Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Δ.Π.Μ.Σ.: Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΝΕΧΩΝ ΚΑΙ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΟΡΟΦΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ

ΒΑΡΔΑΡΟΥ ΜΑΡΙΝΑ

Επιτροπή:

Π. Νομικός, Καθηγητής (επιβλέπων)

Ι. Ζευγώλης, Επικ. Καθηγητής

Π. Γιούτα-Μήτρα, ΕΔΙΠ

Αθήνα, Οκτώβρης 2021

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Παύλο Νομικό και την κ. Παρασκευή Γιούτα-Μήτρα που μου έδωσαν την ευκαιρία να ενασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα υπογείων έργων και για την καθοδήγηση τους κατά την διάρκεια της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη που μου δείχνει όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς των πολυστρωματικών συνεχών και ρωγματωμένων οροφών που συναντώνται στην οροφή υπογείων ανοιγμάτων καθώς και της ενίσχυσής τους.

Παράλληλες γεωλογικές στρώσεις εντοπίζονται συχνά σε διάφορα περιβάλλοντα των υπογείων εκσκαφών. Οι στρώσεις αυτές μπορεί να είναι αποτέλεσμα ιζηματογένεσης, μεταμόρφωσης πετρωμάτων, ακόμη και από διακλάσεις εφελκυσμού. Γεωμετρικά χαρακτηρίζονται από επιπεδότητα και εμμονή, ενώ μηχανικά από την πολύ μικρή έως μηδενική εφελκυστική αντοχή και μικρή διατμητική αντοχή, σε σχέση με αυτή του άρρηκτου πετρώματος, με απόρροια τη δυνατότητα απομάκρυνσης και ολίσθησης μεταξύ αυτών. Τα στρωσιγενή πετρώματα μπορεί να είναι συμπαγή έως πολύ ρωγματωμένα.

Η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των στρωσιγενών οροφών ενός υπόγειου ανοίγματος, στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιείται μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων με τον αριθμητικό κώδικα UDEC 7.0. Είναι γνωστό ότι το αποτέλεσμα της επίλυσης γεωτεχνικών προβλημάτων με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα του καννάβου. Συνεπώς, προκειμένου, τα αποτελέσματα της αριθμητικής λύσης να θεωρηθούν αποδεκτά, πραγματοποιείται αρχικά έλεγχος της επίδρασης του μεγέθους των στοιχείων καννάβου κατά την προσομοίωση αμφίπακτης δοκού ασβεστολίθου υπό ίδιον βάρος, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με την αντίστοιχη αναλυτική λύση.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις για την περίπτωση των άμεσων στρωσιγενών οροφών, εντός ασβεστολιθικού πετρώματος, αβαθών υπογείων ανοιγμάτων, με μόνο επίπεδο αδυναμίας την στρώση, καθώς και όταν τα στρώματα της διακόπτονται από ομάδες κατακόρυφων ασυνεχειών. Η μελέτη διεξάγεται για οροφή ενός έως πέντε στρωμάτων. Για κάθε περίπτωση οροφής, πραγματοποιείται ο έλεγχος των τάσεων πάνω στην στήριξη, σε ένα σημείο πλησίον αυτής και στο μέσον του υπόγειου ανοίγματος. Για την περίπτωση οροφής συνεχών στρωμάτων η μηχανική συμπεριφορά εξετάζεται, επιπλέον, με αναλυτική λύση, ως ένα μέτρο σύγκρισης διαφορετικών συνθηκών. Στην περίπτωση των οροφών στις οποίες η συνέχειά τους διακόπτεται από κατακόρυφες ασυνέχειες ελέγχονται οι ορθές τάσεις που αναπτύσσονται εντός των κατακόρυφων ασυνεχειών, καθώς και το άνοιγμα αυτών. Επιπλέον, πλησίον της στήριξης ελέγχονται οι τάσεις που αναπτύσσονται καθ' ύψος των στρωμάτων οροφής και συγκρίνονται με τις τάσεις των αντίστοιχων συνεχών οροφών.

Για κάθε περίπτωση οροφής, πραγματοποιείται έλεγχος των βυθίσεων στο μέσον του υπόγειου ανοίγματος. Με αυτόν τον τρόπο, μελετάται η επίδραση της παρουσίας των κατακόρυφων ασυνεχειών εντός των συνεχών στρωμάτων.

Τέλος, προσομοιώνεται η ενίσχυση στρωσιγενών συνεχών και πολυρωγματωμένων οροφών του υπόγειου ανοίγματος με προεντεταμένες αγκυρώσεις. Η ενίσχυση αποσκοπεί στην αποφυγή του διαχωρισμού των κατώτερων στρωμάτων και στην αποφυγή ολίσθησης μεταξύ αυτών, εξαναγκάζοντας τα επιμέρους στρώματα να λειτουργήσουν ως ενιαίος συμπαγής φορέας. Για κάθε τύπο ενισχυμένης οροφής, λαμβάνονται οι τιμές των βυθίσεων στο μέσον του υπόγειου ανοίγματος και συγκρίνονται με τις τιμές των αντίστοιχων μη ενισχυμένων οροφών, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της ενίσχυσης των στρωμάτων.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΣΤΡΩΣΙΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ 15
1.1 Στρωσιγενή πετρώματα 16
1.2 Δομές στρωσιγενών πετρωμάτων 17
1.3 Ανυποστήριχτο συνεχές στρώμα 20
1.4 Ευστάθεια εγκάρσια ρωγματωμένης οροφής 22
1.5 Όπλιση ή ενίσχυση στρωμάτων 24
1.6 Αριθμητικός κώδικας μοντελοποίησης UDEC 26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΗΣ ΔΟΚΟΥ ΟΡΟΦΗΣ 27
2.1 Επαλήθευση αποτελεσμάτων προσομοίωσης 28
2.2 Αναλυτική λύση 29
2.2.1 Αποτελέσματα αναλυτικής λύσης 30
2.2.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων υπολογισμού των τάσεων από την αναλυτική λύση 32
2.3 Αποτελέσματα αριθμητικής λύσης δοκού με τον κώδικα Udec 33
2.3.1 Αποτελέσματα αριθμητικής λύσης μέσω κώδικα Udec για x/L=0,1 34
2.3.2 Αποτελέσματα αριθμητικής λύσης μέσω κώδικα Udec για x/L=0,5 36
2.3.3 Αποτελέσματα αριθμητικής λύσης μέσω κώδικα Udec για x/L=0,4 38
2.4 Επιλογή προσομοιώματος διακριτοποίησης 41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΣΤΡΩΣΙΓΕΝΕΙΣ ΟΡΟΦΕΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΥΠΟΓΕΙΟ ΑΝΟΙΓΜΑ 42
3.1 Στρωσιγενείς οροφές γύρω από υπόγειο άνοιγμα 43
3.2 Προσομοίωση μονοστρωματικής οροφής 44
3.2.1 Αποτελέσματα μονοστρωματικής οροφής x/L=0 45
3.2.2 Αποτελέσματα μονοστρωματικής οροφής x/L=0,5 47
3.2.3 Αποτελέσματα μονοστρωματικής οροφής x/L=0,1 48
3.2.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων μονοστρωματικής οροφής 49
3.3 Προσομοίωση διστρωματικής οροφής 50
3.3.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης διστρωματικής οροφής x/L=0 51
3.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης διστρωματικής οροφής x/L=0,5 52
3.3.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης διστρωματικής οροφής x/L=0,1 53
3.3.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων διστρωματικής οροφής 54
3.4 Προσομοίωση οροφής τριών στρωμάτων 55
3.4.1 Αποτελέσματα οροφής τριών στρωμάτων x/L=0 55
3.4.2 Αποτελέσματα οροφής τριών στρωμάτων x/L=0,5 57
3.4.3 Αποτελέσματα οροφής με τρεις στρώσεις x/L=0,1 58

3.4.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων οροφής τριών στρωμάτων 59
3.5 Προσομοίωση οροφής τεσσάρων στρωμάτων 60
3.5.1 Αποτελέσματα οροφής τεσσάρων στρωμάτων x/L=0 61
3.5.2 Αποτελέσματα οροφής τεσσάρων στρωμάτων x/L=0,5 62
3.5.3 Αποτελέσματα οροφής τεσσάρων στρωμάτων x/L=0,1 63
3.5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων οροφής τεσσάρων στρωμάτων 64
3.6 Προσομοίωση οροφής πέντε στρωμάτων 65
3.6.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης οροφής πέντε στρωμάτων x/L=0 65
3.6.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης οροφής πέντε στρωμάτων x/L=0,5 67
3.6.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης οροφής πέντε στρωμάτων x/L=0,1 68
3.6.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων οροφής πέντε στρωμάτων 69
3.7 Αποτελέσματα βυθίσεων οροφών 70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΤΡΩΣΙΓΕΝΕΙΣ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΕΣ ΟΡΟΦΕΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΥΠΟΓΕΙΟ ΑΝΟΙΓΜΑ 74
4.1 Στρωσιγενείς ρωγματωμένες οροφές γύρω από υπόγειο άνοιγμα 75
4.2 Προσομοιώσεις μονοστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες 77
4.2.1 Αποτελέσματα μονοστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,1 78
4.2.2 Αποτελέσματα μονοστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0 80
4.2.3 Αποτελέσματα μονοστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,5 81
4.2.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων μονοστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες 82
4.3 Προσομοιώσεις διστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες 83
4.3.1 Αποτελέσματα διστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,1 84
4.3.2 Αποτελέσματα διστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0 86
4.3.3 Αποτελέσματα διστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,5 87
4.3.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων διστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες 88
4.4 Προσομοιώσεις οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες 89
4.4.1 Αποτελέσματα οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,1 90
4.4.2 Αποτελέσματα οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0 92
4.4.3 Αποτελέσματα οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,5 93
4.4.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες 94
4.5 Προσομοιώσεις οροφής τεσσάρων στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες 95
4.5.1 Αποτελέσματα οροφής τεσσάρων στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,1 96
4.5.2 Αποτελέσματα οροφής τεσσάρων στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0 98
4.5.3 Αποτελέσματα οροφής τεσσάρων στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,5 99
4.5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων οροφής τεσσάρων στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες 100
4.6 Προσομοιώσεις οροφής πέντε στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες 101

4.6.1 Αποτελέσματα οροφής πέντε στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,1 102
4.6.2 Αποτελέσματα οροφής πέντε στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0 104
4.6.3 Αποτελέσματα οροφής πέντε στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,5 105
4.6.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων οροφής πέντε στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες 106
4.7 Σύγκριση βυθίσεων οροφών με ή χωρίς την παρουσία κατακόρυφων ασυνεχειών..... 107
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΟΡΟΦΗΣ ΜΕ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΕΣ ΑΓΚΥΡΩΣΕΙΣ 108
5.1 Ενίσχυση οροφής στρωσιγενών πετρωμάτων 109
5.2 Αποτελέσματα βυθίσεων ενισχυμένων οροφών στρωσιγενών πετρωμάτων..... 114
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... 116
EXTENDED ABSTRACT 119
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 129

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1.1: Φυσικό ομοίωμα της διαδικασίας αστοχίας στρωσιγενούς οροφής (Goodman, 1989)....16

Εικόνα 1.2: Σκαρίφημα διαχωρισμού στρωμάτων οροφής (Νομικός, 2020)....17

Εικόνα 1.3: Σκαρίφημα της διαδικασίας αστοχίας επίπεδης στρωσιγενούς οροφής. Τα βέλη δείχνουν σχηματικά τις διευθύνσεις των μέγιστων κύριων τάσεων που οδηγούνται εκατέρωθεν του ανοίγματος (Σοφιανός, 2018)....18

Εικόνα 1.4: Σκαρίφημα υπόγειας διάνοιξης σε ογκοτεμαχισμένη βραχόμαζα και δημιουργία αψίδας και τοξοειδούς ζώνης στη ρωγματωμένη δοκό της άμεσης οροφής (Sterling, 1977)....19

Εικόνα 1.5: Σκαρίφημα απλής αμφίπακτης δοκού υπό κατανεμημένο φορτίο q και γραφήματα τέμνουσας δύναμης (V) και ροπής (M) κατά μήκος x του ανοίγματος (Σοφιανός, 2018)....20

Εικόνα 1.6: Πλάκα υπόγειας οροφής (Σοφιανός, 2018)....21

Εικόνα 1.7: Ελαστική δοκός στηριζόμενη σε πακτωμένα άκρα (Νομικός, 2020)....21

Εικόνα 1.8: Οπλισμός διαστρωμένου πετρώματος (Σοφιανός, 2018)....24

Εικόνα 1.9: Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομής της τέμνουσας δύναμης κατά μήκος (x) του ανοίγματος και των διατμητικών και εφελκυστικών τάσεων στο άκρο του (Σοφιανός, 2018)....25

Εικόνα 2.1: Προσομοίωση ορθογωνικής δοκού οροφής ασβεστολίθου μεγέθους στοιχειών καννάβου 0,08m στον κώδικα Udec 7.0....29

Εικόνα 2.2: Προσομοίωμα ορθογωνικής δοκού οροφής ασβεστολίθου με αποτύπωση των διαγραμμάτων των ανηγμένων τάσεων καθ' ύψος στα τρία χαρακτηριστικά σημεία της δοκού....32

Εικόνα 3.1: Προσομοίωση μονοστρωματικής οροφής υπόγειου ανοίγματος στον κώδικα Udec 7.0....44

Εικόνα 3.2: Προσομοίωση διστρωματικής οροφής υπόγειου ανοίγματος μέσω του κώδικα Udec 7.0....50

Εικόνα 3.3: Προσομοίωση οροφής τριών στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος μέσω κώδικα Udec 7.0....55

Εικόνα 3.4: Προσομοίωση οροφής τεσσάρων στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κώδικα Udec 7.0....60

Εικόνα 3.5: Προσομοίωση οροφής πέντε στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος μέσω κώδικα Udec 7.0....65

Εικόνα 3.6: Βυθίσεις μονοστρωματικής οροφής μέσω κώδικα Udec 7.0....70

Εικόνα 3.7: Βυθίσεις διστρωματικής οροφής μέσω κώδικα Udec 7.0....70

Εικόνα 3.8: Βυθίσεις οροφής τριών στρωμάτων μέσω κώδικα Udec 7.0....71

Εικόνα 3.9: Βυθίσεις οροφής τεσσάρων στρωμάτων μέσω κώδικα Udec 7.0....71

Εικόνα 3.10: Βυθίσεις οροφής πέντε στρωμάτων μέσω κώδικα Udec 7.0....72

Εικόνα 4.1: Προσομοίωση μονοστρωματικής οροφής υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m μέσω κώδικα Udec 7.0 και αναπαράσταση σημείων ελέγχου....77

Εικόνα 4.2: Προσομοίωση μονοστρωματικής οροφής υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 1m μέσω κώδικα Udec 7.0....77

Εικόνα 4.3: Προσομοίωση μονοστρωματικής οροφής υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 0,5m μέσω κώδικα Udec 7.0....78

Εικόνα 4.4: Προσομοίωση διστρωματικής οροφής υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m μέσω κώδικα Udec 7.0....83

Εικόνα 4.5: Προσομοίωση διστρωματικής οροφής υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 1m μέσω κώδικα Udec....84

Εικόνα 4.6: Προσομοίωση διστρωματικής οροφής υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 0,5m μέσω κώδικα Udec....84

Εικόνα 4.7: Προσομοίωση ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m μέσω κώδικα Udec 7.0....89

Εικόνα 4.8: Προσομοίωση ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 1m μέσω κώδικα Udec 7.0....89

Εικόνα 4.9: Προσομοίωση ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 0,5m μέσω κώδικα Udec 7.0....90

Εικόνα 4.10: Προσομοίωση οροφής τεσσάρων στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m μέσω κώδικα Udec 7.0....95

Εικόνα 4.11: Προσομοίωση οροφής τεσσάρων στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 1m μέσω κώδικα Udec 7.0....95

Εικόνα 4.12: Προσομοίωση οροφής τεσσάρων στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 0,5m μέσω κώδικα Udec 7.0....96

Εικόνα 4.13: Προσομοίωση οροφής πέντε στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m μέσω κώδικα Udec 7.0....101

Εικόνα 4.14: Προσομοίωση οροφής πέντε στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 1m μέσω κώδικα Udec 7.0....101

Εικόνα 4.15: Προσομοίωση οροφής πέντε στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 0,5m μέσω κώδικα Udec 7.0....102

Εικόνα 5.1: Εφαρμογή φορτίων για την ενίσχυση διστωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m μέσω κώδικα Udec....110

Εικόνα 5.2: Βυθίσεις ενισχυμένης διστωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m....110

Εικόνα 5.3: Βυθίσεις οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m, με το φορτίο των 141kN....111

Εικόνα 5.4: Αναπαράσταση ολίσθησης στρωμάτων οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m και ανοίγματος ασυνεχειών με το φορτίο των 141kN....111

Εικόνα 5.5: Βυθίσεις ενισχυμένης οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m....113

Εικόνα 5.6: Κύριες τάσεις ενισχυμένης οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m....114

Πίνακας διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1.1: Εκτίμηση της ευστάθειας εγκάρσια ρωγματωμένης στρωσιγενούς οροφής με ασυνέχειες στο μέσο και στις στηρίξεις (Σοφιανός, 2018)....22

Διάγραμμα 1.2: Εκτίμηση της ευστάθειας πολυρωγματωμένης οροφής (Γιούτα-Μήτρα & Σοφιανός, 2018)....23

Διάγραμμα 2.1: Αποτελέσματα ανηγμένης σ_{xx} για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου και της αναλυτικής λύσης, καθ' ύψος της δοκού οροφής ασβεστολίθου για x/L=0,1....35

Διάγραμμα 2.2: Αποτελέσματα ανηγμένης σ_{yy} για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου και της αναλυτικής λύσης, καθ' ύψος της δοκού οροφής ασβεστολίθου για x/L=0,1....35

Διάγραμμα 2.3: Αποτελέσματα ανηγμένης τ_{xy} για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου και της αναλυτικής λύσης, καθ' ύψος της δοκού οροφής ασβεστολίθου για x/L=0,1....36

Διάγραμμα 2.4: Αποτελέσματα ανηγμένης σ_{xx} για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου και της αναλυτικής λύσης, καθ' ύψος της δοκού οροφής ασβεστολίθου για x/L=0,5....37

Διάγραμμα 2.5: Αποτελέσματα ανηγμένης σ_{yy} για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου και της αναλυτικής λύσης, καθ' ύψος της δοκού οροφής ασβεστολίθου για x/L=0,5....38

Διάγραμμα 2.6: Αποτελέσματα ανηγμένης σ_{xx} για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου και της αναλυτικής λύσης, καθ' ύψος της δοκού οροφής ασβεστολίθου για x/L=0,4....39

Διάγραμμα 2.7: Αποτελέσματα ανηγμένης σ_{yy} για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου και της αναλυτικής λύσης, καθ' ύψος της δοκού οροφής ασβεστολίθου για x/L=0,4....40

Διάγραμμα 2.8: Αποτελέσματα ανηγμένης τ_{xy} για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου και της αναλυτικής λύσης, καθ' ύψος της δοκού οροφής ασβεστολίθου για x/L=0,4....40

Διάγραμμα 3.1: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος μονοστρωματικής οροφής για x/L=0....45

Διάγραμμα 3.2: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος μονοστρωματικής οροφής για x/L=0....46

Διάγραμμα 3.3: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος μονοστρωματικής οροφής για x/L=0....46

Διάγραμμα 3.4: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος μονοστρωματικής οροφής για x/L=0,5....47

Διάγραμμα 3.5: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος μονοστρωματικής οροφής για x/L=0,5....47

Διάγραμμα 3.6: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος μονοστρωματικής οροφής για x/L=0,1....48

Διάγραμμα 3.7: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος μονοστρωματικής οροφής για x/L=0,1....48

Διάγραμμα 3.8: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος μονοστρωματικής οροφής για x/L=0,1....48

Διάγραμμα 3.9: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος διστρωματικής οροφής για x/L=0....51

Διάγραμμα 3.10: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος διστρωματικής οροφής για x/L=0....51

Διάγραμμα 3.11: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος διστρωματικής οροφής για x/L=0....51

Διάγραμμα 3.12: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος διστρωματικής οροφής για x/L=0,5....52

Διάγραμμα 3.13: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος διστρωματικής οροφής για x/L=0,5....52

Διάγραμμα 3.14: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος διστρωματικής οροφής για x/L=0,1....53

Διάγραμμα 3.15: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος διστρωματικής οροφής για x/L=0,1....53

Διάγραμμα 3.16: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος διστρωματικής οροφής για x/L=0,1....53

Διάγραμμα 3.17: Μεταβολή σ_{xx} καθ' όλο το ύψος στρώσεων, οροφής με τρεις στρώσεις για x/L=0....55

Διάγραμμα 3.18: Μεταβολή σ_{yy} καθ' όλο το ύψος στρώσεων, οροφής με τρεις στρώσεις για x/L=0 56
Διάγραμμα 3.19: Μεταβολή τ_{xy} καθ' όλο το ύψος στρώσεων, οροφής με τρεις στρώσεις για x/L=0 56
Διάγραμμα 3.20: Μεταβολή σ_{xx} καθ' όλο το ύψος στρώσεων, οροφής με τρεις στρώσεις για x/L=0,5 57
Διάγραμμα 3.21: Μεταβολή σ_{yy} καθ' όλο το ύψος στρώσεων, οροφής με τρεις στρώσεις για x/L=0,5 57
Διάγραμμα 3.22: Μεταβολή σ_{xx} καθ' όλο το ύψος στρώσεων, οροφής με τρεις στρώσεις για x/L=0,1 58
Διάγραμμα 3.23: Μεταβολή σ_{yy} καθ' όλο το ύψος στρώσεων, οροφής με τρεις στρώσεις για x/L=0,1 58
Διάγραμμα 3.24: Μεταβολή τ_{xy} καθ' όλο το ύψος στρώσεων, οροφής με τρεις στρώσεις για x/L=0,1 59
Διάγραμμα 3.25: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0 61
Διάγραμμα 3.26: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0 61
Διάγραμμα 3.27: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0 61
Διάγραμμα 3.28: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0,5 62
Διάγραμμα 3.29: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0,5 62
Διάγραμμα 3.30: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0,1 63
Διάγραμμα 3.31: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0,1 63
Διάγραμμα 3.32: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0,1 63
Διάγραμμα 3.33: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0 65
Διάγραμμα 3.34: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xy} καθ' ύψος οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0 66
Διάγραμμα 3.35: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0 66
Διάγραμμα 3.36: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0,5 67
Διάγραμμα 3.37: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0,5 67
Διάγραμμα 3.38: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0,1 68
Διάγραμμα 3.39: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0,1 68
Διάγραμμα 3.40: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0,1 69
Διάγραμμα 4.1: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής για x/L=0,1 78
Διάγραμμα 4.2: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής για x/L=0,1 79
Διάγραμμα 4.3: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής για x/L=0,1 79
Διάγραμμα 4.4: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής, πάνω στην στήριξη (x/L=0) 80
Διάγραμμα 4.5: Άνοιγμα ασυνέχειας πάνω στην στήριξη (x/L=0), καθ' ύψος ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής 80
Διάγραμμα 4.6: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής, πάνω στην στήριξη (x/L=0,5) 81
Διάγραμμα 4.7: Άνοιγμα ασυνέχειας στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5) καθ' ύψος ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής 81

Διάγραμμα 4.8: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής για x/L=0,1 84

Διάγραμμα 4.9: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής για x/L=0,1 85

Διάγραμμα 4.10: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής για x/L=0,1 85

Διάγραμμα 4.11: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής, πάνω στην στήριξη (x/L=0) 86

Διάγραμμα 4.12: Άνοιγμα ασυνέχειας πάνω στην στήριξη (x/L=0), καθ' ύψος ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής 86

Διάγραμμα 4.13: : Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής, στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5) 87

Διάγραμμα 4.14: Άνοιγμα ασυνέχειας στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5) καθ' ύψος ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής 87

Διάγραμμα 4.15: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων για x/L=0,1 90

Διάγραμμα 4.16: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων για x/L=0,1 91

Διάγραμμα 4.17: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων για x/L=0,1 91

Διάγραμμα 4.18: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων, πάνω στην στήριξη (x/L=0) 92

Διάγραμμα 4.19: Άνοιγμα ασυνέχειας πάνω στην στήριξη (x/L=0), καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων 92

Διάγραμμα 4.20: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων, πάνω στην στήριξη (x/L=0,5) 93

Διάγραμμα 4.21: Άνοιγμα ασυνέχειας στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5), καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων 93

Διάγραμμα 4.22: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0,1 96

Διάγραμμα 4.23: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0,1 97

Διάγραμμα 4.24: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0,1 97

Διάγραμμα 4.25: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων, πάνω στην στήριξη (x/L=0) 98

Διάγραμμα 4.26: Άνοιγμα ασυνέχειας πάνω στην στήριξη (x/L=0), καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων 98

Διάγραμμα 4.27: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων, πάνω στην στήριξη (x/L=0,5) 99

Διάγραμμα 4.28: Άνοιγμα ασυνέχειας στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5), καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων 99

Διάγραμμα 4.29: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0,1 102

Διάγραμμα 4.30: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0,1 103

Διάγραμμα 4.31: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0,1 103

Διάγραμμα 4.32: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων, πάνω στην στήριξη (x/L=0) 104

Διάγραμμα 4.33: Άνοιγμα ασυνέχειας πάνω στην στήριξη (x/L=0), καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων 104

Διάγραμμα 4.34: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων, στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5) 105

Διάγραμμα 4.35: Άνοιγμα ασυνέχειας στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5), καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων 105

Διάγραμμα 5.1: Αποτύπωση καμπυλών ολίσθησης ενισχυμένων οροφών τριών έως πέντε στρωμάτων στο διάγραμμα εκτίμησης της ευστάθειας πολυρωγματωμένης οροφής (Γιούτα-Μήτρα & Σοφιανός, 2018) 112

Πίνακες

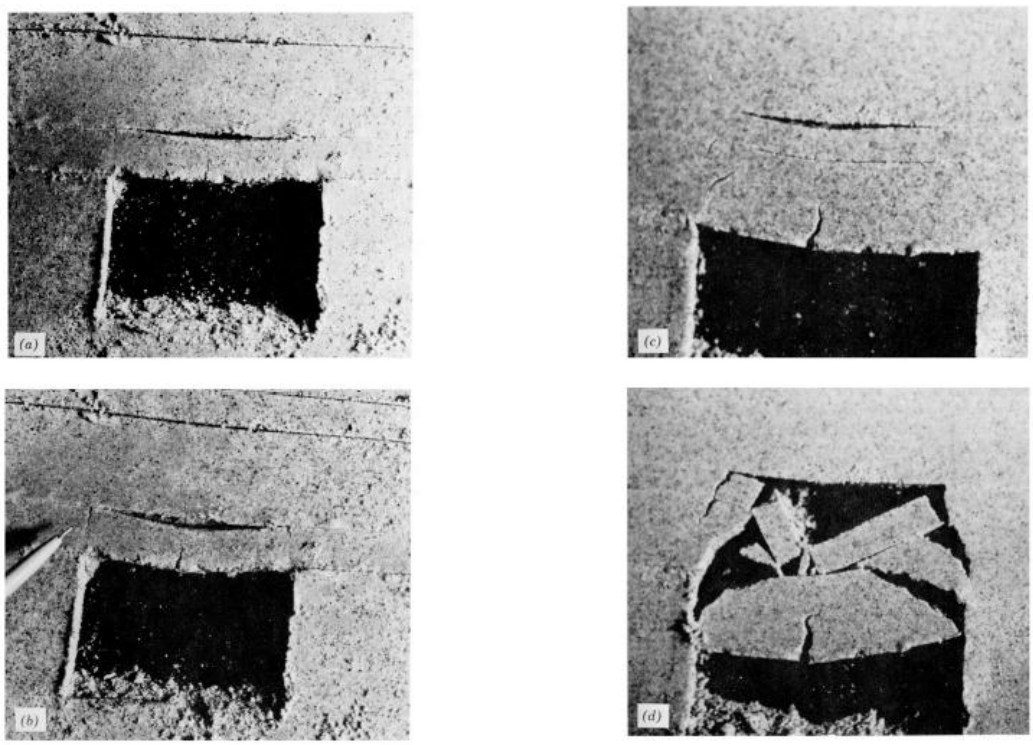
Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά ορθογωνικής δοκού οροφής υπό επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση.....28
Πίνακας 2.2: Τάσεις καθ' ύψος της δοκού πλησίον του άκρου (x/L=0,1).....31
Πίνακας 2.3: Τάσεις καθ' ύψος της δοκού στο κέντρο (x/L=0,5).....31
Πίνακας 2.4: Τάσεις καθ' ύψος της δοκού πλησίον του κέντρου (x/L=0,4).....31
Πίνακας 2.5: Αποτελέσματα τάσεων για x/L=0,1 (Udec).....34
Πίνακας 2.6: Διαφορές τιμών τάσεων για x/L=0,1.....34
Πίνακας 2.7: Αποτελέσματα τάσεων για x/L=0,5 (Udec).....36
Πίνακας 2.8: Διαφορές τιμών τάσεων για x/L=0,5.....37
Πίνακας 2.9: Αποτελέσματα τάσεων για x/L=0,4 (Udec).....38
Πίνακας 2.10: Διαφορές τιμών τάσεων για x/L=0,4.....39
Πίνακας 2.11: Αποτελέσματα βυθίσεων.....41
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά ασβεστολιθικού πετρώματος.....43
Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά των στρώσεων.....43
Πίνακας 3.3: Βυθίσεις στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος.....72
Πίνακας 3.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων βυθίσεων αναλυτικής λύσης συμπαγούς αμφίπακτης δοκού και αριθμητικής λύσης για κάθε τύπο οροφής.....73
Πίνακας 4.1: Μεγέθη για την εκτίμηση της δυσκαμψίας των κατακόρυφων ασυνεχειών.....75
Πίνακας 4.2: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής (x/L=0).....82
Πίνακας 4.3: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής (x/L=0,5).....82
Πίνακας 4.4: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής (x/L=0).....88
Πίνακας 4.5: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής (x/L=0,5).....88
Πίνακας 4.6: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων (x/L=0).....94
Πίνακας 4.7: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων (x/L=0,5).....94
Πίνακας 4.8: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων (x/L=0).....100
Πίνακας 4.9: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων (x/L=0,5).....100
Πίνακας 4.10: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων (x/L=0).....106
Πίνακας 4.11: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων (x/L=0,5).....106
Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα βυθίσεων για όλους τους τύπους οροφής.....107
Πίνακας 5.1: Δεδομένα μέγιστης απαιτούμενης προέντασης.....109
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα επιβαλλόμενης δύναμης για κάθε τύπο οροφής.....113
Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα βυθίσεων των οροφών με κατακόρυφες ασυνέχειες, με και χωρίς ενίσχυση.....115
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα βυθίσεων των συνεχών οροφών, με και χωρίς ενίσχυση.....115

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1
ΣΤΡΩΣΙΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

1.1 Στρωσιγενή πετρώματα

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς των στρωσιγενών επίπεδων οροφών που συναντώνται γύρω από υπόγεια ανοίγματα.

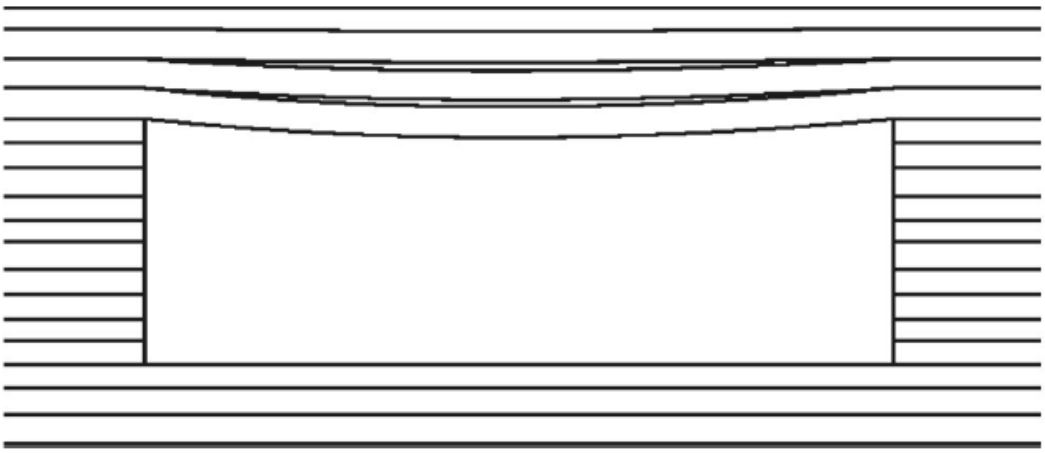
Παράλληλες γεωλογικές στρώσεις με δεσπόζουσα σημασία στη συμπεριφορά του πετρώματος, εντοπίζονται συχνά σε διάφορα περιβάλλοντα των υπογείων εκσκαφών. Οι στρώσεις αυτές μπορεί να οφείλονται σε ιζηματογενείς αποθέσεις, σε διακλάσεις εφελκυσμού, σε υφές που έχουν δημιουργηθεί από διαδικασίες μεταμόρφωσης, ακόμη και από ροές λάβας. Τέτοιες ασυνέχειες χαρακτηρίζονται γεωμετρικά από την επιπεδότητα και την εμμονή τους, ενώ μηχανικά από την πολύ μικρή έως μηδενική εφελκυστική αντοχή και μικρή διατμητική αντοχή σε σχέση με αυτή του άρρηκτου πετρώματος, με απόρροια τη δυνατότητα απομάκρυνσης και ολίσθησης μεταξύ αυτών. Στην εικόνα 1.1 παρουσιάζεται ένα φυσικό ομοίωμα της διαδικασίας αστοχίας μιας στρωσιγενούς οροφής γύρω από υπόγειο άνοιγμα. Αυτού του είδους δομές πετρωμάτων αποτελούν βασικό παράγοντα, που ελέγχει την ασφάλεια των οροφών και των παρειών σε υπόγεια έργα, σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις (π.χ. άνθρακα) ή σε σήραγγες και υπόγειους θαλάμους.



Εικόνα 1.1: Φυσικό ομοίωμα της διαδικασίας αστοχίας στρωσιγενούς οροφής (Goodman, 1989)

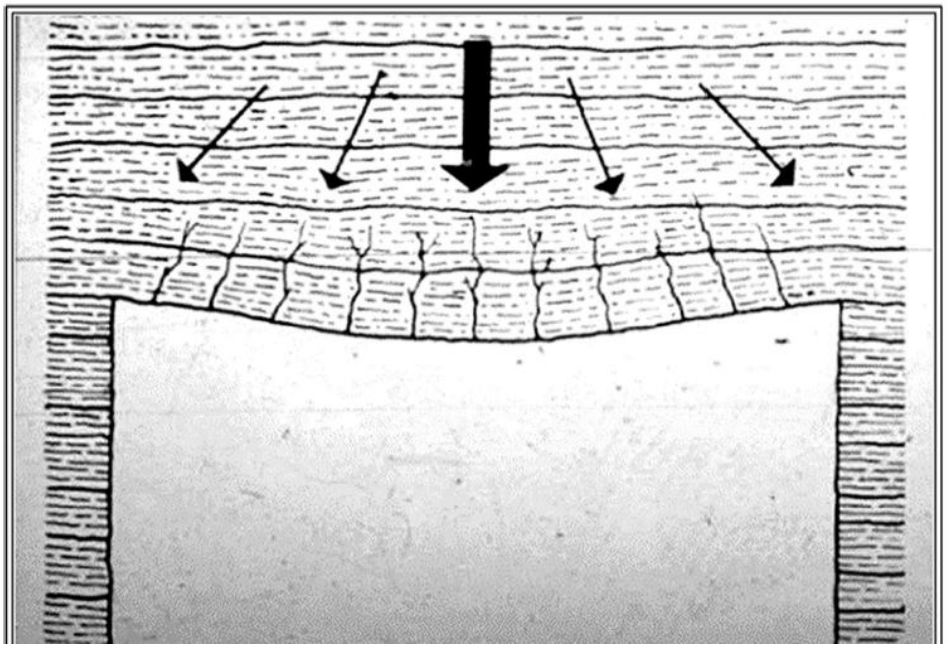
1.2 Δομές στρωσιγενών πετρωμάτων

Τα στρωσιγενή πετρώματα είναι δυνατόν να είναι από συμπαγή έως πολυρωγματωμένα. Στην περίπτωση των επίπεδων οροφών, ο έλεγχος ευστάθειας ενός υπόγειου ανοίγματος περιλαμβάνει αρχικά τον έλεγχο της υπέρβασης της αντοχής του πετρώματος ως συνεχούς μέσου. Τα κατώτερα στρώματα θεωρείται ότι υφίστανται διαχωρισμό μεταξύ αυτών και συνεπώς, η ευστάθεια της άμεσης οροφής εξαρτάται από την ικανότητα του μεμονωμένου στρώματος να φέρει το ίδιον βάρος του, χωρίς να ρωγματώνεται. Πλησίον των άκρων της οροφής, η κατακόρυφη θλιπτική τάση κρατά σε επαφή τα στρώματα, στην διεπιφάνεια των οποίων η διατμητική αντοχή καθορίζεται από το μέγεθος της θλιπτικής τάσης. Λόγω κάμψης, το εκάστοτε στρώμα στην κάτω ίνα του στην στήριξη τείνει να θλίβεται και επομένως να βραχύνεται, ενώ στην άνω ίνα τείνει να εφελκύεται και επομένως να επιμηκύνεται. Άρα, στις διεπιφάνειες των στρωμάτων η αποφυγή ολίσθησης εξαρτάται από την ανάπτυξη της διατμητικής τάσης (Brady & Brown, 2006). Η ανάπτυξη της ολίσθησης επιτρέπει τη στροφή των τάσεων σε μορφή θόλου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, κάθε επόμενο προς τα πάνω στρώμα έχει μικρότερο στατικό άνοιγμα από το προηγούμενο, που σημαίνει μικρότερο βέλος κάμψης και διαχωρισμό των στρωμάτων (Εικόνα 1.2), με απότοκο την δημιουργία ζώνης χαλάρωσης, η έκταση της οποίας καθορίζεται από τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά και από την τοποθετημένη στήριξη (Σοφιανός, 2016).



Εικόνα 1.2: Σκαρίφημα διαχωρισμού στρωμάτων οροφής (Νομικός, 2020)

Σε σκληρά, συμπαγή, ψαθυρά πετρώματα τα οποία συμπεριφέρονται ως ελαστικά υλικά, πριν από την θραύση τους, τα οποία κατά την διάνοιξη ενός υπόγειου θαλάμου, δεν παρουσιάζουν παραμένουσες παραμορφώσεις, έχει διαπιστωθεί ότι μετά την εκσκαφή παρατηρούνται αποφλοιώσεις και διαρρήξεις. Μετά τη θραύση τους, η παραμένουσα αντοχή τους είναι πολύ μικρότερη της κορυφαίας, με αποτέλεσμα την εκτόνωση σημαντικής ελαστικής ενέργειας υπό μορφή μικροδονήσεων και ενίοτε εκρήξεων. Αυτό συμβαίνει λόγω των τάσεων οι οποίες παρακάμπτουν το άνοιγμα, με απόρροια τη δημιουργία ισχυρών θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων περιμετρικά της εκσκαφής. Οι θλιπτικές τάσεις προκαλούν αποφλοιώσεις, εσωτερική θραύση του πετρώματος, ολίσθηση και λυγισμό των στρωμάτων, ενώ οι εφελκυστικές ρωγματώσεις και ζώνη χαλάρωσης πάνω από την οροφή (Εικόνα 1.3).

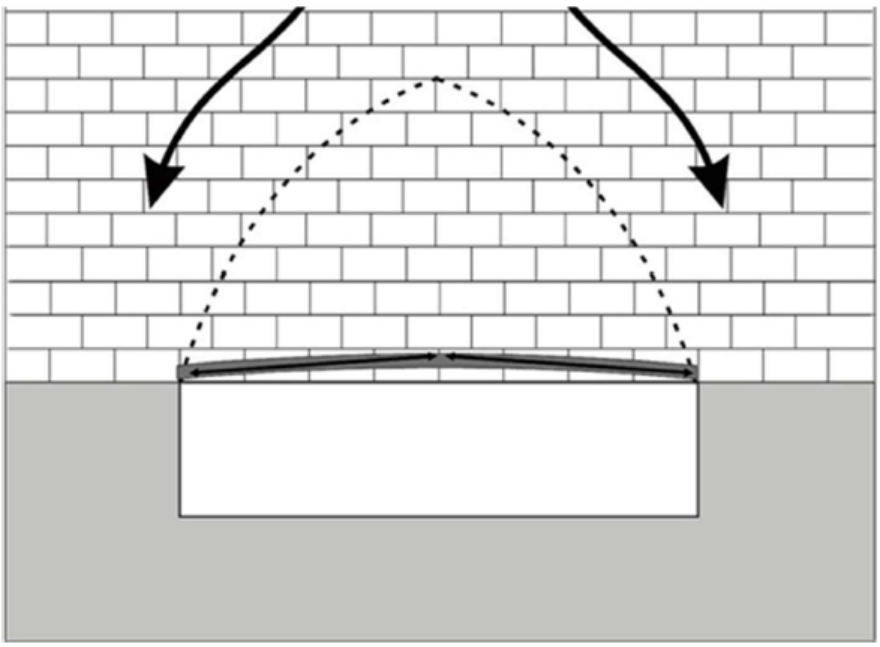


Εικόνα 1.3: Σκαρίφημα της διαδικασίας αστοχίας επίπεδης στρωσιγενούς οροφής. Τα βέλη δείχνουν σχηματικά τις διευθύνσεις των μέγιστων κύριων τάσεων που οδηγούνται εκατέρωθεν του ανοίγματος (Σοφιανός, 2018)

Σε υπόγεια ορυχεία εντός σκληρών πετρωμάτων τυγχάνει ή και επιδιώκεται, οι οροφές και τα δάπεδα των εκσκαφών να ακολουθούν γενικά τη δομή του πετρώματος, και επομένως ταυτίζονται με τα επίπεδα στρώσης. Σε τέτοιες οροφές, όπως πρώτος παρατήρησε ο Fayol (1885), οι ορθές εφελκυστικές τάσεις στις διεπιφάνειες των στρωμάτων προκαλούν διαχωρισμό τους στο μέσον της άμεσης οροφής. Κατά την κάμψη των κατώτερων στρωμάτων της οροφής, αυτά μεταφέρουν ως πλάκα στα στηρίγματα το ίδιο τους βάρος, χωρίς να συνεργάζονται με τα υπερκείμενά τους στρώματα. Εφόσον κατά την κάμψη τους

αδυνατούν να φέρουν το ίδιον βάρος τους, ρωγματώνονται εγκάρσια στα στρώματα σε διαδοχικές φάσεις και δύνανται να καταλήγουν συχνά στη διαμόρφωση θολωτής οροφής. Γι' αυτό, στα τεχνικά έργα, αλλά και γενικότερα όπου πρακτικά δεν είναι εφικτή ή επιθυμητή η διαμόρφωση επίπεδης οροφής, αυτή διαμορφώνεται σε θόλο, ο οποίος πλεονεκτεί στη δυνατότητα ομαλής διάχυσης των τάσεων εκατέρωθεν του ανοίγματος.

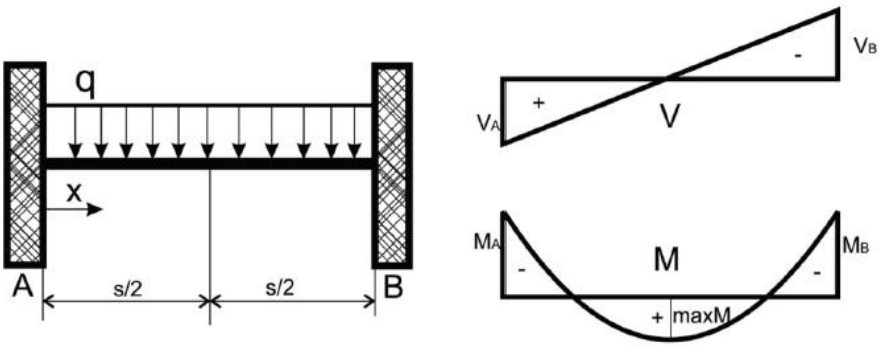
Το περιβάλλον πέτρωμα γύρω από ένα υπόγειο άνοιγμα μπορεί να χαρακτηρίζεται από στρωσιγενή διακλασμένη δομή. Συνεπώς, κάθετες ή μη ομάδες ασυνεχειών που διακόπτουν τα στρώματα, προϋπάρχουν πριν την διαδικασία της εκσκαφής. Εξίσου, στην περίπτωση αυτή, μετά την διάνοιξη η επίπεδη οροφή διαμορφώνεται σε θόλο. Στην εικόνα 1.4 παρουσιάζεται το σκαρίφημα υπόγειας διάνοιξης σε ογκοτεμαχισμένη βραχόμαζα με κανονική και επαναλαμβανόμενη δομή των ασυνεχειών της. Αναπαριστάται η διαμόρφωση αψίδας μεταφοράς του βάρους των υπερκειμένων στις εκατέρωθεν παρειές της εκσκαφής και η τοξοειδής ζώνη μεταφοράς δυνάμεων στο εσωτερικό της ρωγματωμένης δοκού της άμεσης οροφής.



Εικόνα 1.4: Σκαρίφημα υπόγειας διάνοιξης σε ογκοτεμαχισμένη βραχόμαζα και δημιουργία αψίδας και τοξοειδούς ζώνης στη ρωγματωμένη δοκό της άμεσης οροφής (Sterling, 1977)

1.3 Ανυποστήριχτο συνεχές στρώμα

Η αντοχή των επίπεδων οροφών σε κάμψη, καθορίζεται από την εφελκυστική αντοχή αυτών. Η ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς ενός διαχωρισμένου στρώματος επιμήκους άμεσης οροφής υπόγειου ανοίγματος, μπορεί να βασισθεί στη θεωρία απλών δοκών πακτωμένων στα εκατέρωθεν ερείσματα (Εικόνα 1.5).



Εικόνα 1.5: Σκαρίφημα απλής αμφίπακτης δοκού υπό κατανεμημένο φορτίο q και γραφήματα τέμνουσας δύναμης (V) και ροπής (M) κατά μήκος x του ανοίγματος (Σοφιανός, 2018)

Οι σχέσεις που δίνουν την τέμνουσα δύναμη V και την ροπή M είναι (Σοφιανός, 2018):

$$V_A = -V_B = \frac{q*s}{2}, M_A = M_B = -\frac{q*s^2}{2}, \ \max M = \frac{q*s^2}{24}$$

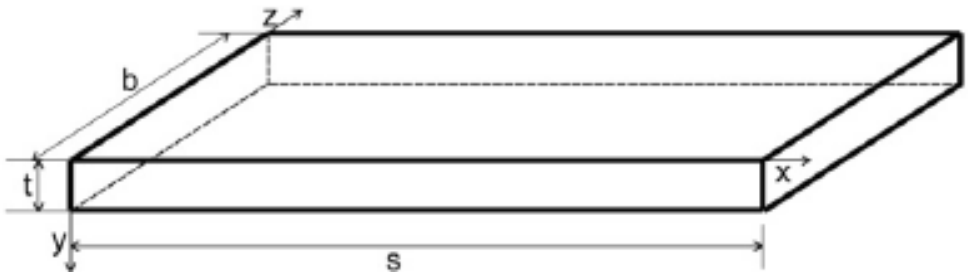
Ο λυγισμός των στρωμάτων είναι δυνατόν να αγνοηθεί, εξαιτίας της μικρής οριζόντιας συνιστώσας της τάσης σ_h. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση όπου: $\sigma_h \ll \frac{\pi^2*E*t}{60*s^2}$.

Στην εν προκειμένω περίπτωση, η αξονική τάση σ_{max} και τροπή (ανηγμένη παραμόρφωση) ε_{amax} στην ακραία ίνα στην πλάκα υπόγειας οροφής (Εικόνα 1.6) και το ανηγμένο βέλος κάμψης δ_{nmid} στον μέσον του ανοίγματος δίνονται από τις σχέσεις (Σοφιανός, 2018):

$$\sigma_{\alpha max} = \frac{M_A}{W_A} = \frac{\gamma*t*s^2/12}{t^2/6} = \frac{\gamma*s^2}{2*t}, \varepsilon_{\alpha max} = \frac{\sigma_{\alpha max}}{E} = \frac{Q_n*s_n}{E}$$

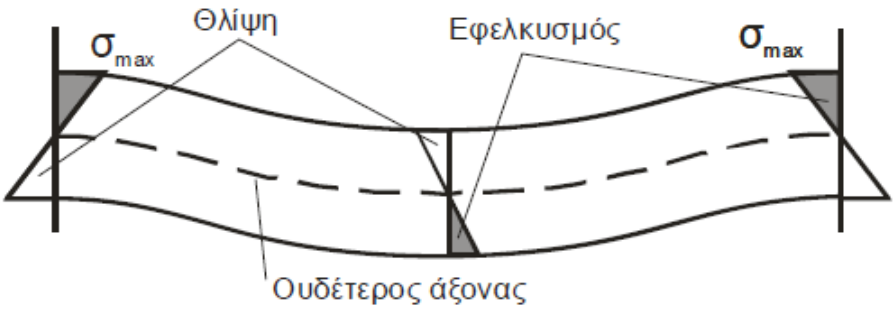
$$\delta_{mid} = \frac{q*s^4}{384*E*J} = \frac{q*s^4}{384*E*t^3} = \frac{\gamma*t*s^4}{384*E*t^3}, \delta_{nmid} = \frac{\delta_{mid}}{t} = \frac{Q_n*s_n{}^3}{32}$$

Όταν $q = \gamma * t$, $Q_n = \frac{\gamma*s}{E}$, $s_n = \frac{s}{t}$, όπου γ: Μοναδιαίο βάρος πετρώματος, δ_{mid}: Βέλος κάμψης στο μέσον ανοίγματος, E: Μέτρο ελαστικότητας, s: Άνοιγμα υπόγειας οροφής, t: Πάχος στρώματος, b=1: Μοναδιαίο πλάτος στρώματος οροφής, M_a: Ροπή στη στήριξη, W_a: Ροπή αντιστάσεως στη στήριξη



Εικόνα 1.6: Πλάκα υπόγειας οροφής (Σοφιανός, 2018)

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις, είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί έλεγχος της μέγιστης εφελκυστικής τροπής ή τάσης, αν ξεπερνιέται η αντίστοιχη ικανότητα ανάληψης της, καθώς και αν το βέλος κάμψης είναι μικρό. Στην εικόνα 1.7 υποδεικνύονται η περιοχές που θλίβονται και εφελκύονται σε μια ελαστική δοκό με πακτωμένα άκρα.



Εικόνα 1.7: Ελαστική δοκός στηριζόμενη σε πακτωμένα άκρα (Νομικός, 2020)

Όταν το όριο εφελκυσμού δεν ξεπερνιέται, η οροφή χαρακτηρίζεται από ευστάθεια και δεν ρωγματώνεται, ενώ σε αντίθετη περίπτωση, η ρωγμάτωση της οροφής μπορεί να αποφευχθεί από εξωτερική ή εσωτερική υποστήριξη με ανάρτηση ή όπλιση της οροφής. Η εξωτερική υποστήριξη δημιουργεί προσκόμματα στη διέλευση και αυτό την καθιστά απαγορευτική, σε αντίθεση με την εσωτερική που πλεονεκτεί λειτουργικά, αλλά συνήθως και στατικά.

1.4 Ευστάθεια εγκάρσια ρωγματωμένης οροφής

Οι ρωγματωμένες οροφές παρουσιάζουν τρεις μορφές αστοχίας. Αυτές είναι η καμπτική θλίψη, ο λυγισμός και η ολίσθηση σε διακλάσεις στα άκρα του ανοίγματος. Η κατάσταση μιας οροφής χαρακτηρίζεται από την λυγηρότητα s_n και την φόρτιση της, που μπορεί να αναπαρασταθεί από τον αδιάστατο συντελεστή φόρτισης Q_n. Μεγάλες τιμές των μεγεθών αυτών, σημαίνει δυσμενέστερες συνθήκες ευστάθειας.

Η λυγηρότητα υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση:

$$s_n = \frac{s}{t}$$

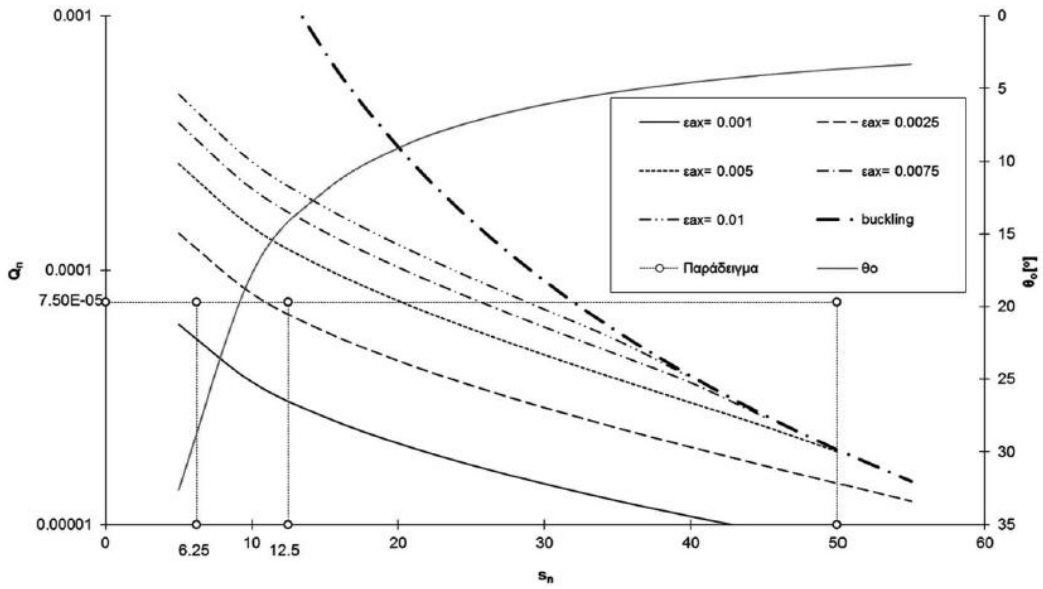
Όπου s: άνοιγμα υπόγειας οροφής και t: πάχος οροφής

Η φόρτιση του φορέα υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση:

$$Q_n = \frac{\gamma * s}{E}$$

Όπου γ: Μοναδιαίο βάρος πετρώματος και E: Μέτρο ελαστικότητας πετρώματος

Με αυτά τα δύο μεγέθη είναι δυνατόν να διεξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την ευστάθεια της οροφής, με βάση το ακόλουθο διάγραμμα.



