



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Επίδραση της κλίμακας στην αντοχή της βραχομάζας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημητριάδης Γεώργιος

Επιβλέπων: Π. Νομικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Επίδραση της κλίμακας στην αντοχή της βραχομάζας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημητριάδης Γεώργιος

Επιβλέπων: Π. Νομικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 23 / 07 / 2021

Π. Νομικός, Καθηγητής ΕΜΠ, (Υπογραφή)

Α. Μπενάρδος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, (Υπογραφή)

Ι. Ζευγώλης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ, (Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021

Πρόλογος – Ευχαριστίες

Η αστοχία της βραχομάζας προκύπτει συχνά μέσα από σύνθετες διαδικασίες που περιλαμβάνουν την αστοχία του ίδιου του άρρηκτου πετρώματος ή/και την ολίσθηση των επιπέδων των ασυνεχειών της. Το ποσοστό συμμετοχής κάθε μηχανισμού στη συνολική αστοχία της βραχομάζας επηρεάζεται σε μεγάλο ποσοστό από την κλίμακα εξέτασης του προβλήματος η οποία χαρακτηρίζεται από το μέγεθος του θεωρούμενου όγκου της βραχομάζας. Έτσι, η επίδραση της κλίμακας ανάγεται στην επίδραση του μεγέθους ενός «δοκιμίου» βραχομάζας η απόκριση του οποίου εξετάζεται υπό συγκεκριμένες εντατικές συνοριακές συνθήκες, ώστε να μελετηθούν οι μηχανισμοί αστοχίας του που καθορίζουν και την αντοχή της βραχομάζας σε σχέση με την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος. Είναι δε αναμφισβήτητο ότι, στα προβλήματα βραχομηχανικής η αντοχή της βραχομάζας είναι ίσως και η πιο κρίσιμη παράμετρος για το σχεδιασμό έργων σε πετρώματα.

Το από μακρού χρόνου ενδιαφέρον μου για τη μελέτη αυτών των φαινομένων βραχομηχανικής υλοποιείται με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία έχει ως στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης των φαινομένων της κλίμακας στην αντοχή της βραχομάζας. Καθώς η πειραματική διερεύνηση είναι πρακτικά αδύνατη, λόγω της αδυναμίας του υπάρχοντος σήμερα τεχνικού εξοπλισμού ως προς τη διαμόρφωση και τη φόρτιση μεγάλων δοκιμίων βραχομάζας, για την επίτευξη του στόχου της εργασίας γίνεται χρήση αριθμητικών μεθόδων και συγκεκριμένα της μεθόδου διακριτών στοιχείων, όπως είναι προγραμματισμένη στον κώδικα διακριτών στοιχείων UDEC.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παύλο Νομικό, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του ΕΜΠ, για την ανάθεση του θέματος, τις συμβουλές και τις υποδείξεις του, καθώς και για την καθοριστική καθοδήγηση και επίβλεψη που μου παρείχε. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας, τον κ. Ανδρέα Μπενάρδο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π. και τον κ. Ιωάννη Ζευγώλη, Επίκουρο Καθηγητή του Ε.Μ.Π. για τον χρόνο που διαθέσανε για την αξιολόγηση της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου για την ανεκτίμητη υποστήριξή τους.

Δημητριάδης Β. Γεώργιος,

Ιούλιος 2021

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο μελέτης την επίδραση των φαινομένων της κλίμακας στην αντοχή της βραχομάζας. Αρχικά, παρουσιάζεται το πρόβλημα της επίδρασης της κλίμακας, ο τρόπος λειτουργίας του φαινομένου αυτού καθώς και η περιγραφή των προσομοιώσεων που έγιναν στο πλαίσιο των αναγκών της παρούσας εργασίας. Στη συνέχεια αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο, ο μηχανισμός αστοχίας της βραχομάζας καθώς και παλαιότερες εργασίες σχετικές με το αντικείμενο μελέτης. Αναπτύσσεται ο τρόπος λειτουργίας του αριθμητικού κώδικα που χρησιμοποιήθηκε και των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν. Επιπλέον, γίνεται αναλυτική περιγραφή των αριθμητικών μοντέλων, της γεωμετρίας των μοντέλων και του τρόπου εκτέλεσης των αριθμητικών δοκιμών που έγιναν στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Ακολουθεί η καταγραφή των αποτελεσμάτων σε μορφή διαγραμμάτων για την αντοχή και σχημάτων για τον τύπο αστοχίας των προσομοιωμάτων που εξάγονται από το περιβάλλον του αριθμητικού κώδικα. Γίνεται συγκεντροποίηση και δημιουργία συγκεντρωτικών πινάκων και διαγραμμάτων με τα αποτελέσματα των δοκιμών. Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη που έγινε.

Abstract

The present thesis has as object of study the effect of scale phenomena on the rockmass strength. First, the problem of the scale effect, the mode of operation of this phenomenon as well as the description of the simulations that were done in the context of the needs of the present work are presented. Then the theoretical background, the failure mechanism of the rockmass and previous work with similar objects of study are analyzed. The mode of operation of the arithmetic code used and the simulations that took place in this thesis are developed. In addition, a detailed description of the arithmetic models, the geometry of the models and how to perform the test runs, are given. Aggregate tables and diagrams are created with the test results. Finally, the conclusions that emerge, are presented.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. Φαινόμενα κλίμακας και η σημασία τους στο σχεδιασμό έργων σε πετρώματα ...	1
1.2. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας.....	2
1.2.1. Πρώτος τύπος δοκιμών – Οικογένειες κάθετων ασυνεχειών.....	3
1.2.2. Δεύτερος τύπος δοκιμών – DFN.....	4
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	6
2.1. Επίδραση του μεγέθους στην αντοχή του άρρηκτου πετρώματος.....	12
2.2. Κατάταξη βραχομάζας και προγενέστερες έρευνες στην επίδραση των φαινομένων της κλίμακας στην αντοχή της.....	13
3. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ Ο ΚΩΔΙΚΑΣ UDEC.....	22
3.1. Εξισώσεις κίνησης στη μέθοδο διακριτών στοιχείων στο UDEC	24
3.2. Παραμορφωσιμότητα των μπλοκ.....	26
3.3. Αναπαράσταση οριακής κατάστασης στον κώδικα UDEC.....	31
4. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ UDEC, ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΩΝ, ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ, ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ.....	34
4.1. Δημιουργία δοκιμών με οικογένειες κάθετων ασυνεχειών	34
4.2. Δημιουργία δοκιμών για επαλήθευση κριτηρίου Mohr-Coulomb.....	41
4.3. Δημιουργία δοκιμών με ασυνέχειες από DFN.....	42
5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	45
5.1. Αποτελέσματα για τον πρώτο τύπο δοκιμών – οικογένειες κάθετων ασυνεχειών	45
5.1.1. Αποτελέσματα δοκιμών διαστάσεων 2.5x5.0 m	46

5.1.2.	Αποτελέσματα δοκιμών διαστάσεων 5x10 m	49
5.1.3.	Αποτελέσματα δοκιμών διαστάσεων 10x20 m	52
5.1.4.	Αποτελέσματα δοκιμών διαστάσεων 20x40 m	55
5.2.	Αποτελέσματα για τον δεύτερο τύπο δοκιμών – ασυνέχειες από DFN	58
5.2.1.	Αποτελέσματα για τα δοκίμια διαστάσεων 1.25x2.50 m.....	59
5.2.2.	Αποτελέσματα δοκιμών διαστάσεων 2.5x5.0 m	71
5.2.3.	Αποτελέσματα δοκιμών διαστάσεων 5x10 m.....	83
5.2.4.	Αποτελέσματα δοκιμών διαστάσεων 10x20 m	99
5.2.5.	Αποτελέσματα δοκιμών διαστάσεων 20x40 m.....	103
5.3.	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα και σχολιασμός αυτών.....	107
5.3.1.	Πίνακες και διαγράμματα για τα δοκίμια με οικογένειες κάθετων ασυνεχειών 107	
5.3.2.	Πίνακες και διαγράμματα για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN	111
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	121
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	125
8.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	128

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Σχηματική αναπαράσταση της θεωρίας της κλίμακας (Hoek&Brown1997).....	2
Σχήμα 2 .Δοκίμια διαφορετικού μεγέθους με κάθετες οικογένειες ασυνεχειών.....	3
Σχήμα 3. Το αρχικό μοντέλο 20x40 που περιλαμβάνει το DFN.....	5
Σχήμα 4. Δοκίμιο και περιβάλλουσα αστοχίας Mohr – Coulomb (Τομπουλίδου, 2015).....	6
Σχήμα 5. Περιβάλλουσες αστοχίας Mohr – Coulomb και Hoek – Brown (Τομπουλίδου, 2015).....	7
Σχήμα 7. Το βασικό διάγραμμα του Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής GSI (Hoek&Marinos, 2000).....	8
Σχήμα 6. Προτανόμενες τιμές m_i για διάφορα πετρώματα (Hoek&Marinos, 2000).....	8
Σχήμα 8. Απλακόνιση του κριτηρίου Patton (Patton, 1966).....	9
Σχήμα 9. Διάγραμμα συσχετισμού αντοχής τοιχώματος και του αριθμού αναπήδησης της σφύρας Schmidt (Τομπουλίδου, 2015).....	11
Σχήμα 10. Τομές τραχύτητας και ανίστοιχες τιμές του δείκτη JRC (Barton & Choubey 1977).....	11
Σχήμα 11. Επίδραση του μεγέθους στην αντοχή του δοκιμίου άρρηκτου πετρώματος	13
Σχήμα 12. Αναπαράσταση του συστήματος κατάταξης RMR και ο τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων (Schultz 1996).....	14
Σχήμα 13. Η αντοχή της βραχομάζας ως συνάρτηση της σχετικής κλίμακας σύμφωνα με τη μέθοδο των Cai et al., υποθέτοντας διάμετρο εκσκαφής 5m. (Cundall et al., 2008).....	15
Σχήμα 14. Ποσοτικοποίηση του συστήματος GSI (Cai et al., 2004).....	15
Σχήμα 15. Συσχέτιση αντοχής βραχομάζας – αντοχής άρρηκτου υλικού με το μέγεθος του άρρηκτου τεμαχίου (Goldstein et al., 1966).....	16
Σχήμα 16. Γαωμετρία δοκιμίων που εξετάστηκαν από τον Brown (Τομπουλίδου, 2015).....	17
Σχήμα 17. Επίδραση του όγκου του δοκιμίου στην θλιπτική αντοχή βραχομάζας (Heuze 1979).....	18
Σχήμα 18. Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου SRM και SJM (Cundall et al., 2008).....	20
Σχήμα 19. Διαδοχικά μικρότερα δοκίμια που εξήχθησαν από μεγαλύτερο αρχικό πέτρωμα (Cundall et al., 2008).....	21
Σχήμα 20. Υπολογιστικός κύκλος για την μέθοδο διακριτών στοιχείων στον κώδικα UDEC. (Itasca, 2019)	23
Σχήμα 21. Σειρά υπολογισμών της προσομοίωσης που λαμβάνει χώρα στο UDEC. (Itasca, 2019).....	25
Σχήμα 22. Χωρισμός σε παραμορφώσιμα και μη μπλοκ εντός ενός μοντέλου που περιέχει ένα σύστημα ασυνεχειών. (Itasca, 2019).....	26
Σχήμα 23. Περιγραφή οριακών καταστάσεων σε στοιχειώδη δοκιμή στο UDEC (Itasca, 2019)	28
Σχήμα 24. Αναπαράσταση της επαφής μεταξύ δύο άρρηκτων μπλοκ στο UDEC (Itasca, 2019)	32

Σχήμα 25. Αρχικές επιλογές στο περιβάλλον του UDEC.....	35
Σχήμα 26. Δημιουργία μπλοκ στο UDEC.....	35
Σχήμα 27. Δοκίμιο βραχομάζας 5x10, με ασυνέχειες κλίσης 30-120.....	36
Σχήμα 28. Ακριβείς τιμές ιδιοτήτων του πετρώματος των δοκιμίων.....	37
Σχήμα 29. Ακριβείς τιμές ιδιοτήτων ασυνεχειών που περιέχονται στα δοκίμια.....	38
Σχήμα 30. Τελική κατάσταση δοκιμίου πριν τη δοκιμή.....	39
Σχήμα 31. Διάφοροι τύποι δοκιμίων για επαλήθευση κριτηρίου Mohr-Coulomb.....	41
Σχήμα 32. Γεωμετρία δοκιμίου διαστάσεων 20x40m, με ασυνέχειες του DFN, πριν και μετά την οριζόντια και κάθετη τομή.....	43
Σχήμα 33. Ιδιότητες ασυνεχειών για το δεύτερο τύπο δοκιμίων, DFN.....	44
Σχήμα 34. Απεικόνιση δοκιμίου διαστάσεων 2.5x5m με ασυνέχειες με κλίση 0-90 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος και η διατμητική αστοχία των ασυνεχειών.....	46
Σχήμα 35. Απεικόνιση δοκιμίου διαστάσεων 2.5x5m με ασυνέχειες με κλίση 30-120 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	47
Σχήμα 36. Απεικόνιση δοκιμίου διαστάσεων 2.5x5m με ασυνέχειες με κλίση 45-135 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών καθώς και μερική πλαστική παραμόρφωση.....	48
Σχήμα 37. Απεικόνιση δοκιμίου διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες με κλίση 0-90 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος και η διατμητική αστοχία των ασυνεχειών.....	49
Σχήμα 38. Απεικόνιση δοκιμίου διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες με κλίση 30-120 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	50
Σχήμα 39. Απεικόνιση δοκιμίου διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες με κλίση 45-135 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	51
Σχήμα 40. Απεικόνιση δοκιμίου διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες με κλίση 0-90 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.....	52
Σχήμα 41. Απεικόνιση δοκιμίου διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες με κλίση 30-120 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	53
Σχήμα 42. Απεικόνιση δοκιμίου διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες με κλίση 45-135 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	54
Σχήμα 43. Απεικόνιση δοκιμίου διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες με κλίση 0-90 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.....	55

Σχήμα 44. Απεικόνιση δοκιμίου διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες με κλίση 30-120 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.	56
Σχήμα 45. Απεικόνιση δοκιμίου διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες με κλίση 45-135 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών, καθώς και η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.....	57
Σχήμα 46. Απεικόνιση δοκιμίου (Α) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.	59
Σχήμα 47. Απεικόνιση δοκιμίου (Β) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.	60
Σχήμα 48. Απεικόνιση δοκιμίου (C) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	61
Σχήμα 49. Απεικόνιση δοκιμίου (D) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών καθώς και η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.....	62
Σχήμα 50. Απεικόνιση δοκιμίου (E) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών, καθώς και η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.....	63
Σχήμα 51. Απεικόνιση δοκιμίου (F) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.	64
Σχήμα 52. Απεικόνιση δοκιμίου (G) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος	65
Σχήμα 53. Απεικόνιση δοκιμίου (H) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος	66
Σχήμα 54. Απεικόνιση δοκιμίου (I) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	67
Σχήμα 55. Απεικόνιση δοκιμίου (J) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών καθώς και η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.....	68
Σχήμα 56. Απεικόνιση δοκιμίου (K) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	69
Σχήμα 57. Απεικόνιση δοκιμίου (L) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.	70

Σχήμα 84. Απεικόνιση δοκιμίου (O) διαστάσεων 5x10mm με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	97
Σχήμα 85. Απεικόνιση δοκιμίου (P) διαστάσεων 5x10mm με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	98
Σχήμα 86. Απεικόνιση δοκιμίου (A) διαστάσεων 10x20mm με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	99
Σχήμα 87. Απεικόνιση δοκιμίου (B) διαστάσεων 10x20mm με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	100
Σχήμα 88. Απεικόνιση δοκιμίου (C) διαστάσεων 10x20mm με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	101
Σχήμα 89. Απεικόνιση δοκιμίου (D) διαστάσεων 10x20mm με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	102
Σχήμα 90. Απεικόνιση δοκιμίου (A) διαστάσεων 20x40mm με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	103
Σχήμα 91. Απεικόνιση δοκιμίου (B) διαστάσεων 20x40mm με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	104
Σχήμα 92. Απεικόνιση δοκιμίου (C) διαστάσεων 20x40mm με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	105
Σχήμα 93. Απεικόνιση δοκιμίου (D) διαστάσεων 20x40mm με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.....	106
Σχήμα 94. Συνολική απεικόνιση των διαγραμμάτων με τις μεταβολές των τιμών των δεδομένων των δοκιμίων με ασυνέχειες από DFN που εξήχθησαν από το UDEC.....	116

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 2.5x5m με ασυνέχειες με κλίση 0-90. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 55Mpa.....	46
Διάγραμμα 2. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 2.5x5m με ασυνέχειες με κλίση 30-120. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 13.8Mpa.....	47
Διάγραμμα 3. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 2.5x5m με ασυνέχειες με κλίση 45-135. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 10.5 Mpa.....	48
Διάγραμμα 4. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες με κλίση 0-90. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 55Mpa.....	49
Διάγραμμα 5. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες με κλίση 30-120. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 16.7Mpa.....	50
Διάγραμμα 6. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες με κλίση 45-135. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 4.8Mpa.....	51
Διάγραμμα 7. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες με κλίση 0-90. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 55Mpa.....	52
Διάγραμμα 8. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες με κλίση 30-120. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 15,9 Mpa.....	53
Διάγραμμα 9. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες με κλίση 45-135. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 37Mpa.....	54
Διάγραμμα 10. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες με κλίση 0-90. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 55Mpa.....	55
Διάγραμμα 11. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες με κλίση 30-120. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 15.3Mpa.....	56
Διάγραμμα 12. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες με κλίση 14-135. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 32Mpa.....	57
Διάγραμμα 13. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (Α) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 55Mpa.....	59
Διάγραμμα 14. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (Β) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 55Mpa.....	60
Διάγραμμα 15. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (C) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 6.8Mpa.....	61
Διάγραμμα 16. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (D) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 53Mpa.....	62

Διάγραμμα 51. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (O) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 50.5Mpa.....	97
Διάγραμμα 52. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (P) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 52Mpa.....	98
Διάγραμμα 53. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (A) διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 25Mpa.....	99
Διάγραμμα 54. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (B) διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 31Mpa.....	100
Διάγραμμα 55. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (C) διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 50Mpa.....	101
Διάγραμμα 56. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (D) διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 48Mpa.....	102
Διάγραμμα 57. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (A) διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 42Mpa.....	103
Διάγραμμα 58. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (B) διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 42Mpa.....	104
Διάγραμμα 59. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (C) διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 49Mpa.....	105
Διάγραμμα 60. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (D) διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 47Mpa.....	106
Διάγραμμα 61. Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής-μεγέθους δοκιμίων (2.5x5.0 (no.1) - 20x40 (no.4))για τα δοκίμια με οικογένειες κάθετων ασυνεχειών με διακριτοποίηση 0.25m και ρυθμό παραμόρφωσης –be-3 m/s , b : πλάτος δοκιμίων.....	109
Διάγραμμα 62. Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής-μεγέθους δοκιμίων (5x10 (no.1) - 20x40 (no.3)) για τα δοκίμια με οικογένειες κάθετων ασυνεχειών με διακριτοποίηση 1 m και ρυθμό παραμόρφωσης –4.32e-3 m/s.	109
Διάγραμμα 63. Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής-μεγέθους δοκιμίων (5x10 (no.1) - 20x40 (no.3))για τα δοκίμια με οικογένειες κάθετων ασυνεχειών με 0,025xh m, h : ύψος και ρυθμό παραμόρφωσης –4.32e-3 m/s.	110
Διάγραμμα 64. Διασπορά των τιμών της αντοχής των δοκιμίων σε θλίψη για κάθε μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.....	113
Διάγραμμα 65. Μέσες τιμές της αντοχής των δοκιμίων σε θλίψη ανά μέγεθος δοκιμίου για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.....	113

Διάγραμμα 66. Διάγραμμα της μέσης τιμής του συνόλου των άρρηκτων μπλοκ των δοκιμίων, ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.	116
Διάγραμμα 67. Διάγραμμα της μέσης τιμής της μέσης επιφάνειας, σε m^2 , των άρρηκτων μπλοκ των δοκιμίων, ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.	117
Διάγραμμα 68. Διάγραμμα της μέσης τιμής της μάζας, σε kg, των άρρηκτων μπλοκ των δοκιμίων, ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.	117
Διάγραμμα 69. Διάγραμμα της μέσης τιμής της μέγιστης επιφάνειας, σε m^2 , των άρρηκτων μπλοκ των δοκιμίων, ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.	118
Διάγραμμα 70. Διάγραμμα της μέσης τιμής της ελάχιστης επιφάνειας, σε m^2 , των άρρηκτων μπλοκ των δοκιμίων, ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.	118
Διάγραμμα 71. Διάγραμμα της μέσης τιμής του συνολικού μήκους ασυνεχειών, σε m, των δοκιμίων, ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.	119
Διάγραμμα 72. Διάγραμμα του λόγου της μέσης τιμής του συνολικού μήκους ασυνεχειών προς την επιφάνεια του δοκιμίου, σε m^{-1} , ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.	119
Διάγραμμα 73. Διάγραμμα του αντίστροφου λόγου της μέσης τιμής του συνολικού μήκους ασυνεχειών προς την επιφάνεια του δοκιμίου, σε m, ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.	120
Διάγραμμα 74. Διάγραμμα της μέσης τιμής της μέσης ανηγμένης επιφάνειας, στα 100, των άρρηκτων μπλοκ των δοκιμίων, ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.	120

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Αλγόριθμος σε γλώσσα fish στο UDEC που καταγράφει την τάση και την παραμόρφωση των δοκιμών κάθε 1.000 υπολογιστικά βήματα και αποθηκεύει τα δεδομένα σε ξεχωριστούς πίνακες.....	40
Πίνακας 2. Εντολές στο UDEC που δημιουργούν τη δομή διακριτών ασυνεχειών και απαλείφουν πολύ κοντινές και παράλληλες ασυνέχειες	42
Πίνακας 3. Εντολές στο UDEC που δημιουργούν το αρχικό δοκίμιο 20x40m το οποίο περιλαμβάνει τις ασυνέχειες από το δίκτυο διακριτών ασυνεχειών (DFN).....	43
Πίνακας 4. Πίνακας συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων της αντοχής των δοκιμών με οικογένειες κάθετων ασυνεχειών.....	108
Πίνακας 5. Πίνακας συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων της αντοχής των δοκιμών με ασυνέχειες από DFN.	112
Πίνακας 6. Πίνακας με τις μέσες τιμές χρήσιμων δεδομένων ανά μέγεθος δοκιμίου για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN. Οι αναλυτικοί πίνακες με τα δεδομένα από τα οποία προκύπτουν οι μέσες τιμές παρατίθενται στο παράρτημα της εργασίας.....	114
Πίνακας 7. Πίνακας δεδομένα για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN διαστάσεων 20x40	129
Πίνακας 8. Πίνακας με δεδομένα για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN διαστάσεων 10x20.....	129
Πίνακας 9. Πίνακας με δεδομένα για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN διαστάσεων 5x10.....	129
Πίνακας 10. Πίνακας με δεδομένα για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN διαστάσεων 2.5x5.0.....	129
Πίνακας 11. Πίνακας με δεδομένα για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN διαστάσεων 1.25x2.50.....	129

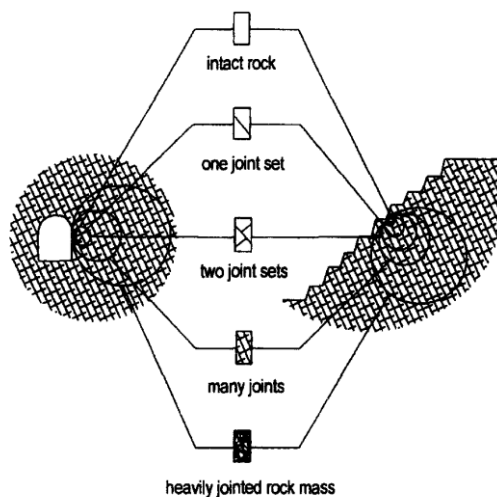
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Φαινόμενα κλίμακας και η σημασία τους στο σχεδιασμό έργων σε πετρώματα

Συνοδευόμενη από την ανάπτυξη δομικών και μεταλλευτικών έργων, η ακριβής εκτίμηση της αντοχής της βραχομάζας είναι σημαντική και πολύτιμη για τις εφαρμογές της βραχομηχανικής και έχει γίνει ερευνητικό επίκεντρο στο παρελθόν. Η βραχομάζα αποτελείται από τμήματα άρρηκτου πετρώματος που οριοθετούνται από ασυνέχειες, που αποτελούν το πιο κρίσιμο δομικό στοιχείο στην βραχομηχανική. Ακόμα, για τον αξιόπιστο σχεδιασμό και κατασκευή δομικών έργων όπως σήραγγες, πρανή, κλπ, απαιτείται η ακριβής εκτίμηση της αντοχής της βραχομάζας. Λόγω των «ελαττωμάτων» σε διαφορετικές κλίμακες, από τις μικρορωγμές στην κλίμακα κόκκων, μέχρι τις πλήρως φραγμένες ή μερικώς φραγμένες ασυνέχειες στην κλίμακα της βραχομάζας, η αντοχή αυτή μπορεί να διαφέρει. Η ύπαρξη των «ελαττωμάτων» αυτών σε διαφορετικές κλίμακες συνήθως, έχει ως αποτέλεσμα την χαμηλότερη αντοχή της βραχομάζας και τη διαφορετική μηχανική συμπεριφορά αυτής, από εκείνη του άρρηκτου πετρώματος.

Έχουν γίνει διάφορες εμπειρικές προσεγγίσεις για τον χαρακτηρισμό και την κατηγοριοποίηση της βραχομάζας. Η πρώτη προσπάθεια για την κατηγοριοποίηση της δομής της βραχομάζας αποδίδεται στον Terzaghi(1946), ο οποίος διακρίνει εννέα κατηγορίες βραχομάζας. Ο Hoek(1983) ομαδοποιώντας τις κατηγορίες διακρίνει τις ακόλουθες τυπικές δομές βραχομάζας.

- Άρρηκτο πέτρωμα
- Άρρηκτο πέτρωμα με μία ασυνέχεια
- Συμπαγές πέτρωμα με δύο οικογένειες ασυνεχειών
- Συμπαγές πέτρωμα με λίγα σύνολα ασυνεχειών
- Ισχυρά διακλασμένη βραχομάζα



Σχήμα 1. Σχηματική αναπαράσταση της θεωρίας της κλίμακας (Hoek&Brown1997)

1.2. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας

Αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη επίδρασης του μεγέθους στην αντοχή της βραχομάζας. Η επίδραση του μεγέθους οφείλεται στις ασυνέχειες της βραχομάζας και του μεγέθους των τεμαχίων που αυτές δημιουργούν καθώς τέμνονται. Η ανάλυση γίνεται μέσω της μεθόδου DEM στον κώδικα UDEC, δημιουργώντας αριθμητικά δοκίμια για δύο κύριους τύπους δοκιμίων βραχομάζας και προσομοιώνοντας τα δοκίμια σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης.

Στο κεφάλαιο 2 αναφέρεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο στη μηχανική πετρωμάτων και στα φαινόμενα κλίμακας.

Στο κεφάλαιο 3 αναφέρεται η μέθοδος DEM και ο κώδικας UDEC.

Στο κεφάλαιο 4 αναλύονται τα αριθμητικά μοντέλα και η διαμόρφωσή τους.

Στο κεφάλαιο 5 παρατίθενται τα αριθμητικά και ποιοτικά αποτελέσματα.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και αναπτύσσονται τα συμπεράσματα.

Ακολουθεί σύντομη περιγραφή του πειραματικού μέρους της παρούσας εργασίας.

1.2.1. Πρώτος τύπος αριθμητικών δοκιμίων – Οικογένειες κάθετων ασυνεχειών

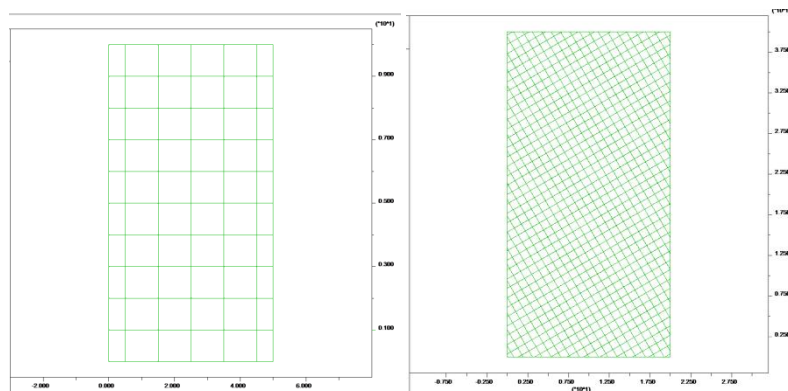
Ο πρώτος τύπος, αφορά δοκίμια βραχομάζας με οικογένειες κάθετων ασυνεχειών για τα παρακάτω ζεύγη γωνιών κλίσης:

- $0^\circ - 90^\circ$
- $30^\circ - 120^\circ$
- $45^\circ - 145^\circ$

Έτσι δημιουργήθηκαν συνολικά 12 δοκίμια με οικογένειες κάθετων ασυνεχειών, τρία για κάθε μέγεθος δοκιμίου με τα μεγέθη που αναφέρονται παρακάτω.

- 2.5x5.0 m
- 5x10 m
- 10x20 m
- 20x40 m

Για όλα τα παραπάνω δοκίμια η κάθετη απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών παραμένει σταθερή και ίση με 1 m ανεξαρτήτως της γωνίας κλίσης και του μεγέθους του δοκιμίου.



Σχήμα 2. Δοκίμια διαφορετικού μεγέθους με κάθετες οικογένειες ασυνεχειών.

Στη συνέχεια στα δοκίμια δίνεται μια πλευρική τάση ίση με 5 MPa και αρχική φόρτιση πάλι ίση με 5 MPa, έτσι ώστε η δοκιμή να προσομοιώνει τη δοκιμή τριαξονικής θλίψης σε δύο διαστάσεις, καθώς όπως προαναφέρθηκε το πρόγραμμα UDEC χρησιμοποιεί μόνο τις δύο διαστάσεις. Τέλος, ορίζεται ένας ρυθμός παραμόρφωσης στο άνω όριο των δοκιμίων και η προσομοίωση είναι έτοιμη να ξεκινήσει αφού ορίσουμε για πόσα υπολογιστικά βήματα αυτή θα πραγματοποιείται.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, έχουμε ορίσει στο πρόγραμμα να καταγράφει σε πίνακα την τάση καθώς και την παραμόρφωση των δοκιμίων μέσω της χρήσης της γλώσσας fish, που χρησιμοποιεί το UDEC, έτσι ώστε μετά το τέλος της δοκιμής να μπορούμε να εξάγουμε διαγράμματα και συμπεράσματα όσων αφορά την μέγιστη αντοχή της βραχομάζας σε αξονική θλίψη.

Με αυτή τη δοκιμή εκτιμάται πως θα μπορέσουμε να έχουμε μια σχέση για την αντοχή της βραχομάζας σε αξονική θλίψη και το μέγεθος των δοκιμίων. Επίσης, θα γίνει κατανοητό πώς η κλίση των ασυνεχειών επιδρά στη μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε συνδυασμό με την κλίμακα στην οποία εκτελείται η δοκιμή.

1.2.2. Δεύτερος τύπος δοκιμίων – DFN

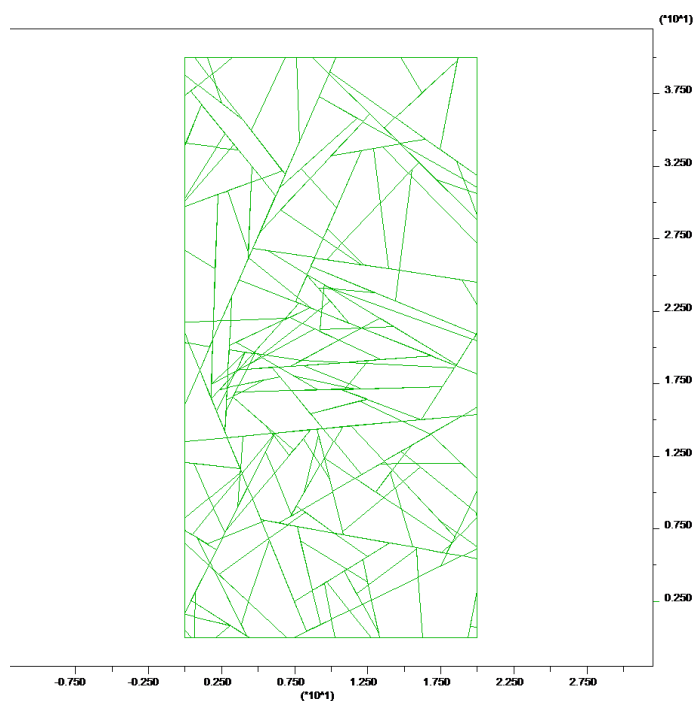
Για τον δεύτερο τύπο δοκιμής έγινε χρήση του ενσωματωμένου εργαλείου του UDEC που μας επιτρέπει να δημιουργήσουμε ένα DFN (DiscreteFractureNetwork). Πρόκειται δηλαδή για μία δομή στο επίπεδο η οποία αποτελείται από ένα δίκτυο ασυνεχειών με γεωμετρικά χαρακτηριστικά (κλίση, εμμονή) βασισμένα σε μία στατιστική κατανομή.

Στη συνέχεια δημιουργείται ένα δοκίμιο στις επιθυμητές διαστάσεις, το οποίο περιέχει ένα μέρος αυτών των ασυνεχειών. Συγκεκριμένα, δημιουργείται ένα δοκίμιο διαστάσεων 20x40 μέτρων, το οποίο αρχικό δοκίμιο στη συνέχεια διαιρείται έως ότου να δημιουργηθούν τέσσερα ίσα δοκίμια διαστάσεων 10x20 μέτρων. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για τα αμέσως μικρότερα δοκίμια δημιουργούνται ακόμα 16 δοκίμια διαστάσεων 5x10m.

Αναλύοντας τα παραπάνω 16 δοκίμια μικρότερου μεγέθους επιλέχθηκαν τρία από αυτά, ένα με αντοχή κοντά στην ελάχιστη αντοχή από τα 16, ένα με αντοχή κοντά στη μέση, και ένα με αντοχή κοντά στη μέγιστη σε αξονική θλίψη, έτσι ώστε να διαιρεθούν και αυτά

ώστε να προκύψουν ακόμα 12 δοκίμια μικρότερων διαστάσεων 2.5x5.0 μέτρων. Στη συνέχεια αφού αναλυθούν και αυτά επιλέγονται ακόμα τρία δοκίμια από τα 12 με τα ίδια κριτήρια όπως και προηγουμένως, ώστε να δημιουργηθούν τελικά ακόμα 12 δοκίμια διαστάσεων 1.25x2.50 μέτρων. Έτσι τελικώς, έχουν δημιουργηθεί 48 δοκίμια που προκύπτουν από το αρχικό δοκίμιο, τα οποία περιλαμβάνουν όλα μέρη των ασυνεχειών που υπήρχαν στο αρχικό δοκίμιο.

Με αυτόν τον τύπο δοκιμής, δημιουργώντας μια δομή ασυνεχειών βασισμένη σε μια στατιστική κατανομή εκτιμάται, πως το περιβάλλον που δημιουργείται θα προσομοιώνει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες της βραχομάζας, αφού τέτοιες καταστάσεις συναντώνται και στην πραγματικότητα όπου ο τυχαίος παράγοντας συνδράμει σημαντικά. Επίσης, η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών θα έχει μικρότερη επίδραση αφού έχουν δημιουργηθεί ασυνέχειες με ποικίλα χαρακτηριστικά. Αυτό θα συμβάλει σημαντικά στο να διακριθεί η επίδραση της κλίμακας, αφού ο παράγοντας των ασυνεχειών έχει “εξαλειφθεί”.



Σχήμα 3. Το αρχικό μοντέλο 20x40 που περιλαμβάνει το DFN

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Αντοχή βραχομάζας

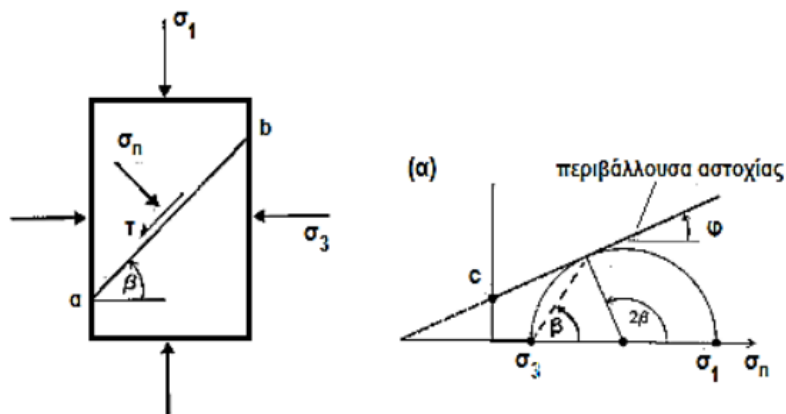
Το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb είναι το απλούστερο κριτήριο που μπορεί να εκφράσει την αστοχία των γεωυλικών. Θεωρεί ότι η αστοχία συμβαίνει όταν η διατμητική τάση τ σε ένα οποιοδήποτε επίπεδο ξεπεράσει τη διατμητική αντοχή, που είναι ανάλογη της ορθής τάσης σ_n , στο επίπεδο αυτό. Οι παράμετροί του είναι δύο: η γωνία τριβής φ και η συνοχή c του υλικού.

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c$$

$$\sigma_1 = \sigma_c + k \sigma_3,$$

$$\sigma_c = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

$$k = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \cos \varphi}$$



Σχήμα 4. Δοκίμιο και περιβάλλουσα αστοχίας Mohr – Coulomb (Τομπουλίδου, 2015)

Οι Hoek – Brown ανέπτυξαν ένα γενικευμένο εμπειρικό κριτήριο που περιγράφει την αστοχία της βραχομάζας και εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a$$

Οι παράμετροι m_b , s και a εκτιμώνται βάσει των μηχανικών χαρακτηριστικών του άρρηκτου πετρώματος και των δομικών χαρακτηριστικών όπως προκύπτουν από κάποιο σύστημα ταξινόμησης. Εφόσον χρησιμοποιείται το σύστημα GSI ισχύουν οι εξής σχέσεις:

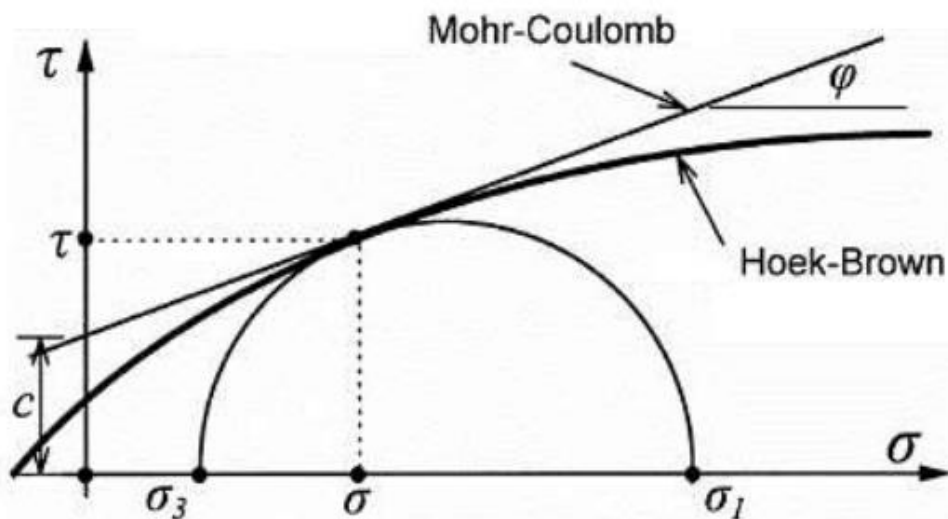
$$m_b = m_i e^{\frac{(GSI-100)}{(28-14D)}}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right)}$$

D : ο βαθμός διαταραχής της βραχώμαζας λόγω ανατινάξεων ή χαλάρωσης

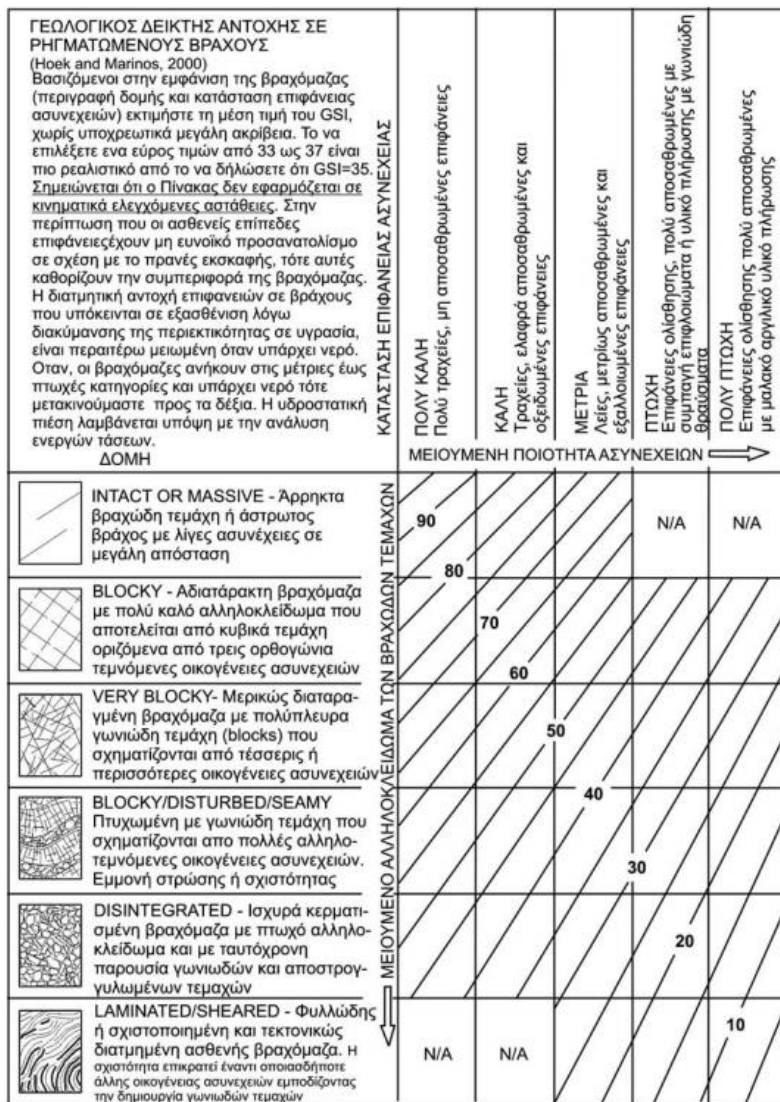
Το κριτήριο Hoek – Brown συνδέεται με το αντίστοιχο κριτήριο των Mohr – Coulomb στο σημείο που οι δύο περιβάλλουσες αστοχίας ταυτίζονται όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Εκεί υπολογίζονται η συνοχή c και η γωνία τριβής ϕ .



Σχήμα 5. Περιβάλλουσες αστοχίας Mohr – Coulomb και Hoek – Brown (Τομπουλίδου, 2015)

Ο δείκτης GSI

Ο δείκτης, GSI, εισήχθη από τους Hoek, Wood and Shah (1992) επεκτάθηκε ουσιαστικά για τις ασθενείς βραχώμαζες από τους Hoek, Marinos and Benissi (1998), Marinos and Hoek (2000). Ο δείκτης εκτός από τη γεωτεχνική ταξινόμηση, εκφράζει αριθμητικά την απομείωση των σταθερών του υλικού, ανάλογα με την ρωγμάτωση της βραχώμαζας. Αποτελεί λοιπόν σημαντικό στοιχείο στο πρόβλημα του προσδιορισμού των πλέον αντιπροσωπευτικών τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού των τεχνικών έργων σε περιβάλλον ρωγματομένων βράχων. Ο δείκτης GSI βασίζεται στην εκτίμηση των ασυνεχειών της βραχώμαζας και επομένως αποτελεί ένα εύκολο εργαλείο κατηγοριοποίησης.



Σχήμα 6. Το βασικό διάγραμμα του Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής GSI (Hoek & Marinos, 2000)

Τύπος πετρώματος	Κατηγορία	Ομάδα	Υφή			
			Αδρή	Μέτρια	Λεπτή	Πολύ λεπτή
I Z H M A T O G N E S	Κλαστικό	Κροκαλοπαγείς (22) Λατυποπαγείς	Ψαμίτης 17=4	Πυρόλιθος 7=2	Αργιλολιθος 4=2	Αργ. σχιστολιθος 6=2
				Γρασοβάκης 18=3	Μάργες 7=2	
	Μη κλαστικό	Οργανικό	Κρητίς 7=2 Ανθρακας 8-21			
	Ανθρακικό	Κροσταλλικοί ασβεστολιθοί 12=3	Σπαρτιτικός ασβεστόλιθος 10=2	Μικρικό ασβεστόλιθος 9=2	Δολομίτης 9=3	
	Εβαποριτες		Γύψος 8=2	Ανοδριτης 12=2		
M E T A M O P H I C R O M A T O S	Μη πτυχωμένα	Μάρμαρο 9=3	Κερατόλιθοι 19=4	Μεταψαμίτης 19=3	Χαλαζίτης 20=3	
	Ελαφρά πτυχωμένα	Μηγματίτης 29=3	Αμφοβλίτης 26=6	Γνεόσιος 28=5		
	Πτυχωμένα		Σχιστολιθος 12=3	Φυλλίτης 7=3	Σχιστες 7=4	
P Y R I G E N E S	Πλοστώνια	Ανοστόχρωμα	Γρανίτης 32=3	Γρανодиόριτης 29=3		Ονιειανός 19
		Σκοτεινόχρωμα	Γάββρος 27=3	Νορίτης 20=5	Δολιρίτης 16=5	
	Ηφαιστειακά	Λάβα	Πορφύρης 20=5	Ρυόλιθος 25=5	Ανδεσίτης 25=5	Διαβάσης 15=5
	Πορφυροειδή	Κροκαλοπαγείς 19=3	Ηφαιστειακό λατοποπαγείς 19=5	Βασάλτης 25=5	Τόφφος 13=5	Περιοσίτης 25=5

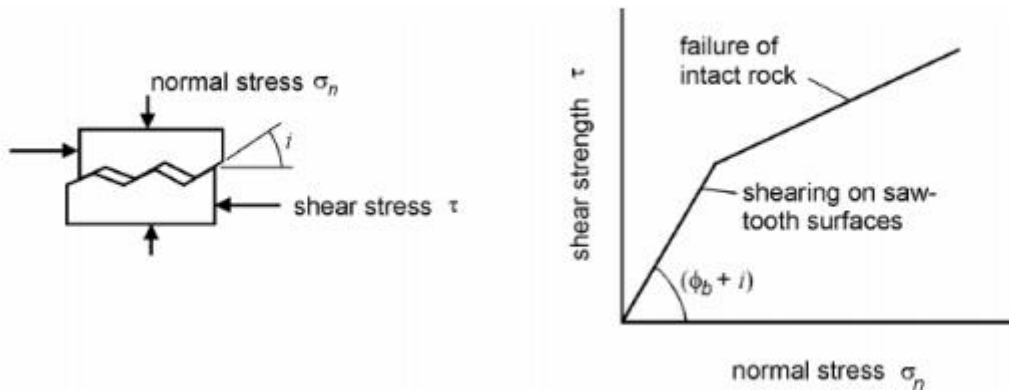
Σχήμα 7. Προτεινόμενες τιμές mi για διάφορα πετρώματα (Hoek & Marinos, 2000)

Κριτήριο Patton

Ο Patton (1966) πραγματοποιώντας πειράματα σε δοκίμια με τραχείς ασυνέχειες κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών περιγράφεται από τη σχέση:

$$\tau = \sigma_n \tan (\varphi_b + i)$$

Η γωνία φ_b ονομάζεται γωνία τριβής και εκπροσωπεί την ελάχιστη αντίσταση τριβής μεταξύ δύο λείων και επίπεδων επιφανειών, και η γωνία i είναι μια μέση γωνία που αντιπροσωπεύει την τραχύτητα. Εφόσον η ασυνέχεια έχει αστοχήσει, αντί της γωνίας τριβής φ_b χρησιμοποιείται η παραμένουσα γωνία τριβής φ_r . Σε λείες η γωνία τριβής είναι ισοδύναμη της παραμένουσας ($\varphi_b = \varphi_r$) αλλιώς $\varphi_r < \varphi_b$.



Σχήμα 8. Απεικόνιση του κριτηρίου Patton (Χαλακατεβάκης, 2010)

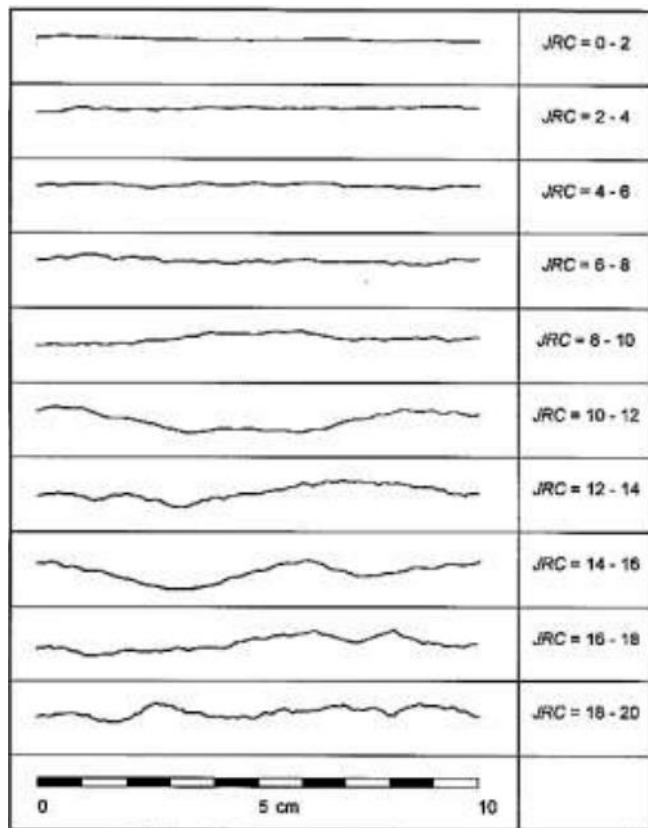
Κριτήριο Barton – Bandis

Μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους υπολογισμού της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών προτάθηκε από τους Barton – Bandis. Από αναλύσεις μεγάλου αριθμού δοκιμών προτάθηκε η παρακάτω εμπειρική σχέση:

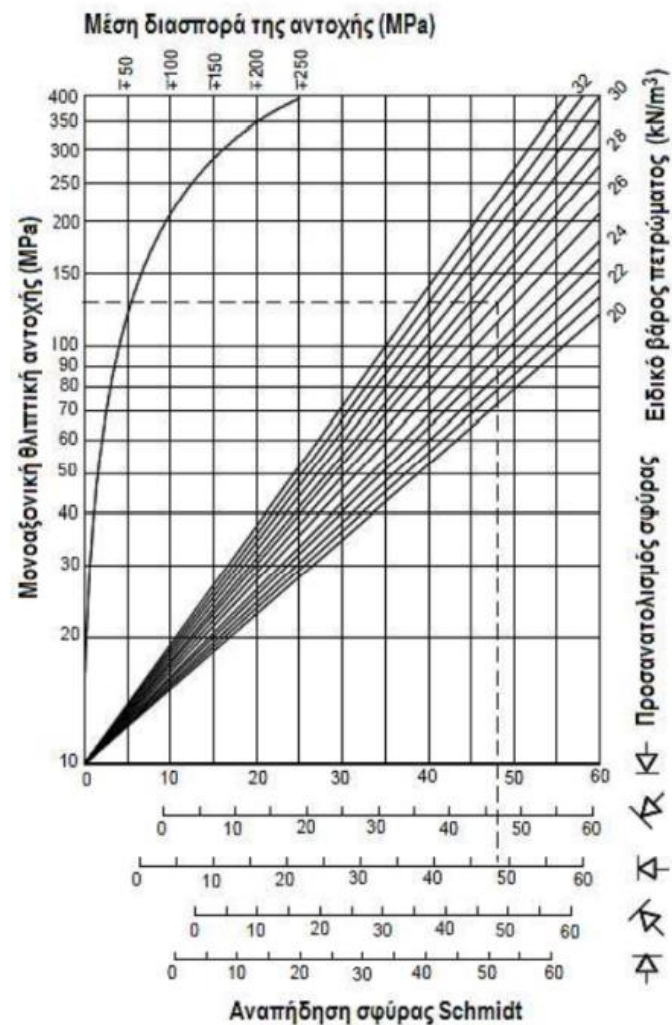
$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_b \right]$$

Ο δείκτης τραχύτητας JRC (Joint Roughness Coefficient) σύμφωνα με τους Barton – Bandis είναι μια φυσική σταθερά που εκφράζει κατά προσέγγιση το λόγο του μήκους L της ασυνέχειας προς το μέσο ύψος του ανάγλυφου της. Ο δείκτης αυτός λαμβάνει τιμές από 0 για λείες και επίπεδες ασυνέχειες έως 20 για τραχείες. Για την αντικειμενική επιλογή της παραμέτρου έχουν αναπτυχθεί πειραματικές μέθοδοι ανάλυσης, είτε επί τόπου στο ύπαιθρο, είτε στο εργαστήριο με τη χρήση ειδικών διατάξεων.

Ο δείκτης JCS (Joint Compressive Strength) περιγράφει την αντοχή σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη του βραχώδους υλικού. Προκύπτει βάσει της τιμής αναπήδησης της σφύρας Schmidt με χρήση του αντίστοιχου διαγράμματος που παρατίθεται στη συνέχεια.