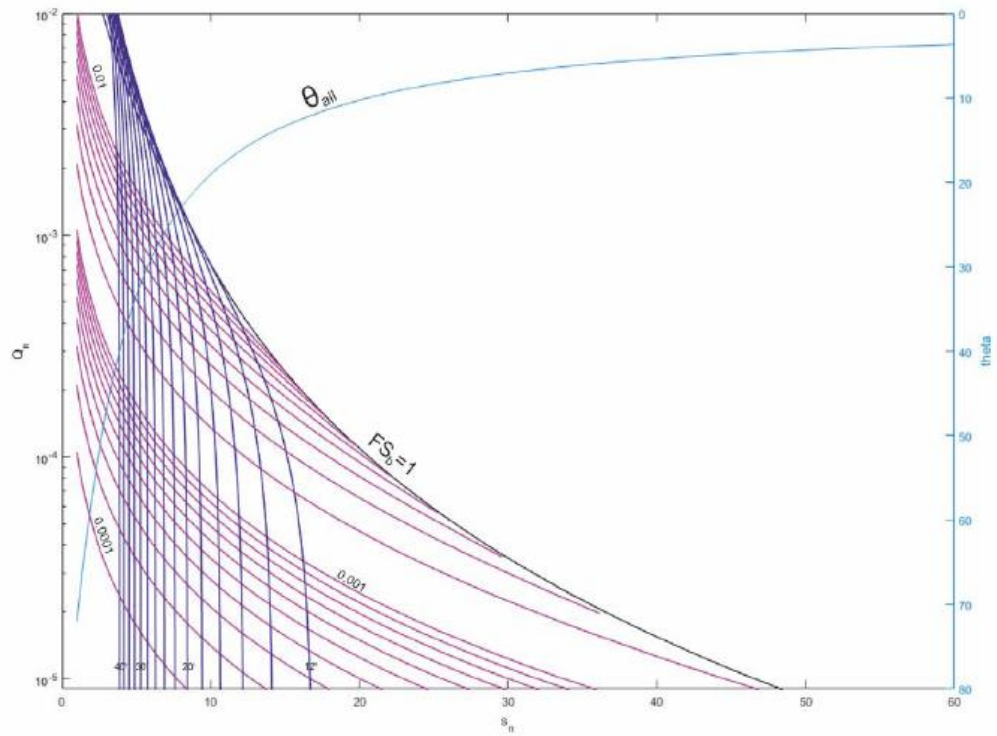
Διάγραμμα 1.1: Εκτίμηση της ευστάθειας εγκάρσια ρωγματωμένης στρωσιγενούς οροφής με ασυνέχειες στο μέσο και στις στηρίξεις (Σοφιανός, 2018)

Η ευστάθεια έναντι αστοχίας σε θλίψη εξασφαλίζεται αν η κατάσταση βρίσκεται κάτω από την καμπύλη επιτρεπόμενης παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα, όταν η τροπή που προκύπτει από τις συντεταγμένες (s_n,Q_n), είναι μικρότερη από την ικανότητα του πετρώματος, οροφή είναι ευσταθής ως προς θλιπτική αστοχία σε κάμψη.

Στο διάγραμμα υπάρχει η καμπύλη λυγισμού, όπου διαχωρίζει την περιοχή σε ευσταθή και ασταθή. Κάτω από την καμπύλη λυγισμού η περιοχή κρίνεται ευσταθής έναντι λυγισμού.

Στο διάγραμμα υπάρχει η καμπύλη θ_o, η οποία έχει σχεδιαστεί ως συνάρτηση της λυγηρότητας, με την οποία είναι δυνατόν να εκτιμηθεί κατά πόσον η υπάρχουσα γωνία τριβής φ_j, είναι αρκετή, ώστε να εξασφαλιστεί η ευστάθεια έναντι αστοχίας σε ολίσθηση στις ασυνέχειες στα άκρα του ανοίγματος. Πιο συγκεκριμένα, η ευστάθεια εξασφαλίζεται όταν η s_n βρίσκεται δεξιά από την επιτρεπόμενη λυγηρότητα που δίνεται από την καμπύλη ολίσθησης για δεδομένη επιτρεπόμενη γωνία τριβής θ_o.

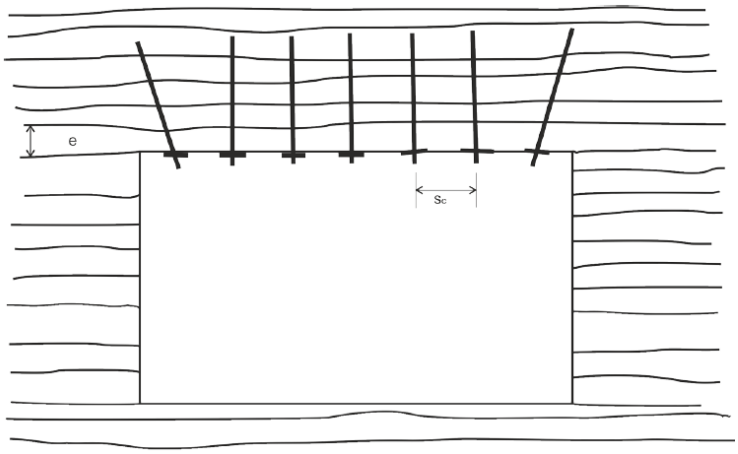
Παρακάτω, παρουσιάζεται το διάγραμμα που αφορά την ευστάθεια των πολυρωγματωμένων οροφών. Η καμπύλη FS_b=1 είναι η καμπύλη του λυγισμού, όπου ο συντελεστής ασφάλειας ισούται με μονάδα. Πάνω από την καμπύλη, αντίστοιχα, η περιοχή κρίνεται ασταθής έναντι λυγισμού.



Διάγραμμα 1.2: Εκτίμηση της ευστάθειας πολυρωγματωμένης οροφής (Γιούτα-Μήτρα & Σοφιανός, 2018)

1.5 Όπλιση ή ενίσχυση στρωμάτων

Η όπλιση ή ενίσχυση στρωμάτων συμβάλλει στην αποφυγή του διαχωρισμού των κατώτερων στρωμάτων και στην αποφυγή ολίσθησης μεταξύ αυτών, λόγω υπέρβασης της διατμητικής αντοχής στις διεπιφάνειες, εξαναγκάζοντας τα επιμέρους στρώματα να λειτουργήσουν ως ενιαίος συμπαγής φορέας. Στην εικόνα 1.8 παρουσιάζεται ένα διαστρωμένο πέτρωμα οροφής οπλισμένο, που αποσκοπεί στη μείωση των τάσεων ή τροπών.

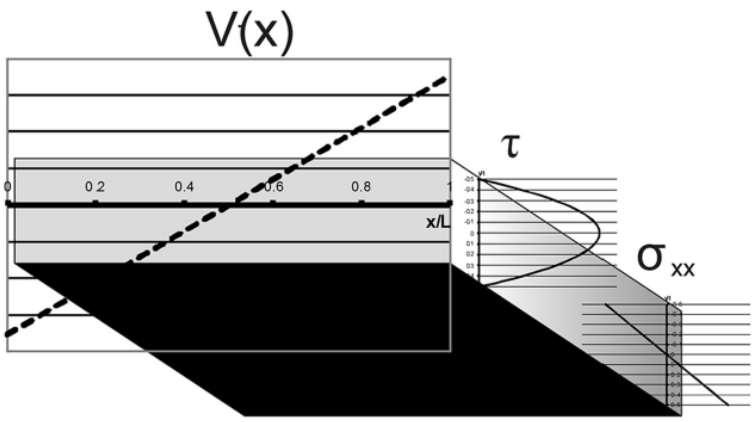


Εικόνα 1.8: Οπλισμός διαστρωμένου πετρώματος (Σοφιανός, 2018)

Για την αποφυγή του διαχωρισμού των στρωμάτων απαιτείται η δημιουργία κοινού βέλους κάμψης, ενώ για την αποφυγή της ολίσθησης μεταξύ αυτών, προϋπόθεση αποτελεί η επαρκής διατμητική αντοχή, σε σχέση με τη διατμητική τάση, στις διεπιφάνειες των στρωμάτων. Η τέμνουσα δύναμη V(x) σε εγκάρσια τομή του φορέα, στη θέση x, είναι το ολοκλήρωμα των διατμητικών τάσεων στη διατομή. Η κατανομή αυτών των διατμητικών τάσεων είναι παραβολική (Εικόνα 1.9) και η μέγιστη τιμή τους τ_{max} είναι ίση με 1.5 φορά τη μέση τάση τ_{mean}. Από τη συμμετρία του τανυστή των τάσεων, είναι γνωστό ότι η τιμή της διατμητικής συνιστώσας της τάσης σε ένα σημείο, είναι ίση σε κάθετα μεταξύ τους επίπεδα. Άρα, η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια μεταξύ των στρωμάτων δύναται να υπολογιστεί από την τέμνουσα δύναμη στη διατομή του αποκολλημένου από τα ανώτερα στρώματα συμπαγή φορέα, από τη σχέση (Σοφιανός, 2018):

$$V(x) = \gamma * t_s * \left(\frac{s}{2} - x\right)$$

$$t_{max} = \frac{3}{2} * t_{mean} \rightarrow t_{max} = \frac{3}{2} * \frac{V(x)}{t_s} = \frac{3}{2}\,\gamma * \left(\frac{s}{2} - x\right)$$



Εικόνα 1.9: Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομής της τέμνουσας δύναμης κατά μήκος (x) του ανοίγματος και των διατμητικών και εφελκυστικών τάσεων στο άκρο του (Σοφιανός, 2018)

Η δημιουργία ή επαύξηση της διατμητικής αντοχής των διεπιφανειών των στρωμάτων μπορεί να επιτευχθεί με την προένταση της ήλωσης των στρωμάτων. Για συνοχή c_j και γωνία τριβής φ_j, σύμφωνα με το κριτήριο Mohr-Coulomb επιτυγχάνεται ικανότητα ανάληψης διατμητικής τάσης (Σοφιανός, 2018):

$$\tau_c = p_b * \tan\varphi_j + c_j$$

Η ενιαία λειτουργία του φορέα απαιτεί η διατμητική αντοχή (ικανότητα) να είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη από τη στατική διατμητική τάση, δηλαδή:

$$p_b * \tan\varphi_j + c_j \geq \frac{3}{2} * \gamma * (\frac{s}{2} - x) \rightarrow p_b(x) \geq \frac{\frac{3}{2} * \gamma * \left(\frac{s}{2} - x\right) - c_j}{\tan\varphi_j}$$

Για x=0 και c_j=0, προκύπτει η μέγιστη τιμή (Goodman, 1980) της απαιτούμενης προέντασης:

$$p_{b,max}(x = 0) \geq \frac{3}{4} * \frac{\gamma * s}{\tan\varphi_j}$$

Η πίεση $P_{b,max}$ στο μέσον, όπου η διατμητική τάση είναι μικρή, θα πρέπει να επαρκεί για την αποτροπή του διαχωρισμού των κατώτερων στρωμάτων λόγω του ιδίου βάρους τους. Άρα, η ασκούμενη πίεση θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη πίεση μερικής ανάρτησης, που όμως για παρόμοιου πάχους στρώματα είναι μηδέν. Όμως, δεδομένης της διαφορετικής καμπτικής καταπόνησης των στρωμάτων στο μέσον του ανοίγματος, συνιστάται ο κάνναβος και η προένταση των ήλων να διατηρούνται ίδιοι κατά το πλάτος του.

1.6 Αριθμητικός κώδικας μοντελοποίησης UDEC

Η μελέτη της συμπεριφοράς των στρωσιγενών οροφών ενός υπόγειου ανοίγματος μπορεί να επιτευχθεί με χρήση κατάλληλων αριθμητικών προσομοιωμάτων και επίλυση αυτών σε υπολογιστή. Στην παρούσα διπλωματική εξετάζεται η περίπτωση των άμεσων στρωσιγενών οροφών, αβαθών υπογείων ανοιγμάτων, με μόνο επίπεδο αδυναμίας την στρωσιγένεια, καθώς και όταν εμπεριέχονται σε αυτές διακλάσεις εγκάρσια στις στρώσεις. Οι προσομοιώσεις των εν λόγο περιπτώσεων πραγματοποιούνται με τον αριθμητικό κώδικα UDEC 7.0.

Το UDEC (Universal Distinct Element Code) είναι ένας διδιάστατος αριθμητικός κώδικας μοντελοποίησης που βασίζεται στη μέθοδο διακριτών στοιχείων και χρησιμοποιείται για προηγμένη αριθμητική ανάλυση γεωτεχνικών έργων σε πετρώματα και της δομικής υποστήριξης τους ή ενίσχυσης τους. Το UDEC προσομοιώνει την απόκριση ασυνεχούς μέσου (όπως η ασυνεχής βραχόμαζα) που υπόκειται σε στατική ή σε δυναμική φόρτιση.

Το ασυνεχές μέσο αντιπροσωπεύεται ως μία συνένωση διακριτών μπλοκ, ενώ οι ασυνέχειες αντιμετωπίζονται ως οριακές συνθήκες μεταξύ αυτών. Μπορούν να συμβούν μεγάλες μετατοπίσεις κατά μήκος μίας ασυνέχειας και περιστροφές μπλοκ.

Τα μοντέλα μπορεί να περιέχουν άκαμπτα και παραμορφώσιμα μπλοκ. Τα παραμορφώσιμα μπλοκ υποδιαιρούνται σε ένα πλέγμα ζωνών πεπερασμένων διαφορών, όπου κάθε ζώνη αποκρίνεται σύμφωνα με έναν προκαθορισμένο γραμμικό ή μη νόμο τάσης – τροπής. Η σχετική κίνηση των ασυνεχειών διέπεται επίσης από γραμμικές ή μη σχέσεις δύναμης - μετατόπισης για μετακινήσεις σε ορθές και σε διατμητικές κατευθύνσεις.

Το UDEC έχει πολλά ενσωματωμένα μοντέλα συμπεριφοράς υλικών για άρρηκτα μπλοκ και για τις ασυνέχειες, που επιτρέπουν την προσομοίωση σε ασυνεχείς βραχόμαζες. Ο κώδικας αυτός κρίνεται ικανός για την αναπαράσταση μεγάλων μετακινήσεων και παραμορφώσεων ενός συστήματος μπλοκ και μπορεί να μοντελοποιήσει ακόμη και πολύπλοκες συμπεριφορές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΗΣ ΔΟΚΟΥ ΟΡΟΦΗΣ

2.1 Επαλήθευση αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται με την βοήθεια του κώδικα UDEC 7.0, η αρχή λειτουργίας του οποίου βασίζεται στη μέθοδο διακριτών στοιχείων.

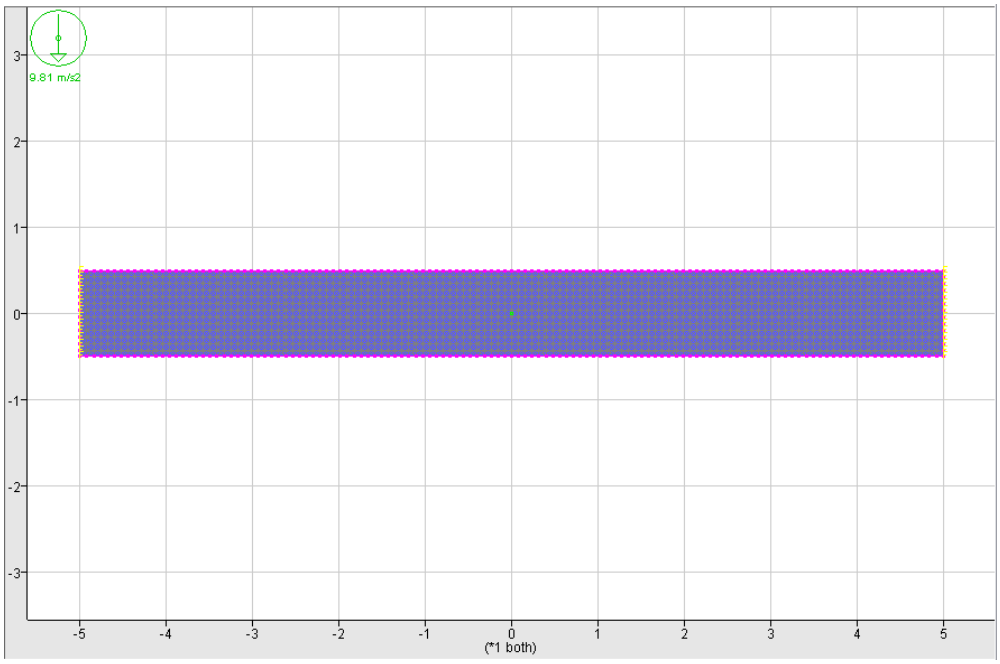
Προκειμένου, τα αποτελέσματα που θα παραχθούν, να θεωρηθούν αποδεκτά, είναι σημαντικό να λάβει χώρα ο έλεγχος της επίδρασης του μέγεθος των στοιχείων καννάβου των προσομοιώσεων, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με την αναλυτική λύση αμφίπακτης δοκού ορθογωνικής διατομής υπό ίδιον βάρος.

Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων, προσομοιώνεται αμφίπακτη δοκός ασβεστολίθου, η οποία πακτώνεται στα άκρα της και θεωρείται ότι η μόνη δύναμη που δέχεται είναι το ίδιον βάρος της. Η δοκός αυτή, αντιπροσωπεύει την οροφή ενός υπόγειου ανοίγματος. Τα χαρακτηριστικά της ορθογωνικής δοκού παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά ορθογωνικής δοκού οροφής υπό επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση

Χαρακτηριστικά ορθογωνικής δοκού οροφής	
Πάχος t (m)	1
Μήκος L (m)	10
Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	25,50
Λόγος Poisson v	0,29
Μέτρο Διόγκωσης K (GPa)	22,62
Μέτρο Διάτμησης G (GPa)	11,05
Γωνία τριβής φ (^{o})	42
Συνοχή c (kPa)	6720
Πυκνότητα ρ (g/cm^3)	2,7

Στο σχήμα (Εικόνα 2.1) που ακολουθεί, παρουσιάζεται το προσομοίωμα της ορθογωνικής δοκού οροφής του ασβεστολίθου με την χρήση του κώδικα Udec 7.0.



Εικόνα 2.1: Προσομοίωση ορθογωνικής δοκού οροφής ασβεστολίθου μεγέθους στοιχειών καννάβου 0,08m στον κώδικα Udec 7.0

2.2 Αναλυτική λύση

Η ορθογωνική δοκός οροφής στηρίζεται στα δύο πλησιέστερα άκρα της και συμπεριφέρεται ως μια αμφίπακτη δοκό (Σοφιανός, 2018). Για την αναλυτική λύση της δοκού χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις αμφίπακτης δοκού οροφής υπό ίδιον βάρος.

Οι εξισώσεις των τάσεων αμφίπακτης δοκού οροφής υπό το ίδιον βάρος είναι (Γιούτα, 2018):

$$\sigma_{xx} = \frac{\rho\, g\, y}{t^2}\left(6x^2 - 4y^2 - \frac{1}{2}L^2 + \frac{3}{5}y\right)$$

$$\sigma_{yy} = -\frac{\rho\, g\, y}{2}\left(1 - 4\frac{y^2}{t^2}\right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{3}{2}\rho\, g\, x\left(1 - 4\frac{y^2}{t^2}\right)$$

Οι εξισώσεις των παραμορφωσιακών καταστάσεων αμφίπακτης δοκού οροφής υπό το ιδίον βάρος είναι (Γιούτα, 2018):

Οριζόντιες μετατοπίσεις u_x:

$$u_x = \frac{q}{24EJ}\left[(1-\nu^2)\left\{xy(12x^2-L^2)+2x\left(-4y^3+\frac{3}{5}t^2y\right)\right\}+\nu(1+\nu)xy\,(t^2-4y^2)\right]$$

Κατακόρυφες μετατοπίσεις ή βυθίσεις u_y:

$$u_y = \frac{q}{24EJ}\left[(1-\nu^2)\left(y^4-\frac{t^2y^2}{2}\right)-2\nu(1+\nu)\left(\frac{12x^2-L^2}{4}y^2-y^4+\frac{3}{10}t^2y^2\right)\right.$$
$$+(1-\nu^2)\left(-x^4+\frac{L^2x^2}{2}+\frac{12}{5}x^2t^2\right)+\frac{5}{2}\nu\,(1+\nu)x^2t^2-\ (1-\nu^2)\left(\frac{L^4}{16}+\frac{3}{5}t^2L^2\right)$$
$$\left.-\frac{5}{8}\nu\,(1+\nu)t^2L^2\right]$$

Η αναλυτική λύση απαιτεί το σημείο μηδέν (0,0) να ορίζεται στο μέσον της διατομής. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν επιλύεται μια προσομοίωση θεωρητικά, είναι αναγκαίο να γίνονται και οι αντίστοιχες μετατροπές των συντεταγμένων.

2.2.1 Αποτελέσματα αναλυτικής λύσης

Για την εφαρμογή των εξισώσεων των τάσεων και των βυθίσεων της ορθογωνικής δοκού οροφής ασβεστολίθου, μέσω της αναλυτικής λύσης και εν συνεχεία, μέσω του κώδικα Udec, επιλέγονται τρία χαρακτηριστικά σημεία της δοκού από το αριστερό άκρο της.

Αυτά είναι:

- Πλησίον του άκρου: $\frac{x}{L} = \frac{1}{10} = 0{,}1$
- Στο κέντρο: $\frac{x}{L} = \frac{1}{2} = 0{,}5$
- Σημείο πλησίον του κέντρου: $\frac{x}{L} = \frac{4}{10} = 0{,}4$

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών των τάσεων που διεξήχθησαν για τα σημεία ελέγχου παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 2.2-2.4).

Πίνακας 2.2: Τάσεις καθ' ύψος της δοκού πλησίον του άκρου (x/L=0,1)

y/t	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	τ_{xy} (MPa)
0,5	0,600	0	0
0,4	0,483	-0,002	-0,057
0,3	0,364	-0,003	-0,102
0,2	0,243	-0,002	-0,133
0,1	0,122	-0,001	-0,153
0	0	0	-0,159
-0,1	-0,122	0,001	-0,153
-0,2	-0,242	0,002	-0,133
-0,3	-0,361	0,003	-0,102
-0,4	-0,478	0,002	-0,057
-0,5	-0,592	0	0

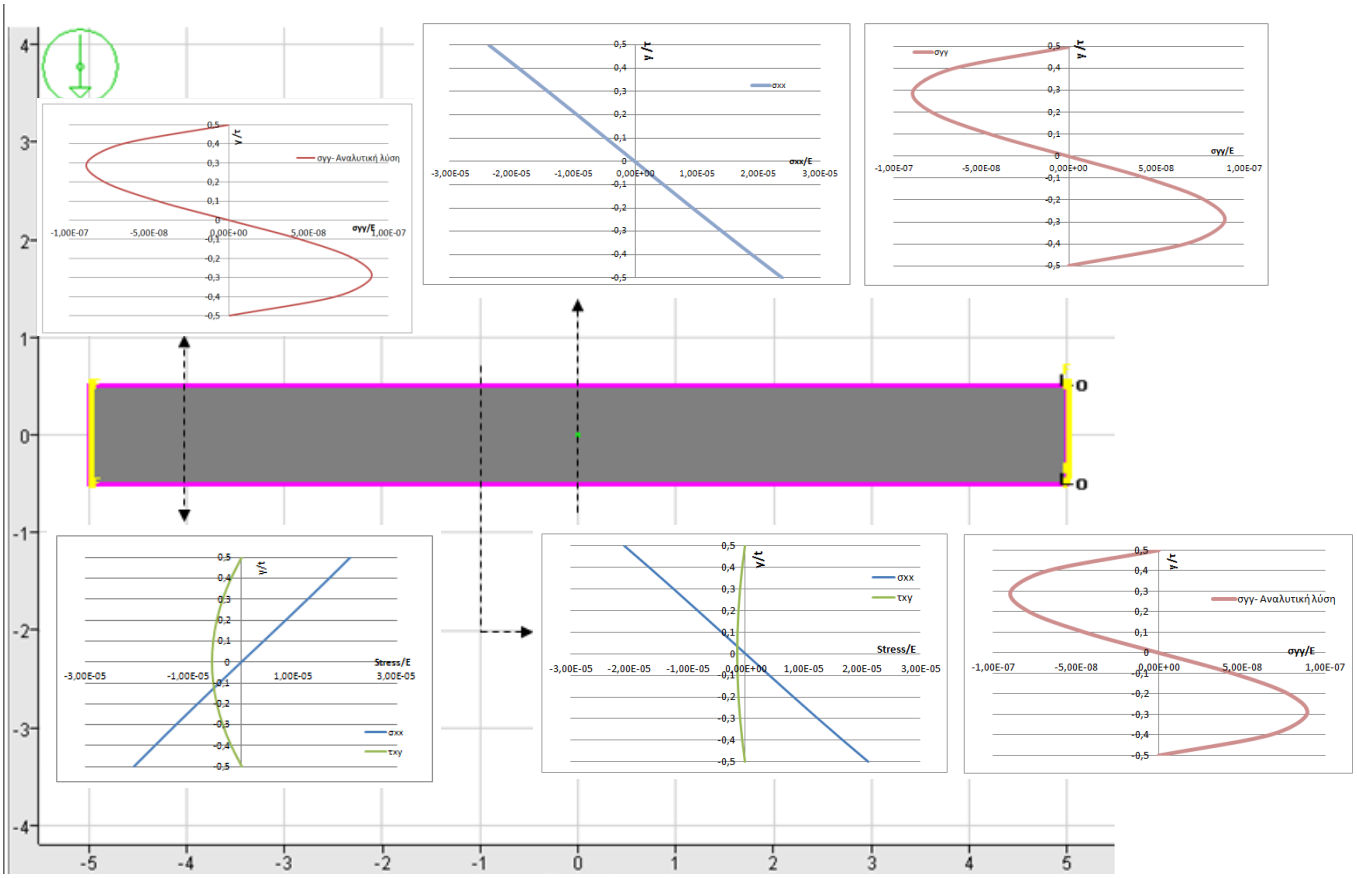
Πίνακας 2.3: Τάσεις καθ' ύψος της δοκού στο κέντρο (x/L=0,5)

y/t	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	τ_{xy} (MPa)
0,5	-0,671	0	0
0,4	-0,534	-0,002	0
0,3	-0,399	-0,003	0
0,2	-0,265	-0,002	0
0,1	-0,132	-0,001	0
0	0	0	0
-0,1	0,133	0,001	0
-0,2	0,266	0,002	0
-0,3	0,402	0,003	0
-0,4	0,539	0,002	0
-0,5	0,679	0	0

Πίνακας 2.4: Τάσεις καθ' ύψος της δοκού πλησίον του κέντρου (x/L=0,4)

y/t	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	τ_{xy} (MPa)
0,5	-0,5920	0	0
0,4	-0,4704	-0,0019	-0,0143
0,3	-0,3511	-0,0025	-0,0254
0,2	-0,2333	-0,0022	-0,0334
0,1	-0,1165	-0,0013	-0,0381
0	0	0	-0,0397
-0,1	0,1168	0,0013	-0,0381
-0,2	0,2346	0,0022	-0,0334
-0,3	0,3539	0,0025	-0,0254
-0,4	0,4755	0,0019	-0,0143
-0,5	0,5999	0	0

Στο παρακάτω προσομοίωμα της ορθογωνικής δοκού ασβεστολίθου, αποτυπώνονται τα διαγράμματα των ανηγμένων τάσεων, ως προς το μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος, καθ' ύψος της δοκού στα τρία σημεία ελέγχου. Τα αποτελέσματα των τάσεων είναι ανεξαρτητοποιημένα από τον τύπο του πετρώματος, ώστε να αντικατοπτρίζουν μια γενικότερη ισχύ.



Εικόνα 2.2: Προσομοίωμα ορθογωνικής δοκού ορόφης ασβεστολίθου με αποτύπωση των διαγραμμάτων των ανηγμένων τάσεων καθ' ύψος στα τρία χαρακτηριστικά σημεία της δοκού

2.2.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων υπολογισμού των τάσεων από την αναλυτική λύση

Από τα διαγράμματα των ανηγμένων τάσεων παρατηρείται η γνωστή συμπεριφορά των τάσεων καθ' ύψος της δοκού για τα τρία σημεία ελέγχου.

Η οριζόντια κύρια τάση σ_{xx} μεταβάλλεται γραμμικά καθ' ύψος της δοκού. Η σ_{xx} παρουσιάζει μέγιστες απόλυτες τιμές στην πάνω και κάτω ακραία ίνα της δοκού, και μηδενίζεται στο κέντρο της. Πλησίον του άκρου (x/L=0,1) παρουσιάζει θετικές τιμές στο πάνω μέρος της δοκού, που σημαίνει ότι οι τάσεις είναι εφελκυστικές, ενώ αρνητικές στο κάτω μέρος, δηλαδή οι τάσεις είναι θλιπτικές. Από την άλλη, στο κέντρο (x/L=0,5) και πλησίον του (x/L=0,4)

φαίνεται ότι η σ_{xx} έχει αντίθετη διεύθυνση σε σχέση με αυτή του x/L=0,1, δηλαδή στο πάνω μέρος της δοκού, οι τάσεις λειτουργούν ως θλιπτικές, ενώ στο κάτω μέρος ως εφελκυστικές.

Όσον αφορά, την κατακόρυφη τάση σ_{yy}, μηδενίζεται στην άνω και κάτω ακραία ίνα και στο μέσο του ύψους της διατομής. Στα τρία σημεία ελέγχου η σ_{yy} παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά. Στο πάνω μέρος της δοκού, η σ_{yy} συμπεριφέρεται ως θλιπτική, ενώ στο κάτω μέρος ως εφελκυστική.

Σχετικά με την διατμητική τάση τ_{xy}, παρουσιάζει μέγιστη τιμή στο μέσο του ύψους της διατομής και μηδενισμό στην πάνω και κάτω ακραία ίνα. Στο σημείο ελέγχου x/L=0,5 (στο κέντρο) η διατμητική τάση μηδενίζεται καθ' όλο το ύψος της δοκού.

2.3 Αποτελέσματα αριθμητικής λύσης δοκού με τον κώδικα Udec

Για την προσομοίωση της ορθογωνικής αμφίπακτης δοκού ασβεστολίθου υπό ίδιον, μέσω του κώδικα Udec 7.0, επιλέγεται η χρήση τετραγωνικού καννάβου. Είναι σημαντικό, να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος του μεγέθους των στοιχείων του και πως επηρεάζει τα αποτελέσματα των τάσεων και βυθίσεων. Σκοπός είναι ο προσδιορισμός ενός αποδεκτού μεγέθους στοιχείων καννάβου, όπου τα αποτελέσματα δεν θα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές με αυτά της αναλυτικής λύσης.

Η ορθογωνική πλάκα φόρτισης ασβεστολίθου επιλύεται για τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων του τετραγωνικού καννάβου, οι οποίες είναι:

1. Για μέγεθος στοιχείου e_l=0,1m
2. Για μέγεθος στοιχείου e_l=0,01m
3. Για μέγεθος στοιχείου e_l=0,08m

Για τις τρεις αυτές περιπτώσεις διεξάγονται αναλύσεις και μετρώνται οι τάσεις στις τρεις θέσεις ελέγχου (Κεφ. 2.2.1), καθώς και η βύθιση στο κέντρο της δοκού (x/L=0,5). Τα αποτελέσματα καταγράφονται και παρουσιάζονται μέσω διαγραμμάτων και συγκρίνονται με αυτά της αναλυτικής λύσης, προκειμένου να ελέγχει η ακρίβεια του προσομοιώματος και τέλος να επιλεγεί ο κατάλληλος κάνναβος.

Οι διαφοροποιήσεις δίνονται με βάση τη σχέση:

$$\text{Διαφοροποίηση τιμών } \% = \left| \frac{\text{Τιμή}_{\text{Αναλυτικής Λύσης}} - \text{Τιμή}_{\text{UDEC}}}{\text{Τιμή}_{\text{Αναλυτικής Λύσης}}} \right| * 100$$

2.3.1 Αποτελέσματα αριθμητικής λύσης μέσω κώδικα Udec για x/L=0,1

Τα αποτελέσματα των τάσεων του σημείου ελέγχου x/L=0,1 (πλησίον του άκρου), για τις τρείς περιπτώσεις του μεγέθους των στοιχείων καννάβου, παρουσιάζονται στον πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5: Αποτελέσματα τάσεων για x/L=0,1 (Udec)

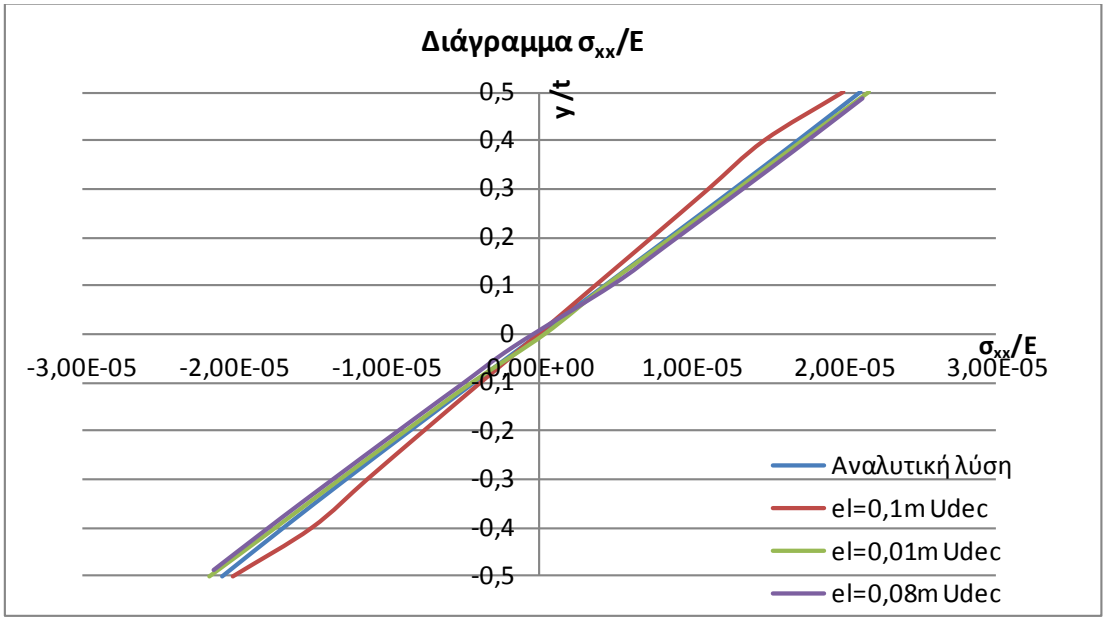
	e_l=0,1m			e_l=0,01m			e_l=0,08m		
y/t	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	τ_{xy} (MPa)	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	τ_{xy} (MPa)	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	τ_{xy} (MPa)
0,5	0,570	-0,010	-0,026	0,617	-0,001	-0,031	0,605	-0,008	-0,022
0,4	0,422	-0,011	-0,084	0,493	-0,003	-0,062	0,515	-0,009	-0,064
0,3	0,318	-0,009	-0,120	0,371	-0,004	-0,106	0,422	-0,010	-0,098
0,2	0,213	-0,007	-0,146	0,249	-0,004	-0,139	0,235	-0,010	-0,144
0,1	0,106	-0,004	-0,162	0,124	-0,002	-0,158	0,140	-0,009	-0,155
0	0,000	0,000	-0,167	0,010	0,000	-0,164	-0,046	0,007	-0,159
-0,1	-0,108	0,003	-0,162	-0,126	0,002	-0,158	-0,142	0,008	-0,155
-0,2	-0,214	0,006	-0,146	-0,250	0,003	-0,138	-0,237	0,009	-0,144
-0,3	-0,320	0,009	-0,120	-0,373	0,004	-0,106	-0,424	0,010	-0,098
-0,4	-0,423	0,011	-0,084	-0,494	0,003	-0,062	-0,516	0,009	-0,064
-0,5	-0,570	0,010	-0,026	-0,617	0,001	-0,030	-0,606	0,008	-0,022

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται, στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.6), οι διαφορές των αποτελεσμάτων του Udec για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου, σε σχέση με τις τιμές της αναλυτικής λύσης για το σημείο x/L=0,1.

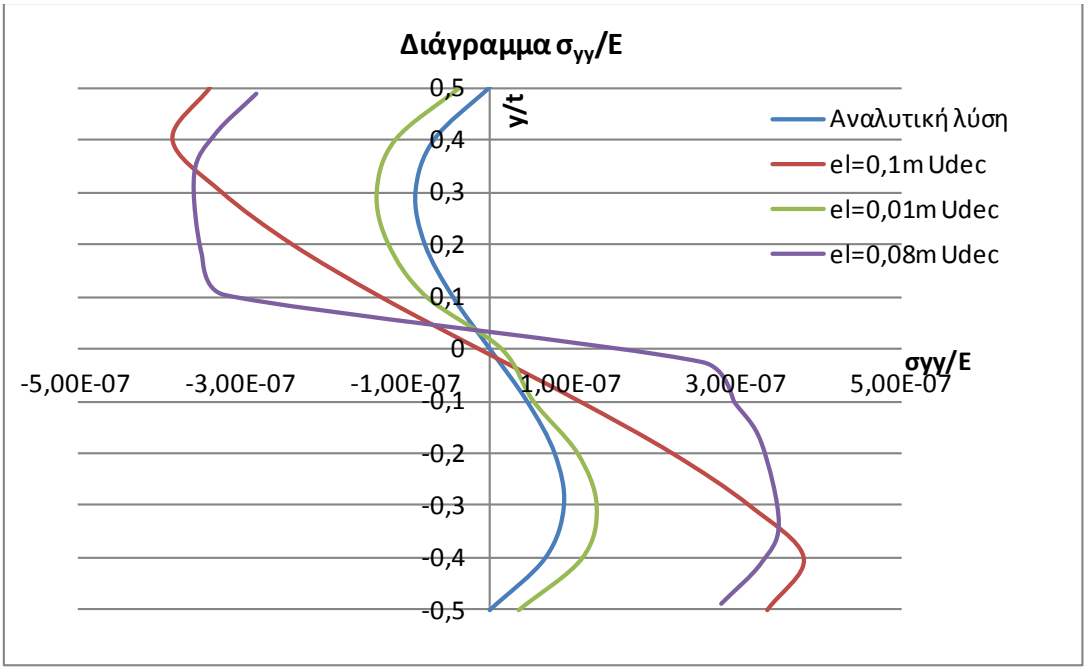
Πίνακας 2.6: Διαφορές τιμών τάσεων για x/L=0,1

	e_l=0,1m		e_l=0,01m		e_l=0,08m	
y/t	σ_{xx} %	τ_{xy} %	σ_{xx} %	τ_{xy} %	σ_{xx} %	τ_{xy} %
0,5	5,0	-	2,8	-	0,9	-
0,4	12,7	46,8	2,0	8,4	6,5	11,4
0,3	12,7	18,0	1,9	4,2	16,0	3,9
0,2	12,5	9,4	2,3	4,1	3,6	7,5
0,1	13,0	6,2	1,7	3,6	14,6	1,7
0	-	5,1	-	3,2	-	0,2
-0,1	11,2	6,2	3,6	3,6	16,4	1,7
-0,2	11,6	9,4	3,2	3,4	2,3	7,6
-0,3	11,4	18,0	3,3	4,2	17,3	3,9
-0,4	11,5	46,8	3,3	8,4	7,9	11,3
-0,5	3,7	-	4,2	-	2,3	-

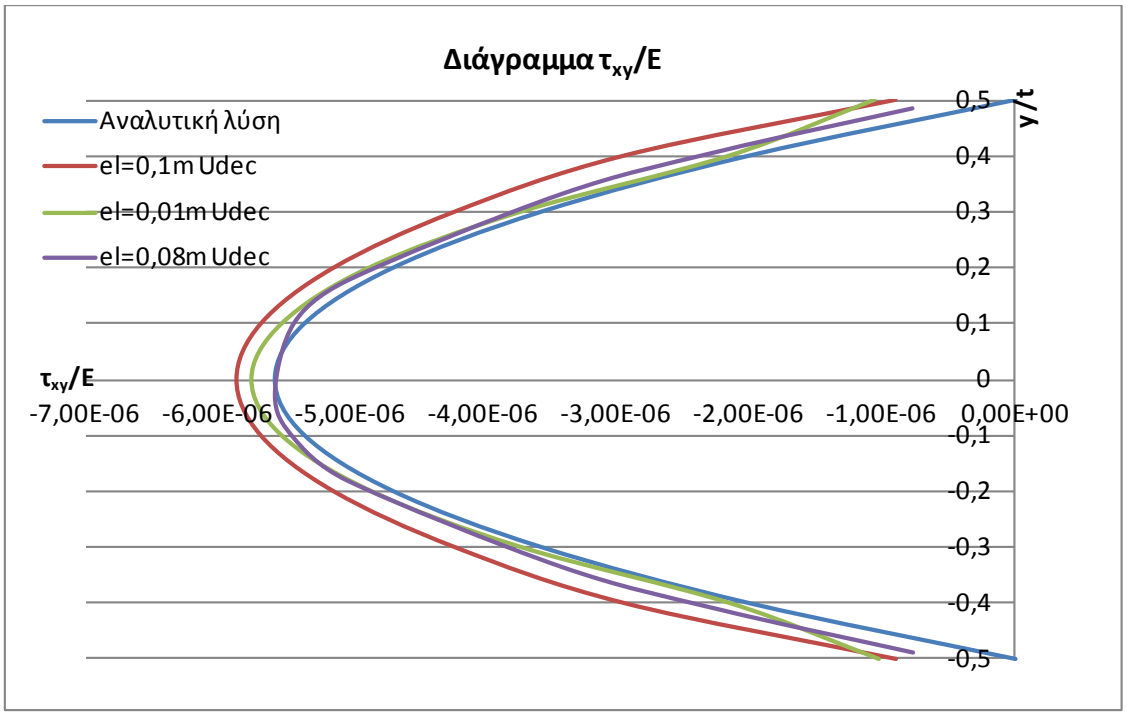
Στην συνέχεια, αναπαριστώνται τα διαγράμματα μεταβολής των ανηγμένων τάσεων της αριθμητικής λύσης καθ' ύψος της ορθογωνικής δοκού οροφής ασβεστολίθου για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχειών του τετραγωνικού καννάβου, σε σχέση με τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης στη θέση x/L=0,1.



Διάγραμμα 2.1: Αποτελέσματα ανηγμένης σ_{xx} για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου και της αναλυτικής λύσης, καθ' ύψος της δοκού οροφής ασβεστολίθου για x/L=0,1



Διάγραμμα 2.2: Αποτελέσματα ανηγμένης σ_{yy} για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου και της αναλυτικής λύσης, καθ' ύψος της δοκού οροφής ασβεστολίθου για x/L=0,1



Διάγραμμα 2.3: Αποτελέσματα ανηγμένης τ_{xy} για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου και της αναλυτικής λύσης, καθ' ύψος της δοκού οροφής ασβεστολίθου για x/L=0,1

2.3.2 Αποτελέσματα αριθμητικής λύσης μέσω κώδικα Udec για x/L=0,5

Τα αποτελέσματα των τάσεων του σημείου ελέγχου x/L=0,5 (κέντρο ορθογωνικής δοκού), για τις τρεις περιπτώσεις του μεγέθους των στοιχείων καννάβου, παρουσιάζονται στον πίνακα 2.7.

Πίνακας 2.7: Αποτελέσματα τάσεων για x/L=0,5 (Udec)

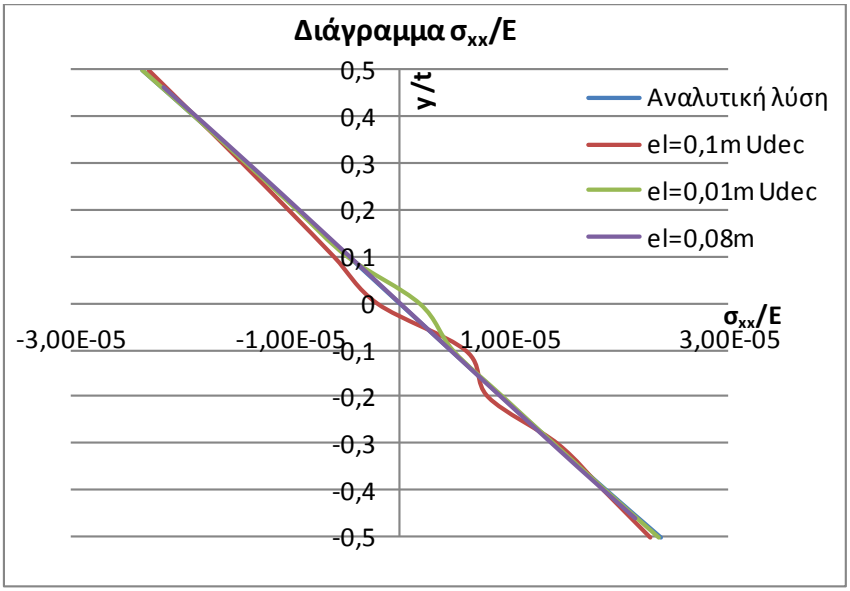
	e_l=0,1m		e_l=0,01m		e_l=0,08m	
y/t	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)
0,5	-0,655	0,011	-0,671	-0,001	-0,613	-0,001
0,4	-0,532	0,010	-0,534	-0,002	-0,509	-0,002
0,3	-0,410	0,009	-0,400	-0,002	-0,405	-0,002
0,2	-0,290	0,010	-0,268	-0,002	-0,303	-0,002
0,1	-0,172	0,010	-0,137	-0,001	-0,101	-0,001
0	-0,059	0,012	0,050	0,000	-0,001	0,000
-0,1	0,170	-0,010	0,136	0,001	0,100	0,001
-0,2	0,229	-0,010	0,267	0,002	0,200	0,002
-0,3	0,410	-0,009	0,399	0,003	0,404	0,002
-0,4	0,530	-0,010	0,533	0,002	0,507	0,002
-0,5	0,650	-0,011	0,670	0,000	0,612	0,001

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται, στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 2.8), οι διαφορές των αποτελεσμάτων του Udec για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου, σε σχέση με τις τιμές της αναλυτικής λύσης για το σημείο x/L=0,5.

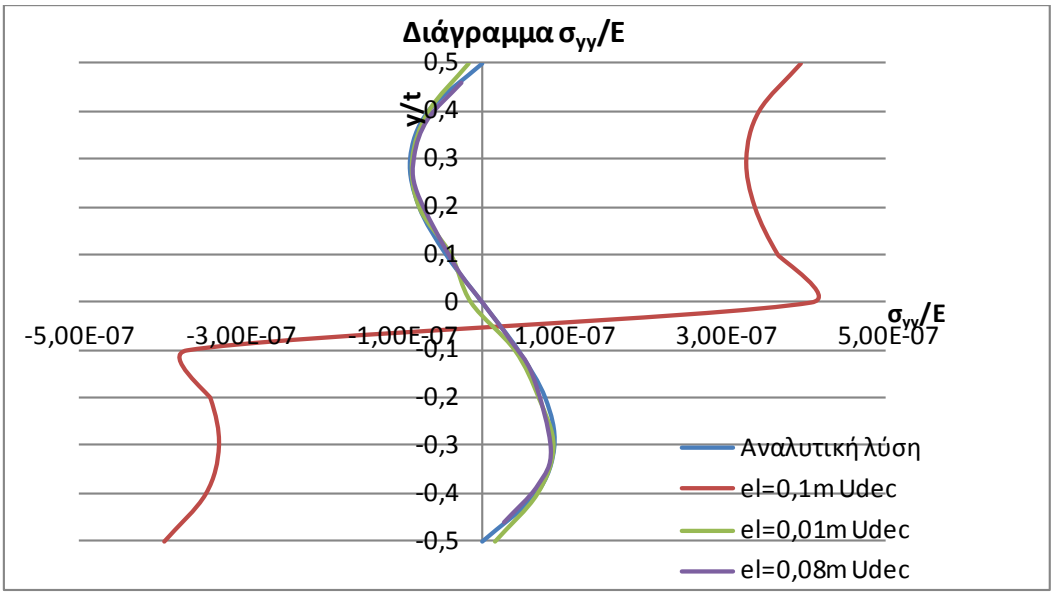
Πίνακας 2.8: Διαφορές τιμών τάσεων για x/L=0,5

	e_l=0,1m		e_l=0,01m		e_l=0,08m	
y/t	σ_{xx} %	σ_{yy} %	σ_{xx} %	σ_{yy} %	σ_{xx} %	σ_{yy} %
0,5	2,4	-	0,1	-	8,6	-
0,4	0,4	624,4	0,0	0,8	4,7	2,7
0,3	2,8	453,9	0,3	1,8	1,7	4,3
0,2	9,4	549,5	1,1	1,4	14,4	4,7
0,1	29,9	886,5	3,5	11,4	23,6	23,4
0	-	-	-	-	-	-
-0,1	28,1	886,5	2,5	10,6	24,9	24,5
-0,2	14,0	549,5	0,2	10,8	24,8	19,9
-0,3	2,1	453,9	0,6	1,6	0,5	4,7
-0,4	1,7	624,4	1,1	1,3	5,9	2,1
-0,5	4,3	-	1,4	-	9,9	-

Στην συνέχεια, αναπαριστώνται τα διαγράμματα μεταβολής των ανηγμένων τάσεων της αριθμητικής λύσης καθ' ύψος της ορθογωνικής δοκού οροφής ασβεστολίθου για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχειών του τετραγωνικού καννάβου, σε σχέση με τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης στη θέση x/L=0,5.



Διάγραμμα 2.4: Αποτελέσματα ανηγμένης σ_{xx} για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου και της αναλυτικής λύσης, καθ' ύψος της δοκού οροφής ασβεστολίθου για x/L=0,5



Διάγραμμα 2.5: Αποτελέσματα ανηγμένης σ_{yy} για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου και της αναλυτικής λύσης, καθ' ύψος της δοκού οροφής ασβεστολίθου για x/L=0,5

2.3.3 Αποτελέσματα αριθμητικής λύσης μέσω κώδικα Udec για x/L=0,4

Τα αποτελέσματα των τάσεων του σημείου ελέγχου x/L=0,4 (σημείο πλησίον του κέντρου), για τις τρεις περιπτώσεις του μεγέθους των στοιχείων καννάβου, παρουσιάζονται στον πίνακα 2.9.

Πίνακας 2.9: Αποτελέσματα τάσεων για x/L=0,4 (Udec)

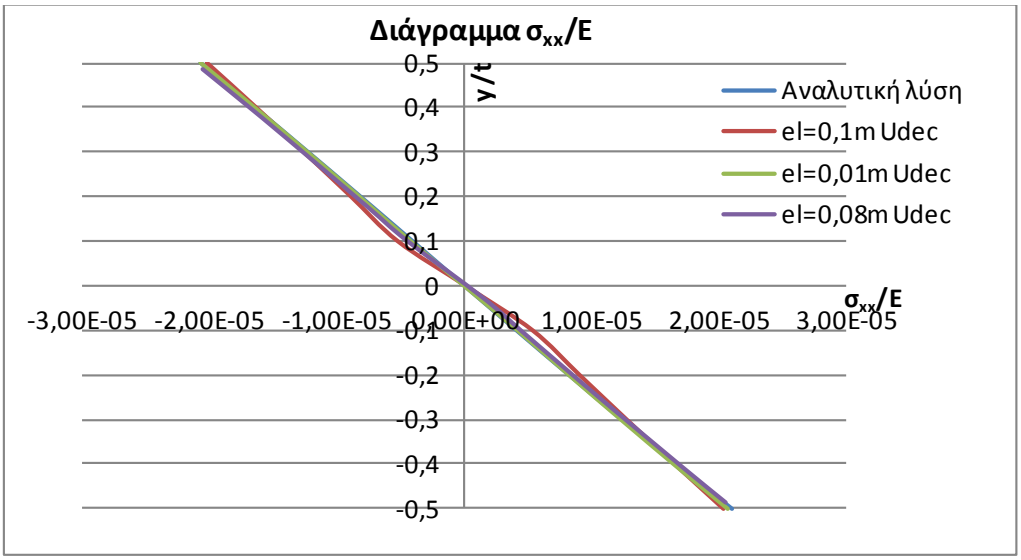
	e_l=0,1m			e_l=0,01m			e_l=0,08m		
y/t	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	τ_{xy} (MPa)	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	τ_{xy} (MPa)	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	τ_{xy} (MPa)
0,5	-0,579	0,010	-0,027	-0,592	0,001	-0,001	-0,585	0,008	-0,005
0,4	-0,469	0,008	-0,181	-0,471	-0,001	-0,015	-0,491	0,006	-0,016
0,3	-0,362	0,008	-0,272	-0,353	-0,002	-0,026	-0,399	0,006	-0,024
0,2	-0,256	0,008	-0,337	-0,236	-0,001	-0,033	-0,219	0,006	-0,035
0,1	-0,152	0,009	-0,376	-0,121	-0,003	-0,038	-0,130	0,007	-0,038
0	0,000	0,000	-0,287	-0,001	0,000	-0,039	0,040	-0,008	-0,039
-0,1	0,150	-0,009	-0,376	0,119	0,003	-0,038	0,128	-0,007	-0,038
-0,2	0,255	-0,008	-0,337	0,235	0,001	-0,033	0,217	-0,006	-0,035
-0,3	0,361	-0,008	-0,272	0,351	0,002	-0,026	0,307	-0,006	-0,031
-0,4	0,468	-0,008	-0,181	0,470	0,001	-0,015	0,490	-0,006	-0,016
-0,5	0,577	-0,010	-0,272	0,591	-0,001	-0,001	0,584	-0,008	-0,006

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται, στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 2.10), οι διαφορές των αποτελεσμάτων του Udec για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου, σε σχέση με τις τιμές της αναλυτικής λύσης για το σημείο x/L=0,4.

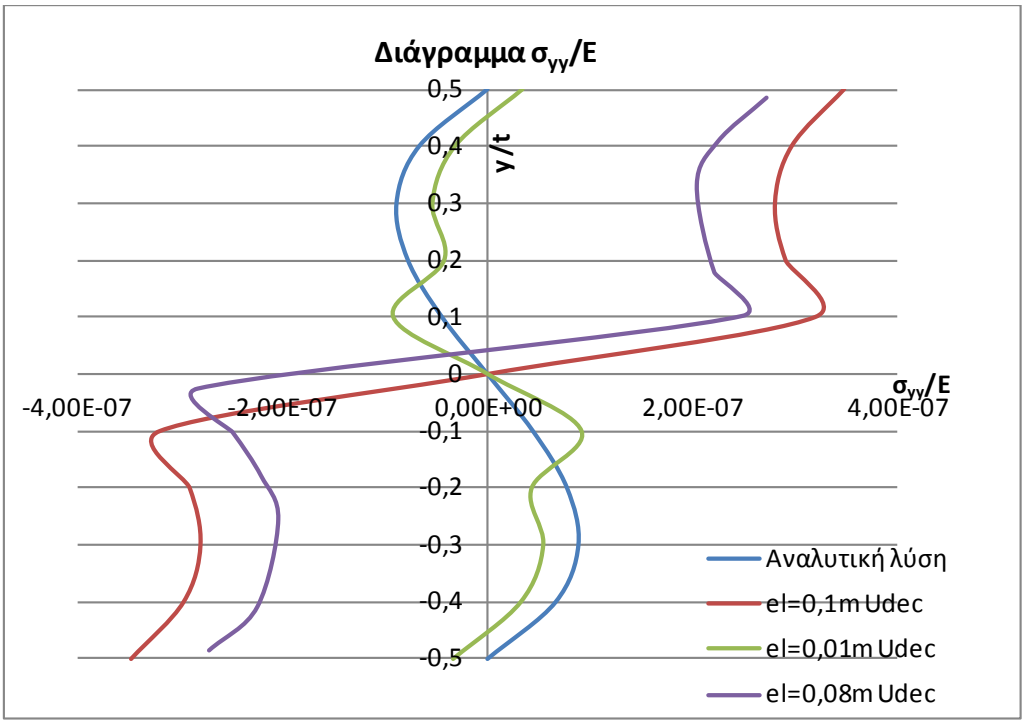
Πίνακας 2.10: Διαφορές τιμών τάσεων για x/L=0,4

	e_l=0,1m		e_l=0,01m		e_l=0,08m	
y/t	σ_{xx} %	τ_{xy} %	σ_{xx} %	τ_{xy} %	σ_{xx} %	τ_{xy} %
0,5	2,2	-	0,0	-	1,2	-
0,4	0,3	1165,5	0,1	4,9	4,5	10,2
0,3	3,1	969,7	0,6	2,3	13,8	4,9
0,2	9,7	909,8	1,2	1,1	6,2	6,3
0,1	30,5	885,8	3,9	0,4	11,6	0,5
0	-	622,4	-	1,8	-	1,0
-0,1	28,4	885,8	1,9	0,4	9,9	0,5
-0,2	8,7	909,8	0,2	1,1	7,3	6,3
-0,3	2,0	969,7	0,8	2,3	13,2	21,1
-0,4	1,6	1165,5	1,2	4,9	3,0	10,5
-0,5	3,8	-	1,5	-	2,7	-

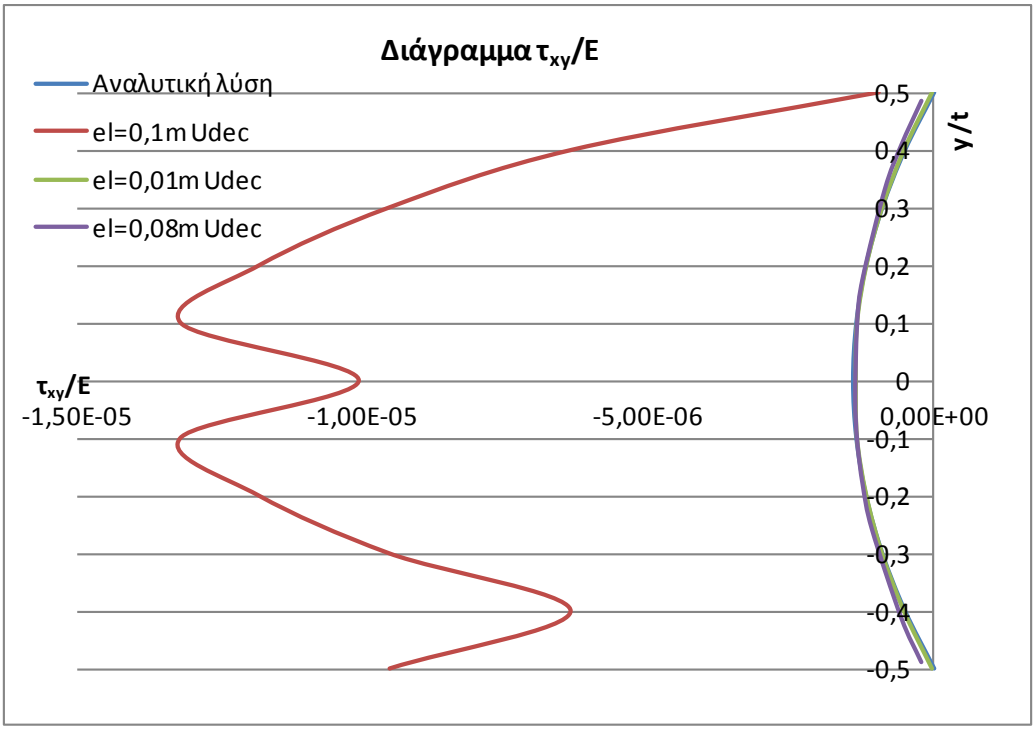
Στην συνέχεια, αναπαριστώνται τα διαγράμματα μεταβολής των ανηγμένων τάσεων της αριθμητικής λύσης καθ' ύψος της ορθογωνικής δοκού οροφής ασβεστολίθου για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχειών του τετραγωνικού καννάβου, σε σχέση με τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης στη θέση x/L=0,4.



Διάγραμμα 2.6: Αποτελέσματα ανηγμένης σ_{xx} για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου και της αναλυτικής λύσης, καθ' ύψος της δοκού οροφής ασβεστολίθου για x/L=0,4



Διάγραμμα 2.7: Αποτελέσματα ανηγμένης σ_{yy} για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου και της αναλυτικής λύσης, καθ' ύψος της δοκού οροφής ασβεστολίθου για x/L=0,4



Διάγραμμα 2.8: Αποτελέσματα ανηγμένης τ_{xy} για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους των στοιχείων καννάβου και της αναλυτικής λύσης, καθ' ύψος της δοκού οροφής ασβεστολίθου για x/L=0,4

2.4 Επιλογή προσομοιώματος διακριτοποίησης

Τόσο από τα διαγράμματα, όσο και από τους πίνακες των διαφορών των τάσεων γίνεται αντιληπτό ότι η προσομοίωση της ορθογωνικής δοκού ασβεστολίθου με μέγεθος των στοιχείων καννάβου 0,01m παρουσιάζει καλύτερη προσέγγιση. Στην περίπτωση των οριζόντιων ορθών τάσεων σ_{xx} και οι τρεις προσομοιώσεις προσεγγίζουν τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης και παρουσιάζουν μικρές διαφορές.

Οι κατακόρυφες ορθές τάσεις σ_{yy} της αριθμητικής λύσης παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις στα σημεία ελέγχου πλησίον του άκρου (x/L=0,1) και πλησίον του κέντρου (x/L=0,4), σε σχέση με αυτά της αναλυτικής λύσης. Όμως σαν τάξη μεγέθους είναι πολύ μικρές. Στο κέντρο (x/L=0,5) φαίνεται ότι οι περιπτώσεις καννάβου με μέγεθος στοιχείων 0,08m και 0,01m παρουσιάζουν καλή προσέγγιση σε σχέση με την αναλυτική λύση.

Όσον αφορά την διατμητική τάση τ_{xy}, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με μέγεθος στοιχείων καννάβου 0,01m και 0,08m προσεγγίζουν αυτά της αναλυτικής λύσης, με μικρές διαφορές, ενώ τα αποτελέσματα που έδωσε η προσομοίωση με μέγεθος στοιχείων καννάβου 0,1m παρουσιάζουν μεγάλη διαφοροποίηση.

Παρακάτω (Πίνακας 2.11) δίνονται τα αποτελέσματα των βυθίσεων στο κέντρο της ορθογωνικής δοκού για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους στοιχείων καννάβου.

Πίνακας 2.11: Αποτελέσματα βυθίσεων

Βυθίσεις						
Αποτέλεσμα αναλυτικής λύσης (mm)	Αποτελέσματα αριθμητικής λύσης (mm)			Διαφοροποίηση %		
	e_l=0,1m	e_l=0,01m	e_l=0,08m	e_l=0,1m	e_l=0,01m	e_l=0,08m
0,302	0,297	0,301	0,298	1,7	0,5	1,4

Οι διαφορές των βυθίσεων σε σχέση με το αποτέλεσμα της αναλυτικής λύσης είναι της τάξης από 0,5-1,7%, ενώ φαίνεται ότι όσο πιο λεπτομερής είναι ο κάνναβος τόσο μικρότερες διαφορές παρουσιάζει.

Τέλος, κρίνεται ότι ο πιο λεπτομερής κάνναβος, με μέγεθος στοιχείων καννάβου 0,01 m δίνει καλύτερη προσέγγιση σε σχέση με την αναλυτική λύση. Ωστόσο, για μέγεθος στοιχείων καννάβου 0,08 m τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτά σε σύγκριση με την αναλυτική λύση. Επειδή το υπολογιστικό κόστος για την επίλυση των αριθμητικών μοντέλων με στοιχεία μεγέθους 0,01 m είναι μεγάλο και ο απαιτούμενος χρόνος επίλυσης των μοντέλων καθίσταται απαγορευτικός, επιλέγεται το μέγεθος των στοιχείων καννάβου να είναι 0,08m στις περιοχές ενδιαφέροντος, για τις προσομοιώσεις των στρωσιγενών οροφών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΤΡΩΣΙΓΕΝΕΙΣ ΟΡΟΦΕΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΥΠΟΓΕΙΟ ΑΝΟΙΓΜΑ

3.1 Στρωσιγενείς οροφές γύρω από υπόγειο άνοιγμα

Στο κεφάλαιο αυτό διερευνάται η συμπεριφορά της οροφής, ενός υπόγειου ανοίγματος, για στρωσιγενή πετρώματα, με μοναδικό επίπεδο αδυναμίας τις στρώσεις.

Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται σε σχηματισμό συμπαγούς ασβεστολίθου μήκους 12m, του οποίου τα άκρα είναι πακτωμένα, και ύψους 3m. Στον σχηματισμό, διανοίγεται υπόγειο άνοιγμα μήκους 4m και ύψους 1m. Η οροφή του υπόγειου ανοίγματος αποτελείται από διαδοχικά στρώματα με διεπιφάνειες, οι οποίες είναι πληρωμένες με αργιλικό υλικό. Τα χαρακτηριστικά του συμπαγούς σχηματισμού δίνονται στον πίνακα 3.1, ενώ των στρώσεων που έχουν πληρωθεί από αργιλικό υλικό δίνονται στον πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά ασβεστολιθικού πετρώματος

Χαρακτηριστικά ασβεστολιθικού πετρώματος	
Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	28,50
Λόγος Poisson v	0,29
Μέτρο Διόγκωσης K (GPa)	22,62
Μέτρο Διάτμησης G (GPa)	11,05
Γωνία τριβής φ (^{o})	42
Συνοχή c (kPa)	6720
Πυκνότητα ρ (MN/m^3)	0,027
Επιτάχυνση βαρύτητας g (m/s^2)	9,81

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά των στρώσεων

Χαρακτηριστικά Στρώσεων	
Ορθή δυσκαμψία ασυνεχειών k_n (1/GPa)	10
Διατμητική δυσκαμψία ασυνεχειών k_s (1/GPa)	1
Γωνία τριβής φ (^{o})	29
Συνοχή c (kPa)	100

Η μελέτη πραγματοποιείται για την περίπτωση οροφής που περιλαμβάνει από ένα έως πέντε στρώματα, με πάχος στρώματος 0,4 μέτρα. Τα μοντέλα είναι ελαστοπλαστικά και επιλύονται με το κριτήριο Mohr-Coulomb, μέσω του κώδικα Udec 7.0.

Για την εκάστοτε προσομοίωση επιλέγονται τρεις θέσεις ελέγχου των τάσεων από την αριστερή παρειά του ανοίγματος. Αυτές είναι:

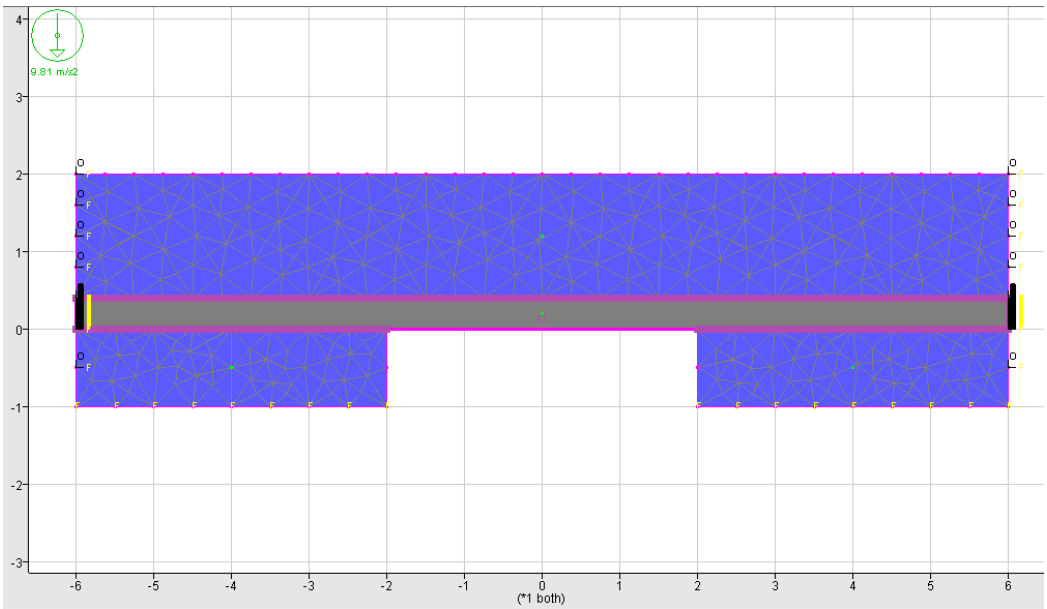
- Πάνω στην στήριξη του ανοίγματος: $\frac{x}{L} = \frac{0}{4} = 0$
- Στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος: $\frac{x}{L} = \frac{2}{4} = 0{,}5$
- Πλησίον της παρειάς: $\frac{x}{L} = \frac{0{,}4}{4} = 0{,}1$

Για κάθε θέση ελέγχου, πραγματοποιείται η αναλυτική λύση (Κεφάλαιο 2.2), ως ένα μέτρο σύγκρισης διαφορετικών συνθηκών. Για την αναλυτική λύση, θεωρείται ότι το πάχος της οροφής ισούται με το συνολικό πάχος των στρωμάτων.

Για κάθε προσομοίωση λαμβάνονται οι βυθίσεις στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος.

3.2 Προσομοίωση μονοστρωματικής οροφής

Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 3.1) παρουσιάζεται η προσομοίωση μονοστρωματικής οροφής πάχους t=0,4m, γύρω από το υπόγειο άνοιγμα, μέσω του κώδικα Udec 7.0.



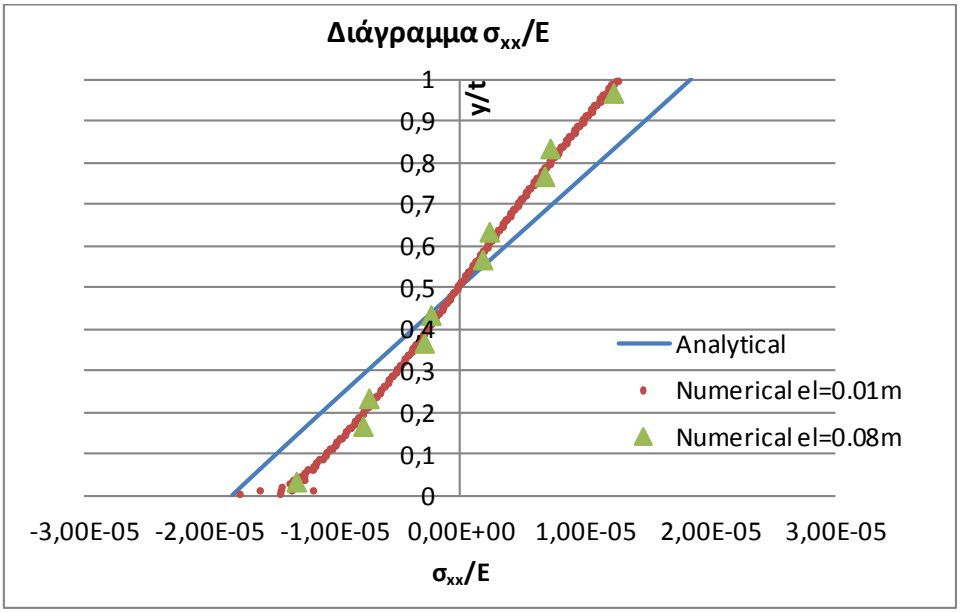
Εικόνα 3.1: Προσομοίωση μονοστρωματικής οροφής υπόγειου ανοίγματος στον κώδικα Udec 7.0

Προκειμένου να εμπλουτιστούν τα αποτελέσματα των τάσεων από την αριθμητική προσομοίωση, ώστε να παραχθεί μια ευκρινή κατανομή αυτών, επιλέγεται η εκάστοτε προσομοίωση να λύνεται με κάνναβο μεγέθους στοιχειών 0,01m μέχρι τους 100000 κύκλους, εφόσον παρατηρηθεί ότι τα αποτελέσματα συγκλίνουν με αυτά της αριθμητικής επίλυσης με μέγεθος στοιχείων καννάβου 0,08m.

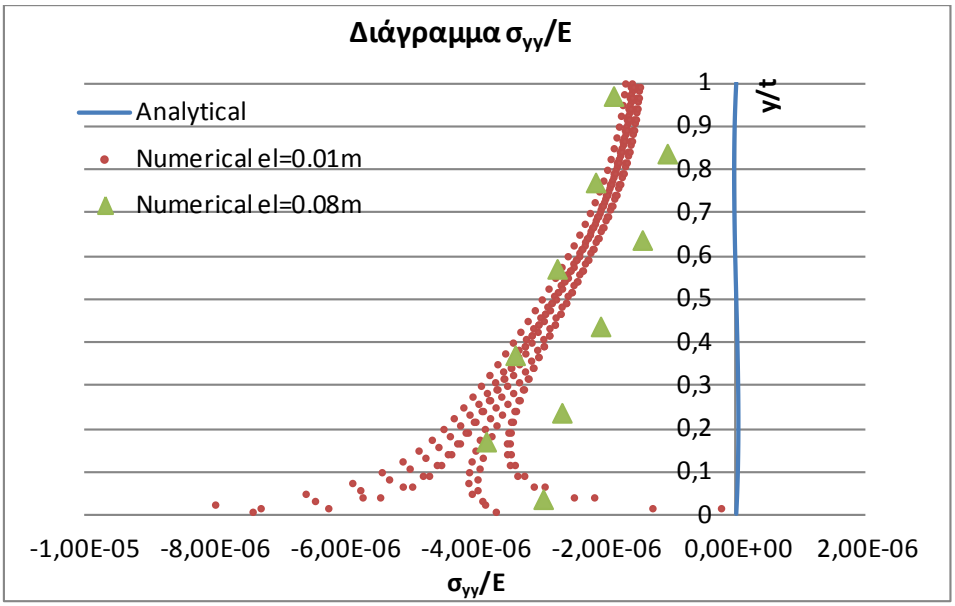
Στην περίπτωση του καννάβου με μέγεθος στοιχείων 0,01m, λαμβάνονται οι τιμές των τάσεων σε μία περιοχή ±0,01m γύρω από τα σημεία ελέγχου.

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ανηγμένων τάσεων, για κάθε σημείο ελέγχου, καθ' ύψος της μονοστρωματικής οροφής, για τα δύο μεγέθη στοιχείων καννάβου.

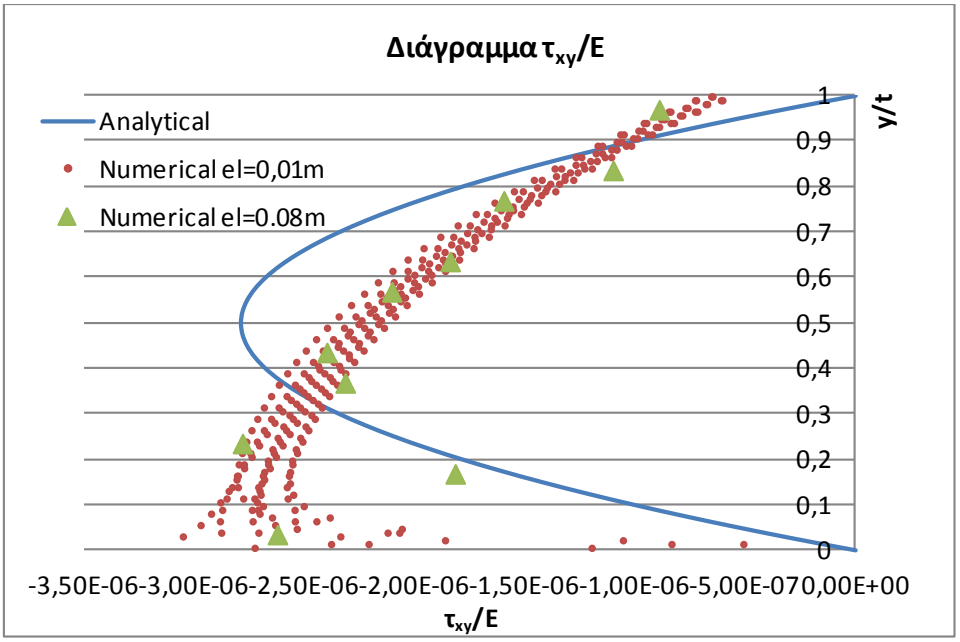
3.2.1 Αποτελέσματα μονοστρωματικής οροφής x/L=0



Διάγραμμα 3.1: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος μονοστρωματικής οροφής για x/L=0

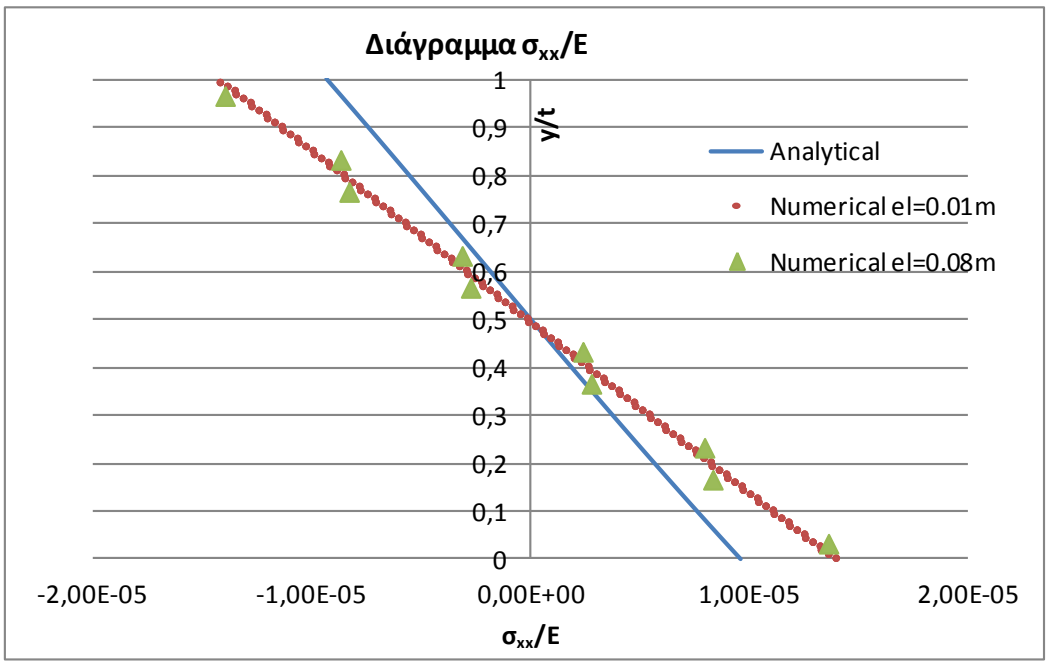


Διάγραμμα 3.2: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος μονοστρωματικής οροφής για x/L=0

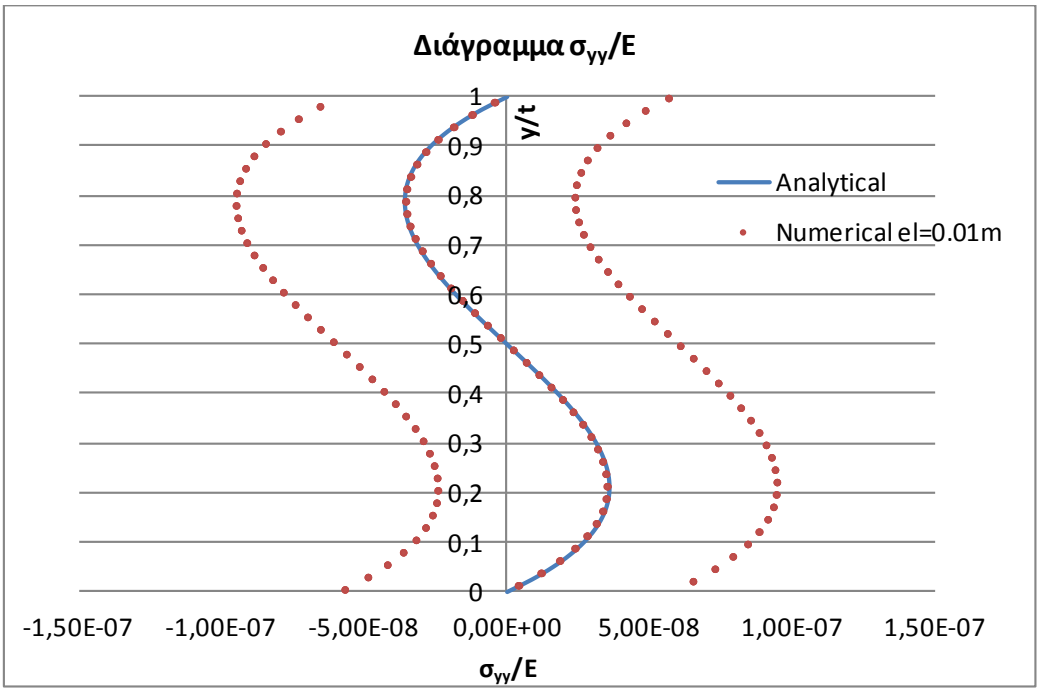


Διάγραμμα 3.3: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος μονοστρωματικής οροφής για x/L=0

3.2.2 Αποτελέσματα μονοστρωματικής οροφής x/L=0,5

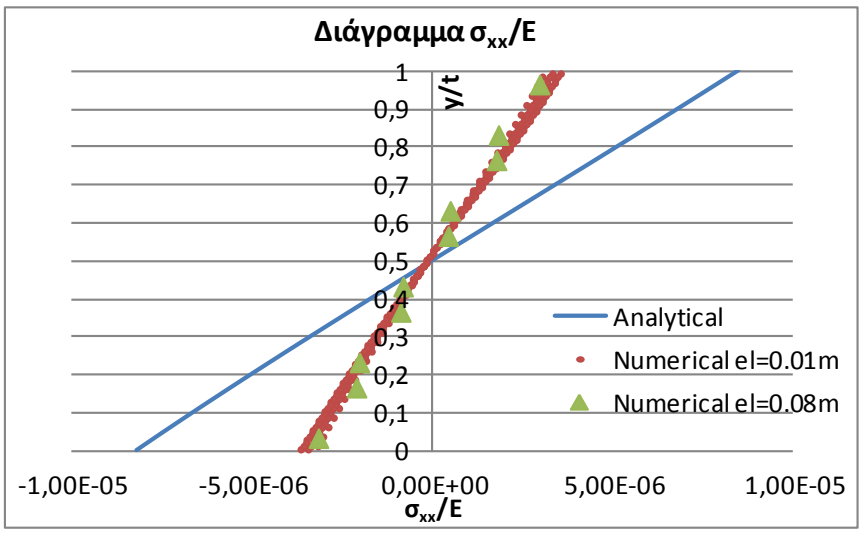


Διάγραμμα 3.4: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος μονοστρωματικής οροφής για x/L=0,5

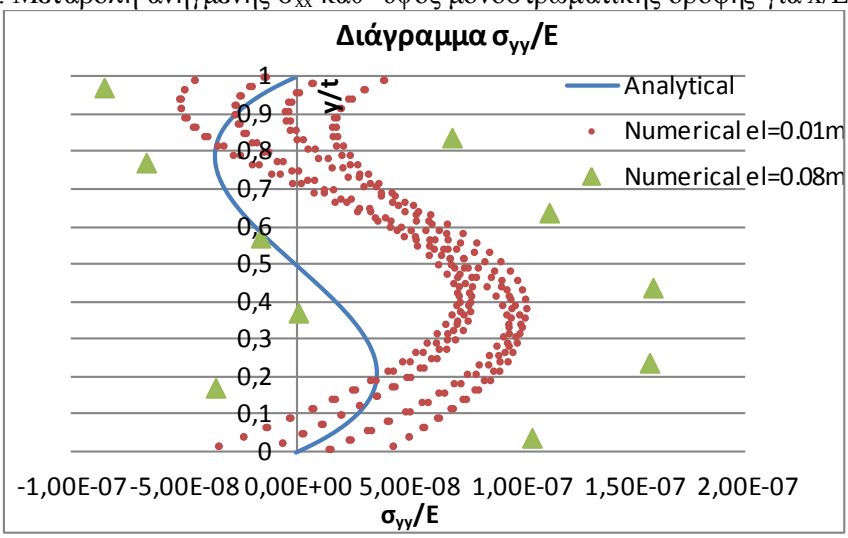


Διάγραμμα 3.5: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος μονοστρωματικής οροφής για x/L=0,5

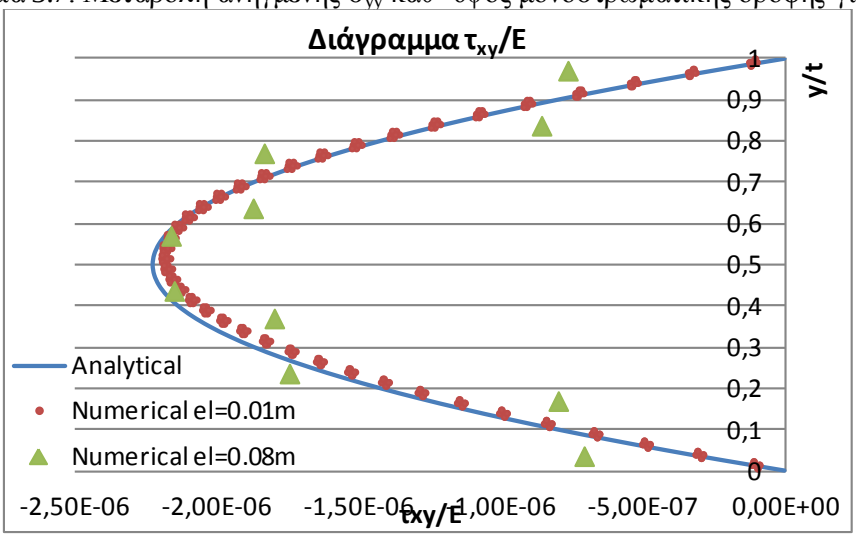
3.2.3 Αποτελέσματα μονοστρωματικής οροφής x/L=0,1



Διάγραμμα 3.6: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος μονοστρωματικής οροφής για x/L=0,1



Διάγραμμα 3.7: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος μονοστρωματικής οροφής για x/L=0,1



Διάγραμμα 3.8: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος μονοστρωματικής οροφής για x/L=0,1

3.2.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων μονοστρωματικής οροφής

Από τα διαγράμματα των ανηγμένων τάσεων, παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δύο περιπτώσεις μεγέθους στοιχείων καννάβου συγκλίνουν και επομένως θεωρούνται αποδεκτά. Ο χρόνος της αριθμητικής επίλυσης του προσομοιώματος με μέγεθος στοιχείων καννάβου 0,01m κρίνεται απαγορευτικός. Για τον λόγο αυτό, επιλέγεται η αριθμητική λύση να επιλύεται μέχρι τους 100000 κύκλους. Ενδεικτικά, πραγματοποιείται ο έλεγχος σύγκλισης των αποτελεσμάτων και στην περίπτωση οροφής τριών στρωμάτων.

Τα αποτελέσματα της αριθμητικής λύσης συγκρίνονται με την αναλυτική λύση μονοστρωματικής οροφής, πάχους 0,4m, ιδίου μέτρου ελαστικότητας και υπόγειου ανοίγματος. Από τα διαγράμματα των ανηγμένων τάσεων της μονοστρωματικής οροφής, όπως είναι αναμενόμενο, οι καμπύλες των αποτελεσμάτων της αριθμητικής λύσης παρουσιάζουν διαφορές σε σύγκριση με την αναλυτική λύση. Αυτό συμβαίνει διότι η προσομοίωση προσεγγίζει τις πραγματικές συνθήκες. Στην περίπτωση της αναλυτικής λύσης θεωρείται ότι πρόκειται για μία δοκό, μήκους όσο είναι το υπόγειο άνοιγμα (4m), με πακτωμένα τα άκρα της, όπου η μόνη δύναμη που δέχεται είναι το ίδιον βάρος της. Στην προσομοίωση, οι συνοριακές συνθήκες είναι σε μεγαλύτερη απόσταση από τις παρειές του υπόγειου ανοίγματος. Επιπρόσθετα, η μονοστρωματική οροφή πέρα από το βάρος της δέχεται επιπλέον το βάρος του υπερκείμενου σχηματισμού. Ακόμη, στις περιοχές που υπάρχουν στηρίξεις (πάκτωση) της αμφίπακτης δοκού, στην περίπτωση του μοντέλου υφίσταται εγκιβωτισμός σε πέτρωμα, ο οποίος χαρακτηρίζεται από ενδοσιμότητα, έτσι που οι στηρίξεις πλέον μπορούν να παραμορφωθούν.

Με βάση τα διαγράμματα της οριζόντιας ανηγμένης ορθής τάσης συμπεραίνεται ότι η σ_{xx} μεταβάλλεται γραμμικά καθ' ύψος της μονοστρωματικής οροφής. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζει μέγιστες τιμές στις ακραίες ίνες και μηδενίζεται στην κεντρική ίνα του στρώματος. Παρατηρείται η αναμενόμενη διαφορετική κλίση σε σχέση με την αμφίπακτη δοκό.

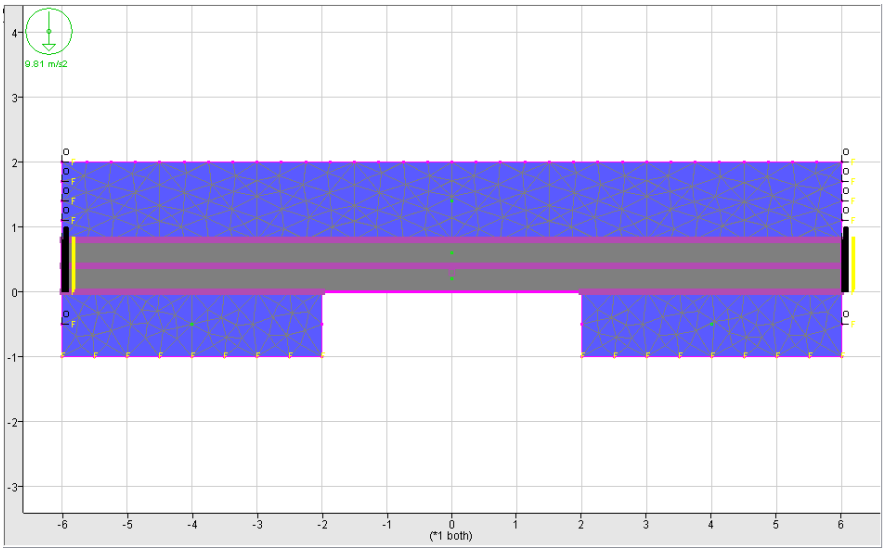
Όσον αφορά την κατακόρυφη τάση σ_{yy} παρατηρείται ότι παρουσιάζει μεγαλύτερες απόλυτες τιμές στην στήριξη (x/L=0) από τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης, σε σχέση με την περίπτωση της αμφίπακτης δοκού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι στηρίξεις πλέον χαρακτηρίζονται από ενδοσιμότητα. Οι τάσεις λειτουργούν ως θλιπτικές λόγω της επιφόρτισης που δέχεται το στρώμα από τον υπερκείμενο σχηματισμό. Στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος, παρατηρείται μια ταύτιση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής και

αναλυτικής λύσης. Πλησίον της στήριξης (x/L=0,1) παρατηρείται μικρή ανάπτυξη της σ_{yy} σε σχέση με την αναλυτική λύση.

Σχετικά με την διατμητική τάση τ_{xy}, στο μέσον του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5) μηδενίζεται, λόγω ανάπτυξης της μέγιστης κάμψης του στρώματος. Στο σημείο ελέγχου πλησίον της στήριξης (x/L=0,1), η τ_{xy} παρουσιάζει μέγιστη τιμή στην κεντρική ίνα του στρώματος και μηδενισμό στις ακραίες ίνες. Πάνω στην στήριξη (x/L=0) παρατηρείται ότι η τ_{xy} δεν μηδενίζεται στην κάτω ακραία ίνα.

3.3 Προσομοίωση διστρωματικής οροφής

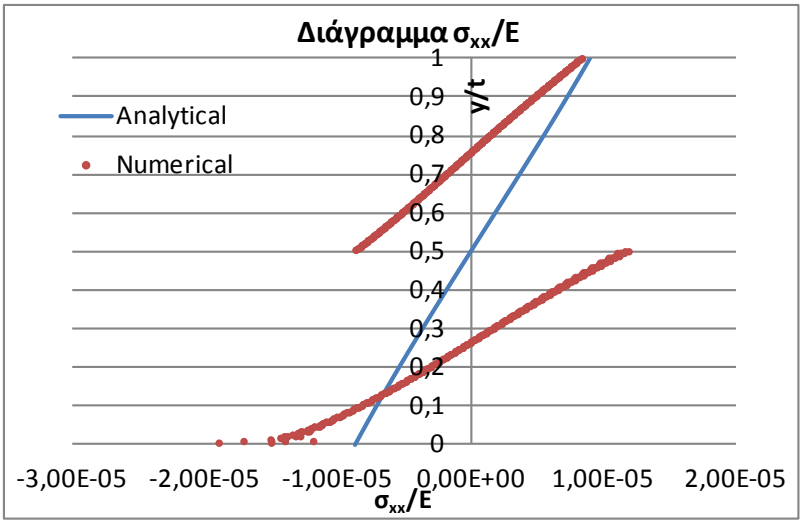
Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 3.2) παρουσιάζεται η προσομοίωση διστρωματικής οροφής, με πάχος εκάστοτε στρώματος t=0,4m, γύρω από το υπόγειο άνοιγμα.



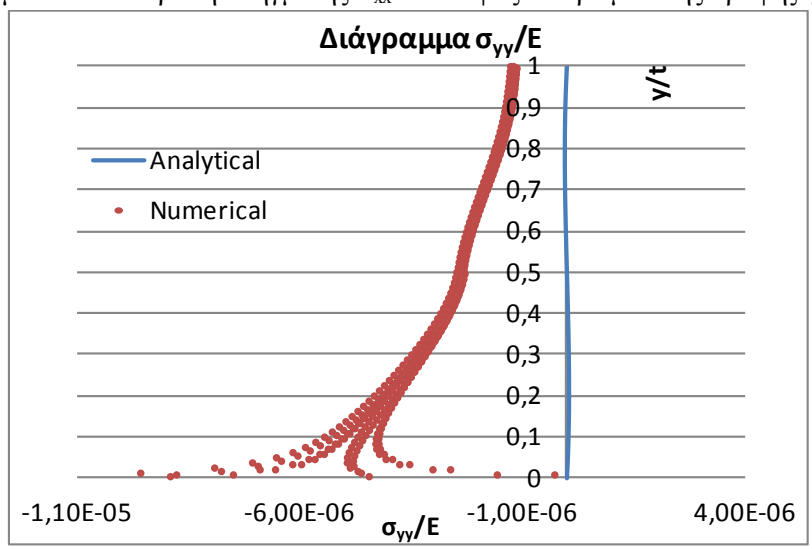
Εικόνα 3.2: Προσομοίωση διστρωματικής οροφής υπόγειου ανοίγματος μέσω του κώδικα Udec 7.0

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ανηγμένων τάσεων, για κάθε σημείο ελέγχου, καθ' ύψος της διστρωματικής οροφής.

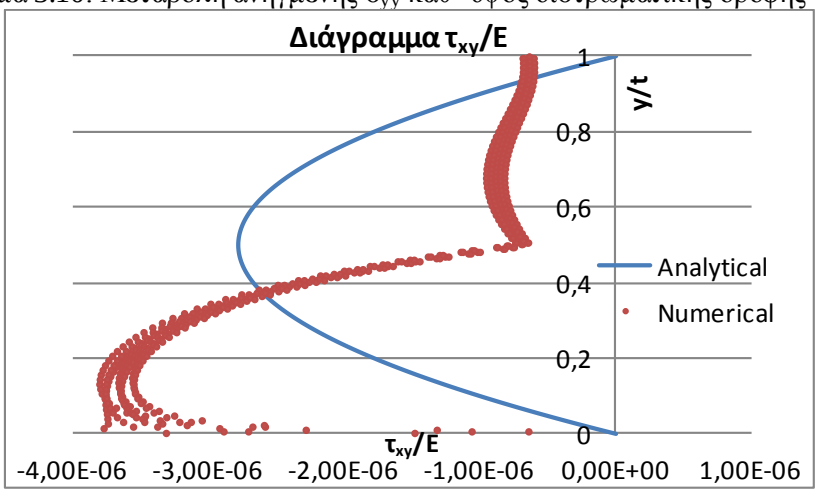
3.3.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης διστρωματικής οροφής x/L=0



Διάγραμμα 3.9: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος διστρωματικής οροφής για x/L=0

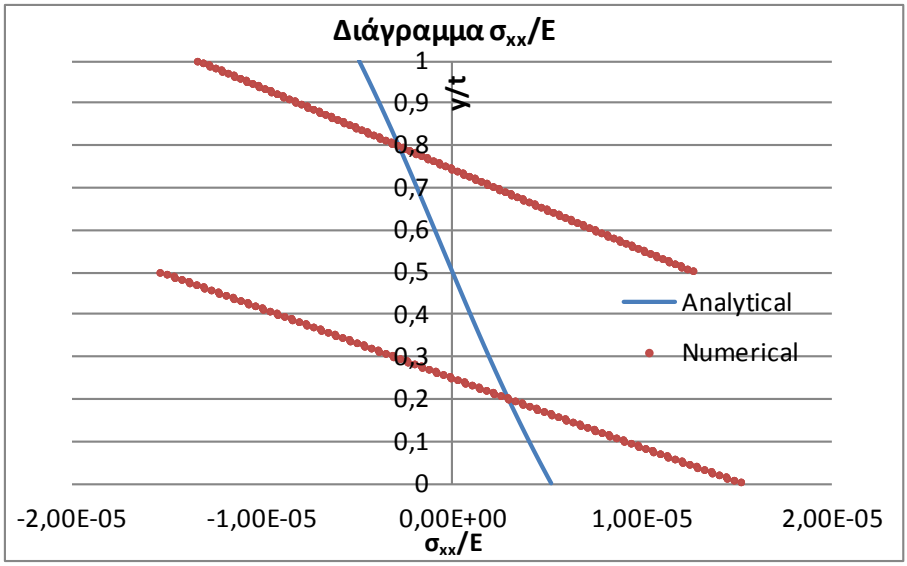


Διάγραμμα 3.10: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος διστρωματικής οροφής για x/L=0

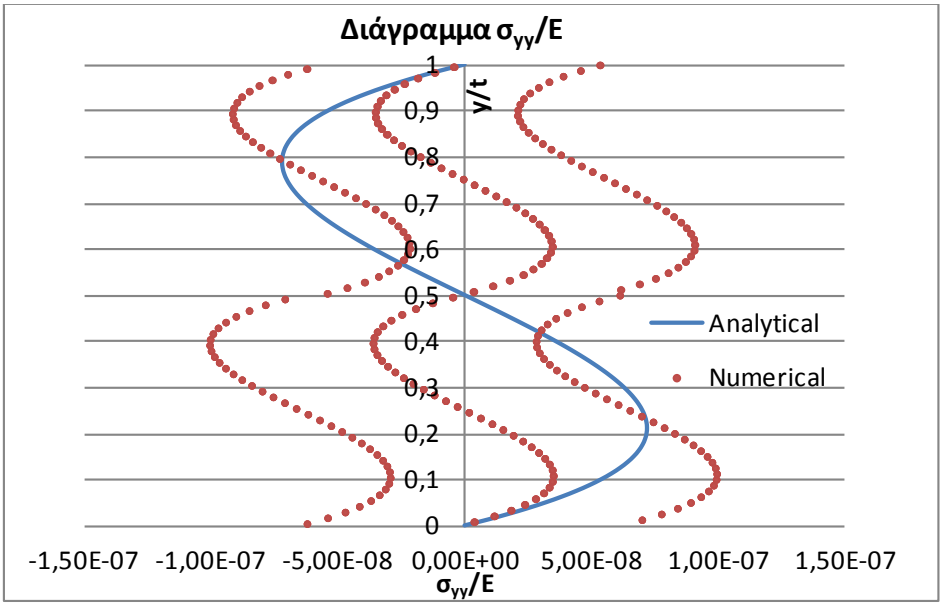


Διάγραμμα 3.11: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος διστρωματικής οροφής για x/L=0

3.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης διστρωματικής οροφής x/L=0,5

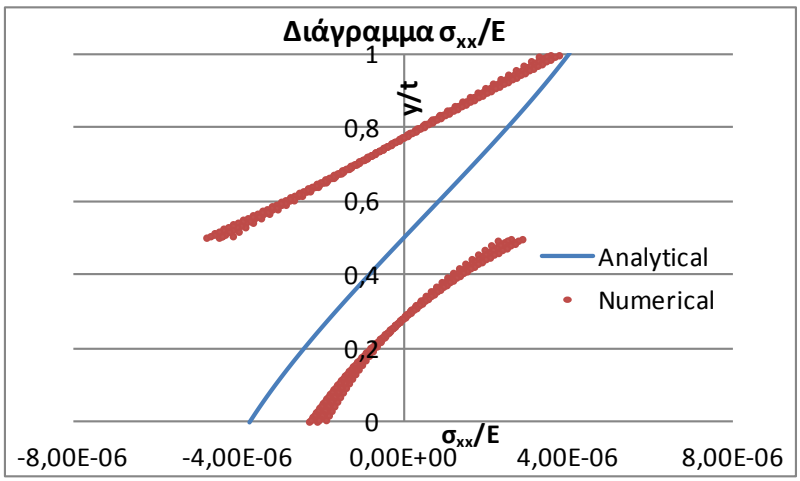


Διάγραμμα 3.12: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος διστρωματικής οροφής για x/L=0,5

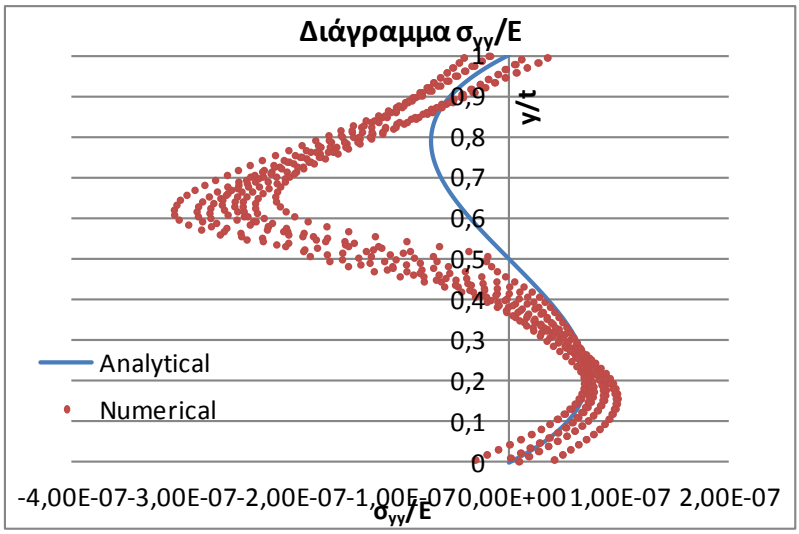


Διάγραμμα 3.13: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος διστρωματικής οροφής για x/L=0,5

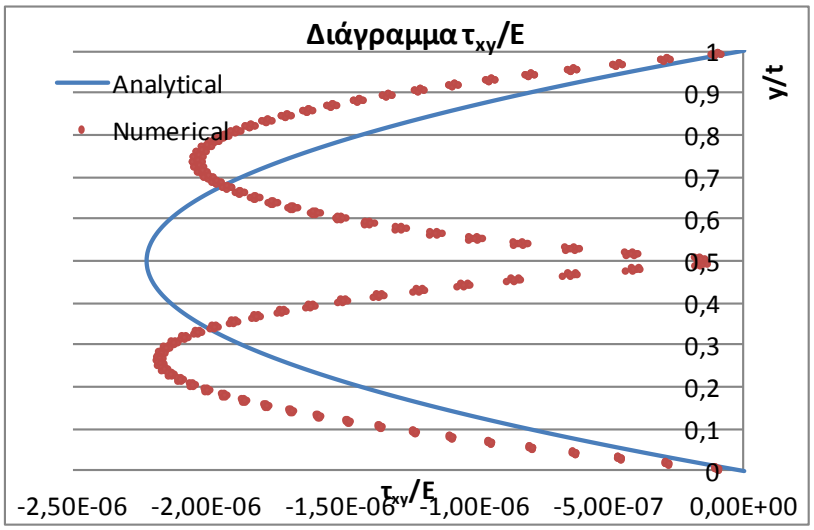
3.3.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης διστρωματικής οροφής x/L=0,1



Διάγραμμα 3.14: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος διστρωματικής οροφής για x/L=0,1



Διάγραμμα 3.15: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος διστρωματικής οροφής για x/L=0,1



Διάγραμμα 3.16: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος διστρωματικής οροφής για x/L=0,1

3.3.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων διστρωματικής οροφής

Τα αποτελέσματα της αριθμητικής λύσης συγκρίνονται με την αναλυτική λύση μονοστρωματικής οροφής, πάχους 0,8m, ίδιου μέτρου ελαστικότητας και υπόγειου ανοίγματος.

Οι καμπύλες των αποτελεσμάτων της αριθμητικής λύσης παρουσιάζουν τις αναμενόμενες διαφορές σε σύγκριση με την αναλυτική λύση, όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 3.2.4, λόγω διαφορετικών συνοριακών συνθηκών. Επιπλέον, στην αναλυτική λύση, θεωρείται ότι το πάχος της οροφής ισούται με το συνολικό πάχος των δύο στρωμάτων. Η σύγκριση αποσκοπεί στον έλεγχο συμπεριφοράς των τάσεων δύο στρωμάτων, σε σχέση με το αν επρόκειτο για ένα.

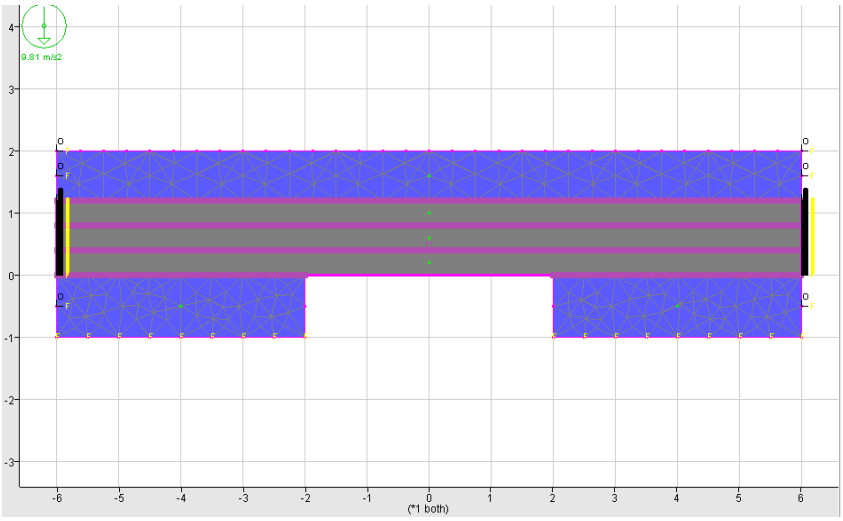
Με βάση τα διαγράμματα της οριζόντιας ανηγμένης ορθής τάσης συμπεραίνεται ότι η σ_{xx} μεταβάλλεται γραμμικά καθ' ύψος του εκάστοτε στρώματος. Όμως πλησίον της στήριξης (x/L=0,1) διαπιστώνεται ότι στο πρώτο στρώμα η συμπεριφορά της, παρεκκλίνει από την γραμμικότητα. Αυτό είναι πιθανό να συμβαίνει διότι, η περιοχή αυτή, παύει να συμπεριφέρεται ελαστικά και περνάει στην ελαστοπλαστική φάση. Επιπλέον, σημειώνεται ότι στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος και στην στήριξη φαίνεται ότι αναπτύσσεται λιγότερο στο δεύτερο στρώμα σε σχέση με το πρώτο.

Όσον αφορά την κατακόρυφη τάση σ_{yy} παρατηρείται η ανάπτυξη της στην στήριξη (x/L=0), περισσότερο, δε, στο πρώτο στρώμα. Οι τάσεις στην στήριξη λειτουργούν ως θλιπτικές. Στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος, παρατηρείται η αναμενόμενη συμπεριφορά, όπου παρουσιάζει μηδενισμό στις ακραίες ίνες και στην κεντρική ίνα του εκάστοτε στρώματος. Πλησίον της στήριξης (x/L=0,1) παρατηρείται ότι στο πρώτο στρώμα είναι εφελκυστική, ενώ στο δεύτερο πρόκειται για θλιπτική τάση.