Σχήμα 10. Τομές τραχύτητας και αντίστοιχες τιμές του δείκτη JRC (Barton & Choubey 1977)



Σχήμα 9. Διάγραμμα συσχετισμού αντοχής τοιχώματος και του αριθμού αναπήδησης της σφύρας Schmidt (Τομπολίδου, 2015)

2.1. Επίδραση του μεγέθους στην αντοχή του άρρηκτου πετρώματος

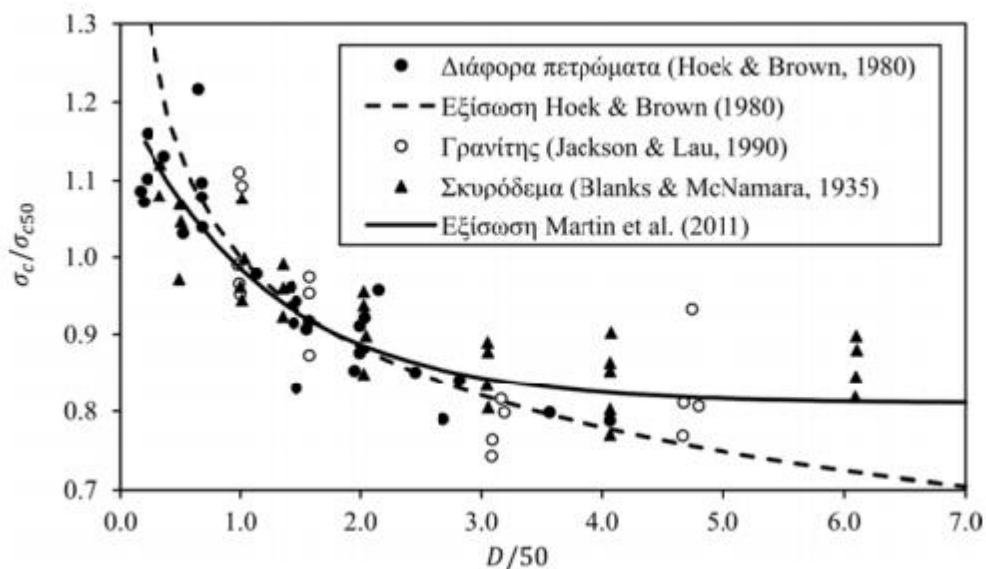
Σε πειραματικό επίπεδο έχει παρατηρηθεί ότι για σχετικά σταθερό λόγο ύψους/διάμετρο του δοκιμίου, η αντοχή σε θλίψη και η ψαθυρότητά του, μειώνονται με την αύξηση του όγκου του δοκιμίου. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στο γεγονός πως μεγαλύτερος όγκος δοκιμίου ισοδυναμεί με μεγαλύτερη πιθανότητα ύπαρξης εν γένη μικρορωγματώσεων ή μικροαστοχιών στο δοκίμιο. Οι Hoek&Brown (1980), βάση αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια διαμέτρου από 10mm έως 200mm, προτείνουν μια προσεγγιστική σχέση για την επίδραση του όγκου στην αντοχή των δοκιμίων.

$$\sigma_c = \sigma_{c50} \left(\frac{50}{D} \right)^{0.18}$$

- D, η διάμετρος του δοκιμίου σε mm
- σ_{c50} , η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίου διαμέτρου 50mm

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, η αντοχή ενός δοκιμίου 350 mm θα ανέρχεται στο 70% της αντοχής του δοκιμίου διαμέτρου 50 mm. Οι Martinetal. (2011), αξιοποιώντας αυτά τα δεδομένα, ερεύνησαν πειραματικά δοκίμια γρανίτη με διάμετρο έως 294 mm (Jackson&Lau 1990), καθώς και δοκίμια σκυροδέματος διαμέτρου έως 914 mm και λόγο ύψους προς διάμετρο 2 (Blanks&McNamara 1935). Από τις δοκιμές αυτές καταλήγουν και προτείνουν μία άλλη εμπειρική σχέση υπολογισμού της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{c50}} = 0.81 + \frac{0.4}{\exp\left(\frac{D}{60.5}\right)}$$



Σχήμα 11. Επίδραση του μεγέθους στην αντοχή του δοκιμίου άρρηκτου πετρώματος

(Νομικός, 2015)

2.2. Κατάταξη βραχομάζας και προγενέστερες έρευνες στην επίδραση των φαινομένων της κλίμακας στην αντοχή της

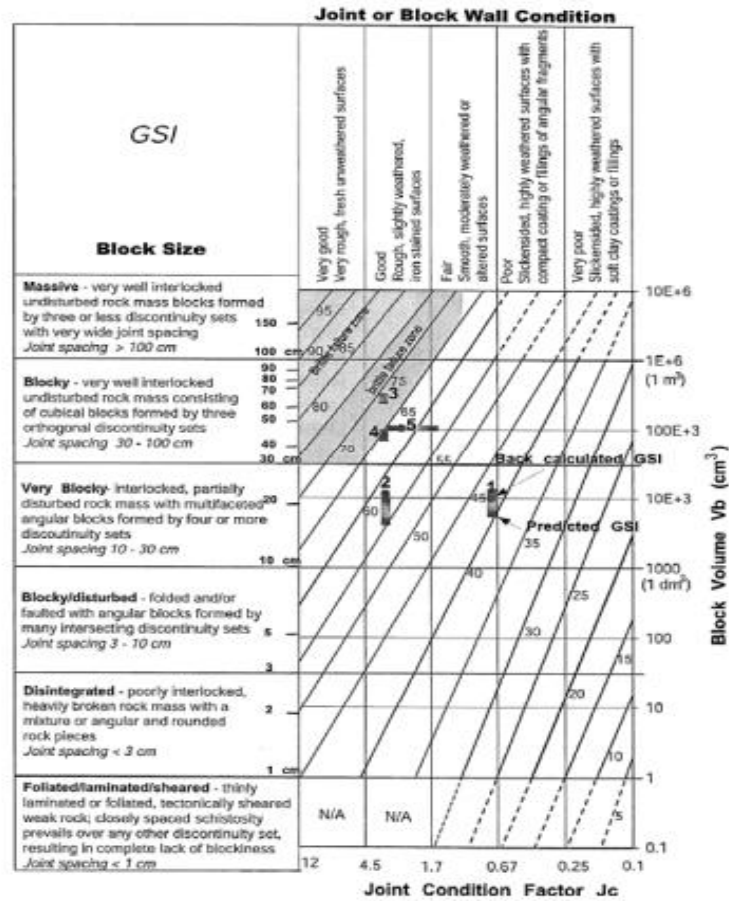
Πιθανώς η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη προσέγγιση για την χαρακτηρισμό της βραχομάζας όσον αφορά τη θλίψη είναι αυτή που προτείνεται από τους Hoek & Brown (1980). Η εφαρμογή αυτού του εμπειρικού κριτηρίου στη ρωγματομένη βραχομάζα, είναι απλή στην θεωρία αλλά συχνά παρουσιάζει προκλήσεις στην πράξη, επειδή το κριτήριο Hoek – Brown εφαρμόζεται πιο άμεσα σε βραχομάζες που τις χαρακτηρίζει ισοτροπική συμπεριφορά.

Το 1989, ο Beniaowski προτείνει το σύστημα κατάταξης βραχομάζας RMR, που είχε αρχίσει να διατυπώνει από το 1972, το οποίο λαμβάνει υπόψη την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, τον δείκτη RQD, την απόσταση των ασυνεχειών, την κατάσταση των ασυνεχειών, τις συνθήκες υπόγειου νερού και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Το αποτέλεσμα που χαρακτηρίζει την αντοχή της βραχομάζας προκύπτει από την άθροιση της βαθμολογίας των παραπάνω κατηγοριών. Τελικώς, η βραχομάζα χαρακτηρίζεται με μία βαθμονόμηση από το 0 (πλήρως κατακερματισμένη, πολύ αδύναμη, υδροθερμικά αλλοιωμένη) έως το 100 (ελάχιστες ασυνέχειες, άριστη).

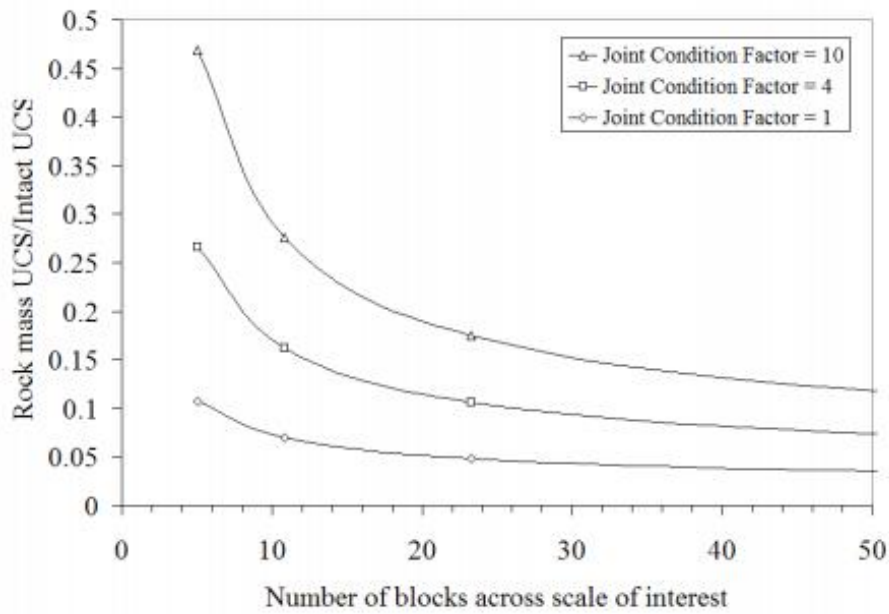
1.	Strength of intact rock	Point-load index, MPa	> 10	4-10	2-4	1-2				
		Uniaxial compressive strength, MPa	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	< 1	
Rating:			15	12	7	4	2	1	0	0-15
2a.	Drill core quality RQD, %		90-100	75-90	50-75	25-50	< 25			+
		Rating:		20	17	13	8	3		3-20
2b.	Spacing of discontinuities, m		> 2	0.6-2	0.2-0.6	0.06-0.2	< 0.06			+
		Rating:		20	15	10	8	5		5-20
2c.	Condition of discontinuities		Very rough Discontinuous No separation Unweathered	Rough walls Separation < 0.1 mm Slightly weathered	Slightly rough Separation < 1 mm Highly weathered	Slickensides or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm. Continuous	Soft gouge > 5 mm thick or Separation > 5 mm. Continuous Decomposed wall rock			+
		Rating:		30	25	20	10	0		0-30
3.	Ground-water	Inflow per 10 m tunnel length, l/min	none	< 10	10-25	25-125	> 125			+
		λ	0	< 0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5			
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing			
Rating:			15	10	7	4	0		0-15	
RMR = 1 + 2a + 2b + 2c + 3										
≤ 100										

Σχήμα 12. Αναπαράσταση του συστήματος κατάταξης RMR και ο τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων (Schultz, 1996)

Οι Mostyn και Douglas (2000) προτείνουν ότι τα φαινόμενα της κλίμακας μπορούν να ερμηνευτούν από τον δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) στην κλίμακα ενδιαφέροντος. Οι Cai et al. (2004) προχώρησαν αυτή την ιδέα ένα βήμα παραπέρα, προτείνοντας ένα πιο ποσοτικό μέσο για τον υπολογισμό της δομής και της κατάστασης της επιφάνειας των ασυνεχειών στο σύστημα GSI (Σχήμα 14). Στην προσέγγισή τους, ο κάθετος άξονας του γραφήματος GSI (που αντιπροσωπεύει τη δομή) αντικαθίσταται από τον όγκο των μπλοκ (σε cm³) και ο οριζόντιος άξονας που χαρακτηρίζει την κατάσταση των ασυνεχειών, αντικαθίσταται από τη βαθμονόμηση των ασυνεχειών κατά Jc. Αυτό φαίνεται να υποδηλώνει ότι το GSI είναι ανεξάρτητο από την κλίμακα του προβλήματος, αλλά ο Kaiser (pers. comm., 2008) επισημαίνει ότι οι όγκοι μπλοκ που πρότειναν οι Cai et al. (2004) πρέπει να ερμηνευθούν σε σχέση με την κλίμακα μιας σήραγγας. Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση των Cai et al. (2004) και υποθέτοντας διάμετρο σήραγγας 5 m, εκτιμήθηκαν το GSI και η αντοχή της βραχομάζας ως συνάρτηση της σχετικής κλίμακας του προβλήματος (ο αριθμός μπλοκ κατά μήκος της κλίμακας ενδιαφέροντος).



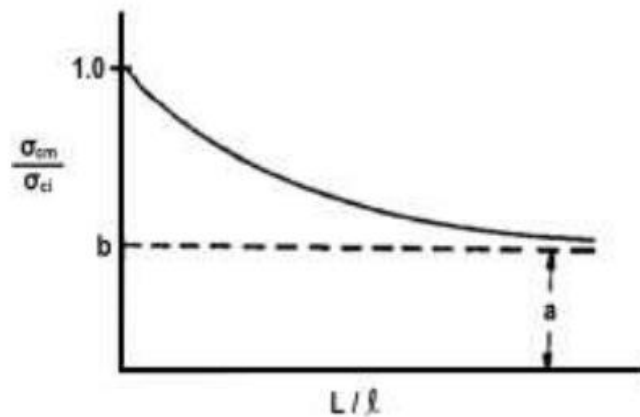
Σχήμα 14. Ποσοτικοποίηση του συστήματος GSI (Cai et al., 2004)



Σχήμα 13. Η αντοχή της βραχομάζας ως συνάρτηση της σχετικής κλίμακας σύμφωνα με τη μέθοδο των Cai et al., υποθέτοντας διάμετρο εκσκαφής 5m. (Cundall et al., 2008)

Οι Goldstein et al. (1966) ήταν από τους πρώτους που πραγματοποίησαν δοκιμές σε δοκίμια βραχομάζας φτιαγμένα από γύψο με τεχνητές ασυνέχειες με σκοπό να αναλύσουν την επίδραση των ασυνεχειών στη συμπεριφορά της βραχομάζας. Η έρευνα αυτή μπορεί να μην έχει άμεση σχέση με τα φαινόμενα κλίμακας, παρόλα αυτά περιλαμβάνεται στις σχετικές έρευνες καθώς το συμπέρασμά της συνδέεται με αυτά. Το συμπέρασμα της έρευνας ήταν ότι η μείωση του μεγέθους του τεμαχίου του άρρηκτου πετρώματος και η αύξηση του αριθμού των ασυνεχειών, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του δοκιμίου μέχρι ενός σημείου. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών πρότειναν την επόμενη εμπειρική σχέση:

$$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{ci}} = a + b \left(\frac{l}{L}\right)^e$$



Σχήμα 15. Συσχέτιση αντοχής βραχομάζας – αντοχής άρρηκτου υλικού με το μέγεθος του άρρηκτου τεμαχίου (Goldstein et al., 1966)

$$b = 1 - a, \quad e < 1.0$$

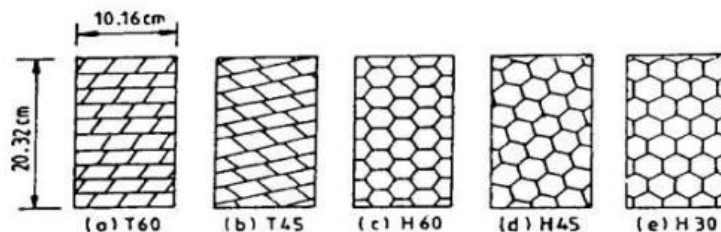
L : το μήκος του δείγματος

l : η απόσταση των ασυνεχειών

σ_{cm} : η αντοχή της μάζας του υλικού

σ_{ci} : η αντοχή του άρρηκτου υλικού

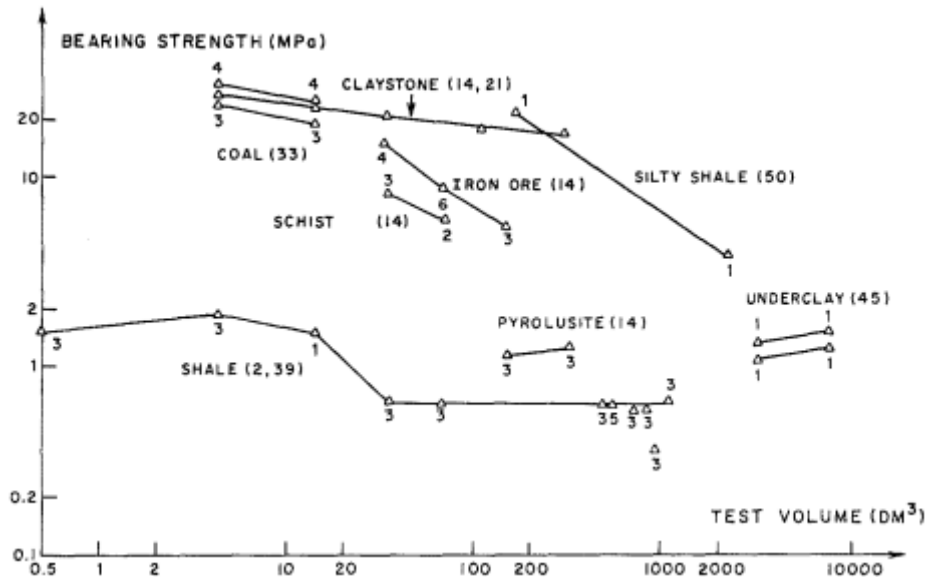
Ο Brown (1970) πραγματοποίησε δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια γύψου διαστάσεων 4.0in x 4.0in x 8.0in κατασκευασμένα έτσι ώστε να δημιουργούνται διάφορα συστήματα ασυνεχειών. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για πέντε τιμές πλευρικής πίεσης: 0 MPa, 1.20MPa, 3.0MPa, 6.0MPa και 12.0MPa



Σχήμα 16. Γεωμετρία δοκιμίων που εξετάστηκαν από τον Brown (Τομπουλίδου, 2015)

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στην πλευρική πίεση των 12.0MPa η αντοχή όλων των δοκιμίων ήταν υψηλότερη από αυτήν του άρρηκτου πετρώματος. Ένας πιθανός λόγος που συνέβη αυτό σύμφωνα με τον Brown είναι η επίδραση της κλίμακας. Η συμπεριφορά των δοκιμίων για υψηλές τιμές πλευρικής πίεσης ήταν όλκιμη με τις ασυνέχειες να έχουν πολύ μικρή επίδραση στην αντοχή των δοκιμίων.

Μία από τις πρωταρχικές έρευνες που αφορούν τα φαινόμενα κλίμακας στη βραχομηχανική έγινε από τον Heuze (1979). Η έρευνα αυτή είχε ως αντικείμενο την εργαστηριακή αλλά και *in situ* καταγραφή της θλιπτικής αντοχής δοκιμίων πετρώματος, διαφόρων διαστάσεων αλλά και ορυκτολογικής σύστασης, στα πλαίσια του σχεδιασμού υπόγειων εκμεταλλεύσεων με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων. Έτσι τελικά, καταγράφεται μείωση της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων καθώς αυξάνεται ο όγκος τους.



Σχήμα 17. Επίδραση του όγκου του δοκιμίου στην θλιπτική αντοχή βραχομάζας (Heuze, 1979)

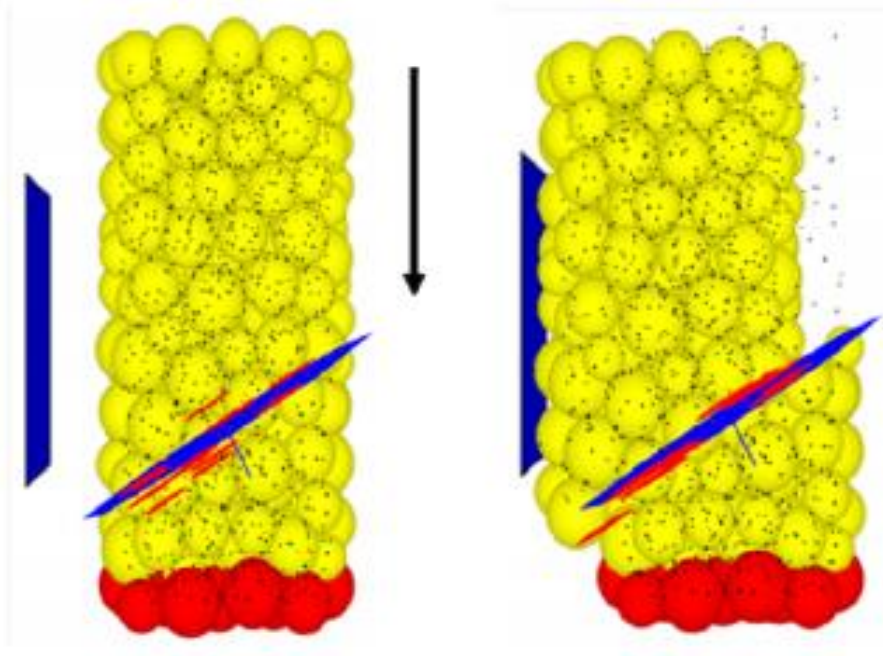
Οι Bandis et al. (1981) εκτέλεσαν δοκιμές διαξονικής θλίψης σε δοκίμια ψαθυρού υλικού με δύο συστήματα ασυνεχειών. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για τρία δοκίμια η μόνη διαφορά των οποίων ήταν η απόσταση των ασυνεχειών. Έτσι, το δοκίμιο A αποτελούνταν από 4000 τεμάχια άρρηκτου υλικού, το δοκίμιο B από 1000 και το δοκίμιο C από 250. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι μεγαλύτερη αντοχή παρουσίασε το δοκίμιο με τα περισσότερα τεμάχια (A) και μάλιστα 30% μεγαλύτερη από την αντοχή του δοκιμίου (C) με τα 250. Τα δοκίμια B και C αστόχησαν με ολίσθηση κατά μήκος των ασυνεχειών, ενώ στο δοκίμιο A η αστοχία οφειλόταν σε ζώνες παραμόρφωσης. Οι περιστροφές των τεμαχίων ενεργοποιούν μηχανισμούς περιστροφικής διάτμησης με αποτέλεσμα τον καλύτερο δεσμό μεταξύ των τεμαχίων και κατά συνέπεια την αύξηση της αντοχής της βραχομάζας.

Σύμφωνα με τον Bandis (1990) ο οποίος πραγματοποίησε αντίστοιχες δοκιμές σε δύο δοκίμια με διαφορετικό μέγεθος τεμαχίου άρρηκτου υλικού η παραπάνω συμπεριφορά είναι αποτέλεσμα της επίδρασης της κλίμακας, όταν τα τεμάχια έχουν τη δυνατότητα να κινηθούν ανεξάρτητα και να έχουν επαφή με όλες τις κλίμακες τραχύτητας.

Όπως σημείωσε ο Schultz (1996), μία από τις προϋποθέσεις για την εκτίμηση της αντοχής και της παραμόρφωσης για τη βραχομάζα, είναι να συγκρίνουμε την κλίμακα του προβλήματος (π.χ. μέγεθος εκσκαφής ή μέγεθος δείγματος) με την κλίμακα του δικτύου ασυνεχειών (π.χ. μέγεθος μπλοκ). Καθώς αυξάνεται η σχετική κλίμακα (δηλαδή, καθώς το μέγεθος του δείγματος γίνεται μεγαλύτερο σε σχέση με το μέγεθος του μπλοκ), η αντοχή, μειώνεται.

Οι York & Canbulat(1998), προσπάθησαν να διατυπώσουν τα φαινόμενα της κλίμακας που προκύπτουν στο σχεδιασμό υπογείων εκμεταλλεύσεων και συγκεκριμένα τα φαινόμενα αυτά που επηρεάζουν την αντοχή των στύλων στο σχεδιασμό υπόγειων εκμεταλλεύσεων θαλάμων και στύλων. Στην ίδια έρευνα μελετάται και ο λόγος ύψους / πλάτους τόσο των δοκιμίων όσο και των στύλων και τελικώς προτείνεται ένας ελάχιστος κρίσιμος όγκος δείγματος προκειμένου να είναι αντιπροσωπευτικός και να φέρει την ίδια αντοχή με αυτή της βραχομάζας που μελετάται.

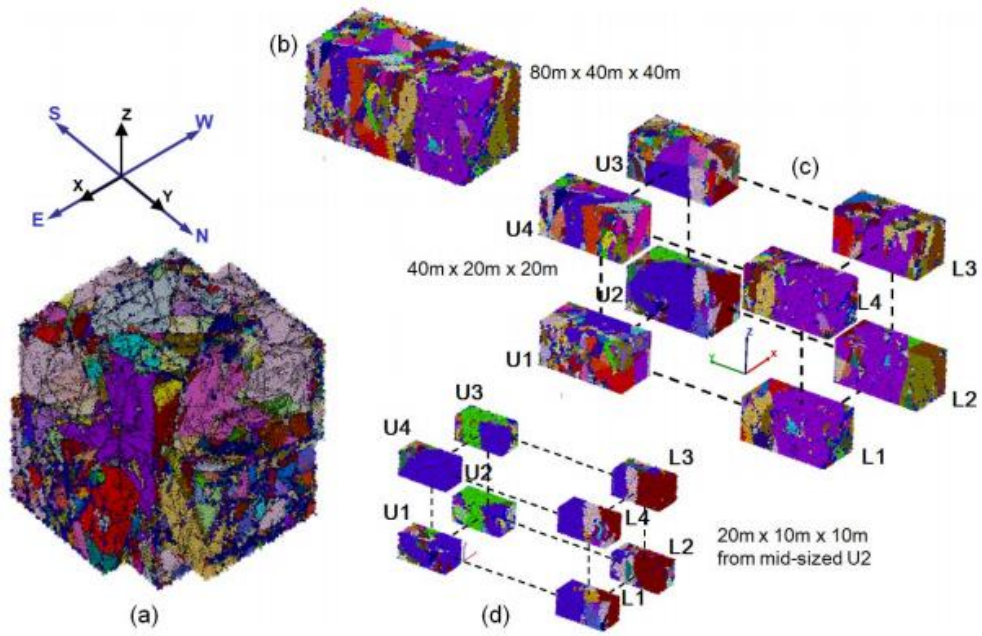
Οι Pierce et al.(2007) εισήγαγαν τη μέθοδο SRM (Synthetic RockMass) στην ανάλυση τους που αφορά την εκσκαφή μεταλλευτικής στοάς. Το SRM είναι μια τρισδιάστατη αναπαράσταση μίας βραχομάζας. Αντιπροσωπεύει το άρρηκτο πέτρωμα ως μια συστάδα συνδεδεμένων σωματιδίων και ένα ενσωματωμένο διακριτό δίκτυο ασυνεχειών (DFN) που αντιπροσωπεύει τις ασυνέχειες σε σχήμα δίσκου. Οι ασυνέχειες παριστάνονται στη συστάδα σωματιδίων με ένα SJM(SmoothJointMaterial) σε επαφές στοιχειωδών σωματιδίων που τέμνονται από κάθε ασυνέχεια. Το SJM εξασφαλίζει ολίσθηση στο επίπεδο της ασυνέχειας, ανεξάρτητα από τις τοπικές διευθύνσεις των επαφών. Σε μια προσπάθεια επίτευξης ενός REV(RepresentiveElementVolume),δηλαδή ενός αντιπροσωπευτικού όγκου της βραχομάζας, που αφορούσε τη μελέτη, τα δείγματα SRM κατασκευάστηκαν με διάμετρο ίση με 55 φορές τη μέση απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής διαπιστώθηκε ολίσθηση στα επίπεδα των ασυνεχειών και νέα ανάπτυξη ρωγμών στα δείγματα.



Σχήμα 18. Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου SRM και SJM (Cundall et al., 2008)

Οι Cundall et al. (2008) βασιζόμενοι στην ίδια μέθοδο, έκαναν μία ανάλυση προσπαθώντας να συσχετίσουν την αντοχή της βραχομάζας με τα φαινόμενα κλίμακας. Δημιούργησαν ένα αρχικό δοκίμιο στο περιβάλλον του *PFC3D* από το οποίο διαδοχικά εξήγαγαν άλλα μικρότερης κλίμακας δοκίμια, των οποίων έγινε η εκτίμηση της μονοαξονικής αντοχής της βραχομάζας. Αυτό συνέβη για τρεις διαφορετικές ιδιότητες πετρωμάτων αντιπροσωπεύοντας ασβεστίτη, γάββρο και πυροξενίτη. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής έκαναν ισχυρή την παρουσία της επίδρασης της κλίμακας στην αντοχή της βραχομάζας, καθώς παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της αντοχής σε σχέση με την αύξηση του μεγέθους των δοκιμίων.

Έκτοτε, διάφορες αναλύσεις με σκοπό το συσχετισμό του μεγέθους στην αντοχή της βραχομάζας (Liu, He & Wang 2019) αλλά και για σχεδιαστικούς λόγους (Aydin & Li, 2018), οι οποίες χρησιμοποιούν τη μέθοδο διακριτών στοιχείων, τη δημιουργία διακριτών δικτύων ασυνεχειών και υπολογιστικά προγράμματα που προσομοιώνουν τη συμπεριφορά βραχομάζας. Τα παραπάνω εργαλεία είναι τα πλέον σημαντικά στην αποτύπωση του προβλήματος της κλίμακας, καθώς μπορούν να προσομοιώνουν μια πιο ρεαλιστική κατάσταση της βραχομάζας και της εντατικής κατάστασής της.



Σχήμα 19. Διαδοχικά μικρότερα δοκίμια που εξήχθησαν από μεγαλύτερο αρχικό πέτρωμα (Cundall et al., 2008)

3. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ Ο ΚΩΔΙΚΑΣ UDEC

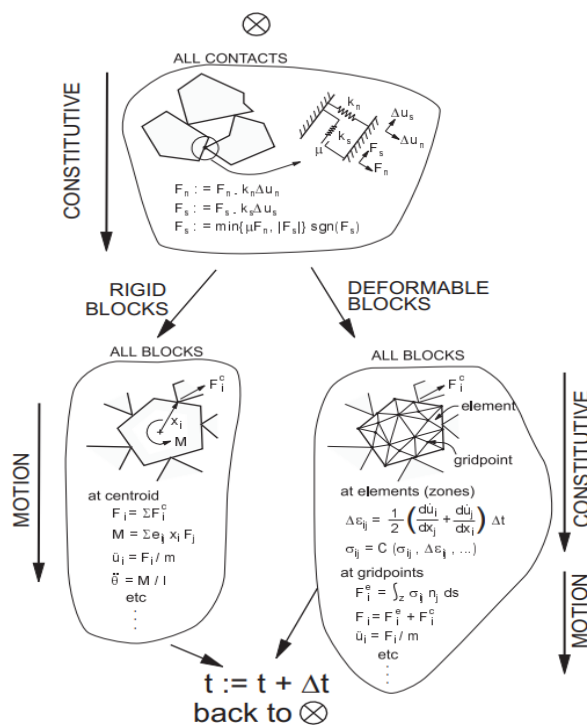
Η Μέθοδος Διακριτών Στοιχείων περιλαμβάνει υπολογιστικές μεθόδους για τον υπολογισμό της κίνησης και επιρροής ενός μεγάλου συνόλου στοιχειωδών σωματιδίων. Την εν λόγω μέθοδο εισήγαγε αρχικά ο Peter A. Cundall το 1971 με εφαρμογή στη βραχομηχανική και αργότερα γενικεύτηκε για διάφορες εφαρμογές, έτσι ώστε η μέθοδος συμπληρώνει, πλέον, πενήντα χρόνια ανάπτυξης και βελτίωσης. Η DEM πλέον χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορους τομείς πέραν της βραχομηχανικής, όπως στη μεταλλουργία, στη χημεία και τη φαρμακευτική βιομηχανία.

Το Universal Distinct Element Code (UDEC) είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα της Itasca Consulting, βασισμένο στη Μέθοδο Διακριτών Στοιχείων (D.E.M) για δύο διαστάσεις. Το UDEC προσομοιώνει την συμπεριφορά ασυνεχών μέσων, όπως η βραχομάζα, όταν αυτά υποβάλλονται είτε σε δυναμικά είτε σε στατικά φορτία. Η Itasca Consulting δημιουργήθηκε το 1981 με σκοπό να παρέχει υπηρεσίες συμβουλευτικής, στο πλαίσιο των αναγκών της μεταλλευτικής βιομηχανίας. Στη μέθοδο διακριτών στοιχείων, η βραχομάζα, αντιπροσωπεύεται ως ένα σύνολο αποτελούμενο από μεμονωμένα παραμορφώσιμα μπλοκ άρρηκτου πετρώματος. Ασυνέχειες, θεωρούνται οι διασυνδέσεις μεταξύ των μπλοκ (δηλαδή, η ασυνέχεια αντιμετωπίζεται ως οριακή κατάσταση). Οι δυνάμεις επαφής και οι μετατοπίσεις στις διεπαφές μιας συμπιεζόμενης βραχομάζας στο UDEC, γίνονται γνωστές μέσα από μια σειρά υπολογισμών που χαρακτηρίζουν τις κινήσεις των μπλοκ. Οι κινήσεις προκύπτουν από τη διάδοση, μέσω της συστάδας των μπλοκ, των διαταραχών που προκαλούνται από εφαρμοζόμενα φορτία ή δυνάμεις. Πρόκειται για μια δυναμική διαδικασία στην οποία η ταχύτητα διάδοσης εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του διακριτού συστήματος.

Η δυναμική συμπεριφορά των δοκιμίων αντιπροσωπεύεται αριθμητικά από έναν αλγόριθμο χρονομέτρησης στον οποίο το μέγεθος του χρονικού βήματος περιορίζεται από την υπόθεση ότι οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις είναι σταθερές μέσα στο χρονικό βήμα.

Η μέθοδος διακριτών στοιχείων, βασίζεται στην ιδέα ότι το χρονικό βήμα είναι επαρκώς μικρό που, σε ένα μόνο βήμα, οι διαταραχές δεν μπορούν να εξαπλωθούν μεταξύ ενός διακριτού στοιχείου και των άμεσα γειτονικών. Αυτό αντιστοιχεί στο γεγονός ότι υπάρχει περιορισμένη ταχύτητα με την οποία οι πληροφορίες μπορούν να μεταδοθούν σε οποιοδήποτε φυσικό μέσο. Ο περιορισμός χρονικού ορίου ισχύει και για τα δύο, ασυνέχειες και μπλοκ.

Οι υπολογισμοί που πραγματοποιούνται με τη μέθοδο του διακριτών στοιχείων εναλλάσσονται μεταξύ της εφαρμογής μιας σχέσης δύναμης-μετατόπισης σε όλες τις επαφές και του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα σε όλα τα μπλοκ. Η σχέση δύναμης-μετατόπισης χρησιμοποιείται για την εύρεση δυνάμεων επαφής από γνωστές (και σταθερές) μετατοπίσεις. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα δίνει την κίνηση των μπλοκ που προκύπτει από τις γνωστές (και σταθερές) δυνάμεις που ενεργούν πάνω τους. Εάν τα μπλοκ είναι παραμορφώσιμα, η κίνηση υπολογίζεται στα σημεία πλέγματος των τριγωνικών στοιχείων πεπερασμένης παραμόρφωσης, εντός αυτών. Στη συνέχεια, η εφαρμογή των καταστατικών σχέσεων του υλικού του μπλοκ, δίνει νέες πιέσεις μέσα στα στοιχεία. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τον υπολογιστικό κύκλο για τη μέθοδο διακριτών στοιχείων.



Σχήμα 20. Υπολογιστικός κύκλος για την μέθοδο διακριτών στοιχείων στον κώδικα UDEC. (Itasca, 2019)

Το UDEC περιέχει στη βάση δεδομένων του αρκετά προκαθορισμένα μοντέλα συμπεριφοράς υλικών, τόσο για τα άρρηκτα τεμάχια, όσο και για τις ασυνέχειες, ώστε να προσομοιώνει διάφορα γεωλογικά υλικά και περιβάλλοντα.

Ακόμη, περιλαμβάνει και την γλώσσα προγραμματισμού FISH που συχνά χρησιμοποιείται σε παρόμοια προγράμματα προσομοίωσης. Το FISH είναι μια ισχυρή γλώσσα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον χειρισμό του μοντέλου, την παραμετροποίηση μοντέλων, τον έλεγχο μοντέλων, τη δημιουργία / υπολογισμό εξόδων νέου μοντέλου, την παρακολούθηση αποτελεσμάτων και την τελική επεξεργασία του μοντέλου μετά τη δοκιμή.

Όλα τα παραπάνω, καθιστούν το UDEC πρωταρχικό εργαλείο ανάλυσης σε ένα ευρύ φάσμα της βραχομηχανικής, συμπεριλαμβανομένων, τη μελέτη βραχωδών πρανών, υπογείων εκσκαφών, καθώς και θεμελιώσεις βράχων.

Τέλος, το UDEC περιέχει αυτόματη δημιουργία DFN (Discrete Fracture Network), το οποίο αναπαράγει ασυνέχειες με γεωμετρικά χαρακτηριστικά βασισμένα σε μια στατιστική κατανομή μέχρι να πληρούνται ορισμένα κριτήρια που ορίζει ο χρήστης, όπως το σύνολο ή η πυκνότητα των ασυνεχειών.

3.1. Εξισώσεις κίνησης στη μέθοδο διακριτών στοιχείων στο UDEC

Η κίνηση ενός μεμονωμένου μπλοκ καθορίζεται από το μέγεθος και την κατεύθυνση της προκύπτουσας ροπής και των δυνάμεων που ενεργούν σε αυτό. Σε αυτήν την ενότητα, αναπτύσσονται οι εξισώσεις κίνησης που περιγράφουν τη μετακίνηση και την περιστροφή του μπλοκ. Εξετάζοντας τη κίνηση ενός σώματος σε μία διάσταση που προκύπτει από την εφαρμογή μιας μεταβαλλόμενης δύναμης, $F(t)$ σε αυτό, ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα μπορεί να γραφεί:

$$\frac{d\dot{u}}{dt} = \frac{F}{m} \quad (3.1)$$

- \dot{u} = ταχύτητα
- t = χρόνος
- m = μάζα

Το πρώτο μέλος της (3.1) μπορεί να γραφτεί:

$$\frac{d\dot{u}}{dt} = \frac{\dot{u}^{(t+\frac{\Delta t}{2})} - \dot{u}^{(t-\frac{\Delta t}{2})}}{\Delta t} \quad (3.2)$$

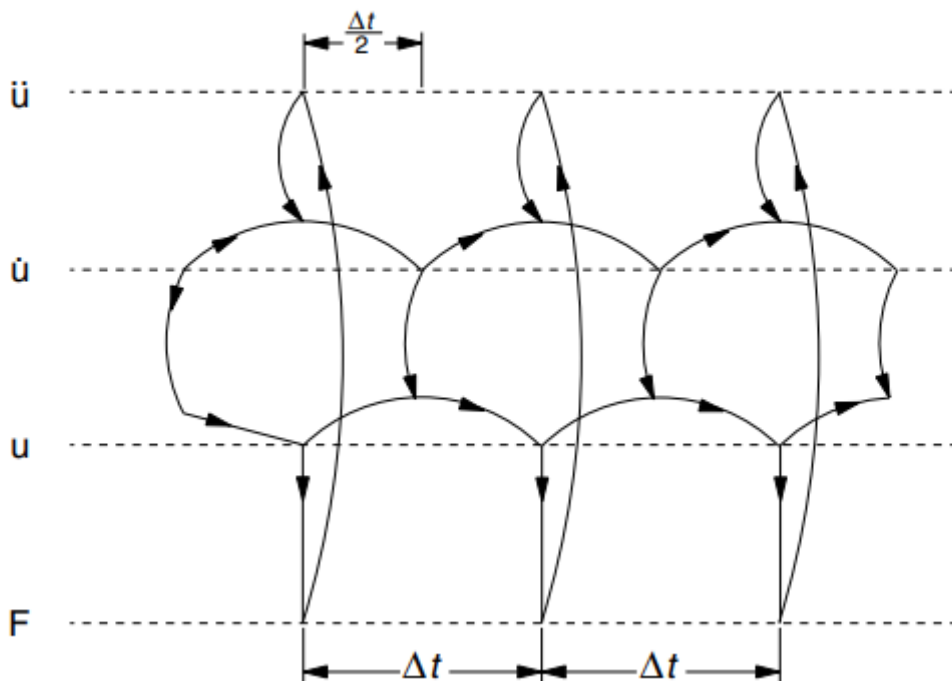
Έτσι η (3.1) σε συνδυασμό με την (3.2) δίνει:

$$\dot{u}^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{u}^{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \frac{F(t)}{m} \Delta t \quad (3.3)$$

Με τις ταχύτητες που είναι αποθηκευμένες στο σημείο μισού βήματος η μετατόπιση είναι δυνατόν να εκφραστεί ως:

$$u^{(t+\Delta t)} = u^{(t)} + \dot{u}^{(t+\frac{\Delta t}{2})} \Delta t$$

Επειδή η δύναμη εξαρτάται από την μετατόπιση, ο υπολογισμός της δύναμης / μετατόπισης γίνεται ταυτόχρονα. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει τη σειρά υπολογισμών που συμβαίνει σε μία προσομοίωση και η σειρά υποδεικνύεται από τα βέλη.



Σχήμα 21. Σειρά υπολογισμών της προσομοίωσης που λαμβάνει χώρα στο UDEC.

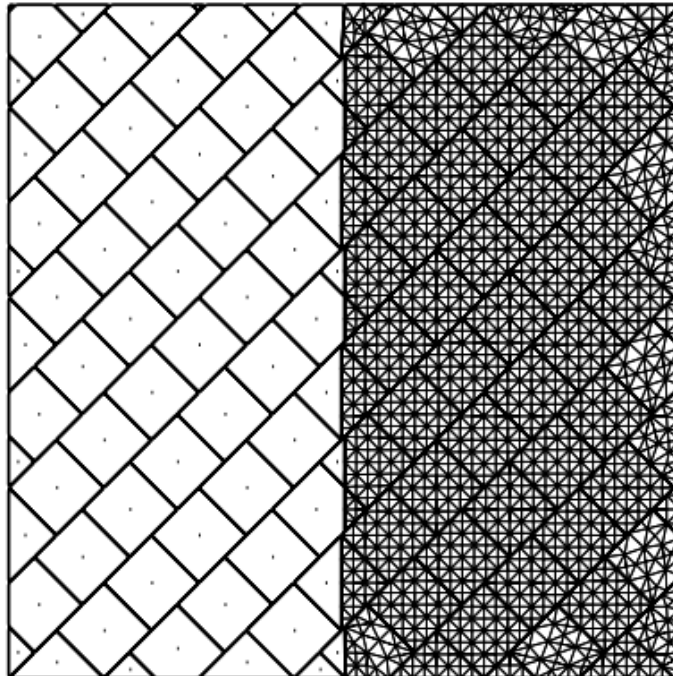
(Itasca, 2019)

3.2. Παραμορφωσιμότητα των μπλοκ

Τα παραμορφώσιμα μπλοκ διακρίνονται εσωτερικά σε τριγωνικά πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων. Η πολυπλοκότητα της παραμόρφωσης των μπλοκ εξαρτάται από τον αριθμό των στοιχείων τα οποία βρίσκονται σε αυτά. Οι κορυφές των τριγωνικών στοιχείων είναι σημεία του συνολικού πλέγματος πεπερασμένων σημείων και οι εξισώσεις κίνησης για κάθε σημείο πλέγματος διατυπώνονται παρακάτω:

$$\ddot{u} = \frac{\int_S \sigma_{ij} n_j ds + F_i}{m} + g_i$$

- S = η επιφάνεια η οποία περικλείει τη μάζα, m
- n_j = η μονάδα που αντιστοιχεί στο s
- F_i = η συνισταμένη των εξωτερικών δυνάμεων που εφαρμόζεται στο δίκτυο στοιχείων
- g_i = η επιτάχυνση της βαρύτητας



Σχήμα 22. Χωρισμός σε παραμορφώσιμα και μη μπλοκ εντός ενός μοντέλου που περιέχει ένα σύστημα ασυνεχειών. (Itasca, 2019)

Η συνισταμένη δύναμη που εφαρμόζεται στο δίκτυο των στοιχείων λαμβάνεται ως άθροισμα τριών όρων:

$$F_i = F_i^Z + F_i^c + F_i^l$$

Το F_i^l αντιστοιχεί στα εξωτερικώς εφαρμοζόμενα φορτία. Το F_i^c προκύπτει από τις δυνάμεις επαφής και υπάρχει μόνο για τα στοιχεία της οριακής κατάστασης. Τέλος, η συμβολή των εσωτερικών τάσεων στα γειτονικά στοιχεία του πλέγματος υπολογίζεται ως:

$$F_i^Z = \int_c \sigma_{ij} n_j ds$$

- σ_{ij} οτανυστής της τάσης του πλέγματος
- n_j η επιφάνεια του περιγράμματος c , που περικλείει την κοντινή πολυγωνική γραμμή που ορίζεται από τα ευθεία τμήματα που διχοτομούν τις άκρες του πλέγματος που συγκλίνουν στο υπό εξέταση σημείο.

Ένα αθροιστικό διάνυσμα δύναμης, $\sum F_i$, υπολογίζεται σε κάθε διακριτό σημείο πλέγματος. Το διάνυσμα περιλαμβάνει συνεισφορές από εφαρμοζόμενα φορτία (όπως συζητήθηκε παραπάνω) και από δυνάμεις λόγω βαρύτητας. Οι δυνάμεις βαρύτητας $F_i^{(g)}$ υπολογίζονται:

$$F_i^{(g)} = g_i m_g$$

όπου m_g είναι η μάζα στο σημείο πλέγματος, που ορίζεται ως το άθροισμα του ενός τρίτου των μαζών των στοιχειωδών τριγώνων που συνδέονται με το σημείο πλέγματος. Εάν το σώμα βρίσκεται σε ισορροπία ή σε σταθερή κατάσταση, το $\sum F_i$ στον κόμβο θα είναι μηδέν. Διαφορετικά, ο κόμβος θα επιταχυνθεί σύμφωνα με τη μορφή πεπερασμένων διαφορών του δεύτερου νόμου κίνησης του Νεύτωνα.

$$\dot{u}_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{u}_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \sum F_i^t \frac{\Delta t}{m}$$

Κατά τη διάρκεια κάθε χρονικού βήματος, οι μετατοπίσεις και οι περιστροφές που σχετίζονται με τις μετακινήσεις των στοιχείων προκύπτουν από:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i})$$

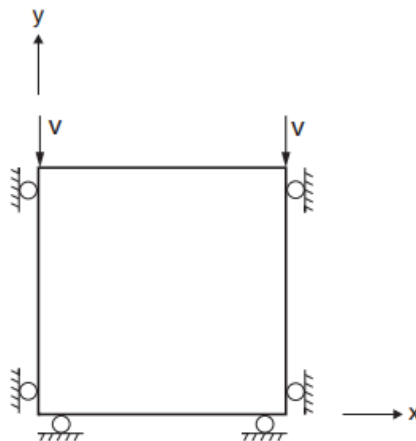
$$\dot{\theta}_{ij} = \frac{1}{2} (\dot{u}_{i,j} - \dot{u}_{j,i})$$

Οι ελαστικές σχέσεις για παραμορφώσιμα μπλοκ που χρησιμοποιούνται στο UDEC είναι σε μεταβολική μορφή έτσι ώστε η εφαρμογή τους σε μη γραμμικά προβλήματα, να μπορεί να επιτευχθεί εύκολα.

$$\Delta\sigma_{ij}^e = \lambda \Delta\epsilon_v \delta_{ij} + 2\mu \Delta\epsilon_{ij}$$

- λ, μ σταθερές *Lame*
- $\Delta\sigma_{ij}^e$ είναι οι ελαστικές μεταβολές του τανυστή της τάσης
- $\Delta\epsilon_{ij}$ είναι οι μεταβολές της τροπής
- $\Delta\epsilon_v = \Delta\epsilon_{11} + \Delta\epsilon_{22}$ η μεταβολή της ογκομετρικής τροπής
- δ_{ij} είναι η κυματοσυνάρτηση του *Kronecker*

Οι θεμελιώδεις σχέσεις που χαρακτηρίζουν το υλικό και χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία είναι οι σχέσεις του κριτηρίου Mohr-Coulomb. Ο τρόπος υπολογισμού των απαραίτητων μεγεθών του πλέγματος του υλικού στο μοντέλο Mohr-Coulomb στο UDEC αναλύεται παρακάτω. Έτσι, για παράδειγμα μιας προσομοίωσης ενός τετράγωνου μπλοκ με πλευρά ίση με ένα μέτρο και με αρχικό ρυθμό παραμόρφωσης $\nu < 0$ στο ανώτερο τμήμα του, οι υπολογισμοί που γίνονται στο πρόγραμμα θα είναι:



Σχήμα 23. Περιγραφή οριακών καταστάσεων σε στοιχειώδη δοκιμή στο UDEC (Itasca, 2019)

Οι οριακές καταστάσεις φαίνονται στο σχήμα. Οι σχέσεις που ισχύουν για αυτές είναι:

$$\Delta e_x = 0$$

$$\Delta e_y = u\Delta t/L$$

$$\Delta e_z = 0$$

Στην ελαστική περιοχή, η εφαρμογή του νόμου του Hooke με $e_y = ut$, t ο χρόνος, δίνει:

$$\sigma_x = \alpha_2 ut$$

$$\sigma_y = \alpha_1 ut$$

$$\sigma_z = \sigma_x$$

Όπου τα $\alpha_1 = K + 4/3G$ και $\alpha_2 = K - 2/3G$

G: Το μέτρο διάτμησης του υλικού.

K: Το μέτρο συμπίεσης (bulk modulus) του υλικού.

Για την εφαρμογή του κριτηρίου M-C κατασκευάζονται οι συναρτήσεις αστοχίας.

$$f^1 = \sigma_y - \sigma_x N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi}$$

$$f^2 = \sigma_y - \sigma_z N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi}$$

Όπου $N_\varphi = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}$, φ : η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού.

Κατά την έναρξη της δοκιμής $f^1 = f^2 = 0$ και από τις αρχικές εξισώσεις προκύπτει:

$$t = \frac{2c\sqrt{N_\varphi}}{-u(\alpha_1 - \alpha_2 N_\varphi)}$$

Έτσι η μετάβαση στη πλαστική περιοχή θα γίνει μόνο αν $\alpha_1 - \alpha_2 N_\varphi > 0$

Κατά τη διάρκεια της πλαστικής περιοχής, οι τροπές προκύπτουν από την άθροιση των ελαστικών και πλαστικών μερών.

$$\Delta e_x = \Delta e_x^e + \Delta e_x^p$$

$$\Delta e_y = \Delta e_y^e + \Delta e_y^p$$

$$\Delta e_z = \Delta e_z^e + \Delta e_z^p$$

Χρησιμοποιώντας ξανά τις αρχικές σχέσεις οι τροπές μπορούν να γραφούν:

$$\Delta e_x^e = -\Delta e_x^p$$

$$\Delta e_y^e = u\Delta t - \Delta e_y^p$$

$$\Delta e_z^e = -\Delta e_z^p$$

Τα πλαστικά μέρη των τροπών ισούνται:

$$\Delta e_x^p = \lambda_1 \frac{\partial g^1}{\partial \sigma_x} + \lambda_2 \frac{\partial g^2}{\partial \sigma_x}$$

$$\Delta e_y^p = \lambda_1 \frac{\partial g^1}{\partial \sigma_y} + \lambda_2 \frac{\partial g^2}{\partial \sigma_y}$$

$$\Delta e_z^p = \lambda_1 \frac{\partial g^1}{\partial \sigma_z} + \lambda_2 \frac{\partial g^2}{\partial \sigma_z}$$

Όπου g^1 και g^2 :

$$g^1 = \sigma_y - \sigma_y N_\psi$$

$$g^2 = \sigma_y - \sigma_z N_\psi$$

$N_\psi = \frac{1+\sin\psi}{1-\sin\psi}$, ψ : η γωνία διαστολής του υλικού

Μετά τη μερική παραγωγή και δεδομένου από τη συμμετρία ότι $\lambda_1 = \lambda_2$ οι σχέσεις γίνονται:

$$\Delta e_x^p = -\lambda_1 N_\psi$$

$$\Delta e_y^p = 2\lambda_1$$

$$\Delta e_z^p = -\lambda_1 N_\psi$$

Η σχέση των τάσεων που προκύπτουν από τον νόμο του Hooke είναι:

$$\Delta \sigma_x = \alpha_1 \Delta e_x^e + \alpha_2 (\Delta e_y^e + \Delta e_x^e)$$

$$\Delta \sigma_y = \alpha_1 \Delta e_y^e + \alpha_2 2\Delta e_x^e$$

$$\Delta \sigma_z = \Delta \sigma_x$$

Από συμμετρία ισχύει ότι $\Delta e_x^e = \Delta e_z^e$ και σε συνδυασμό με τις παραπάνω εξισώσεις τελικώς έχουμε:

$$\Delta\sigma_x = \alpha_1 \lambda_1 N_\psi + \alpha_2 (u\Delta t - 2\lambda_1 + \lambda_1 N_\psi)$$

$$\Delta\sigma_y = \alpha_1 (u\Delta t - 2\lambda_1) + \alpha_2 2\lambda_1 N_\psi$$

$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_x$$

Η παράμετρος λ_1 μπορεί να καθοριστεί εκφράζοντας τη συνθήκη ότι κατά τη διάρκεια της πλαστικής περιοχής $\Delta f^1 = 0$.

$$\Delta\sigma_y - \Delta\sigma_x N_\phi = 0$$

Έτσι μετά από επεξεργασία στις παραπάνω εξισώσεις το λ_1 εκφράζεται:

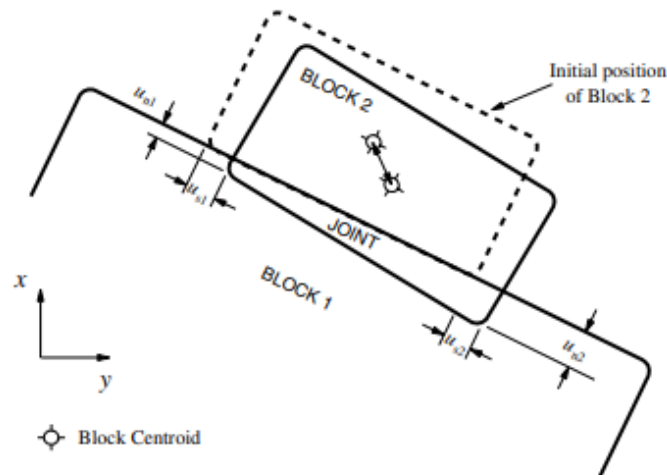
$$\lambda_1 = u \lambda \Delta t$$

Και:

$$\lambda = \frac{\alpha_1 - \alpha_2 N_\phi}{(\alpha_1 + \alpha_2) N_\phi N_\psi - 2\alpha_2 (N_\phi + N_\psi) + 2\alpha_1}$$

3.3. Αναπαράσταση οριακής κατάστασης στον κώδικα UDEC

Μια ασυνέχεια, αναπαρίσταται αριθμητικά, ως επιφάνεια επαφής (αποτελούμενη από μεμονωμένες επαφές σημείων) που σχηματίζονται μεταξύ δύο μπλοκ. Γενικά, για κάθε ζεύγος μπλοκ που εφάπτονται το ένα στο άλλο, (ή διαχωρίζονται από ένα αρκετά μικρό κενό), στοιχειώδη δεδομένα δημιουργούνται για να αντιπροσωπεύουν τις επαφές σημείου. Στο UDEC, τα εφάπτόμενα μπλοκ μπορούν να αγγίζουν το ένα το άλλο κατά μήκος μιας κοινής ασυνέχειας ή σε διακριτά σημεία όπου μια γωνία ενός μπλοκ, συναντά μία πλευρά ή γωνία, ενός άλλου μπλοκ. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την αναπαράσταση των επαφών / ασυνεχειών.



Σχήμα 24. Αναπαράσταση της επαφής μεταξύ δύο άρρηκτων μπλοκ στο UDEC (Itasca, 2019)

Το πρόγραμμα χρειάζεται μόνο δύο βασικούς τύπους επαφών για να αντιπροσωπεύσει ένα σύστημα μπλοκ(βραχομάζα): επαφές τύπου γωνία-γωνία και επαφές τύπου πλευρά-γωνία. Αυτά ονομάζονται "αριθμητικές επαφές". Το βασικό αριθμητικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στο UDEC περιλαμβάνει πολλά από τα φυσικά χαρακτηριστικά που είναι αντιπροσωπευτικά όταν περιγράφεται μια ασυνέχεια προς της μηχανικές της ιδιότητες. Η σχέση τάσης παραμόρφωσης θεωρείται ότι είναι γραμμική και διέπεται από την ακαμψία k_n της ασυνέχειας, έτσι ώστε:

$$\Delta\sigma_n = -k_n\Delta u_n$$

- $\Delta\sigma_n$ = μεταβολή της κάθετης τάσης
- Δu_n = μεταβολή της κάθετης μετατόπισης

Υπάρχει επίσης ένας περιορισμός που αφορά την αντοχή σε εφελκυσμό, T , της ασυνέχειας. Σε περίπτωση υπέρβασης της αντοχής σε εφελκυσμό (δηλαδή, εάν $\sigma_n < -T$), τότε $\sigma_n = 0$. Ομοίως, στη διάτμηση, η απόκριση ελέγχεται από μία διατμητική σταθερά, k_s . Η διατμητική τάση, τ_s , περιορίζεται από έναν συνδυασμό συνοχής (C) και γωνίας τριβής (ϕ).

Έτσι, εάν

$$|\tau_s| \leq C + \sigma_n \tan \varphi = \tau_{max}$$

Τότε

$$\Delta \tau_s = -k_s \Delta u_s^e$$

Αλλιώς, εάν

$$|\tau_s| \geq \tau_{max}$$

Τότε

$$\tau_s = \text{sign}(\Delta u_s) \tau_{max}$$

- $\Delta u_s^e =$ ελαστική σταθερά μεταβολής της διατμητικής παραμόρφωσης
- $\Delta u_s =$ μεταβολή της διατμητικής παραμόρφωσης

Το παραπάνω μοντέλο αναφέρεται ως μοντέλο ολίσθησης Coulomb. Επιπλέον, κατά την έναρξη της ολίσθησης, μπορεί να συμβεί διαστολή της ασυνέχειας (μη ελαστική ολίσθηση). Η διαστολή ελέγχεται στο μοντέλο ολίσθησης Coulomb με καθορισμένη γωνία διαστολής, ψ . Αυτός ο περιορισμός της διαστολής αντιστοιχεί στην παρατήρηση ότι συνθλιβόμενες τραχείες ασυνέχειες σε υψηλή αξονική ή διατμητική τάση θα αποτρέψουν τελικά την ολίσθηση στο επίπεδο της ασυνέχειας. Στο μοντέλο Coulomb, η διαστολή περιορίζεται έτσι ώστε:

Εάν

$$|\tau_s| \leq \tau_{max}, \text{ τότε } \psi = 0$$

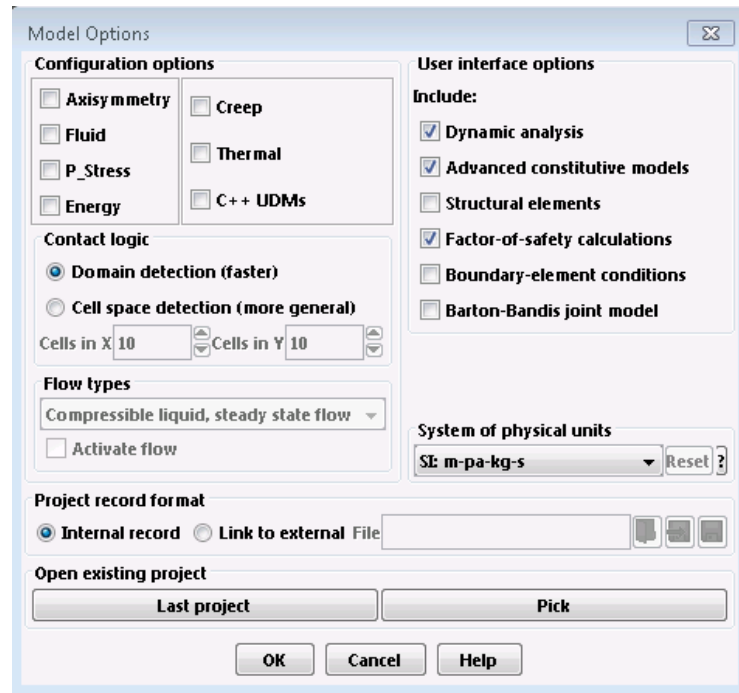
4. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ UDEC, ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΩΝ, ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ, ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

Σε αυτό το σημείο γίνεται αναλυτική περιγραφή των βημάτων για την σχεδίαση και την εισαγωγή όλων των δεδομένων και παραμέτρων. Η διαδικασία επίλυσης περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

Αρχικώς, σχεδιάζεται η γεωμετρία του μοντέλου. Στη συνέχεια κατασκευάζονται οι ασυνέχειες της βραχομάζας, γίνεται διακριτοποίηση σύμφωνα με τη μέθοδο DEM και ορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες του βράχου καθώς και των ασυνεχειών. Έπειτα, ορίζονται τα στατικά και τα δυναμικά φορτία. Τέλος, εκτελείται η προσομοίωση. Η ακολουθία των διαδικασιών είναι αυτή παραπάνω και είναι υποχρεωτική στο περιβάλλον του UDEC. Ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή όλων των προαναφερθεισών διαδικασιών και για τους δύο τύπους δοκιμών.