Σχετικά με την διατμητική τάση τ_{xy}, στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5) μηδενίζεται. Στο σημείο ελέγχου πλησίον της στήριξης (x/L=0,1), η τ_{xy} παρουσιάζει μέγιστη τιμή στην κεντρική ίνα και μηδενισμό στις ακραίες ίνες του εκάστοτε στρώματος. Πάνω στην στήριξη (x/L=0) παρατηρείται ότι οι διατμητικές τάσεις αναπτύσσονται λιγότερο στο δεύτερο στρώμα (υψηλότερο στρώμα).

3.4 Προσομοίωση οροφής τριών στρωμάτων

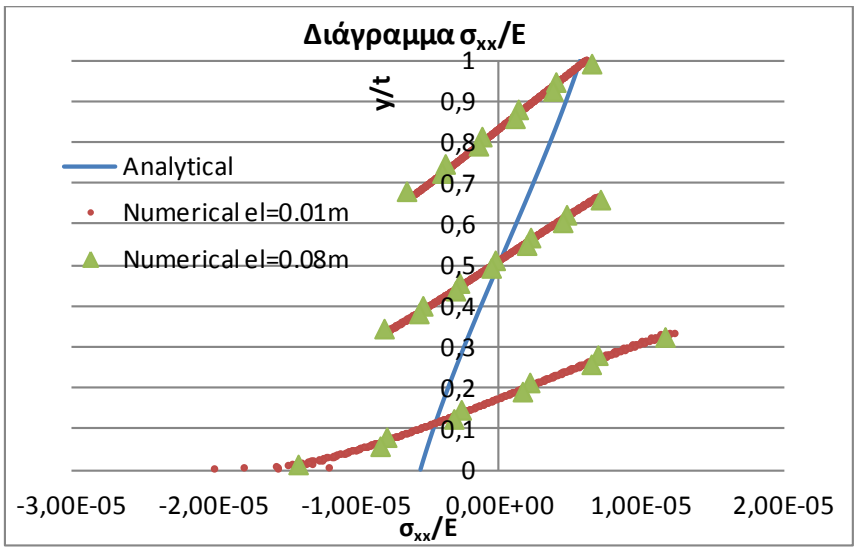
Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 3.3) παρουσιάζεται η προσομοίωση οροφής τριών στρωμάτων, με πάχος εκάστοτε στρώματος t=0,4m, γύρω από το υπόγειο άνοιγμα.



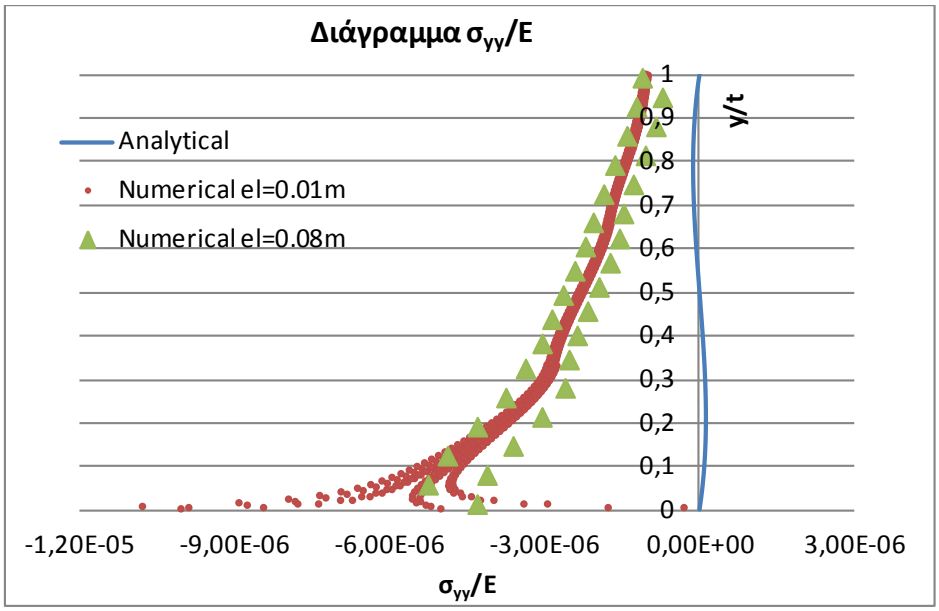
Εικόνα 3.3: Προσομοίωση οροφής τριών στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος μέσω κώδικα Udec 7.0

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ανηγμένων τάσεων, για κάθε σημείο ελέγχου, καθ' ύψος των στρωμάτων οροφής.

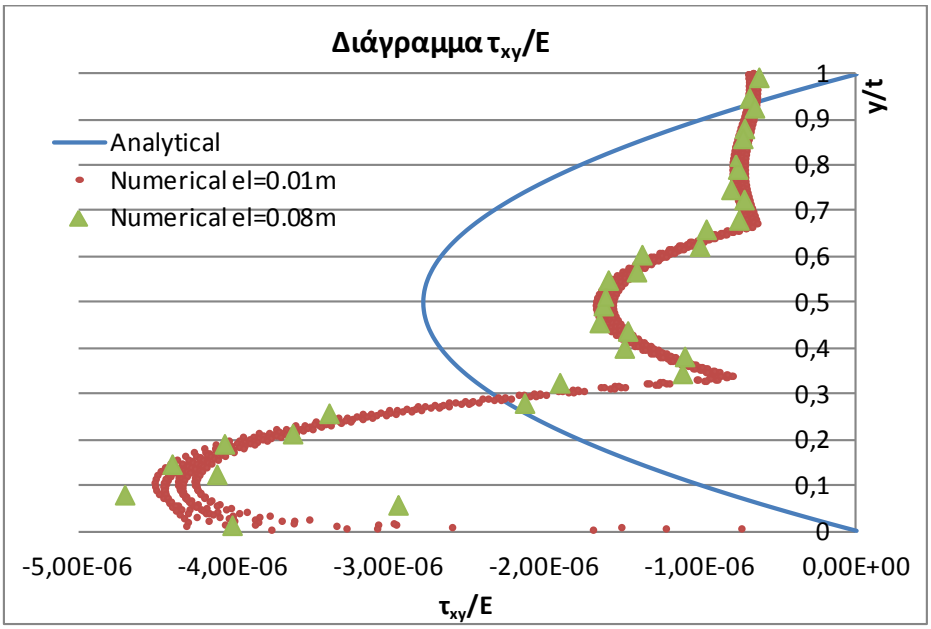
3.4.1 Αποτελέσματα οροφής τριών στρωμάτων x/L=0



Διάγραμμα 3.17: Μεταβολή σ_{xx} καθ' όλο το ύψος στρώσεων, οροφής με τρεις στρώσεις για x/L=0

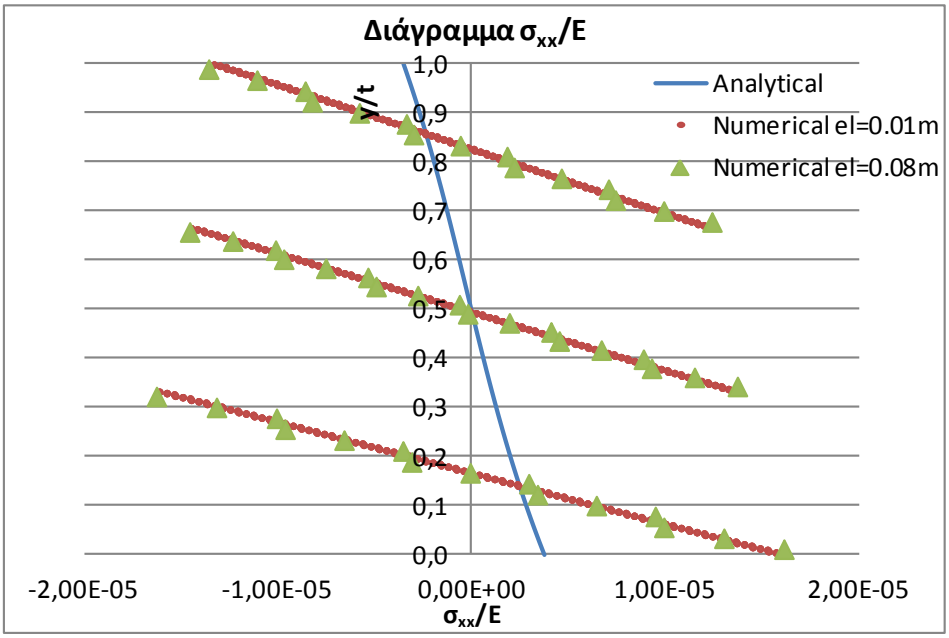


Διάγραμμα 3.18: Μεταβολή σ_{yy} καθ' όλο το ύψος στρώσεων, οροφής με τρεις στρώσεις για x/L=0

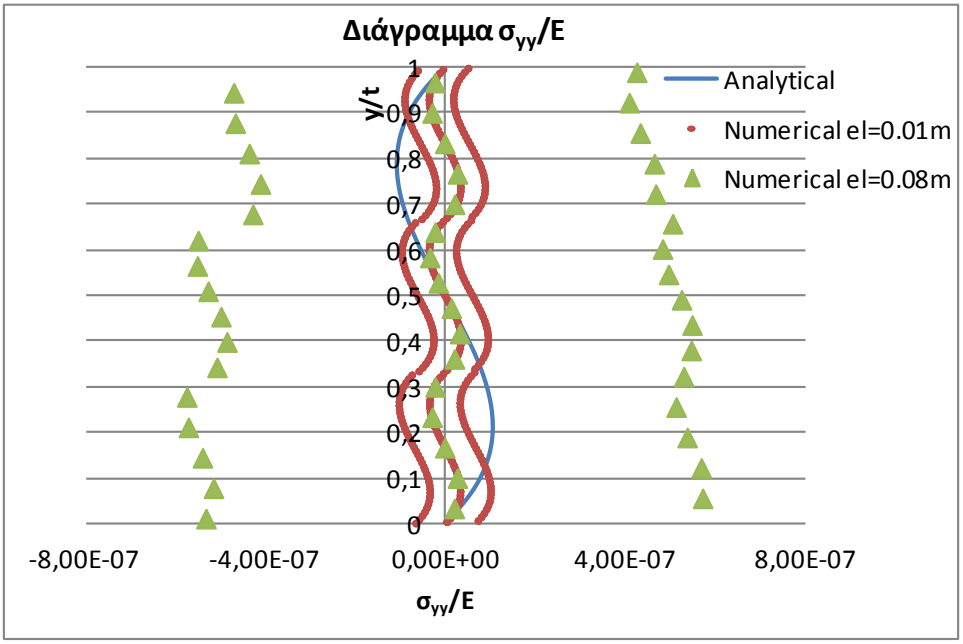


Διάγραμμα 3.19: Μεταβολή τ_{xy} καθ' όλο το ύψος στρώσεων, οροφής με τρεις στρώσεις για x/L=0

3.4.2 Αποτελέσματα οροφής τριών στρωμάτων x/L=0,5

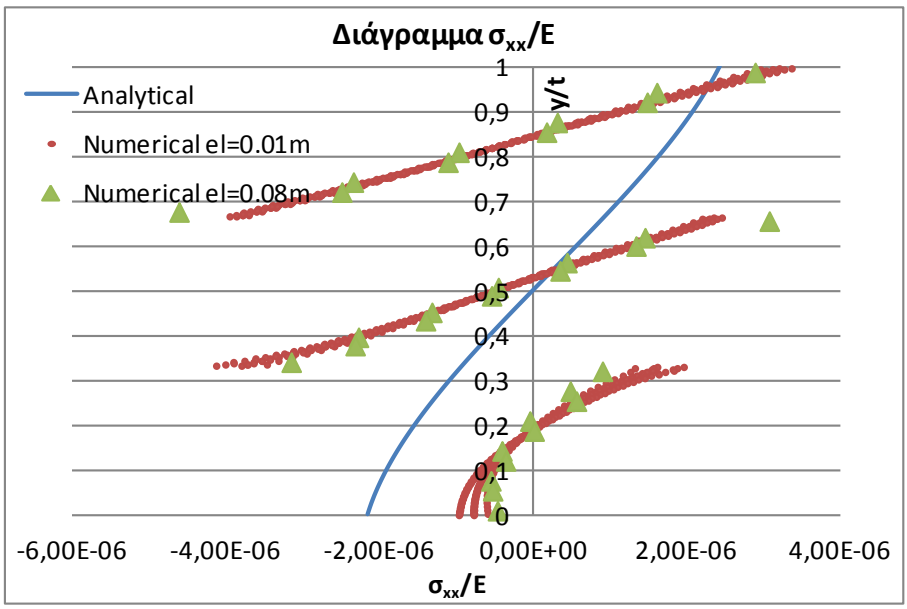


Διάγραμμα 3.20: Μεταβολή σ_{xx} καθ' όλο το ύψος στρώσεων, οροφής με τρεις στρώσεις για x/L=0,5

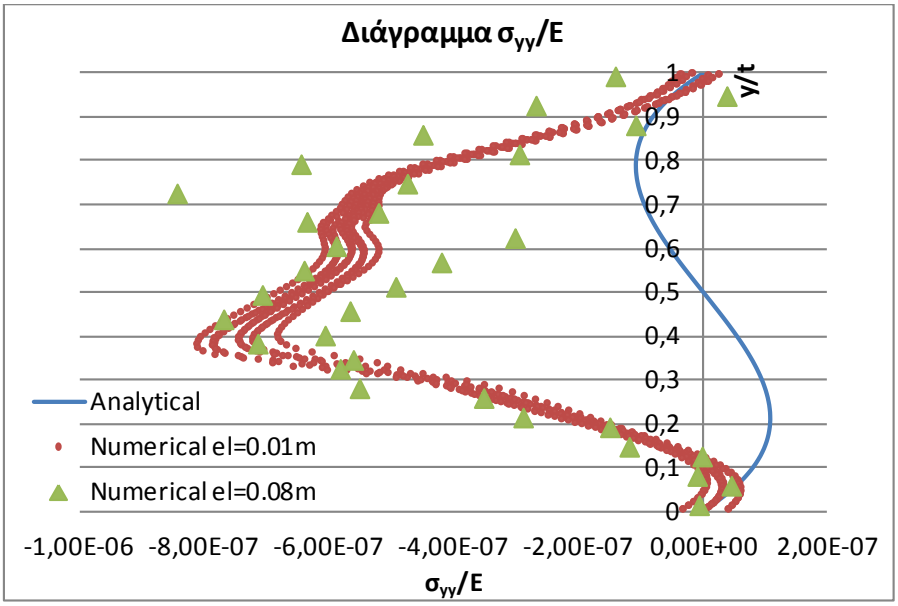


Διάγραμμα 3.21: Μεταβολή σ_{yy} καθ' όλο το ύψος στρώσεων, οροφής με τρεις στρώσεις για x/L=0,5

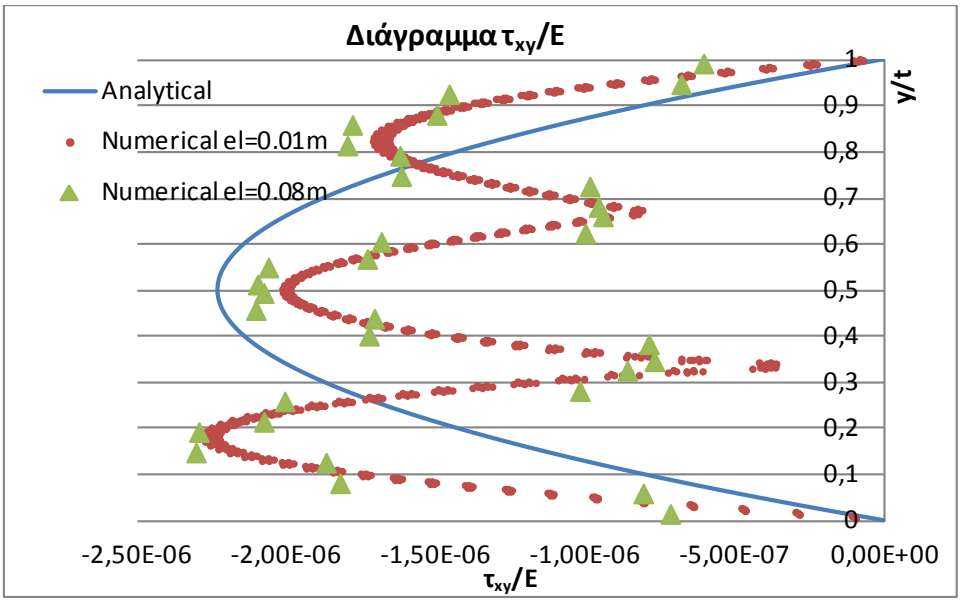
3.4.3 Αποτελέσματα οροφής με τρεις στρώσεις x/L=0,1



Διάγραμμα 3.22: Μεταβολή σ_{xx} καθ' όλο το ύψος στρώσεων, οροφής με τρεις στρώσεις για x/L=0,1



Διάγραμμα 3.23: Μεταβολή σ_{yy} καθ' όλο το ύψος στρώσεων, οροφής με τρεις στρώσεις για x/L=0,1



Διάγραμμα 3.24: Μεταβολή τ_{xy} καθ' όλο το ύψος στρώσεων, οροφής με τρεις στρώσεις για x/L=0,1

3.4.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων οροφής τριών στρωμάτων

Στην περίπτωση της οροφής τριών στρωμάτων πραγματοποιήθηκε έλεγχος των αποτελεσμάτων αριθμητικής επίλυσης του προσομοιώματος με μέγεθος στοιχείων καννάβου 0.08m και για επίλυση του προσομοιώματος με μέγεθος στοιχείων καννάβου 0,01m μέχρι τους 100000 κύκλους. Πράγματι, διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα συγκλίνουν. Στην περίπτωση της κατακόρυφης ορθής τάσης σ_{yy} τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με μέγεθος στοιχείων καννάβου 0,08m έδωσαν ένα μεγαλύτερο εύρος τιμών γύρω από τον κεντρικό άξονα.

Τα αποτελέσματα της αριθμητικής λύσης συγκρίνονται με την αναλυτική λύση μονοστρωματικής οροφής, πάχους 1,2m, ιδίου μέτρου ελαστικότητας και υπόγειου ανοίγματος.

Οι καμπύλες των αποτελεσμάτων της αριθμητικής λύσης παρουσιάζουν τις αναμενόμενες διαφορές σε σύγκριση με την αναλυτική λύση, όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 3.2.4, λόγω διαφορετικών συνοριακών συνθηκών. Επιπλέον, στην αναλυτική λύση, θεωρείται ότι το πάχος της οροφής ισούται με το συνολικό πάχος των τριών στρωμάτων. Η σύγκριση αποσκοπεί στον έλεγχο συμπεριφοράς των τάσεων τριών στρωμάτων, σε σχέση με το αν επρόκειτο για ένα.

Με βάση τα διαγράμματα της οριζόντιας ανηγμένης ορθής τάσης συμπεραίνεται ότι η σ_{xx} μεταβάλλεται γραμμικά καθ' ύψος του εκάστοτε στρώματος. Όμως πλησίον της στήριξης

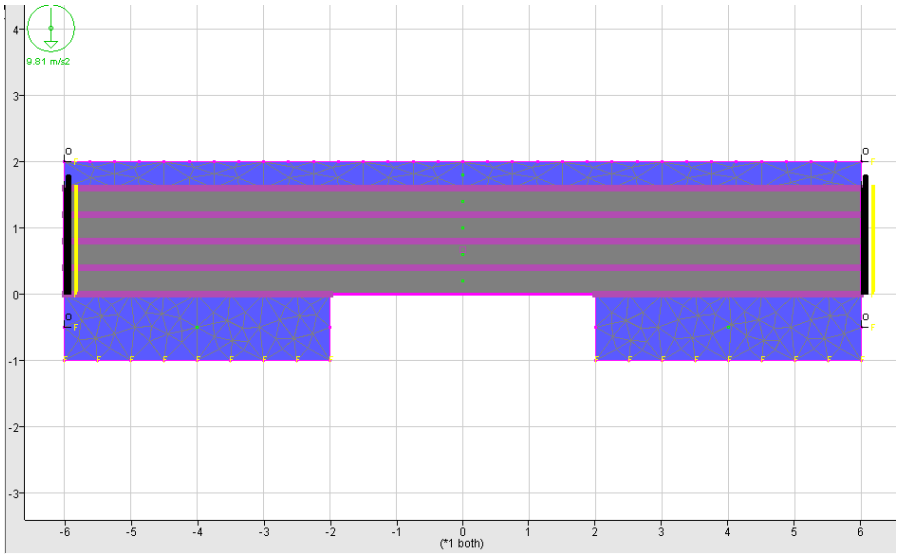
(x/L=0,1) διαπιστώνεται ότι στο πρώτο στρώμα η συμπεριφορά της, παρεκκλίνει από την γραμμικότητα. Επιπλέον, σημειώνεται ότι στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος και στην στήριξη φαίνεται ότι αναπτύσσεται λιγότερο κατά την μετάβαση σε υψηλότερο στρώμα.

Όσον αφορά την κατακόρυφη τάση σ_{yy} παρατηρείται η ανάπτυξη της στην στήριξη (x/L=0), περισσότερο, δε, στο πρώτο στρώμα και λιγότερο κατά την μετάβαση σε υψηλότερο στρώμα. Αυτό συμβαίνει λόγω λιγότερης επιφόρτισης που δέχεται το κάθε στρώμα από τα υπερκείμενα. Οι τάσεις στην στήριξη λειτουργούν ως θλιπτικές. Στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος, παρατηρείται η αναμενόμενη συμπεριφορά, όπου παρουσιάζει μηδενισμό στις ακραίες ίνες και στην κεντρική ίνα του εκάστοτε στρώματος. Πλησίον της στήριξης (x/L=0,1) φαίνεται ότι η οροφή έχει μπει εξ ολοκλήρου σε θλίψη στην θέση αυτή.

Σχετικά με την διατμητική τάση τ_{xy}, στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5) μηδενίζεται. Στο σημείο ελέγχου πλησίον της στήριξης (x/L=0,1), η τ_{xy} παρουσιάζει μέγιστη τιμή στην κεντρική ίνα και ελάχιστη στις ακραίες ίνες του εκάστοτε στρώματος. Πάνω στην στήριξη (x/L=0) είναι φανερό ότι οι διατμητικές τάσεις αναπτύσσονται λιγότερο κατά την μετάβαση σε υψηλότερο στρώμα.

3.5 Προσομοίωση οροφής τεσσάρων στρωμάτων

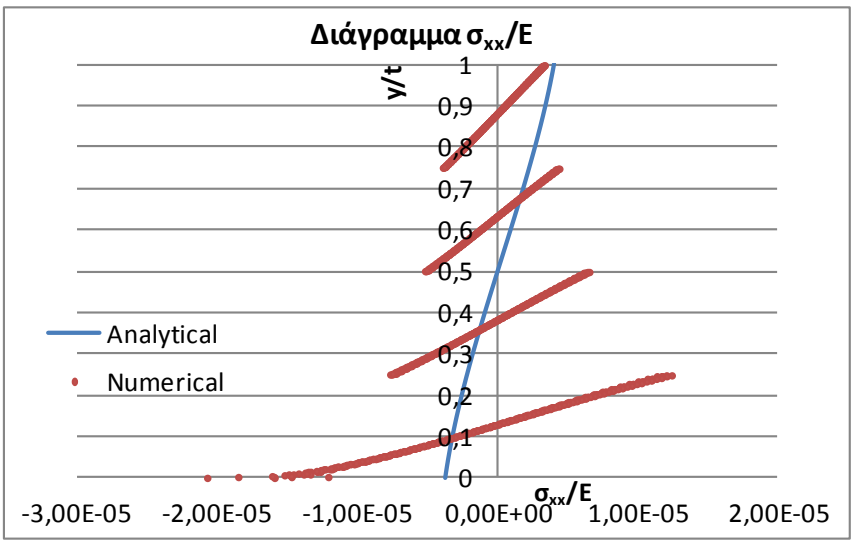
Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 3.4) παρουσιάζεται η προσομοίωση οροφής τεσσσάρων στρωμάτων, με πάχος εκάστοτε στρώματος t=0,4m γύρω από το υπόγειο άνοιγμα.



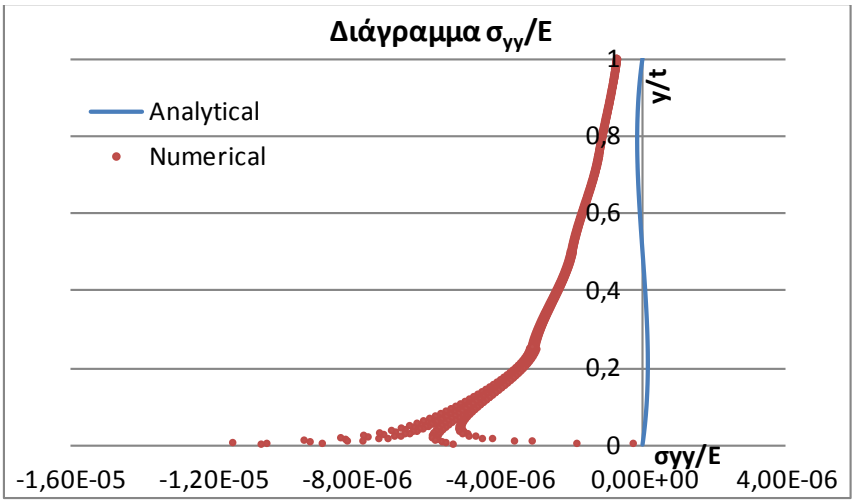
Εικόνα 3.4: Προσομοίωση οροφής τεσσάρων στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κώδικα Udec 7.0

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τάσεων της προσομοίωσης.

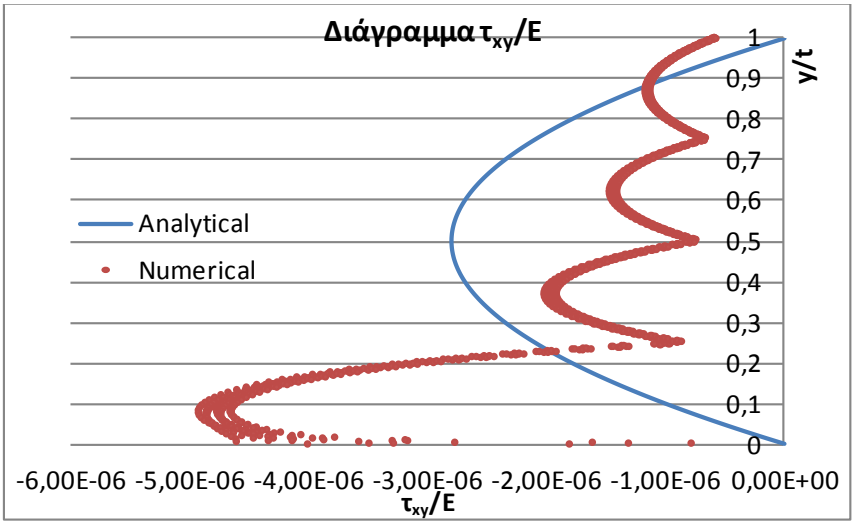
3.5.1 Αποτελέσματα οροφής τεσσάρων στρωμάτων x/L=0



Διάγραμμα 3.25: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0

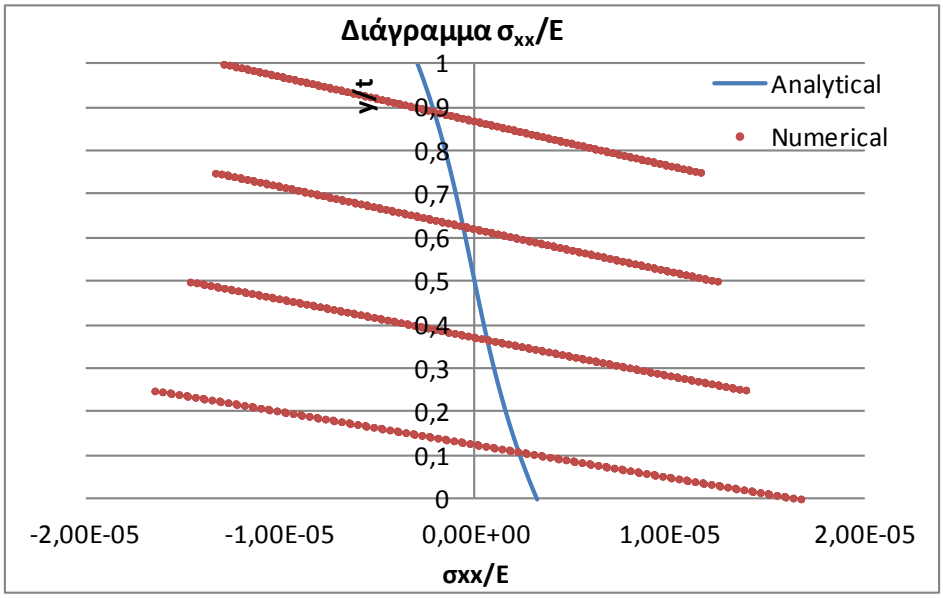


Διάγραμμα 3.26: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0

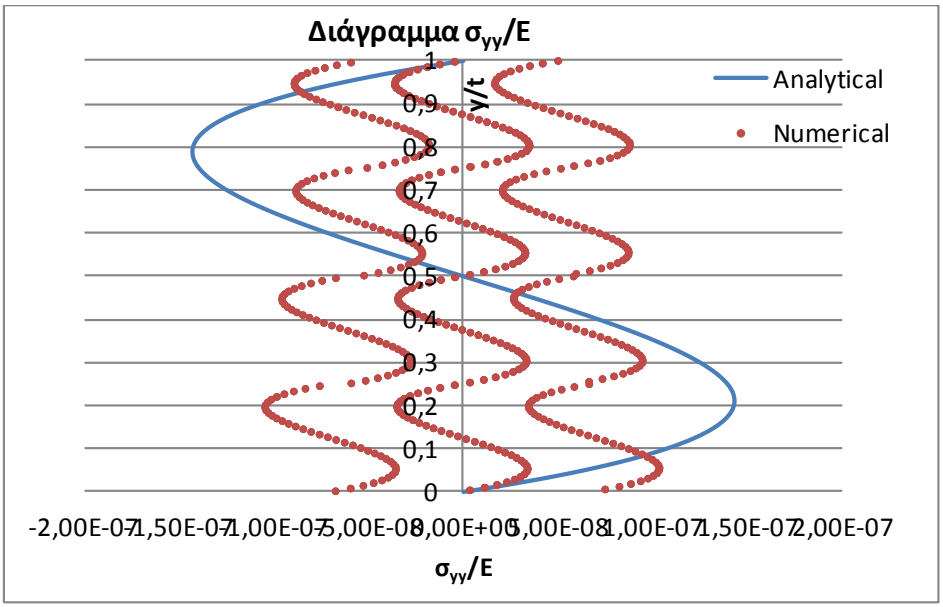


Διάγραμμα 3.27: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0

3.5.2 Αποτελέσματα οροφής τεσσάρων στρωμάτων x/L=0,5

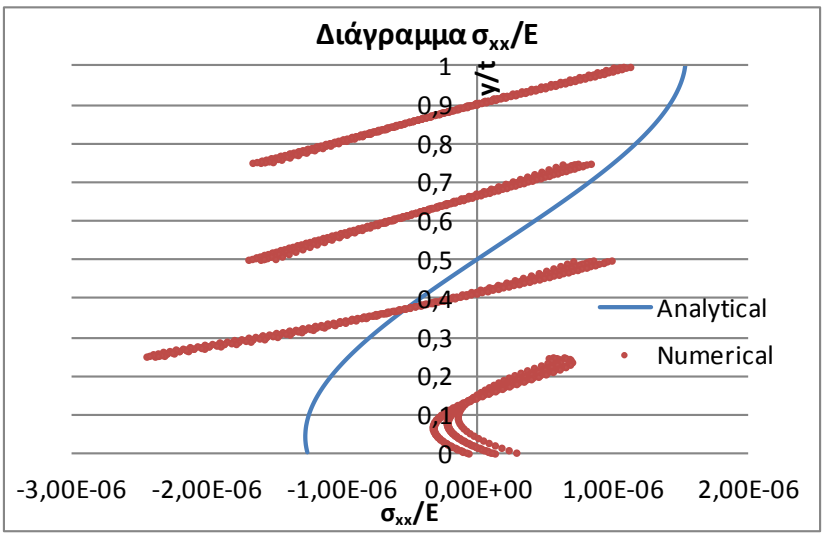


Διάγραμμα 3.28: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0,5

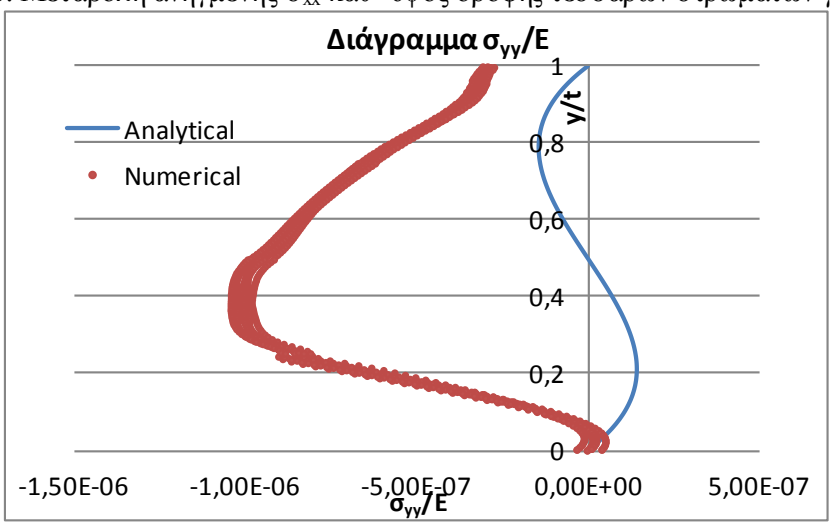


Διάγραμμα 3.29: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0,5

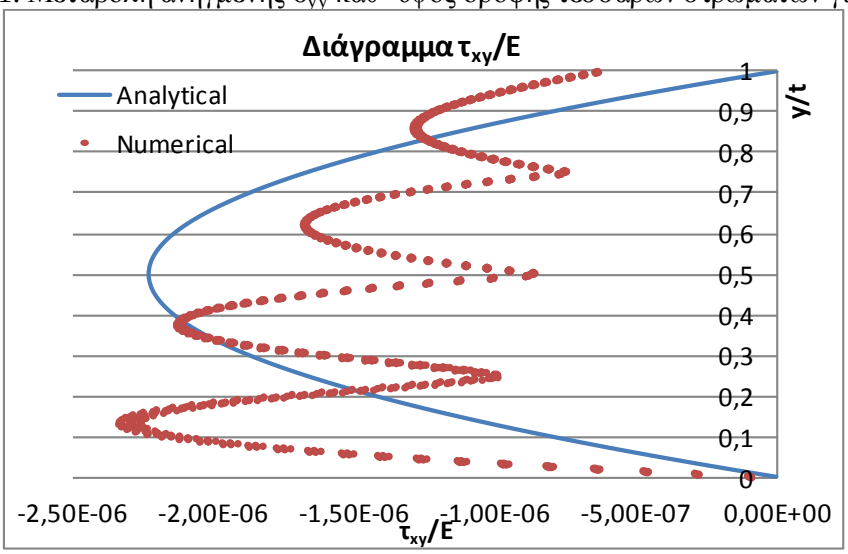
3.5.3 Αποτελέσματα οροφής τεσσάρων στρωμάτων x/L=0,1



Διάγραμμα 3.30: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0,1



Διάγραμμα 3.31: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0,1



Διάγραμμα 3.32: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0,1

3.5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων οροφής τεσσάρων στρωμάτων

Τα αποτελέσματα της αριθμητικής λύσης συγκρίνονται με την αναλυτική λύση μονοστρωματικής οροφής, πάχους 1,6m, ιδίου μέτρου ελαστικότητας και υπόγειου ανοίγματος.

Οι καμπύλες των αποτελεσμάτων της αριθμητικής λύσης παρουσιάζουν τις αναμενόμενες διαφορές σε σύγκριση με την αναλυτική λύση, όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 3.2.4, λόγω διαφορετικών συνοριακών συνθηκών. Επιπλέον, στην αναλυτική λύση, θεωρείται ότι το πάχος της οροφής ισούται με το συνολικό πάχος των τεσσάρων στρωμάτων. Η σύγκριση αποσκοπεί στον έλεγχο συμπεριφοράς των τάσεων τεσσάρων στρωμάτων, σε σχέση με το αν επρόκειτο για ένα.

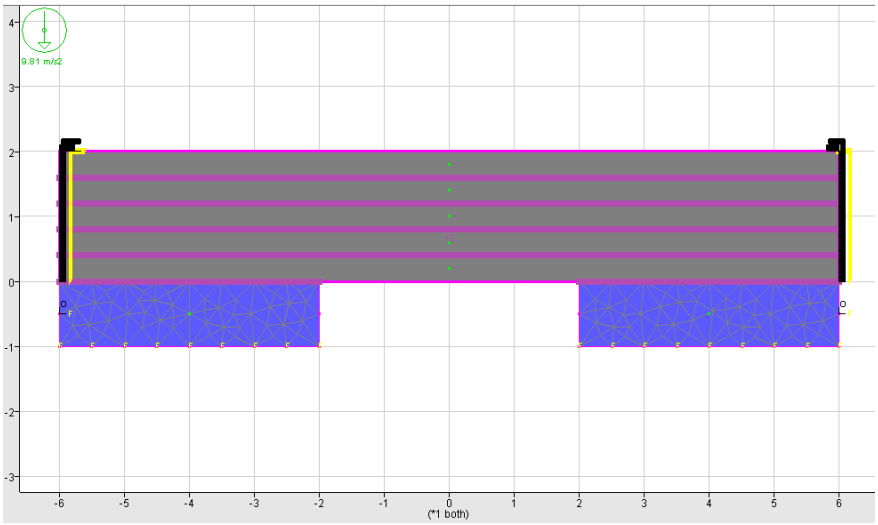
Με βάση τα διαγράμματα της οριζόντιας ανηγμένης ορθής τάσης συμπεραίνεται ότι η σ_{xx} μεταβάλλεται γραμμικά καθ' ύψος του εκάστοτε στρώματος. Όμως πλησίον της στήριξης (x/L=0,1) διαπιστώνεται ότι στο πρώτο στρώμα η συμπεριφορά της, παρεκκλίνει από την γραμμικότητα. Επιπλέον, στην στήριξη (x/L=0) φαίνεται ότι αναπτύσσεται λιγότερο κατά την μετάβαση σε υψηλότερο στρώμα.

Όσον αφορά την κατακόρυφη τάση σ_{yy} παρατηρείται η ανάπτυξη της στην στήριξη (x/L=0), περισσότερο, δε, στο πρώτο στρώμα και λιγότερο κατά την μετάβαση σε υψηλότερο στρώμα. Αυτό συμβαίνει λόγω λιγότερης επιφόρτισης που δέχεται το κάθε στρώμα από τα υπερκείμενα. Οι τάσεις στην στήριξη λειτουργούν ως θλιπτικές. Στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος, παρατηρείται η αναμενόμενη συμπεριφορά, όπου παρουσιάζει μηδενισμό στις ακραίες ίνες και στην κεντρική ίνα του εκάστοτε στρώματος. Πλησίον της στήριξης (x/L=0,1) φαίνεται ότι η οροφή έχει μπει εξ ολοκλήρου σε θλίψη στην θέση αυτή.

Σχετικά με την διατμητική τάση τ_{xy}, στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5) μηδενίζεται. Στο σημείο ελέγχου πλησίον της στήριξης (x/L=0,1), η τ_{xy} παρουσιάζει μέγιστη τιμή στην κεντρική ίνα και ελάχιστη στις ακραίες ίνες του εκάστοτε στρώματος. Πάνω στην στήριξη (x/L=0) είναι φανερό ότι οι διατμητικές τάσεις αναπτύσσονται λιγότερο κατά την μετάβαση σε υψηλότερο στρώμα.

3.6 Προσομοίωση οροφής πέντε στρωμάτων

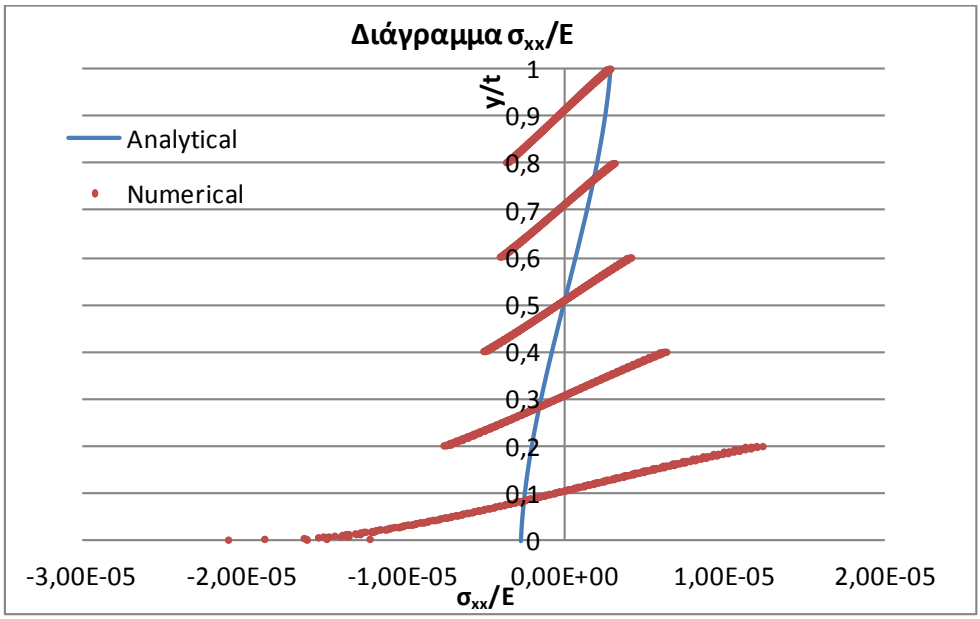
Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 3.5) παρουσιάζεται η προσομοίωση οροφής πέντε στρωμάτων, με πάχος εκάστοτε στρώματος t=0,4m, γύρω από το υπόγειο άνοιγμα.



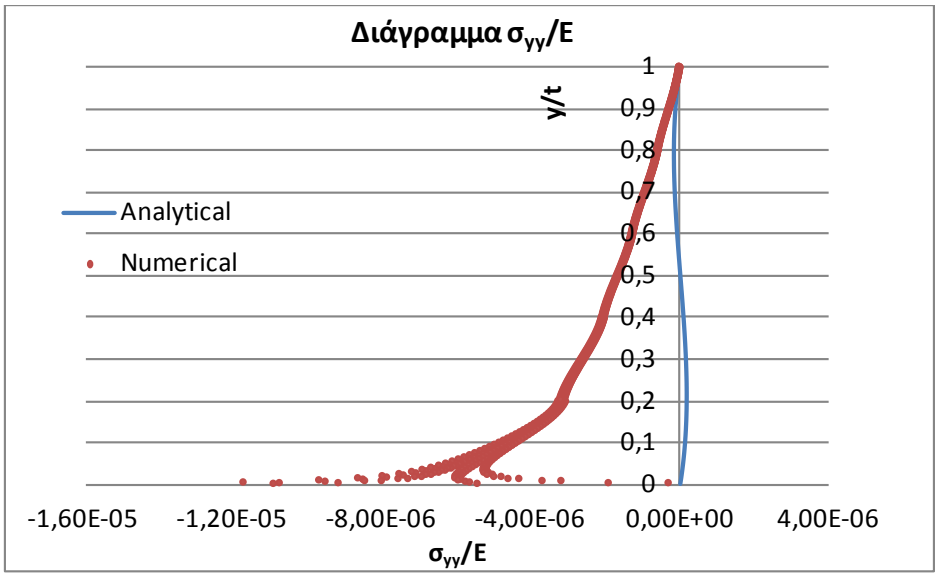
Εικόνα 3.5: Προσομοίωση οροφής πέντε στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος μέσω κώδικα Udec 7.0

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ανηγμένων τάσεων, για κάθε σημείο ελέγχου, καθ' ύψος των στρωμάτων οροφής.

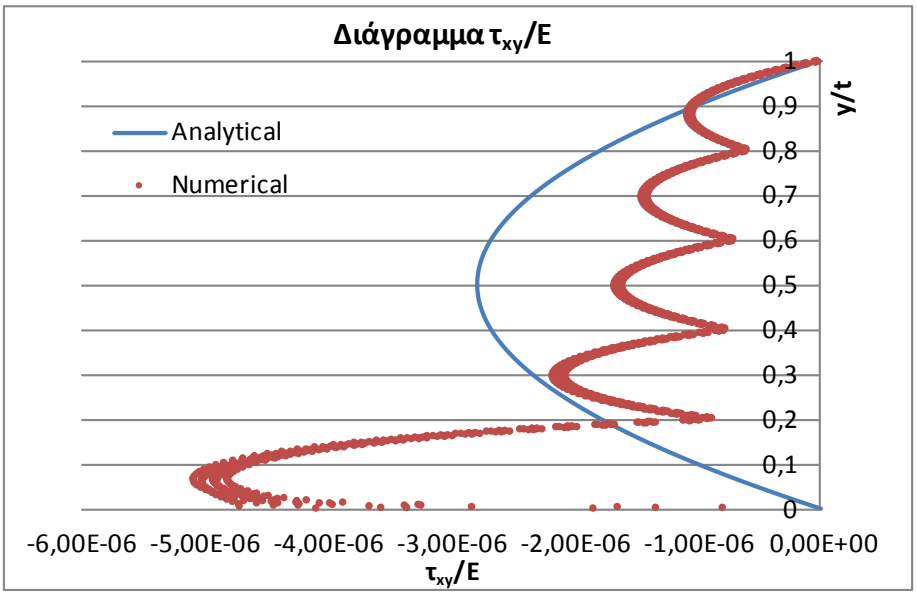
3.6.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης οροφής πέντε στρωμάτων x/L=0



Διάγραμμα 3.33: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0

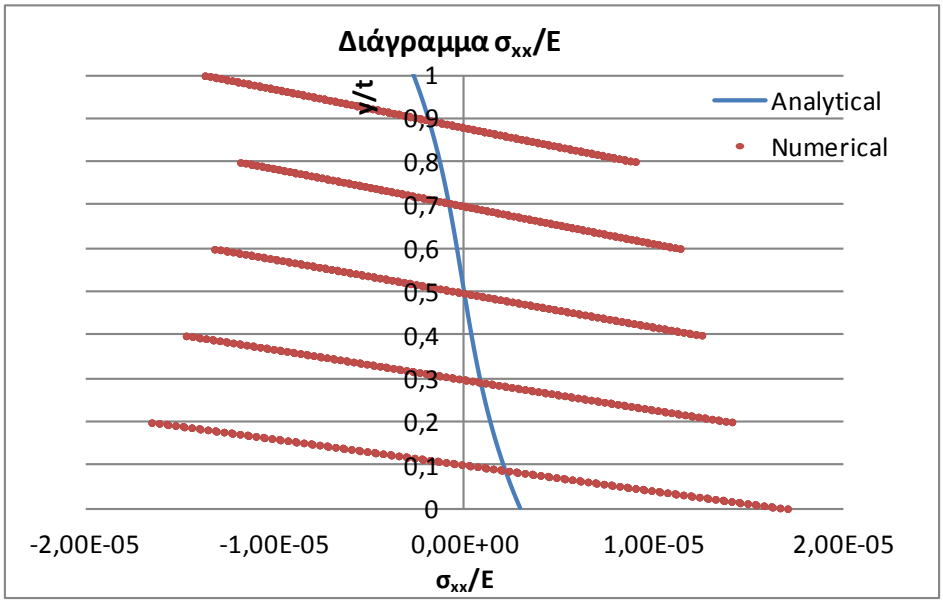


Διάγραμμα 3.34: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xy} καθ' ύψος οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0

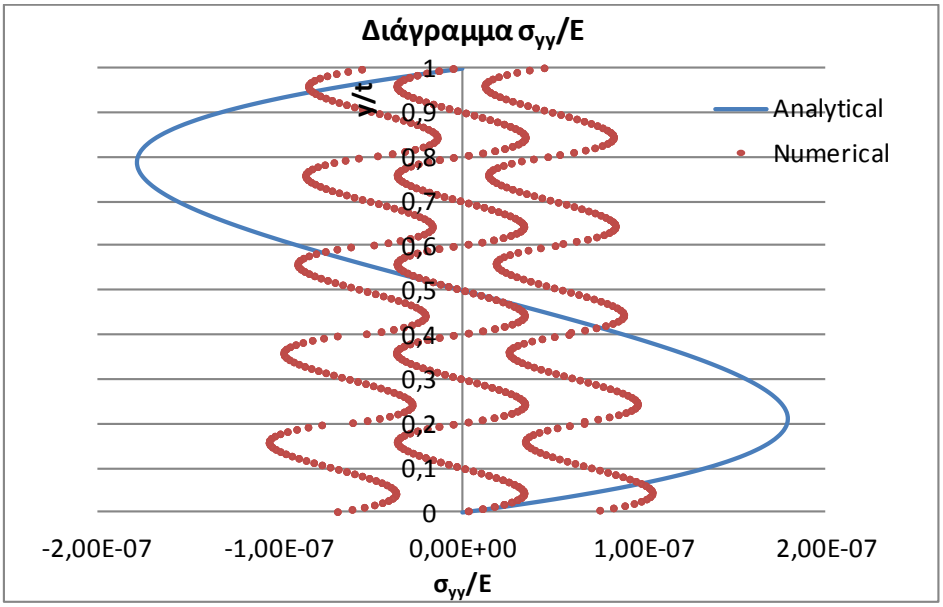


Διάγραμμα 3.35: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0

3.6.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης οροφής πέντε στρωμάτων x/L=0,5

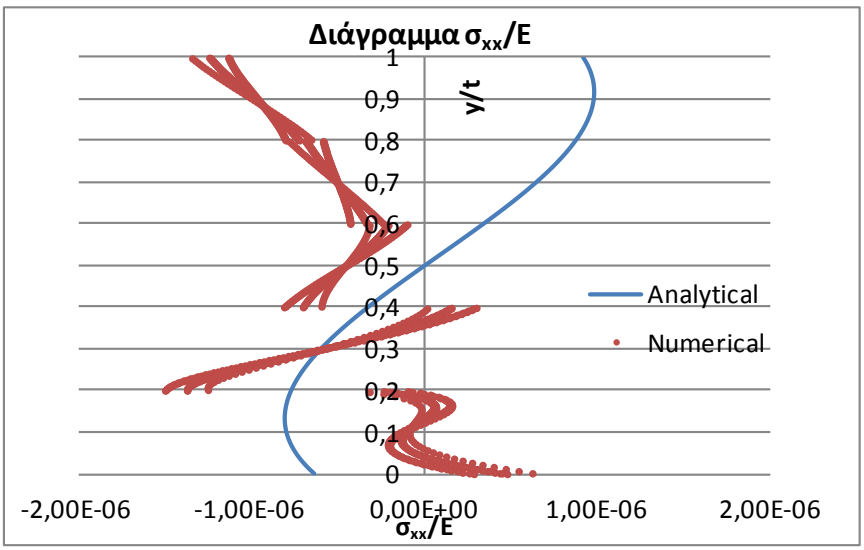


Διάγραμμα 3.36: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0,5

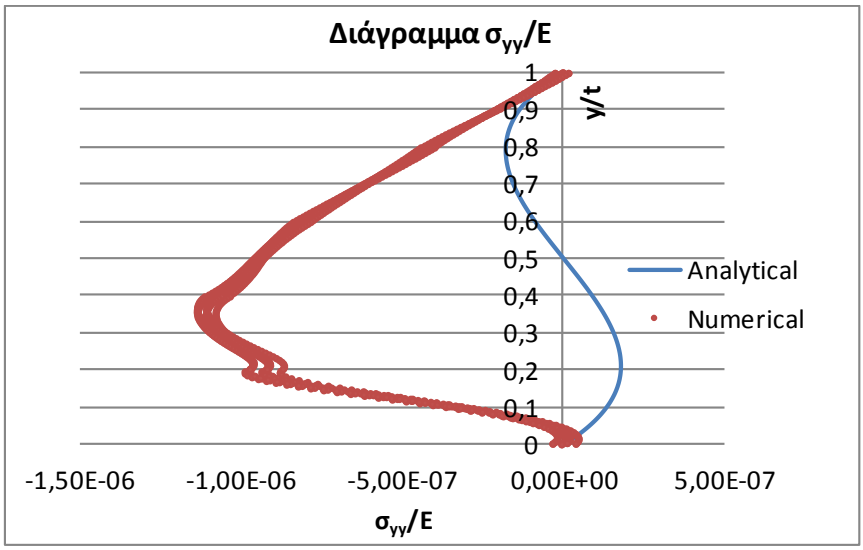


Διάγραμμα 3.37: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0,5

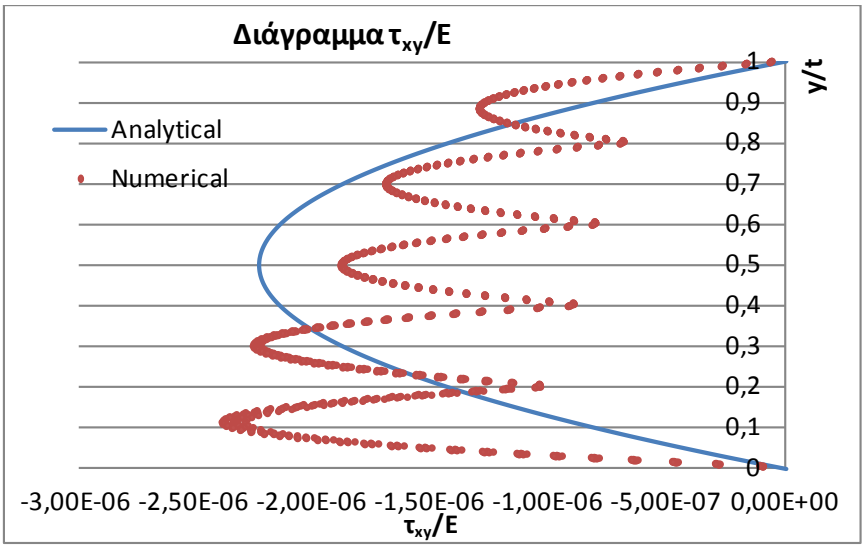
3.6.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης οροφής πέντε στρωμάτων x/L=0,1



Διάγραμμα 3.38: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0,1



Διάγραμμα 3.39: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0,1



Διάγραμμα 3.40: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0,1

3.6.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων οροφής πέντε στρωμάτων

Τα αποτελέσματα της αριθμητικής λύσης συγκρίνονται με την αναλυτική λύση μονοστρωματικής οροφής, πάχους 2m, ιδίου μέτρου ελαστικότητας και υπόγειου ανοίγματος.