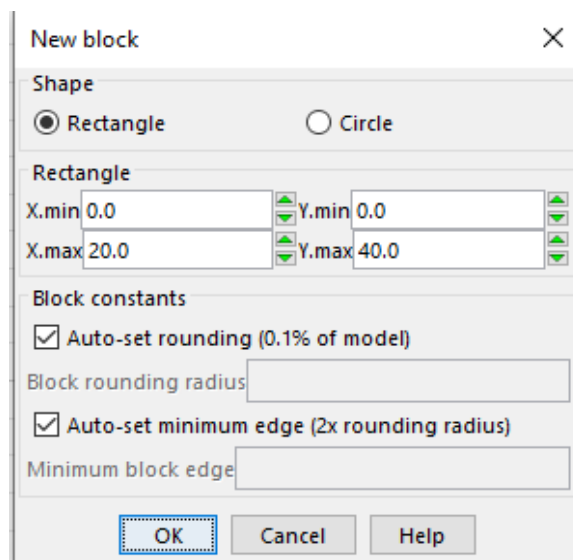
4.1. Δημιουργία δοκιμών με οικογένειες κάθετων ασυνεχειών

Μετά την εκκίνηση του προγράμματος επιλέγουμε τη δημιουργία νέου project και εμφανίζεται μια καρτέλα με διάφορες επιλογές. Σε αυτό το σημείο επιλέγουμε τις μονάδες στο S.I. Ακόμα επιλέγουμε ποια κεφάλαια θέλουμε να συμπεριλάβει το πρόγραμμα στην ανάλυση. Οι ακριβείς επιλογές που έγιναν φαίνονται στη φωτογραφία παρακάτω:



Σχήμα 25. Αρχικές επιλογές στο περιβάλλον του UDEC.

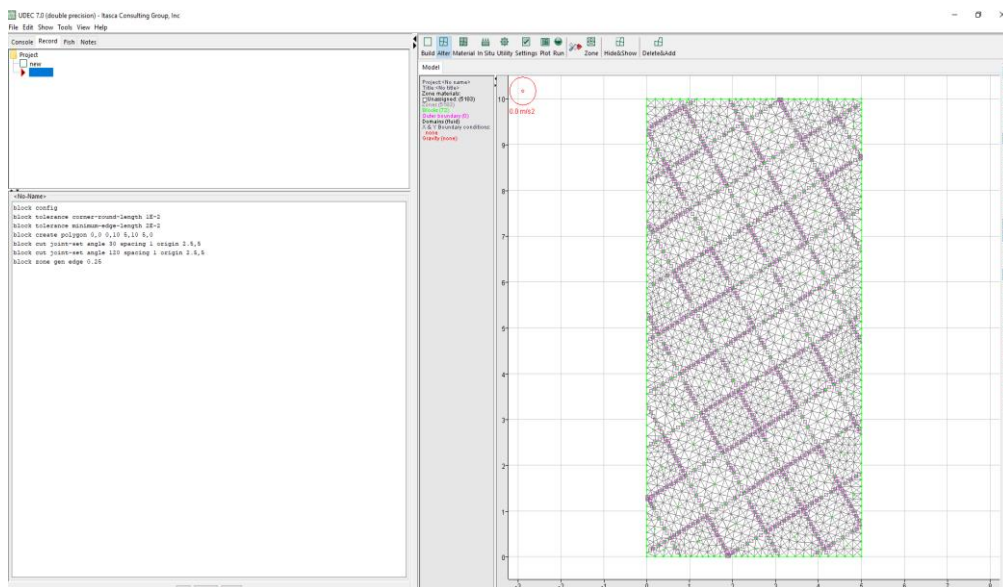
Στη συνέχεια επιλέγουμε τον φάκελο προορισμού και σώζουμε το αρχείο στον επιθυμητό φάκελο. Πλέον το πρόγραμμα είναι έτοιμο ώστε να ξεκινήσει η δημιουργία δοκιμίων. Από την αρχική σελίδα επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εργαλείο δημιουργίας μπλοκ και σχεδιάζουμε ένα μπλοκ βραχομάζας στις διαστάσεις που επιθυμούμε, στην προκειμένη περίπτωση το αρχικό δοκίμιο ήταν και αυτό των μεγαλύτερων διαστάσεων, δηλαδή, 20x40m.



Σχήμα 26. Δημιουργία μπλοκ στο UDEC.

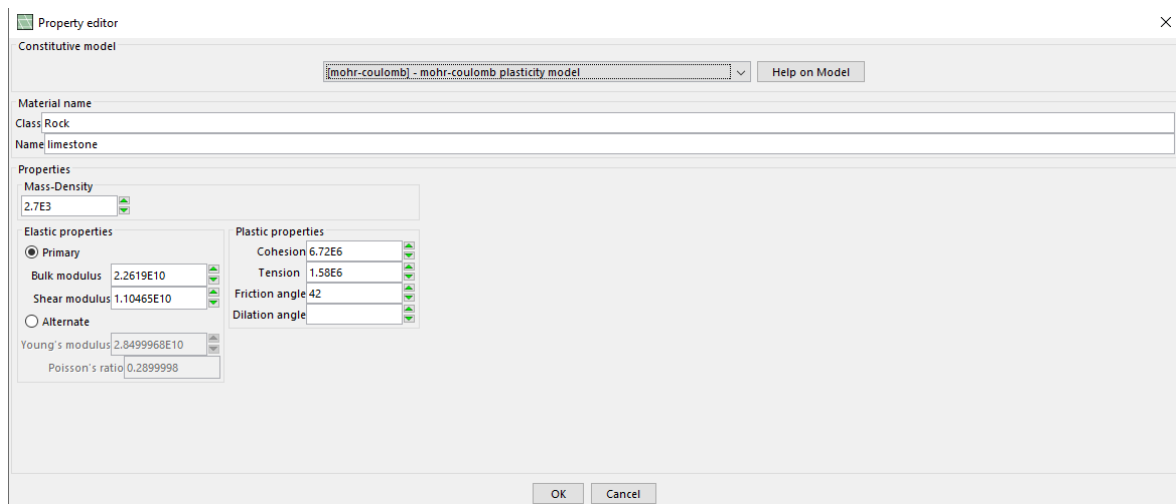
Αφού έχει πλέον δημιουργηθεί η γεωμετρία του δοκιμίου βραχομάζας, σειρά έχουν οι ασυνέχειες. Πάλι από τη γραμμή εργαλείων του προγράμματος επιλέγεται το εργαλείο δημιουργίας ασυνεχειών, και συγκεκριμένα το εργαλείο δημιουργίας παράλληλων ασυνεχειών με σταθερή απόσταση ίση με 1 μέτρο. Αυτό συμβαίνει διαδοχικά μέχρι να δημιουργηθούν δύο οικογένειες κάθετων ασυνεχειών στις γωνίες που έχουν αναφερθεί.

Τελικά, αφού και οι ασυνέχειες έχουν ολοκληρωθεί, μπορεί πλέον να γίνει η διακριτοποίηση του δοκιμίου με τη μέθοδο DEM. Αυτή πάλι επιλέγεται από τη γραμμή εργαλείων στην επιλογή “material”. Το πλέγμα το οποίο αποτελεί την διακριτοποίηση αποτελείται από τετράγωνα πλευράς ίσης με 0.25 μέτρων, καθώς μετά από δοκιμές κρίθηκε πως αυτή είναι η κατάλληλη για όλα τα μεγέθη των δοκιμίων, ώστε η προσομοίωση να μπορεί να δώσει σωστά αποτελέσματα.



Σχήμα 27. Δοκίμιο βραχομάζας 5x10, με ασυνέχειες κλίσης 30-120.

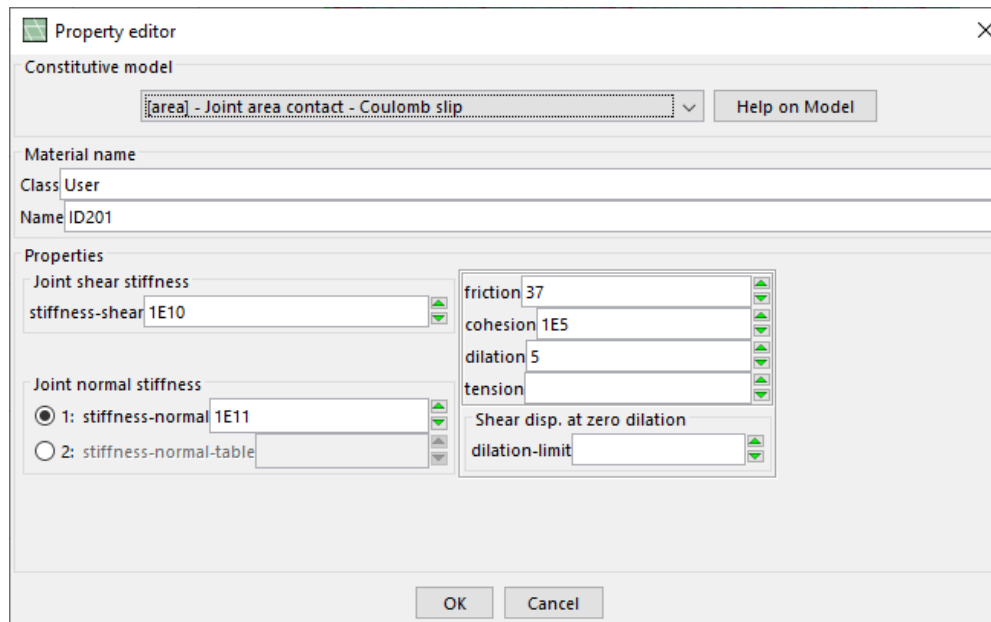
Συνεχίζοντας, ορίζεται το υλικό και οι ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος. Για όλες τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τη βάση δεδομένων του προγράμματος και πιο συγκεκριμένα οι ιδιότητες που δόθηκαν στο άρρηκτο πέτρωμα είναι αυτές για ασβεστολιθικό πέτρωμα. Οι ακριβείς τιμές φαίνονται παρακάτω στη φωτογραφία:



Σχήμα 28. Ακριβείς τιμές ιδιοτήτων του πετρώματος των δοκιμίων.

Όπως φαίνεται παραπάνω το πέτρωμα συμπεριφέρεται σαν υλικό με βάση το κριτήριο Mohr-Coulomb και είναι ένα από τα βασικότερα κριτήρια συμπεριφοράς της ύλης. Ακόμα διαθέσιμα είναι τα κριτήρια Hoek – Brown, καθώς και προκαθορισμένη σχέση τάσης παραμόρφωσης από τον χρήστη.

Σειρά τώρα έχουν οι ασυνέχειες και ο ορισμός των χαρακτηριστικών τους. Η επιλογή γίνεται πάλι μέσα από τη βιβλιοθήκη δεδομένων του UDEC και επιλέγονται χαρακτηριστικά για ασυνέχειες ασβεστολιθικών πετρωμάτων. Στη συνέχεια προσauξήθηκε η διατμητική αντοχή σε σχέση με αυτή που είχε η βάση δεδομένων, καθώς παρατηρήθηκε ότι χωρίς αυτή την προσαύξηση η αστοχία των δοκιμίων επερχόταν πολύ νωρίς με αποτέλεσμα το πρόγραμμα να μην μπορεί να δώσει αποτέλεσμα για την αξονική αντοχή του δοκιμίου. Πάλι οι ακριβείς τιμές φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 29. Ακριβείς τιμές ιδιοτήτων ασυνεχειών που περιέχονται στα δοκίμια.

Έχοντας λοιπόν ολοκληρώσει την εισαγωγή των δεδομένων που αφορούν τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας και των ασυνεχειών, σειρά έχει να δημιουργηθεί η εντατική κατάσταση γύρω από το δοκίμιο, η πλευρική τάση καθώς και οι συνθήκες κύλισης στο κατώτερο τμήμα του δοκιμίου όπως συμβαίνει σε μία δοκιμή θλίψης. Ξανά από τη γραμμή εργαλείων επιλέγεται το εργαλείο “insitu” και δηλώνεται η αρχική περιβάλλουσα τάση του δοκιμίου ίση με 5MPa όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως. Με τον ίδιο τρόπο ορίζεται και η πλευρική τάση ίση με 5MPa.

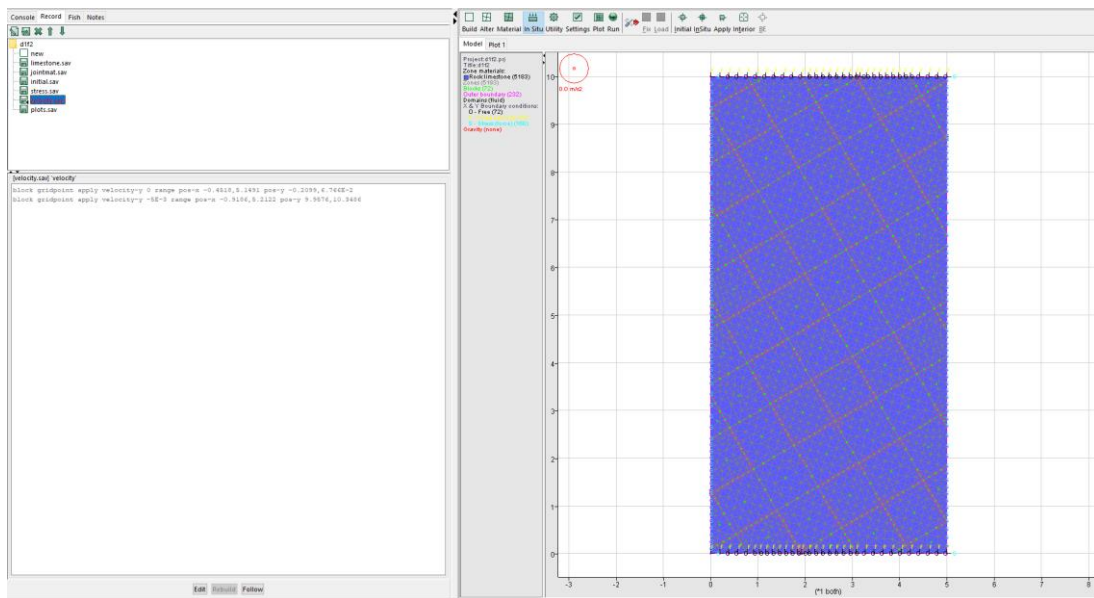
Τέλος, προτού η προσομοίωση να είναι έτοιμη να ξεκινήσει ορίζεται ένας αρχικός ρυθμός παραμόρφωσης στο ανώτερο οριζόντιο τμήμα του δοκιμίου. Ο ρυθμός παραμόρφωσης για όλες τις δοκιμές είναι ανάλογος του πλάτους του δοκιμίου και πιο συγκεκριμένα ίσος με:

$$v = w * 10^{-3} \text{ m/s} \quad , w \text{ πλάτος δοκιμίου}$$

Γενικά, πρόκειται έναν για σχετικά αργό ρυθμό παραμόρφωσης και με την παραπάνω αναλογία εξοικονομείται πολύτιμος χρόνος στις δοκιμές, καθώς όσο το μέγεθος του δοκιμίου αυξάνεται τόσο αυξάνεται και το σύνολο πεπερασμένων στοιχείων που συμμετέχουν στη δοκιμή. Συνεπώς, η διαδικασία της προσομοίωσης γίνεται πολύ απαιτητική σε επεξεργαστική ισχύ. Αυξάνοντας έτσι το ρυθμό παραμόρφωσης ανάλογα με το πλάτος του δοκιμίου χρειάζονται λιγότερα υπολογιστικά βήματα προκειμένου να

ολοκληρωθεί η δοκιμή, χωρίς όμως να επηρεάζονται τα αποτελέσματα, αφού όπως αναφέρθηκε πρόκειται για έναν αργό ρυθμό.

Ακόμα γίνεται και ένας περιορισμός στο κατώτερο οριζόντιο τμήμα του δοκιμίου που το περιορίζει να κινείται στον οριζόντιο άξονα $x-x'$. Έτσι το δοκίμιο είναι σαν να βρίσκεται σε κατάσταση κύλισης.



Σχήμα 30. Τελική κατάσταση δοκιμίου πριν τη δοκιμή.

Αφού έχουν ολοκληρωθεί οι προηγούμενες διαδικασίες η προσομοίωση μπορεί πλέον να ξεκινήσει. Αυτό συμβαίνει μέσα από τη γλώσσα fish που χρησιμοποιεί το UDEC. Ορίζοντας έτσι στο πρόγραμμα να καταγράφει την παραμόρφωση στο ανώτερο και στο κατώτερο τμήμα του δοκιμίου, επίσης να καταγράφει την τάση που δέχεται κάθε τμήμα της ζώνης διακριτοποίησης άρρηκτου πετρώματος ώστε τελικώς να υπολογίζεται η τάση που δέχεται το δοκίμιο συνολικά, αλλά και ορίζεται ο αριθμός των υπολογιστικών βημάτων για τα οποία θα τρέχει η δοκιμή. Έτσι θα μπορέσουμε τελικά μετά το τέλος της δοκιμής να εξάγουμε διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης, καθώς και τάσης-υπολογιστικών βημάτων, ώστε να έχουμε εκτίμηση για τη μέγιστη αντοχή της βραχομάζας σε θλίψη. Οι εντολές fish με τις οποίες επιτυγχάνονται τα παραπάνω αναγράφονται στη συνέχεια.

Πίνακας 1. Αλγόριθμος σε γλώσσα fish στο UDEC που καταγράφει την τάση και την παραμόρφωση των δοκιμίων κάθε 1.000 υπολογιστικά βήματα και αποθηκεύει τα δεδομένα σε ξεχωριστούς πίνακες.

```

1  fishdefine _record_variables
2  ;
3  _model_height = 40
4  _disp_top = block.gp.disp.y(block.gp.near(0,40))
5  _disp_bottom = block.gp.disp.y(block.gp.near(0,0))
6  _eps_yy = -(_disp_top - _disp_bottom)/1.0
7  ;
8  zi = block.zone(block.head)
9  _count = 0
10 _sig_yy = 0.0
11 loopwhilezi# 0
12 _sig_yy = _sig_yy + block.zone.stress.yy(zi)
13 zi = block.zone.next(zi)
14 _count = _count + 1
15 endloop
16 ;
17 _sig_yy = _sig_yy / _count
18 _record_variables = 1.0
19 ;
20 end
21 fishhistory@_record_variables
22
23 historyinterval1000
24 fishhistory@_eps_yy
25 fishhistory@_sig_yy
26
27 blockcycle700000
28
29 histexport1table1
30 histexport2table2
31 ;
32 fishdefine _copy_histories_to_tables
33
34 _n = table.size(1)
35 loopi (1,_n)
36 ; _sig_yyvs_eps_yy
37 table.x(111,i) = -table.y(1,i)
38 table.y(111,i) = -table.y(2,i)
39 ;
40 end_loop
41 End
42 @_copy_histories_to_tables

```

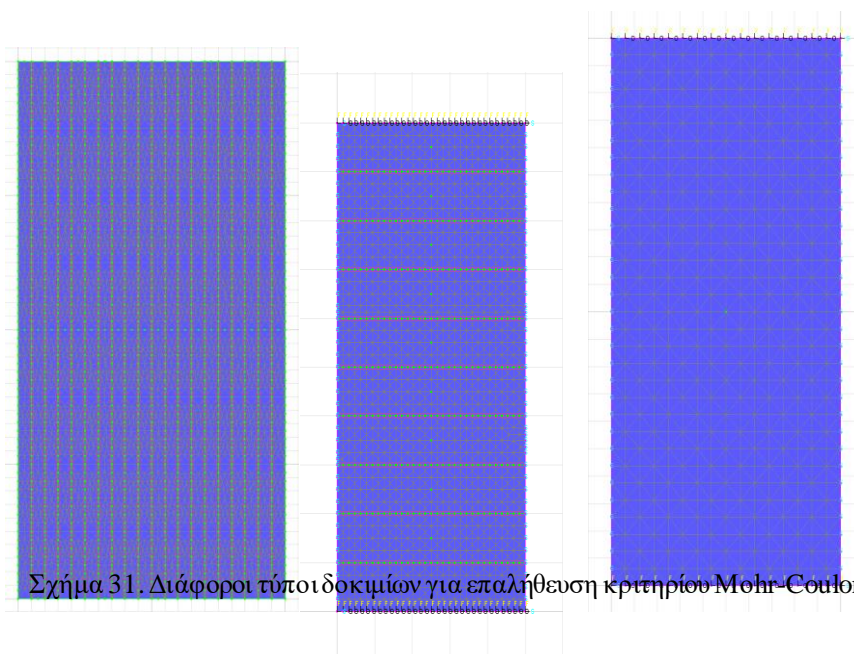
4.2. Δημιουργία δοκιμίων για επαλήθευση κριτηρίου Mohr-Coulomb

Σε αυτό το σημείο, αφού έχει γνωστοποιηθεί η διαδικασία με την οποία δημιουργούνται τα δοκίμια στο UDEC, αναλύονται κάποιες αρχικές δοκιμές προκειμένου να γίνει επαλήθευση του κριτηρίου Mohr-Coulomb. Πρόκειται για κάποια δοκίμια με μόνο άρρηκτο πέτρωμα, μόνο κάθετες και μόνο οριζόντιες ασυνέχειες, με σταθερή απόσταση ίση με 1 μέτρο. Δημιουργήθηκαν τα ανωτέρω δοκίμια για όλες τις διαστάσεις δοκιμών (2.50x5.00, 5x10, 10x20, 20x40 m). Με την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων των παραπάνω μοντέλων διαπιστώνεται πως για όλα τα μοντέλα σε όλες τις διαστάσεις επαληθεύεται το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb άρρηκτου πετρώματος με τη μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε αξονική θλίψη ίση με 55 MPa, όπως και του κριτηρίου. Έτσι, είναι προφανές πως η προσομοίωση εκτιμά σωστά την αντοχή των δοκιμίων και πως η αντοχή των δοκιμίων με μόνο κάθετες ή μόνο οριζόντιες ασυνέχειες δεν διαφέρει από αυτή του κριτηρίου αστοχίας για πέτρωμα με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \sigma_3 + \frac{2S_0 \cos\varphi}{1 - \sin\varphi}$$

- Για $\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$, $\varphi = 42^\circ$, $S_0 = 6.72 \text{ MPa}$

$$\sigma_1 = 55 \text{ MPa}$$



Σχήμα 31. Διάφοροι τύποι δοκιμίων για επαλήθευση κριτηρίου Mohr-Coulomb.

4.3. Δημιουργία δοκιμίων με ασυνέχειες από DFN

Ο δεύτερος τύπος δοκιμίων διαφέρει σημαντικά από τον πρώτο. Ενώ αρχικά δημιουργήθηκαν δοκίμια με συγκεκριμένη κλίση και απόσταση ασυνεχειών, στον δεύτερο τύπο ανάλυσης χρησιμοποιείται το ειδικό εργαλείο του UDEC προκειμένου να κατασκευασθεί ένα DFN. Όπως έχει αναφερθεί πρόκειται για ένα δίκτυο ασυνεχειών με τυχαία γεωμετρικά χαρακτηριστικά που προκύπτουν από μια στατιστική κατανομή. Ακόμα, οι ασυνέχειες οι οποίες είναι σε απόσταση μικρότερη από 0.25 μέτρα και με διαφορά κλίσης μικρότερη από 10° , συγχωνεύονται, προκειμένου να μειωθεί το υπολογιστικό φορτίο της προσομοίωσης, χωρίς ιδιαίτερες επιπτώσεις στα αποτελέσματα. Τα παραπάνω επιτυγχάνονται μέσα από τη γραμμή εντολών του προγράμματος. Οι εντολές που χρησιμοποιούνται προκειμένου να υλοποιηθεί το DFN καθώς και ο συμψηφισμός, είναι οι ακόλουθες:

Πίνακας 2. Εντολές στο UDEC που δημιουργούν τη δομή διακριτών ασυνεχειών και απαλείφουν πολύ κοντινές και παράλληλες ασυνέχειες.

1	<code>model new</code>
2	<code>model random 10000</code>
3	<code>model domain extent -5050</code>
4	<code>;</code>
5	<code>; -- Generate DFN --</code>
6	<code>fracture template create 'dfn_template' size power-law 3 size-limits 220</code>
7	<code>...</code>
8	<code>position uniform orientation uniform</code>
9	<code>;</code>
10	<code>fracture generatedfn 'my_dfn' template 'dfn_template' mass-density 0.5</code>
11	<code>;</code>
12	<code>; merge sub-parallel fractures that are close together</code>
13	<code>fracture combine angle 10 distance 0.2 merge</code>
14	<code>;</code>
15	<code>model save 'dfn'</code>

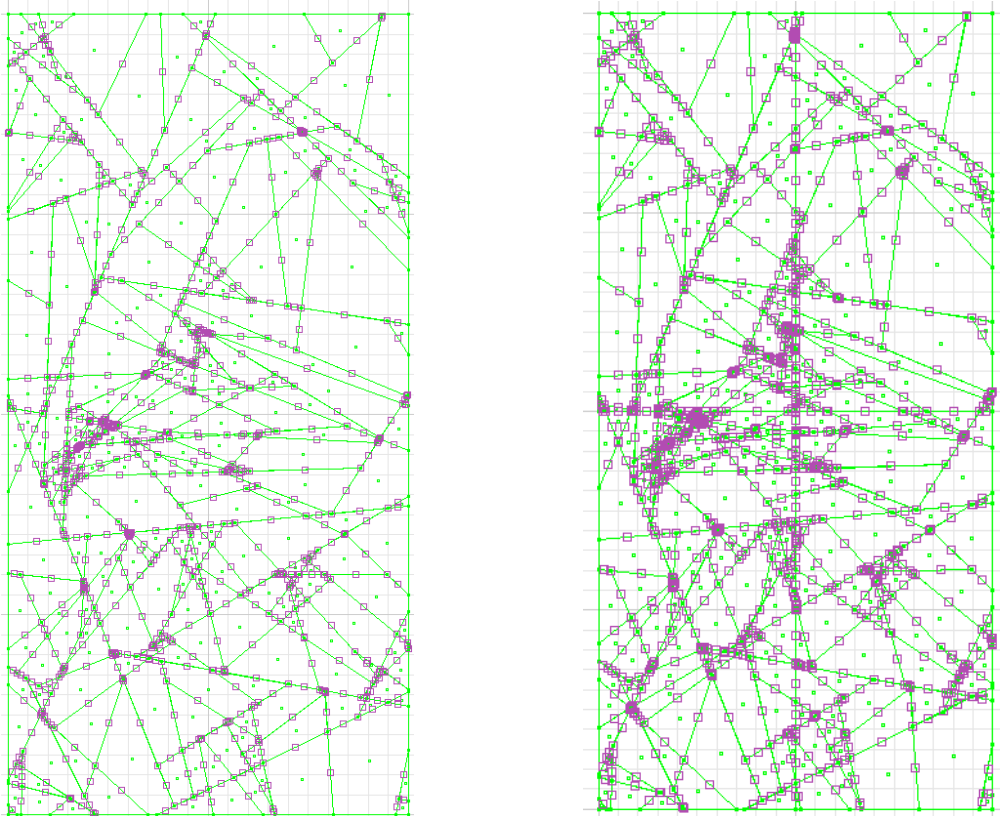
Στη συνέχεια δημιουργείται το αρχικό μπλοκ, δηλαδή, η γεωμετρία του αρχικού δοκιμίου και ορίζονται ως ασυνέχειες του, οι ασυνέχειες τις οποίες περιλαμβάνει το DFN. Πάλι, αυτό επιτυγχάνεται μέσω της γραμμής εντολών και οι εντολές είναι οι ακόλουθες.

Πίνακας 3. Εντολές στο UDEC που δημιουργούν το αρχικό δοκίμιο 20x40 m το οποίο περιλαμβάνει τις ασυνέχειες από το δίκτυο διακριτών ασυνεχειών (DFN).

```

1 ; createblock
2 blockconfig
3 blocktolerancecorner-round-length1E-2
4 blocktoleranceminimum-edge-length2E-2
5 blockcreatepolygon0,00,4020,4020,0
6 ;
7 ; addjointscorrespondingto dfnwith id 1
8 blockcutdfn 'my_dfn'
9 ;

```

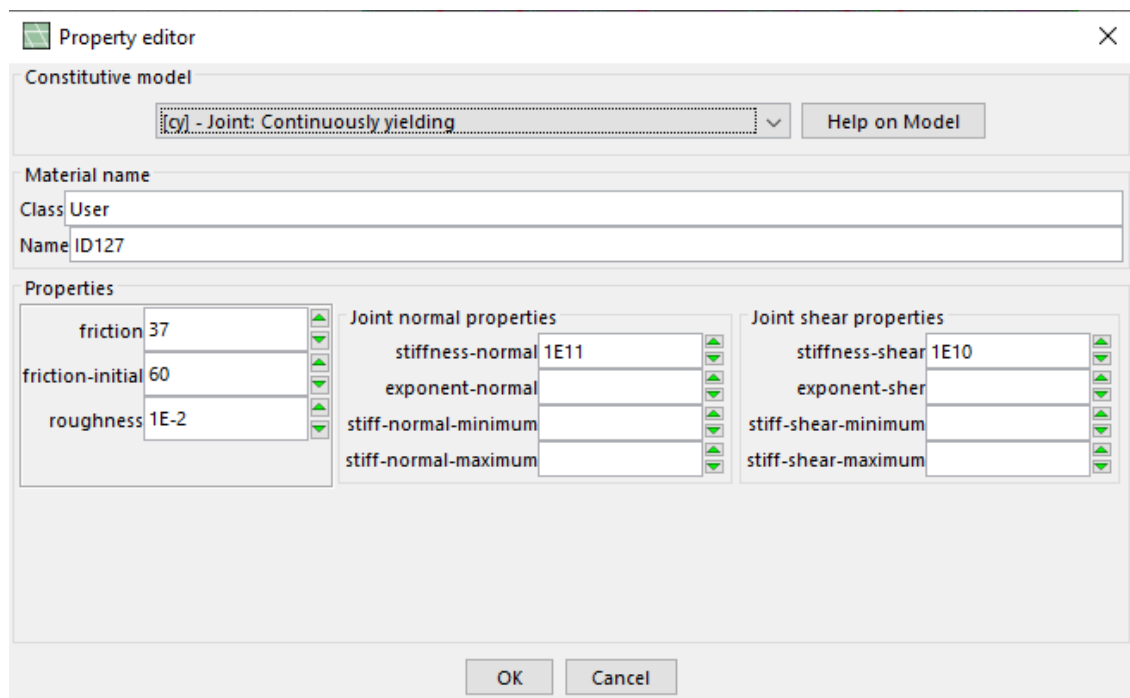


Σχήμα 32. Γεωμετρία δοκιμίου διαστάσεων 20x40m, με ασυνέχειες του DFN, πριν και μετά την οριζόντια και κάθετη τομή.

Έχοντας φτάσει σε αυτό το σημείο, σειρά έχει να γίνει μία οριζόντια και μία κάθετη τομή στο μέσο των πλευρών του δοκιμίου, έτσι ώστε το αρχικό δοκίμιο 20x40m να χωριστεί σε τέσσερα ίσα μικρότερα δοκίμια διαστάσεων 10x20m. Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία για τα μικρότερα δοκίμια, κατασκευάζονται ακόμα 16 δοκίμια διαστάσεων 5x10m.

Αφού τα 16 δοκίμια διαστάσεων 5x10m αναλυθούν και ληφθούν τα αποτελέσματα που αφορούν τη μέγιστη αντοχή, επιλέγονται τρία από αυτά. Το δοκίμιο με τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση αντοχή από τα 16 συνολικά. Τα επιλεγμένα τρία δοκίμια χωρίζονται και αυτά σε συνολικά 12 δοκίμια διαστάσεων 2.5x5.0m. Ξανά, μετά την ανάλυσή τους, επιλέγονται τρία από τα 12 νεότερα με τα ίδια κριτήρια αντοχής και δημιουργούνται 12 τελευταία δοκίμια 1.25x2.50m.

Τέλος, ακολουθείται η ίδια διαδικασία όπως αυτή στον πρώτο τύπο δοκιμών προκειμένου να γίνει η διακριτοποίηση, να δοθούν ιδιότητες στο υλικό του πετρώματος και των ασυνεχειών, καθώς και να γίνει η καταγραφή των τιμών της κατακόρυφης τάσης και της τροπής του δοκιμίου. Οι τιμές των ιδιοτήτων παραμένουν ίδιες με τον πρώτο τύπο δοκιμής, η μόνη διαφοροποίηση, ότι για τις ασυνέχειες χρησιμοποιείται διαφορετικό κριτήριο συμπεριφοράς, αυτό του continuouslyyielding, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Έτσι, όλα τα δοκίμια είναι έτοιμα πλέον για ανάλυση.



Σχήμα 33. Ιδιότητες ασυνεχειών για το δεύτερο τύπο δοκιμών, DFN.

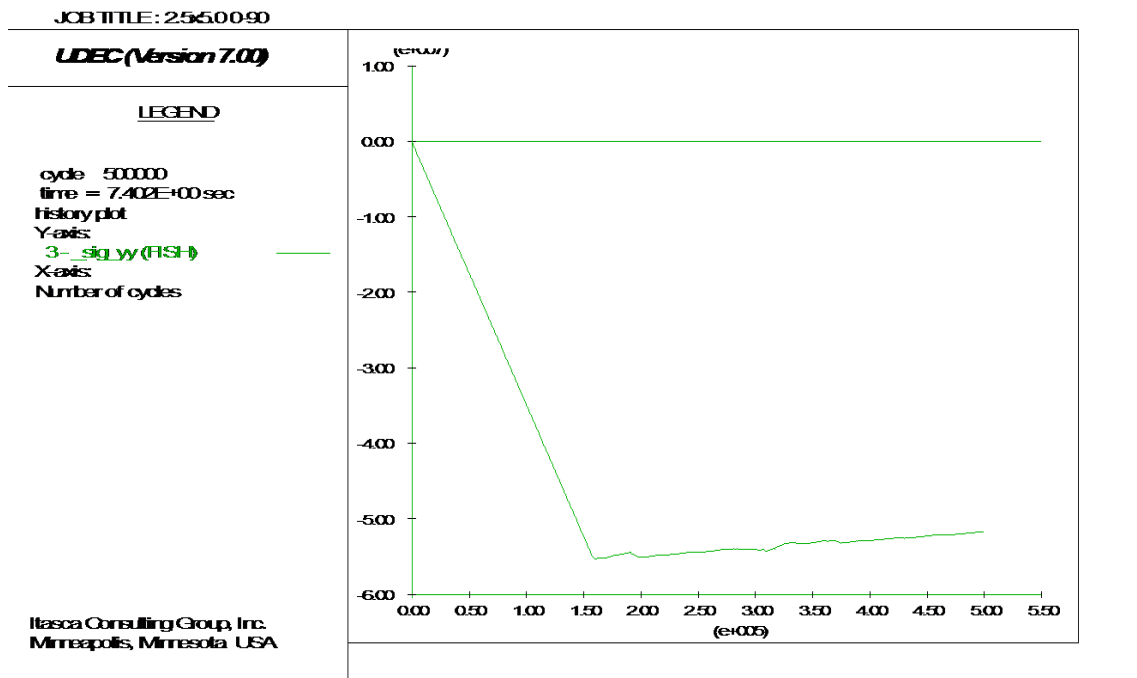
5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα για όλα τα δοκίμια. Τα αποτελέσματα κατηγοριοποιούνται ανά τύπο δοκιμής και διαστάσεις δοκιμίων σε υποκεφάλαια. Για κάθε δοκίμιο, μετά το τέλος της προσομοίωσης, σαν αποτέλεσμα λαμβάνεται ένα διάγραμμα αξονικής θλίψης-υπολογιστικών βημάτων και μια εικόνα του δοκιμίου με τους τύπους αστοχίας που συμβαίνουν στο δοκίμιο. Οι προσομοιώσεις διαρκούν για ένα μεγάλο αριθμό υπολογιστικών βημάτων, (από 700.000 έως 1.700.000, ανάλογα το μέγεθος του δοκιμίου) και κάθε φορά και σταματούν λίγο πριν τα δοκίμια έρθουν σε οριακή κατάσταση και το πρόγραμμα δεν μπορεί να συνεχίσει την προσομοίωση. Έτσι με το συνδυασμό των παραπάνω, βεβαιώνεται, πως τα αποτελέσματα είναι αντιπροσωπευτικά και πως με το πέρας της δοκιμής έχει προηγηθεί η καταγραφή της μέγιστης αντοχής των δοκιμίων.

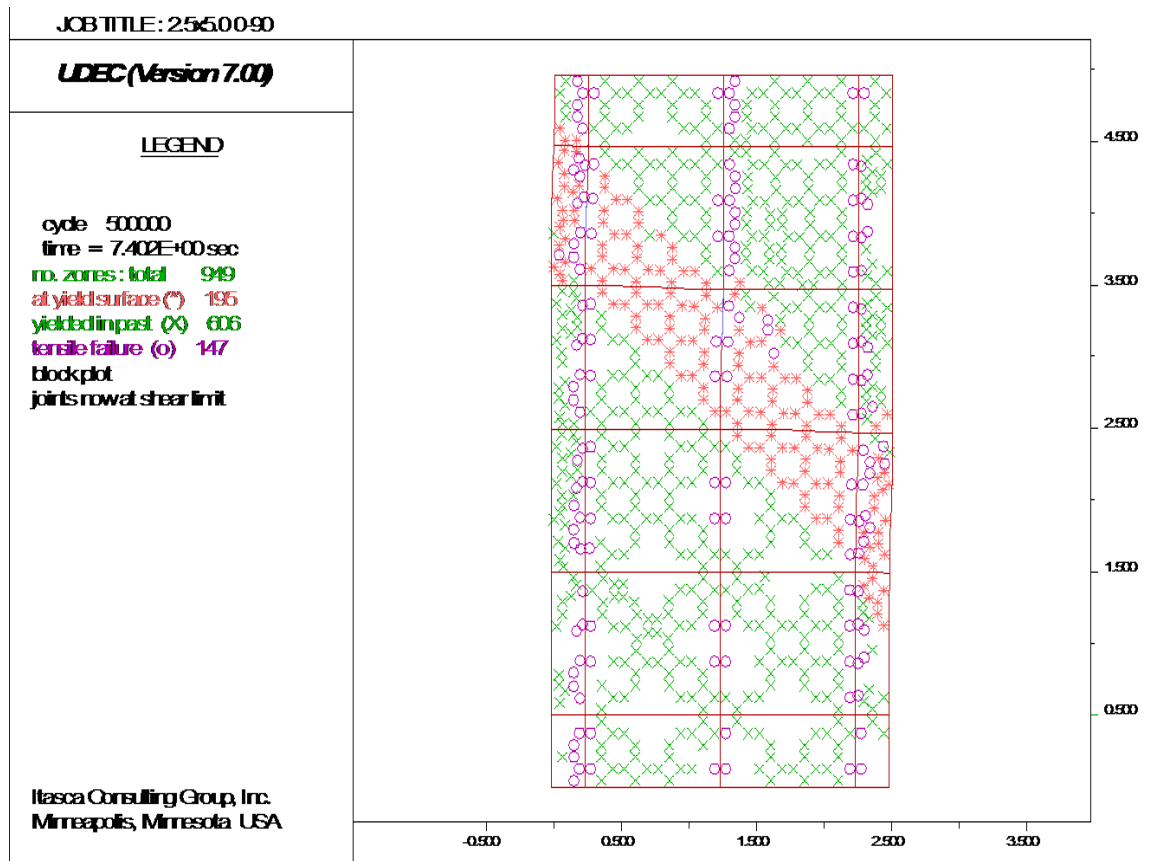
5.1. Αποτελέσματα για τον πρώτο τύπο δοκιμίων – οικογένειες κάθετων ασυνεχειών

Πρόκειται για τα αποτελέσματα των 12 δοκιμίων που υπάγονται στον πρώτο τύπο δοκιμών. Τα αποτελέσματα για αυτό το κεφάλαιο θα παρατίθενται σε εικόνες με διαγράμματα για τις τρεις οικογένειες ασυνεχειών κλίσεων: 0-90, 30-120, 45-135.

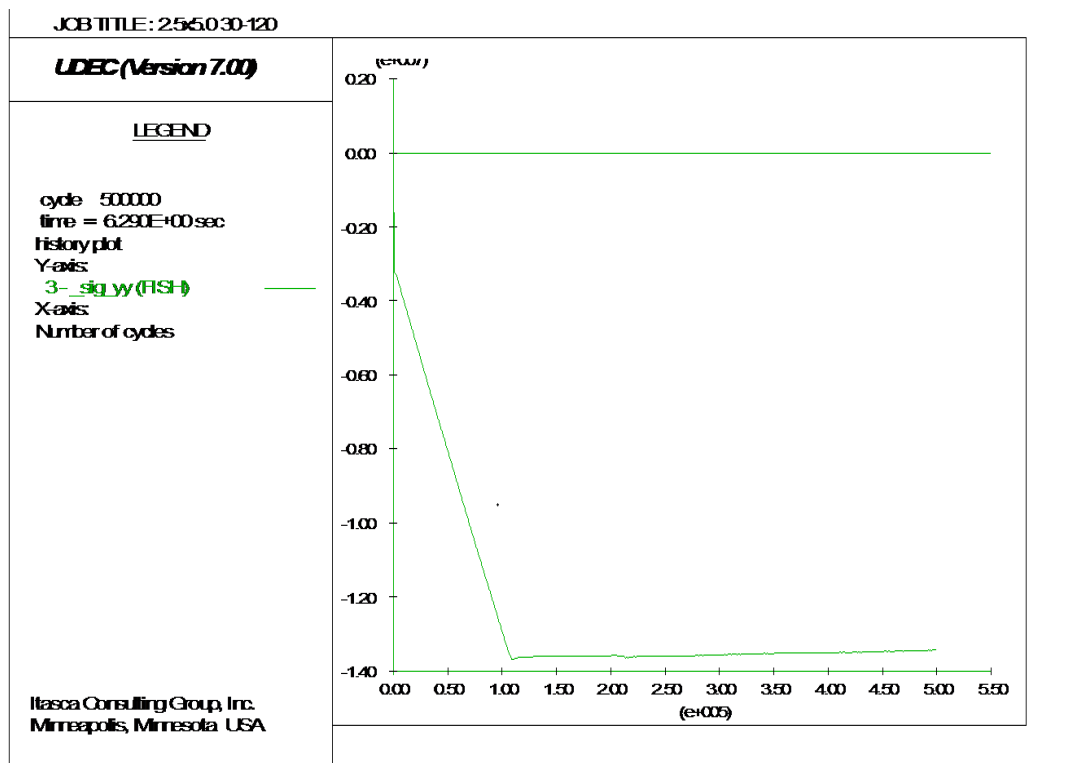
5.1.1. Αποτελέσματα δοκιμών διαστάσεων 2.5x5.0 m



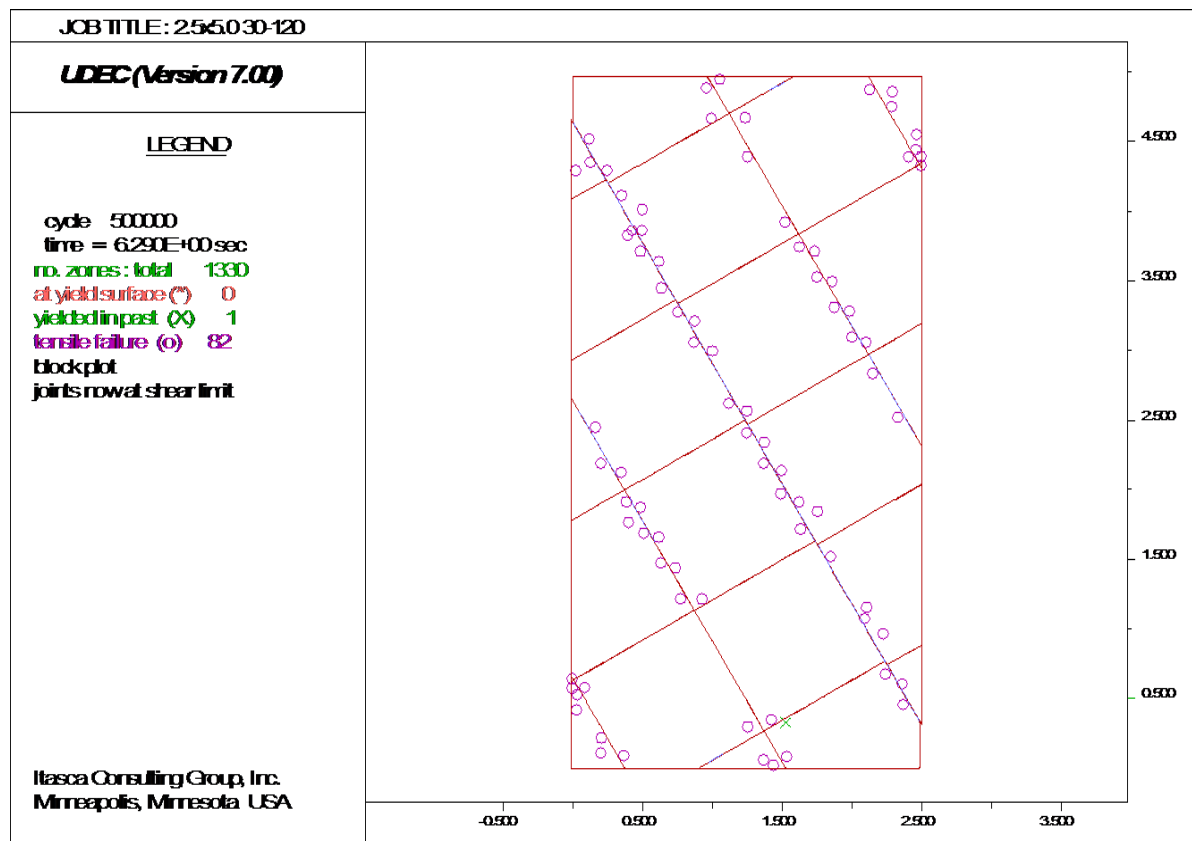
Διάγραμμα 1. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 2.5x5m με ασυνέχειες με κλίση 0-90. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 55Μρα.



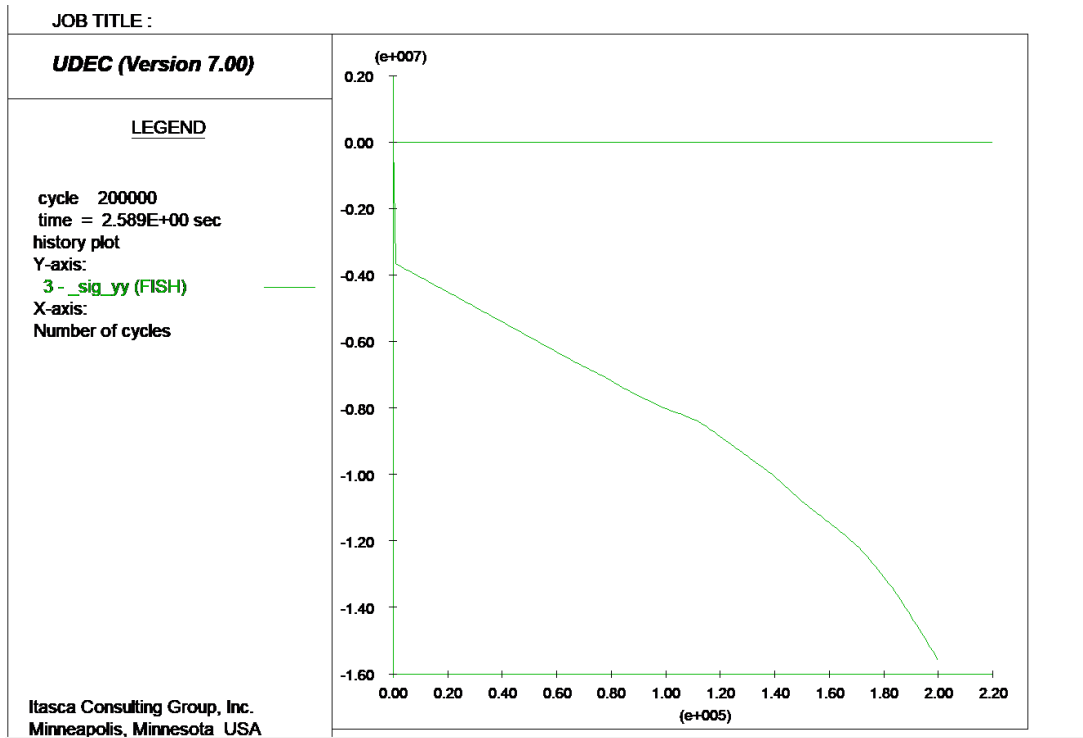
Σχήμα 34. Απεικόνιση δοκιμίου διαστάσεων 2.5x5m με ασυνέχειες με κλίση 0-90 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος και η διατμητική αστοχία των ασυνεχειών.



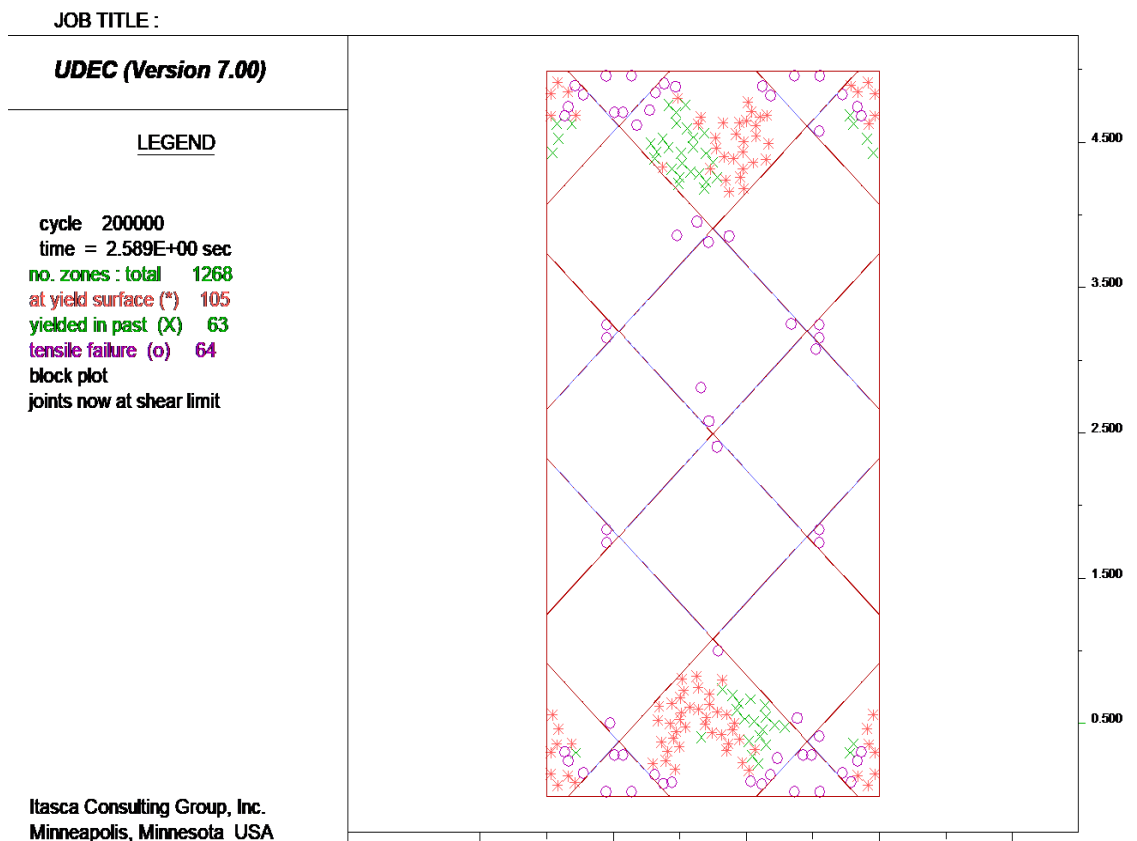
Διάγραμμα 2. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 2.5x5m με ασυνέχειες με κλίση 30-120. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 13.8Μpa.



Σχήμα 35. Απεικόνιση δοκίμιου διαστάσεων 2.5x5m με ασυνέχειες με κλίση 30-120 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.

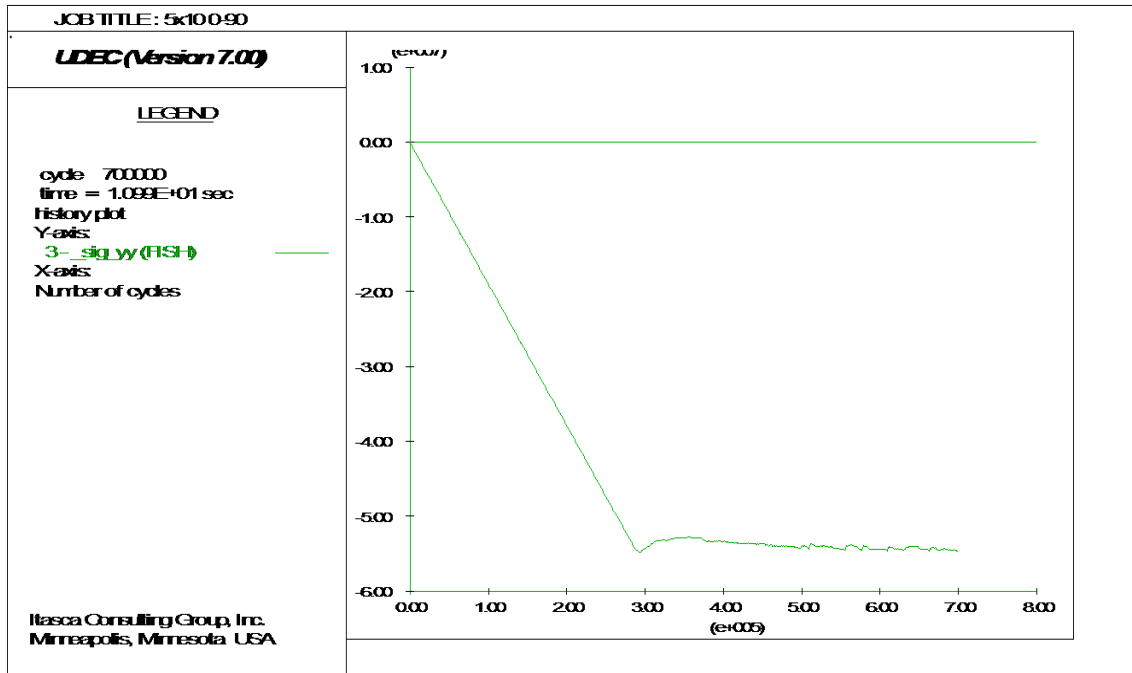


Διάγραμμα 3. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 2.5x5m με ασυνέχειες με κλίση 45-135. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 10.5 Mpa.