Οι καμπύλες των αποτελεσμάτων της αριθμητικής λύσης παρουσιάζουν τις αναμενόμενες διαφορές σε σύγκριση με την αναλυτική λύση, όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 3.2.4, λόγω διαφορετικών συνοριακών συνθηκών. Επιπλέον, στην αναλυτική λύση, θεωρείται ότι το πάχος της οροφής ισούται με το συνολικό πάχος των πέντε στρωμάτων. Η σύγκριση αποσκοπεί στον έλεγχο συμπεριφοράς των τάσεων πέντε στρωμάτων, σε σχέση με το αν επρόκειτο για ένα.

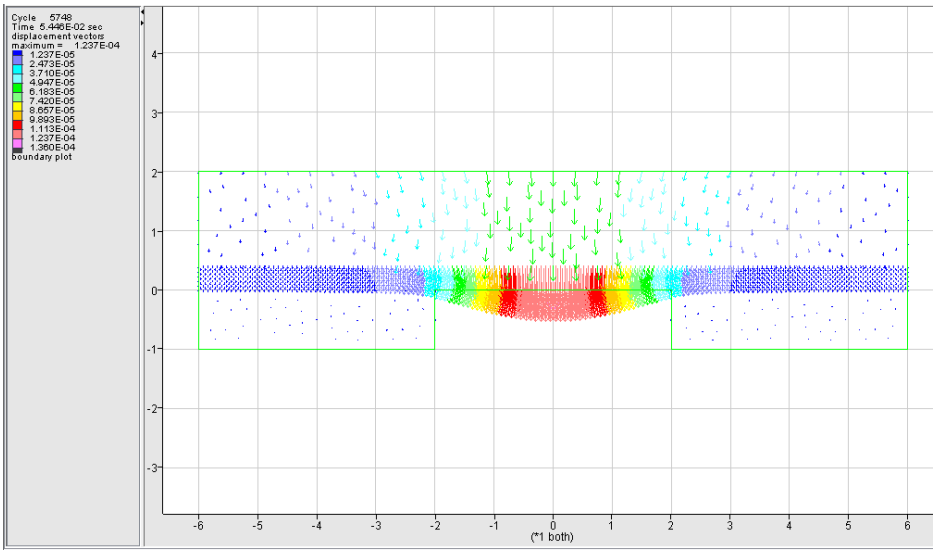
Με βάση τα διαγράμματα της οριζόντιας ανηγμένης ορθής τάσης συμπεραίνεται ότι η σ_{xx} μεταβάλλεται γραμμικά καθ' ύψος του εκάστοτε στρώματος. Όμως πλησίον της στήριξης (x/L=0,1) διαπιστώνεται ότι παρεκκλίνει από την γραμμικότητα.

Όσον αφορά την κατακόρυφη τάση σ_{yy} παρατηρείται η ανάπτυξη της στην στήριξη (x/L=0), περισσότερο, δε, στο πρώτο στρώμα και λιγότερο κατά την μετάβαση σε υψηλότερο στρώμα. Αυτό συμβαίνει λόγω λιγότερης επιφόρτισης που δέχεται το κάθε στρώμα από τα υπερκείμενα. Οι τάσεις στην στήριξη λειτουργούν ως θλιπτικές. Στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος, παρατηρείται η αναμενόμενη συμπεριφορά, όπου παρουσιάζει μηδενισμό στις ακραίες ίνες και στην κεντρική ίνα του εκάστοτε στρώματος. Πλησίον της στήριξης (x/L=0,1) φαίνεται ότι η οροφή έχει μπει εξ ολοκλήρου σε θλίψη στην θέση αυτή.

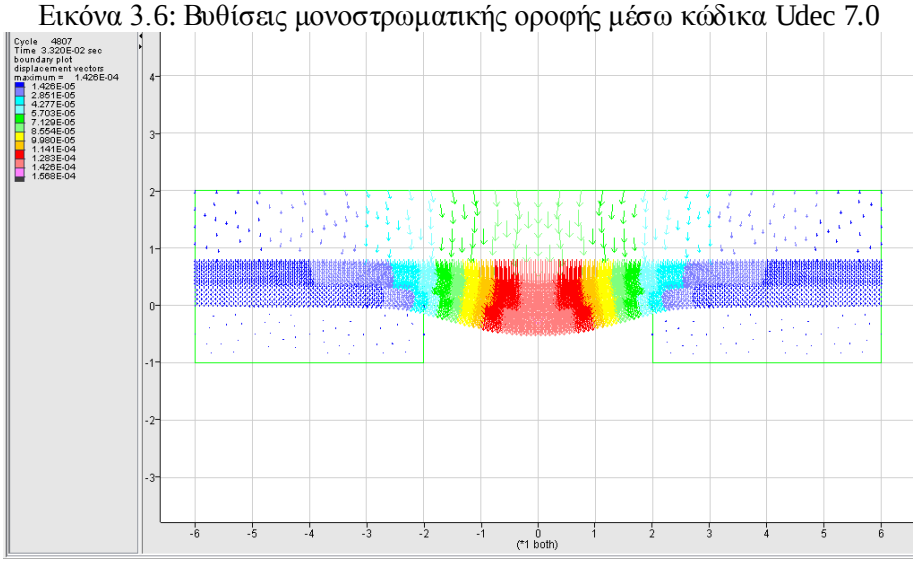
Σχετικά με την διατμητική τάση τ_{xy}, στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5) μηδενίζεται. Στο σημείο ελέγχου πλησίον της στήριξης (x/L=0,1), η τ_{xy} παρουσιάζει μέγιστη τιμή στην κεντρική ίνα και ελάχιστη στις ακραίες ίνες του εκάστοτε στρώματος. Πάνω στην στήριξη (x/L=0) είναι φανερό ότι οι διατμητικές τάσεις αναπτύσσονται λιγότερο κατά την μετάβαση σε υψηλότερο στρώμα.

3.7 Αποτελέσματα βυθίσεων οροφών

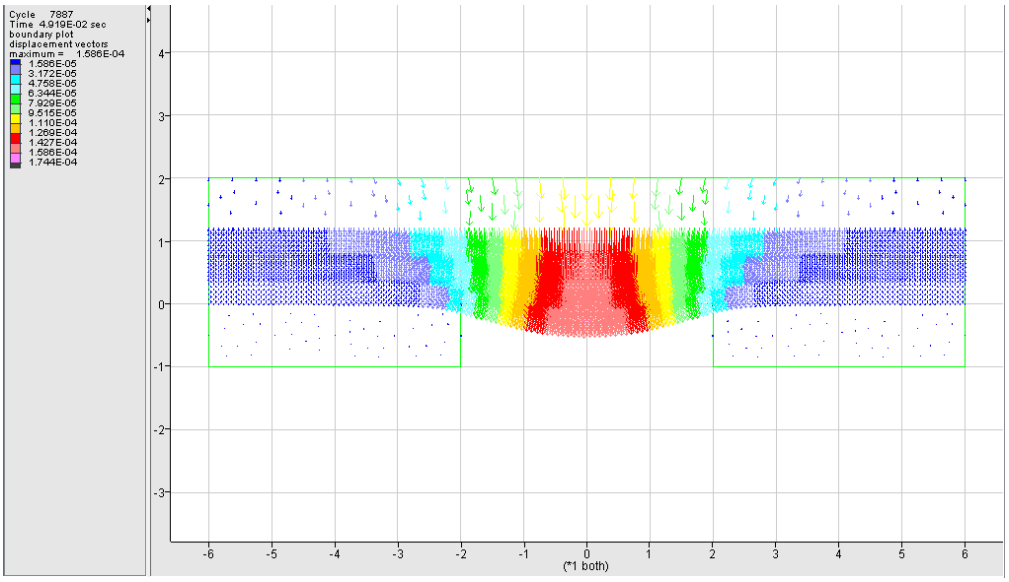
Για κάθε τύπο οροφής, ελέγχεται η βύθιση στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος. Στις παρακάτω εικόνες, παρουσιάζονται οι βυθίσεις των οροφών και στον πίνακα 3.3 συνοψίζονται οι βυθίσεις στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος.



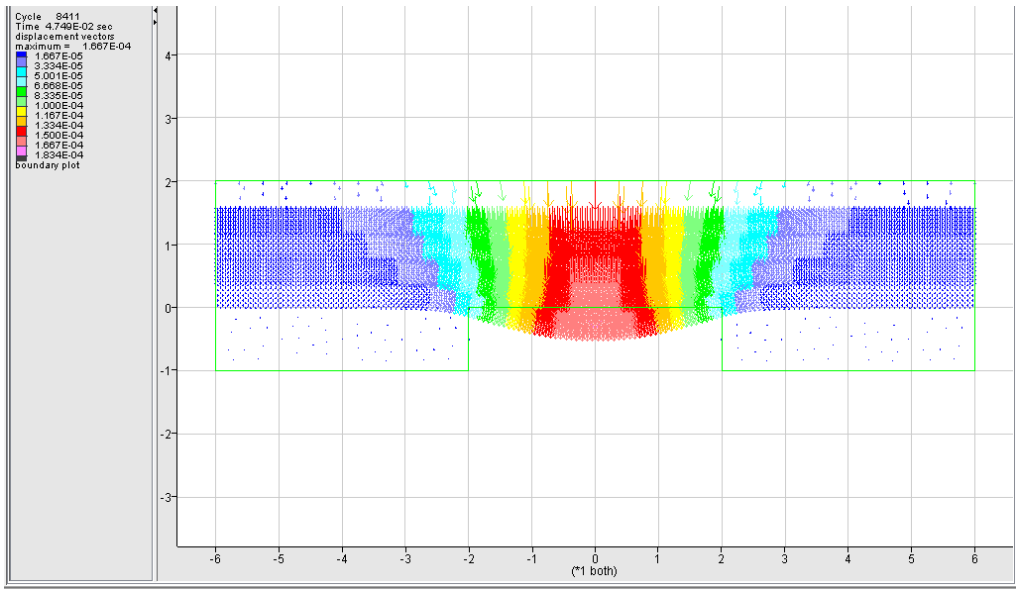
Εικόνα 3.6: Βυθίσεις μονοστρωματικής οροφής μέσω κώδικα Udec 7.0



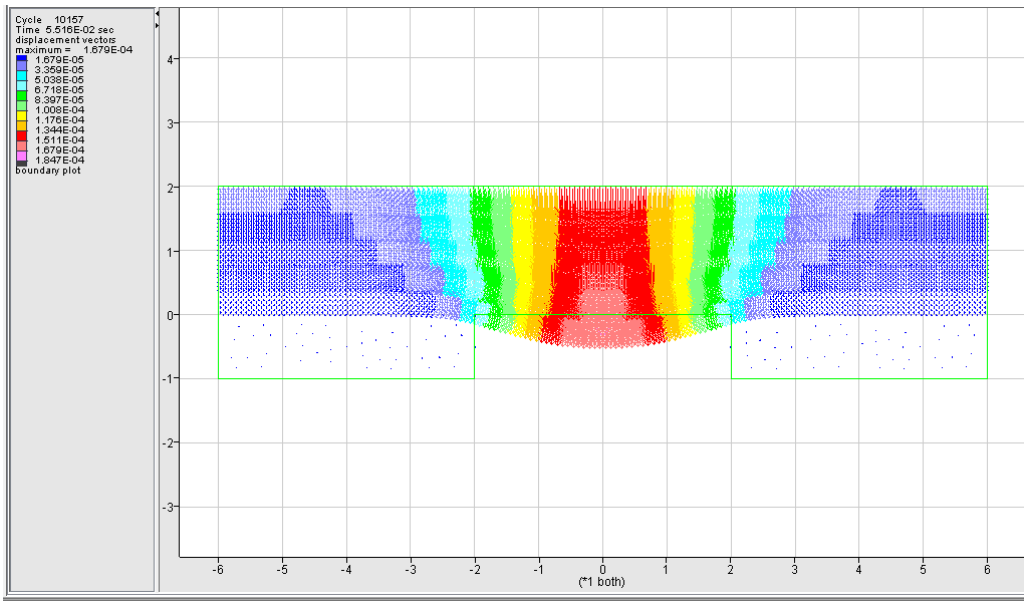
Εικόνα 3.7: Βυθίσεις διστρωματικής οροφής μέσω κώδικα Udec 7.0



Εικόνα 3.8: Βυθίσεις οροφής τριών στρωμάτων μέσω κώδικα Udec 7.0



Εικόνα 3.9: Βυθίσεις οροφής τεσσάρων στρωμάτων μέσω κώδικα Udec 7.0



Εικόνα 3.10: Βυθίσεις οροφής πέντε στρωμάτων μέσω κώδικα Udec 7.0

Πίνακας 3.3: Βυθίσεις στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος

Τύπος οροφής	**Βυθίσεις (m)**
Μονοστρωματική οροφή	1,24E-04
Διστρωματική οροφή	1,43E-04
Οροφή με τρία στρώματα	1,59E-04
Οροφή με τέσσερα στρώματα	1,67E-04
Οροφή με πέντε στρώματα	1,68E-04

Από τα αποτελέσματα των βυθίσεων συμπεραίνεται ότι, όσο αυξάνονται τα στρώματα της οροφής ενός υπόγειου ανοίγματος, αυξάνονται και οι βυθίσεις. Αυτό συμβαίνει διότι αυξάνεται το συνολικό βάρος της οροφής.

Στην συνέχεια, πραγματοποιείται σύγκριση των βυθίσεων των οροφών με τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης (Πίνακας 3.4) για μία δοκό πάχους όσο το συνολικό πάχος των στρωμάτων οροφής.

Πίνακας 3.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων βυθίσεων αναλυτικής λύσης συμπαγούς αμφίπακτης δοκού και αριθμητικής λύσης για κάθε τύπο οροφής

Βυθίσεις (m)				
Τύπος οροφής	Αριθμητική λύση	Συμπαγής δοκός	*Αναλυτική λύση*	*Διαφοροποίηση%*
Μονοστρωματική οροφή	1,24E-04	Δοκός πάχους t=0,4m	4,81E-05	61,2
Διστρωματική οροφή	1,43E-04	Δοκός πάχους t=0,8m	1,61E-05	88,7
Οροφή με τρία στρώματα	1,59E-04	Δοκός πάχους t=1,2m	1,02E-05	93,5
Οροφή με τέσσερα στρώματα	1,67E-04	Δοκός πάχους t=1,6m	8,16E-06	95,1
Οροφή με πέντε στρώματα	1,68E-04	Δοκός πάχους t=2m	7,20E-06	95,7

Η διαφοροποίηση των βυθίσεων της αριθμητικής λύσης σε σχέση με την αναλυτική κυμαίνεται από 51-98%. Η διαφορά αυτή οφείλεται στις διαφορετικές συνοριακές συνθήκες. Στην περίπτωση της αναλυτικής λύσης θεωρείται ότι πρόκειται για μια συμπαγή αμφίπακτη δοκό μήκους όσο είναι το υπόγειο άνοιγμα, όπου η μόνη δύναμη που δέχεται είναι το ίδιον βάρος της. Η προσομοίωση προσεγγίζει τις πραγματικές συνθήκες, όπου οι συνοριακές συνθήκες είναι σε μεγαλύτερη απόσταση από τις παρειές του υπόγειου ανοίγματος. Επιπρόσθετα, η οροφή πέρα από το ίδιον βάρος της, δέχεται και το βάρος των υπερκειμένων και επιπλέον, στις στηρίξεις υπάρχει εγκιβωτισμός σε πέτρωμα που χαρακτηρίζεται από ενδοσιμότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΤΡΩΣΙΓΕΝΕΙΣ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΕΣ ΟΡΟΦΕΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΥΠΟΓΕΙΟ ΑΝΟΙΓΜΑ

4.1 Στρωσιγενείς ρωγματωμένες οροφές γύρω από υπόγειο άνοιγμα

Στο κεφάλαιο αυτό διερευνάται η συμπεριφορά της οροφής, ενός υπόγειου ανοίγματος, για στρωσιγενείς σχηματισμούς που περιλαμβάνουν κατακόρυφες ασυνέχειες.

Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται στον συμπαγή ασβεστόλιθο που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3.1, με την διαφορά ότι εξετάζεται η παρουσία τριών ομάδων κατακόρυφων ασυνεχειών, για κάθε περίπτωση οροφής γύρω από το υπόγειο άνοιγμα. Για την μελέτη αυτή, θεωρείται ότι οι κατακόρυφες ασυνέχειες είναι κενές (δεν εμπεριέχουν κάποιο υλικό πλήρωσης). Οι ομάδες των κατακόρυφων ασυνεχειών είναι οι εξής:

- Κατακόρυφες ασυνέχειες με απόσταση ανά 2m
- Κατακόρυφες ασυνέχειες με απόσταση ανά 1m
- Κατακόρυφες ασυνέχειες με απόσταση ανά 0,5m

Η ενδεικνυόμενη ορθή δυσκαμψία k_n των κατακόρυφων ασυνεχειών εκτιμάται, με βάση τα χαρακτηριστικά του πετρώματος που διακόπτουν, καθώς και το μήκος των στοιχείων καννάβου e_l που χρησιμοποιείται, σύμφωνα με την σχέση:

$$k_n = \frac{(K + \frac{4}{3} * G)}{e_l}$$

Η διατμητική δυσκαμψία των ασυνεχειών k_s είναι:

$$k_s = \frac{k_n}{10}$$

Παρακάτω, στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται, συγκεντρωτικά, τα εν λόγω μεγέθη.

Πίνακας 4.1: Μεγέθη για την εκτίμηση της δυσκαμψίας των κατακόρυφων ασυνεχειών

Χαρακτηριστικά Ασβεστολίθου	
Μέτρο Διόγκωσης K (GPa)	22,62
Μέτρο Διάτμησης G (GPa)	11,05
Παράμετρος προσομοιώσεων	
Μέγεθος στοιχείων καννάβου e_l (m)	0,01
Χαρακτηριστικά κατακόρυφων συνεχειών	
Ορθή δυσκαμψία ασυνεχειών k_n (1/GPa)	3700
Διατμητική δυσκαμψία ασυνεχειών k_s (1/GPa)	370

Η μελέτη πραγματοποιείται για την περίπτωση οροφής που περιλαμβάνει από ένα έως πέντε στρώματα, με πάχος στρώματος 0,4 μέτρα και για τρεις ομάδες κατακόρυφων ασυνεχειών.

Για την εκάστοτε προσομοίωση, εξετάζονται οι αντίστοιχες τρεις θέσεις ελέγχου, όπως στην περίπτωση που τα στρώματα είναι συνεχή (Κεφάλαιο 3), από την αριστερή παρειά του ανοίγματος.

Αυτές είναι:

- Πάνω στην στήριξη του ανοίγματος: $\frac{x}{L}=0$
- Στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος: $\frac{x}{L}=0,5$
- Πλησίον της παρειάς: $\frac{x}{L}=0,1$

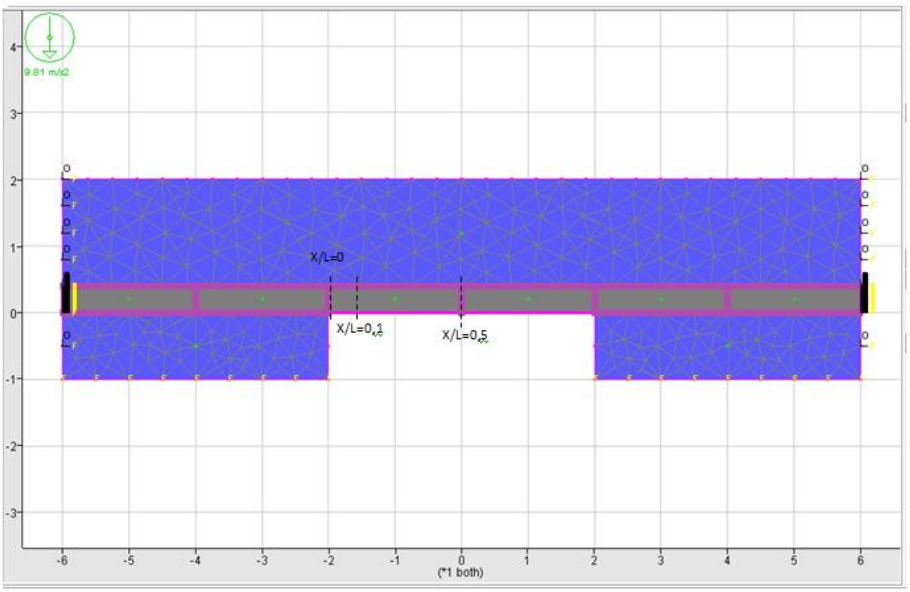
Οι κατακόρυφες ασυνέχειες, στις τρεις ομάδες που εξετάζονται, εμφανίζονται πάνω στην στήριξη του ανοίγματος (x/L=0) και στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5). Σε αυτά τα σημεία μελετώνται οι ορθές τάσεις, που αναπτύσσονται πάνω στην ασυνέχεια και το άνοιγμα τους.

Στο σημείο ελέγχου πλησίον της παρειάς (x/L=0,1), ελέγχονται οι τάσεις, των οποίων τα αποτελέσματα, συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της προσομοίωσης των συνεχών οροφών, ώστε να εξεταστεί η επίδραση τους.

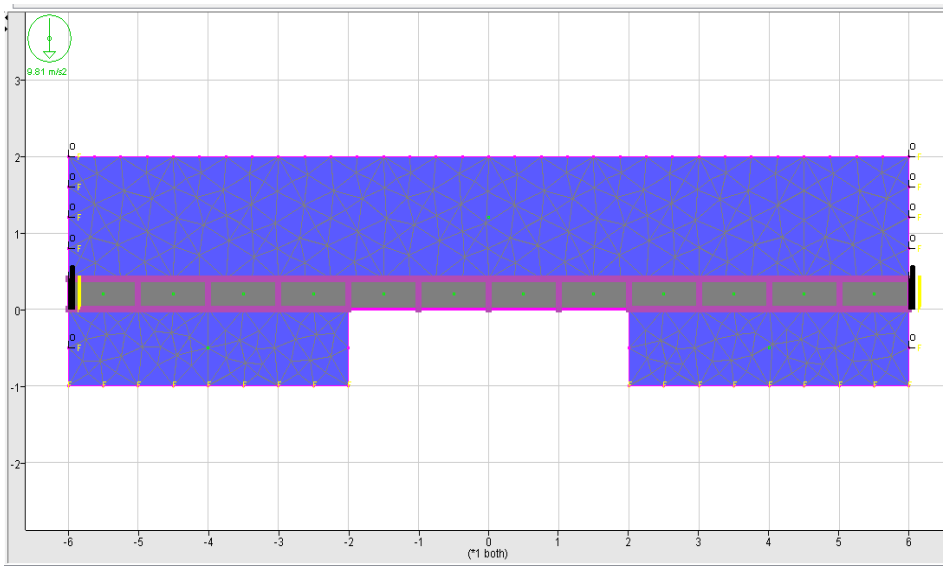
Για κάθε προσομοίωση λαμβάνονται οι βυθίσεις στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος.

4.2 Προσομοιώσεις μονοστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες

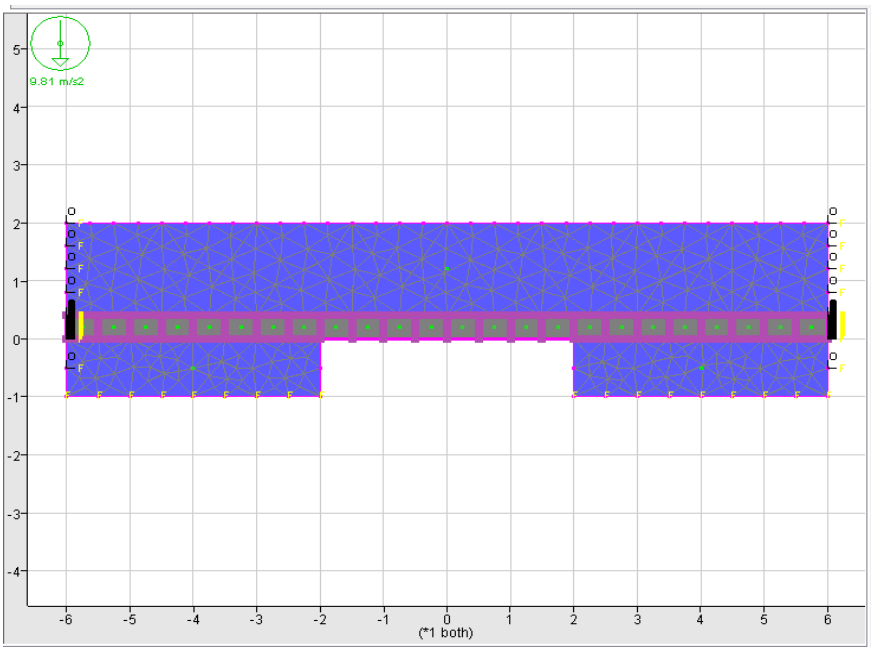
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής με πάχος t=0,4m



Εικόνα 4.1: Προσομοίωση μονοστρωματικής οροφής υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m μέσω κώδικα Udec 7.0 και αναπαράσταση σημείων ελέγχου



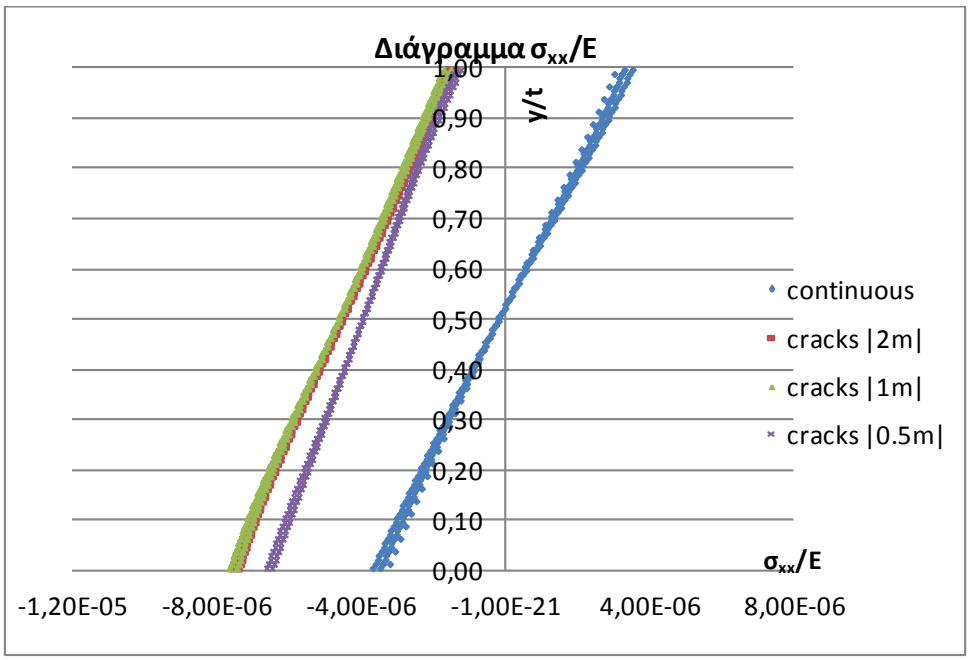
Εικόνα 4.2: Προσομοίωση μονοστρωματικής οροφής υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 1m μέσω κώδικα Udec 7.0



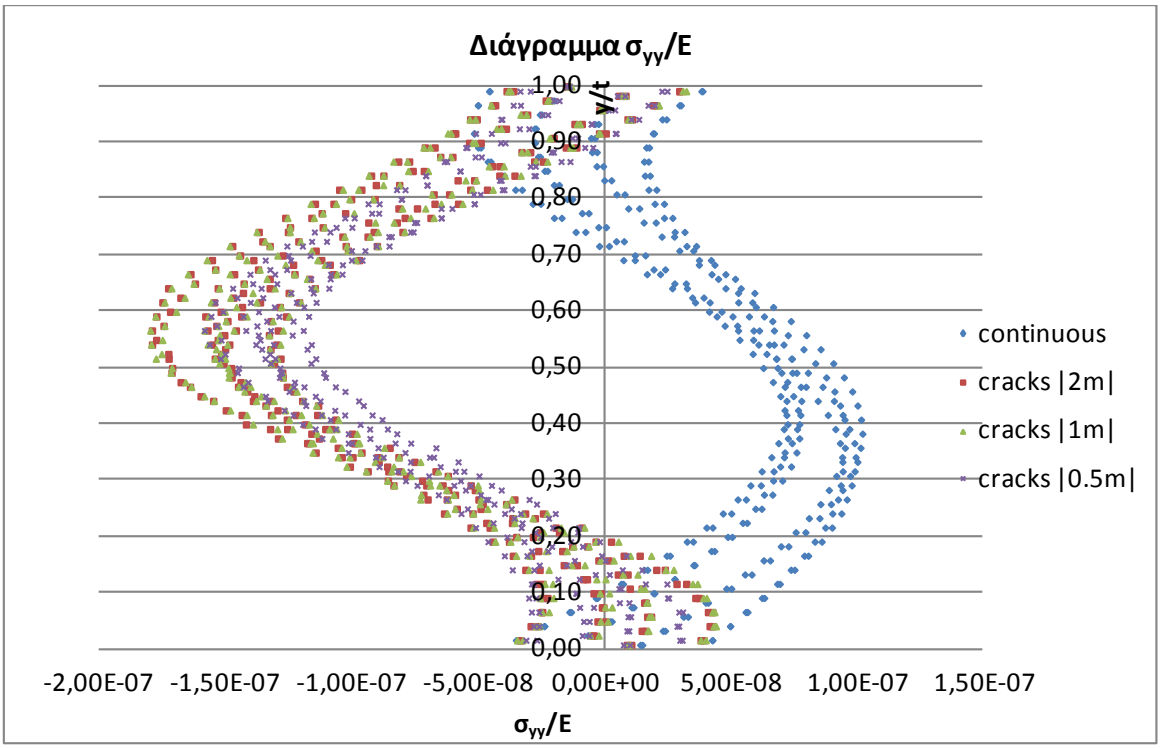
Εικόνα 4.3: Προσομοίωση μονοστρωματικής οροφής υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 0,5m μέσω κώδικα Udec 7.0

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων.

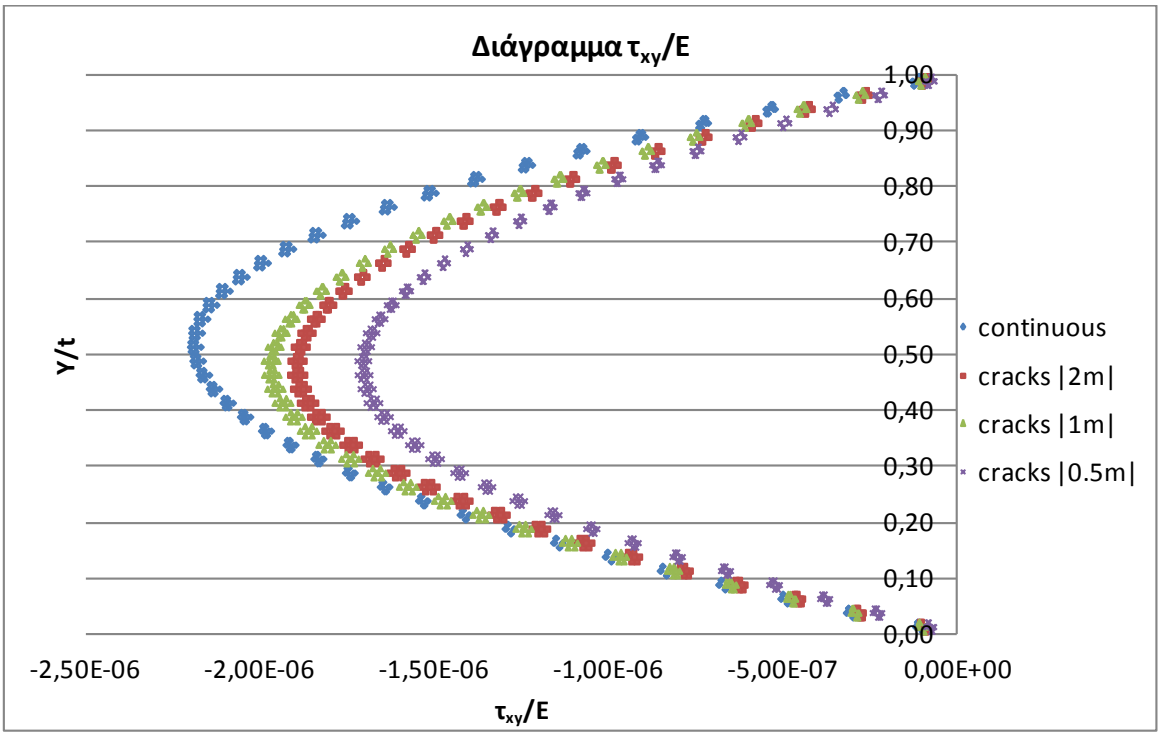
4.2.1 Αποτελέσματα μονοστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,1



Διάγραμμα 4.1: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής για x/L=0,1

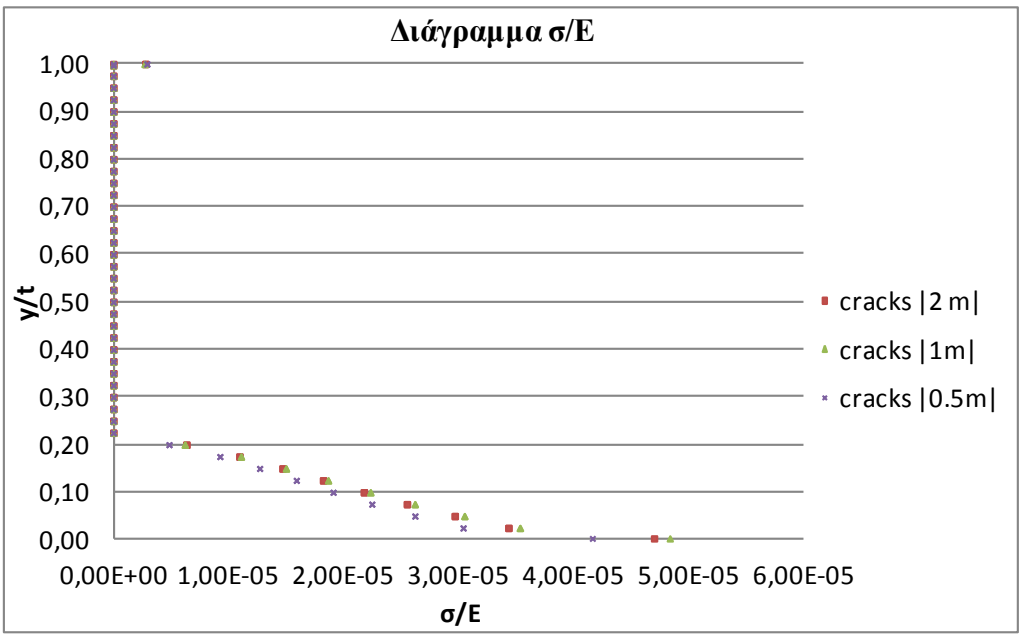


Διάγραμμα 4.2: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής για x/L=0,1

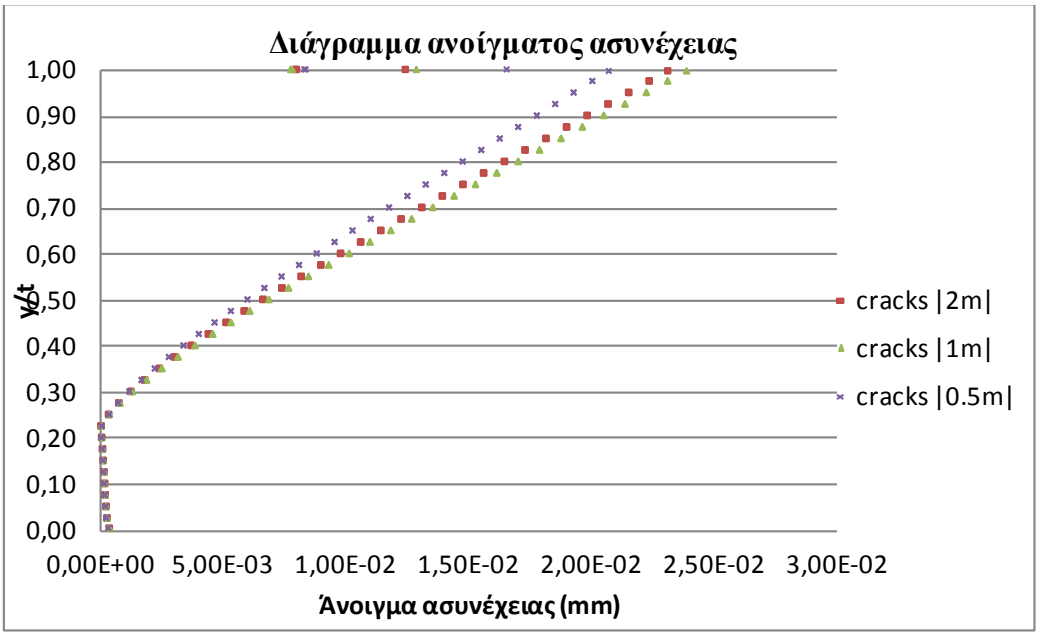


Διάγραμμα 4.3: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής για x/L=0,1

4.2.2 Αποτελέσματα μονοστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0

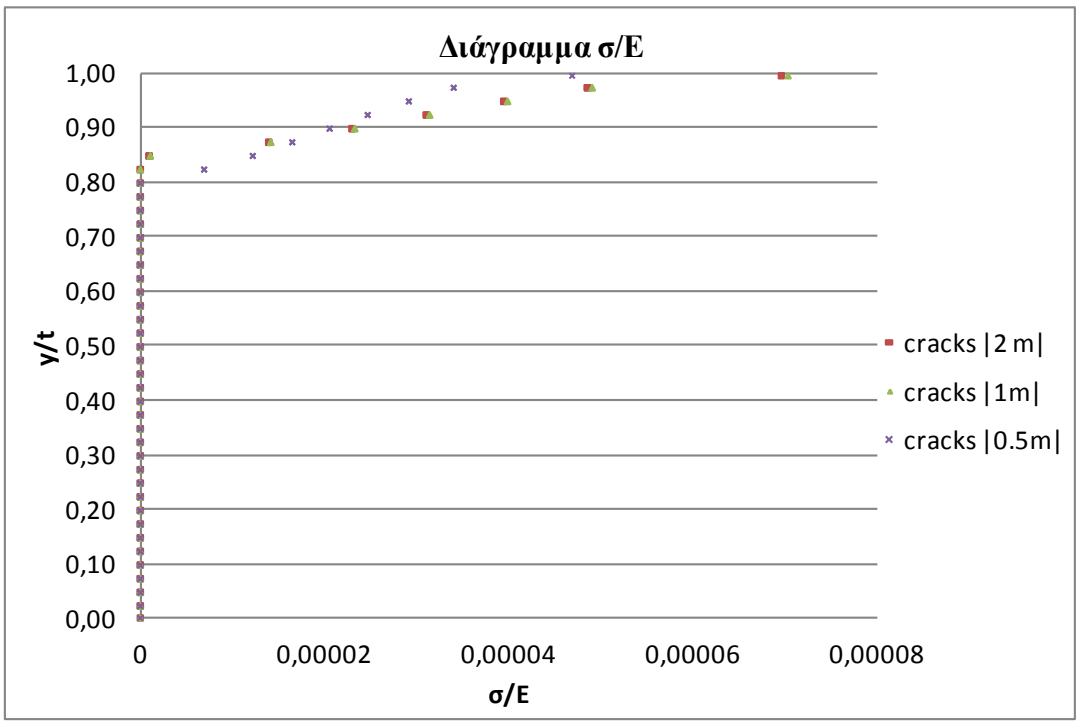


Διάγραμμα 4.4: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής, πάνω στην στήριξη (x/L=0)

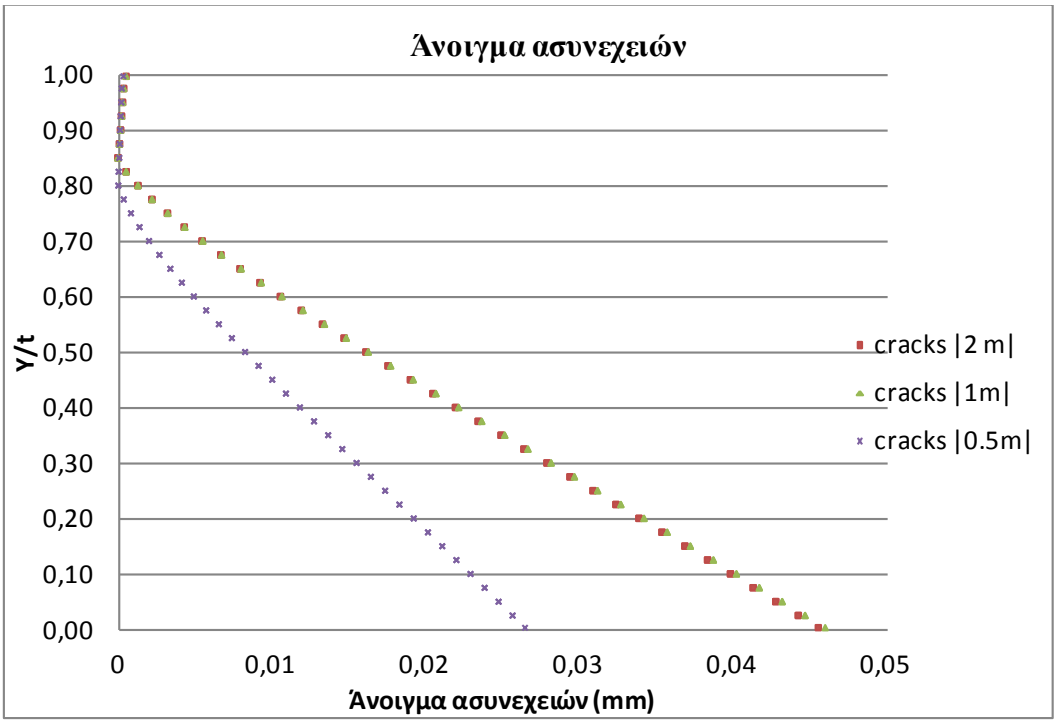


Διάγραμμα 4.5: Άνοιγμα ασυνέχειας πάνω στην στήριξη (x/L=0), καθ' ύψος ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής

4.2.3 Αποτελέσματα μονοστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,5



Διάγραμμα 4.6: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής, πάνω στην στήριξη (x/L=0,5)



Διάγραμμα 4.7: Άνοιγμα ασυνέχειας στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5) καθ' ύψος ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής

4.2.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων μονοστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες

Από τα διαγράμματα των ανηγμένων τάσεων της μονοστρωματικής οροφής, στο σημείο ελέγχου που βρίσκεται πλησίον της στήριξης (x/L=0,1), είναι εμφανής η επίδραση της παρουσίας των κατακόρυφων ασυνεχειών, σε σχέση με την περίπτωση ενός συνεχούς στρώματος.

Με βάση το διάγραμμα της οριζόντιας ανηγμένης ορθής τάσης διαπιστώνεται η ανάπτυξη της σ_{xx} στην ρωγματωμένη οροφή σε σχέση με την περίπτωση της συνεχούς. Οι σ_{xx} που αναπτύσσονται είναι θλιπτικές. Για την περίπτωση των κατακόρυφων ασυνεχειών απόστασης ανά 0,5m αναπτύσσονται μικρότερες ορθές οριζόντιες τάσεις.

Η κατακόρυφη ορθή τάση σ_{yy} της ρωγματωμένης οροφής αλλάζει συμπεριφορά σε σχέση με αυτήν της συνεχούς και είναι θλιπτική.

Όσον αφορά την διατμητική τάση τ_{xy}, παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά σε σχέση με την συνεχή οροφή. Στην περίπτωση της συνεχούς οροφής, αναπτύσσονται μεγαλύτερες τάσεις. Στην οροφή με τις κατακόρυφες ασυνέχειες, αποστάσεως 0,5 m, αναπτύσσονται μικρότερες τάσεις, σε σχέση με τις άλλες δύο ομάδες ασυνεχειών.

Από τα αποτελέσματα των σημείων ελέγχου που βρίσκονται πάνω στις ασυνέχειες (x/L=0 και x/L=0,5) είναι φανερό ότι, οι ασυνέχειες χάνουν την επαφή τους, σε ένα ποσοστό του μήκους τους. Στο σημείο αυτό, ξεκινούν να αναπτύσσονται ορθές τάσεις πάνω στις ασυνέχειες. Επίσης, από τα αποτελέσματα, παρατηρείται το άνοιγμα των ασυνεχειών. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των σημείων ελέγχου.

Πίνακας 4.2: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής (x/L=0)

x/L=0	|Cracks 2m |			|Cracks 1m |			|Cracks 0,5m |		
Στρώμα	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)
1	22,5	2,31E-02	1,34E+06	22,5	2,39E-02	1,38E+06	22,5	2,07E-02	1,19E+06

Πίνακας 4.3: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης μονοστρωματικής οροφής (x/L=0,5)

x/L=0,5	|Cracks 2m |			|Cracks 1m |			|Cracks 0,5m |		
Στρώμα	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)
1	82,4	4,61E-02	1,99E+06	84,9	4,61E-02	2,01E+06	82,4	2,65E-02	1,34E+06

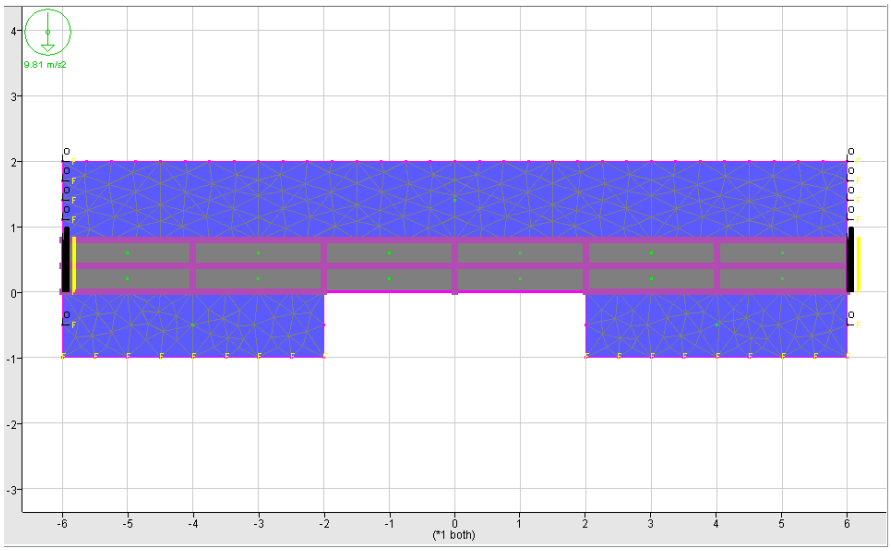
Στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5), η ασυνέχεια ανοίγει από το 82-84% του μήκους της μέχρι την κάτω ακραία ίνα του στρώματος, ενώ στην στήριξη (x/L=0) ξεκινάει να ανοίγει από το 22,5% του μήκους της μέχρι την πάνω ακραία ίνα του στρώματος.

Έπειτα, παρατηρείται ότι το άνοιγμα της ασυνέχειας της ομάδας των 0,5m είναι μικρότερο, σε σχέση με τις δυο άλλες περιπτώσεις στα σημεία ελέγχου. Ειδικά στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5) η διαφορά είναι της τάξης του 42%. Επομένως, φαίνεται ότι οι ομάδες των ασυνεχειών των 2m και 1m, παρουσιάζουν ίδια συμπεριφορά, ενώ όταν είναι πιο πυκνές (ανά 0,5m), εντοπίζεται διαφοροποίηση.

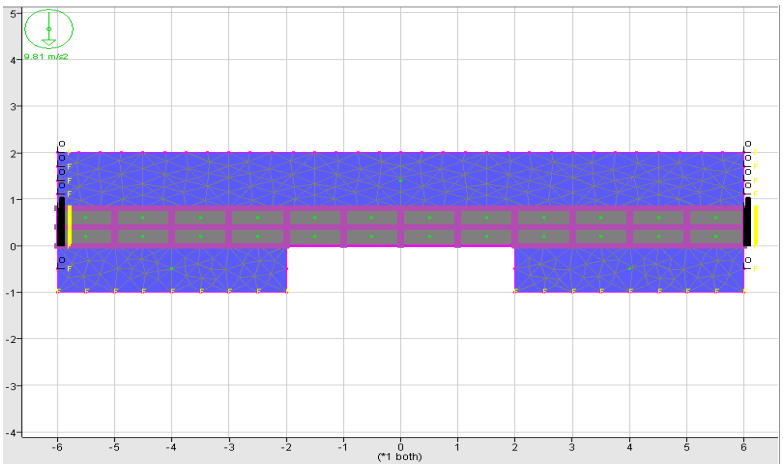
Οι ορθές τάσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια των ασυνεχειών βαίνουν συνεχώς μειούμενες, όσο μικραίνει η απόσταση των ασυνεχειών.

4.3 Προσομοιώσεις διστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες

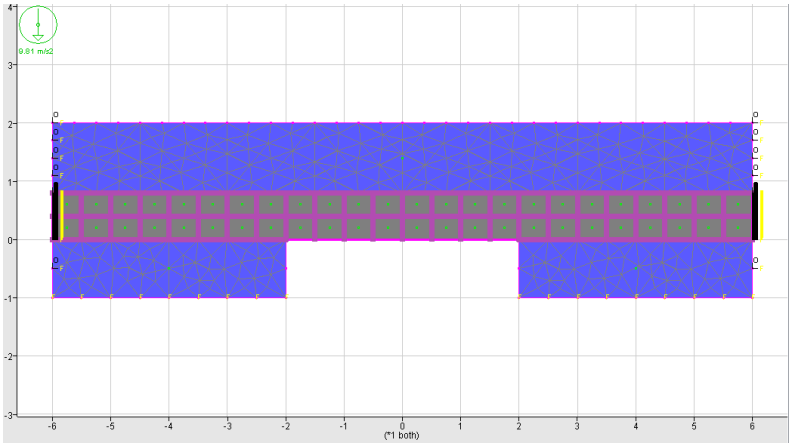
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής με πάχος εκάστοτε στρώματος t=0,4m



Εικόνα 4.4: Προσομοίωση διστρωματικής οροφής υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m μέσω κώδικα Udec 7.0

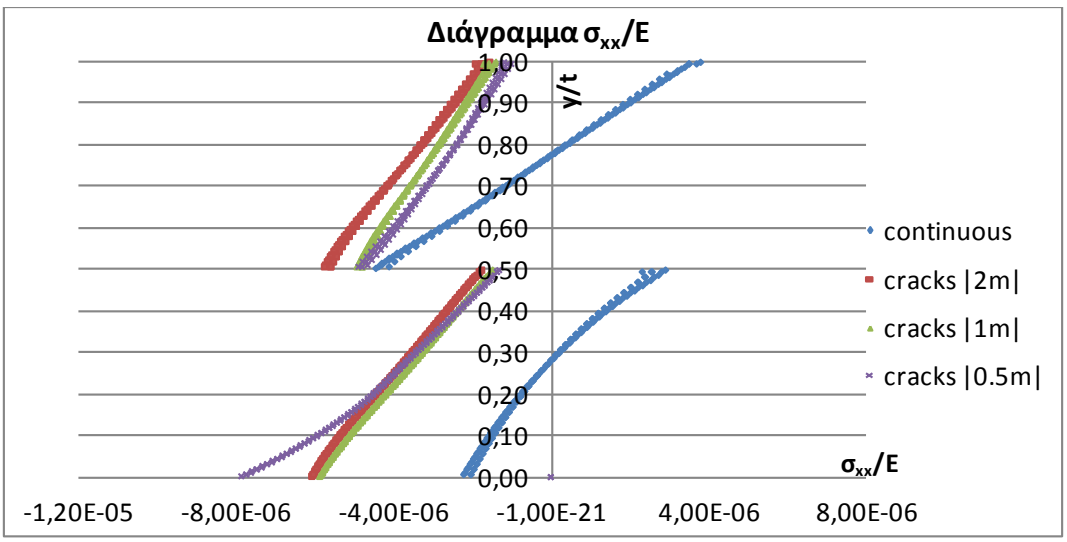


Εικόνα 4.5: Προσομοίωση διστρωματικής οροφής υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 1m μέσω κώδικα Udec

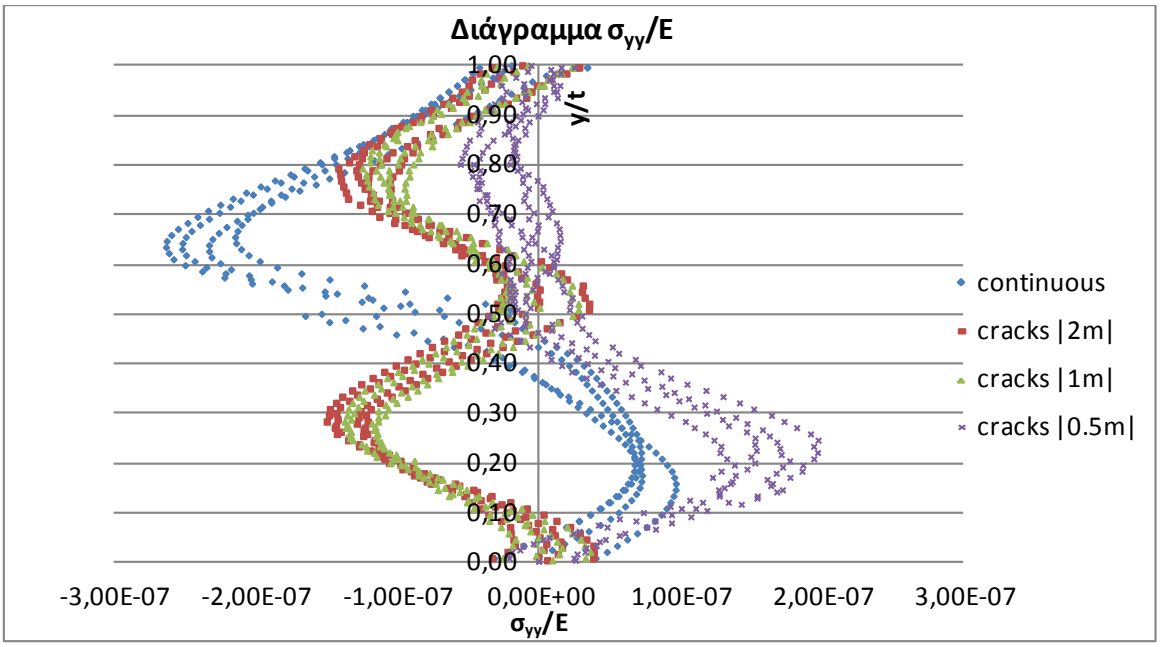


Εικόνα 4.6: Προσομοίωση διστρωματικής οροφής υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 0,5m μέσω κώδικα Udec

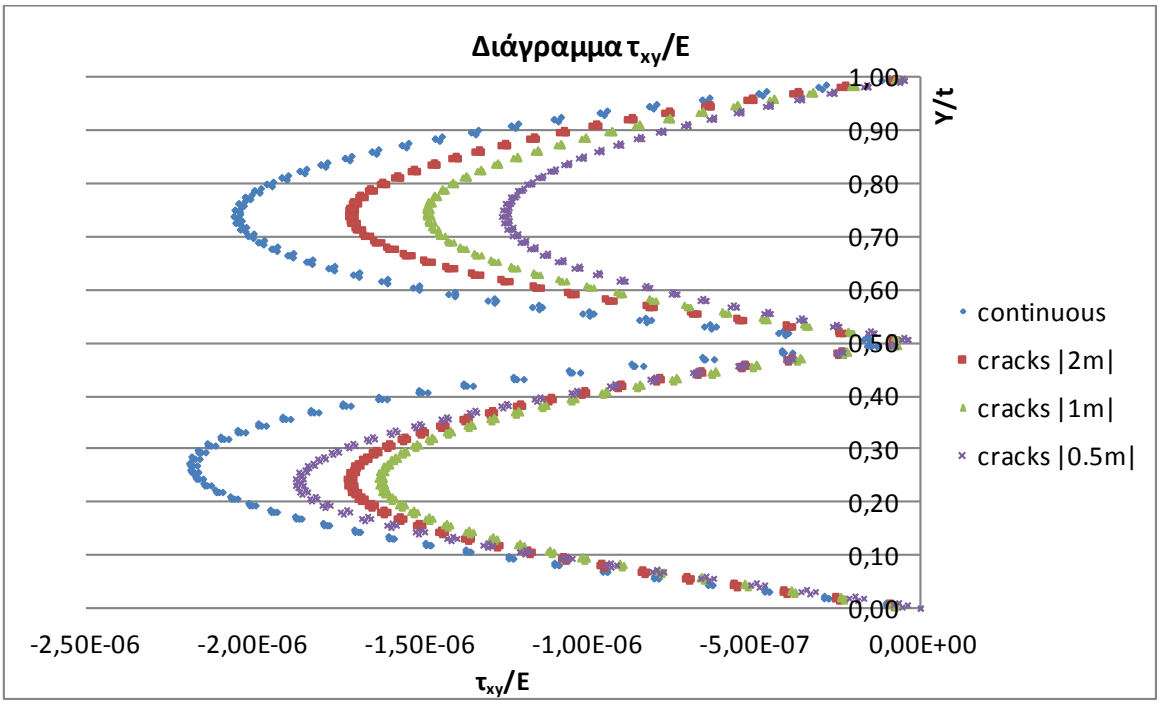
4.3.1 Αποτελέσματα διστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,1



Διάγραμμα 4.8: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής για x/L=0,1

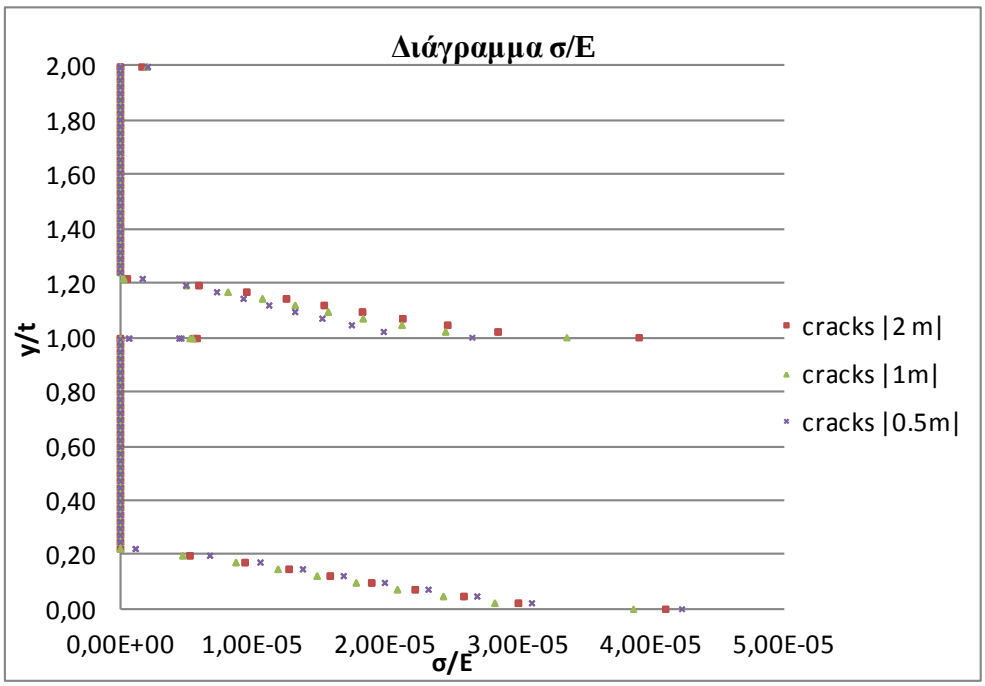


Διάγραμμα 4.9: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής για x/L=0,1

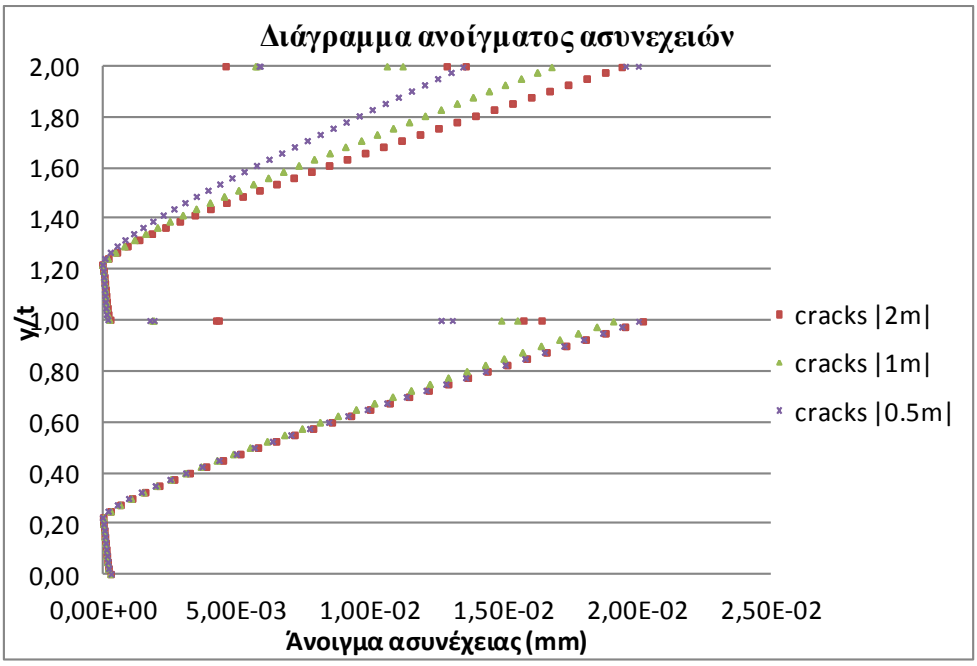


Διάγραμμα 4.10: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής για x/L=0,1

4.3.2 Αποτελέσματα διστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0

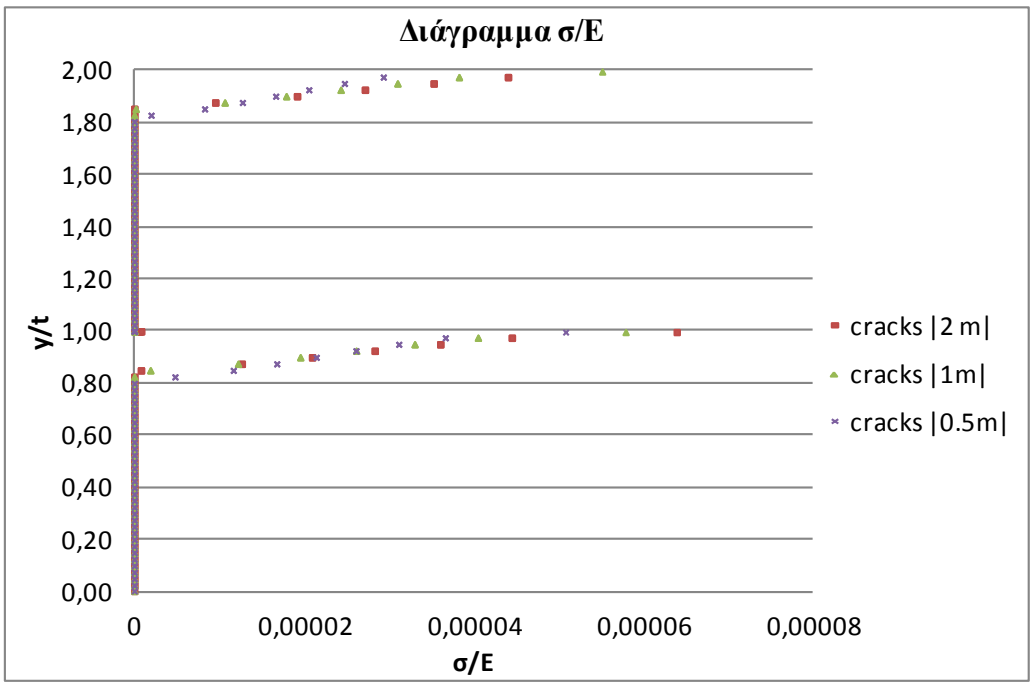


Διάγραμμα 4.11: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής, πάνω στην στήριξη (x/L=0)

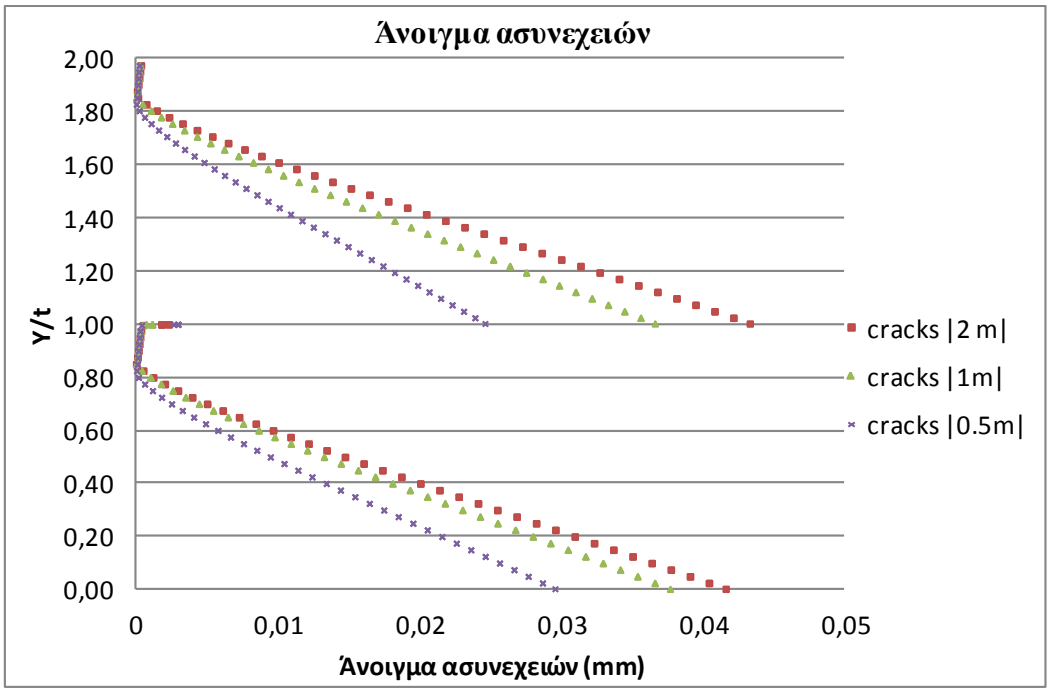


Διάγραμμα 4.12: Άνοιγμα ασυνέχειας πάνω στην στήριξη (x/L=0), καθ' ύψος ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής

4.3.3 Αποτελέσματα διστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,5



Διάγραμμα 4.13: : Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής, στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5)



Διάγραμμα 4.14: Άνοιγμα ασυνέχειας στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5) καθ' ύψος ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής

4.3.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων διστρωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες

Με βάση το διάγραμμα της οριζόντιας ανηγμένης ορθής τάσης σ_{xx} διαπιστώνεται η ανάπτυξη της σ_{xx} στην ρωγματωμένη οροφή, σε σχέση με την περίπτωση της συνεχούς. Οι σ_{xx} που αναπτύσσονται είναι θλιπτικές. Στο υψηλότερο στρώμα της οροφής φαίνεται ότι όσο πιο πυκνές είναι οι ασυνέχειες τόσο λιγότερο αναπτύσσονται οι οριζόντιες ορθές τάσεις.

Σχετικά με την κατακόρυφη ορθή τάση σ_{yy} φαίνεται ότι είναι θλιπτική για την ρωγματωμένη οροφή με ομάδες ασυνεχειών 2m και 1m, ενώ η οροφή με ομάδα ασυνεχειών 0,5m ακολουθεί την συμπεριφορά της συνεχούς διστρωματικής οροφής στο χαμηλότερο στρώμα και είναι εφελκυστική. Παράλληλα, δεν φαίνεται να αναπτύσσεται στο υψηλότερο στρώμα.

Όσον αφορά την διατμητική τάση τ_{xy}, παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά σε σχέση με την συνεχή οροφή. Στην περίπτωση της συνεχούς οροφής, αναπτύσσονται μεγαλύτερες τάσεις. Στο υψηλότερο στρώμα φαίνεται ότι όσο πιο πυκνές είναι οι ασυνέχειες, τόσο μικρότερες διατμητικές τάσεις αναπτύσσονται.

Από τα αποτελέσματα των σημείων ελέγχου που βρίσκονται πάνω στις ασυνέχειες (x/L=0 και x/L=0,5) είναι φανερό ότι, οι ασυνέχειες χάνουν την επαφή τους, σε ένα ποσοστό του μήκους τους, όπου παρατηρείται η ανάπτυξη των ορθών τάσεων πάνω σε αυτές. Επίσης, από τα αποτελέσματα, παρατηρείται το άνοιγμα των ασυνεχειών. Παρακάτω, παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα.

Πίνακας 4.4: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής (x/L=0)

x/L=0	|Cracks 2m |			|Cracks 1m |			|Cracks 0,5m |		
Στρώματα	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (m)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (m)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (m)	σ_{max} (Pa)
2	20	2,02E-02	1,17E+06	20	1,91E-02	1,10E+06	20	2,01E-02	1,21E+06

Πίνακας 4.5: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης διστρωματικής οροφής (x/L=0,5)

x/L=0,5	|Cracks 2m |			|Cracks 1m |			|Cracks 0,5m |		
Στρώματα	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)
2	83	4,33E-02	1,83E+06	83	3,77E-02	1,65E+06	80	2,96E-02	1,45E+06

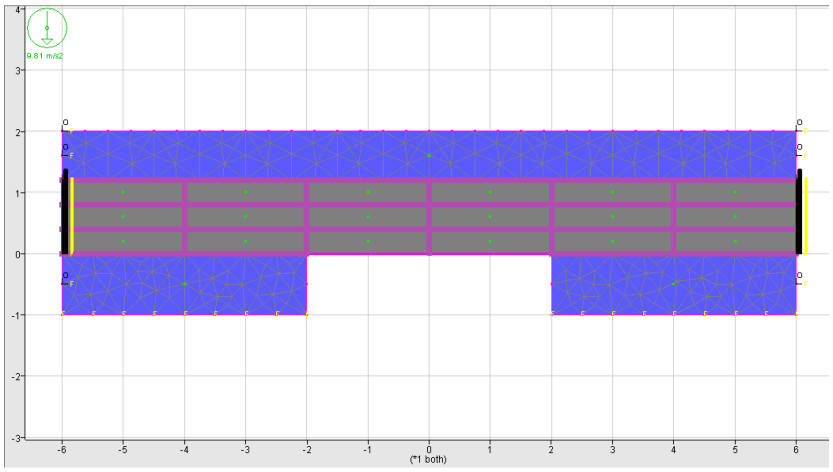
Στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5), η ασυνέχεια ανοίγει από το 80-83% του μήκους της μέχρι την κάτω ακραία ίνα του εκάστοτε στρώματος οροφής, ενώ στην στήριξη (x/L=0) ξεκινάει να ανοίγει από το 20% του μήκους της, μέχρι την πάνω ακραία ίνα των στρωμάτων.

Έπειτα, παρατηρείται ότι το άνοιγμα της ασυνέχειας για τις τρεις ομάδες ασυνεχειών πάνω στην στήριξη (x/L=0) παρουσιάζει διαφοροποίηση στο υψηλότερο στρώμα και φαίνεται ότι όσο πιο πυκνές είναι οι ασυνέχειες, τόσο μικρότερο είναι το άνοιγμα τους. Ομοίως, στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος, είναι φανερό ότι και στα δύο στρώματα της οροφής, οι κατακόρυφες ασυνέχειες ανοίγουν λιγότερο, όσο πιο πυκνές είναι.

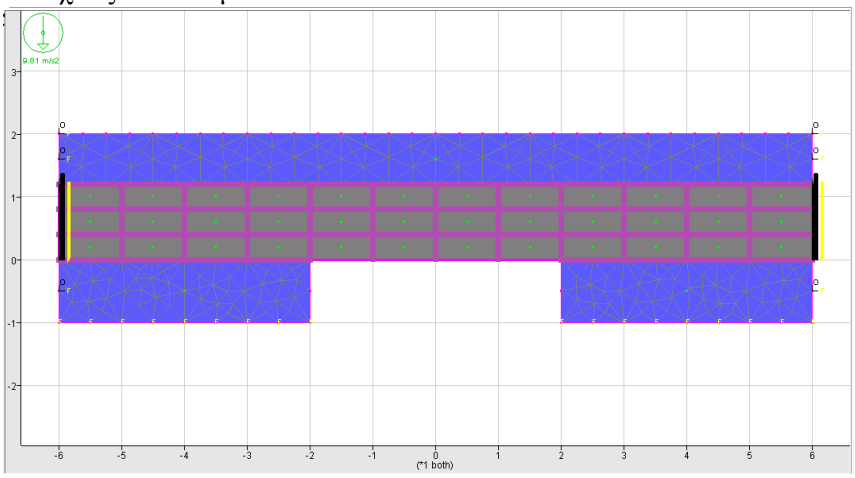
Οι ορθές τάσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια των ασυνεχειών βαίνουν συνεχώς μειούμενες, όσο μικραίνει η απόσταση των ασυνεχειών.

4.4 Προσομοιώσεις οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες

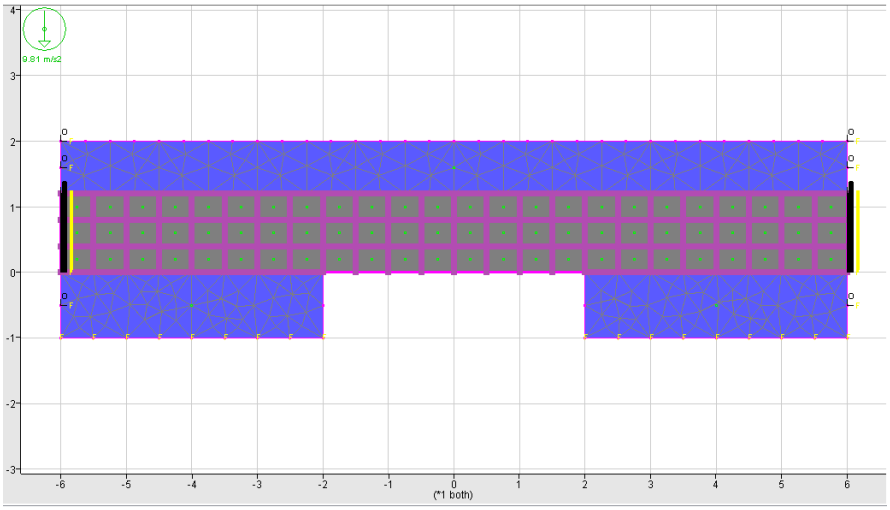
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων με πάχος εκάστοτε στρώματος t=0,4m.



Εικόνα 4.7: Προσομοίωση ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m μέσω κώδικα Udec 7.0

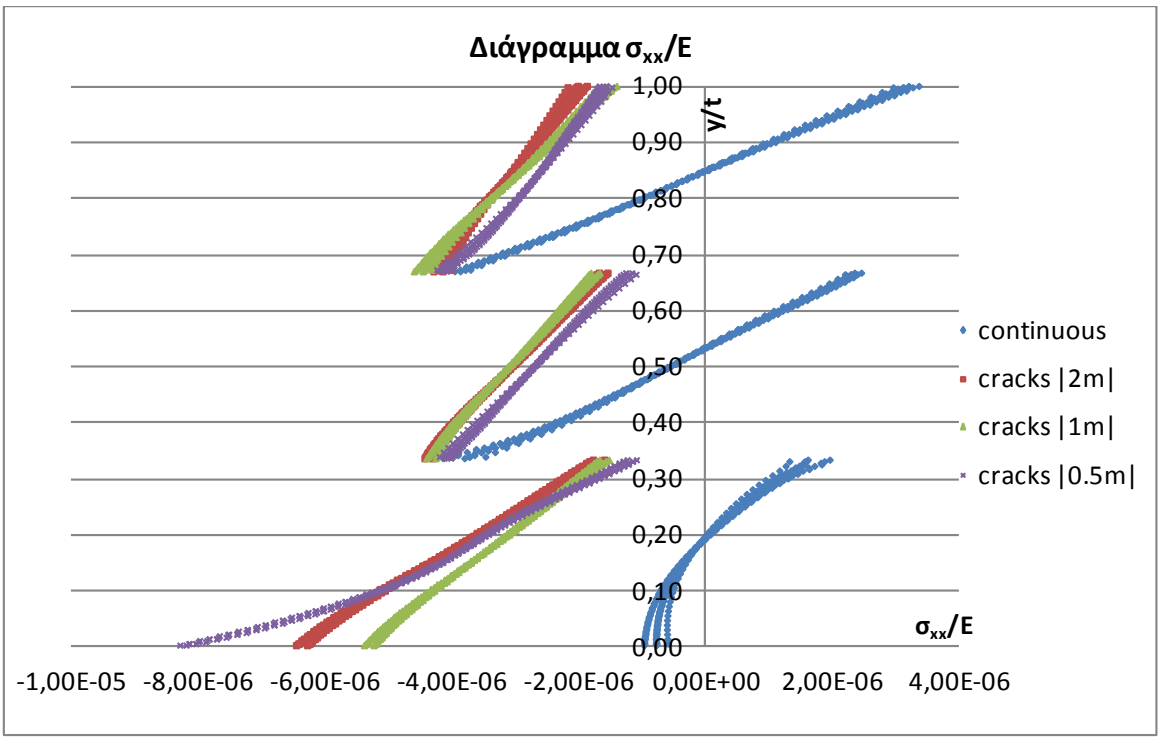


Εικόνα 4.8: Προσομοίωση ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 1m μέσω κώδικα Udec 7.0

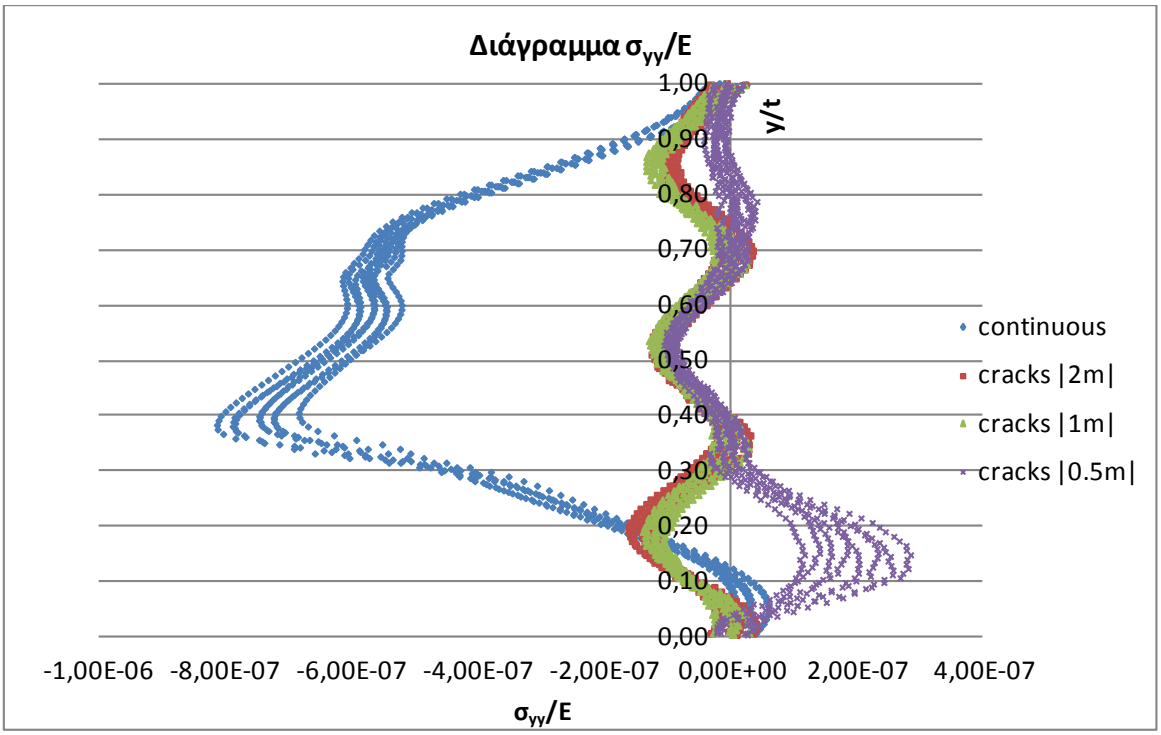


Εικόνα 4.9: Προσομοίωση ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 0,5m μέσω κώδικα Udec 7.0

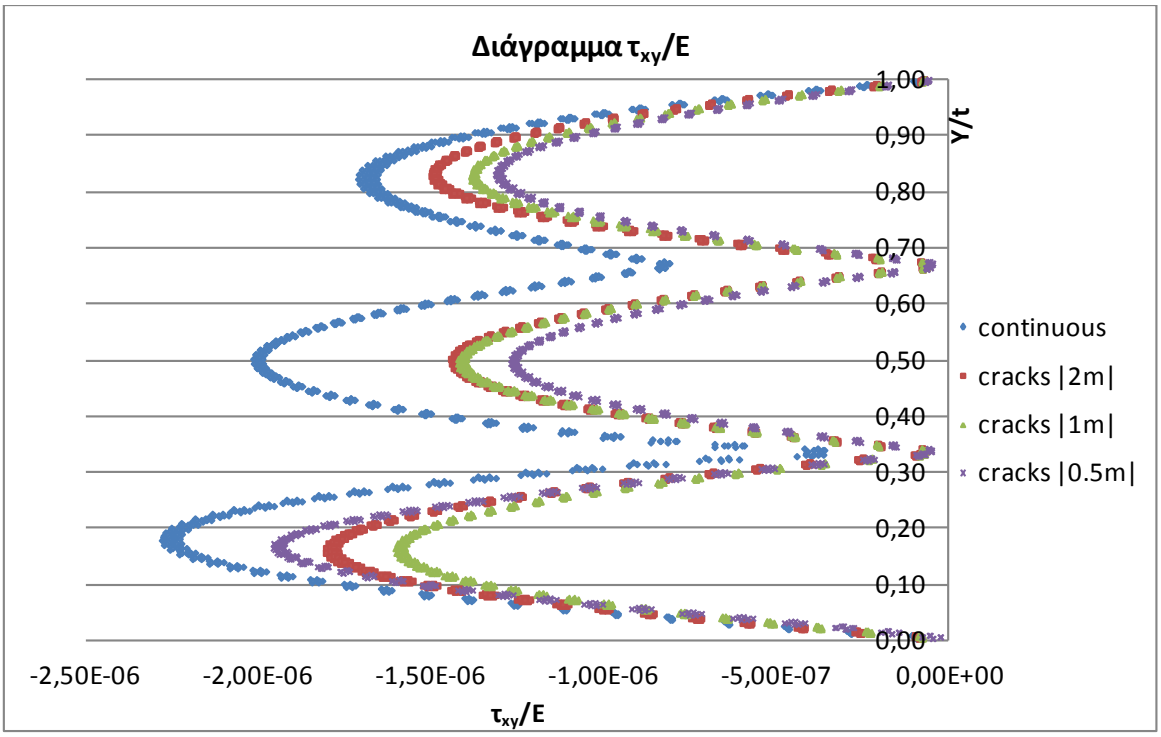
4.4.1 Αποτελέσματα οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,1



Διάγραμμα 4.15: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων για x/L=0,1

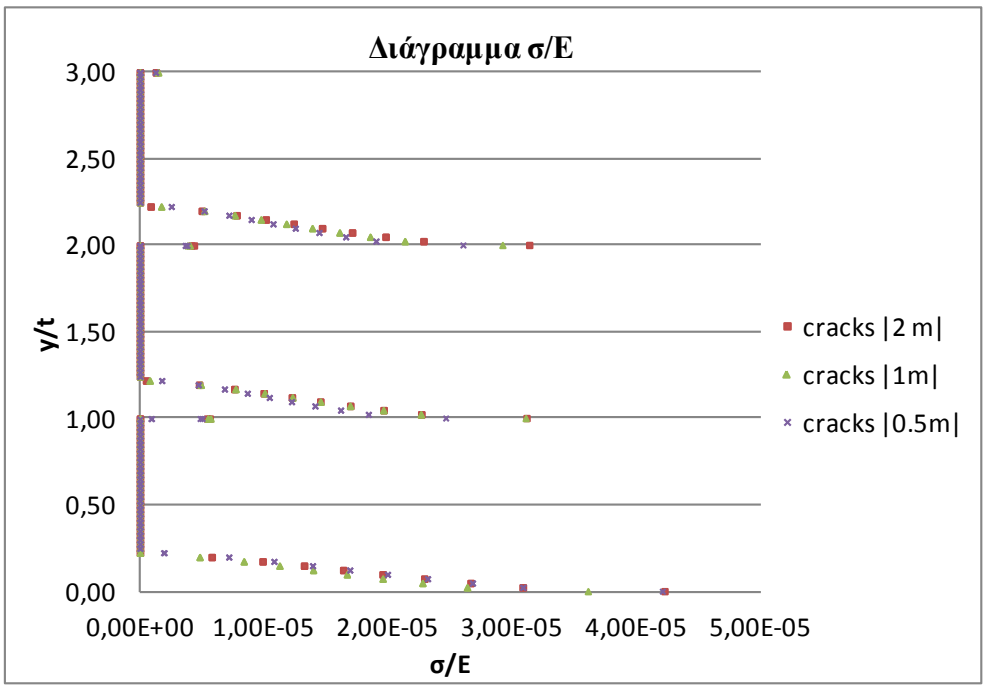


Διάγραμμα 4.16: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων για x/L=0,1

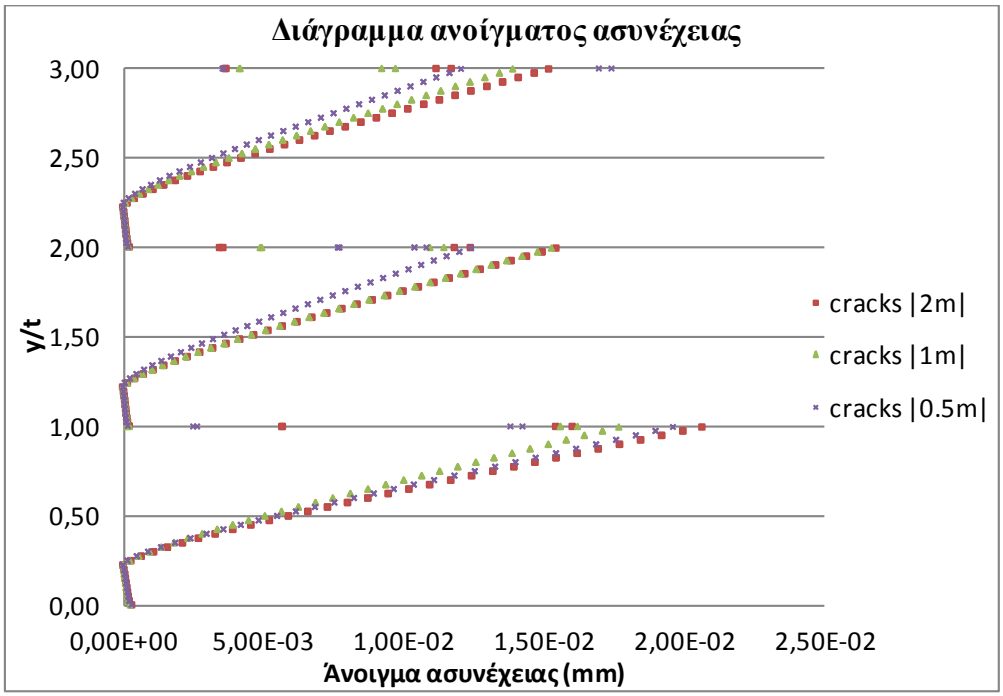


Διάγραμμα 4.17: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων για x/L=0,1

4.4.2 Αποτελέσματα οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0

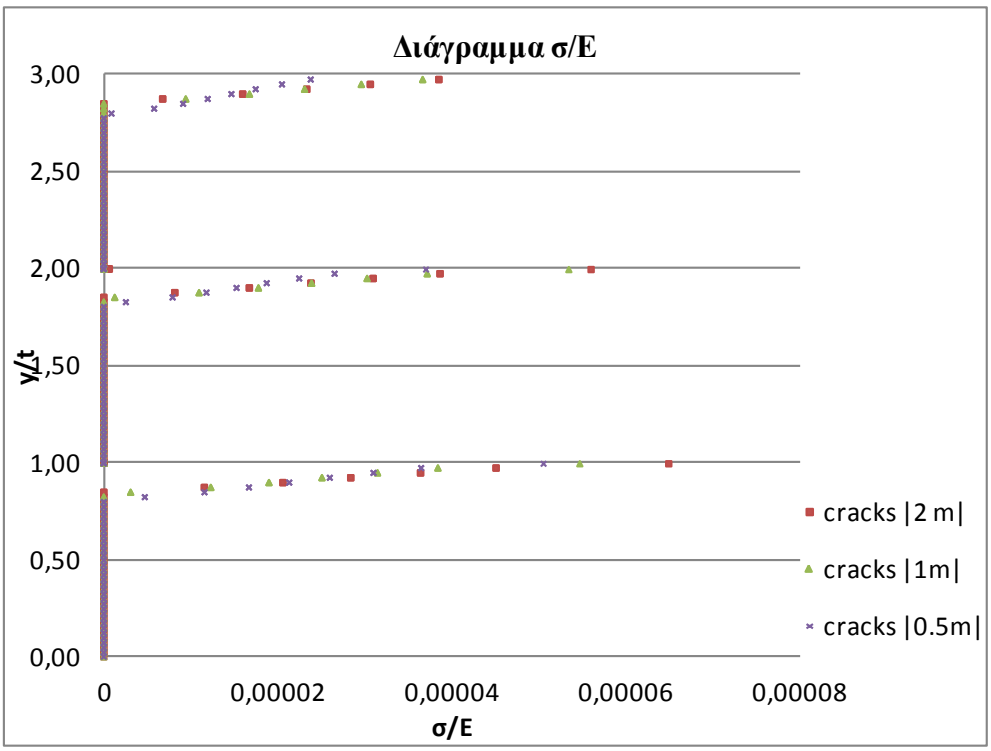


Διάγραμμα 4.18: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων, πάνω στην στήριξη (x/L=0)

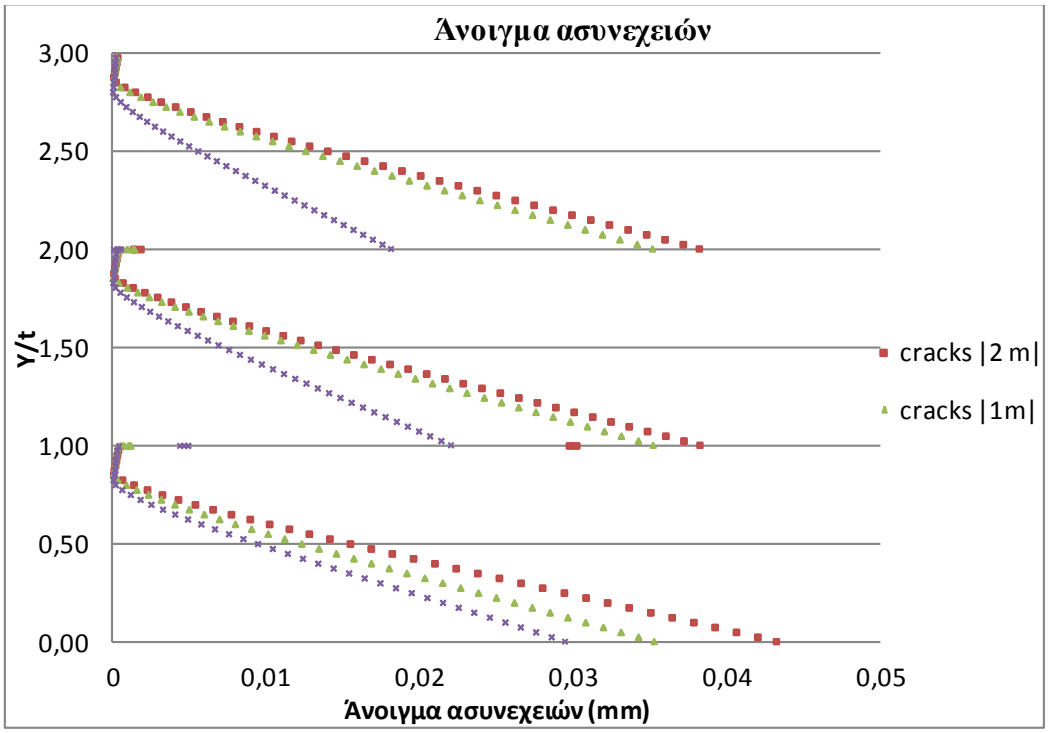


Διάγραμμα 4.19: Άνοιγμα ασυνέχειας πάνω στην στήριξη (x/L=0), καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων

4.4.3 Αποτελέσματα οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,5



Διάγραμμα 4.20: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων, πάνω στην στήριξη (x/L=0,5)



Διάγραμμα 4.21: Άνοιγμα ασυνέχειας στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5), καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων

4.4.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες

Με βάση το διάγραμμα της οριζόντιας ανηγμένης ορθής τάσης σ_{xx} διαπιστώνεται η ανάπτυξη της σ_{xx} στην ρωγματωμένη οροφή, σε σχέση με την περίπτωση της συνεχούς. Οι σ_{xx} που αναπτύσσονται είναι θλιπτικές. Κατά την μετάβαση στα υψηλότερα στρώματα φαίνεται ότι αναπτύσσεται λιγότερο.

Σχετικά με την κατακόρυφη ορθή τάση σ_{yy} φαίνεται ότι δεν αναπτύσσονται σ_{yy} σε μεγάλο βαθμό στη ρωγματωμένη οροφή, συγκριτικά με την συνεχή.

Όσον αφορά την διατμητική τάση τ_{xy}, παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά σε σχέση με την συνεχή οροφή. Στην περίπτωση της συνεχούς οροφής, αναπτύσσονται μεγαλύτερες τάσεις.

Παρακάτω, παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της ορθής τάσης και το άνοιγμα των ασυνεχειών.

Πίνακας 4.6: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων (x/L=0)

x/L=0	|Cracks 2m |			|Cracks 1m |			|Cracks 0,5m |		
Στρώματα	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (m)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (m)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (m)	σ_{max} (Pa)
3	25	2,06E-02	1,21E+06	25	1,77E-02	1,03E+06	25	1,96E-02	1,20E+06

Πίνακας 4.7: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης οροφής τριών στρωμάτων (x/L=0,5)

x/L=0,5	|Cracks 2m |			|Cracks 1m |			|Cracks 0,5m |		
Στρώματα	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)
3	82	4,32E-02	1,86E+06	82	3,42E-02	1,56E+06	80	2,86E-02	1,44E+06

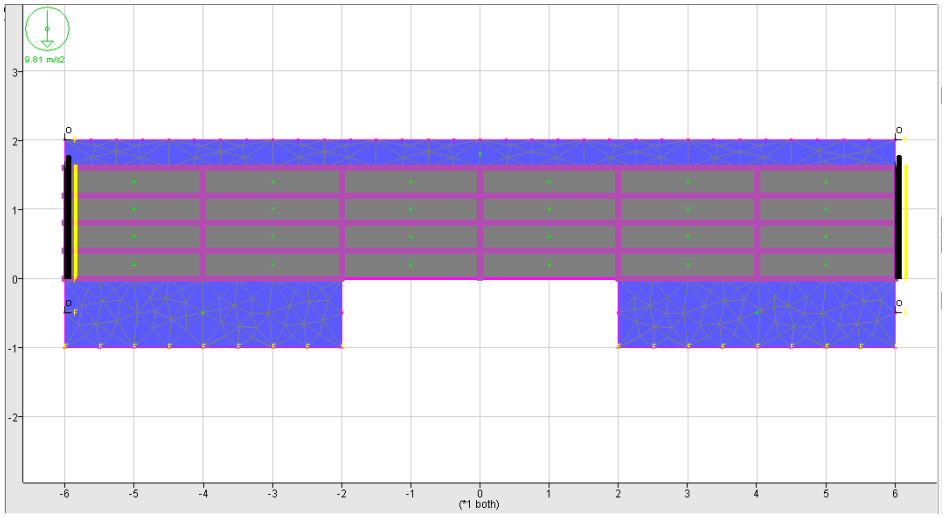
Στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5), η ασυνέχεια ανοίγει από το 80-82% του μήκους της μέχρι την κάτω ακραία ίνα του εκάστοτε στρώματος, ενώ στην στήριξη (x/L=0) ξεκινάει να ανοίγει από το 25% του μήκους της, μέχρι την πάνω ακραία ίνα των στρωμάτων.

Από το διάγραμμα του ανοίγματος της ασυνέχειας, στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5) διαπιστώνεται ότι η ασυνέχεια αποστάσεως 0,5m, παρουσιάζει αισθητή μείωση στο άνοιγμα της σε σχέση με τις άλλες δύο ομάδες ασυνεχειών, ειδικά κατά την μετάβαση σε υψηλότερο στρώμα.

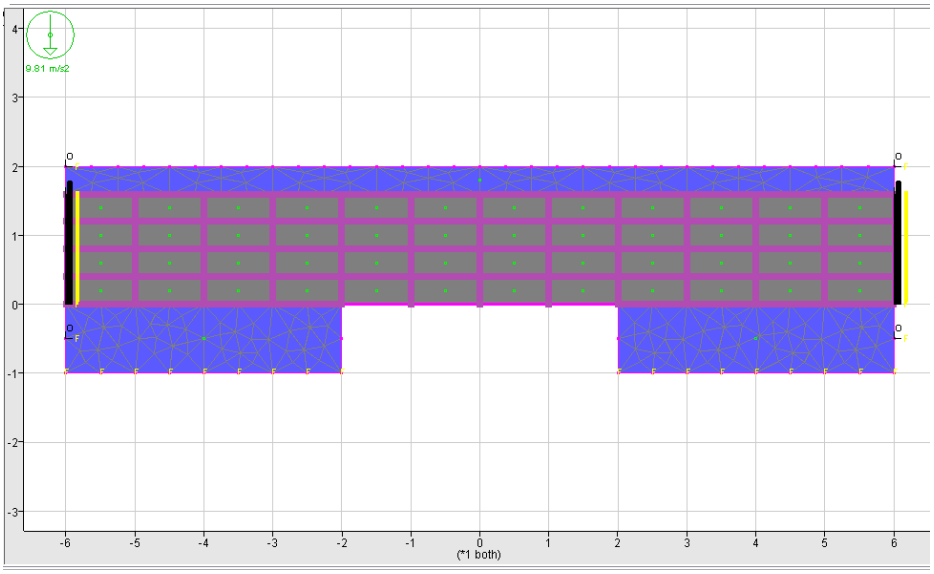
Οι ορθές τάσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια των ασυνεχειών βαίνουν συνεχώς μειούμενες, όσο μικραίνει η απόσταση των ασυνεχειών.

4.5 Προσομοιώσεις οροφής τεσσάρων στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες

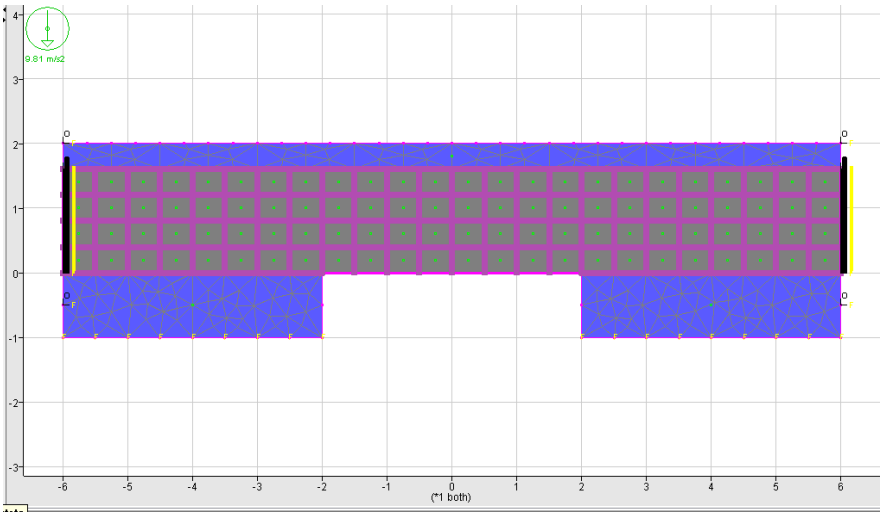
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων με πάχος εκάστοτε στρώματος t=0,4m.