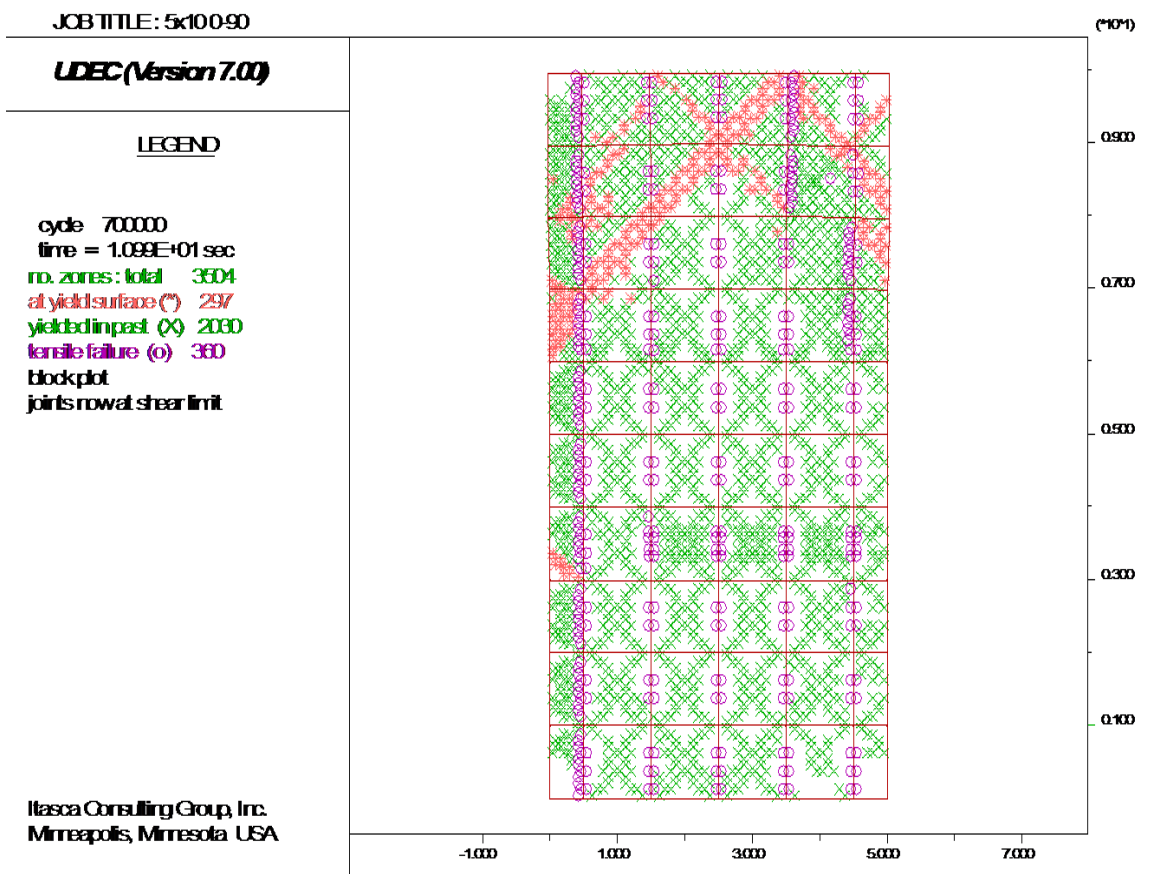


Σχήμα 36. Απεικόνιση δοκίμιου διαστάσεων 2.5x5m με ασυνέχειες με κλίση 45-135 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών καθώς και μερική πλαστική παραμόρφωση.

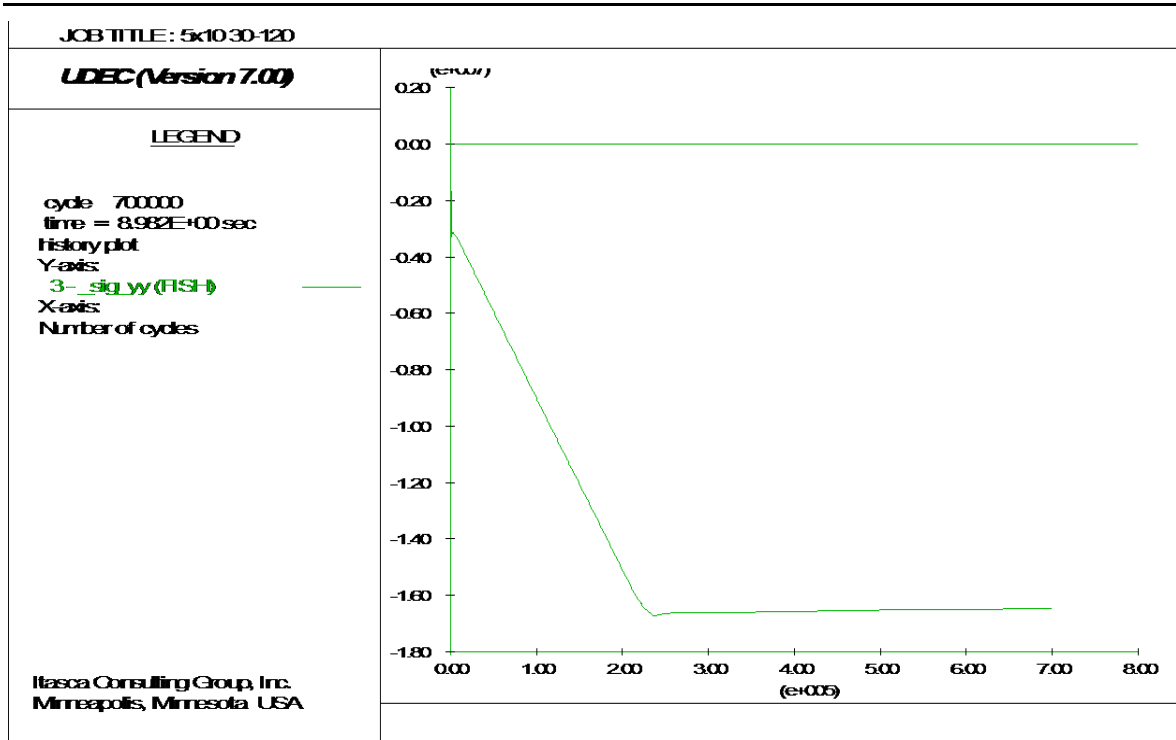
5.1.2. Αποτελέσματα δοκιμών διαστάσεων 5x10 m



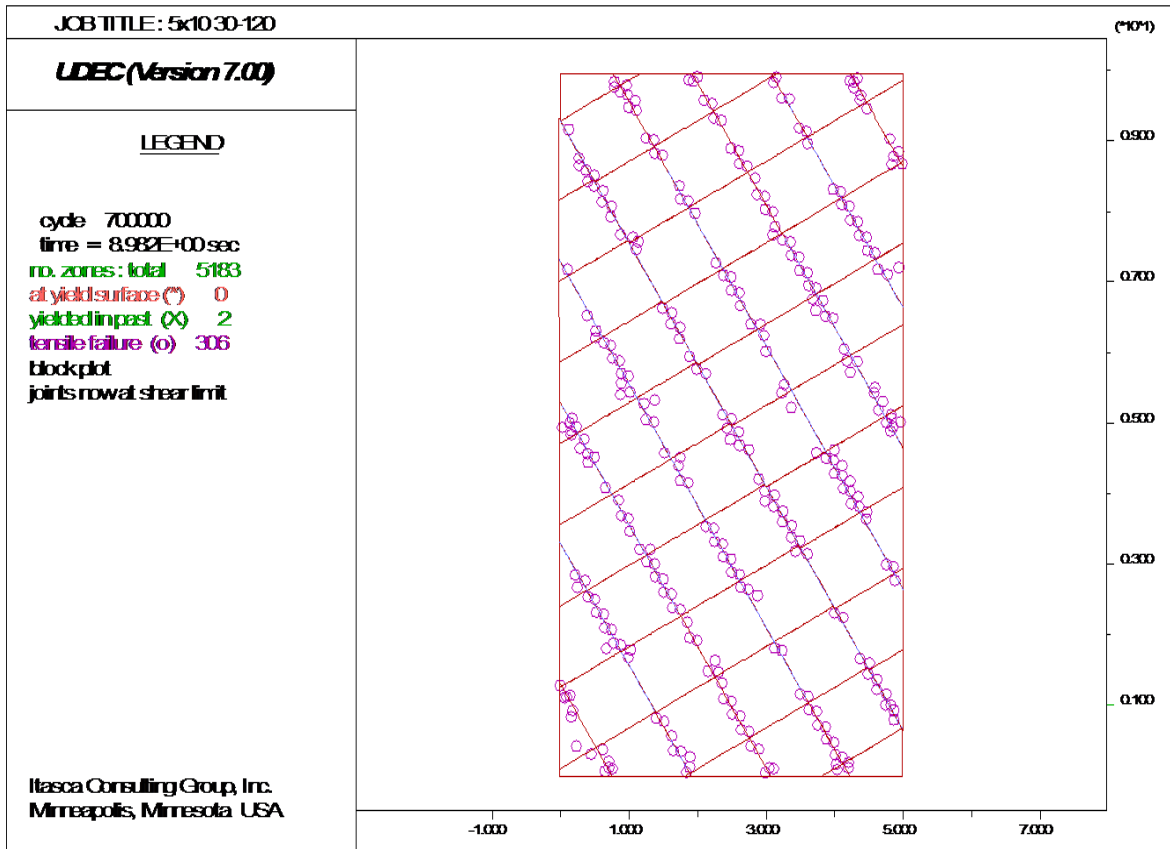
Διάγραμμα 4. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες με κλίση 0-90. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 55Μρα.



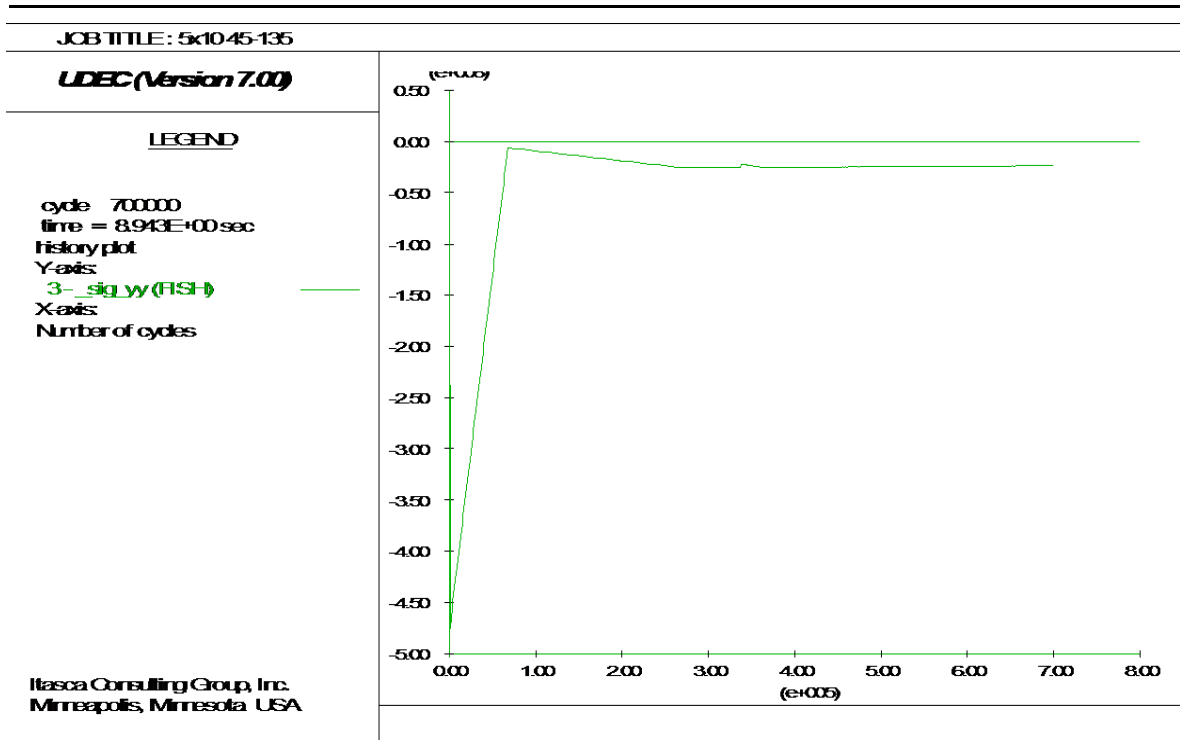
Σχήμα 37. Απεικόνιση δοκιμίου διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες με κλίση 0-90 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος και η διατμητική αστοχία των ασυνεχειών.



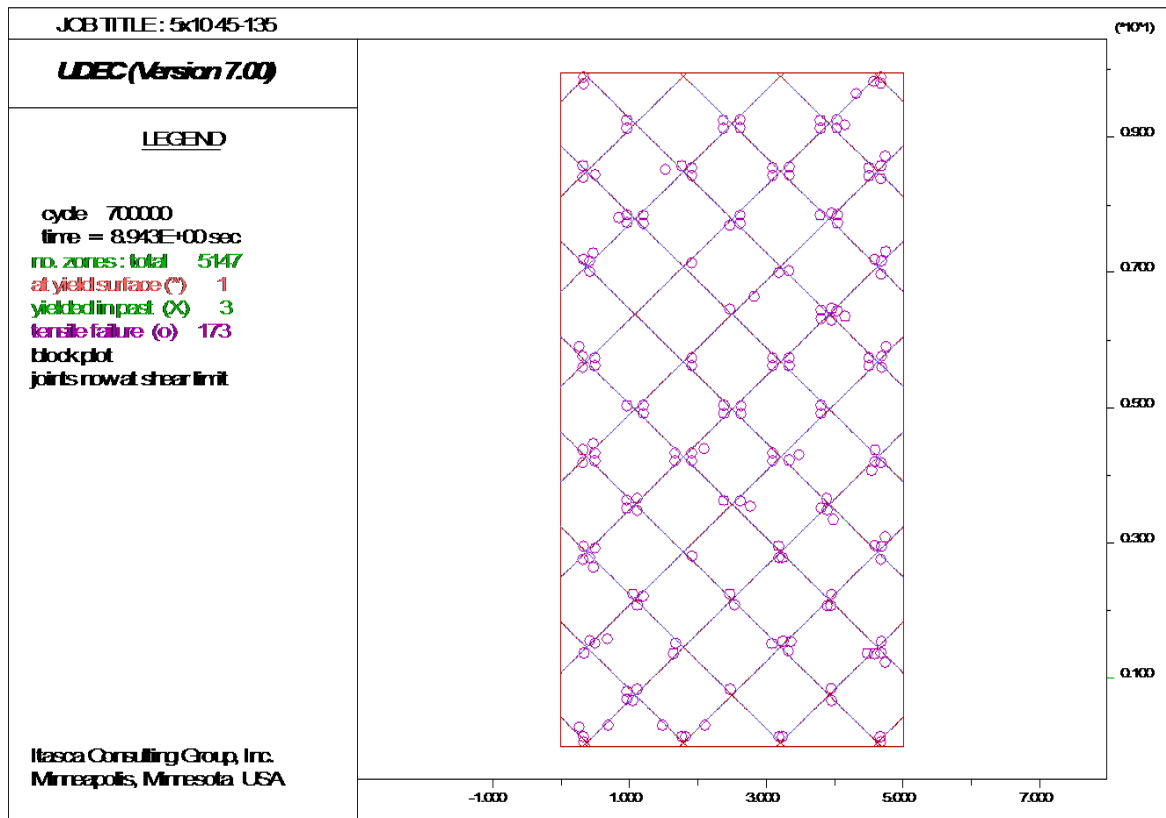
Διάγραμμα 5. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες με κλίση 30-120. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 16.7Μpa.



Σχήμα 38. Απεικόνιση δοκίμιου διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες με κλίση 30-120 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.

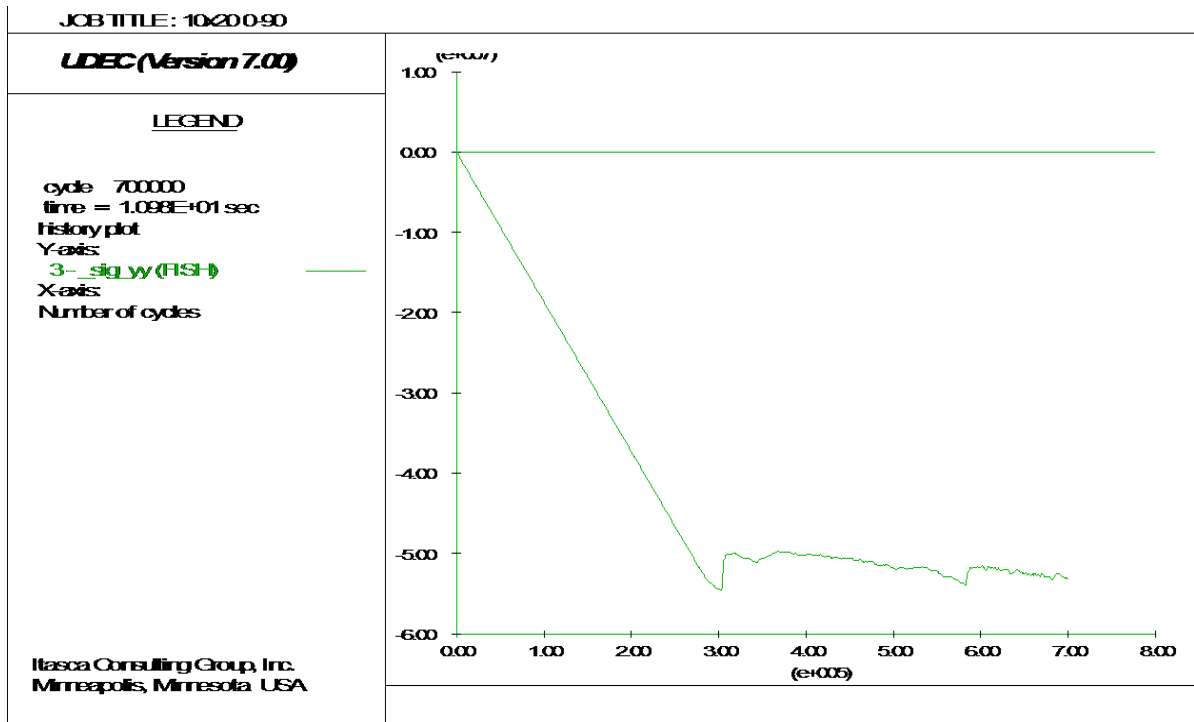


Διάγραμμα 6. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες με κλίση 45-135. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 4.8Μpa.

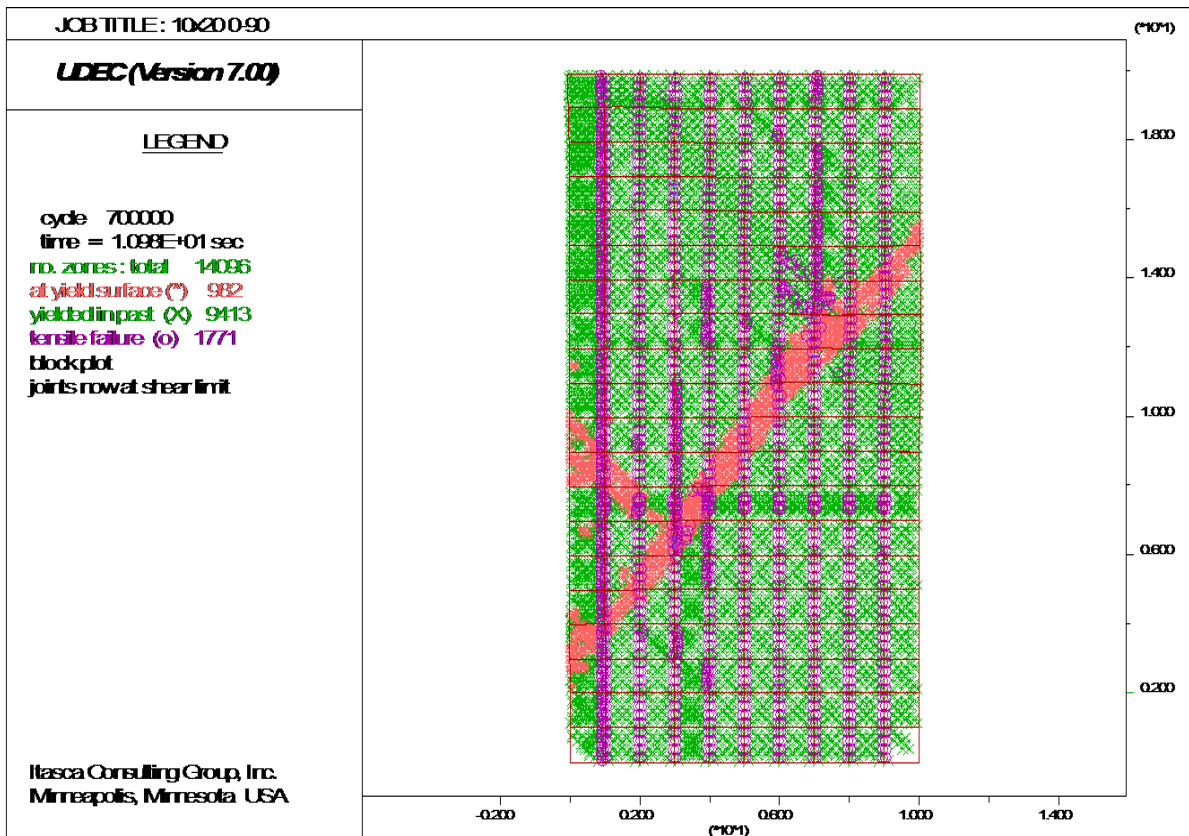


Σχήμα 39. Απεικόνιση δοκίμιου διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες με κλίση 45-135 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.

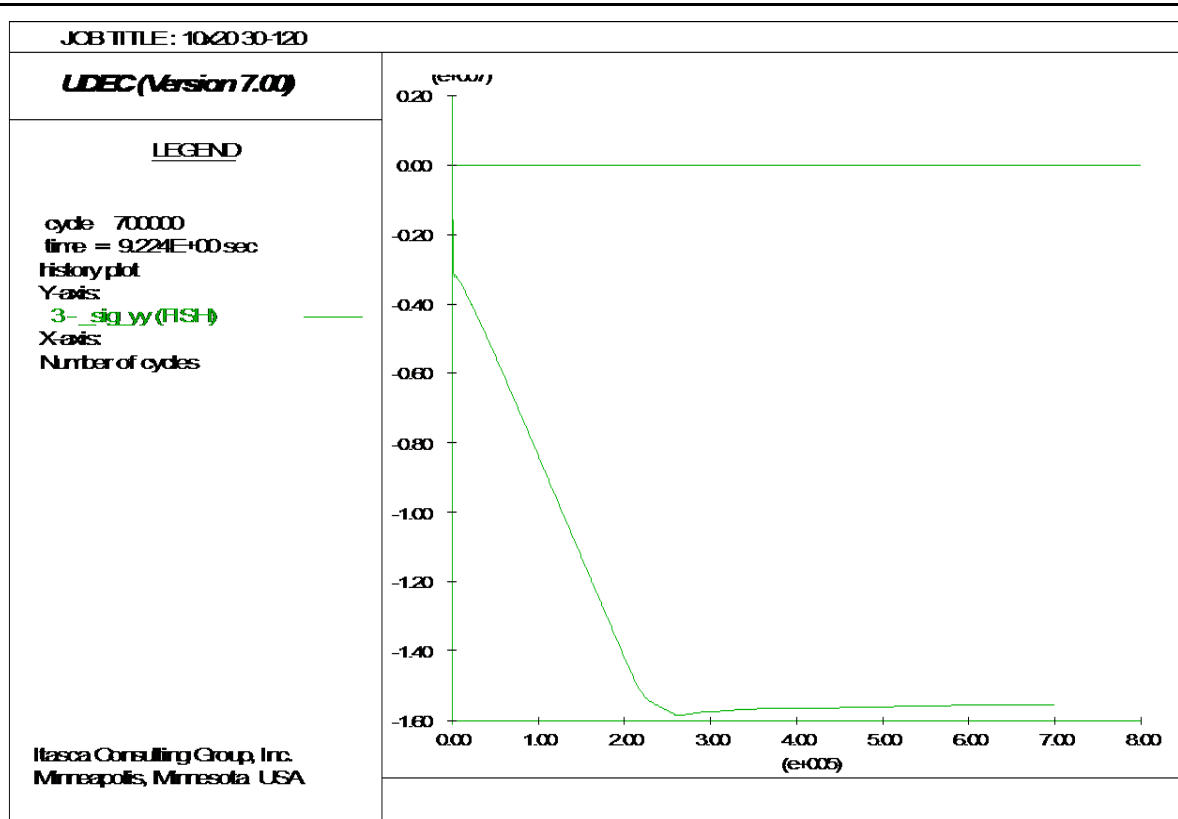
5.1.3. Αποτελέσματα δοκιμών διαστάσεων 10x20 m



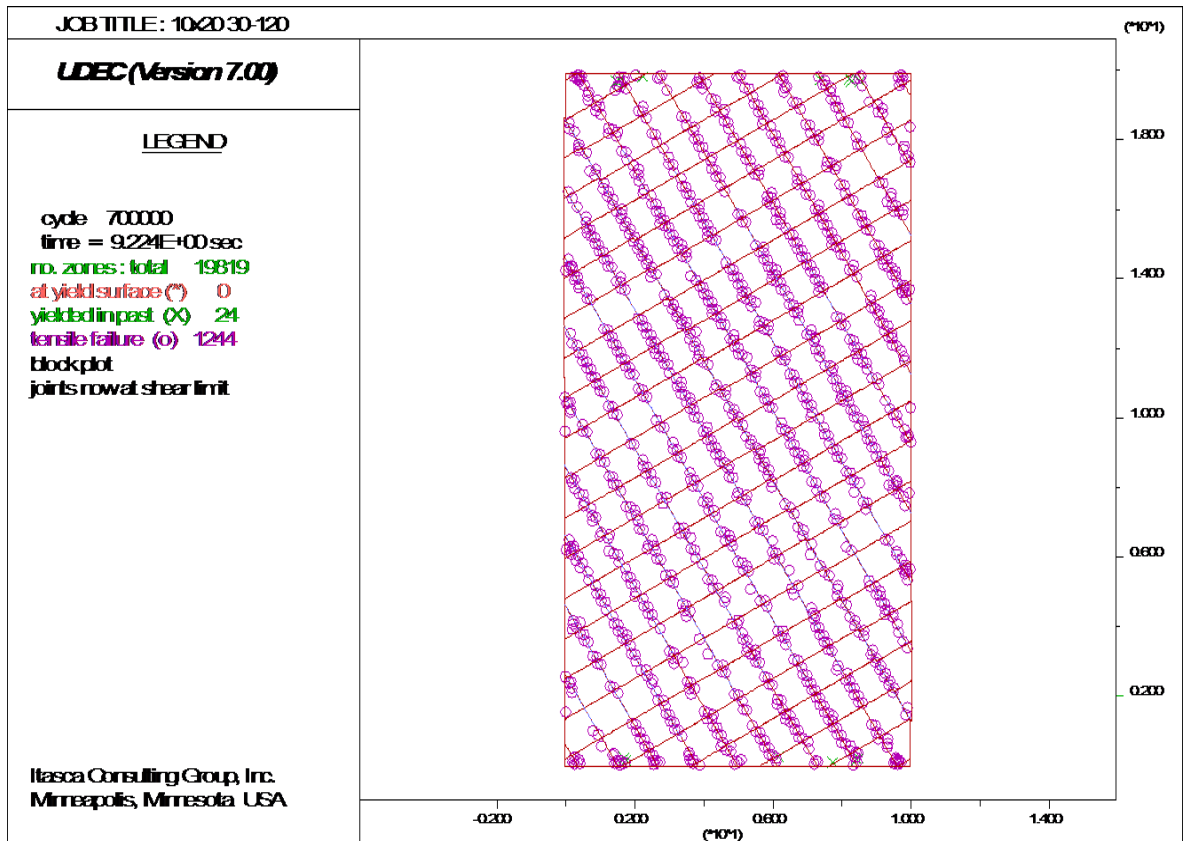
Διάγραμμα 7. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες με κλίση 0-90. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 55Μρα.



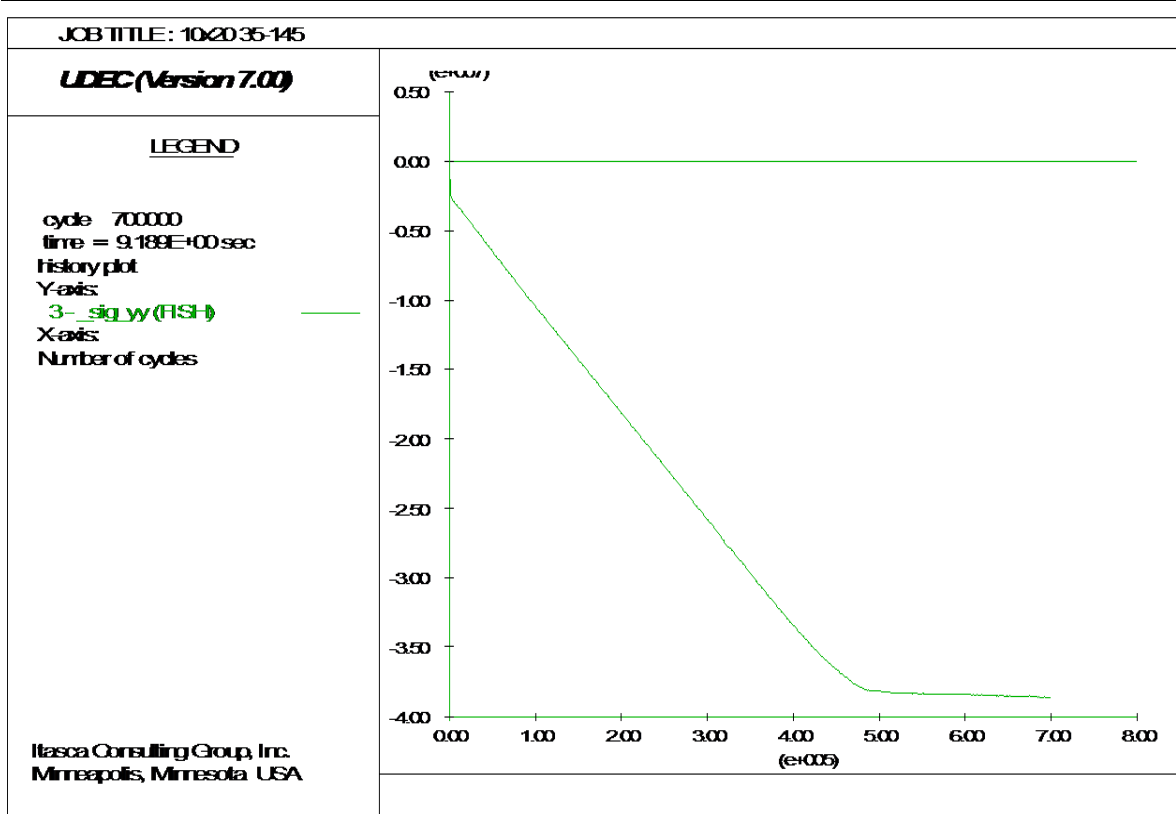
Σχήμα 40. Απεικόνιση δοκιμίου διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες με κλίση 0-90 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.



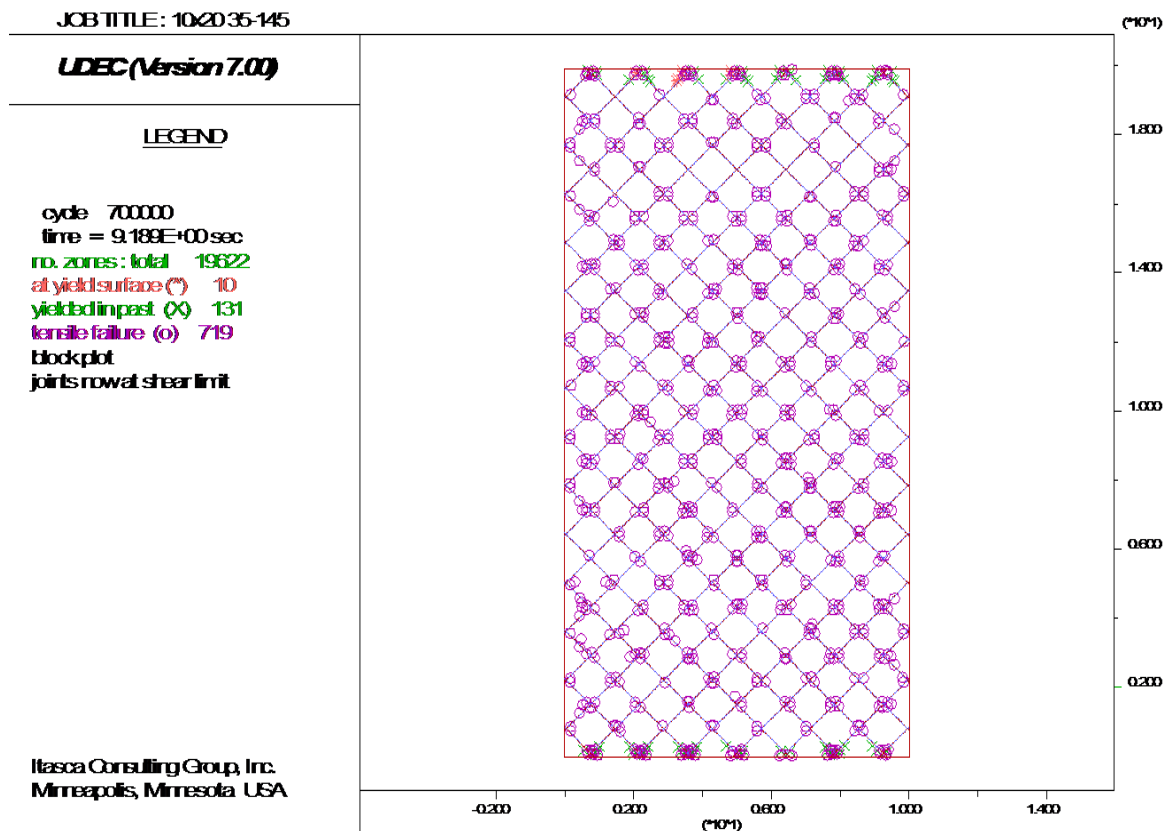
Διάγραμμα 8. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες με κλίση 30-120. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 15.9 Μpa.



Σχήμα 41. Απεικόνιση δοκιμίου διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες με κλίση 30-120 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.

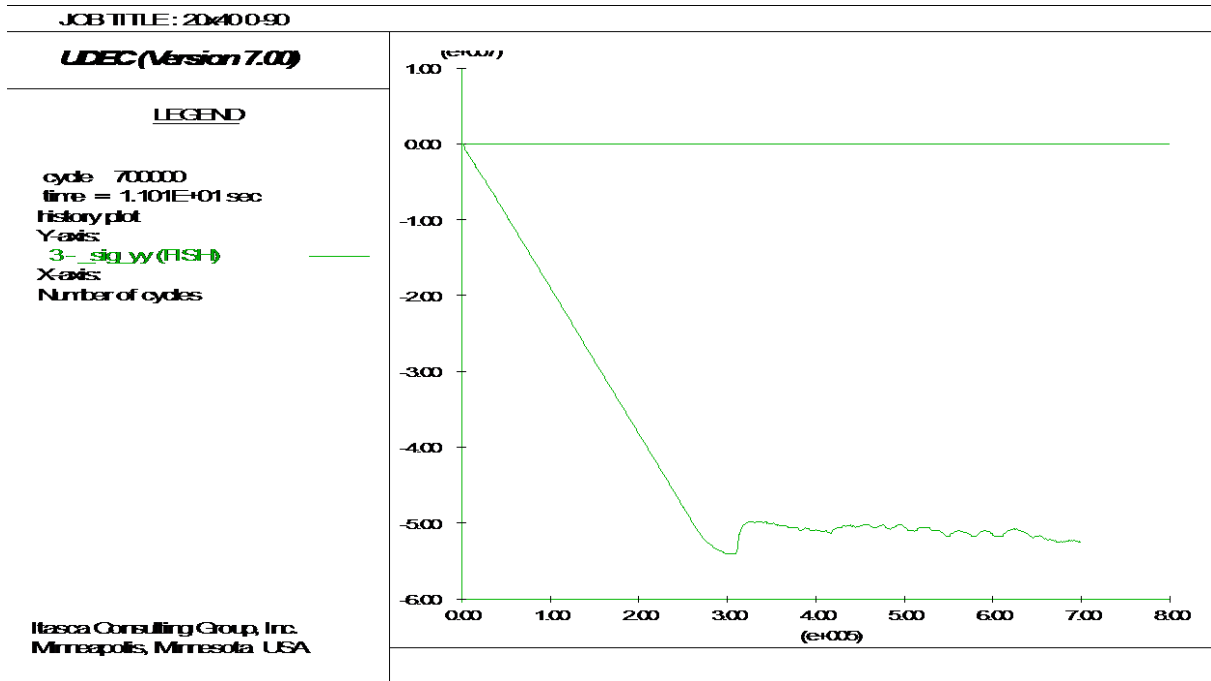


Διάγραμμα 9. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες με κλίση 45-135. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 37Μρα.

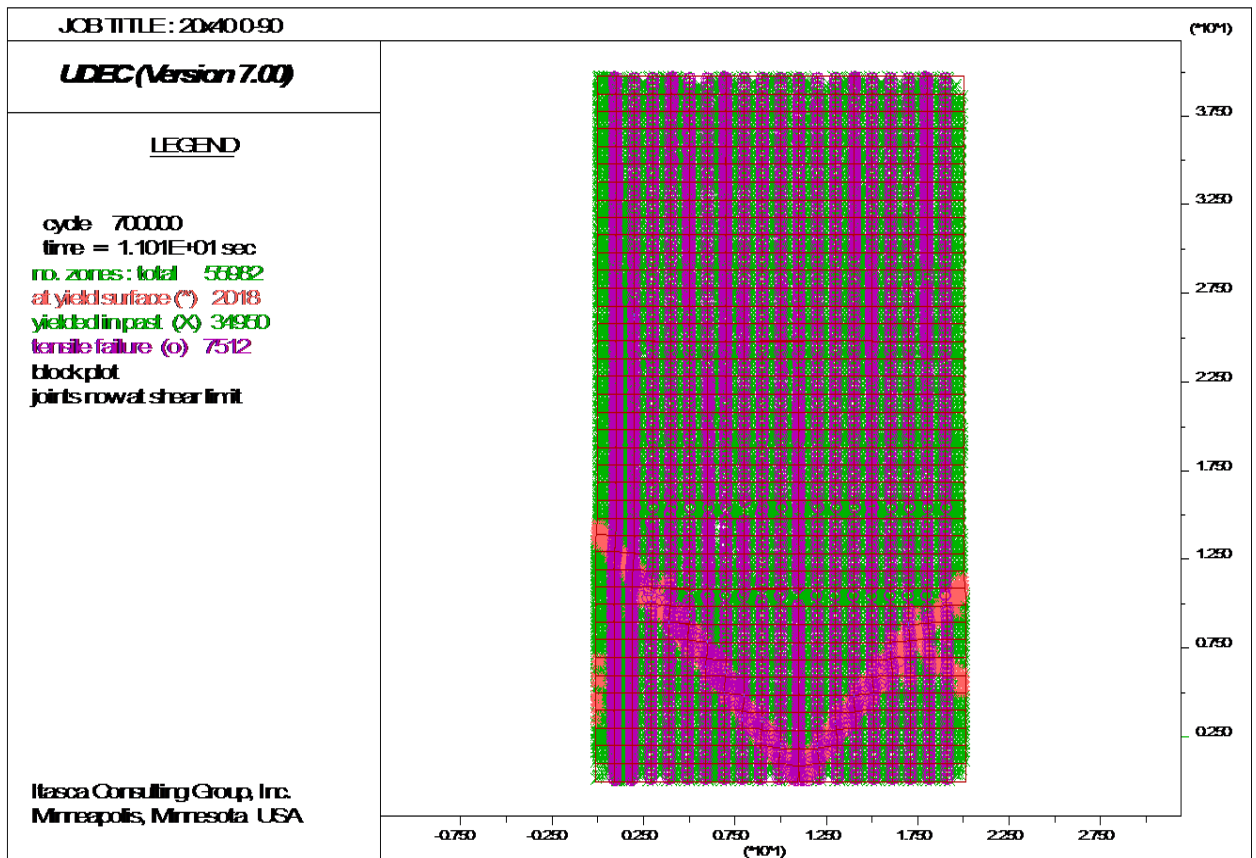


Σχήμα 42. Απεικόνιση δοκίμιου διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες με κλίση 45-135 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.

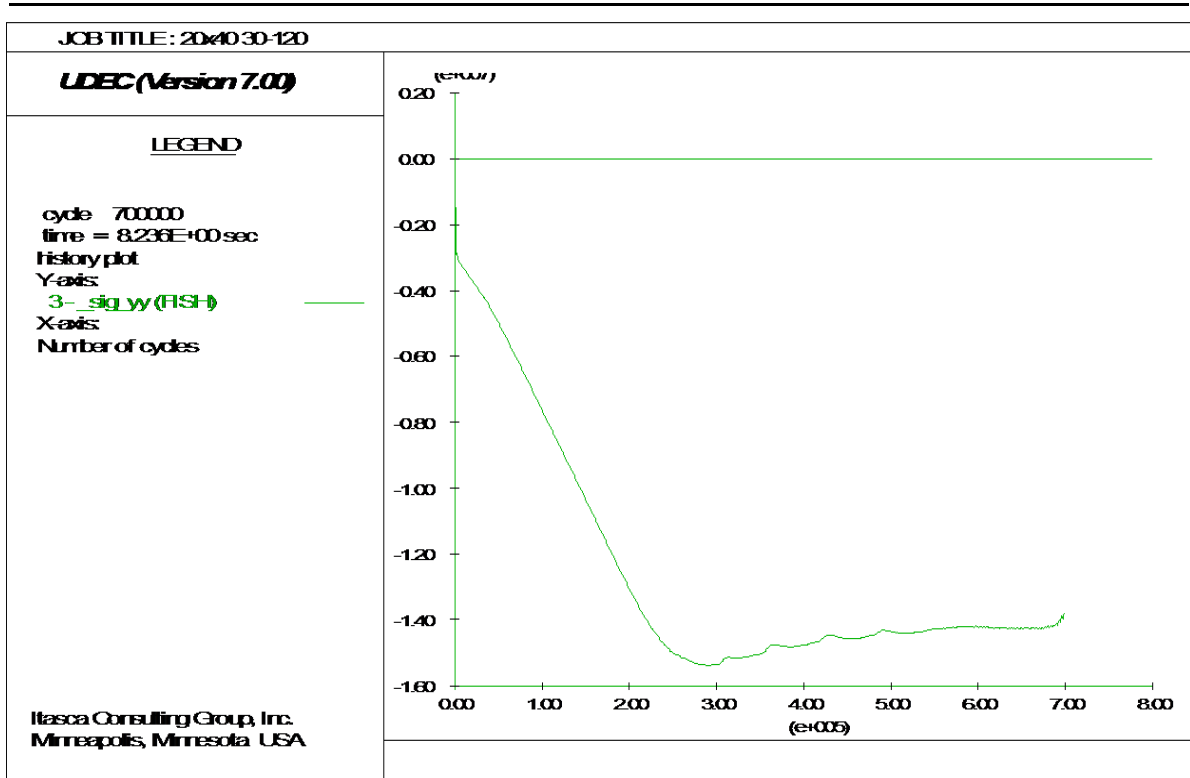
5.1.4. Αποτελέσματα δοκιμών διαστάσεων 20x40 m



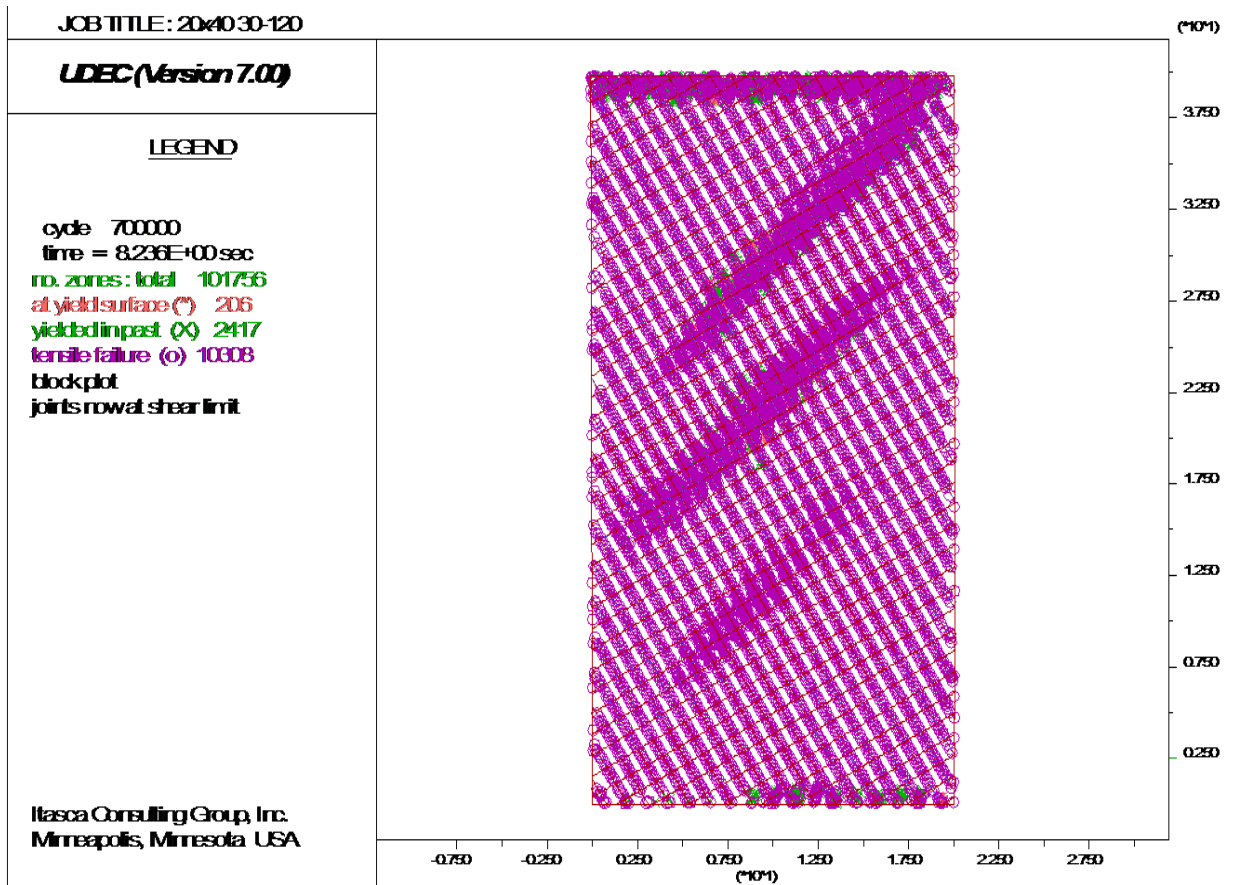
Διάγραμμα 10. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες με κλίση 0-90. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 55Μpa.



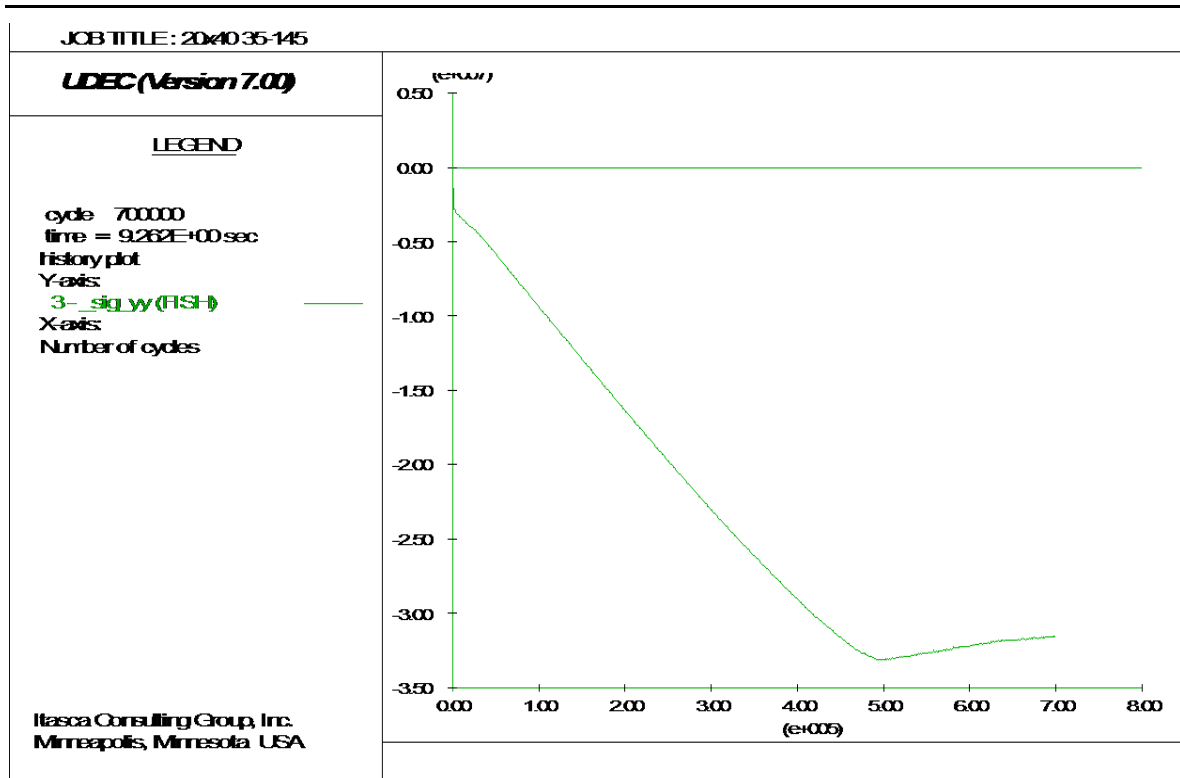
Σχήμα 43. Απεικόνιση δοκιμίου διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες με κλίση 0-90 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστογία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.



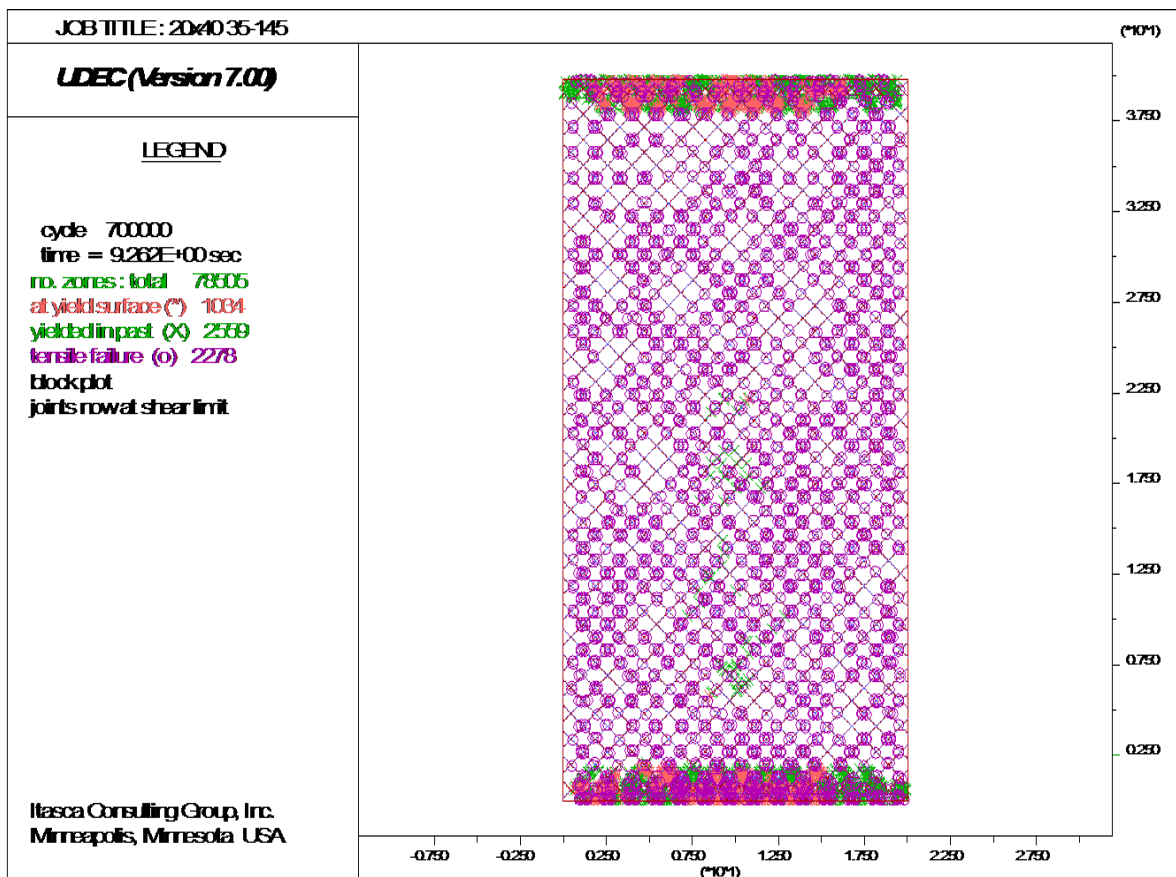
Διάγραμμα 11. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες με κλίση 30-120. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 15.3Μpa.



Σχήμα 44. Απεικόνιση δοκίμιου διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες με κλίση 30-120 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



Διάγραμμα 12. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες με κλίση 14-135. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 32Μpa.



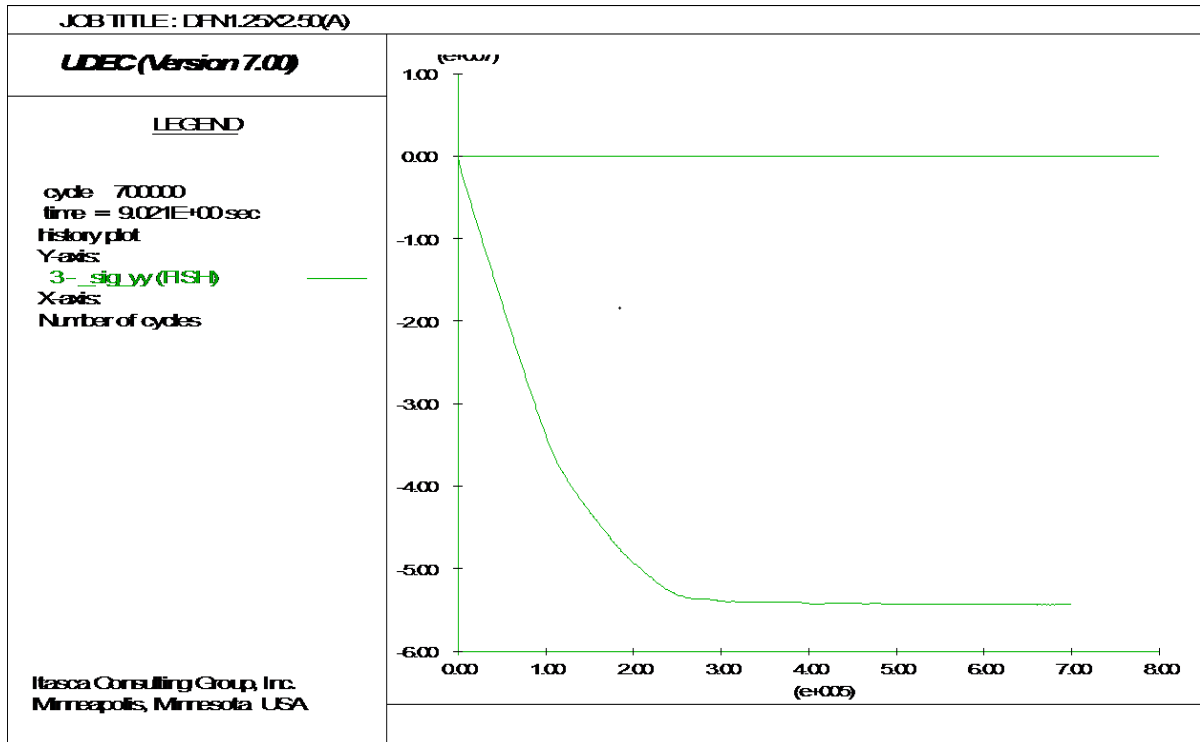
Σχήμα 45. Απεικόνιση δοκίμιου διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες με κλίση 45-135 μετά τη δοκιμή. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών, καθώς και η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.

5.2. Αποτελέσματα για τον δεύτερο τύπο δοκιμίων – ασυνέχειες από DFN

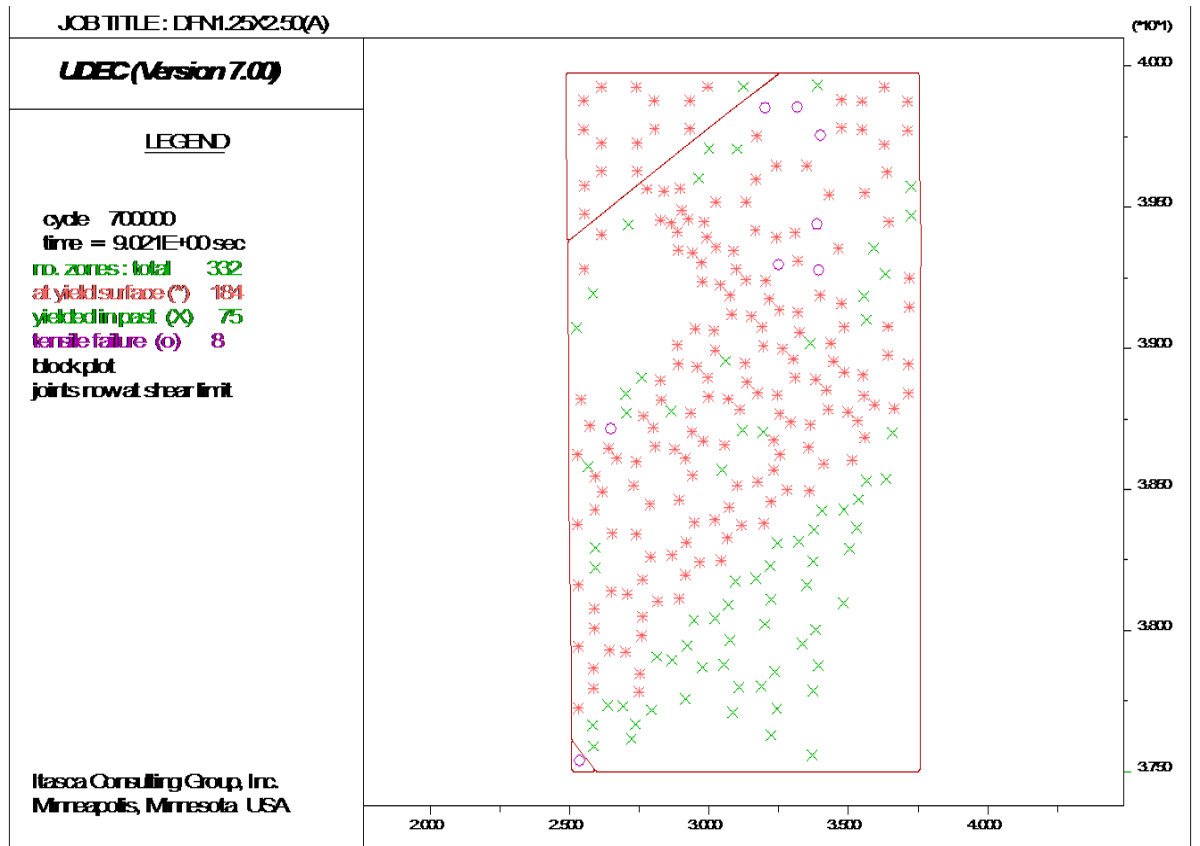
Αυτό το υποκεφάλαιο αφορά τα συνολικά 48 αριθμητικά δοκίμια που δημιουργήθηκαν αποτελούμενα τη δομή ασυνεχειών DFN. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για αυτά τα δοκίμια κατηγοριοποιούνται με βάση το μέγεθος τους.

Ξανά, παρατίθεται υπό τη μορφή εικόνων ένα διάγραμμα κάθετης τάσης- υπολογιστικών βημάτων και μία εικόνα που δηλώνει τη μορφή της αστοχίας που συνέβη για κάθε δοκίμιο. Τα δοκίμια είναι αριθμημένα αλφαβητικά, με ένα γράμμα της αγγλικής αλφαβήτου, σε κάθε κατηγορία διαστάσεων.

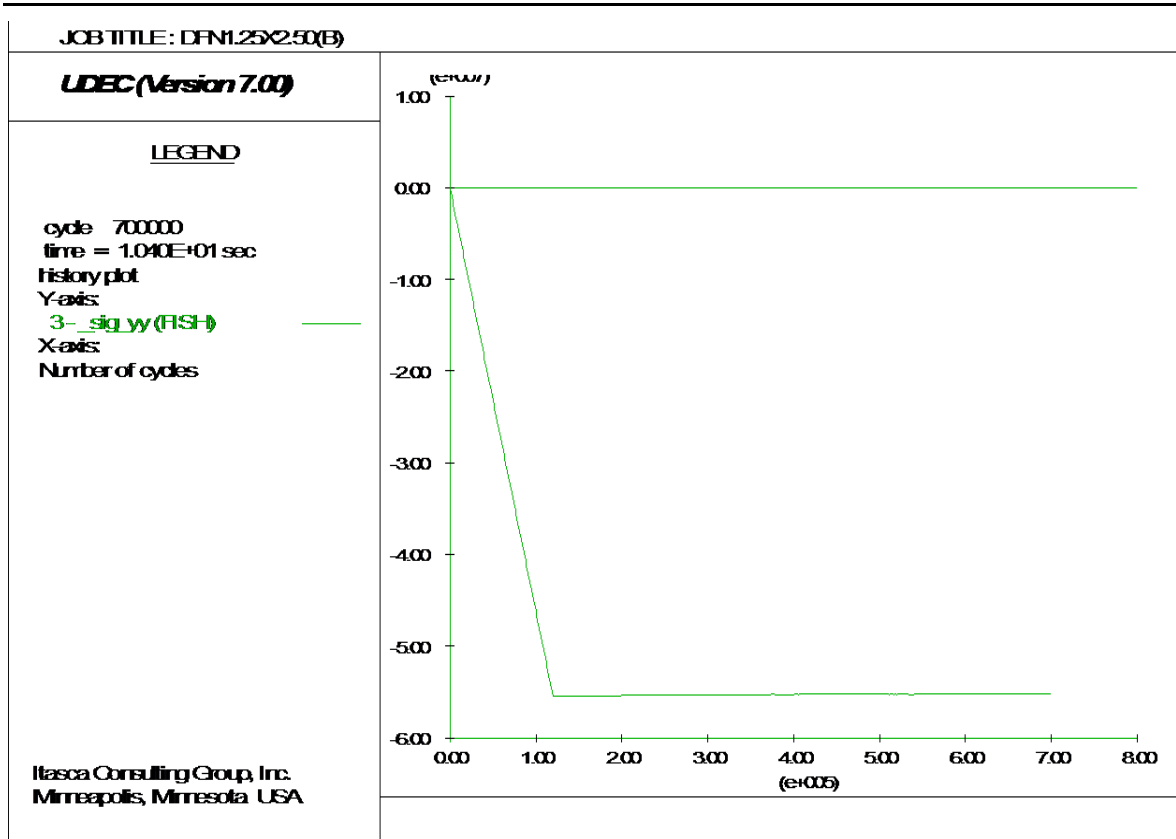
5.2.1. Αποτελέσματα για τα δοκίμια διαστάσεων 1.25x2.50 m



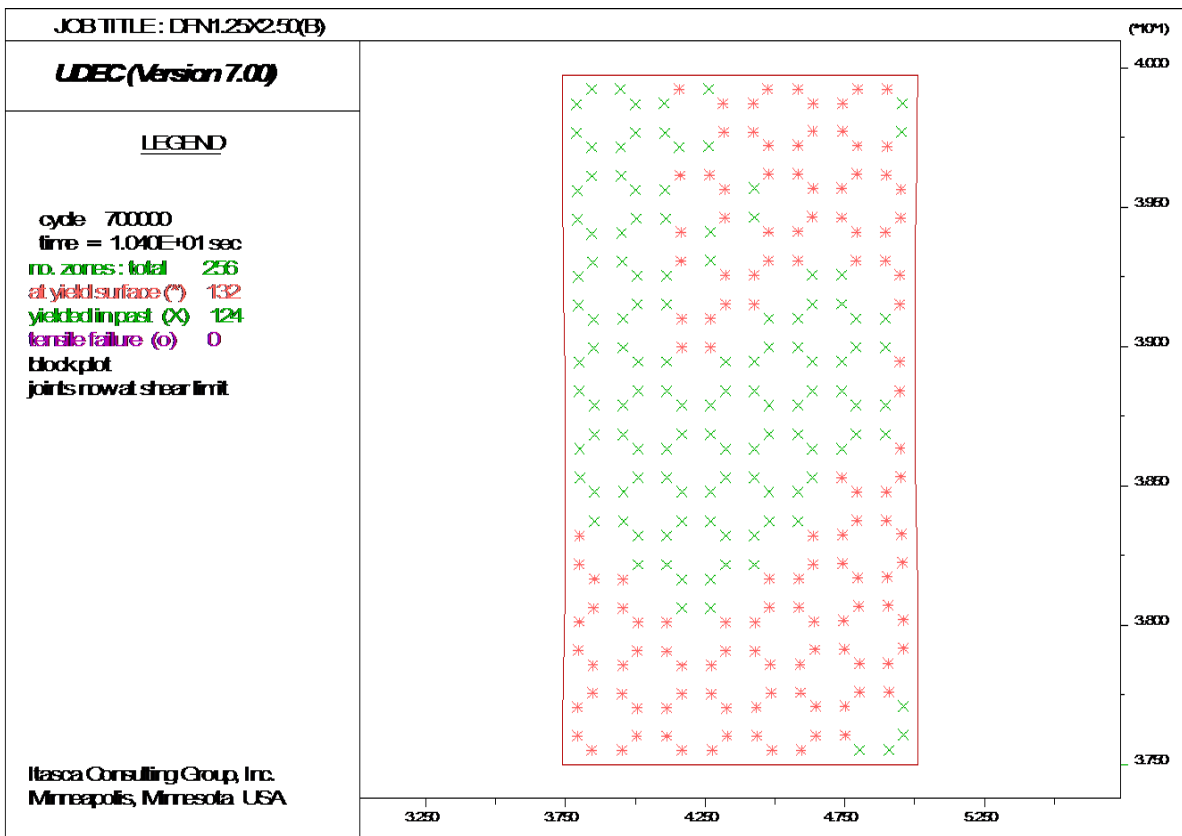
Διάγραμμα 13. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (Α) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 55Μρα.



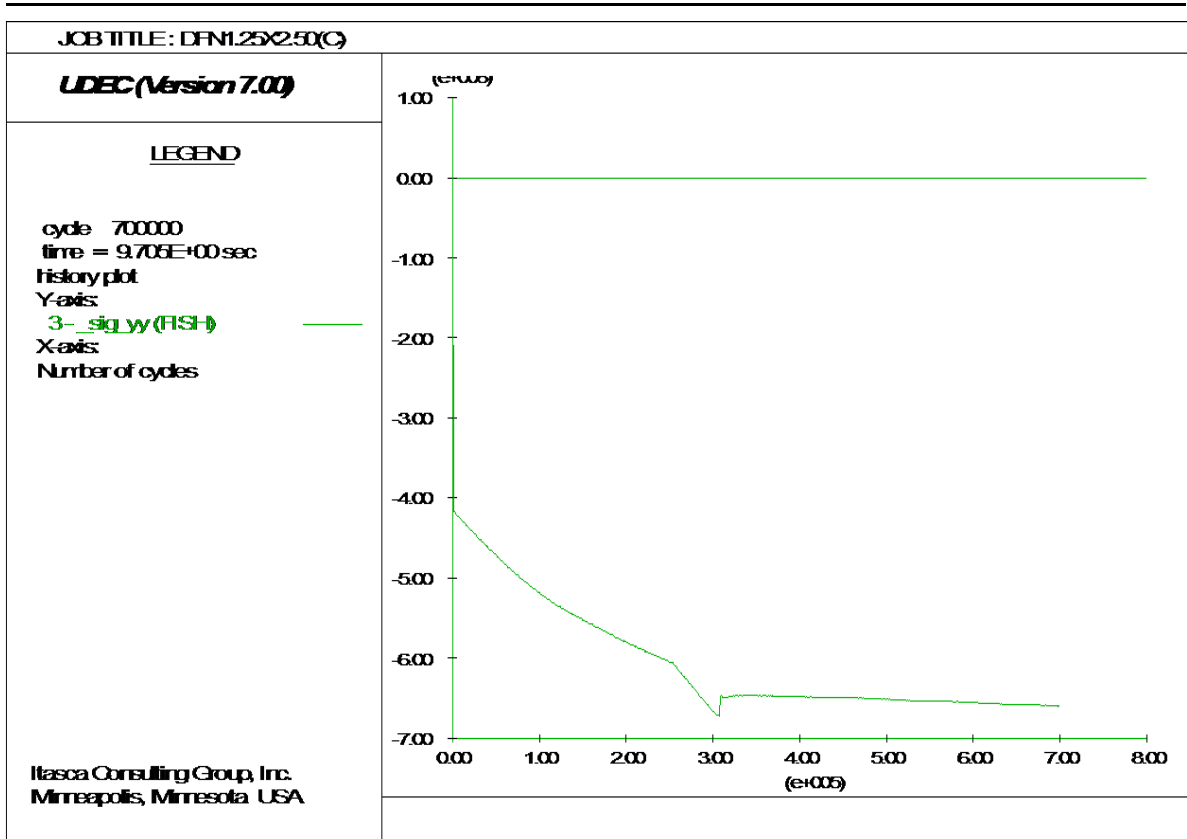
Σχήμα 46. Απεικόνιση δοκιμίου (Α) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.



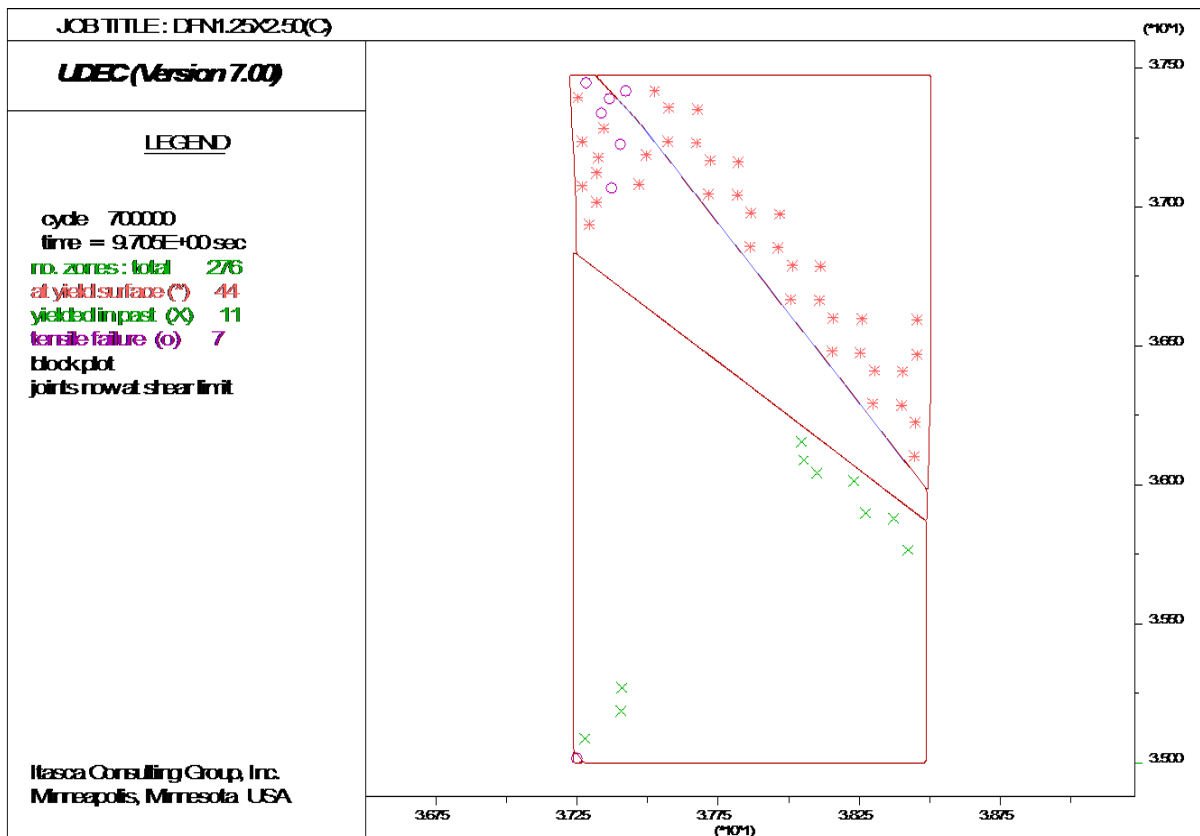
Διάγραμμα 14. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (B) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 55Μpa.



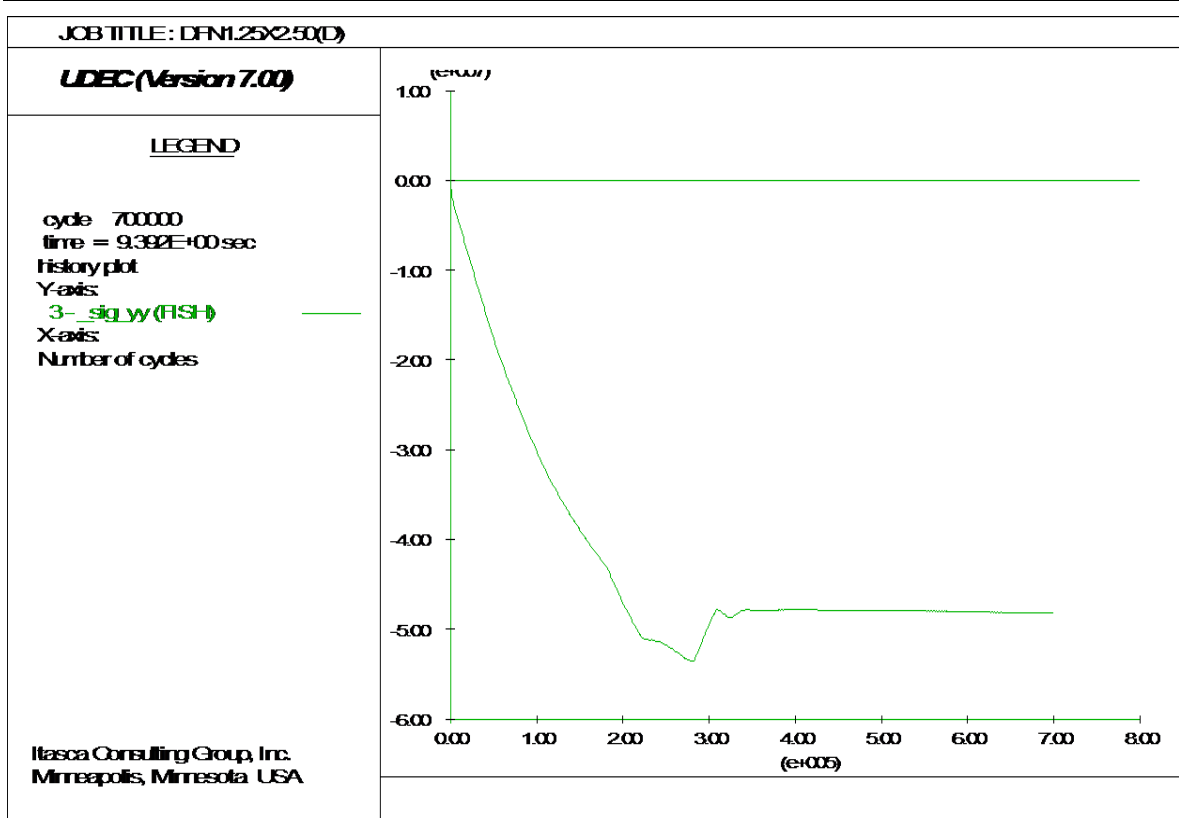
Σχήμα 47. Απεικόνιση δοκιμίου (B) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.



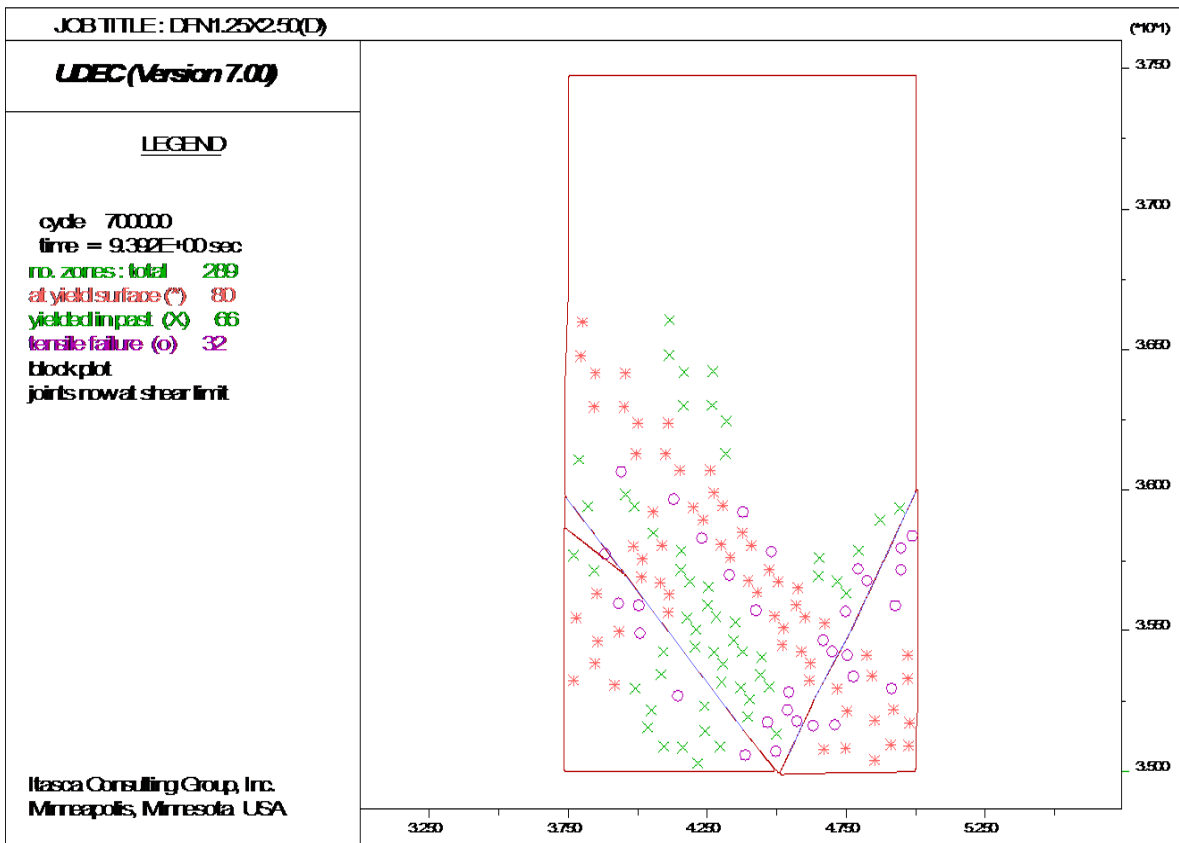
Διάγραμμα 15. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (C) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 6.8Μpa.



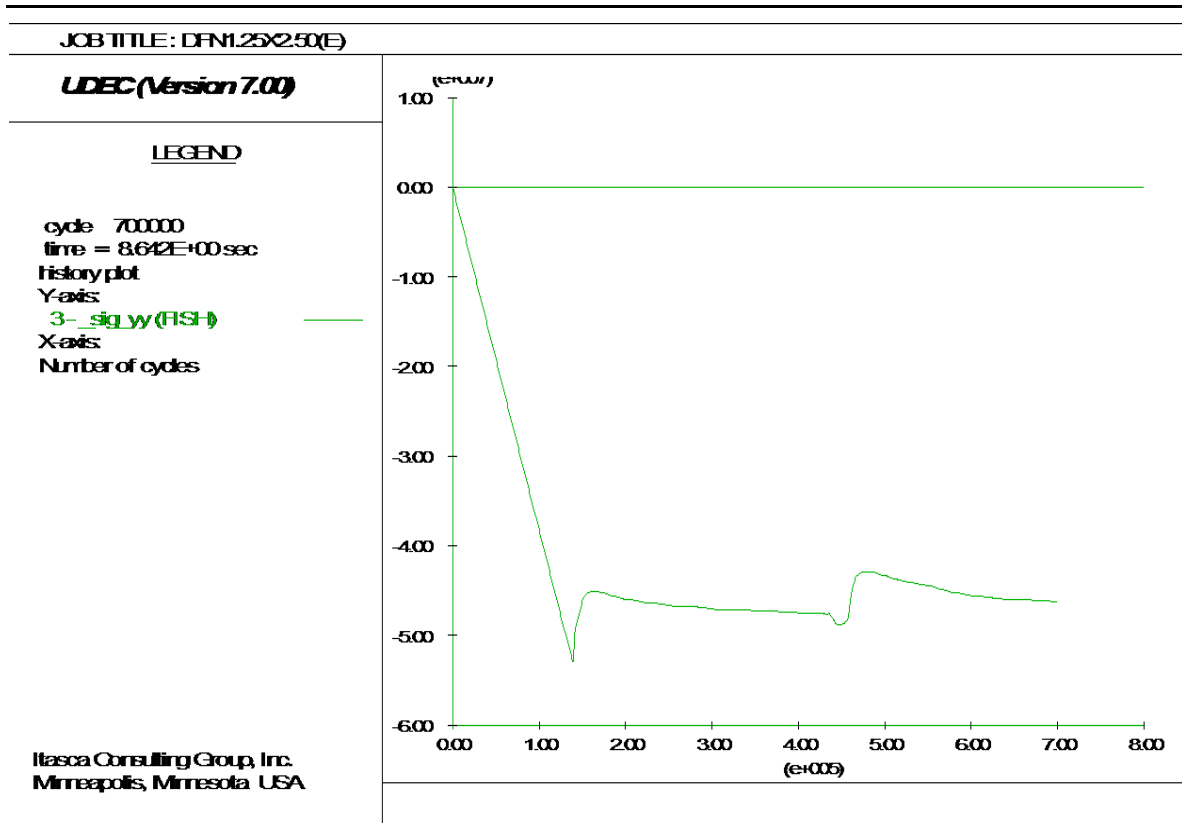
Σχήμα 48. Απεικόνιση δοκμίου (C) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



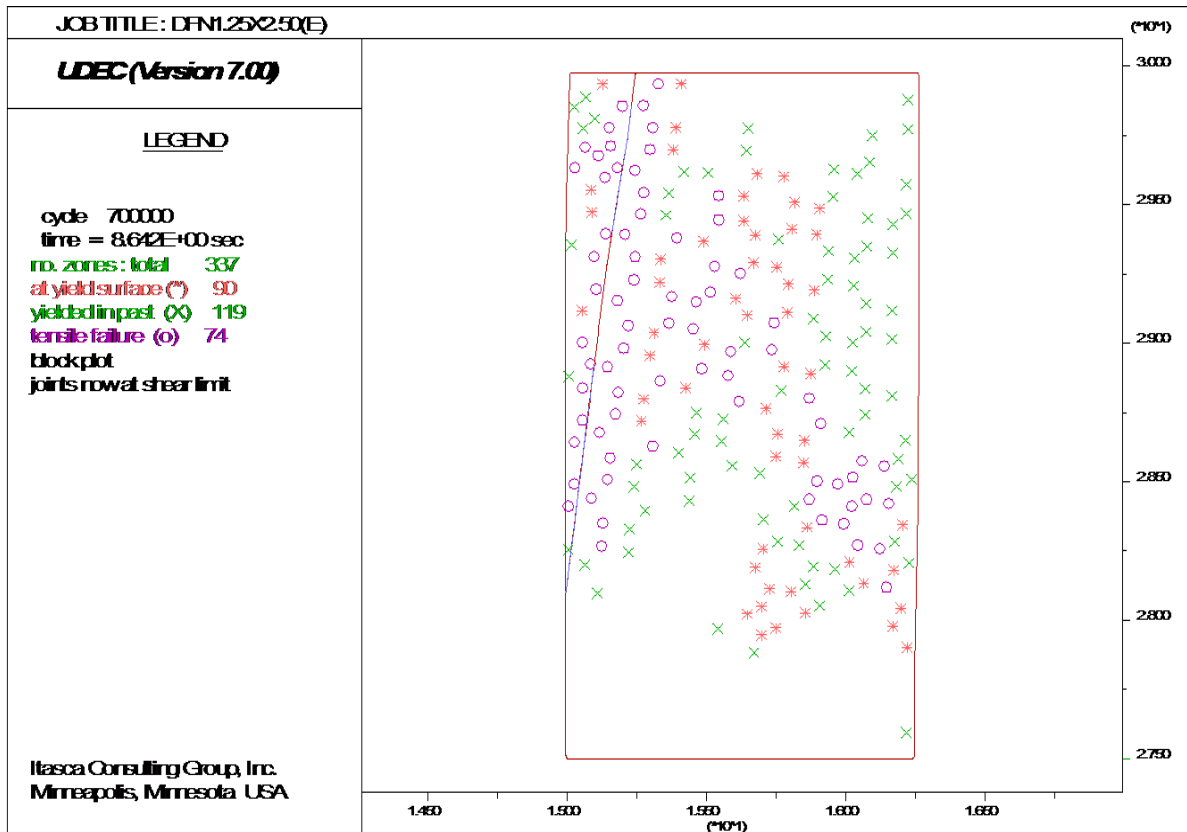
Διάγραμμα 16. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (D) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 53Μpa.



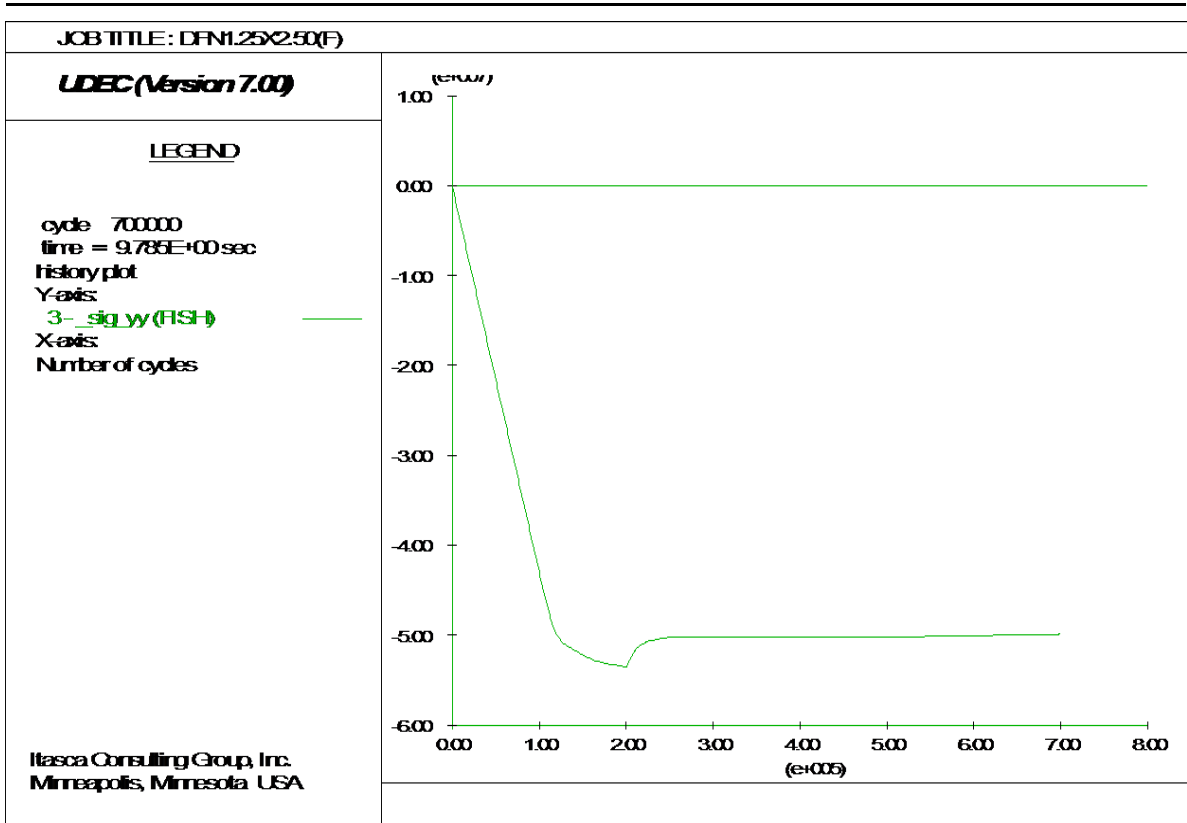
Σχήμα 49. Απεικόνιση δοκμίου (D) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών καθώς και η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.



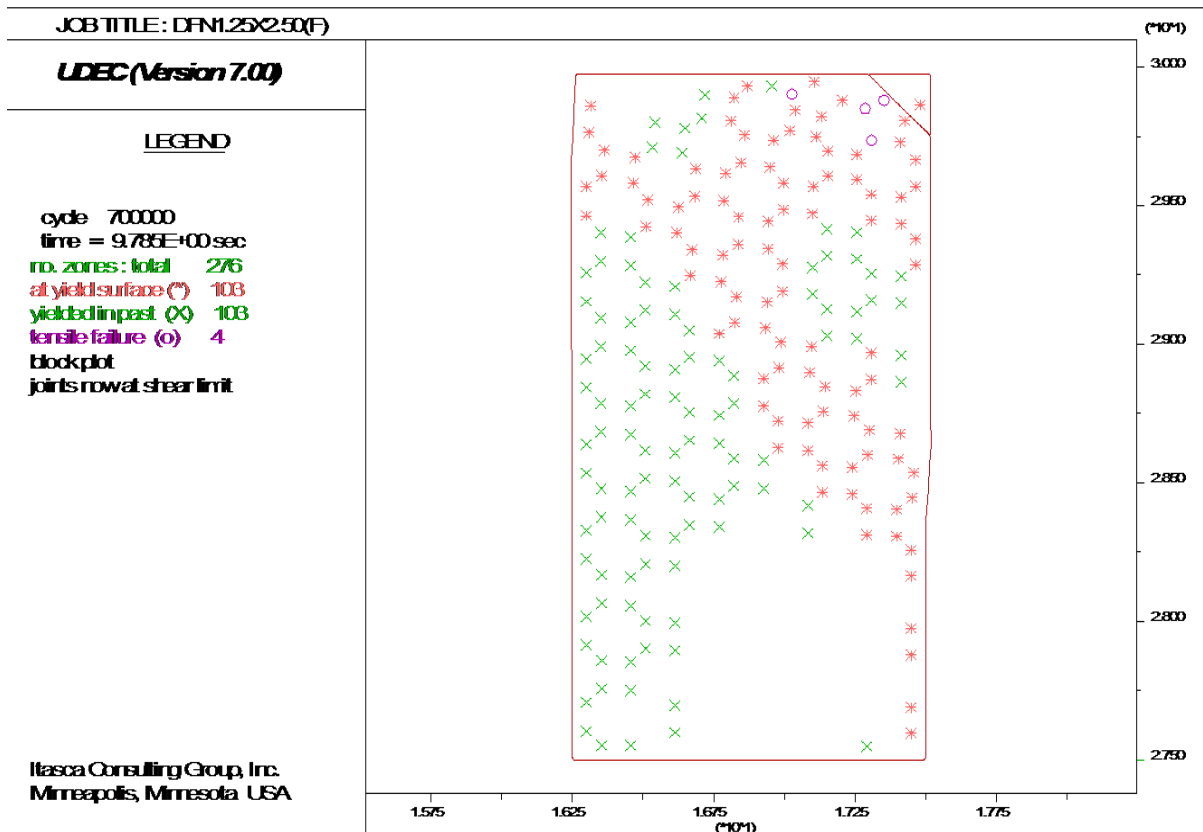
Διάγραμμα 17. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (E) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 52.5 Μpa.



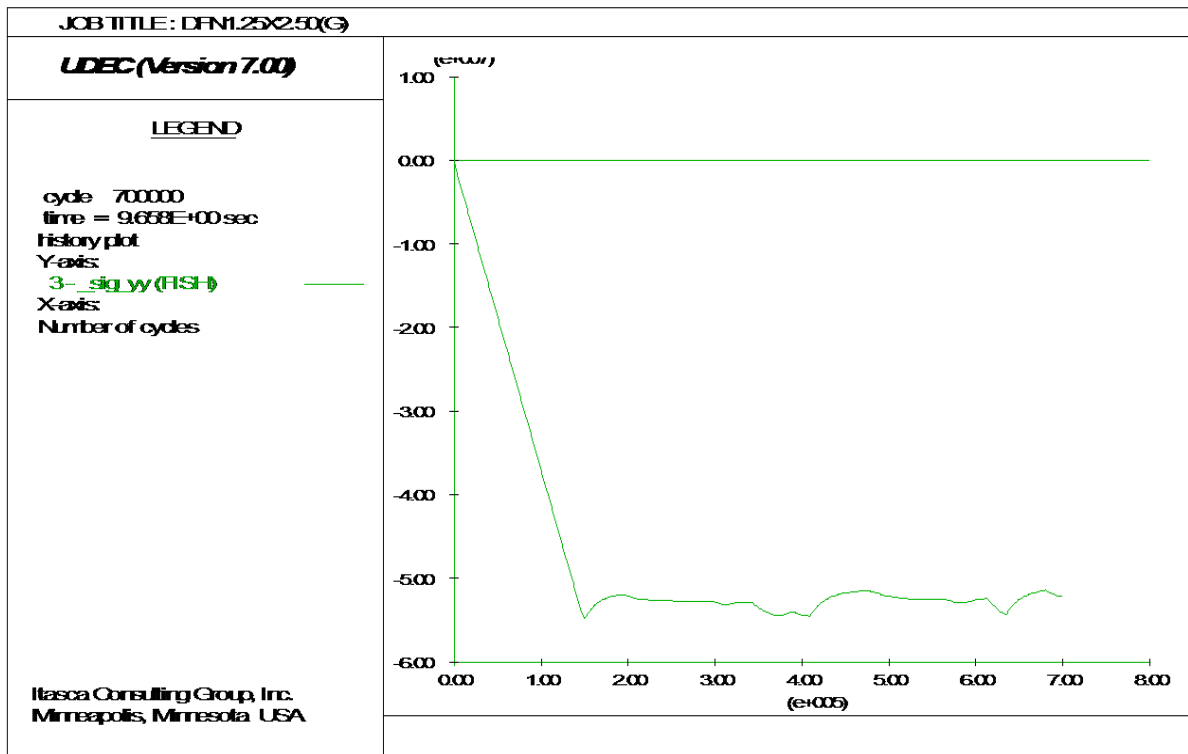
Σχήμα 50. Απεικόνιση δοκιμίου (E) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών, καθώς και η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.



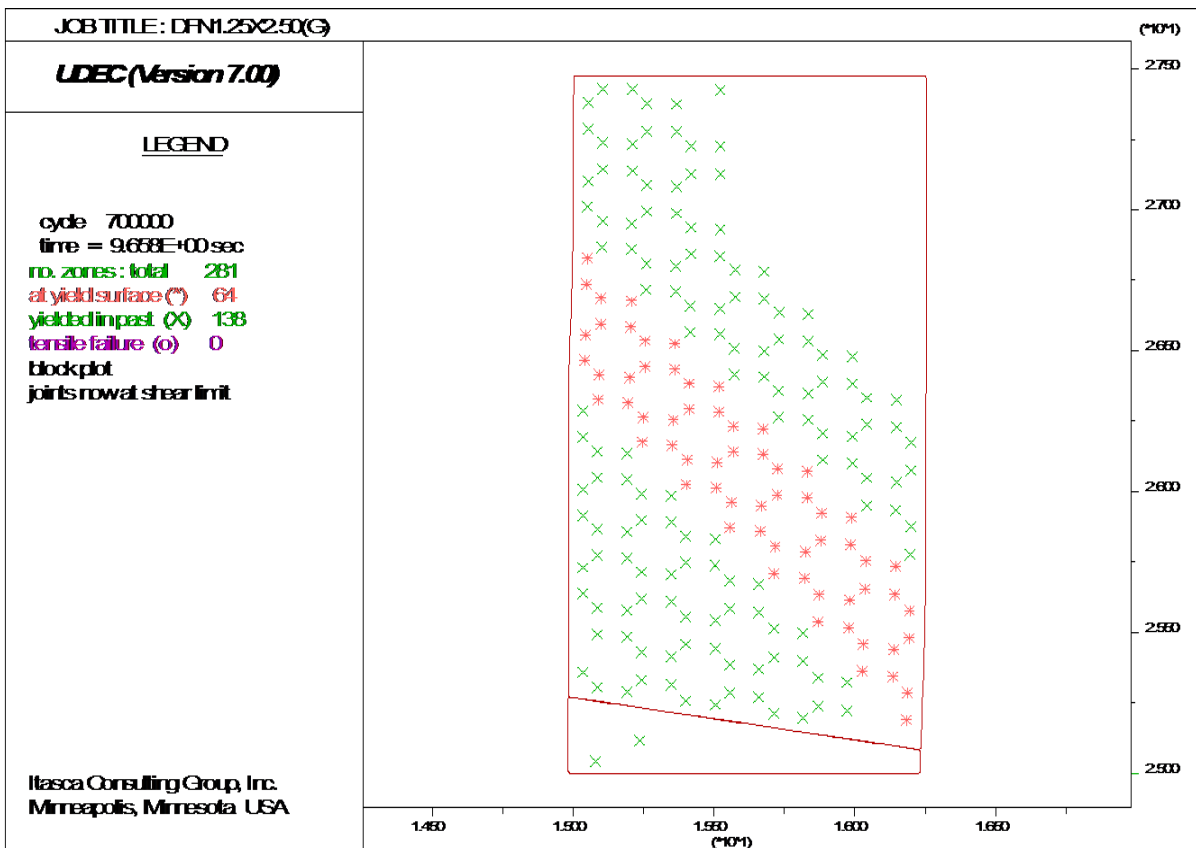
Διάγραμμα 18. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (F) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 53.5 Μpa.



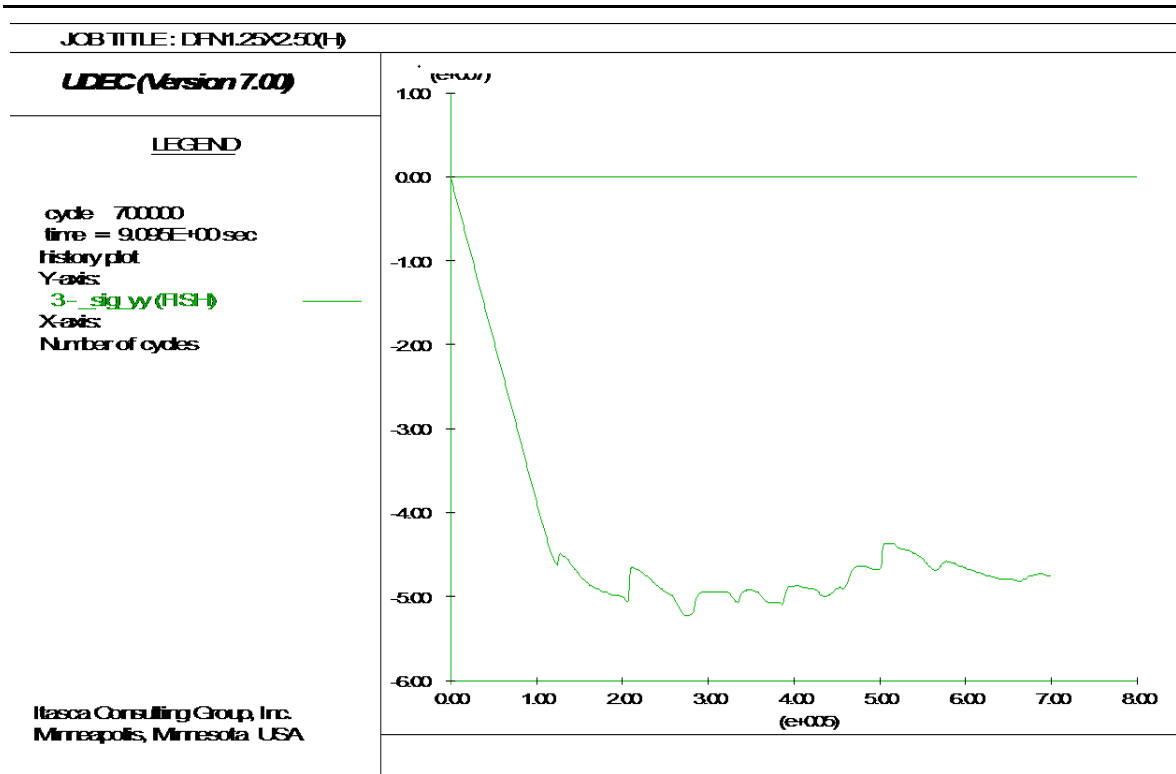
Σχήμα 51. Απεικόνιση δοκίμιου (F) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.



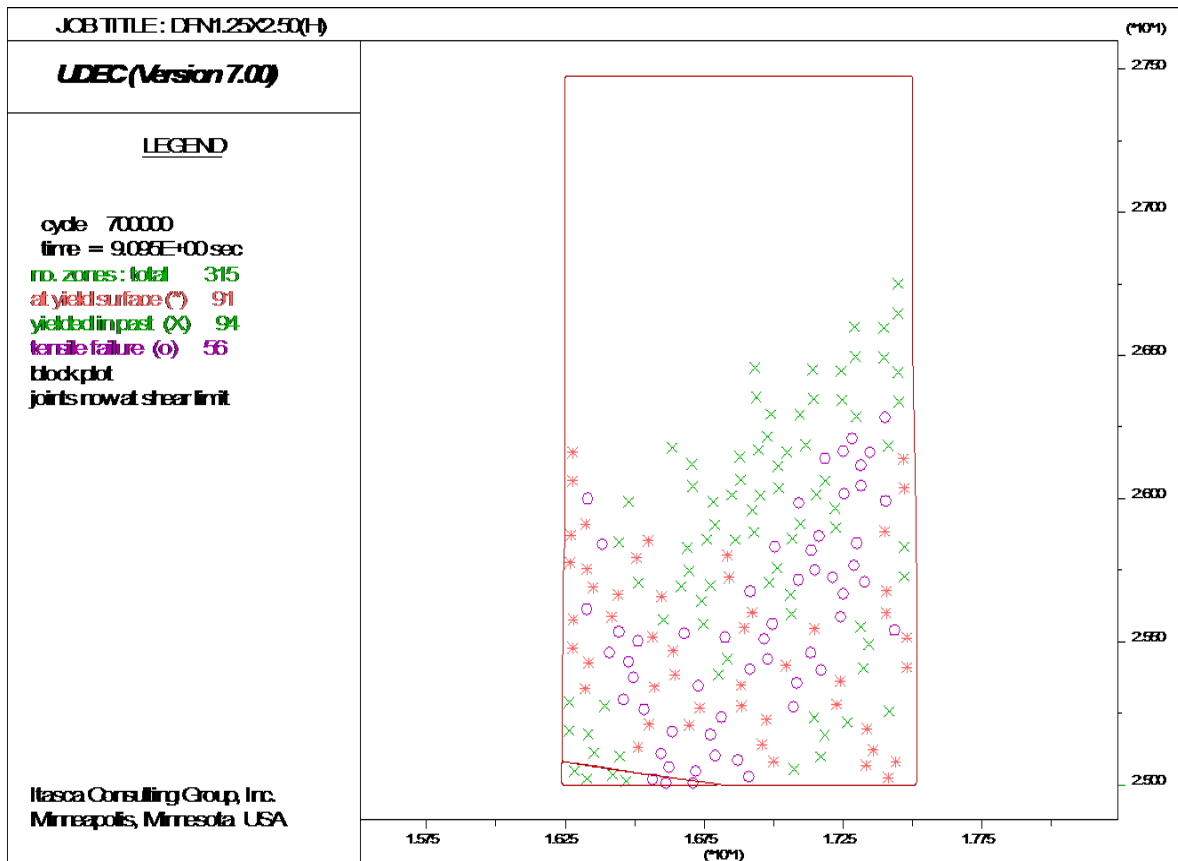
Διάγραμμα 19. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (G) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 55Μρα.



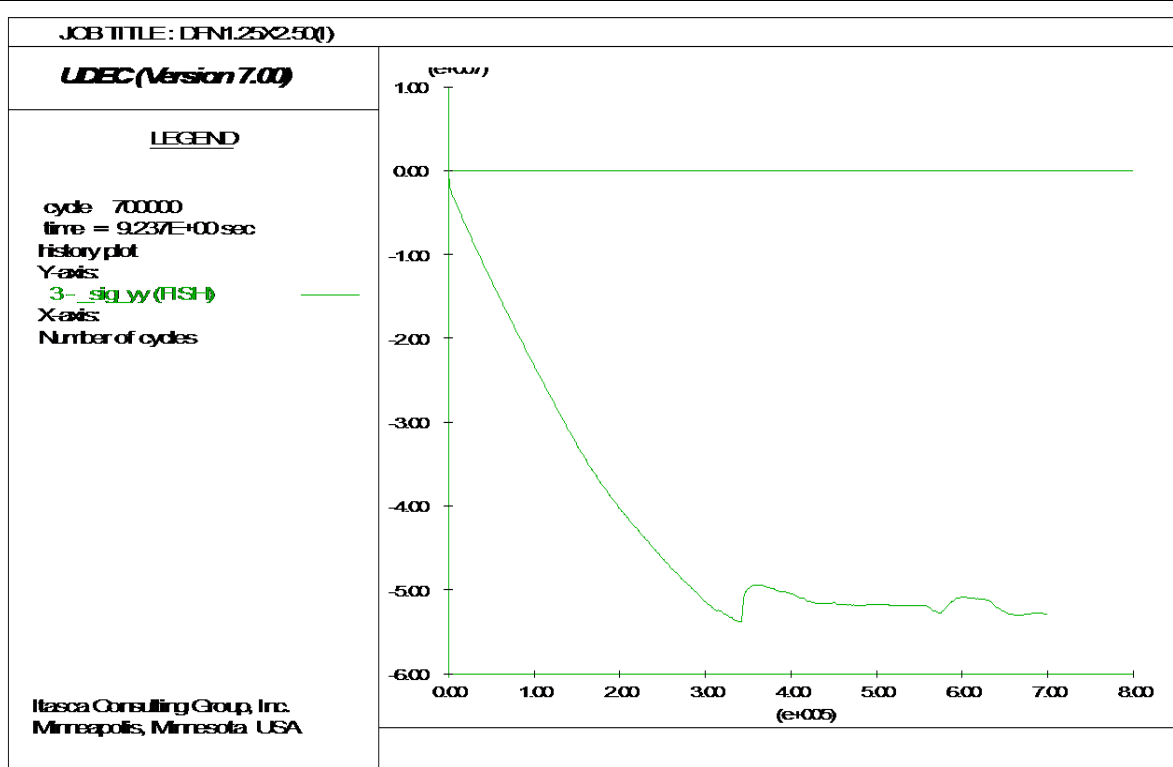
Σχήμα 52. Απεικόνιση δοκιμίου (G) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.



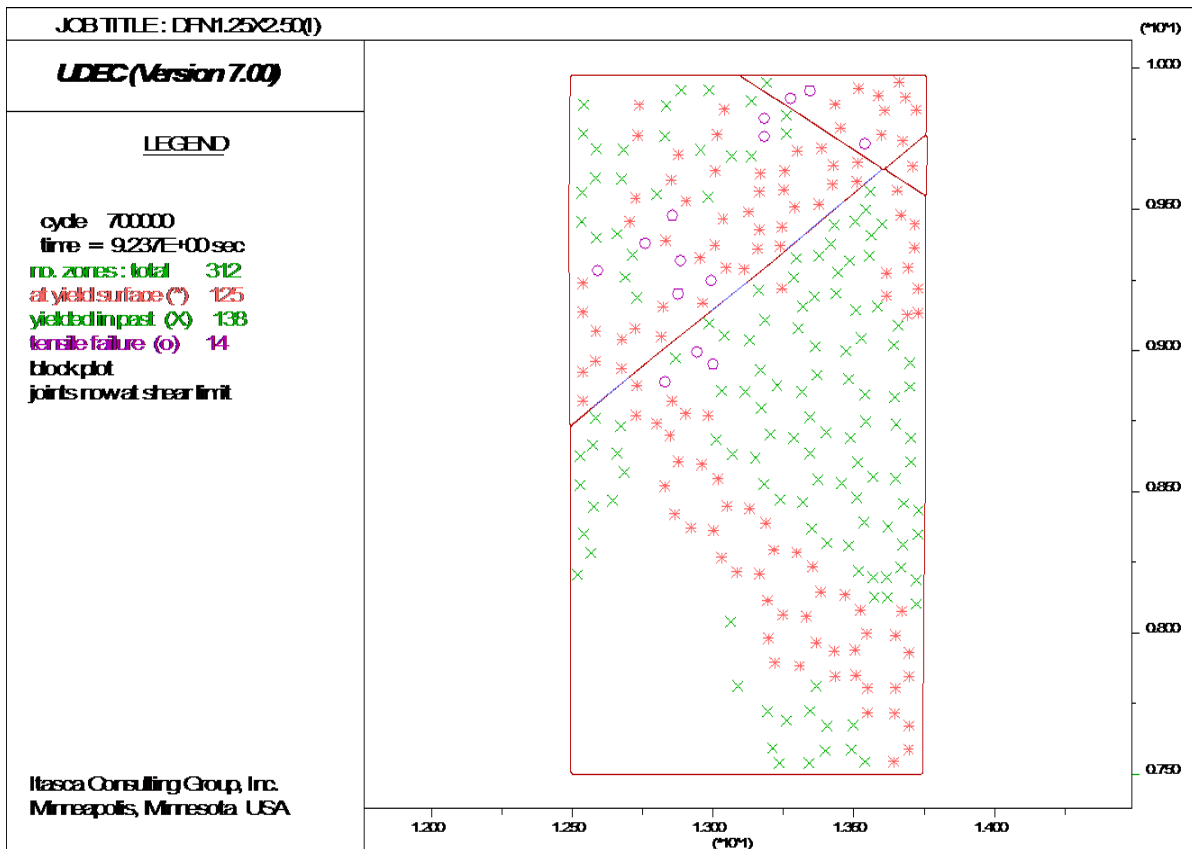
Διάγραμμα 20. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (H) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 52Μρα.



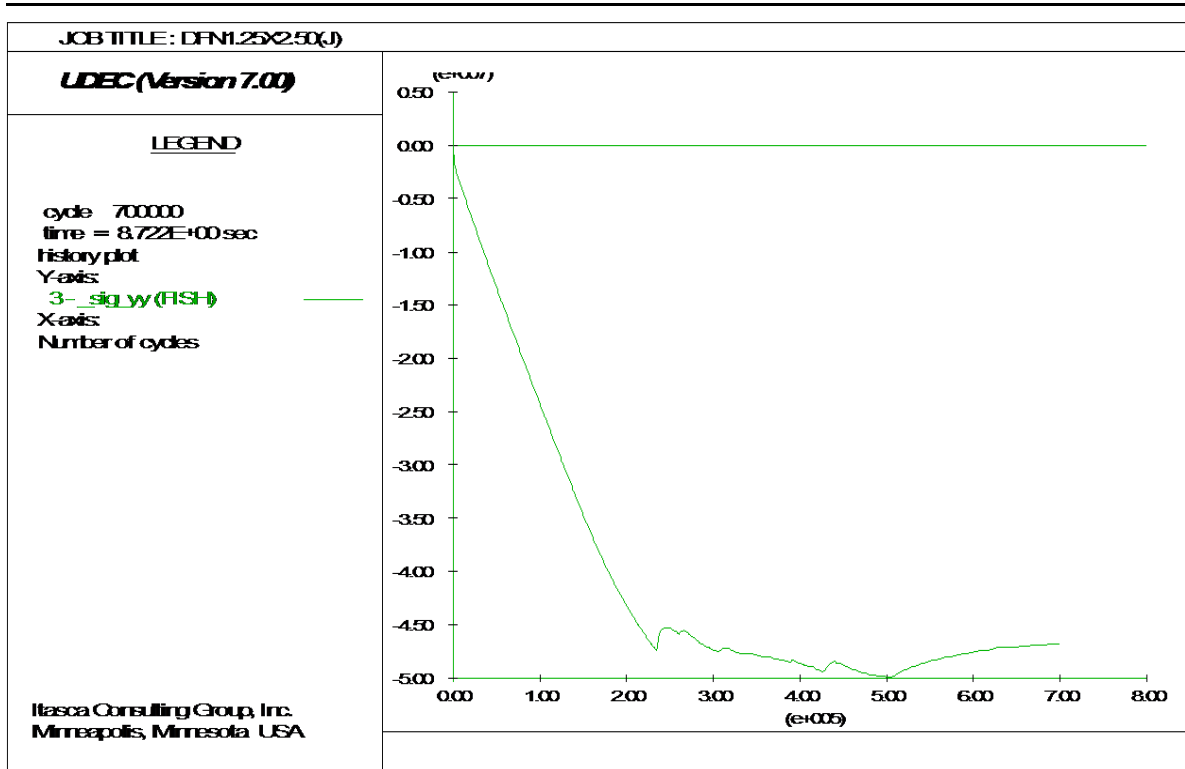
Σχήμα 53. Απεικόνιση δοκίμιου (H) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.