Εικόνα 4.10: Προσομοίωση οροφής τεσσάρων στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m μέσω κώδικα Udec 7.0

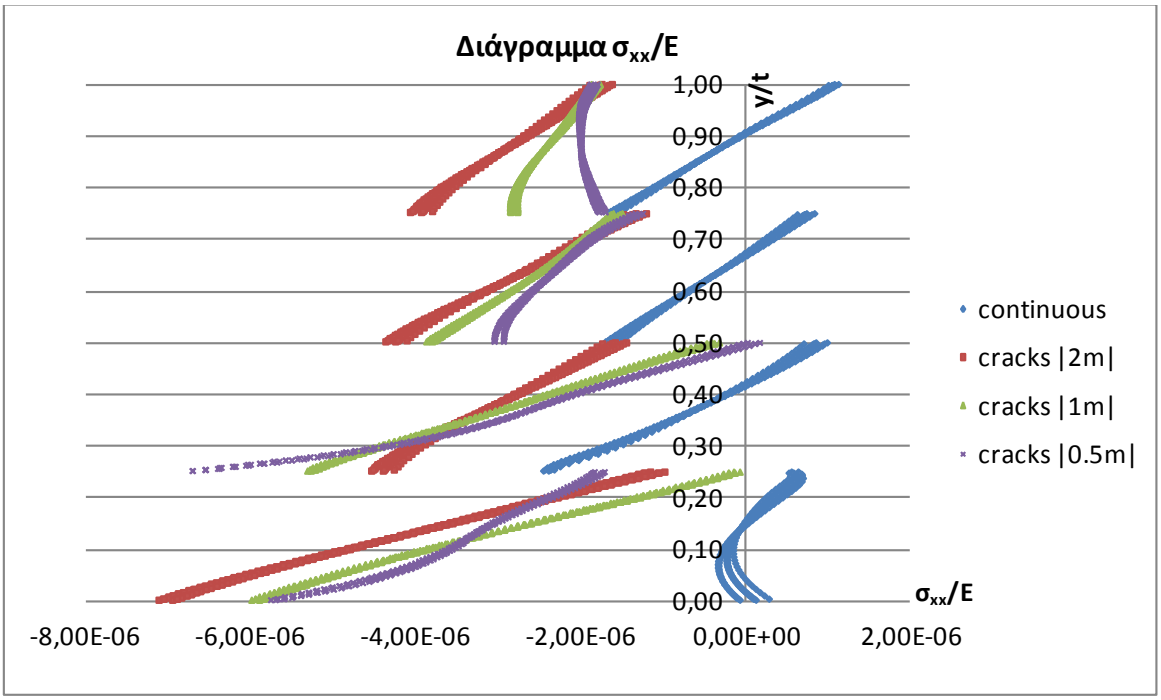


Εικόνα 4.11: Προσομοίωση οροφής τεσσάρων στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 1m μέσω κώδικα Udec 7.0

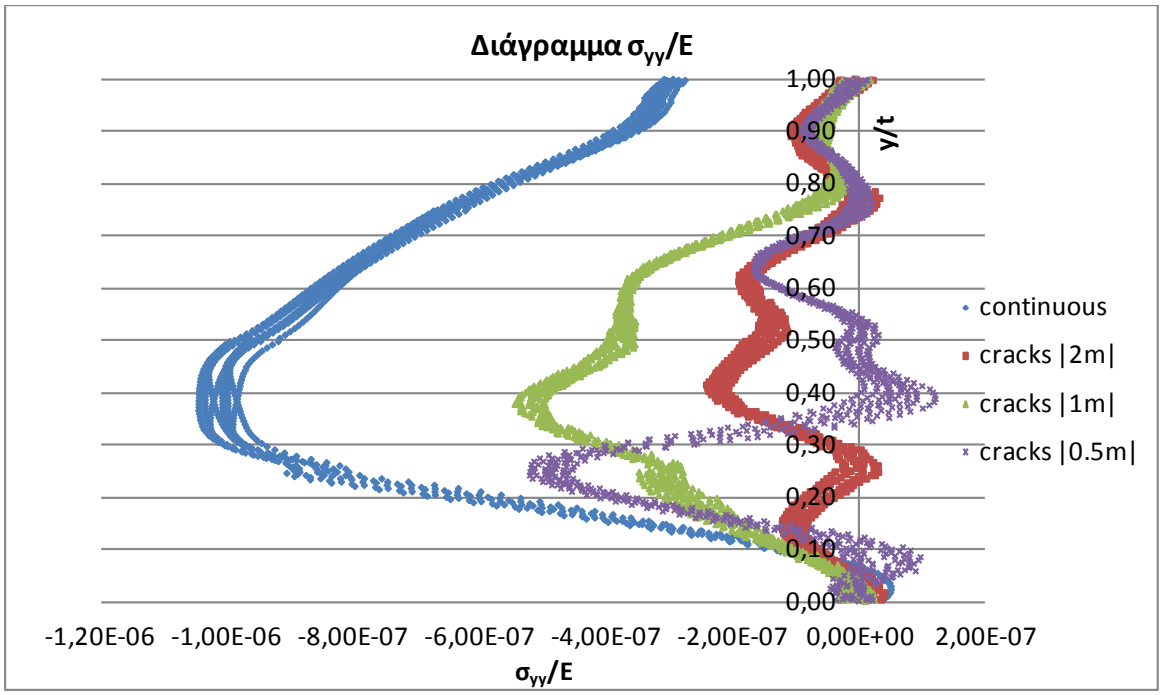


Εικόνα 4.12: Προσομοίωση οροφής τεσσάρων στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 0,5m μέσω κώδικα Udec 7.0

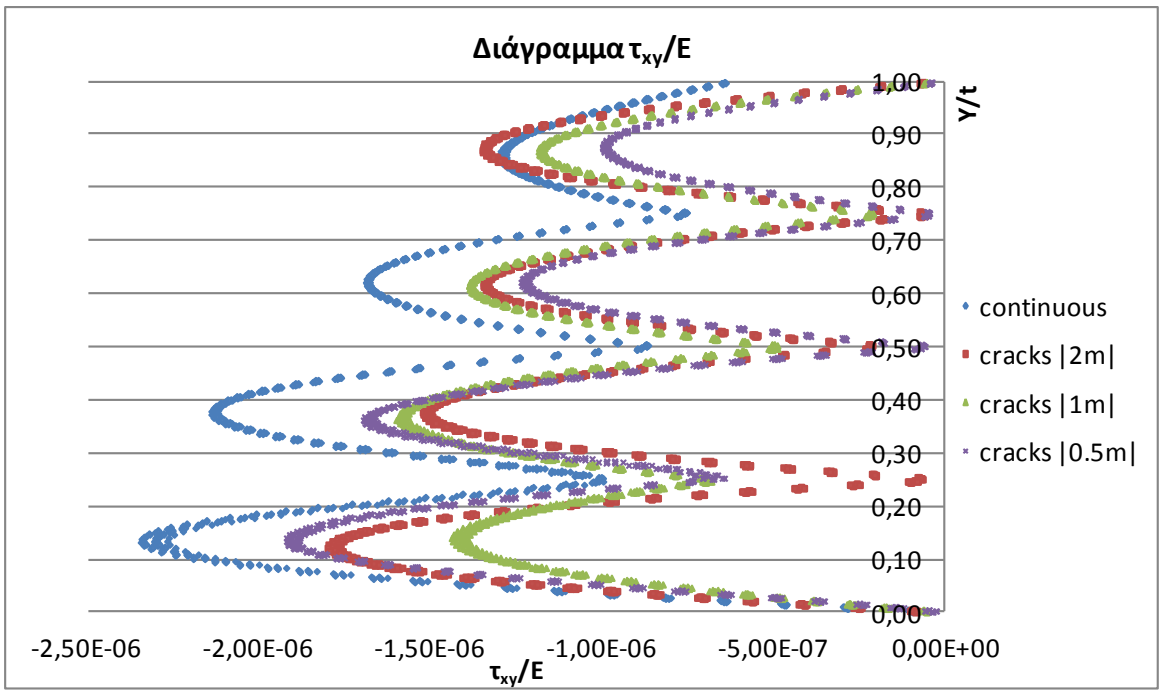
4.5.1 Αποτελέσματα οροφής τεσσάρων στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,1



Διάγραμμα 4.22: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0,1

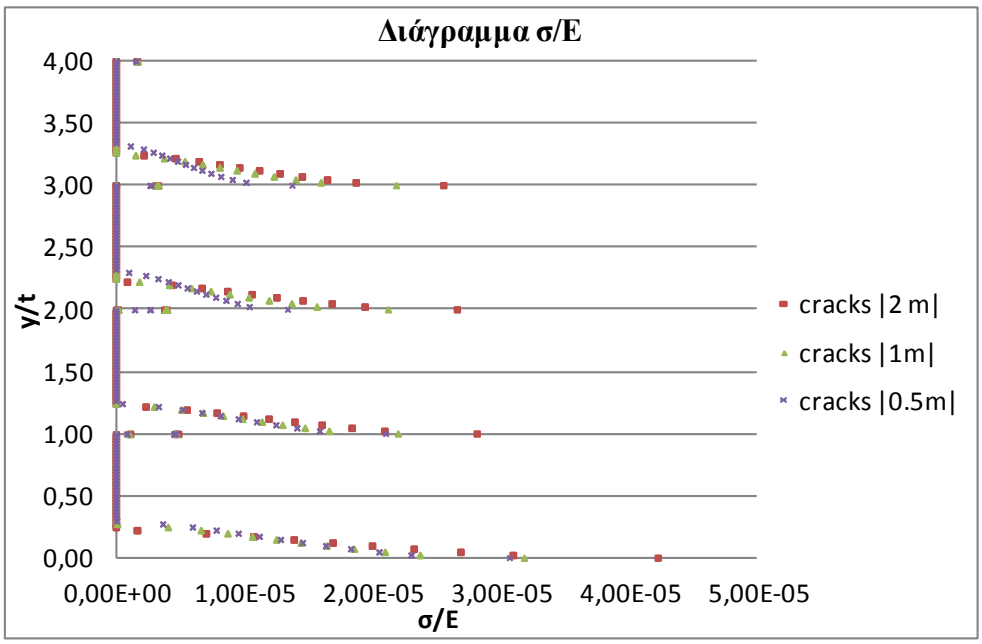


Διάγραμμα 4.23: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0,1

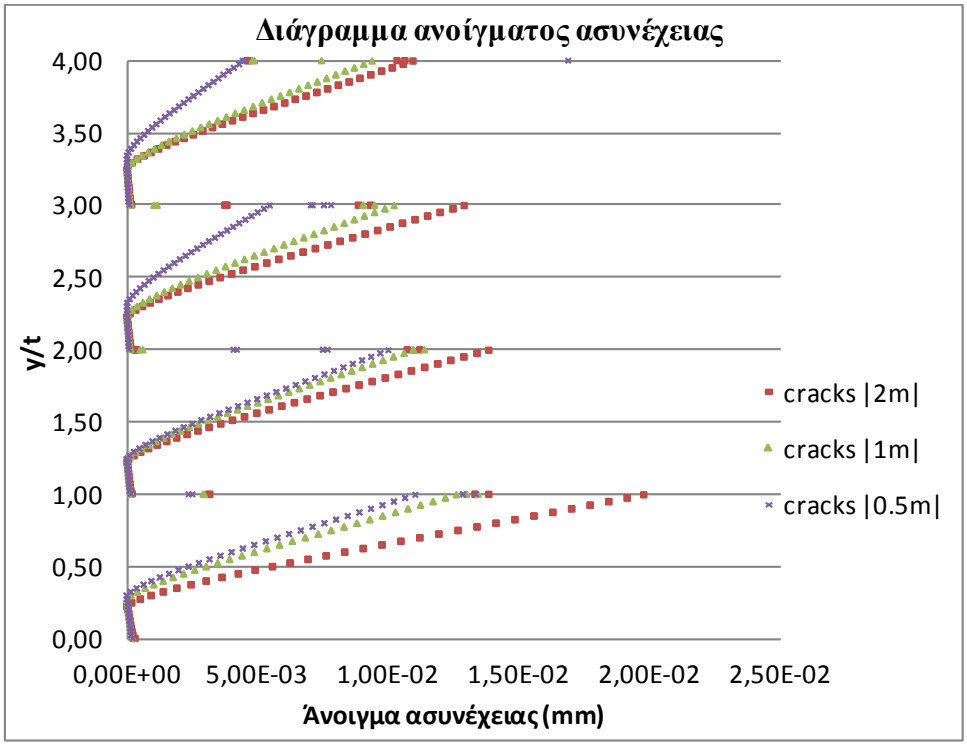


Διάγραμμα 4.24: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων για x/L=0,1

4.5.2 Αποτελέσματα οροφής τεσσάρων στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0

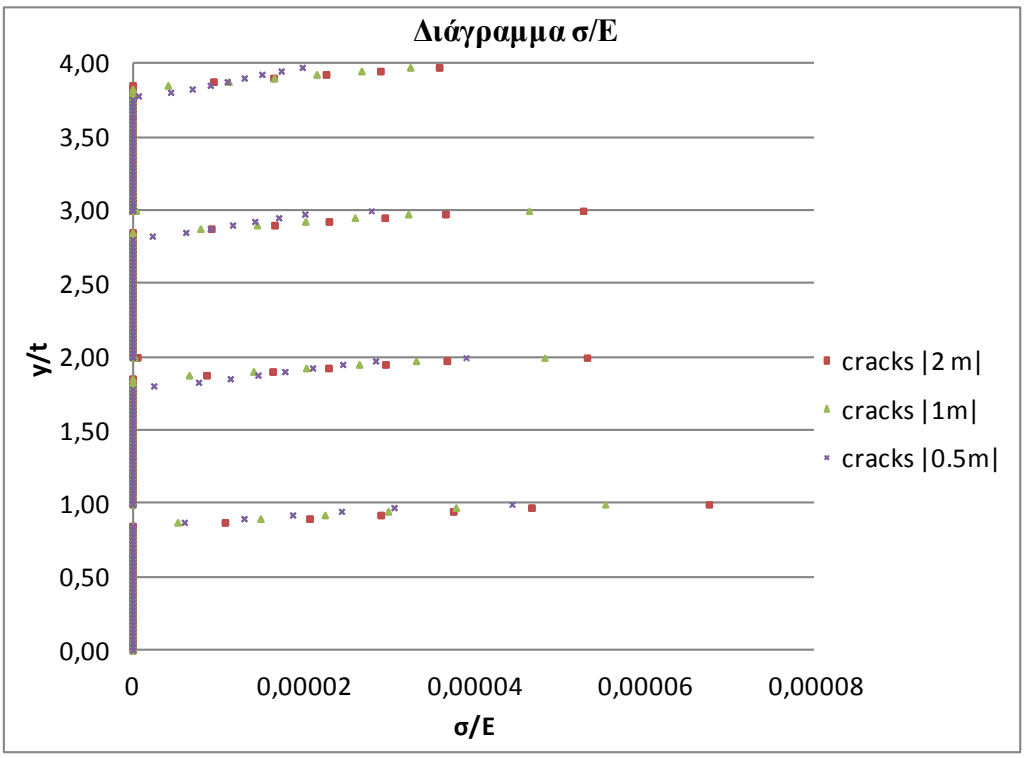


Διάγραμμα 4.25: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων, πάνω στην στήριξη (x/L=0)

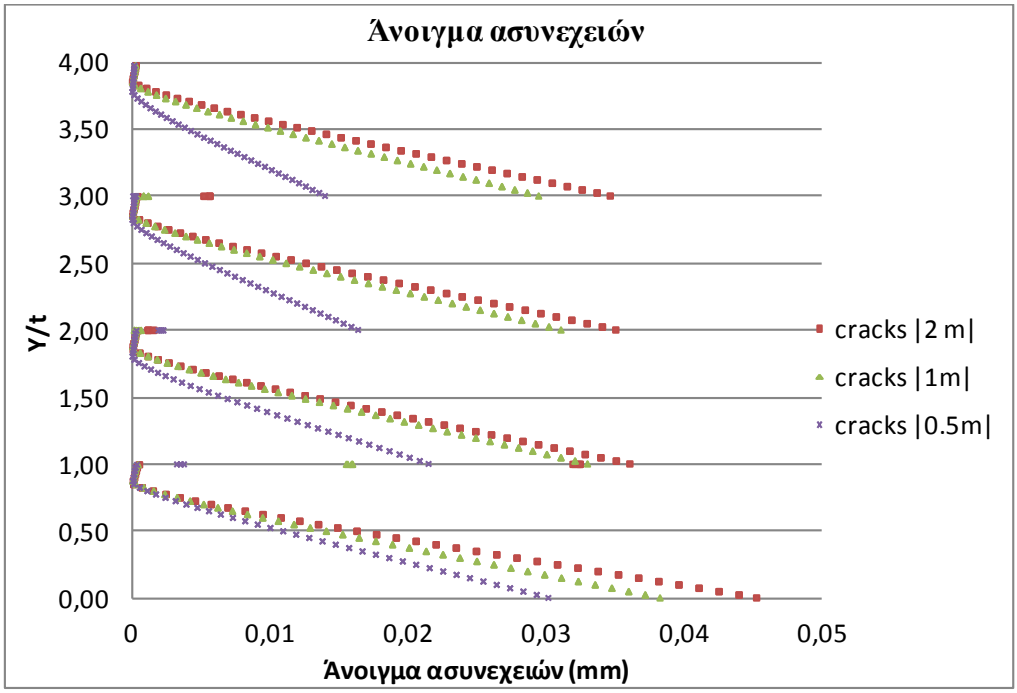


Διάγραμμα 4.26: Άνοιγμα ασυνέχειας πάνω στην στήριξη (x/L=0), καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων

4.5.3 Αποτελέσματα οροφής τεσσάρων στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,5



Διάγραμμα 4.27: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων, πάνω στην στήριξη (x/L=0,5)



Διάγραμμα 4.28: Άνοιγμα ασυνέχειας στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5), καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων

4.5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων οροφής τεσσάρων στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες

Με βάση το διάγραμμα της οριζόντιας ανηγμένης ορθής τάσης σ_{xx} διαπιστώνεται η ανάπτυξη της σ_{xx} στην ρωγματωμένη οροφή, σε σχέση με την περίπτωση της συνεχούς. Οι σ_{xx} που αναπτύσσονται είναι θλιπτικές. Κατά την μετάβαση στα υψηλότερα στρώματα φαίνεται ότι αναπτύσσεται λιγότερο, ενώ παράλληλα όσο πιο πυκνές είναι οι ασυνέχειες, τόσο πιο μικρές είναι οι σ_{xx} που αναπτύσσονται στα στρώματα αυτά.

Σχετικά με την κατακόρυφη ορθή τάση σ_{yy} φαίνεται ότι δεν αναπτύσσονται σ_{yy} σε μεγάλο βαθμό στη ρωγματωμένη οροφή, συγκριτικά με την συνεχή. Στα χαμηλότερα στρώματα είναι θλιπτικές τάσεις.

Όσον αφορά την διατμητική τάση τ_{xy}, παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά σε σχέση με την συνεχή οροφή. Στην περίπτωση της συνεχούς οροφής, αναπτύσσονται μεγαλύτερες τάσεις.

Παρακάτω, παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της ορθής τάσης πάνω στις ασυνέχειες καθώς και το άνοιγμα τους.

Πίνακας 4.8: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων (x/L=0)

x/L=0	|Cracks 2m |			|Cracks 1m |			|Cracks 0,5m |		
Στρώματα	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (m)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (m)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (m)	σ_{max} (Pa)
4	25	1,98E-02	1,20E+06	27	1,34E-02	9,06E+05	35	1,29E-02	8,74E+05

Πίνακας 4.9: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης οροφής τεσσάρων στρωμάτων (x/L=0,5)

x/L=0,5	|Cracks 2m |			|Cracks 1m |			|Cracks 0,5m |		
Στρώματα	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)
4	83	4,53E-02	1,93E+06	78	3,72E-02	1,58E+06	73	3,02E-02	1,27E+06

Στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5), η ασυνέχεια ανοίγει από το 73-83% του μήκους της μέχρι την κάτω ακραία ίνα του εκάστοτε στρώματος. Στην στήριξη (x/L=0) ξεκινάει να ανοίγει από το 25-35% του μήκους της, μέχρι την πάνω ακραία ίνα των στρωμάτων. Σε αυτό το σημείο ελέγχου, διαπιστώνεται, κυρίως στα υψηλότερα στρώματα, ότι όσο πιο πυκνές είναι οι ασυνέχειες, αυξάνεται το μήκος επαφής τους.

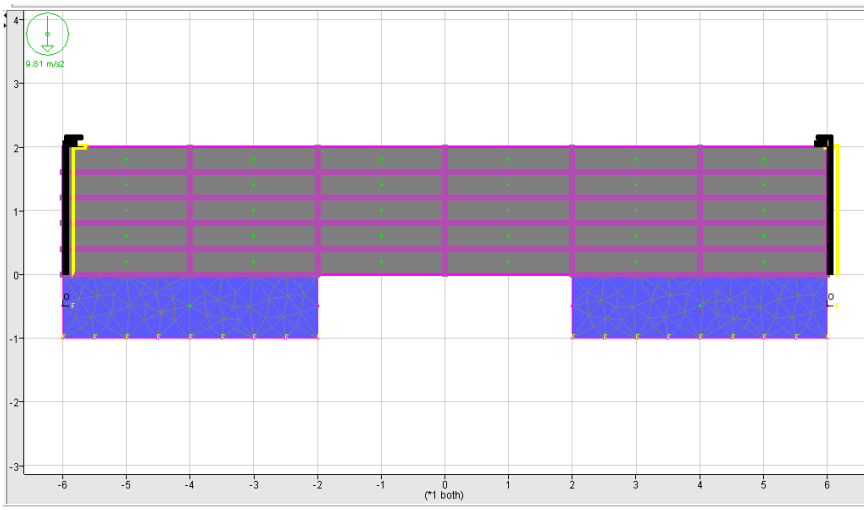
.Από το διάγραμμα του ανοίγματος της ασυνέχειας στις δύο θέσεις ελέγχου, διαπιστώνεται ότι κατά την μετάβαση σε υψηλότερο στρώμα, το άνοιγμα των ασυνεχειών μειώνεται.

Επίσης, παρατηρείται ότι όσο πιο πυκνές είναι οι κατακόρυφες ασυνέχειες, μειώνεται το άνοιγμα αυτών, με την ασυνέχεια με εμμονή 0,5m να παρουσιάζει αισθητή μείωση σε σχέση με τα άλλες δυο ομάδες ασυνεχειών.

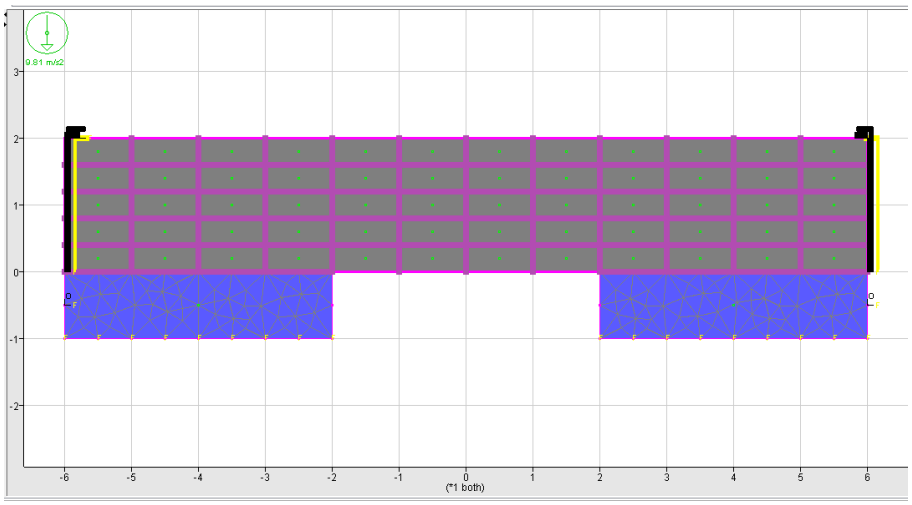
Η μέγιστη ορθή τάση που αναπτύσσεται εντός των ασυνεχειών φαίνεται να παρουσιάζει μια μείωση, όσο πιο πυκνές είναι οι κατακόρυφες ασυνέχειες.

4.6 Προσομοιώσεις οροφής πέντε στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες

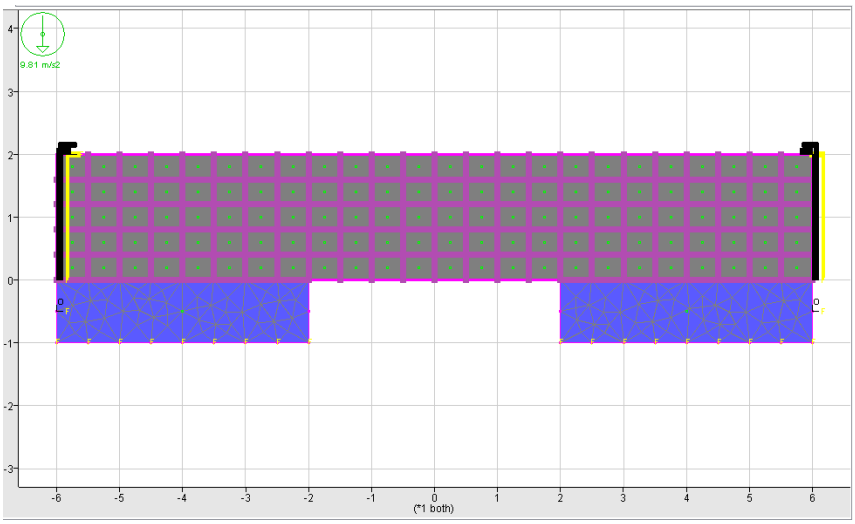
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων με πάχος εκάστοτε στρώματος t=0,4m.



Εικόνα 4.13: Προσομοίωση οροφής πέντε στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m μέσω κώδικα Udec 7.0

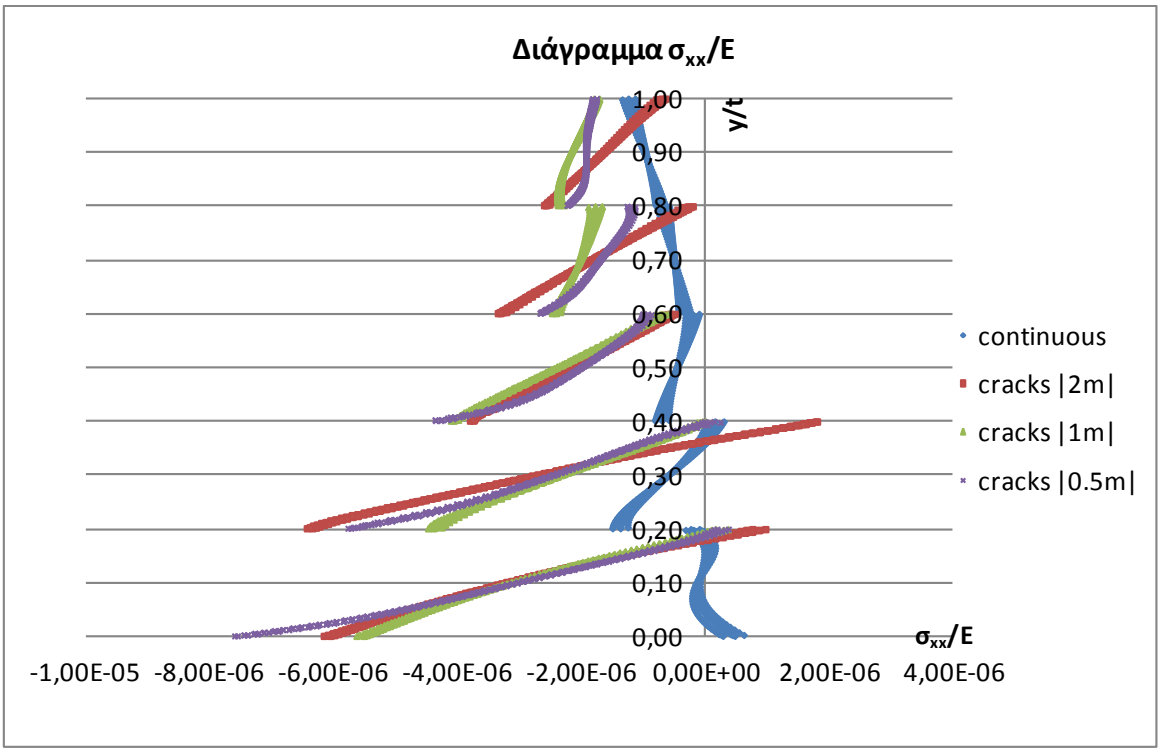


Εικόνα 4.14: Προσομοίωση οροφής πέντε στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 1m μέσω κώδικα Udec 7.0

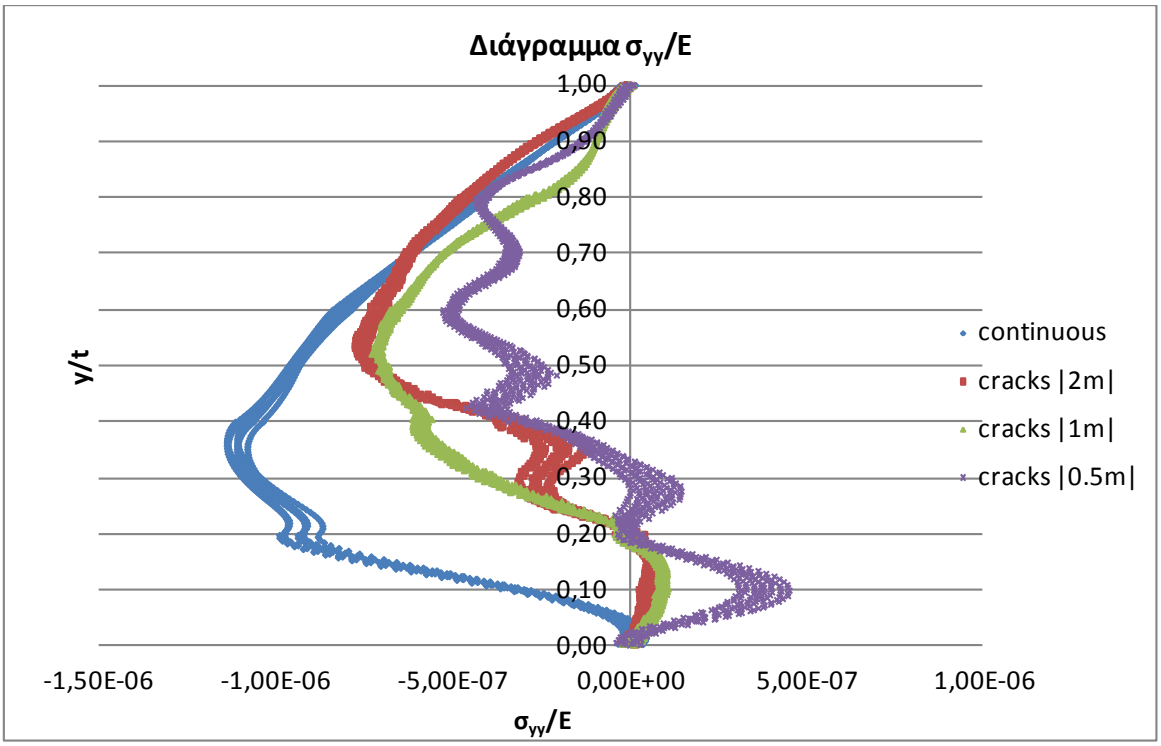


Εικόνα 4.15: Προσομοίωση οροφής πέντε στρωμάτων υπόγειου ανοίγματος με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 0,5m μέσω κώδικα Udec 7.0

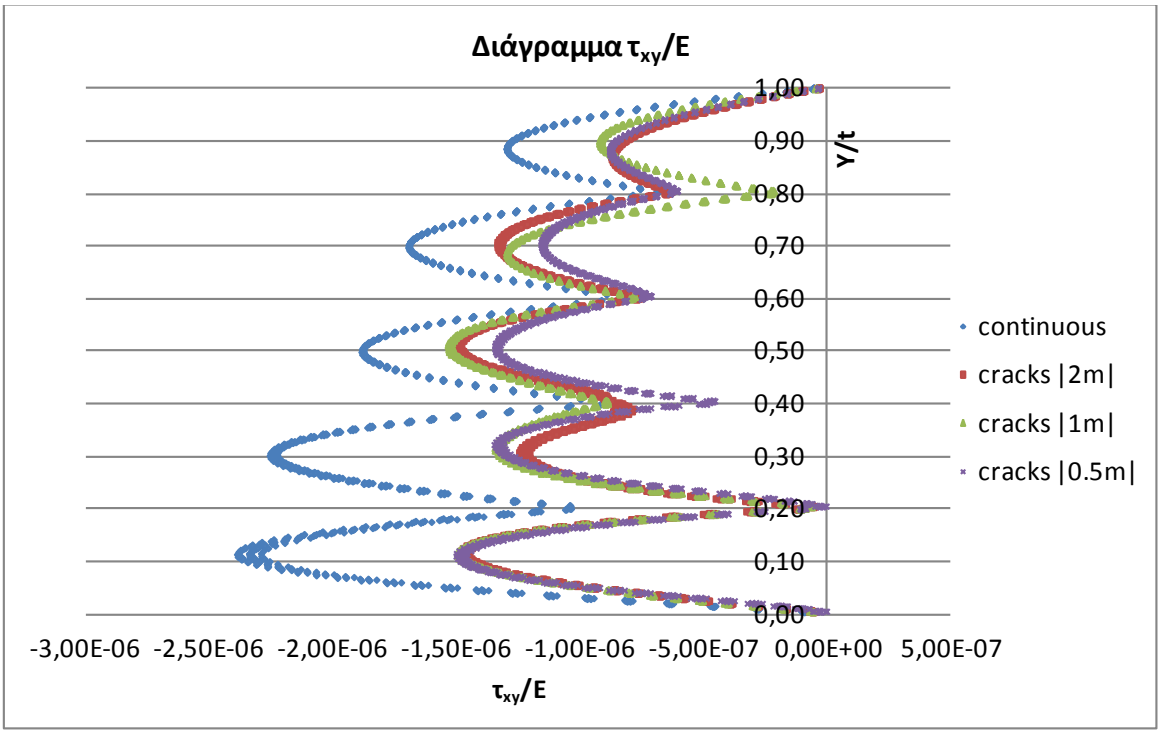
4.6.1 Αποτελέσματα οροφής πέντε στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,1



Διάγραμμα 4.29: Μεταβολή ανηγμένης σ_{xx} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0,1

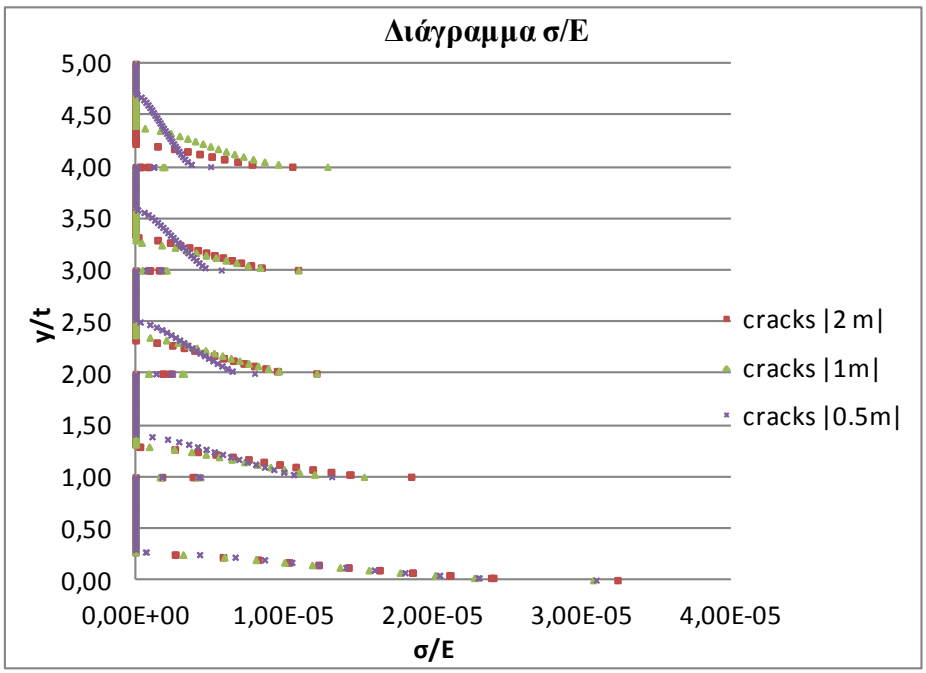


Διάγραμμα 4.30: Μεταβολή ανηγμένης σ_{yy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0,1

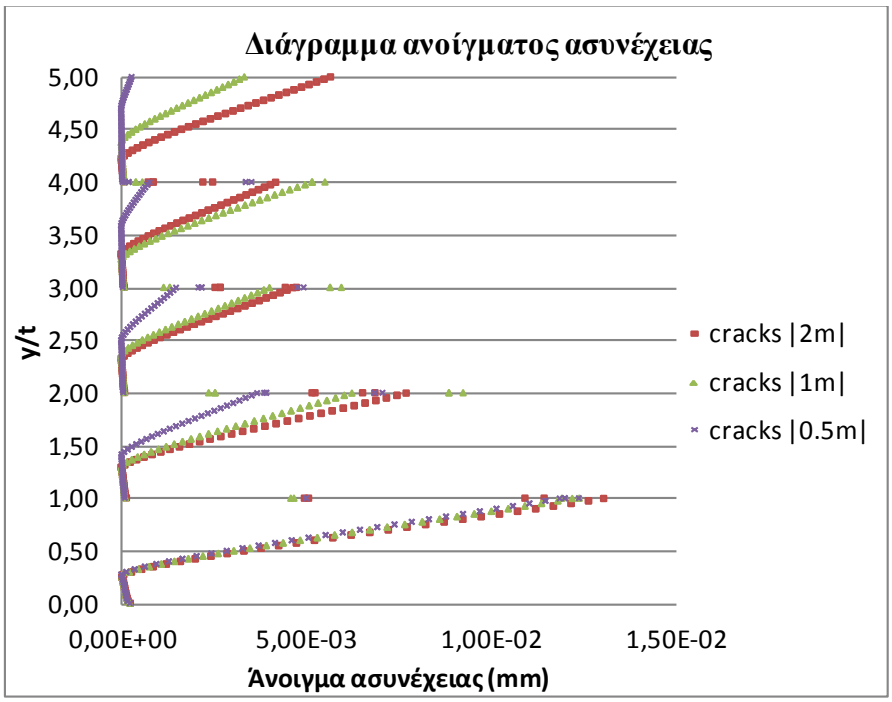


Διάγραμμα 4.31: Μεταβολή ανηγμένης τ_{xy} καθ' ύψος συνεχούς και ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων για x/L=0,1

4.6.2 Αποτελέσματα οροφής πέντε στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0

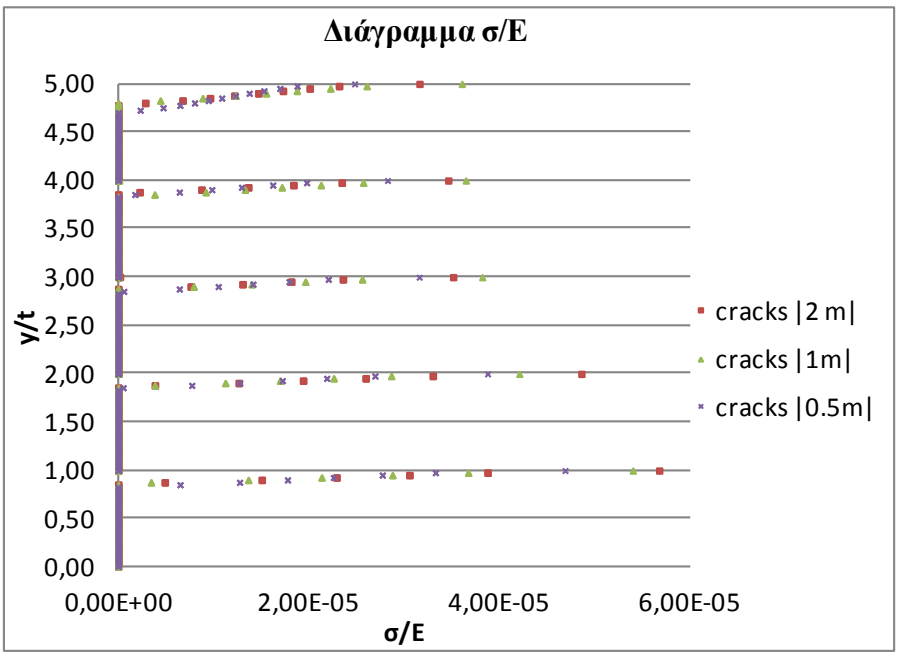


Διάγραμμα 4.32: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων, πάνω στην στήριξη (x/L=0)

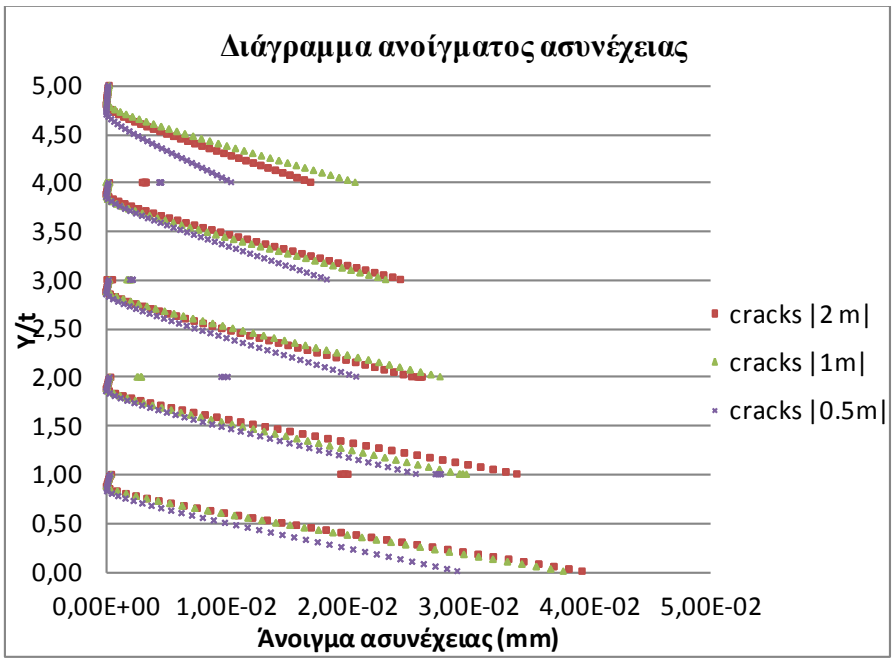


Διάγραμμα 4.33: Άνοιγμα ασυνέχειας πάνω στην στήριξη (x/L=0), καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων

4.6.3 Αποτελέσματα οροφής πέντε στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες x/L=0,5



Διάγραμμα 4.34: Μεταβολή ανηγμένης ορθής τάσης πάνω στην ασυνέχεια, καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων, στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5)



Διάγραμμα 4.35: Άνοιγμα ασυνέχειας στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5), καθ' ύψος ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων

4.6.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων οροφής πέντε στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες

Με βάση το διάγραμμα της οριζόντιας ανηγμένης ορθής τάσης σ_{xx} διαπιστώνεται η ανάπτυξη της σ_{xx} στην ρωγματωμένη οροφή, σε σχέση με την περίπτωση της συνεχούς. Οι σ_{xx} που αναπτύσσονται είναι θλιπτικές. Κατά την μετάβαση στα υψηλότερα στρώματα φαίνεται ότι αναπτύσσεται λιγότερο.

Σχετικά με την κατακόρυφη ορθή τάση σ_{yy} φαίνεται ότι δεν αναπτύσσονται σ_{yy} στον ίδιο βαθμό με της συνεχούς οροφής και συμπεριφέρονται ως θλιπτικές.

Όσον αφορά την διατμητική τάση τ_{xy}, παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά σε σχέση με την συνεχή οροφή. Στην περίπτωση της συνεχούς οροφής, αναπτύσσονται μεγαλύτερες τάσεις.

Παρακάτω, παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της ορθής τάσης και το άνοιγμα των ασυνεχειών.

Πίνακας 4.10: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων (x/L=0)

x/L=0	|Cracks 2m |			|Cracks 1m |			|Cracks 0,5m |		
Στρώματα	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (m)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (m)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (m)	σ_{max} (Pa)
5	30	1,31E-02	9,23E+05	32	1,24E-02	8,82E+05	45-70	1,24E-02	8,76E+05

Πίνακας 4.11: Σύνοψη αποτελεσμάτων ρωγματωμένης οροφής πέντε στρωμάτων (x/L=0,5)

x/L=0,5	|Cracks 2m |			|Cracks 1m |			|Cracks 0,5m |		
Στρώματα	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)	Μήκος επαφής (%)	Άνοιγμα ασυνέχειας (mm)	σ_{max} (Pa)
5	80	3,93E-02	1,62E+06	80	3,78E-02	1,54E+06	80	2,90E-02	1,34E+06

Στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (x/L=0,5), η ασυνέχεια ανοίγει από το 80% του μήκους της μέχρι την κάτω ακραία ίνα του εκάστοτε στρώματος. Στην στήριξη (x/L=0) ξεκινάει να ανοίγει από το 30-70% του μήκους της, μέχρι την πάνω ακραία ίνα των στρωμάτων. Σε αυτό το σημείο ελέγχου, διαπιστώνεται ότι μεγαλύτερο μήκος επαφής παρουσιάζουν οι πιο πυκνές ασυνέχειες, όπου στα υψηλότερα στρώματα η διαφορά είναι αισθητή.

Από το διάγραμμα του ανοίγματος της ασυνέχειας διαπιστώνεται ότι κατά την μετάβαση σε υψηλότερο στρώμα, το άνοιγμα των ασυνεχειών μειώνεται. Επίσης, όσο πιο πυκνές είναι οι κατακόρυφες ασυνέχειες, μειώνεται το άνοιγμα αυτών, με την ασυνέχεια αποστάσεως 0,5m να παρουσιάζει αισθητή μείωση, σε σχέση με τα άλλες δυο ομάδες ασυνεχειών. Ειδικά, πάνω στην στήριξη φαίνεται ότι στα υψηλότερα στρώματα η ασυνέχεια των 0,5 m ανοίγει ελάχιστα.

4.7 Σύγκριση βυθίσεων οροφών με ή χωρίς την παρουσία κατακόρυφων ασυνεχειών

Είναι σημαντικό να πραγματοποιηθεί η σύγκριση των βυθίσεων, στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος, για όλες τις περιπτώσεις οροφής που εξετάζονται, όταν πρόκειται για συνεχή στρώματα και όταν υπεισέρχονται σε αυτά κατακόρυφες ασυνέχειες, με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση τους.

Ως εκ τούτου, στον πίνακα 4.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των βυθίσεων στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος για κάθε τύπο οροφής και εκτιμάται η αύκηση των βυθίσεων των οροφών με κατακόρυφες ασυνέχειες, σε σχέση με τις οροφές που έχουν συνεχή στρώματα.

Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα βυθίσεων για όλους τους τύπους οροφής

	Βυθίσεις (m)						
	ΣΥΝΕΧΕΙΣ	**ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΕΣ**			**Διαφοροποίηση %**		
	-	**| Cracks 2m|**	**| Cracks 1m|**	**| Cracks 0,5m|**	**| Cracks 2m|**	**| Cracks 1m|**	**| Cracks 0,5m|**
Μονοστρωματική οροφή	1,24E-04	3,78E-04	3,67E-04	3,47E-04	67,2	64,3	59,2
Διστρωματική οροφή	1,43E-04	4,33E-04	4,13E-04	4,01E-04	67,1	62,5	59,6
Οροφή με τρία στρώματα	1,59E-04	4,91E-04	4,66E-04	4,42E-04	67,7	62,6	57,8
Οροφή με τέσσερα στρώματα	1,67E-04	5,56E-04	4,93E-04	4,48E-04	70,0	58,8	50,6
Οροφή με πέντε στρώματα	1,68E-04	1,26E-03	1,16E-03	7,74E-04	86,6	79,0	48,3

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 4.12, είναι φανερό ότι η παρουσία των κατακόρυφων ασυνεχειών στα συνεχή στρώματα, αυξάνει τις βυθίσεις στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος, σε ποσοστό 48-87%.

Παρατηρείται ότι για κάθε τύπο οροφής, όσο πιο πυκνές είναι οι κατακόρυφες ασυνέχειες, τόσο λιγότερο αυξάνονται οι βυθίσεις σε σχέση με τις συνεχείς οροφές. Το αναμενόμενο ήταν να συμβαίνει το αντίθετο. Αυτό, ενδεχομένως, οφείλεται στις διαφορετικές συνοριακές συνθήκες στις στηρίξεις, οι οποίες χαρακτηρίζονται από ενδοσιμότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΟΡΟΦΗΣ ΜΕ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΕΣ ΑΓΚΥΡΩΣΕΙΣ

5.1 Ενίσχυση οροφής στρωσιγενών πετρωμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η συμπεριφορά της ενισχυμένης οροφής, του υπόγειου ανοίγματος, για στρωσιγενή πετρώματα που είναι συνεχή και όταν διακόπτονται από κατακόρυφες ασυνέχειες.

Η ενίσχυση των στρωμάτων αποσκοπεί στην αποφυγή του διαχωρισμού των κατώτερων στρωμάτων και στην αποφυγή ολίσθησης μεταξύ αυτών, εξαναγκάζοντας τα επιμέρους στρώματα να λειτουργήσουν ως ενιαίος συμπαγής φορέας.

Η μέγιστη απαιτούμενη προένταση, όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 1.4, προκύπτει σύμφωνα με την σχέση (Goodman, 1980):

$$p_{b,max}(x = 0) \geq \frac{3}{4} * \frac{\gamma * s}{\tan\varphi_j}$$

Όπου γ: το ειδικό βάρος του σχηματισμού, s: το μήκος του υπόγειου ανοίγματος και φ_j: η γωνία τριβής των ασυνεχειών.

Από την παραπάνω σχέση, είναι φανερό ότι η απαιτούμενη προένταση είναι ανεξάρτητη του πάχους των στρωμάτων.

Τα δεδομένα και της απαιτούμενης προέντασης παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

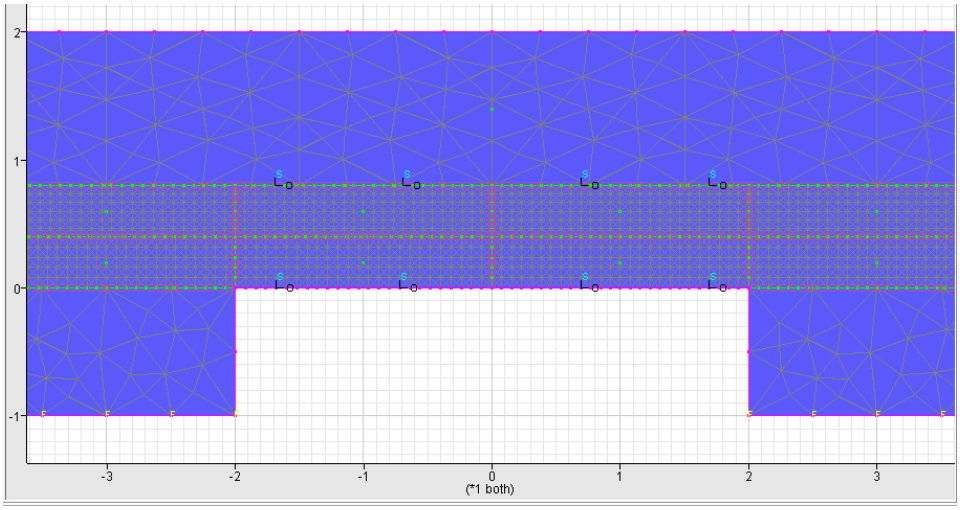
Πίνακας 5.1: Δεδομένα μέγιστης απαιτούμενης προέντασης

Μήκος υπόγειου ανοίγματος s (m)	4
Γωνία τριβής ασυνεχειών φ_j (^{o})	30
Πυκνότητα ρ (MN/m^3)	0,027
Μέγιστη απαιτούμενη προένταση $P_{b,max}$ (kPa)	141

Για κάθε περίπτωση στρωσιγενούς οροφής, επιδιώκεται η σύσφιξη των στρωμάτων με χρήση προτεταμένων αγκυρίων, σε κάνναβο 1x1m, με μέγιστη απαιτούμενη προένταση $P_{b,max}$=141kPa.

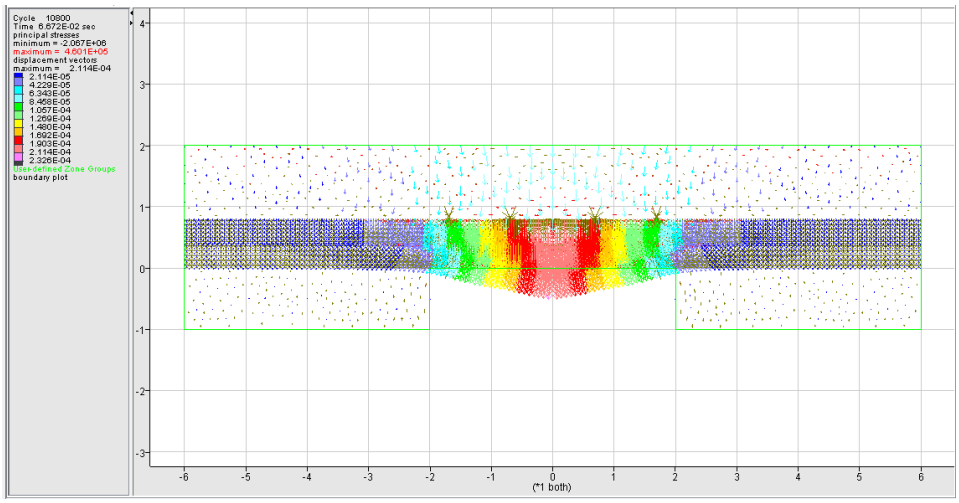
Στις προσομοιώσεις των στρωσιγενών οροφών, επιλέγεται η εφαρμογή δύναμης, διότι προσομοιώνει καλύτερα την προένταση των αγκυρίων. Η λειτουργία των αγκυρίων σε προένταση, μέσω του κώδικα, δεν ήταν η αναμενόμενη. Σαφώς, η δύναμη που εφαρμόζεται είναι 141kN, εφόσον προτιμάται κάνναβος 1x1m.

Προκείμενου, να αποφευχθεί η τοποθέτηση των αγκυριών πάνω σε κατακόρυφες ασυνέχειες, οι δυνάμεις εφαρμόζονται στις θέσεις ±0,7m και ±1,7m από το κέντρο του υπόγειου ανοίγματος. Για παράδειγμα, στην εικόνα 5.1 παρουσιάζεται η εφαρμογή των φορτίων στην περίπτωση της διστρωματικής οροφής που εμπεριέχει κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2 μέτρα.



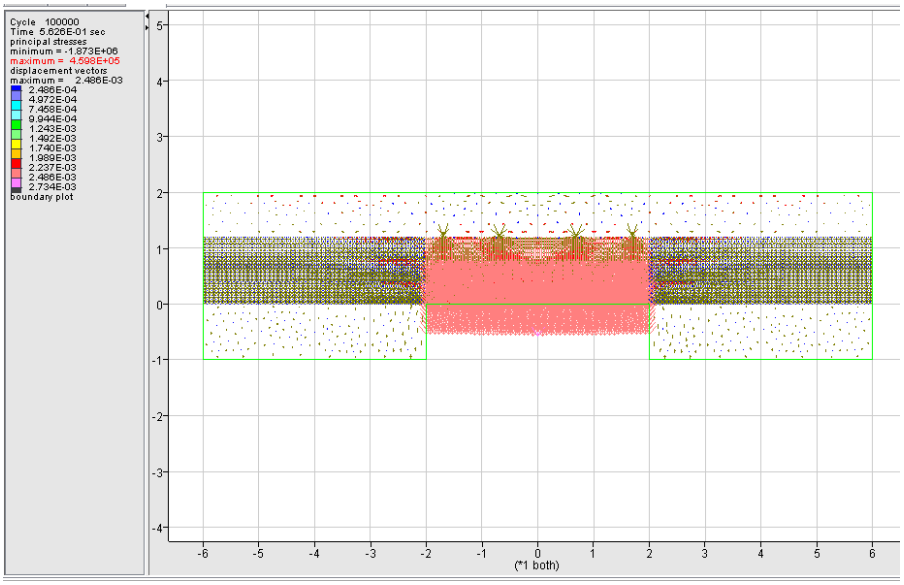
Εικόνα 5.1: Εφαρμογή φορτίων για την ενίσχυση διστωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m μέσω κώδικα Udec

Μετά την εφαρμογή των δυνάμεων στις στρωσιγενείς οροφές, λαμβάνεται η τιμή της βύθισης στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος, προκειμένου να πραγματοποιηθεί σύγκριση με την αρχική βύθιση της οροφής, δηλαδή πριν την ενίσχυση της. Στην εικόνα 5.2 αναπαριστώνται οι βυθίσεις της διστρωματικής οροφής, με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m που προκύπτουν μετά την εφαρμογή των δυνάμεων.

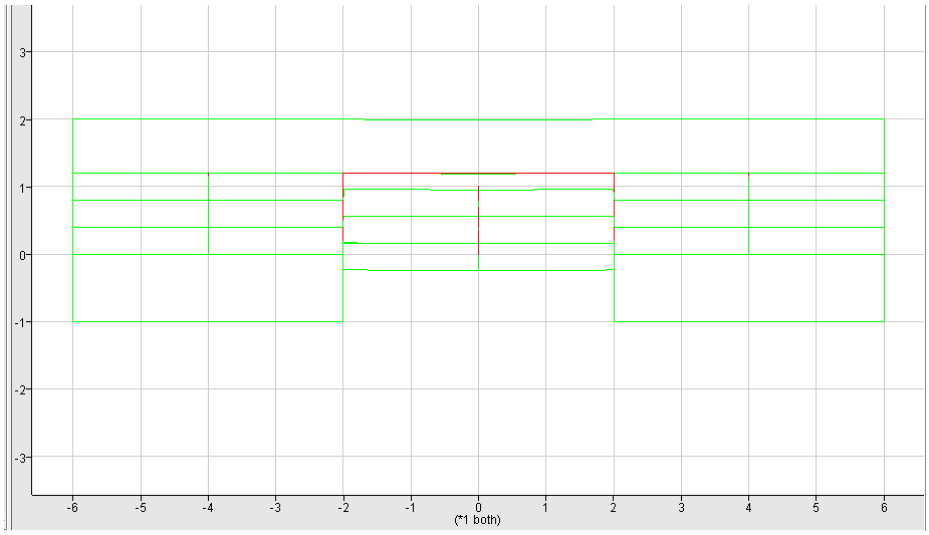


Εικόνα 5.2: Βυθίσεις ενισχυμένης διστωματικής οροφής με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m

Στην περίπτωση της οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m, με την επιβολή του φορτίου των 141kN, παρατηρείται (Εικόνα 5.3) ότι η οροφή ολισθαίνει, που σημαίνει ότι η επαφή των ασυνεχειών έχει χαθεί. Στην εικόνα 5.4, παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα, οι ανοιγμένες ασυνέχειες μετά την επιβολή του φορτίου.



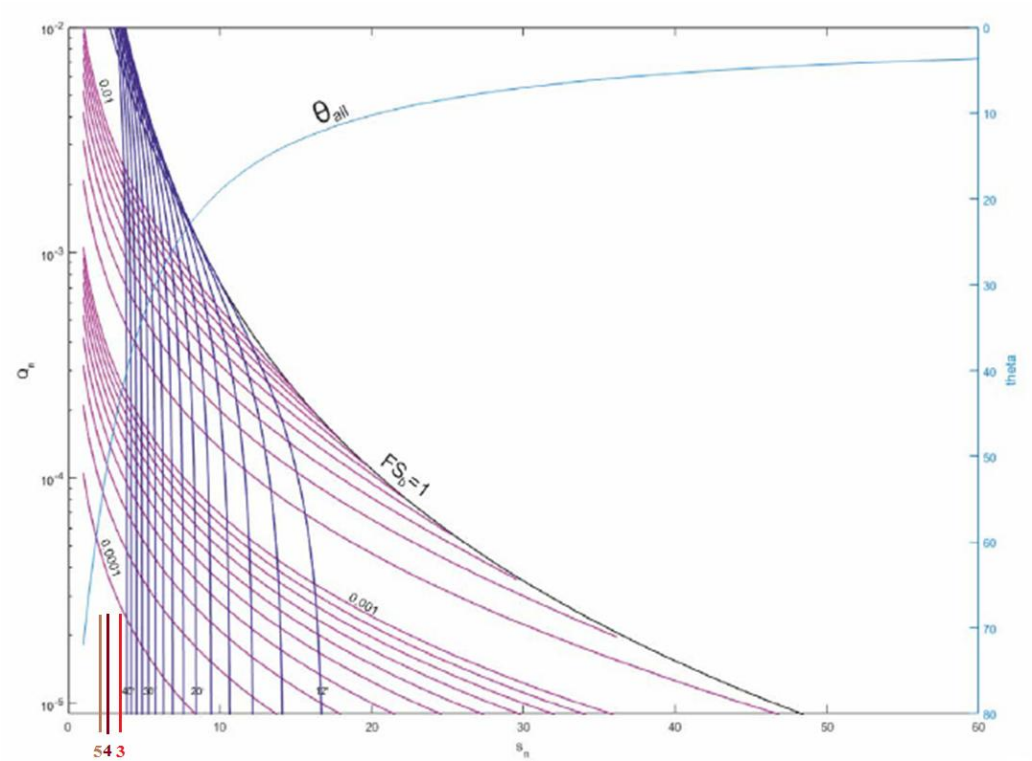
Εικόνα 5.3: Βυθίσεις οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m, με το φορτίο των 141kN



Εικόνα 5.4: Αναπαράσταση ολίσθησης στρωμάτων οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m και ανοίγματος ασυνεχειών με το φορτίο των 141kN

Από την εικόνα 5.4, είναι φανερό ότι τα τρία στρώματα λειτουργούν ως ενιαίος φορέας, διότι έχει δημιουργηθεί κοινό βέλος κάμψης. Αυτό σημαίνει ότι τα φορτία επαρκούν για την αποτροπή του διαχωρισμού των κατώτερων στρωμάτων.