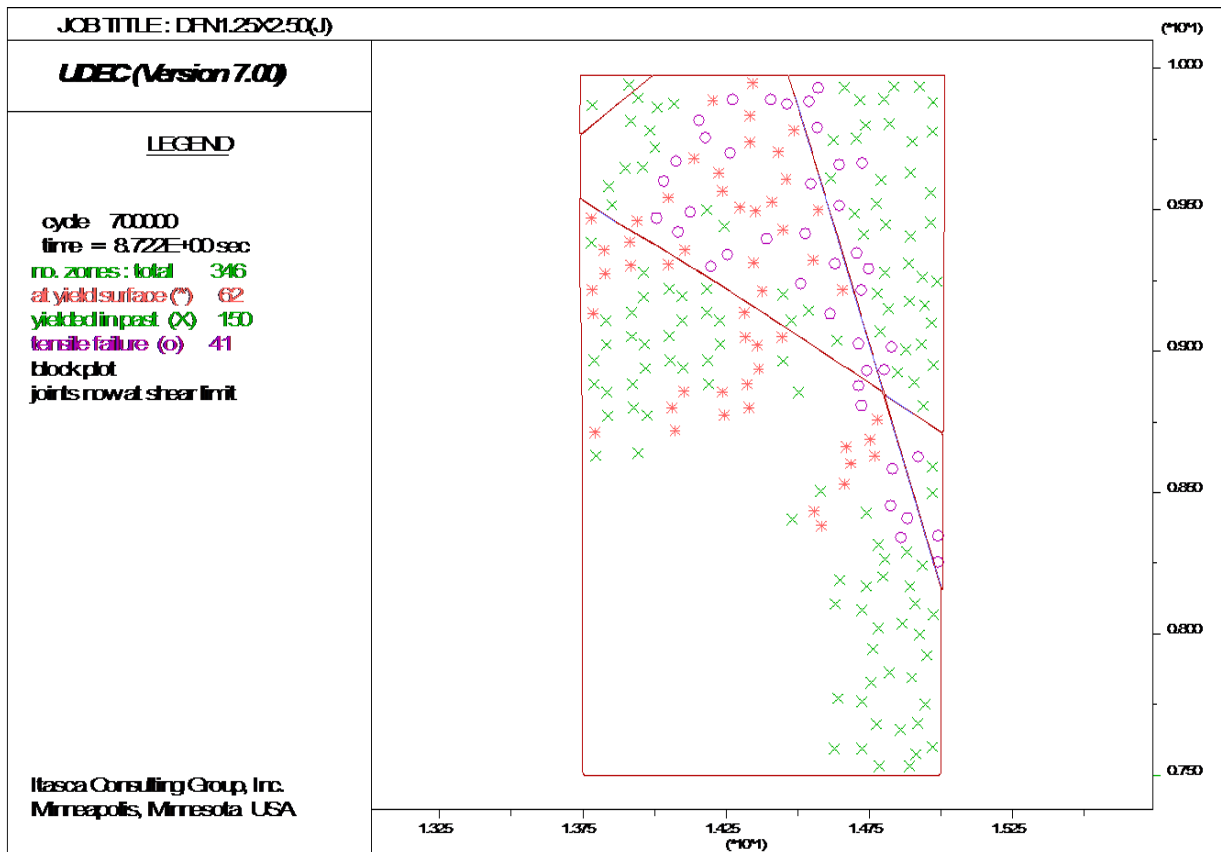
Διάγραμμα 21. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (I) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 54Μρα.



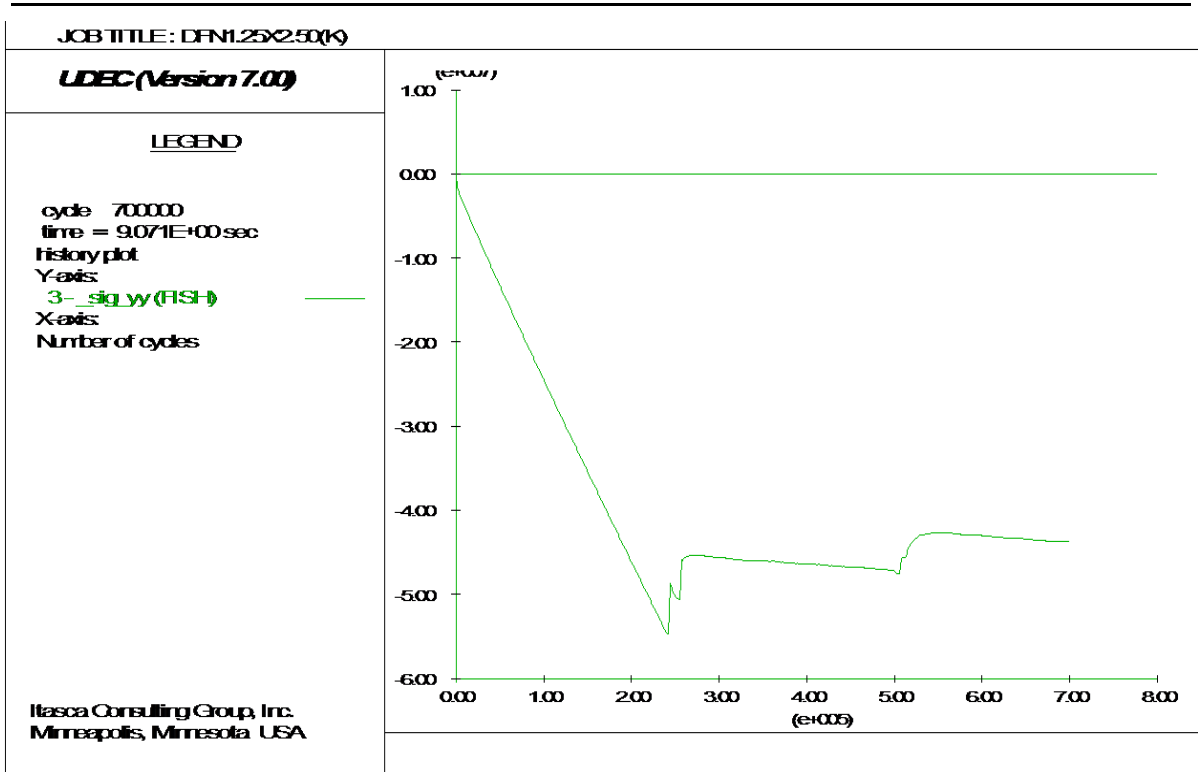
Σχήμα 54. Απεικόνιση δοκίμιου (I) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



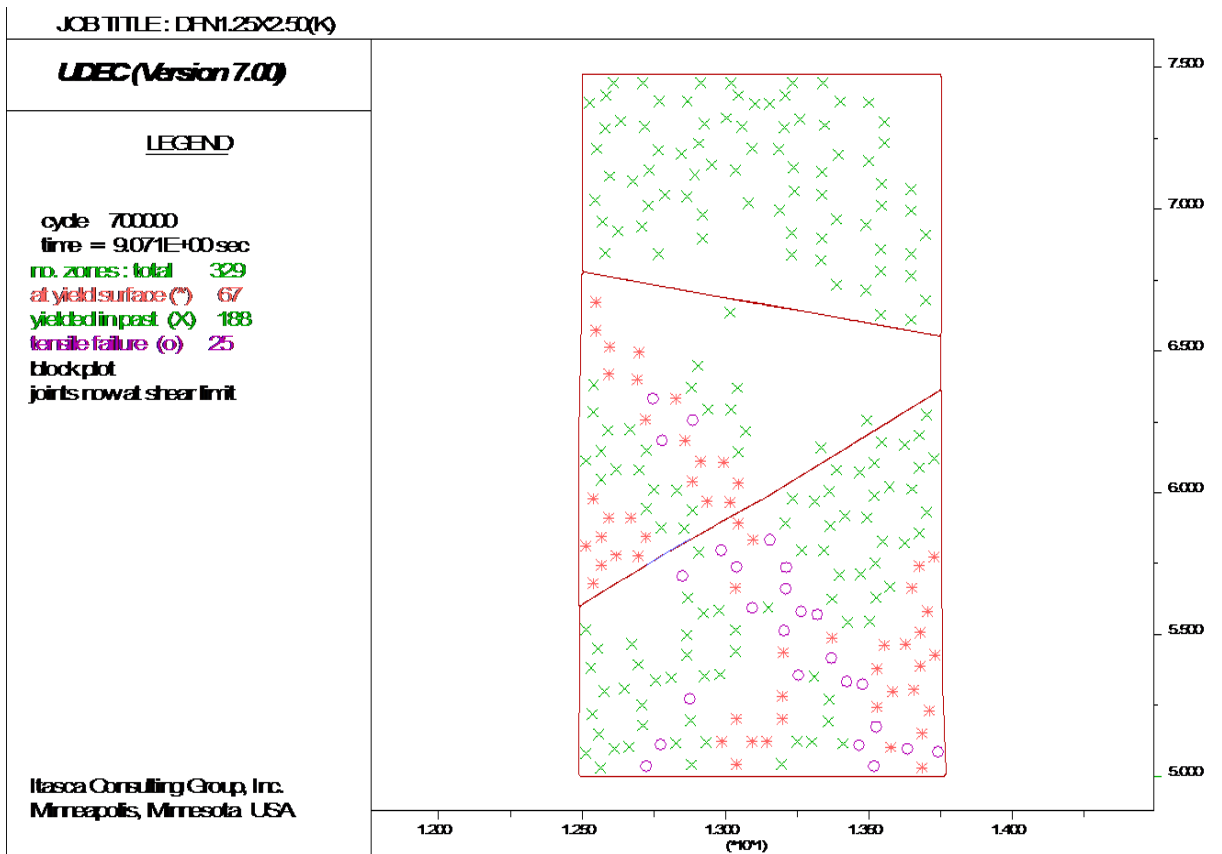
Διάγραμμα 22. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (J) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 50Μpa.



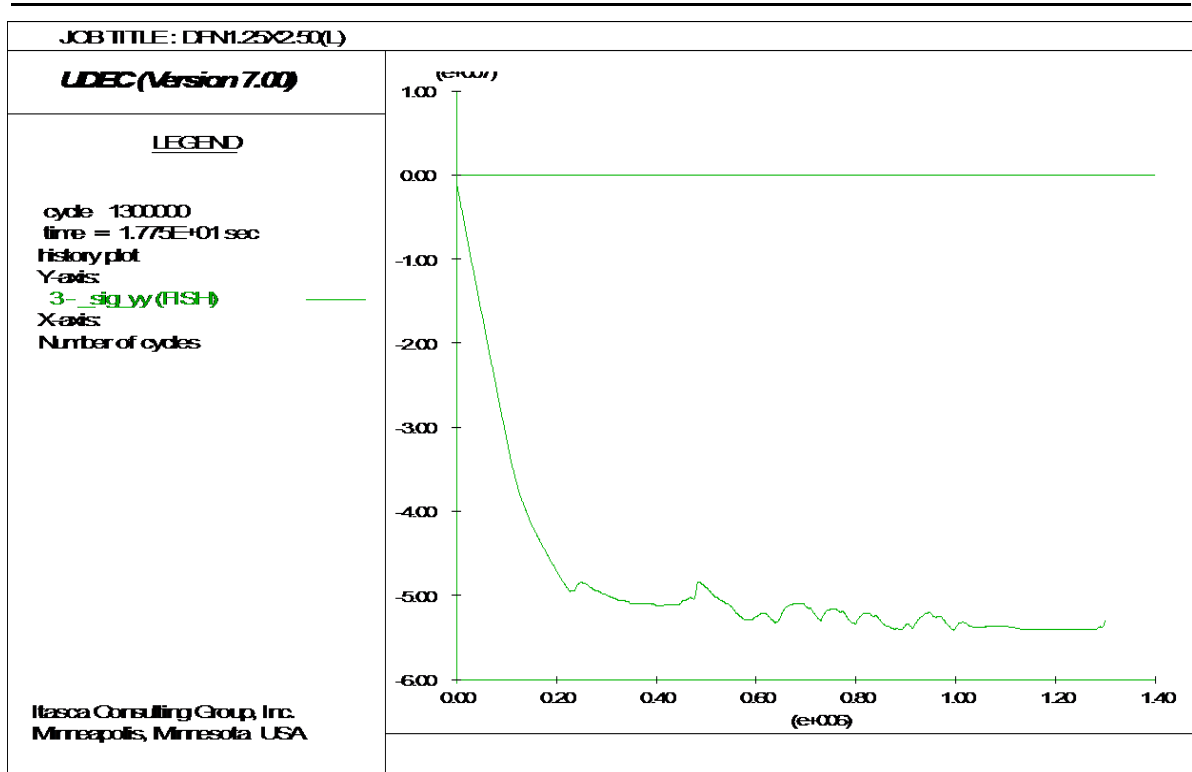
Σχήμα 55. Απεικόνιση δοκίμιου (J) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών καθώς και η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.



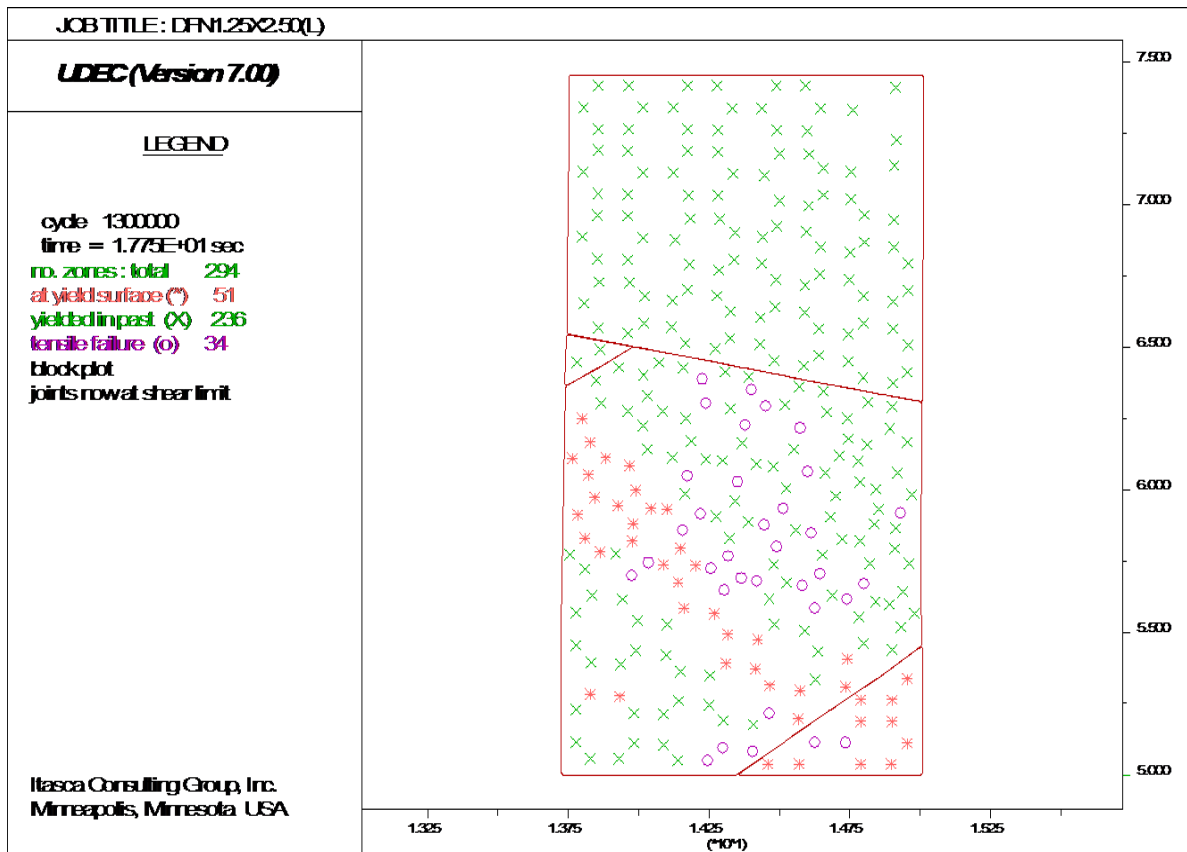
Διάγραμμα 23. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (Κ) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 55Μpa.



Σχήμα 56. Απεικόνιση δοκιμίου (Κ) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και μερικής διατμητικής αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.

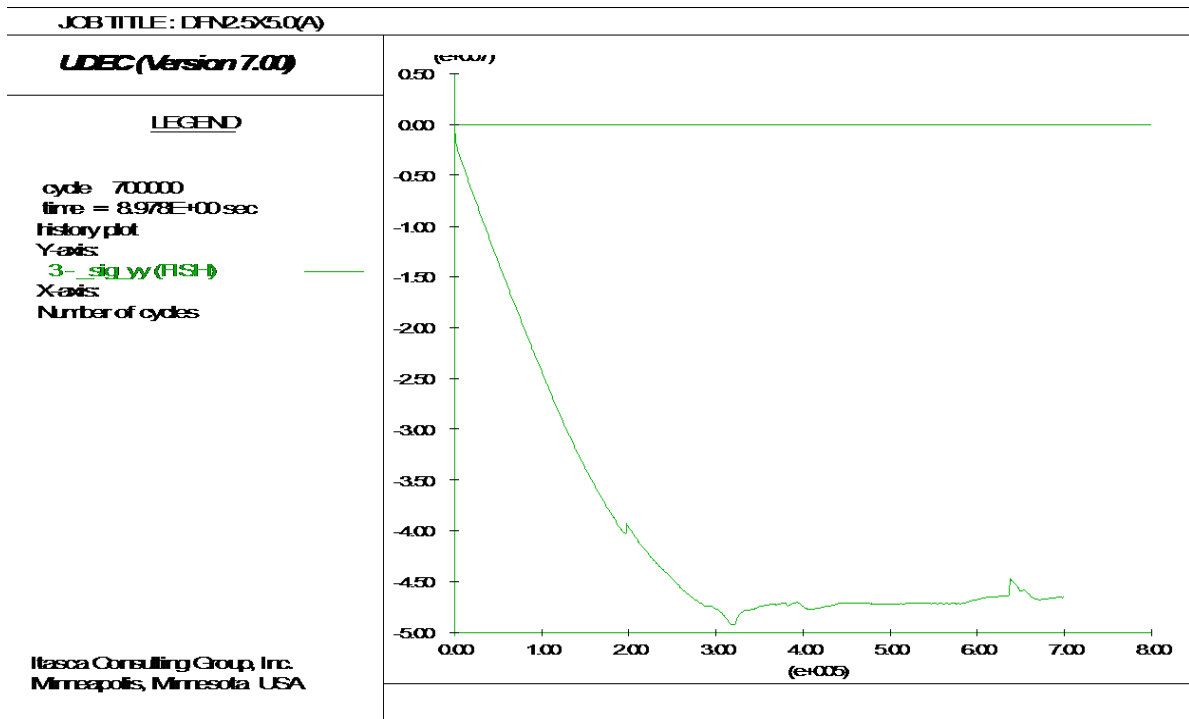


Διάγραμμα 24. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (L) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 54Μρα.

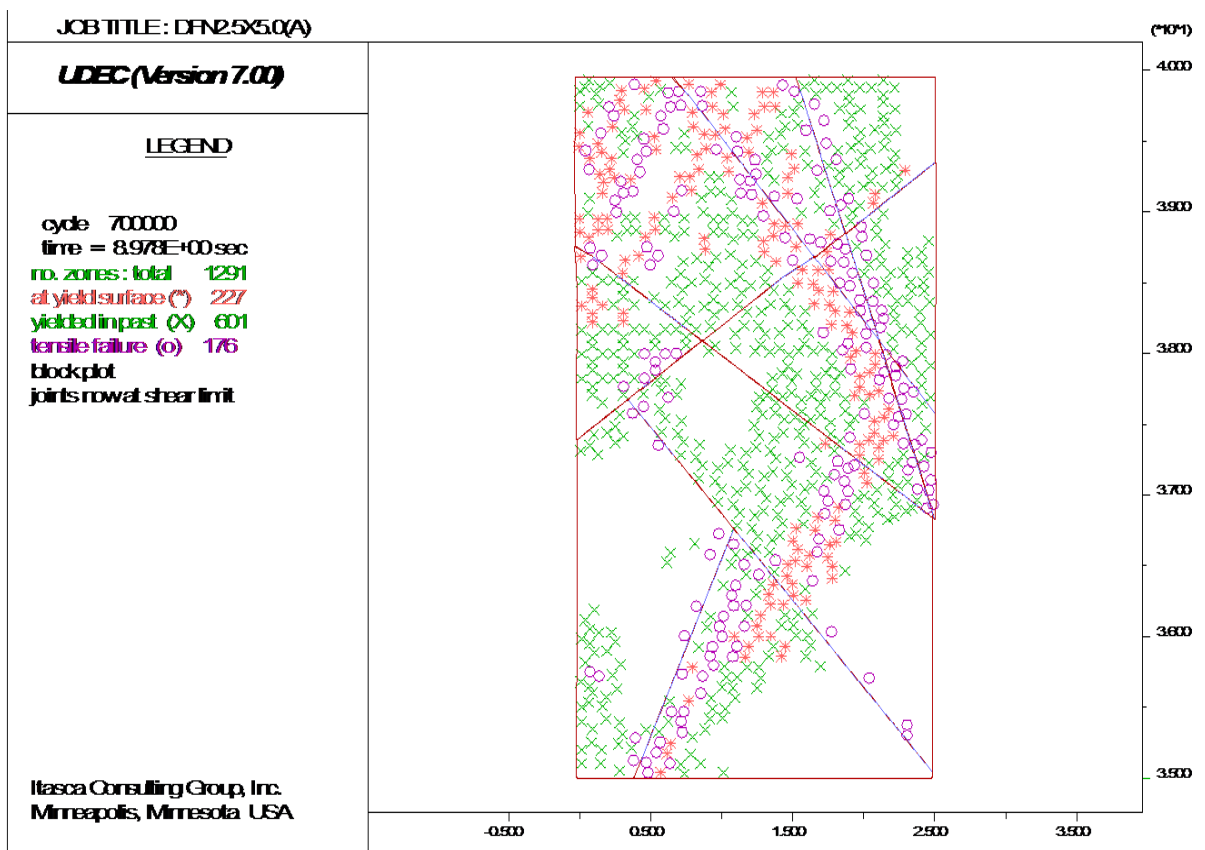


Σχήμα 57. Απεικόνιση δοκιμίου (L) διαστάσεων 1.25x2.50m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.

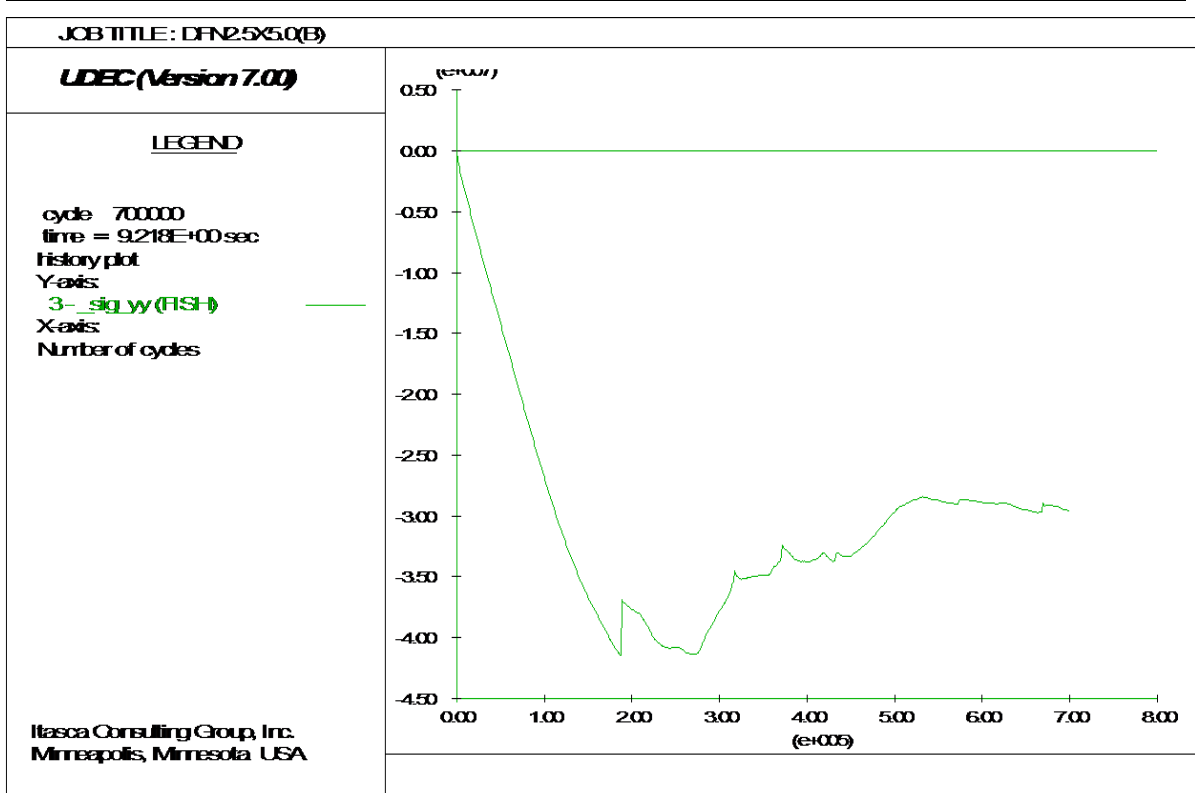
5.2.2. Αποτελέσματα δοκιμών διαστάσεων 2.5x5.0 m



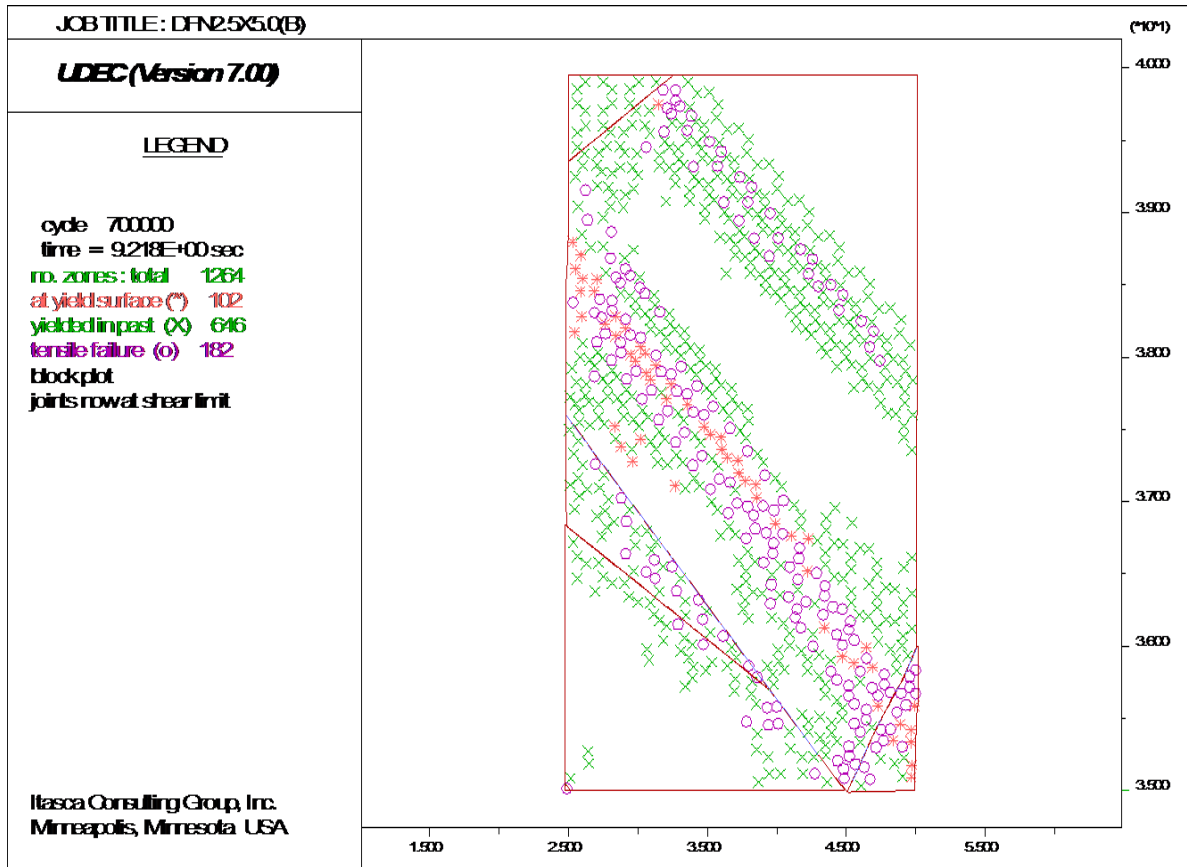
Διάγραμμα 25. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (A) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 49.5Μpa.



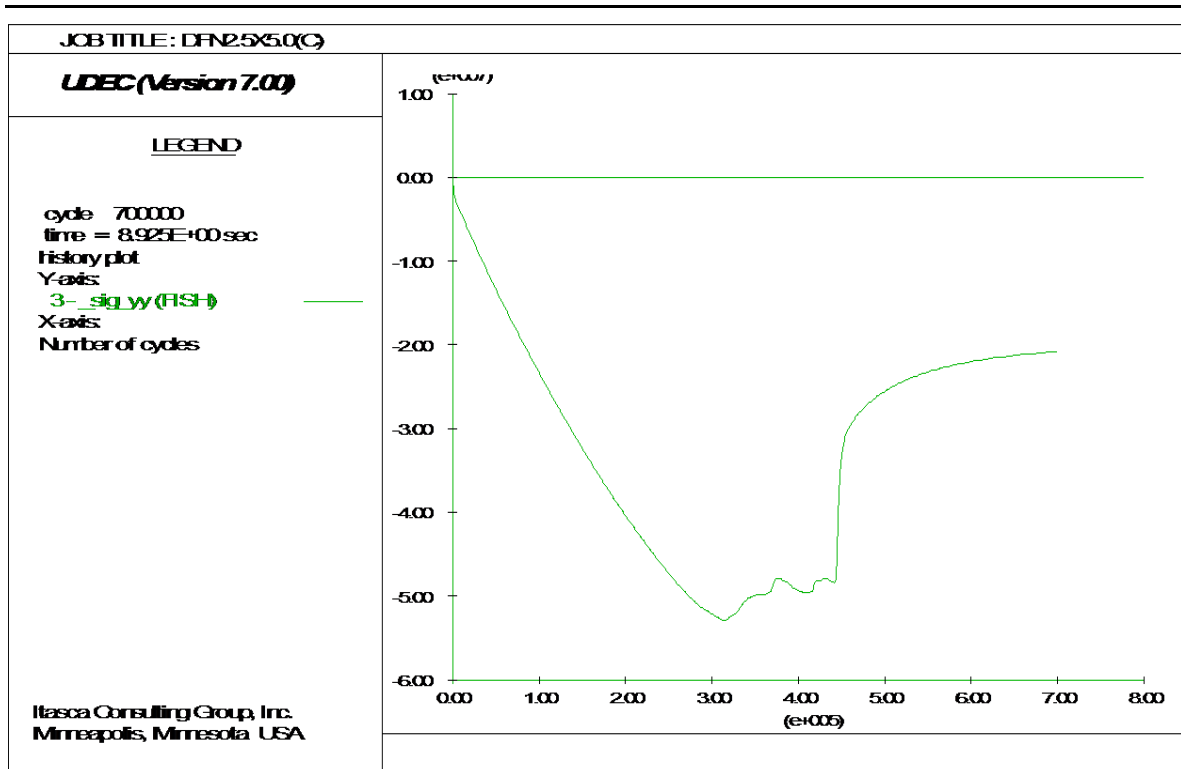
Σχήμα 58. Απεικόνιση δοκιμίου (A) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών καθώς και η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.



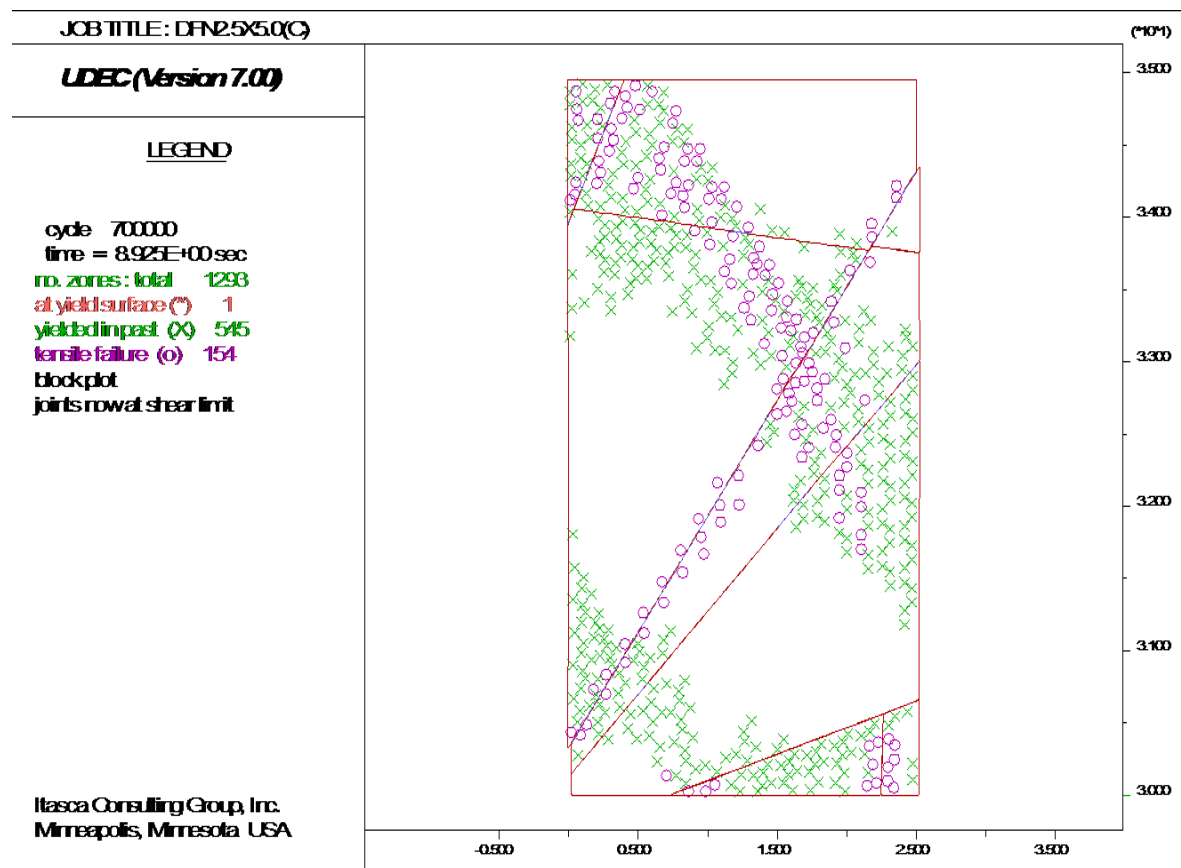
Διάγραμμα 26. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (B) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 42Μpa.



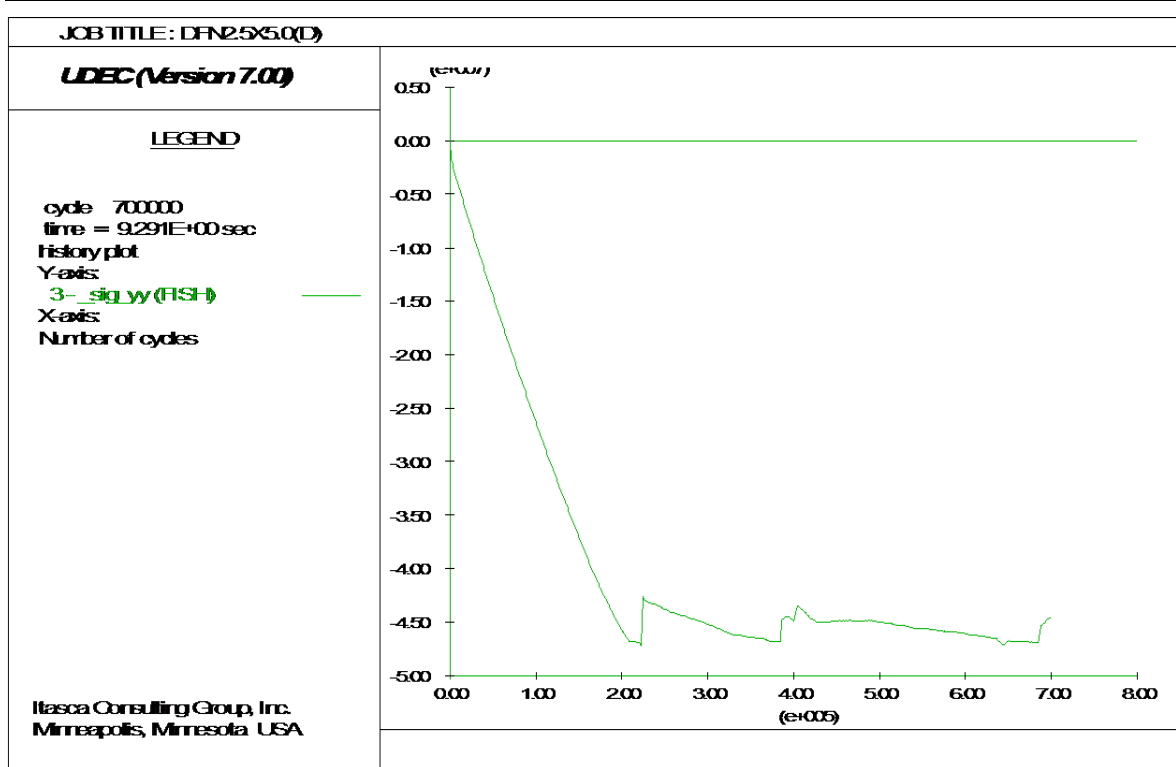
Σχήμα 59. Απεικόνιση δοκίμιου (B) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



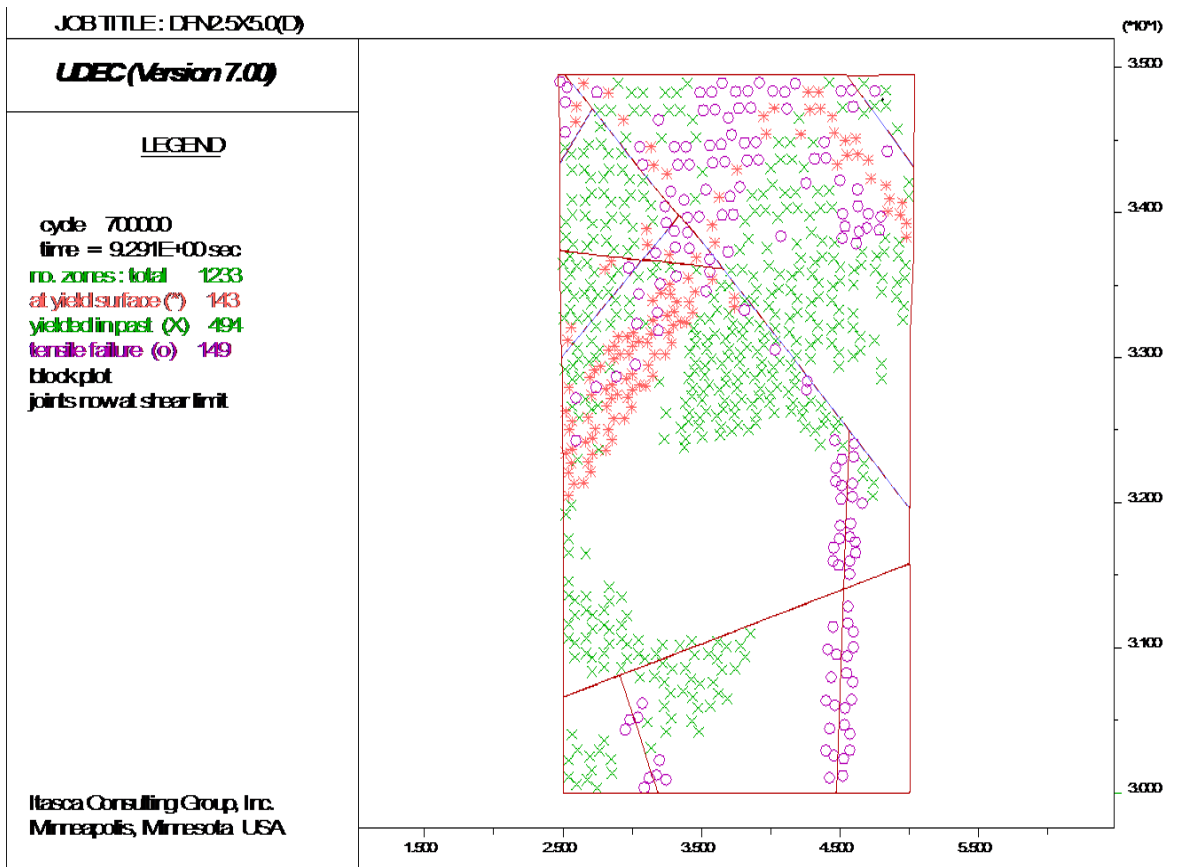
Διάγραμμα 27. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (C) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 52Μρα.



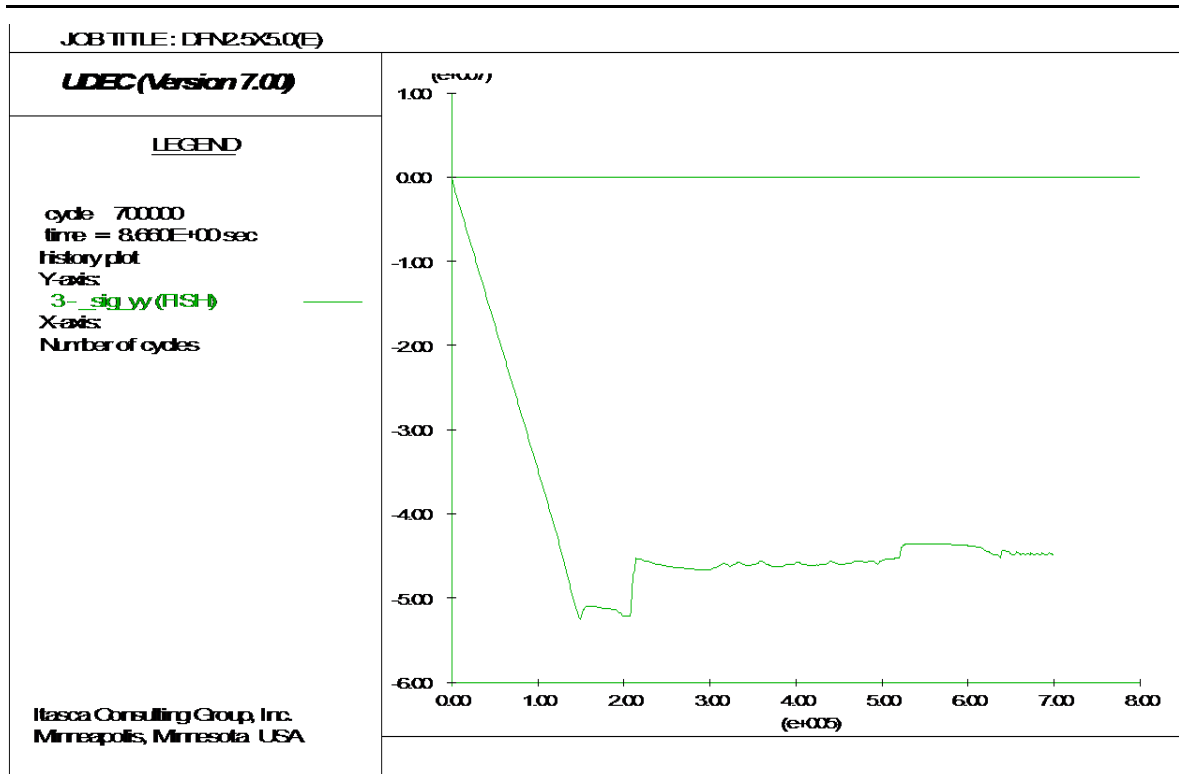
Σχήμα 60. Απεικόνιση δοκιμίου (C) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών, καθώς και πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.



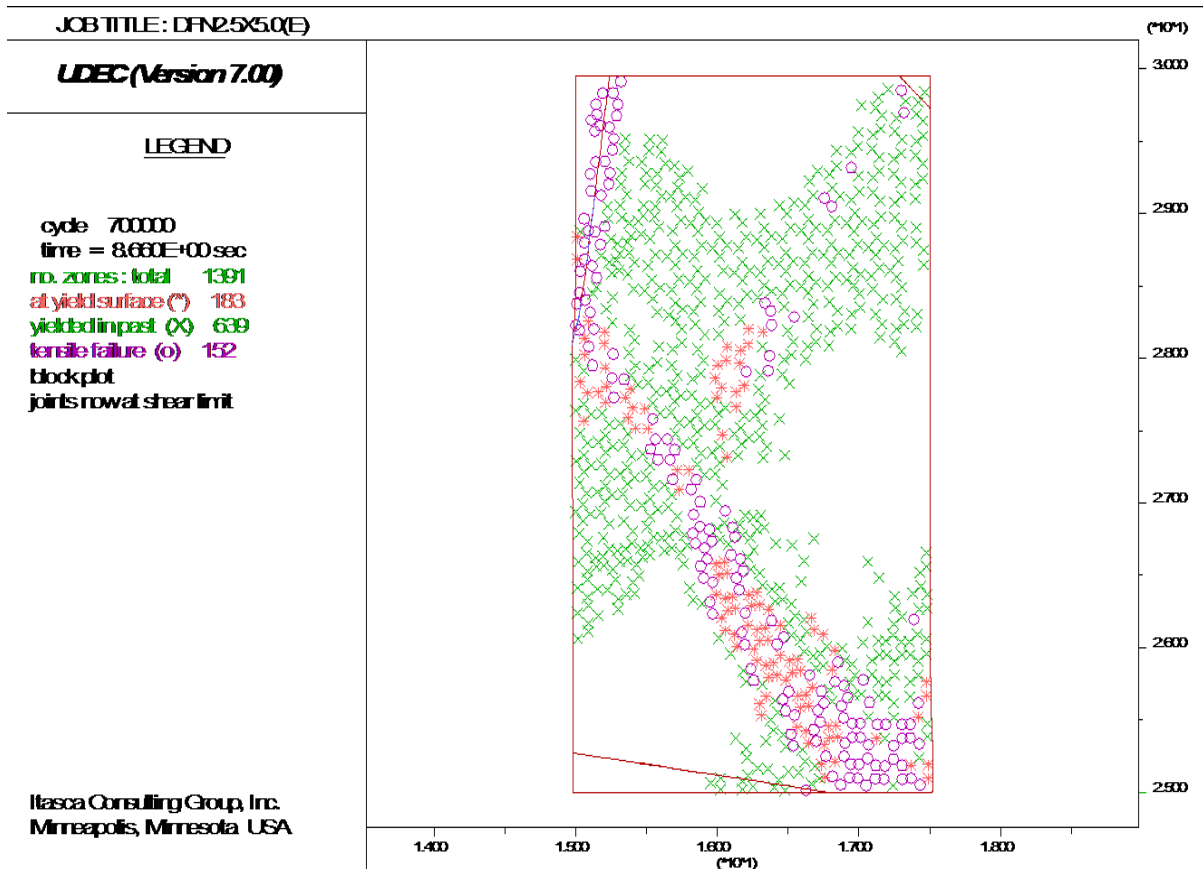
Διάγραμμα 28. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (D) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 48Μpa.



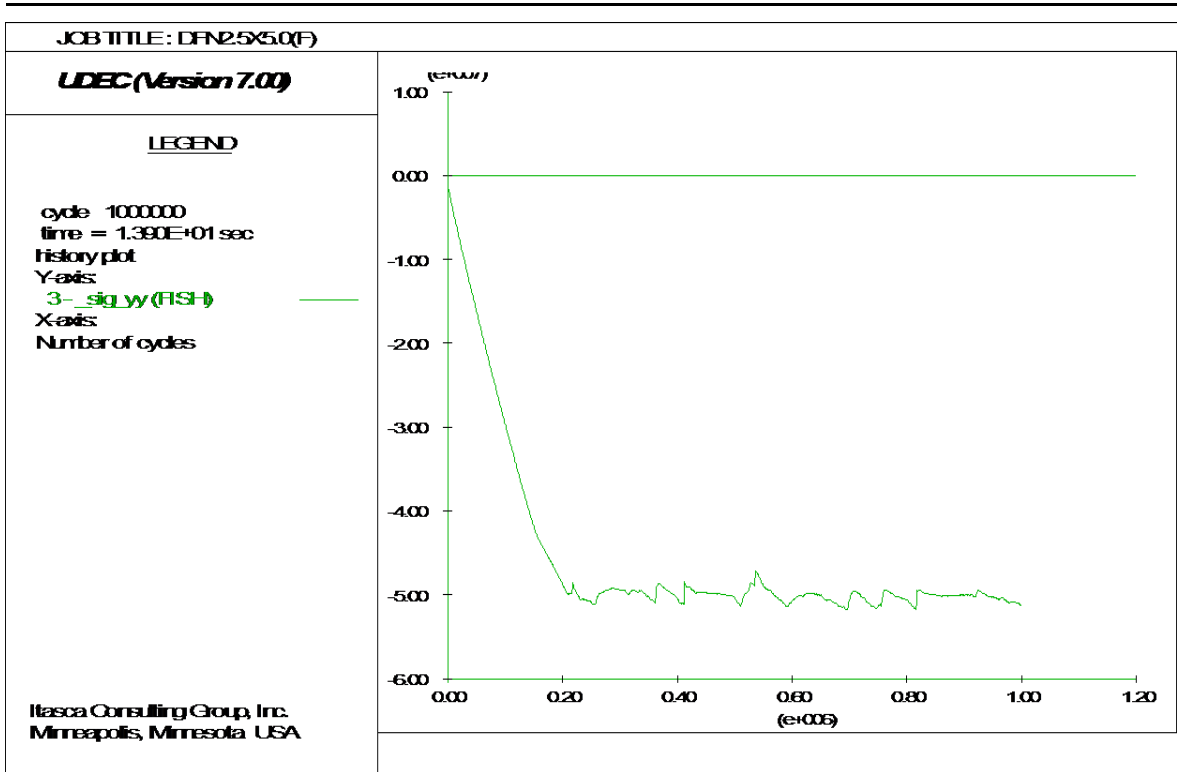
Σχήμα 61. Απεικόνιση δοκιμίου (D) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών καθώς και η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.



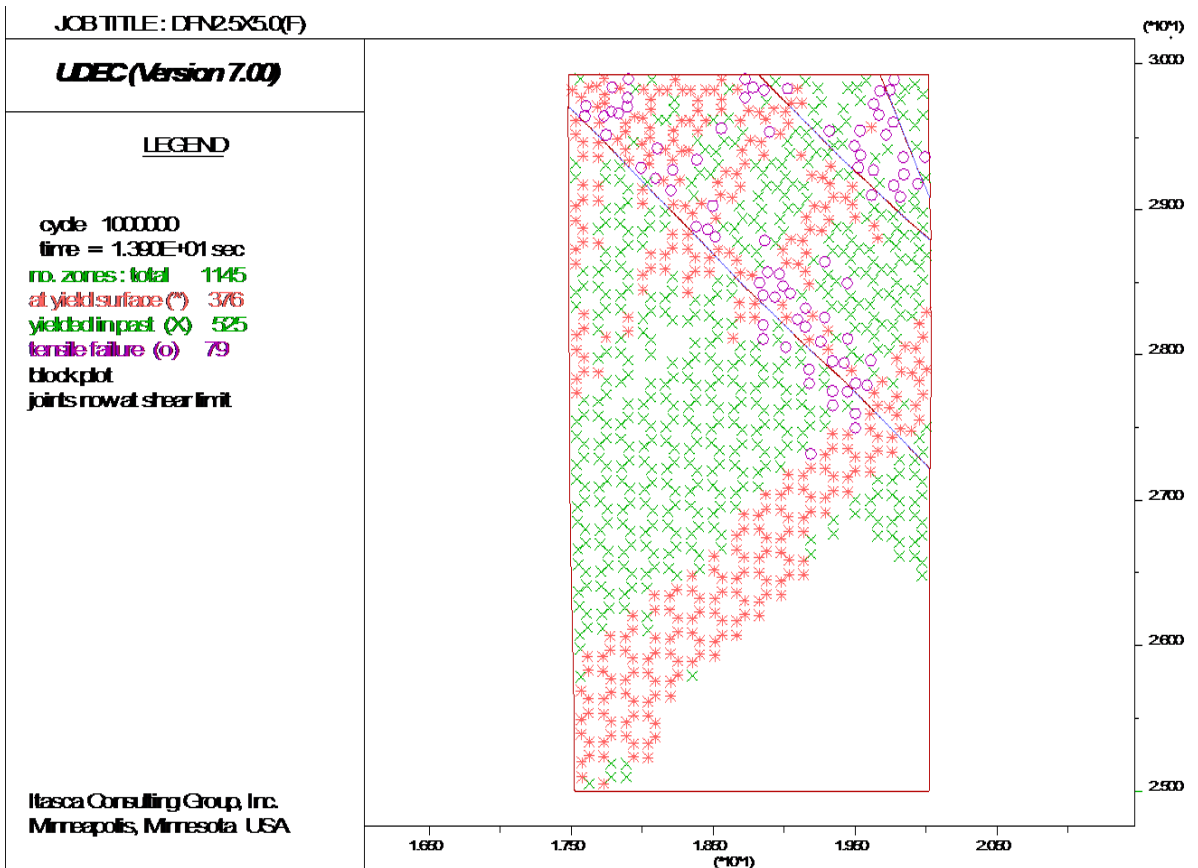
Διάγραμμα 29. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (E) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 52Μpa.



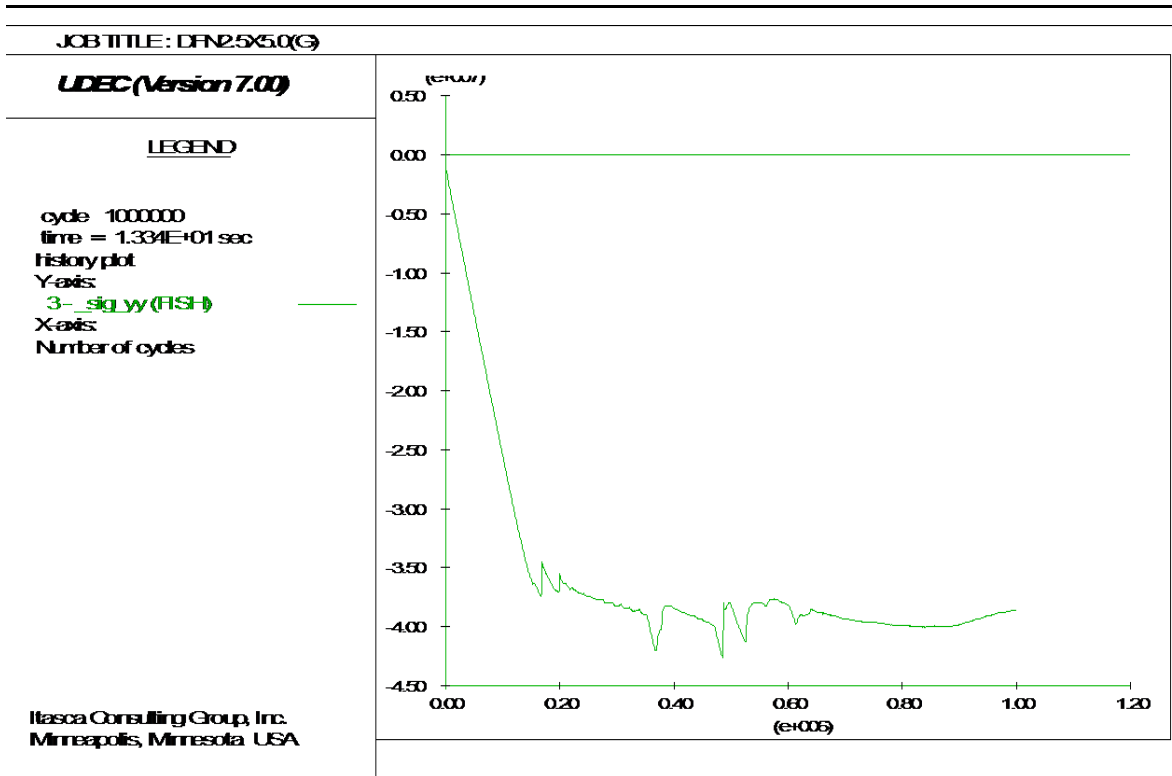
Σχήμα 62. Απεικόνιση δοκίμιου (E) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



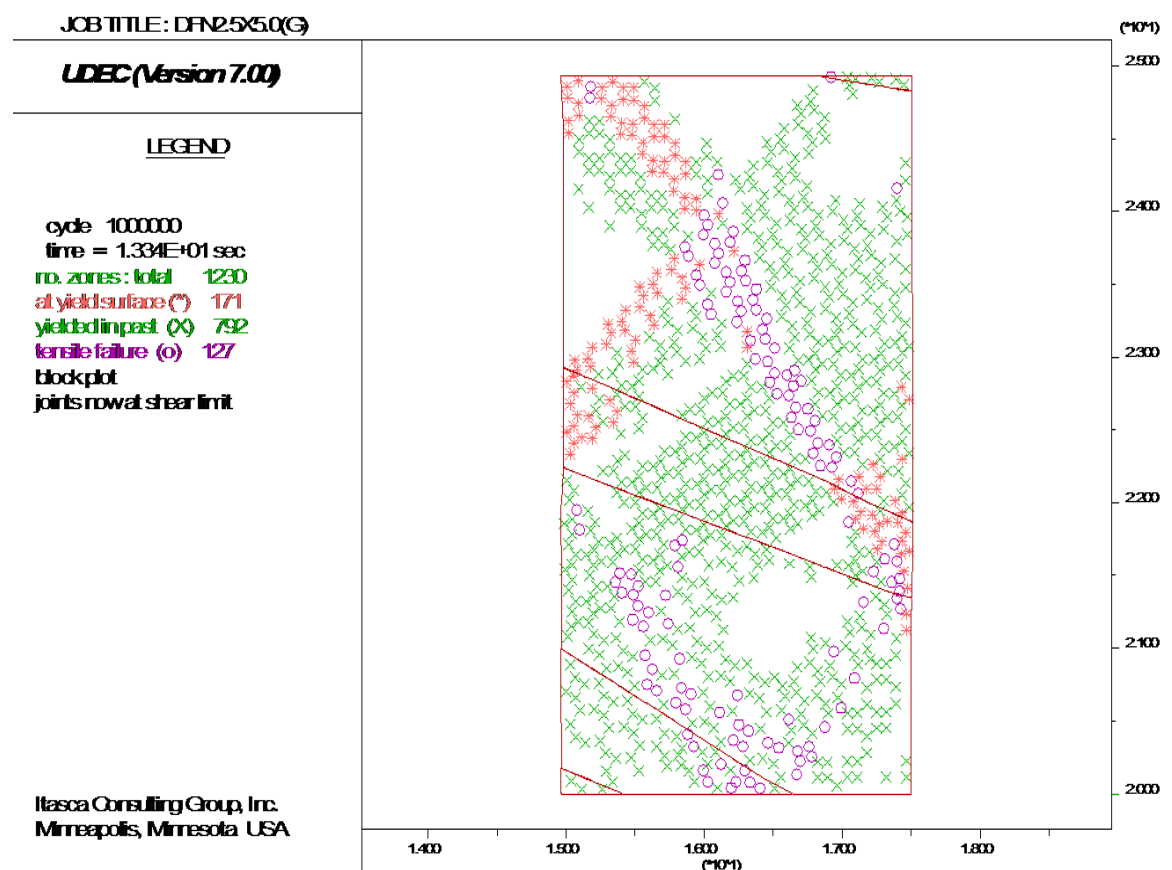
Διάγραμμα 30. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (F) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 51 Μpa.



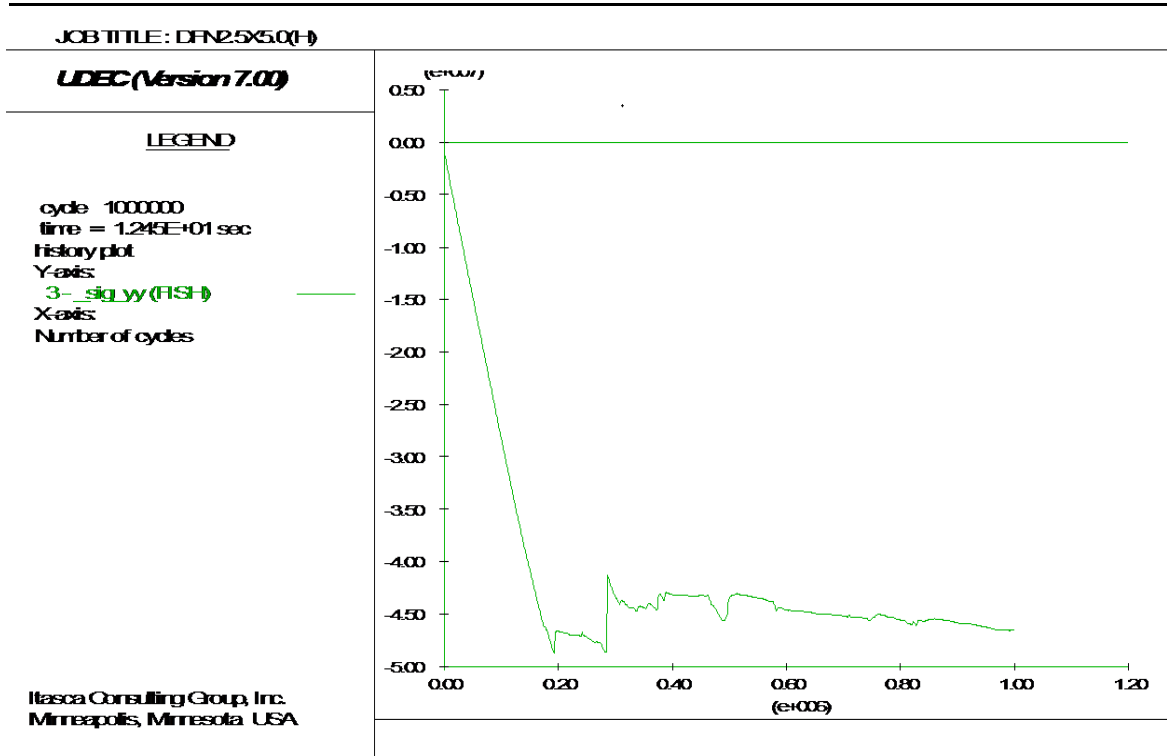
Σχήμα 63. Απεικόνιση δοκίμιου (F) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και η διαμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



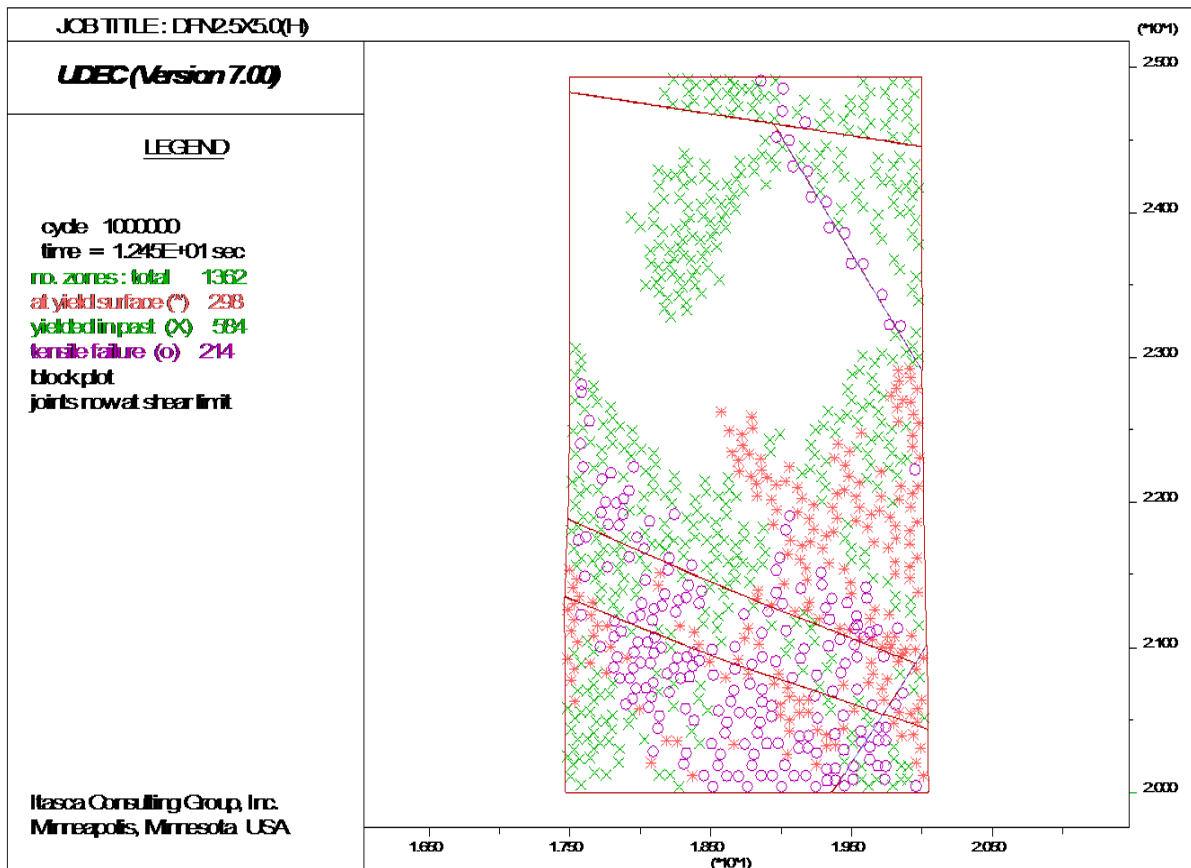
Διάγραμμα 31. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (G) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 43Μpa.



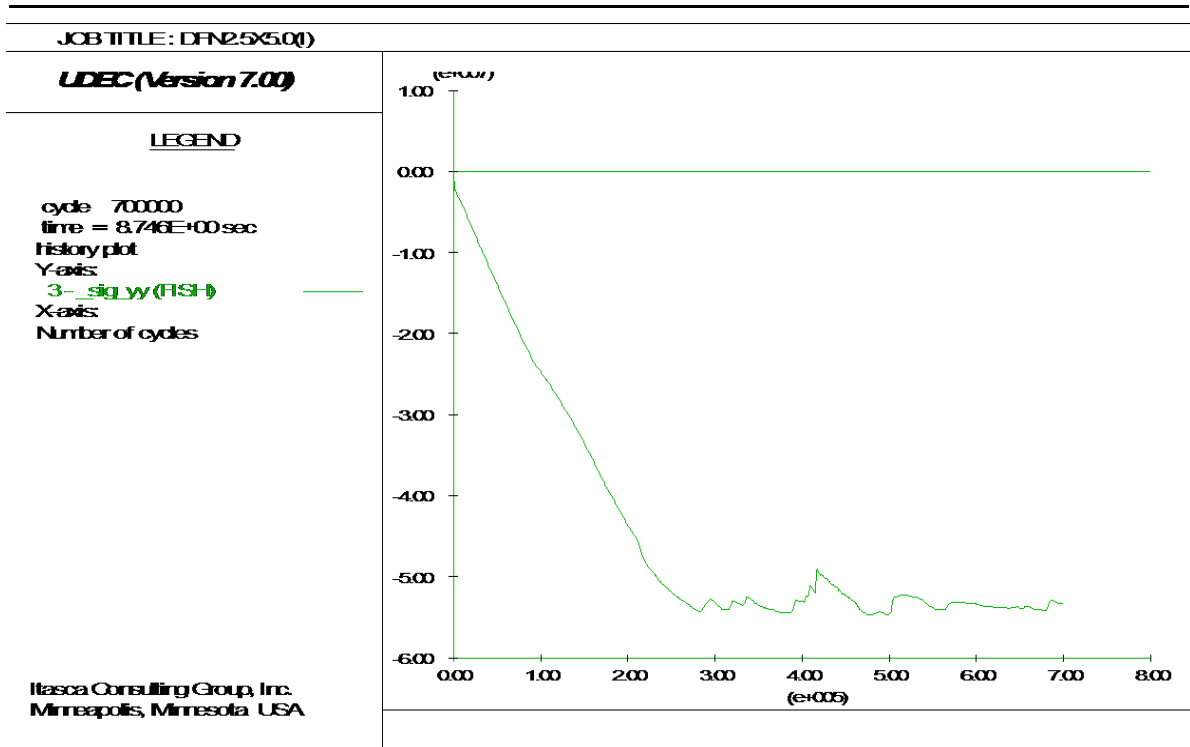
Σχήμα 64. Απεικόνιση δοκιμίου (G) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.



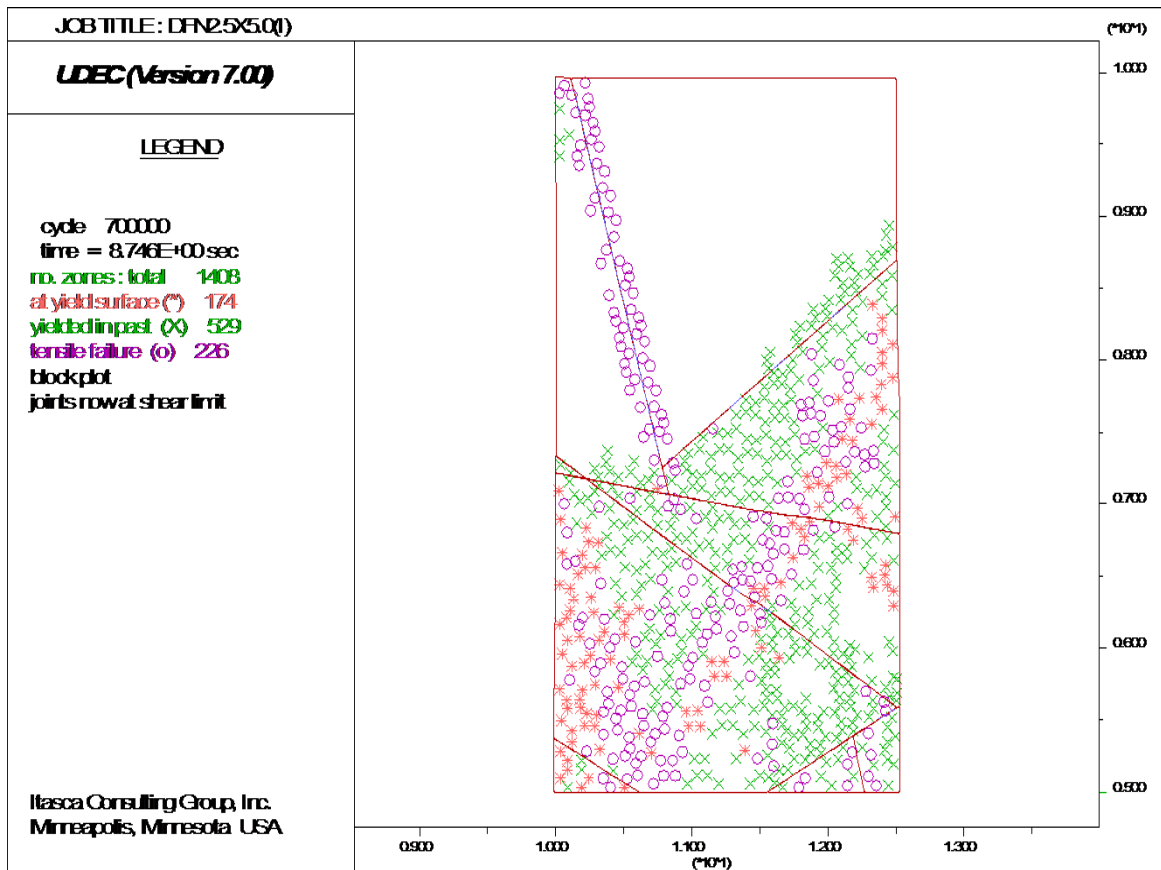
Διάγραμμα 32. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (H) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 49Μρα.



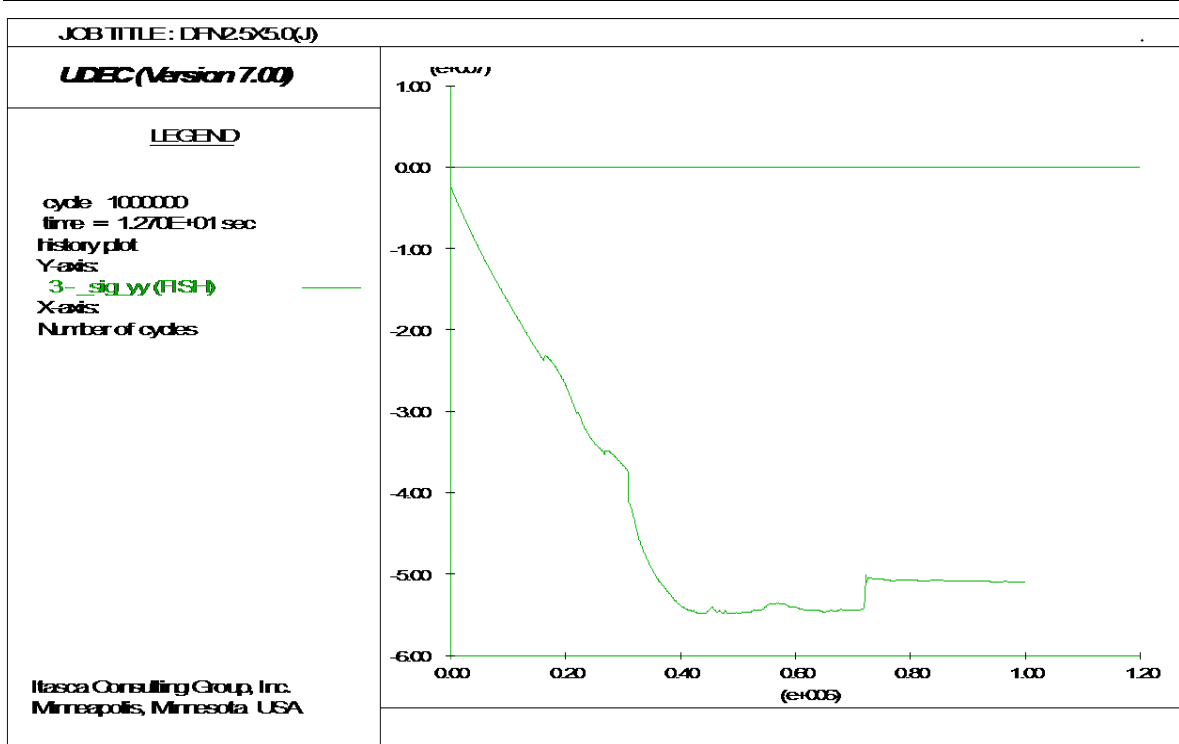
Σχήμα 65. Απεικόνιση δοκίμιου (H) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



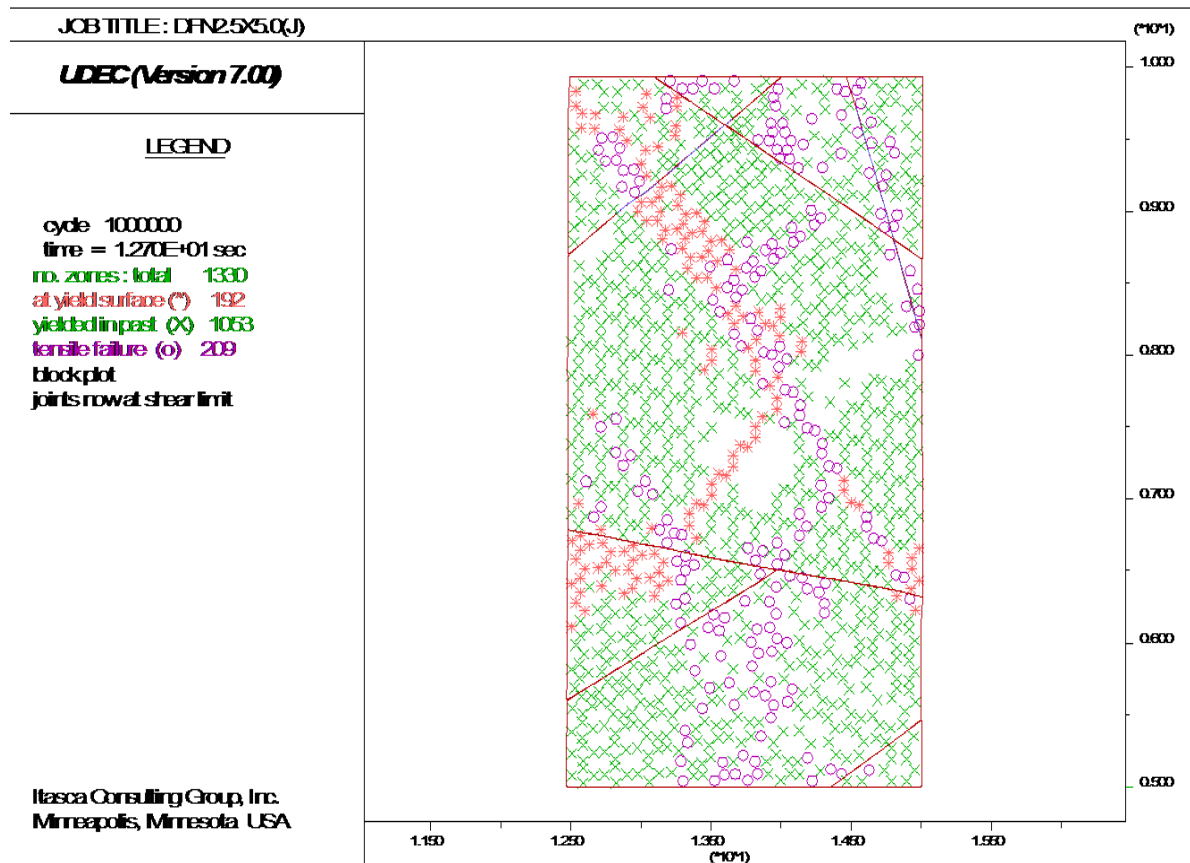
Διάγραμμα 33. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (I) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 54Μpa.



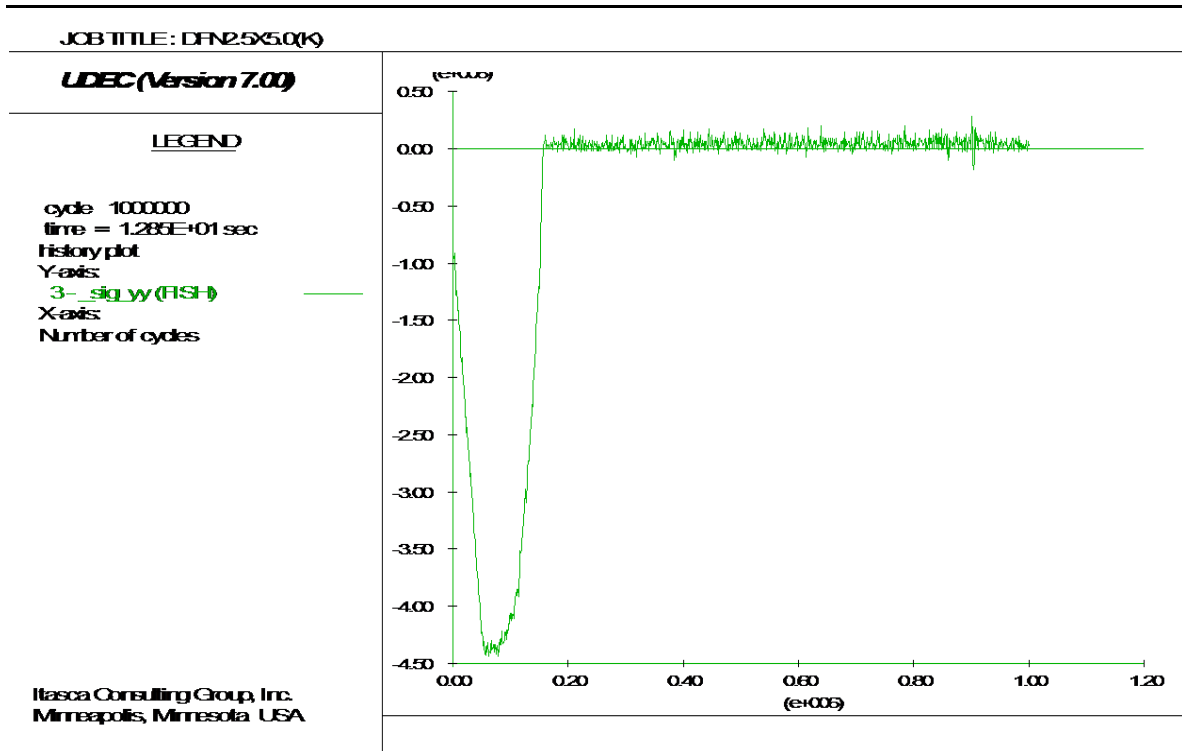
Σχήμα 66. Απεικόνιση δοκίμιου (I) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



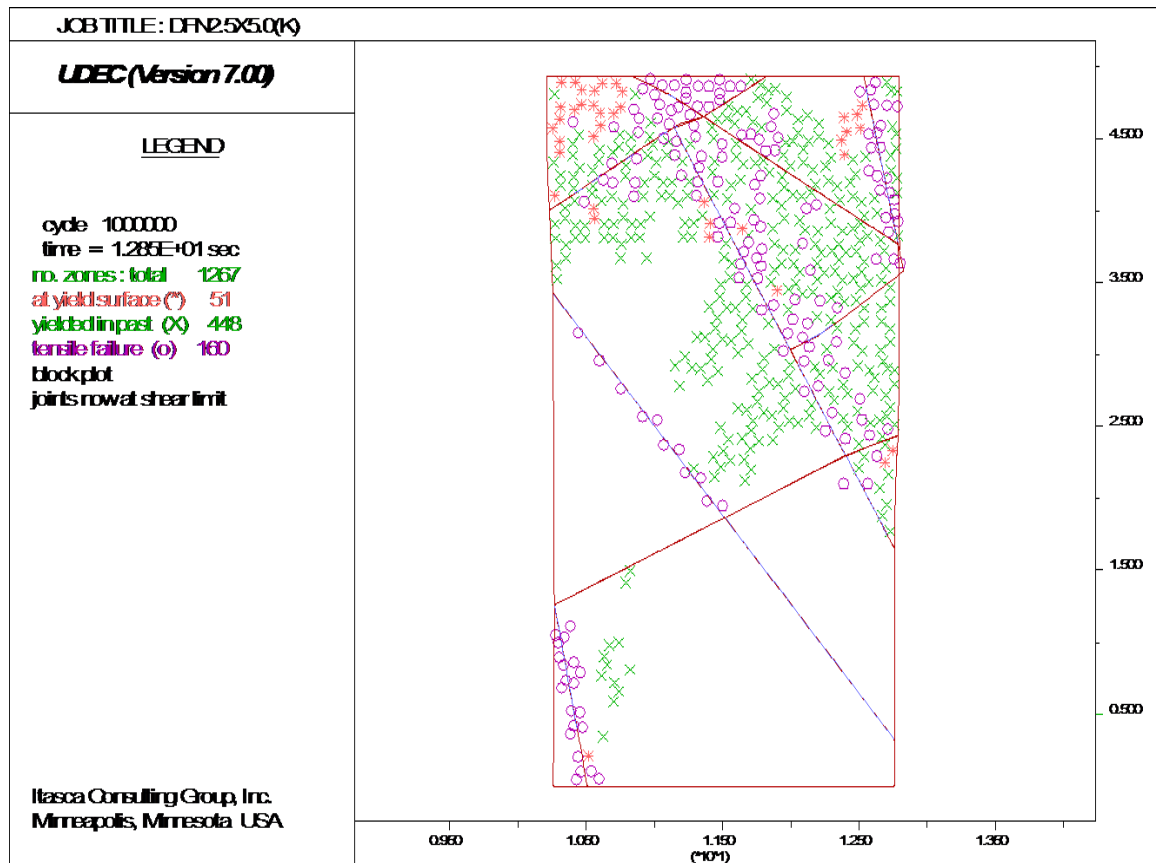
Διάγραμμα 34. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (J) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 55Μρα.



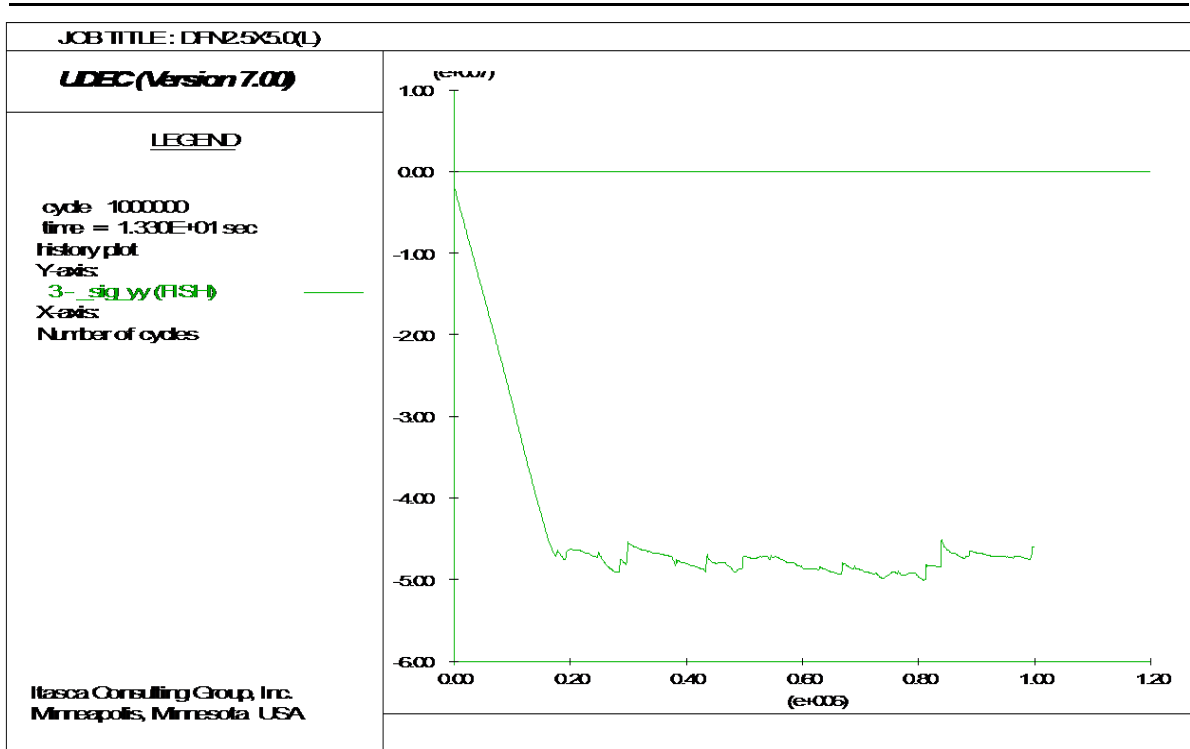
Σχήμα 67. Απεικόνιση δοκίμιου (J) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



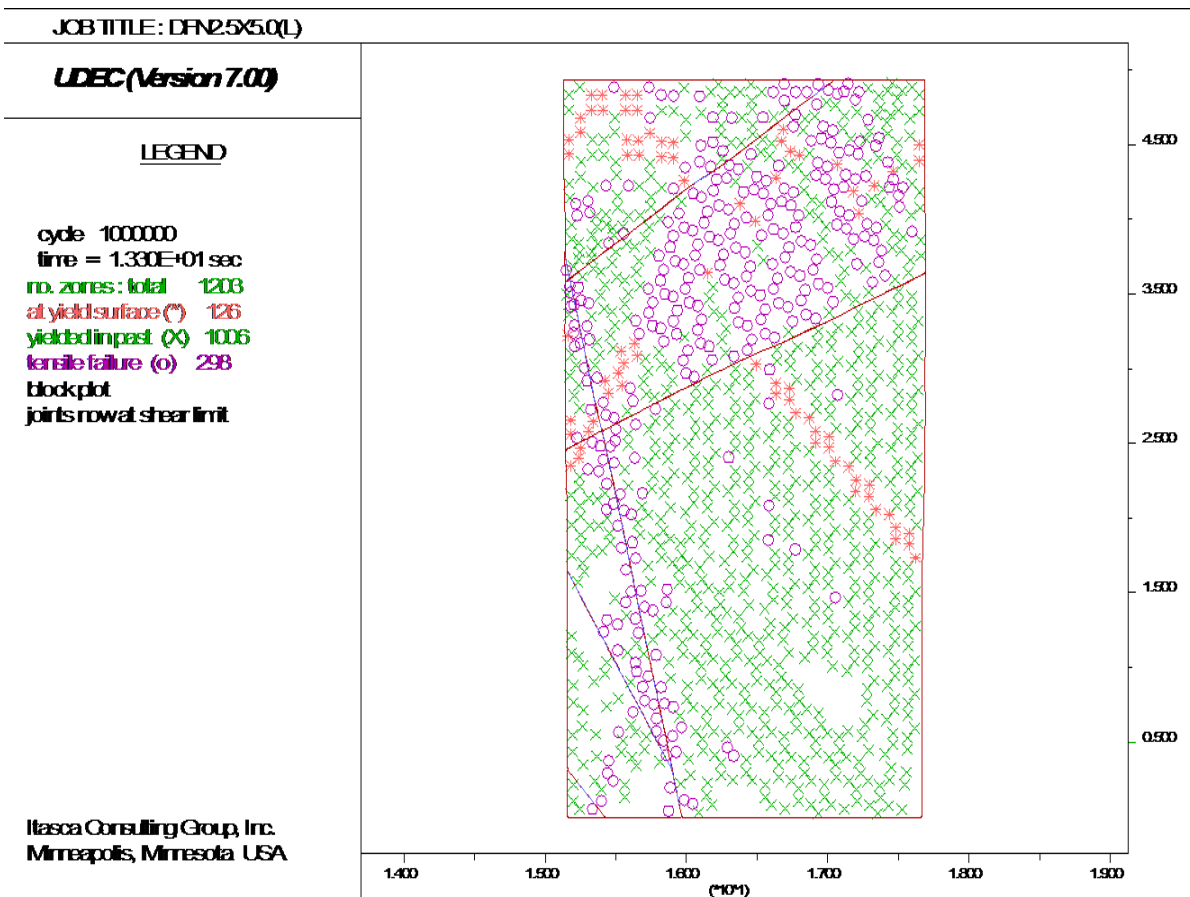
Διάγραμμα 35. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (Κ) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 4.5Μpa.



Σχήμα 68. Απεικόνιση δοκίμιου (Κ) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.

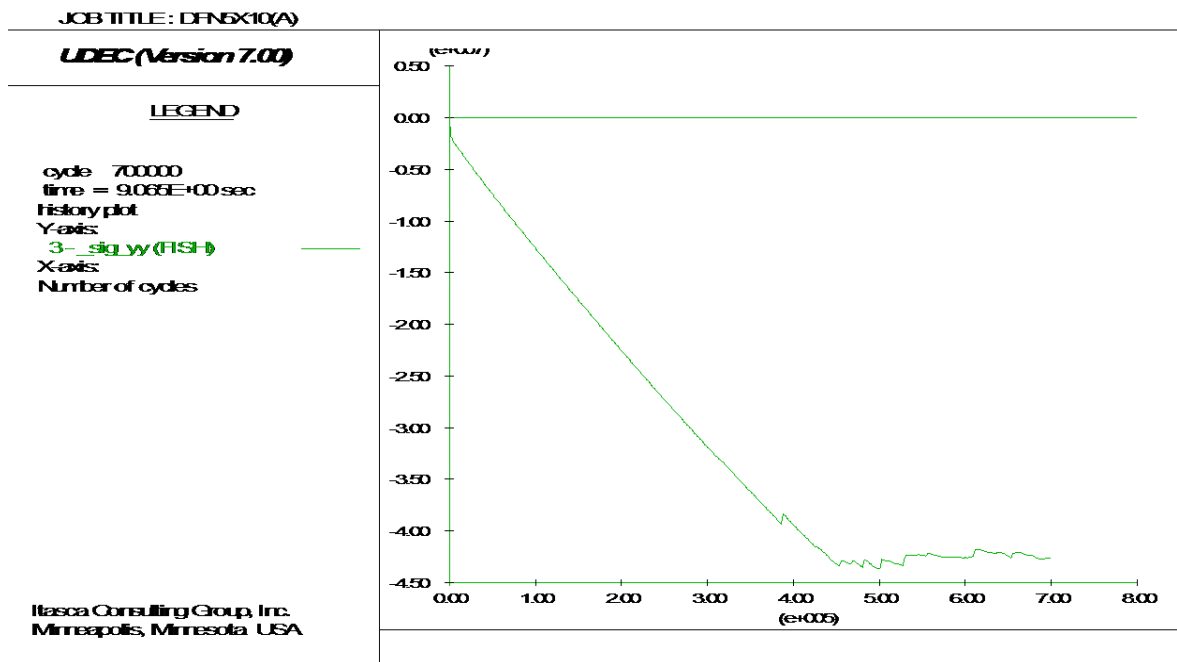


Διάγραμμα 36. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (L) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 4.5Μρα.

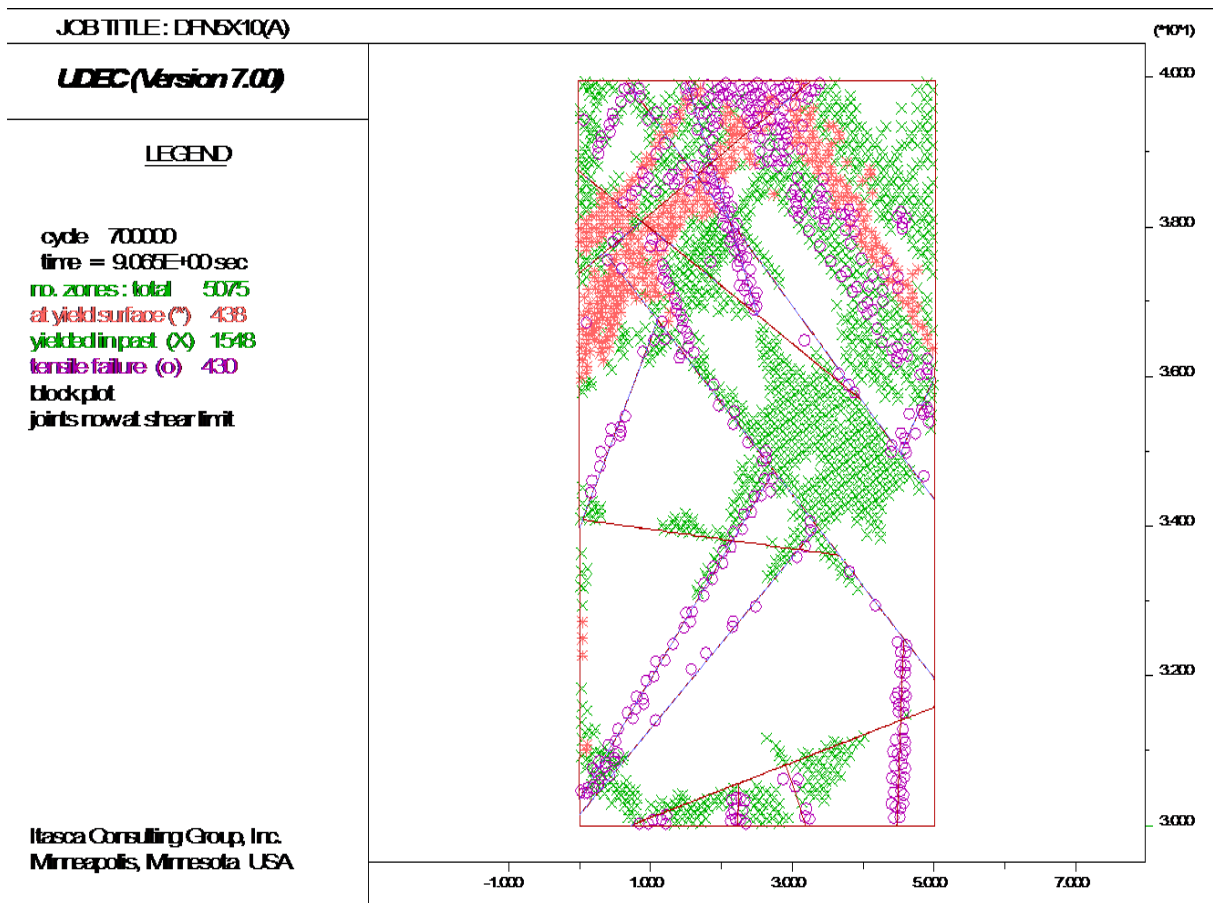


Σχήμα 69. Απεικόνιση δοκίμιου (L) διαστάσεων 2.5x5.0m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.

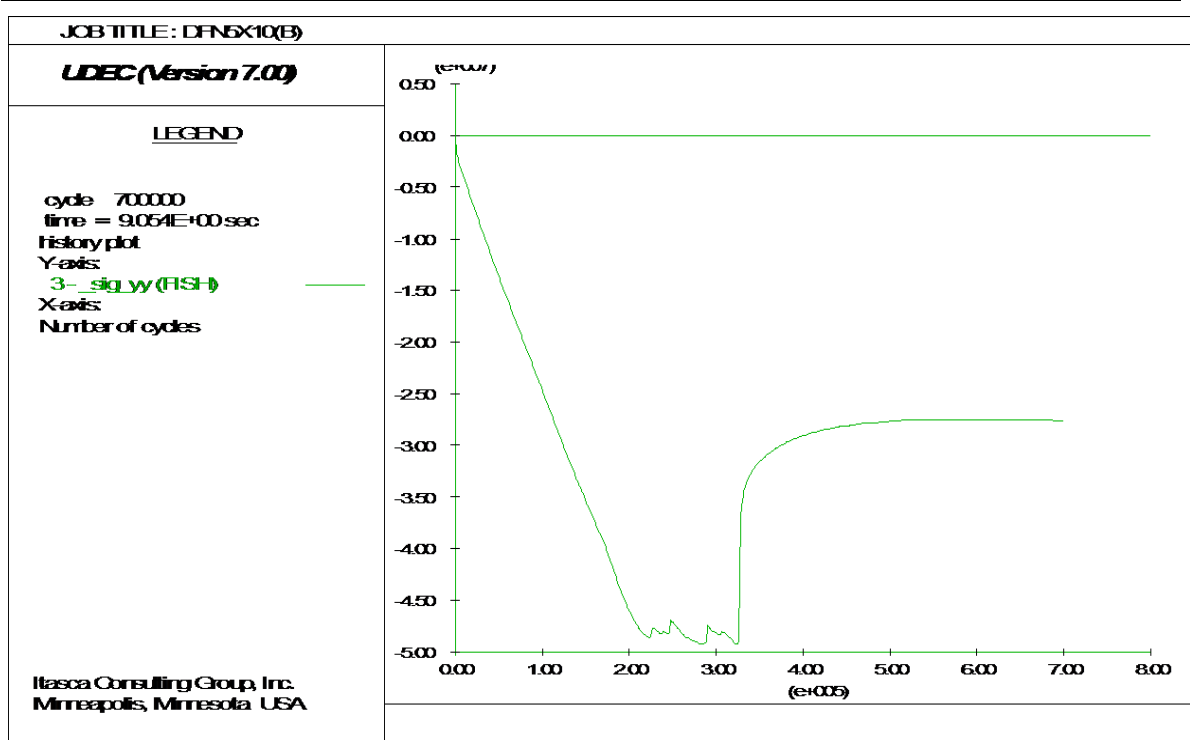
5.2.3. Αποτελέσματα δοκιμών διαστάσεων 5x10 m



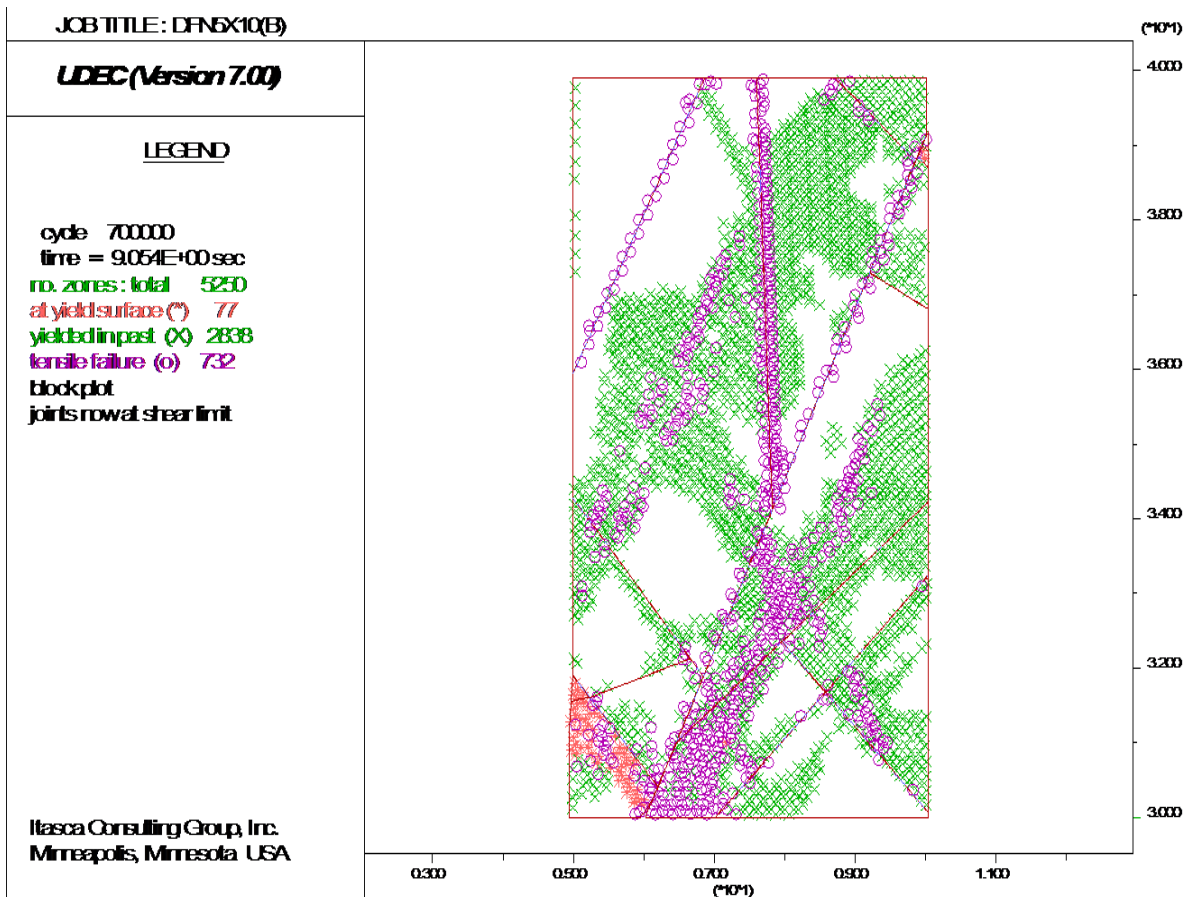
Διάγραμμα 37. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (A) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 44Μpa.



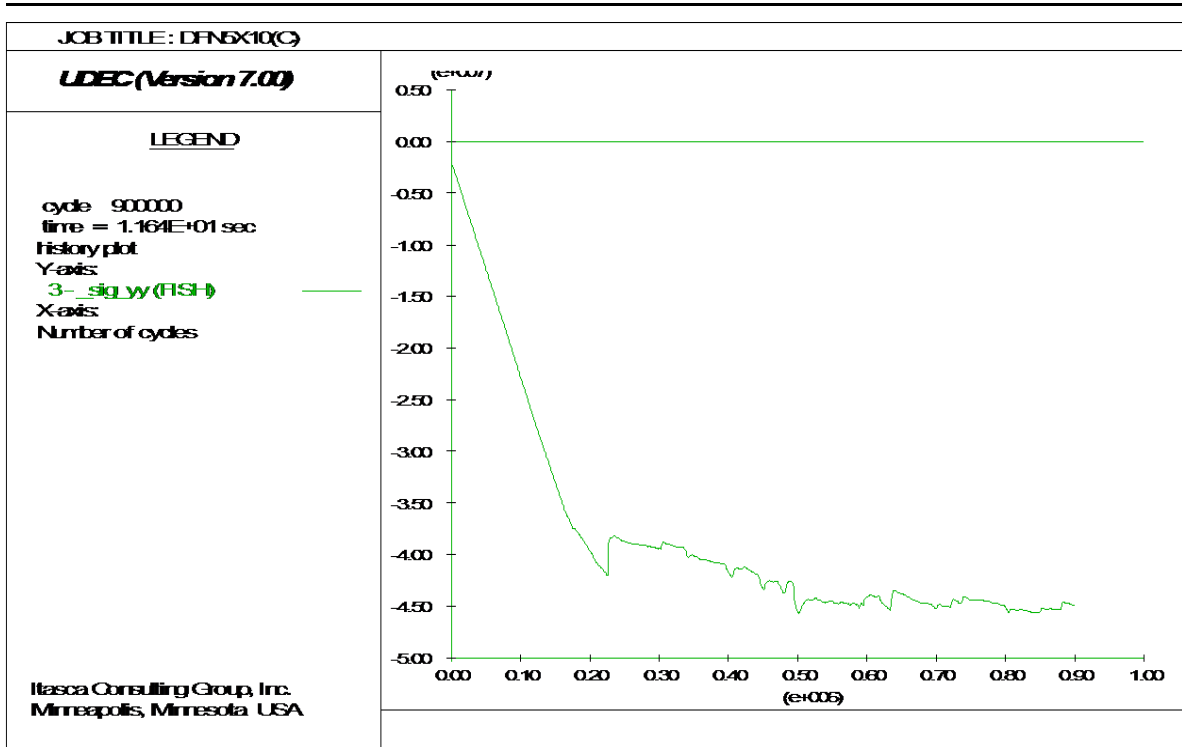
Σχήμα 70. Απεικόνιση δοκιμίου (A) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



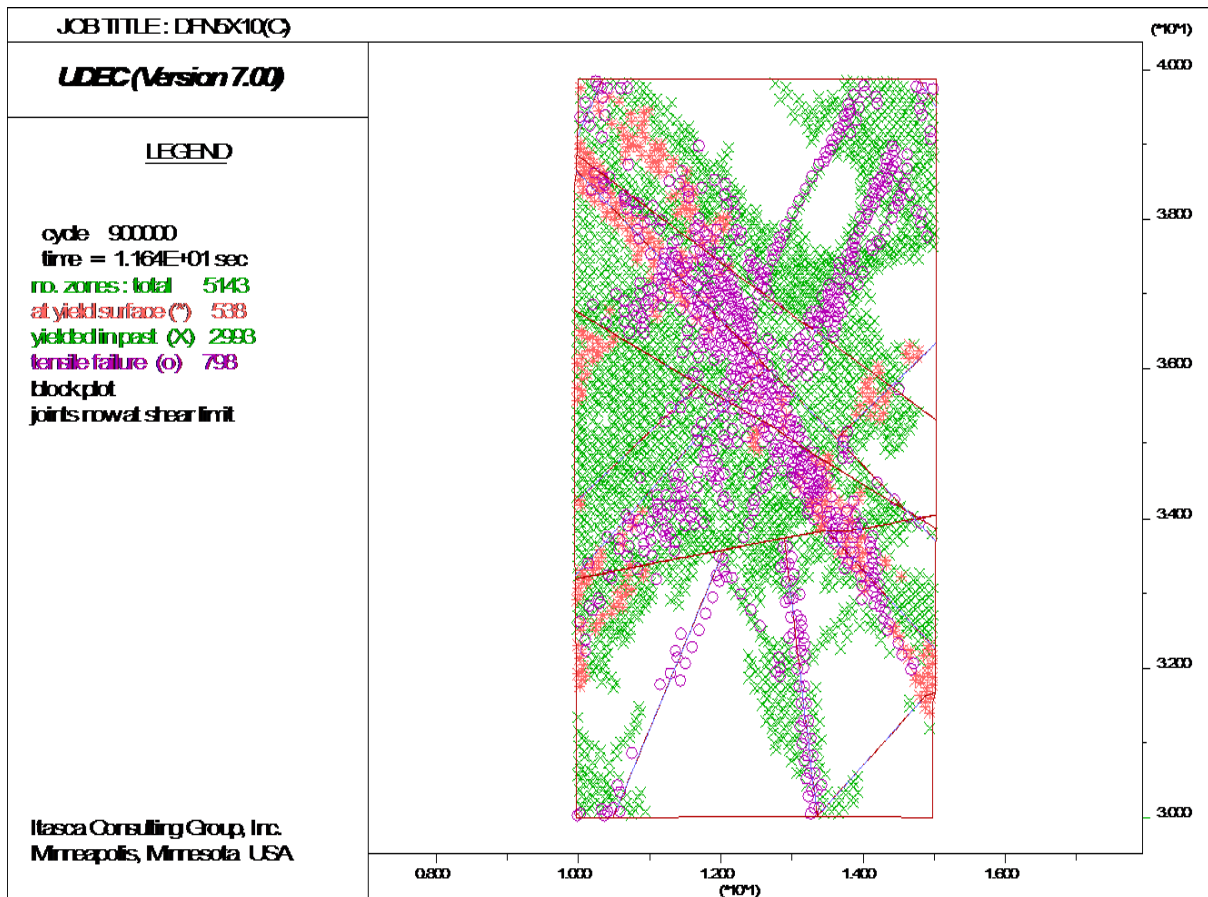
Διάγραμμα 38. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (B) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 49Μpa.



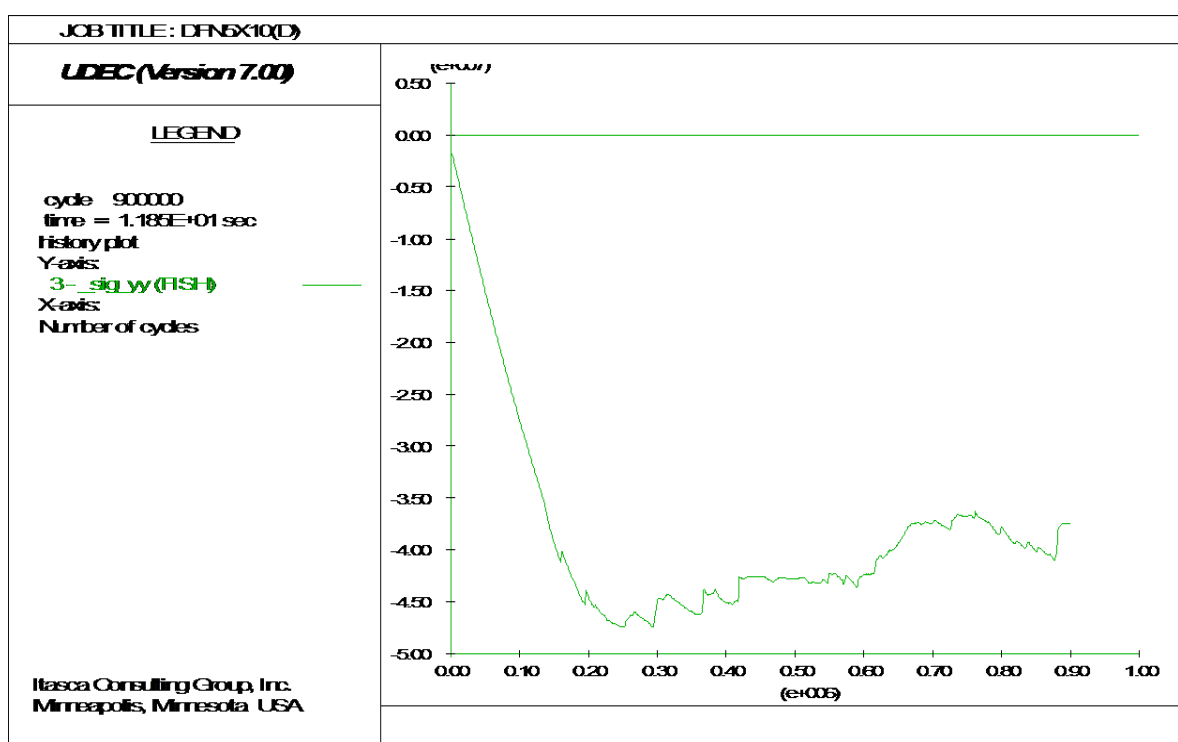
Σχήμα 71. Απεικόνιση δοκίμιου (B) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



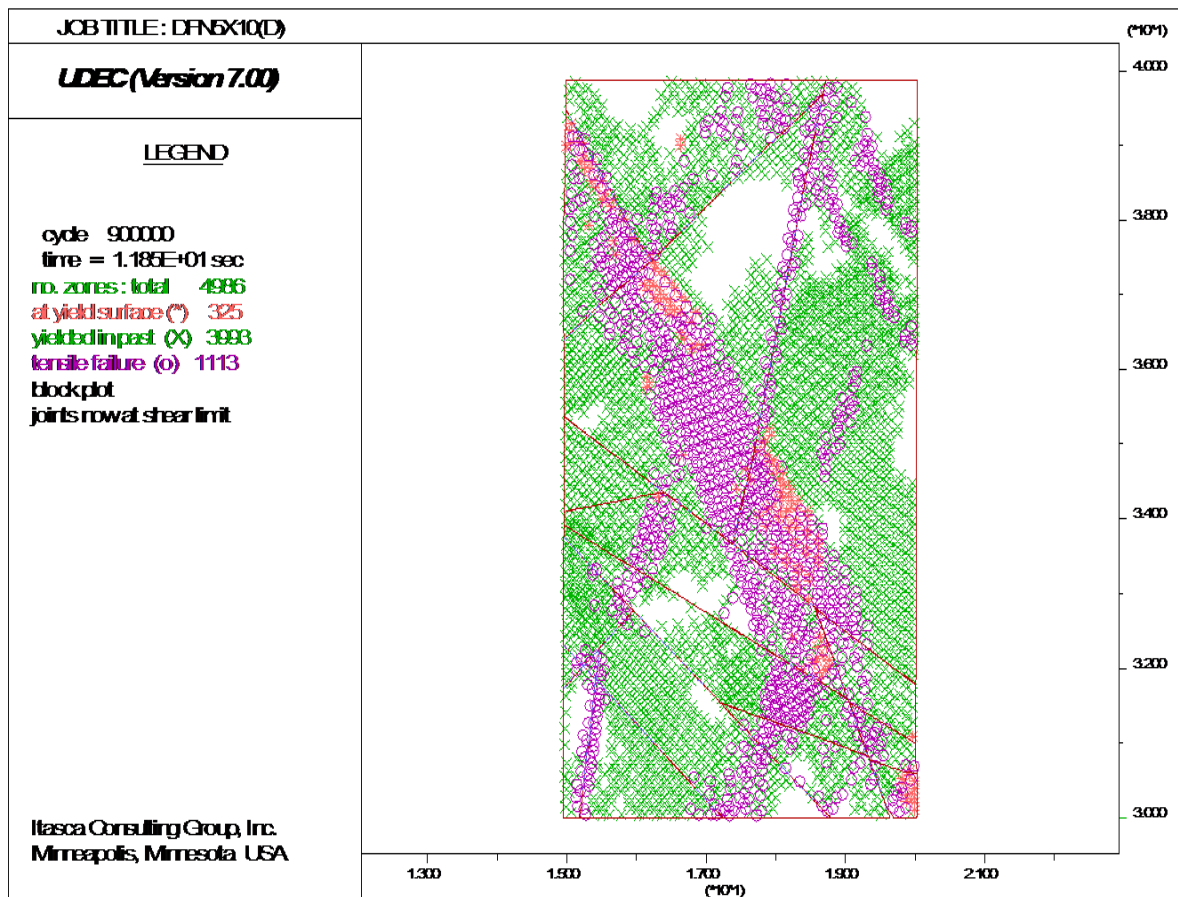
Διάγραμμα 39. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (C) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 45Μpa.