Με βάση το διάγραμμα ευστάθειας των πολυρωγματωμένων οροφών (Διάγραμμα 5.1) μελετώνται οι πιθανοί τύποι αστοχίας αυτών. Η φόρτιση του φορέα Q_n (Κεφάλαιο 1.4) ισούται με 3,79 $*10^{-12}$. Λόγω μικρής φόρτισης, η οροφή δεν κινδυνεύει να αστοχήσει σε λυγισμό και σε καμπτική θλίψη. Ωστόσο, η λυγητότητα s_n αλλάζει, καθώς αυξάνονται τα στρώματα της οροφής. Εφόσον, η σύσφιξη των στρωμάτων αποσκοπεί στην δημιουργία ενός ενιαίου φορέα, το πάχος της οροφής αντιστοιχεί στο συνολικό πάχος των στρωμάτων που την απαρτίζουν. Στο διάγραμμα 5.1 αποτυπώνονται οι καμπύλες ολίσθησης της ενισχυμένης οροφής τριών έως πέντε στρωμάτων.



Διάγραμμα 5.1: Αποτύπωση καμπυλών ολίσθησης ενισχυμένων οροφών τριών έως πέντε στρωμάτων στο διάγραμμα εκτίμησης της ευστάθειας πολυρωγματωμένης οροφής (Γιούτα-Μήτρα & Σοφιανός, 2018)

Από το διάγραμμα 5.1 φαίνεται ότι η ενισχυμένη οροφή κρίνεται ασταθής έναντι ολίσθησης, διότι οι απαιτήσεις της γωνίας τριβής των κατακόρυφων ασυνεχειών είναι πολύ μεγαλύτερες.

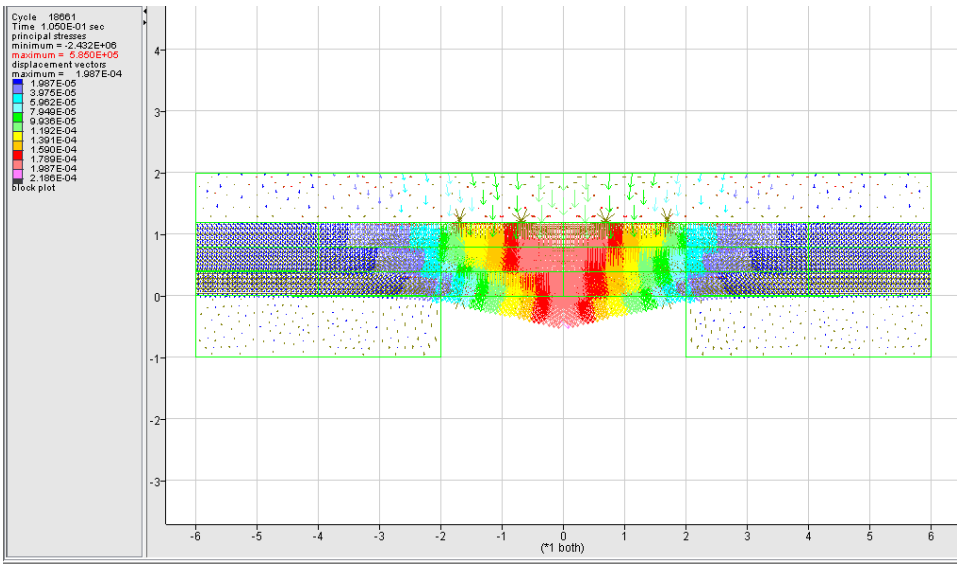
Η ρωγματωμένη οροφή, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των βυθίσεων στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος (Κεφάλαιο 4.7), δεν χρειάζεται υποστήριξη. Παρουσιάζει, μεν, διαφορά σε σχέση με την συνεχή οροφή, αλλά στο συγκεκριμένο κεφάλαιο εξετάζεται η διαφοροποίηση που μπορεί να αποφέρει η ενίσχυση των στρωμάτων στις τιμές των κατακόρυφων μετακινήσεων.

Το άνοιγμα των ασυνεχειών στην περίπτωση της οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m, εντοπίζεται στις στηρίξεις, όπου διαπιστώνεται η υπέρβαση της διατμητικής αντοχής στις διεπιφάνειες αυτών και τελικά προκαλείται ολίσθηση της οροφής. Έτσι, επιλέγεται η προσαύξηση της αρχικής προέντασης, ικανής να συγκρατήσει τα στρώματα της οροφής και να αυξήσει την τριβή των διεπιφανειών. Για κάθε τύπο οροφής, πραγματοποιούνται δοκιμές της ελάχιστης προσαύξησης του αρχικού επιβαλλόμενου φορτίου που απαιτείται, προκειμένου να μην ολισθαίνει η εκάστοτε οροφή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα επιβαλλόμενης δύναμης για κάθε τύπο οροφής

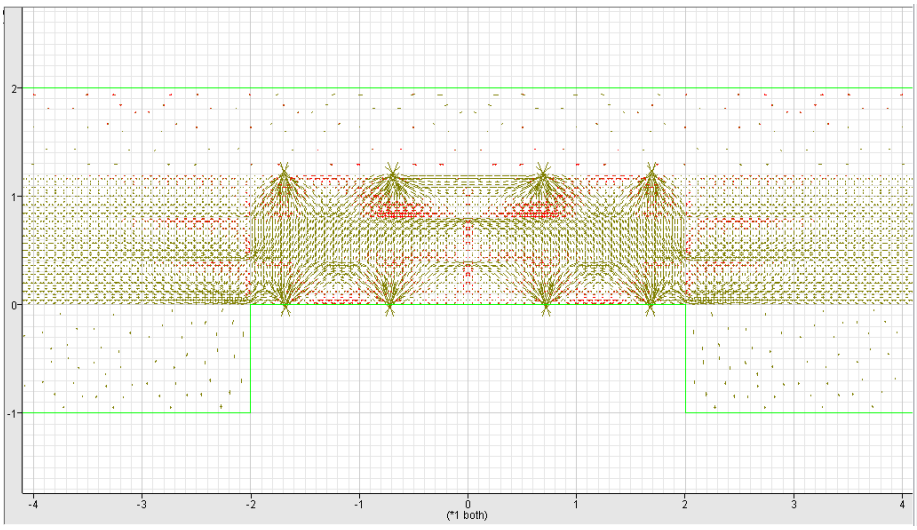
Τύπος οροφής	**Προσαύξηση αρχικής δύναμης**	**Δύναμη (kN)**
Διστρωματική οροφή	-	141,00
Οροφή με τρία στρώματα	0,3	183,30
Οροφή με τέσσερα στρώματα	0,8	253,80
Οροφή με πέντε στρώματα	0,9	267,90

Στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 5.5) αναπαριστώνται οι βυθίσεις της οροφής τριών στρωμάτων, με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m που προκύπτουν μετά την εφαρμογή του προσαυξημένου φορτίου.



Εικόνα 5.5: Βυθίσεις ενισχυμένης οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m

Στην εικόνα 5.6 παρουσιάζονται οι συνολικές κύριες τάσεις που αναπτύσσονται εντός της ενισχυμένης ρωγματωμένης οροφής.



Εικόνα 5.6: Κύριες τάσεις ενισχυμένης οροφής τριών στρωμάτων με κατακόρυφες ασυνέχειες ανά 2m

Με την εφαρμογή του προσαυξημένου φορτίου των 183,3kN για την ενίσχυση της οροφής, φαίνεται από την Εικόνα 5.6 ότι προκαλείται μια διόγκωση στις περιοχές γύρω από τα προεντεταμένα αγκύρια, η οποία συμβάλλει θετικά στην ευστάθεια έναντι ολίσθησης. Πιο συγκεκριμένα, αυξάνεται η τριβή στις διεπιφάνειες των κατακόρυφων ασυνεχειών, με απότοκο την παρεμπόδιση ολίσθησης της οροφής.

Τα αντίστοιχα ισχύουν για τις περιπτώσεις οροφής των τεσσάρων και πέντε στρωμάτων. Τα αποτελέσματα των βυθίσεων των ενισχυμένων οροφών δίνονται στο ακόλουθο κεφάλαιο.

5.2 Αποτελέσματα βυθίσεων ενισχυμένων οροφών στρωσιγενών πετρωμάτων

Από τις προσομοιώσεις των ενισχυμένων οροφών στρωσιγενών πετρωμάτων λαμβάνονται οι τιμές των βυθίσεων στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος και συγκρίνονται με τις βυθίσεις των αντίστοιχων μη ενισχυμένων οροφών, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση των προτεταμένων αγκυρίων. Τα αποτελέσματα των στρωσιγενών οροφών που διακόπτονται από κατακόρυφες ασυνέχειες παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3, ενώ των συνεχών στρωσιγενών οροφών στον πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα βυθίσεων των οροφών με κατακόρυφες ασυνέχειες, με και χωρίς ενίσχυση

	Χωρίς ενίσχυση			Με ενίσχυση					
	Βυθίσεις (m)						*Μειώσεις Βυθίσεων %*		
	| Cracks 2m|	**| Cracks 1m|**	**| Cracks 0,5m|**	**| Cracks 2m|**	**| Cracks 1m|**	**Cracks 0,5m**	**| Cracks 2m|**	**| Cracks 1m|**	**| Cracks 0,5m|**
Διστρωματική οροφή	4,33E-04	4,13E-04	4,01E-04	2,11E-04	2,09E-04	2,18E-04	51,2	49,4	45,5
Οροφή με τρία στρώματα	4,91E-04	4,66E-04	4,42E-04	1,99E-04	2,24E-04	2,32E-04	59,5	52,0	47,6
Οροφή με τέσσερα στρώματα	5,56E-04	4,93E-04	4,48E-04	1,98E-04	2,41E-04	2,13E-04	64,3	51,1	52,6
Οροφή με πέντε στρώματα	1,26E-03	1,16E-03	7,74E-04	1,98E-04	2,37E-04	2,50E-04	84,2	79,6	67,7

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα βυθίσεων των συνεχών οροφών, με και χωρίς ενίσχυση

	Χωρίς ενίσχυση	Με ενίσχυση	
Τύπος οροφής	*Βυθίσεις (m)*		*Μειώσεις Βυθίσεων %*
Μονοστρωματική οροφή	1,24E-04	-	-
Διστρωματική οροφή	1,43E-04	1,26E-04	11,4
Οροφή με τρία στρώματα	1,59E-04	1,38E-04	13,0
Οροφή με τέσσερα στρώματα	1,67E-04	1,41E-04	15,7
Οροφή με πέντε στρώματα	1,68E-04	1,37E-04	18,3

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 5.3, είναι φανερό ότι η ενίσχυση της οροφής συνεισφέρει σε ικανοποιητικό βαθμό στην μείωση των βυθίσεων (45-84%), για όλες τις ομάδες των κατακόρυφων ασυνεχειών, που διακόπτουν τα στρώματα. Από τις τιμές των βυθίσεων, διαπιστώνεται ότι όσο πιο πυκνές είναι οι κατακόρυφες ασυνέχειες, τόσο πιο μικρές είναι οι βυθίσεις στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος. Επίσης, οι μειώσεις των βυθίσεων (%) είναι μικρότερες, όσο πιο πυκνές είναι οι κατακόρυφες ασυνέχειες.

Από τα αποτελέσματα των βυθίσεων των συνεχών οροφών (Πίνακας 5.4), παρατηρείται ότι η ενίσχυση μειώνει τις βυθίσεις σε μικρότερο ποσοστό (11-18%), σε σχέση με τις οροφές που διακόπτονται από κατακόρυφες ασυνέχειες. Ωστόσο, πριν την τοποθέτηση των αγκυρίων οι βυθίσεις ήταν εξίσου μικρότερες σε σχέση με τις οροφές που περιέχουν τις κατακόρυφες ασυνέχειες.

Επιπλέον, σημειώνεται ότι όσο περισσότερα στρώματα έχει η οροφή, παρατηρείται αύξηση του ποσοστού μείωσης των βυθίσεων (%).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η συμπεριφορά των πολυστρωματικών συνεχών και ρωγματωμένων οροφών που συναντώνται γύρω από υπόγεια ανοίγματα και η ενίσχυση αυτών.

Η μελέτη των στρωσιγενών οροφών, πραγματοποιείται μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων με τον αριθμητικό κώδικα UDEC 7.0. Προκειμένου, τα αποτελέσματα να θεωρηθούν αποδεκτά, πραγματοποιείται έλεγχος του μεγέθους των στοιχείων καννάβου, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με την αναλυτική λύση αμφίπακτης δοκού ορθογωνικής διατομής υπό ίδιον βάρος. Έτσι, κρίνεται ότι το μικρότερο μέγεθος στοιχείων του τετραγωνικού καννάβου, δίνει καλύτερη προσέγγιση σε σχέση με την αναλυτική λύση.

Στην συνέχεια, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις στρωσιγενών οροφών, εντός ασβεστολιθικού πετρώματος, αβαθών υπογείων ανοιγμάτων, με μόνο επίπεδο αδυναμίας την στρώση, καθώς και όταν τα στρώματα της διακόπτονται από ομάδες κατακόρυφων ασυνεχειών και λαμβάνει χώρα ο έλεγχος της κατανομής των τάσεων εντός των στρωμάτων και η βύθιση στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος.

Στην περίπτωση οροφής των συνεχών στρωμάτων πραγματοποιείται αναλυτική λύση, ως ένα μέτρο σύγκρισης διαφορετικών συνθηκών. Οι προσομοιώσεις προσεγγίζουν τις πραγματικές συνθήκες. Στην περίπτωση της αναλυτικής λύσης θεωρείται ότι πρόκειται για μία δοκό, μήκους όσο είναι το υπόγειο άνοιγμα (4m), πάχους όσο είναι το συνολικό πάχος των στρωμάτων, με πακτωμένα τα άκρα της, όπου η μόνη δύναμη που δέχεται είναι το ίδιον βάρος της. Στην προσομοίωση, οι συνοριακές συνθήκες είναι σε μεγαλύτερη απόσταση από τις παρειές του υπόγειου ανοίγματος, η οροφή πέρα από το βάρος της δέχεται επιπλέον το βάρος των υπερκειμένων και στις στηρίξεις υπάρχει εγκιβωτισμός σε πέτρωμα που χαρακτηρίζεται από ενδοσιμότητα. Από την σύγκριση της αναλυτικής και αριθμητικής λύσης παρατηρούνται οι αναμενόμενες διαφοροποιήσεις.

Με βάση τα αποτελέσματα των τάσεων, παρατηρείται ότι οι τάσεις που αναπτύσσονται εντός των στρωμάτων οροφής, παρουσιάζουν μια γενική μείωση κατά την μετάβαση σε υψηλότερα στρώματα της οροφής.

Στην περίπτωση των οροφών που διακόπτονται από τις κατακόρυφες ασυνέχειες, είναι φανερό ότι οι ασυνέχειες χάνουν την επαφή τους σε ένα ποσοστό του μήκους τους, στο οποίο ξεκινούν να αναπτύσσονται ορθές τάσεις εντός της επιφάνειας τους. Επιπλέον, παρατηρείται ότι όσο πιο πυκνές είναι οι κατακόρυφες ασυνέχειες, τόσο μικρότερο είναι το άνοιγμα τους

καθώς και οι ορθές τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτές. Ακόμη, παρατηρείται μια γενική μείωση του ανοίγματος των ασυνεχειών κατά την μετάβαση σε υψηλότερα στρώματα, κυρίως στις οροφές περισσότερων των 3 στρωμάτων.

Από τα αποτελέσματα των βυθίσεων στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος για κάθε τύπο οροφής, συμπεραίνεται ότι η παρουσία των κατακόρυφων ασυνεχειών στα συνεχή στρώματα, αυξάνει τις βυθίσεις στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος, σε ποσοστό (48-87%). Επιπρόσθετα, φαίνεται ότι όσο πιο πυκνές είναι οι κατακόρυφες ασυνέχειες, τόσο πιο μικρή είναι βύθιση στο κέντρο του υπόγειου ανοίγματος. Ακόμη, παρατηρείται ότι όσο αυξάνονται τα στρώματα της οροφής, αυξάνεται η βύθιση.

Τέλος, ενισχύονται οι στρωσιγενείς οροφές του υπόγειου ανοίγματος, όταν τα στρώματα είναι συνεχείς και όταν διακόπτονται από ομάδες κατακόρυφων ασυνεχειών. Με βάση τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος και των οριζόντιων ασυνεχειών εκτιμάται η απαιτούμενη προένταση για την σύσφιξη των στρωμάτων.

Στην περίπτωση οροφής περισσότερων εκ των δύο στρωμάτων, κρίνεται αναγκαία η προσαύξηση της εκτιμώμενης προέντασης, ώστε να αυξηθεί η τριβή των διεπιφανειών των κατακόρυφων ασυνεχειών και να αποφευχθεί η ολίσθηση της οροφής.

Με βάση τα αποτελέσματα των βυθίσεων συμπεραίνεται ότι η ενίσχυση της οροφής συνεισφέρει σε ικανοποιητικό βαθμό στην μείωση των βυθίσεων (45-84%), για όλες τις ομάδες των κατακόρυφων ασυνεχειών, που διακόπτουν τα στρώματα. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι οι μειώσεις των βυθίσεων (%) είναι μικρότερες, όσο πιο πυκνές είναι οι κατακόρυφες ασυνέχειες. Στην περίπτωση των συνεχών στρωμάτων παρατηρείται ότι η ενίσχυση της οροφής μειώνει τις βυθίσεις σε μικρότερο ποσοστό (11-18%).

Κλείνοντας, αυτού του είδους οι δομές πετρωμάτων που εντοπίζονται σε υπόγεια ανοίγματα, αποτελούν βασικό παράγοντα, που ελέγχουν την ασφάλεια των οροφών και των παρειών σε υπόγεια έργα, σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις, σε σήραγγες ή υπόγειους θαλάμους. Αναμφίβολα, η προσεκτική εποπτεία των οροφών συμβάλλει στην εξασφάλιση της ασφάλειας των υπογείων έργων.

NUMERICAL SIMULATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOUR AND REINFORCEMENT OF MULTI-LAYER CONTINUOUS AND DISCONTINUOUS ROOFS OF UNDERGROUND OPENINGS

EXTENDED ABSTRACT

The object of this dissertation is to investigate the behavior of multilayer continuous and cracked roofs around underground openings and their reinforcement as a means to reduce the stresses and displacements of the immediate roof.

Parallel geological layers are often found in different environments of underground excavations. These layers can be the result of sedimentation, rock metamorphosis, and even tensile deflections. Geometrically they are characterized by flatness and repetition, while mechanically by very low to zero tensile strength and low shear strength, in relation to that of unbreakable rock, due to the possibility of removal and sliding between them. Layered rocks can be solid to very cracked. Figure 1.1 shows a physical model of the failure process of a layered roof around an underground opening. This type of rock structure is a key factor in controlling the safety of roofs in underground works.

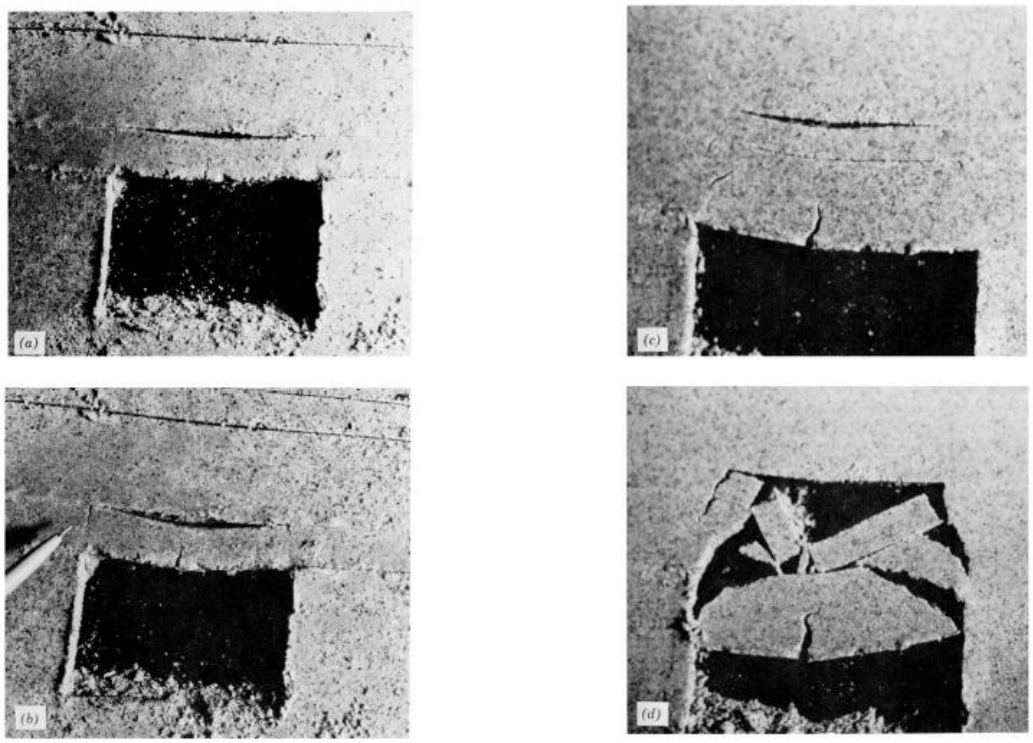


Figure 1: Physical model of the layered roof failure process (Goodman, 1989)

The study of the behavior of the stratified roof of an underground opening, in the present dissertation, is carried out through numerical simulations with the numerical code UDEC 7.0. In order for the results of the numerical solution to be considered acceptable, the model is validated for the case of a single layer of limestone roof in gravitational field, comparing the results with the analytical solution for a fixed-end beam under its self-weight.

Three characteristic points of the beam are selected from its left end to apply the analytical equations of stresses and displacements and compare them to the measured ones from the numerical models.

These points are:

- Near the support: x / L = 0,1
- At the center: x / L = 0,5
- A point near the center: x / L = 0,4

Where x: distance from its left end, L: beam length

Stresses are divided by the elastic rock modulus, so that the results are independent and have general validity.

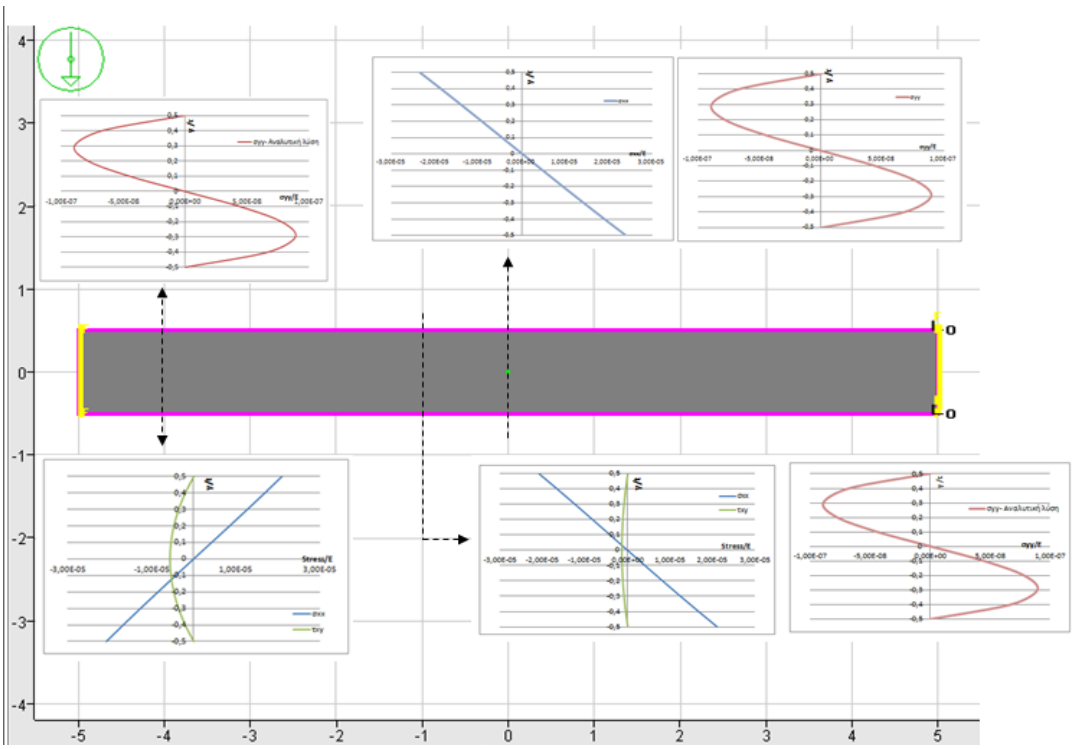


Figure 2: Simulation of the rectangular limestone roof beam with the diagrams of the dimensionless stresses at the three characteristic points of the beam

The rectangular limestone beam is solved for three cases of different discretization, which are:

1. For element side size el = 0,1m
2. For element side size el = 0.01m
3. For element side size el = 0.08m

Indicatively, the diagram of change of the dimensionless right vertical stresses in the center of the beam (Chart 1) and the difference of the vertical displacements for each size of the grid elements in relation to the analytical solution are presented (Table 1).

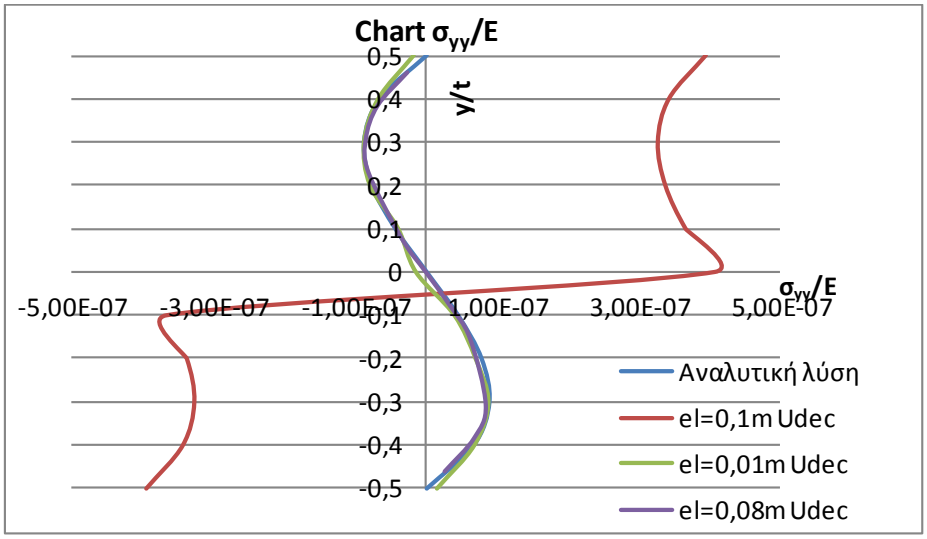


Chart 1: Results of dimensionless σ_{yy} for the three cases of discretization and the analytical solution for x / L = 0,5

Table 1: Comparative results of vertical displacement

Vertical displacements						
Anaylytical (mm)	Numerical (mm)			error %		
	e_l=0,1m	e_l=0,01m	e_l=0,08m	e_l=0,1m	e_l=0,01m	e_l=0,08m
0,302	0,297	0,301	0,298	1,7	0,5	1,4

It is judged that the more detailed grid, gives a better approach in relation to the analytical solution. However, the computational cost of the program is high and it takes a long time for the respective numerical solution, the size of the grid elements is chosen to be 0.08m in the areas of interest, for the following simulations, for the study of stratified roofs.

For this dissertation, simulations are performed for the case of continuous and cracked (three groups of vertical discontinuities) stratified roofs, in limestone rock, shallow underground openings. The study is conducted for a roof of one to five layers, with layer thickness 0.4m. For each roof case, the stresses on the support are measured, at a point near it and in the middle of the underground opening. In the case of a continuous layer roof, the analytical solution is provided, as a measure of comparison of different boundary conditions. In the case of cracked roofs, the principal stresses that develop within the vertical discontinuities are measured, as well as the crack opening. In addition, near the support, the stresses that develop along the height of the roof layers are measured and compared to the stresses of the respective continuous roofs.

Below are indicative results for a selection of cases of continuous and cracked roofs.

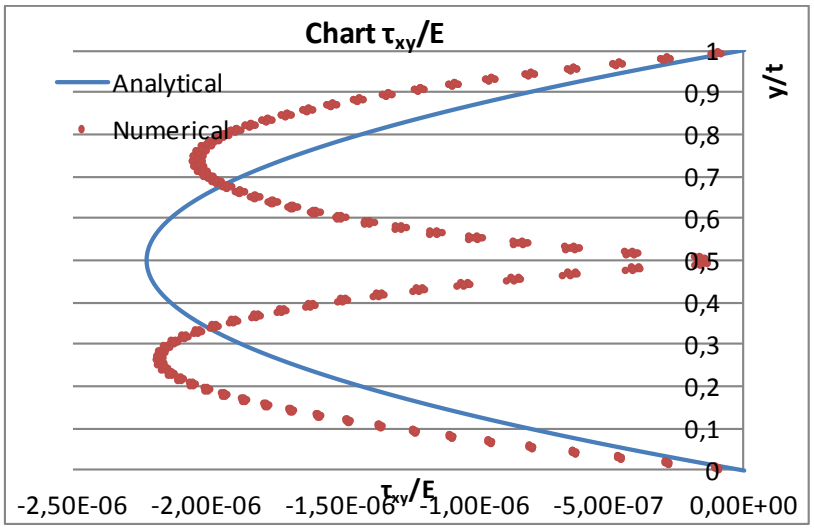


Chart 2: Change of dimensionless τ_{xy} along the roof's height of two layers for x / L = 0,1

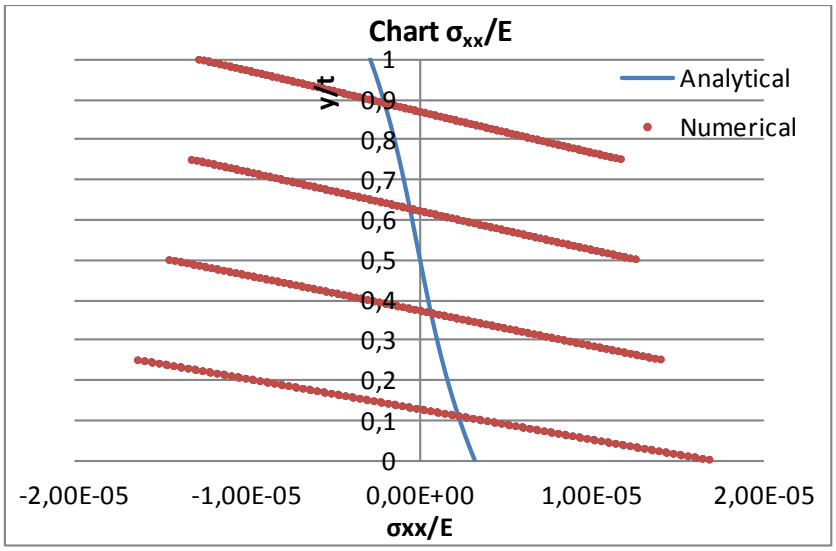


Chart 3: Change of dimensionless σ_{xx} along the roof's height of four layers for x / L = 0,5

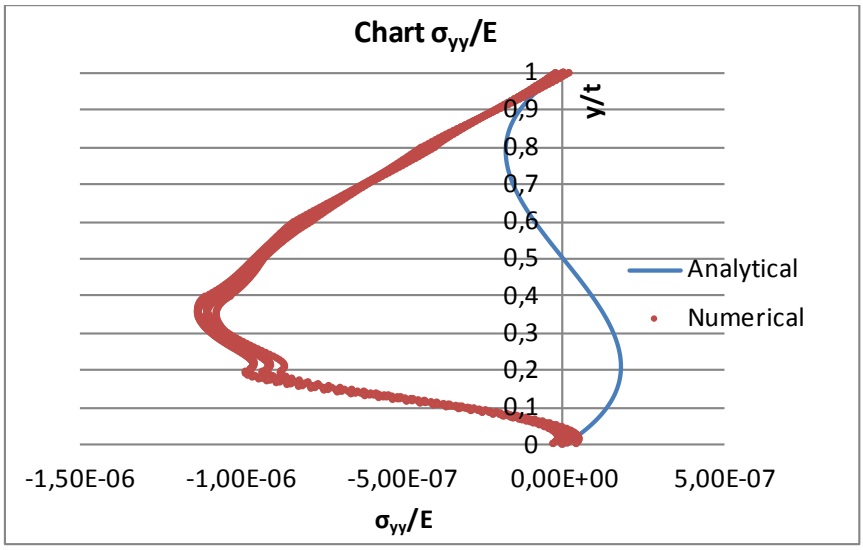


Chart 4: Change of dimensionless σ_{yy} along the roof's height of five layers for x / L = 0,1

The curves of the results of the numerical solution show differences compared to the analytical solution. This is because the simulation is closer to the real conditions. During the simulation, the boundary conditions are farther away from the sides of the underground opening. The roof bears the weight of the overlying rocks. Also, in the areas where there are supports (anchoring) of the beam, in the case of the model there is boxing in rock, and the supports can now be deformed. Another difference between analytical and numerical solution is that in the analytical solution, a solid beam with a thickness equal to the total thickness of the layers is considered.

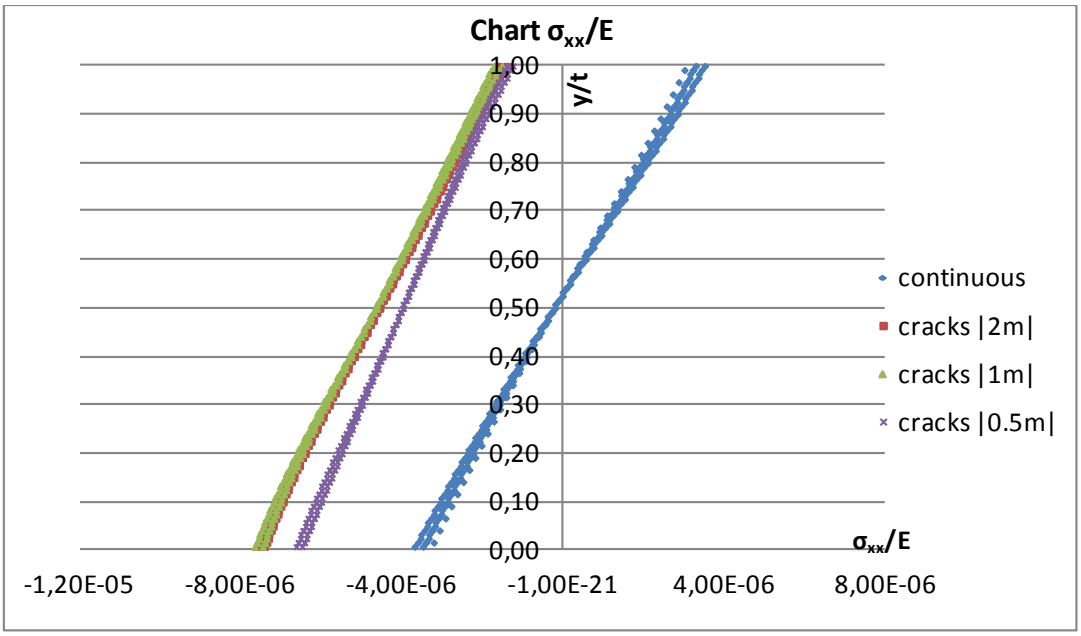


Chart 5: Change of dimensionless σ_{xx} in height of continuous and cracked single-layer roof for x/L=0,1

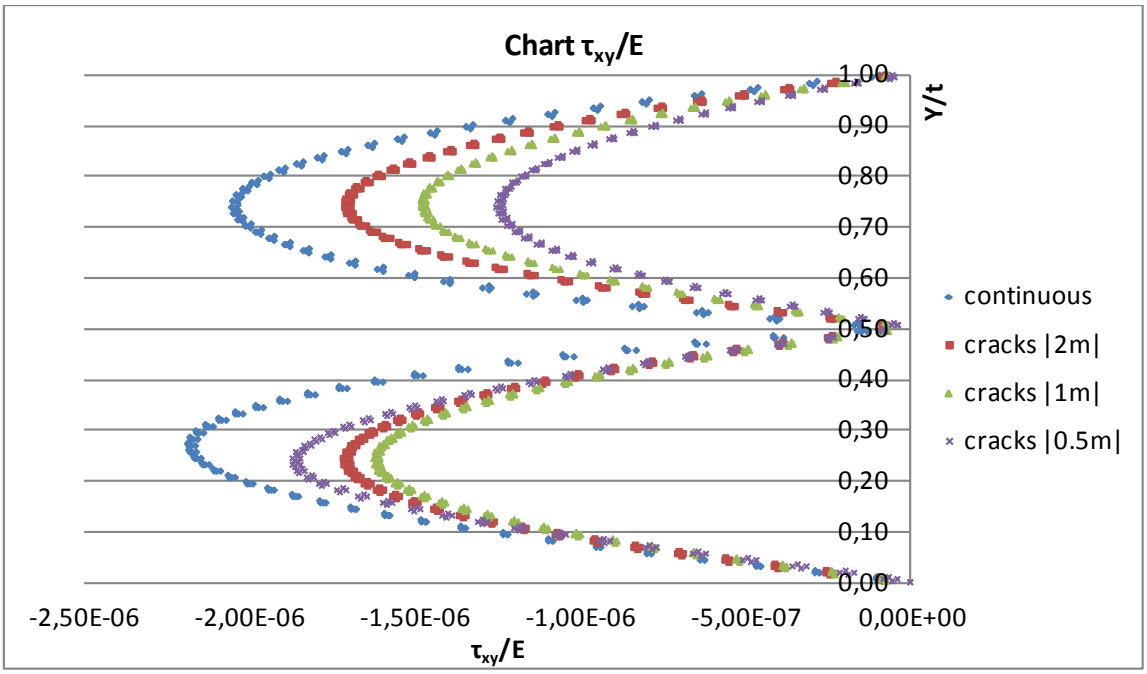


Chart 6: Change of dimensionless τ_{xy} in height of continuous and cracked roof with two layers for x/L=0,1

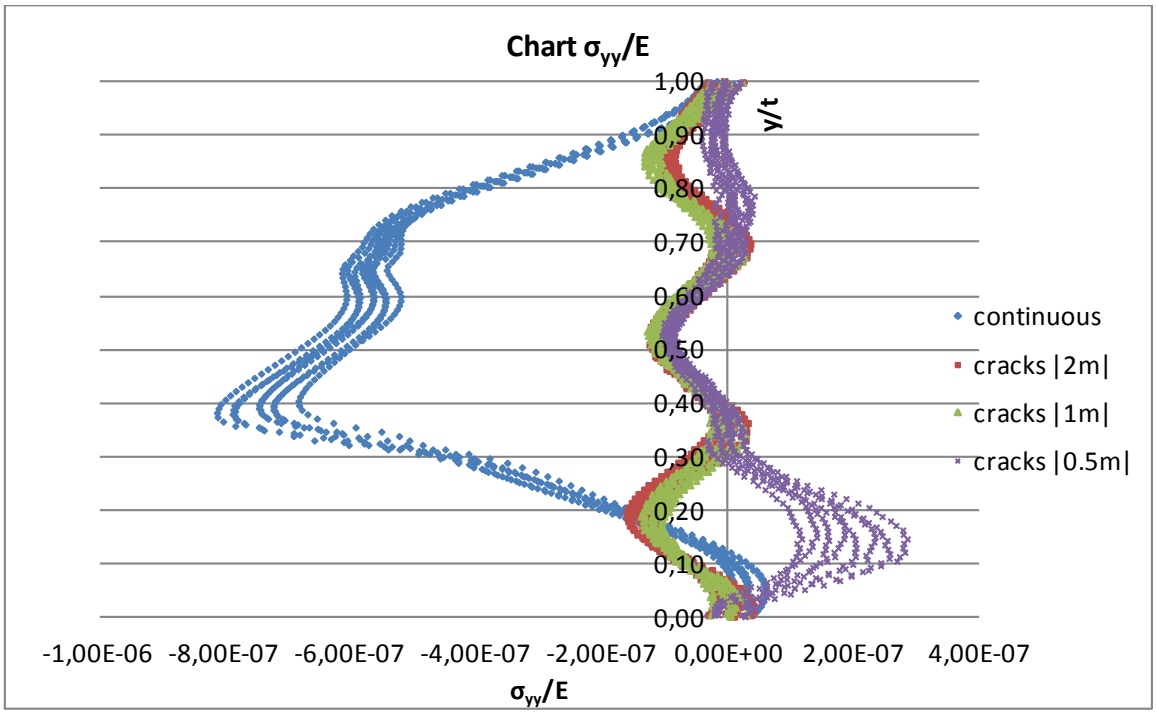


Chart 7: Change of dimensionless σ_{yy} in height of continuous and cracked roof of three layers for x/L=0,1

It is observed that the presence of vertical discontinuities results in a general reduction in the growth of σ_{yy} and τ_{xy} on the roof, while it appears that σ_{xx} increases when the roof is cracked relative to the continuous.

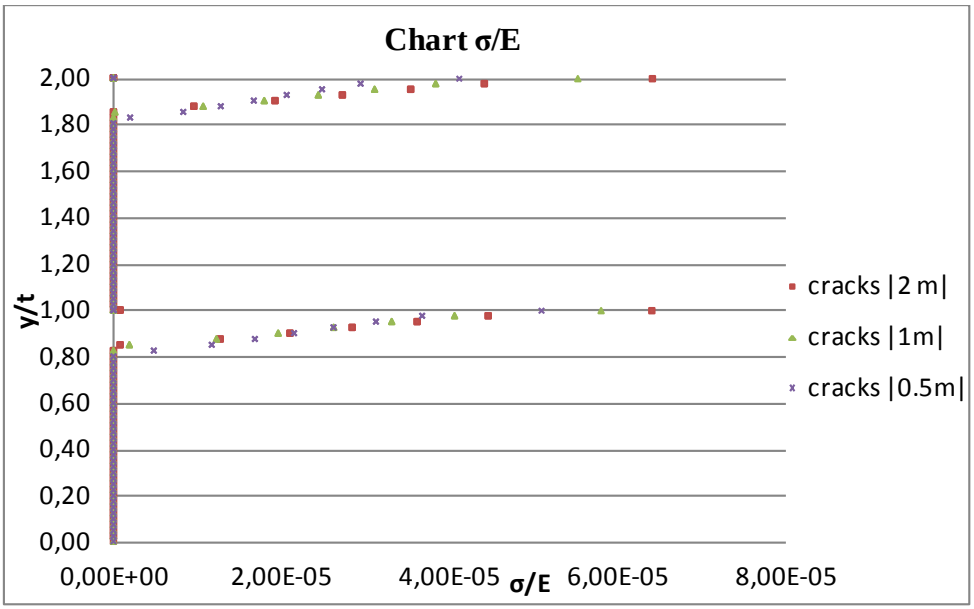


Chart 8: Change of dimensionless principal stress on the discontinuity, at the height of a cracked roof with two layers, in the center of the underground opening (x / L = 0,5)

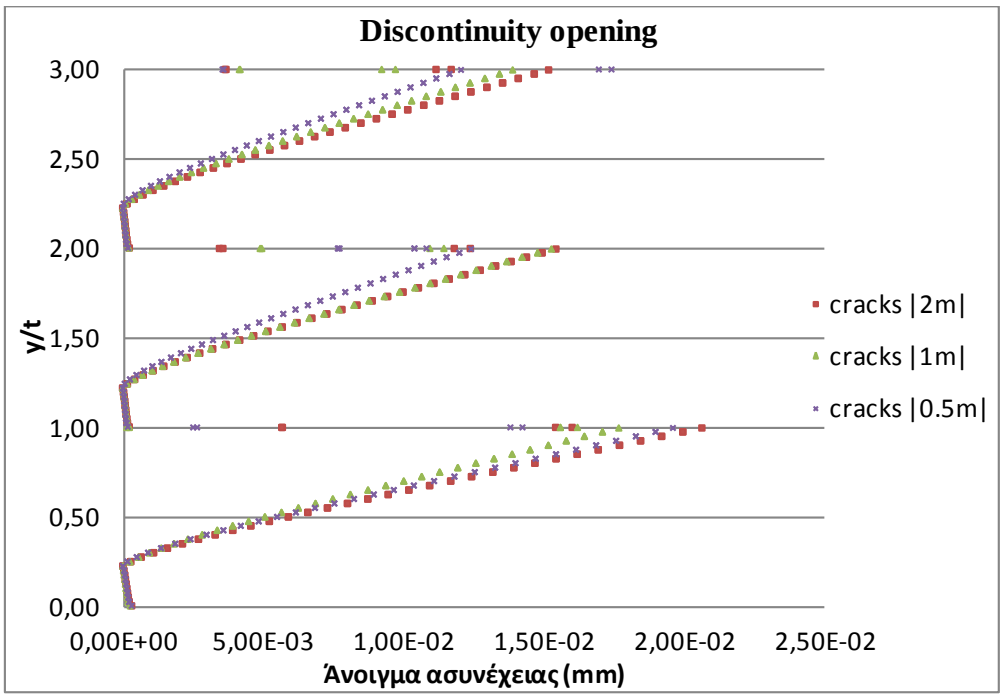


Chart 9: Discontinuity opening on the support (x / L = 0), at the height of a cracked roof of three layers

The discontinuities lose their contact, in a percentage of their length, where the development of the principal stresses on them and the opening of the discontinuities is observed. Also, it is observed that the denser the discontinuities, the smaller their opening. The principal stresses that develop on the surface of the discontinuities are constantly decreasing, as the distance of the discontinuities decreases.

For each roof case, the control of vertical movements in the middle of the underground opening is carried out. In this way, the effect of the presence of vertical discontinuities within the continuous layers is studied (Table 2).

Table 2: Vertical displacements results for each roof case

	Vertical displacements (m)						
	Continuous	**With vertical discontinuities**			**Increase %**		
	-	**| Cracks 2m|**	**| Cracks 1m|**	**| Cracks 0,5m|**	**| Cracks 2m|**	**| Cracks 1m|**	**| Cracks 0,5m|**
Roof with 1 layer	1,24E-04	3,78E-04	3,67E-04	3,47E-04	67,2	64,3	59,2
Roof with 2 layers	1,43E-04	4,33E-04	4,13E-04	4,01E-04	67,1	62,5	59,6
Roof with 3 layers	1,59E-04	4,91E-04	4,66E-04	4,42E-04	67,7	62,6	57,8
Roof with 4 layers	1,67E-04	5,56E-04	4,93E-04	4,48E-04	70,0	58,8	50,6
Roof with 5 layers	1,68E-04	1,26E-03	1,16E-03	7,74E-04	86,6	79,0	48,3

Then, the roofs of the underground opening are reinforced with pretensioned bolts. The reinforcement aims at checking the separation of the lower layers and to stop the slipping between them. Thus, it forces individual continuous layers to function as a single solid roof. It is expected that the response of the cracked roof will be different from that of the continuous layers and the respective results constitute one of the contributions of this dissertation.

For each case of multi-layered roofs, the tightening of the layers with maximum required pretention $P_{b,\ max}$ = 141kPa is performed, on a 1x1m grid. The bolt pretensioning is simulated by applying a compressive force at the point of the bolt installation, as it was found to better simulate the reinforcement. The operation of the bolts in pretension, through the code, was not as expected.

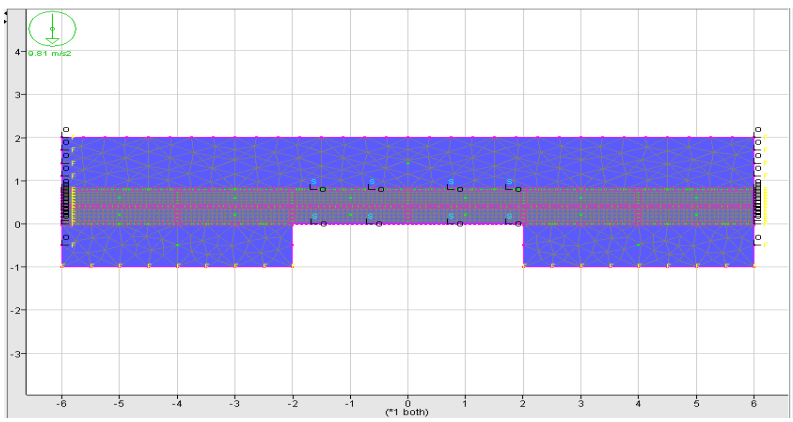


Figure 3: Placement of bolt pretension for the reinforcement of a two-layer roof with vertical discontinuities at distances of 2m.

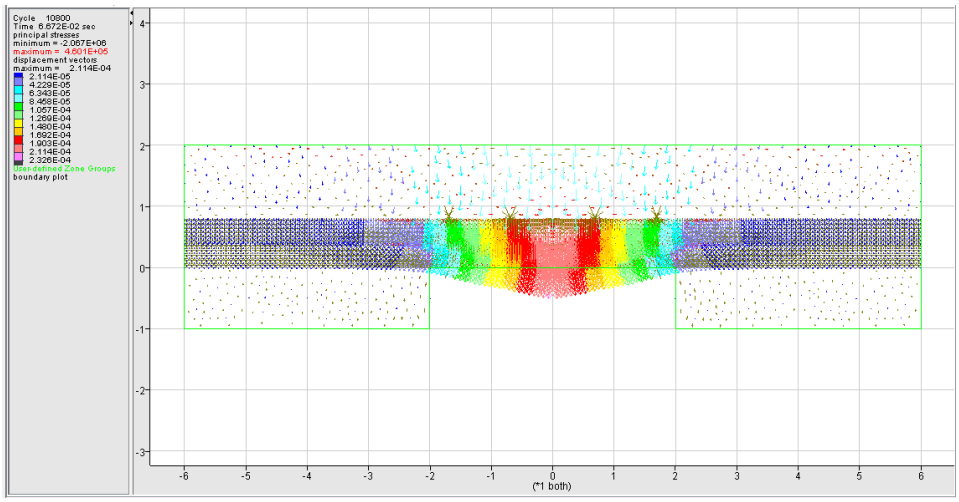


Figure 4: Vertical displacements of reinforced two-layer roof with vertical discontinuities per 2m

With the imposition of the compressive force of 141kN, it is observed that the roof of more than two layers slips, because the contact of the discontinuities is lost.

Thus, the increase of the initial prestressing is chosen, able to hold the roof layers and increase the friction of the interfaces. For each type of roof, tests are performed of the minimum increase of the initial compressive force required, so that the respective roof does not slip. The results are presented in Table 3.

Table 3: Forces for each type of roof

	Increase of the initial force	Force F(N)
Roof with 2 layers	-	1,41E+05
Roof with 3 layers	0,3	1,83E+05
Roof with 4 layers	0,8	2,54E+05
Roof with 5 layers	0,9	2,68E+05

From the simulations of the reinforced multi-layer continuous and cracked roofs, the values of the vertical displacements in the center of the underground opening are obtained and compared with the movements of the respective non-reinforced roofs, in order to investigate the effect of the pretensioned bolts. The results are given in the tables 4 and 5.

Table 4: Results of vertical displacements of cracked roofs, with and without reinforcement

	Without reinforcement			With reinforcement					
	Vertical displacements (m)						*Decrease %*		
	| Cracks 2m|	**| Cracks 1m|**	**| Cracks 0,5m|**	**| Cracks 2m|**	**| Cracks 1m|**	**Cracks 0,5m**	**| Cracks 2m|**	**| Cracks 1m|**	**| Cracks 0,5m|**
Roof with 2 layers	4,33E-04	4,13E-04	4,01E-04	2,11E-04	2,09E-04	2,18E-04	51,2	49,4	45,5
Roof with 3 layers	4,91E-04	4,66E-04	4,42E-04	1,99E-04	2,24E-04	2,32E-04	59,5	52,0	47,6
Roof with 4 layers	5,56E-04	4,93E-04	4,48E-04	1,98E-04	2,41E-04	2,13E-04	64,3	51,1	52,6
Roof with 5 layers	1,26E-03	1,16E-03	7,74E-04	1,98E-04	2,37E-04	2,50E-04	84,2	79,6	67,7

Table 5:Results of vertical displacements of continuous roofs, with and without reinforcement

	Without reinforcement	With reinforcement	
	Vertical displacements (m)		*Decrease %*
Roof with 1 layer	1,24E-04	-	-
Roof with 2 layers	1,43E-04	1,26E-04	11,4
Roof with 3 layers	1,59E-04	1,38E-04	13,0
Roof with 4 layers	1,67E-04	1,41E-04	15,7
Roof with 5 layers	1,68E-04	1,37E-04	18,3

It is concluded that the reinforcement of the roof gives a satisfactory degree to the decrease of vertical displacements (45-84%), for all groups of vertical discontinuities, which interrupt the layers. In the case of continuous layers it is observed that the reinforcement of the roof reduces the vertical displacements to a lesser extent (11-18%). However, the vertical displacements of the continuous roofs were smaller than the cracked roofs in the first place.

In conclusion, this type of rock structure located in underground openings is a key factor in controlling the safety around underground openings. Undoubtedly, the careful monitoring and support of the roofs helps to ensure the safety of underground works.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Nomikos P.P. & Sofianos A.I. & Tsoutrelis C.E., *Structural response of vertically multi-jointed roof rock beams*, International Journey of Rock Mechanics & Mining Sciences 39 (2002) 79-94

Yiouta-Mitra P. & Sofianos A.I., *Multi-jointed voussoir beam analysis – Theory and implementation*, 10th Asian Rock Mechanics Symposium, The ISRM International Symposium for 2018

Itasca, *Universal Distinct Element Code*, Manual

Γιούτα-Μήτρα Π., *Ανάλυση της συμπεριφοράς στρωσιγενούς πετρώματος γύρω από υπόγεια ανοίγματα*, Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2018

Νομικός Π., *Στρωσιγενείς οροφές μετά τη ρωγμάτωση*, Πανεπιστημιακή Παρουσίαση ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων», Ε.Μ.Π., 2020

Σοφιανός Α. (2018), *Υποστήριξη Υπόγειων Έργων*, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, www.kallipos.gr

Σοφιανός Α., *Μέτρα στήριξης σηράγγων*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων», Ε.Μ.Π., 2018