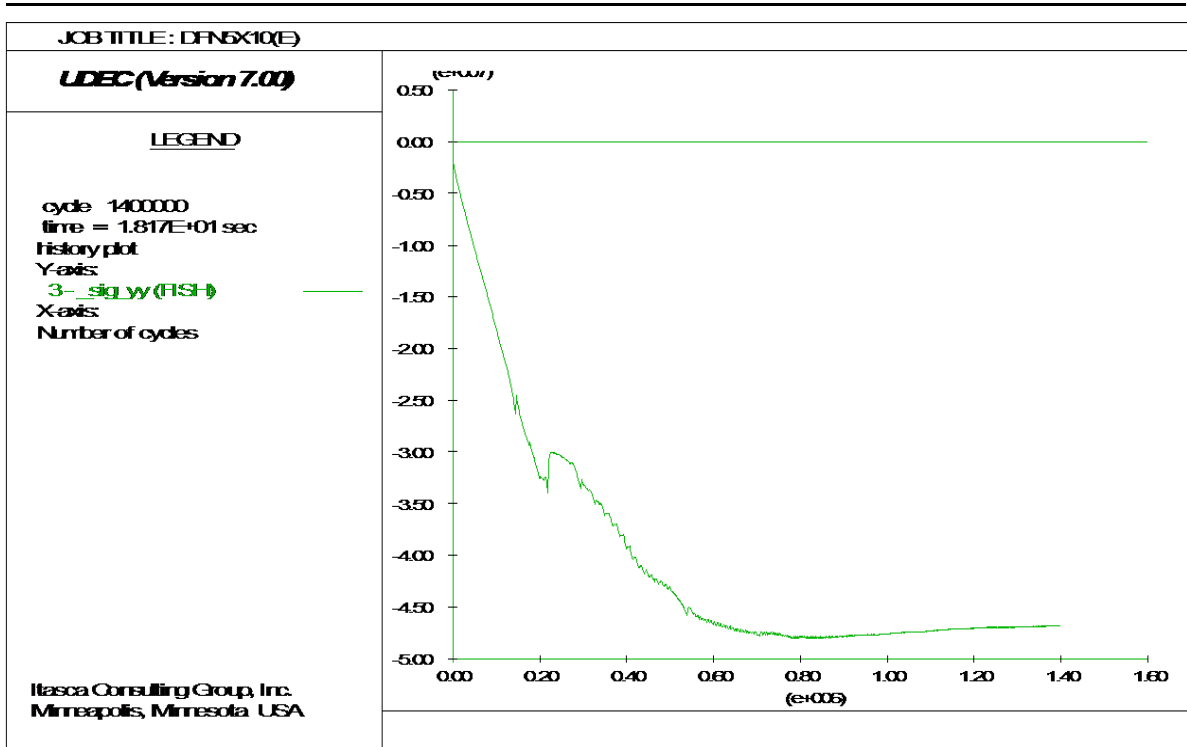
Σχήμα 72. Απεικόνιση δοκιμίου (C) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



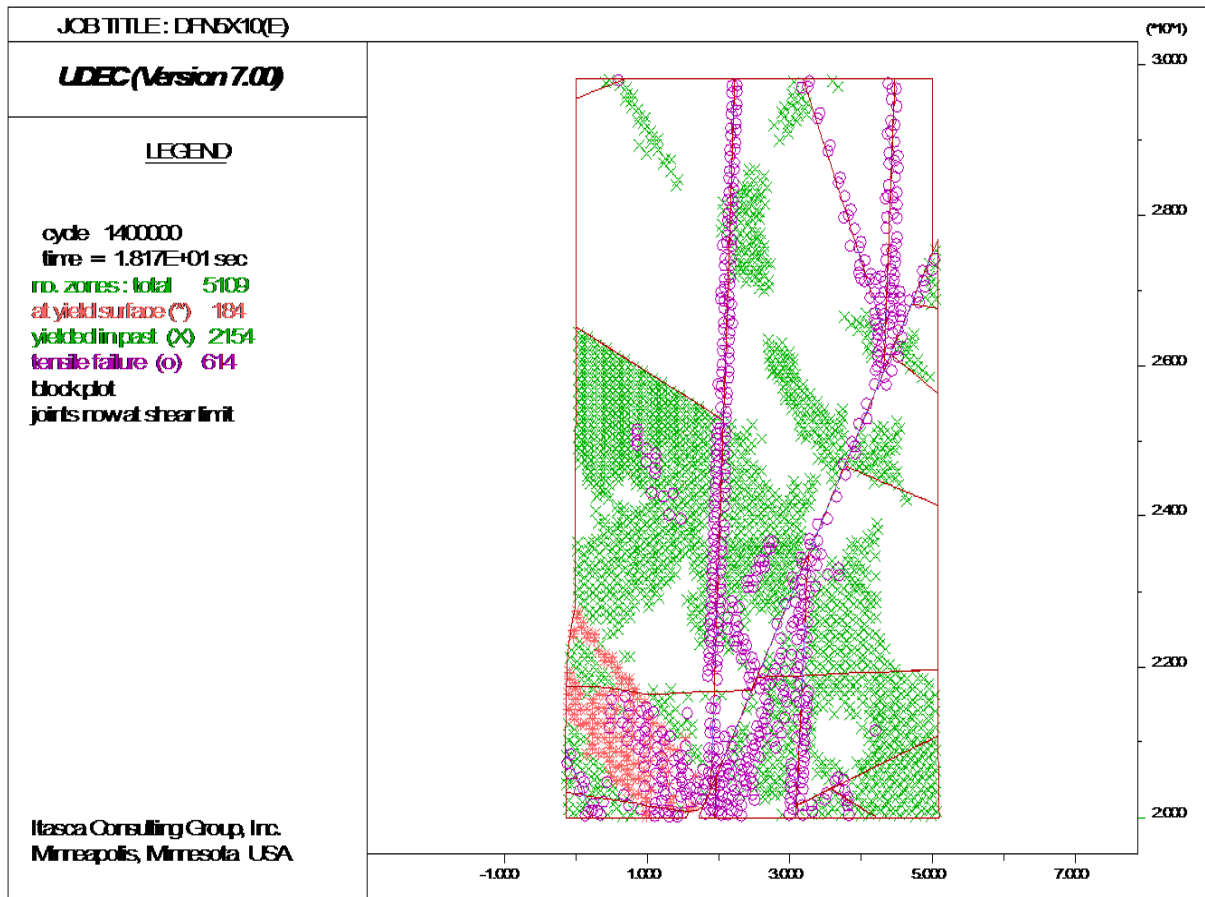
Διάγραμμα 40. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (D) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 46Μpa.



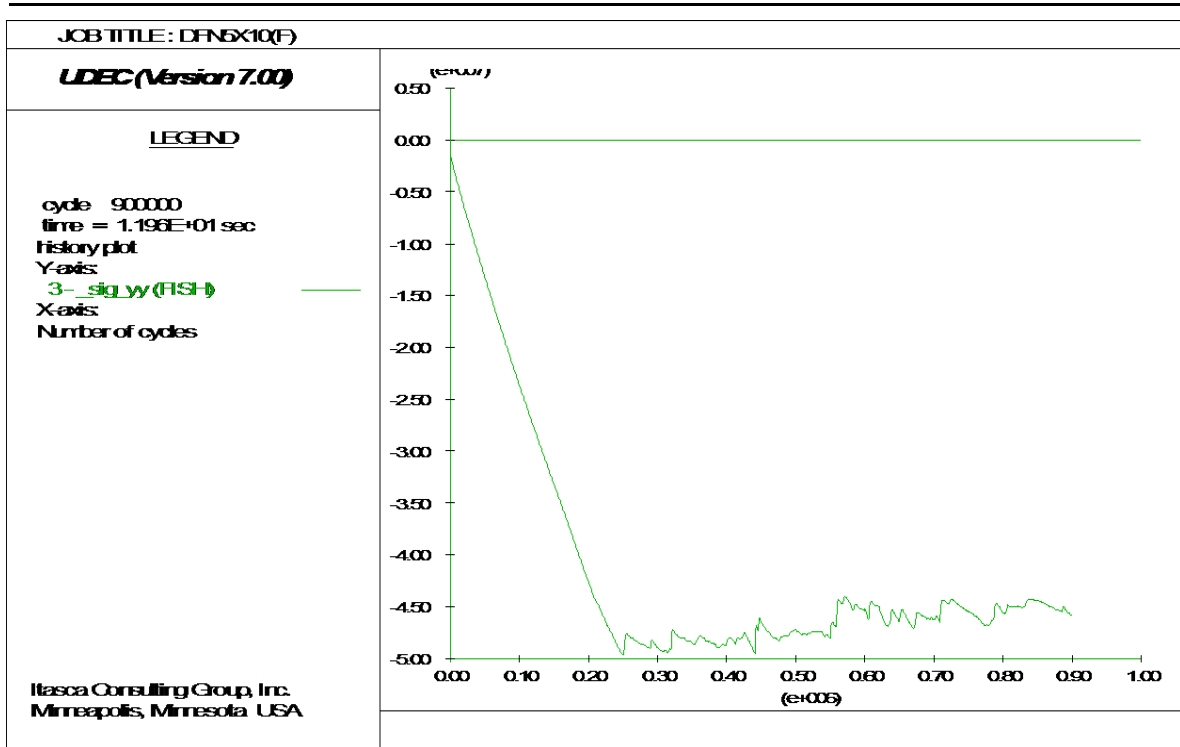
Σχήμα 73. Απεικόνιση δοκιμίου (D) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



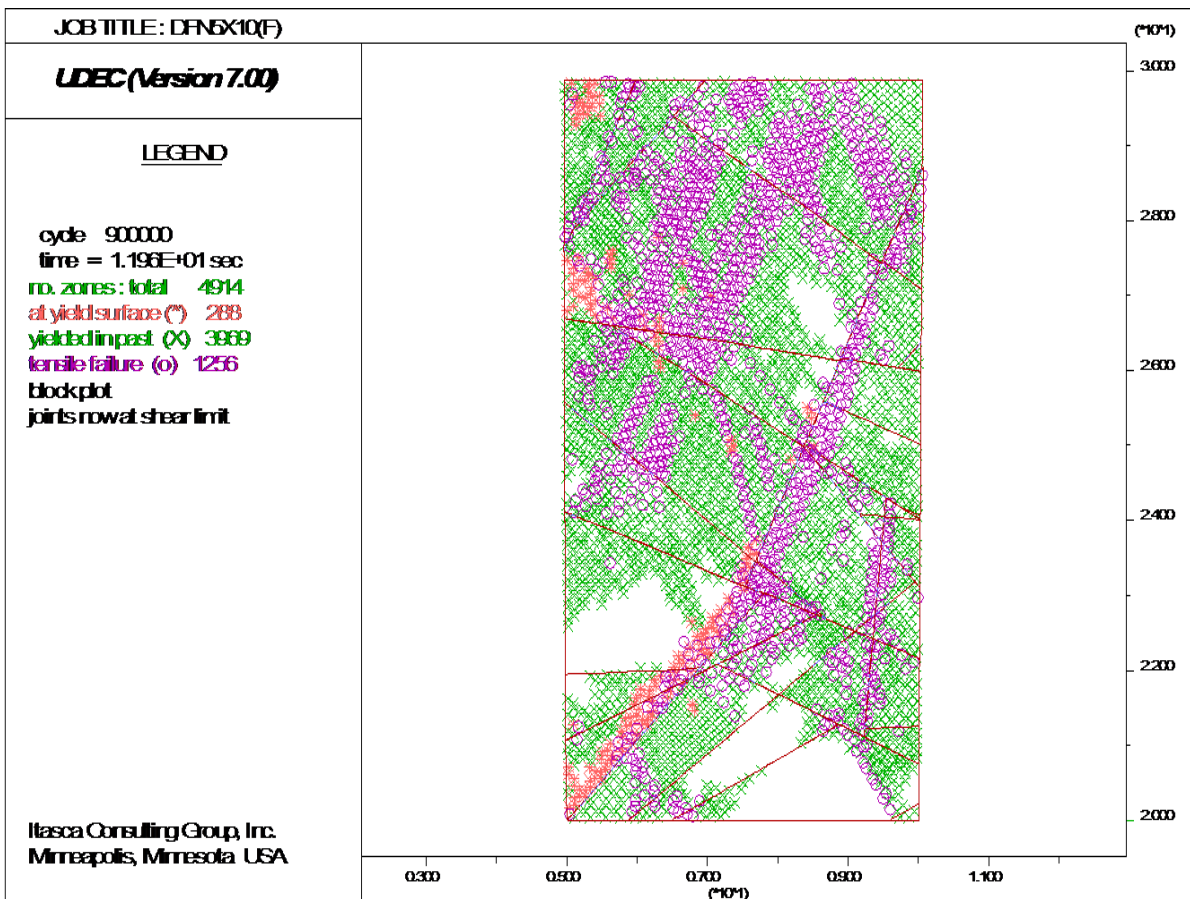
Διάγραμμα 41. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (E) διαστάσεων 5x 10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 48Μρα.



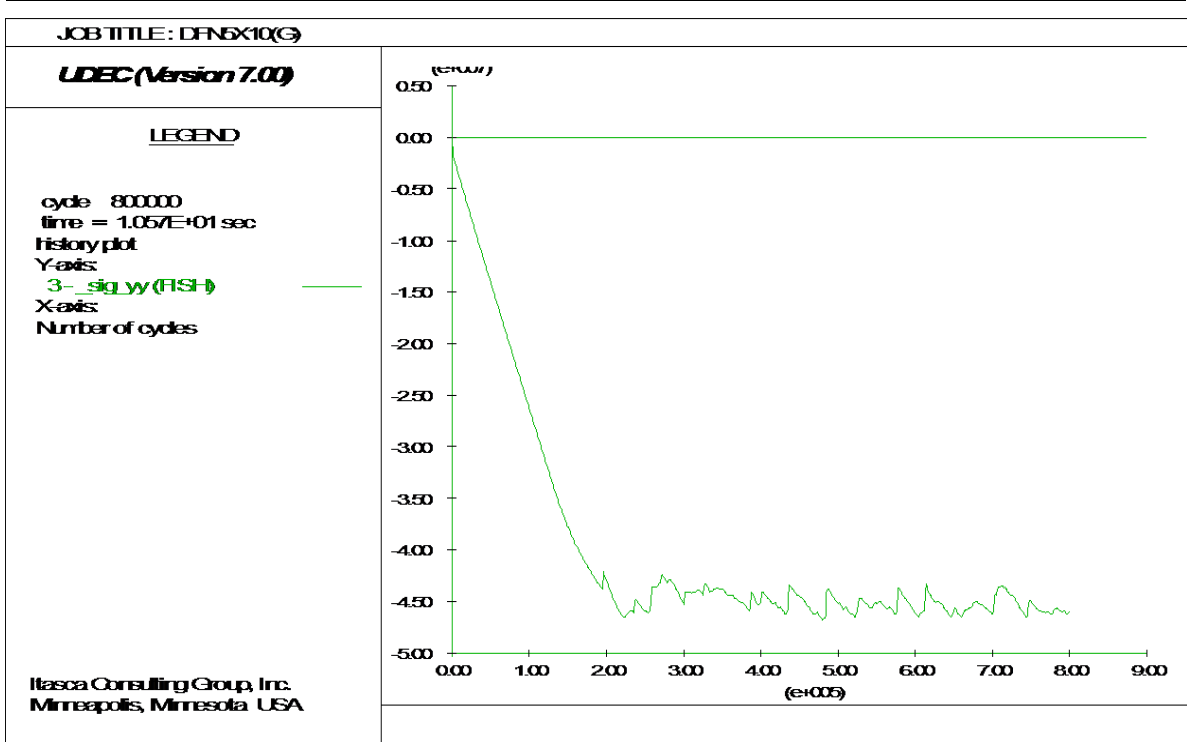
Σχήμα 74. Απεικόνιση δοκίμίου (E) διαστάσεων 5x 10m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



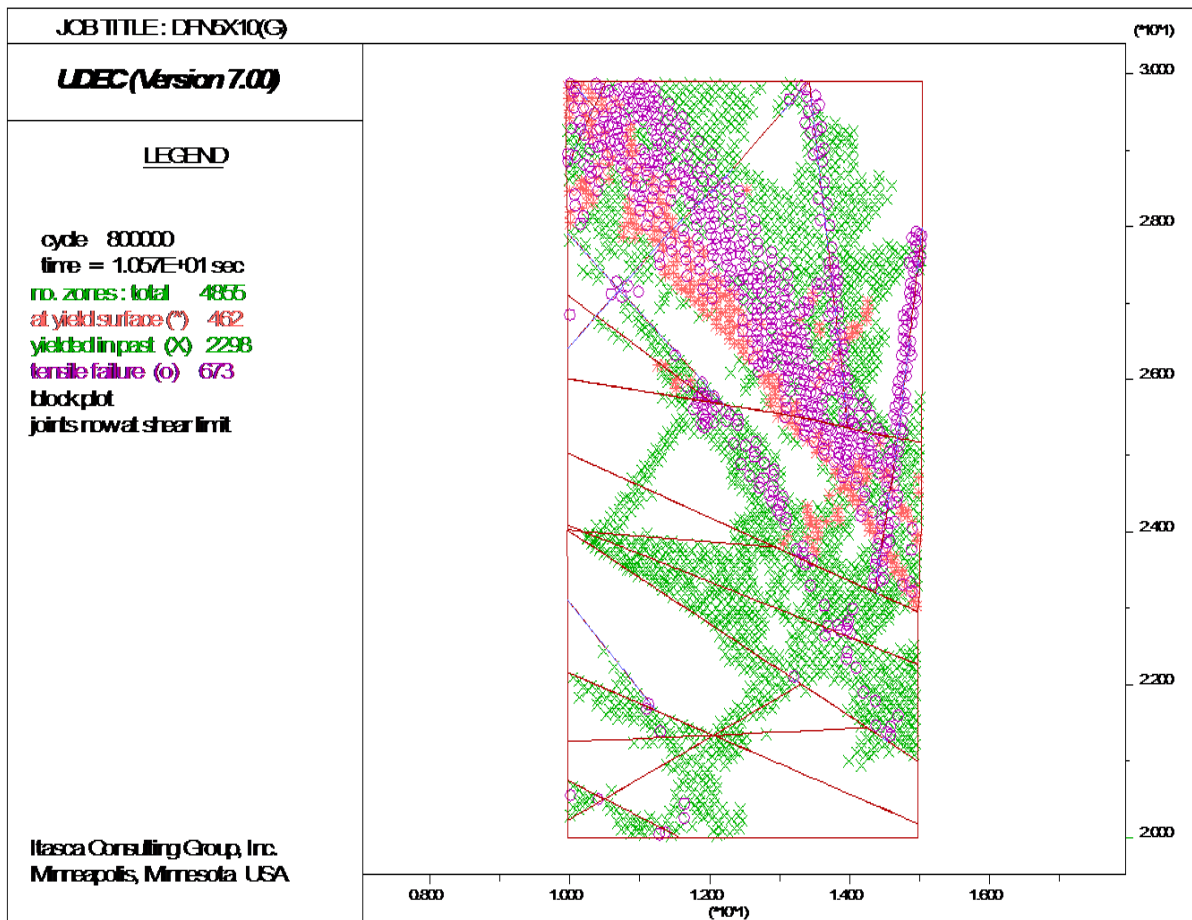
Διάγραμμα 42. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (F) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 49Μpa.



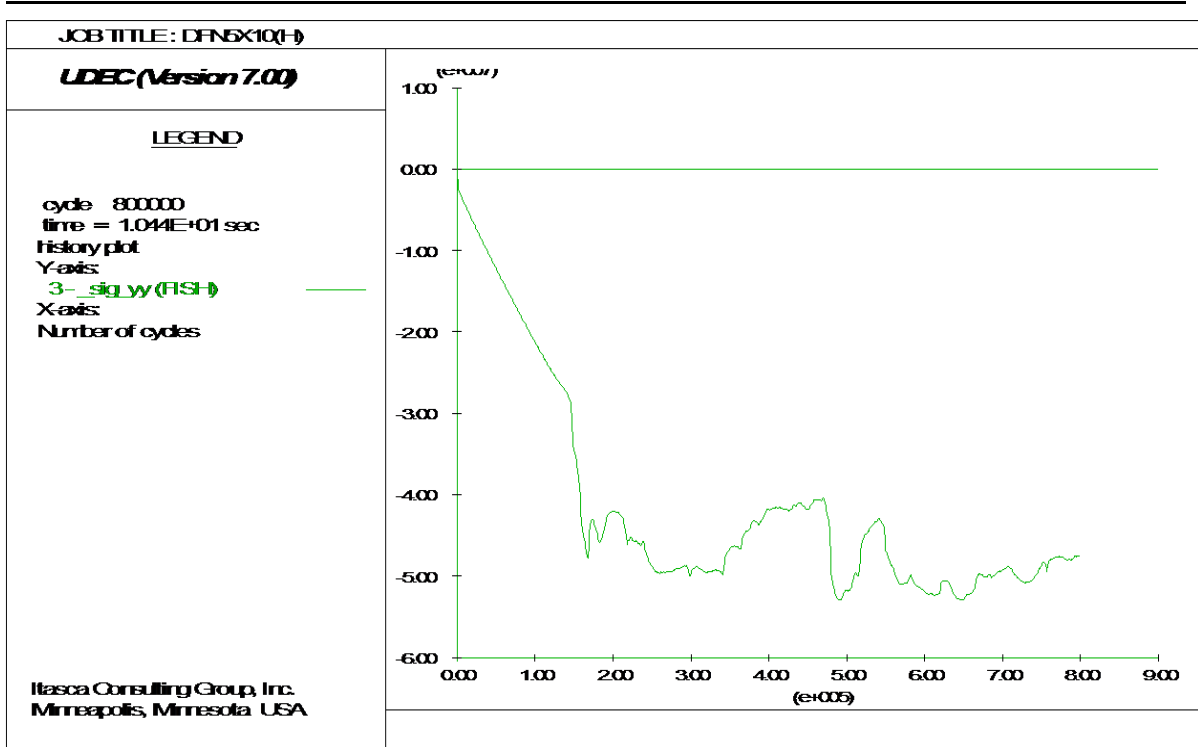
Σχήμα 75. Απεικόνιση δοκίμιου (F) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



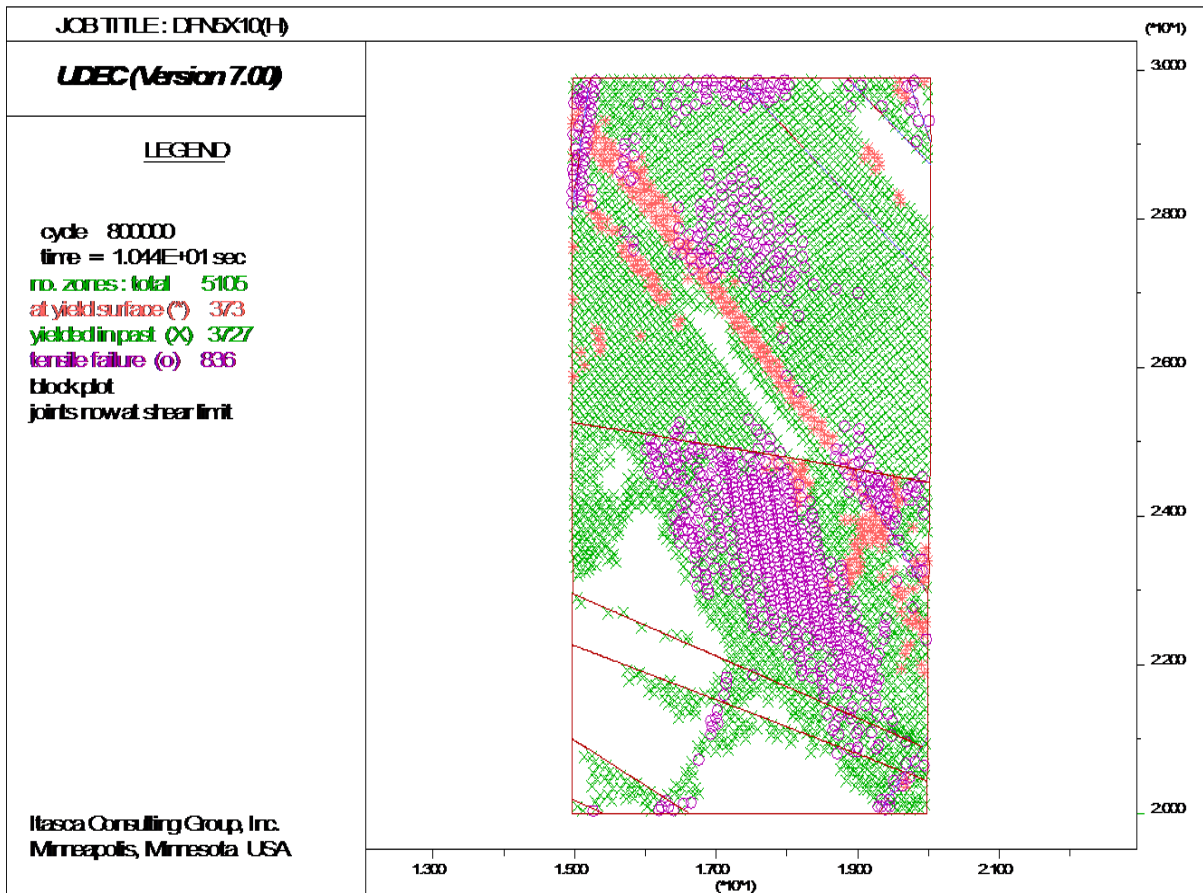
Διάγραμμα 43. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (G) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 47Μpa.



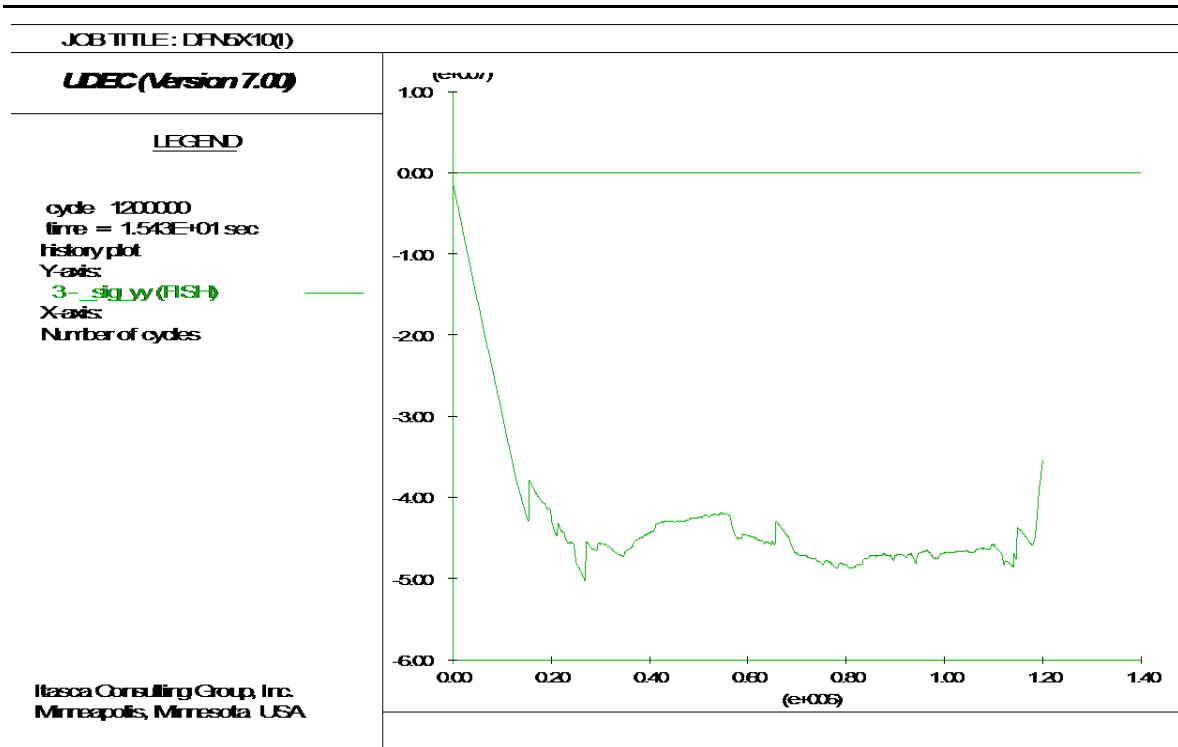
Σχήμα 76. Απεικόνιση δοκιμίου (G) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



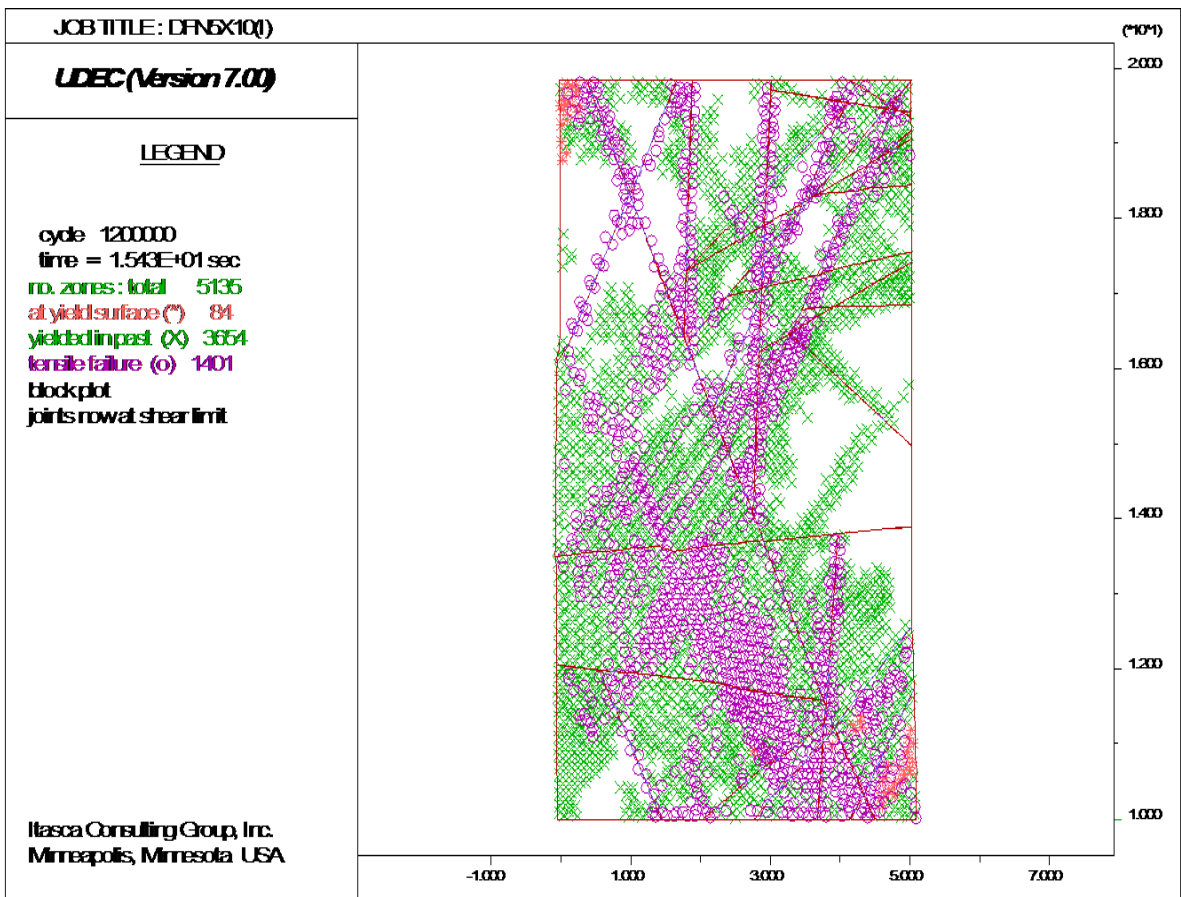
Διάγραμμα 44. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (H) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 52Μρα.



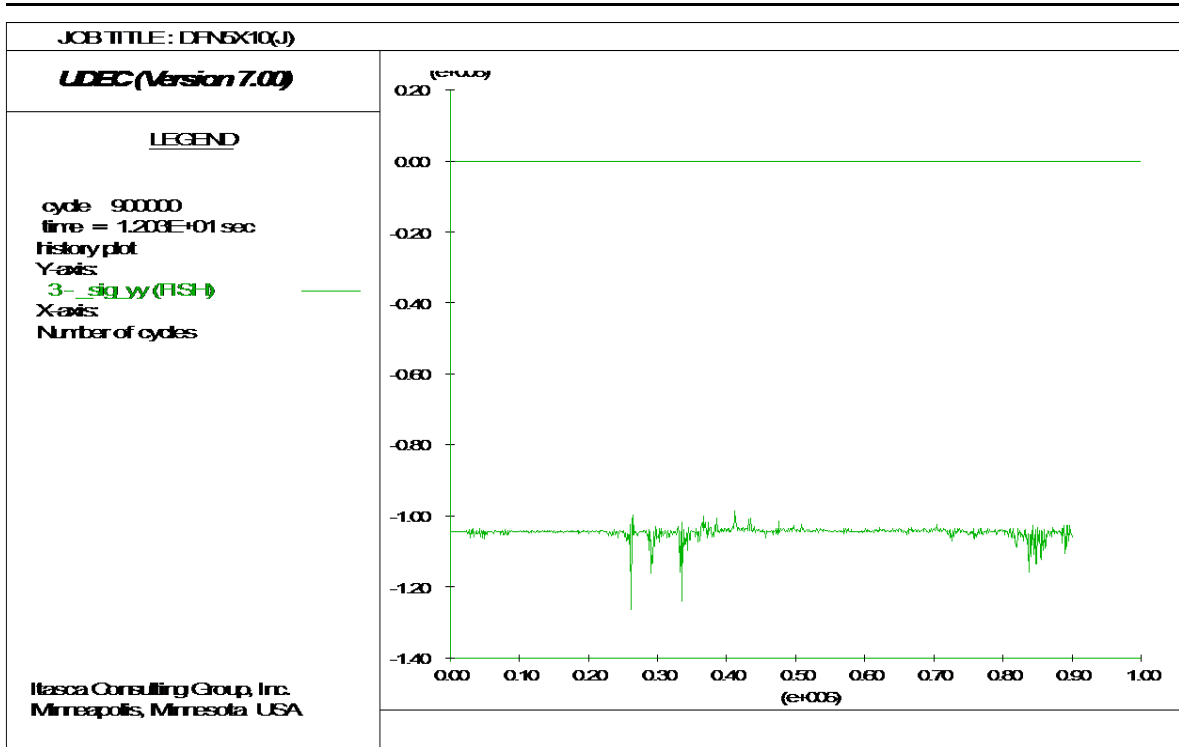
Σχήμα 77. Απεικόνιση δοκίμιου (H) διαστάσεων 5x 10m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



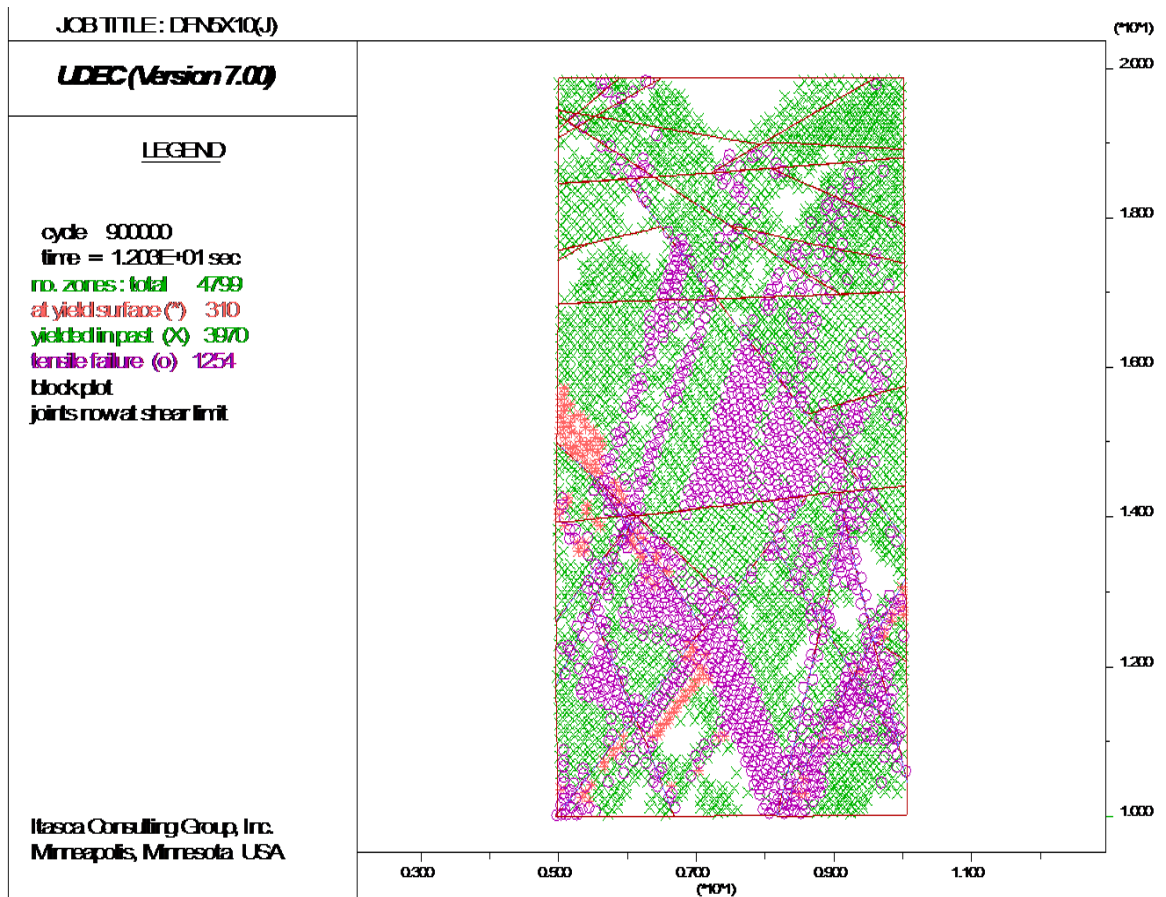
Διάγραμμα 45. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (I) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 50Μpa.



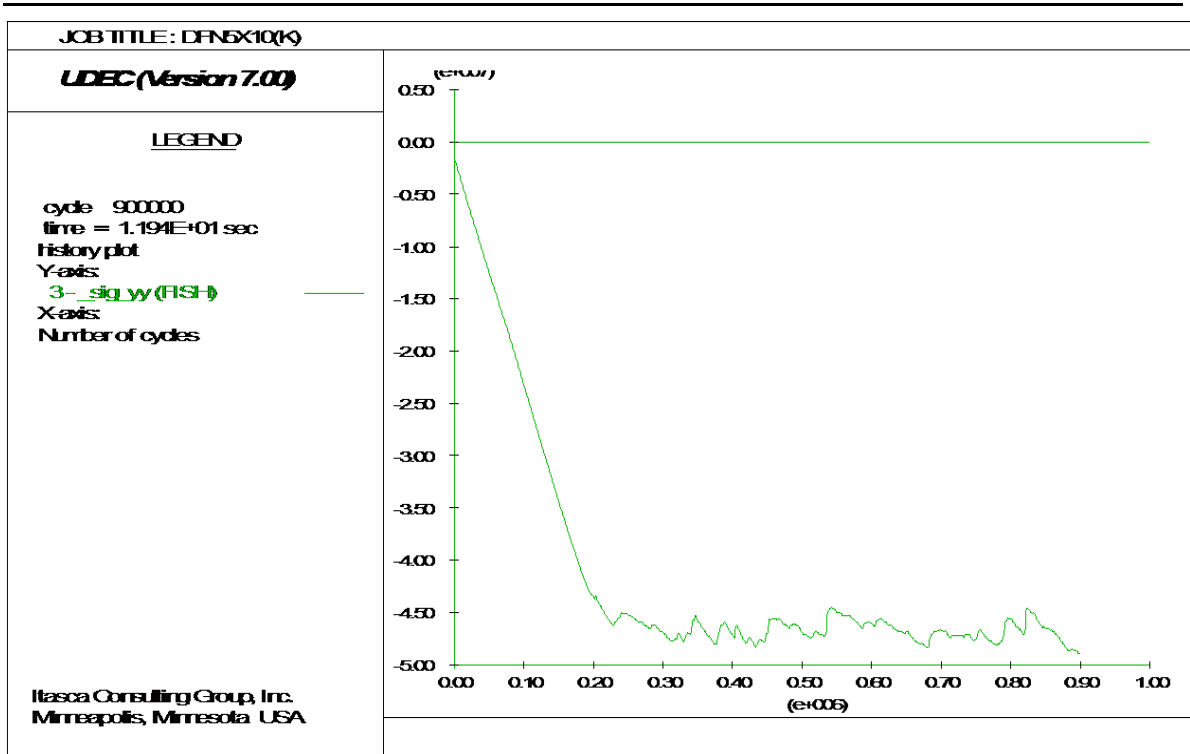
Σχήμα 78. Απεικόνιση δοκίμιου (I) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών, καθώς και η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος.



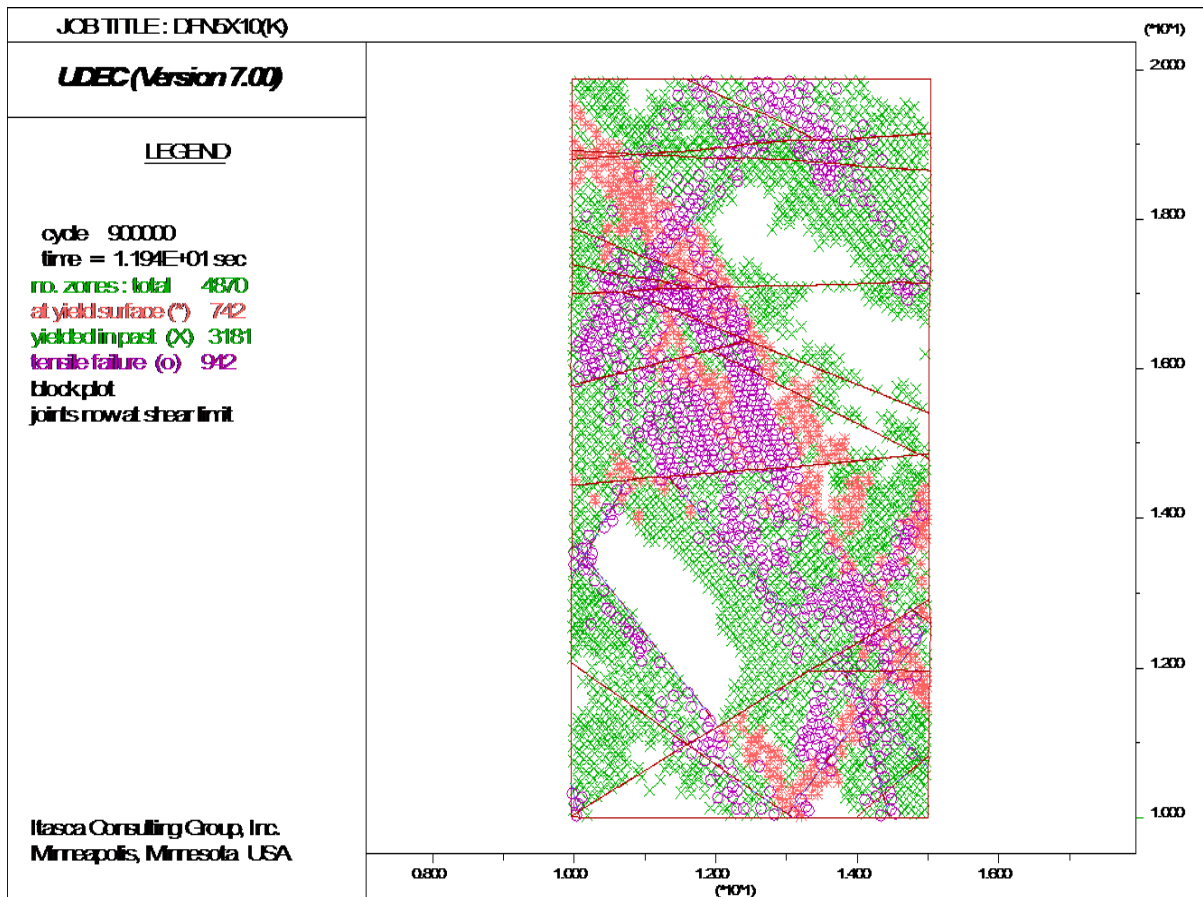
Διάγραμμα 46. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (J) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 1Μpa.



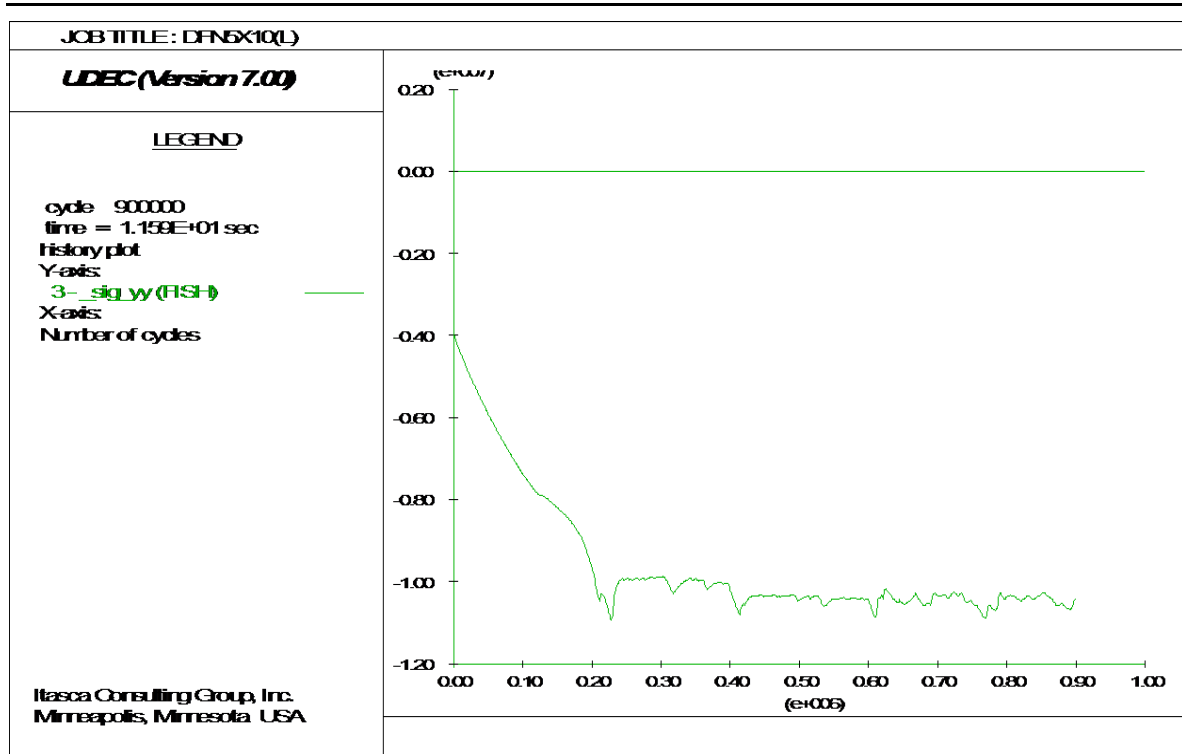
Σχήμα 79. Απεικόνιση δοκιμίου (J) διαστάσεων 5x 10m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



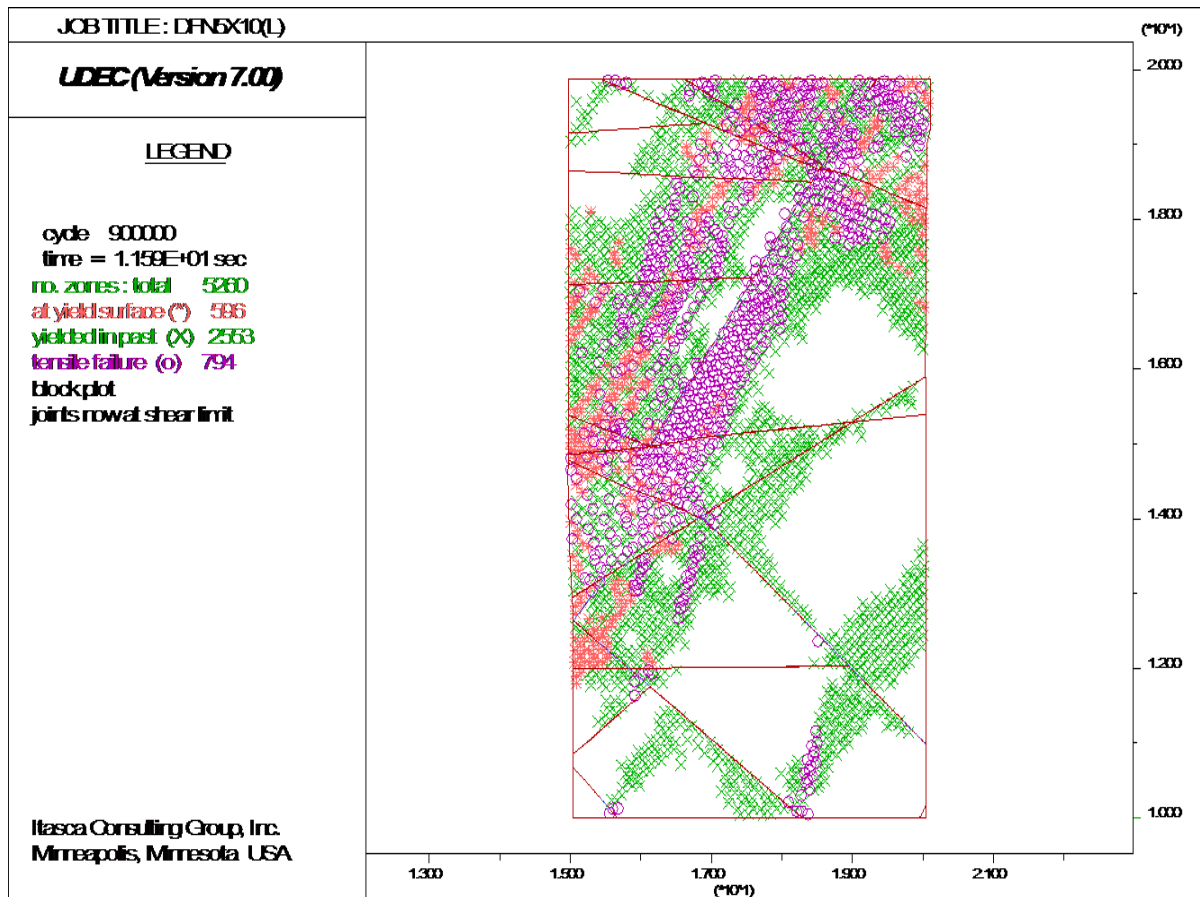
Διάγραμμα 47. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (Κ) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 48Μρα.



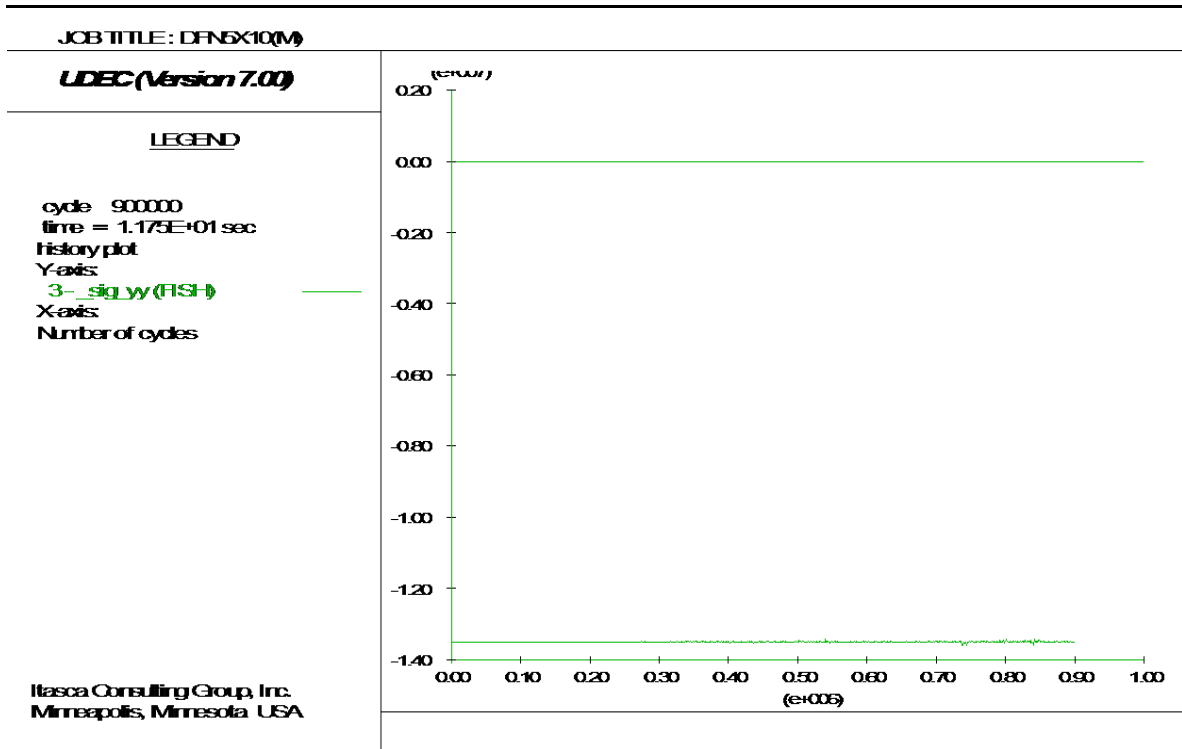
Σχήμα 80. Απεικόνιση δοκίμιου (Κ) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και μερικός η διαμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



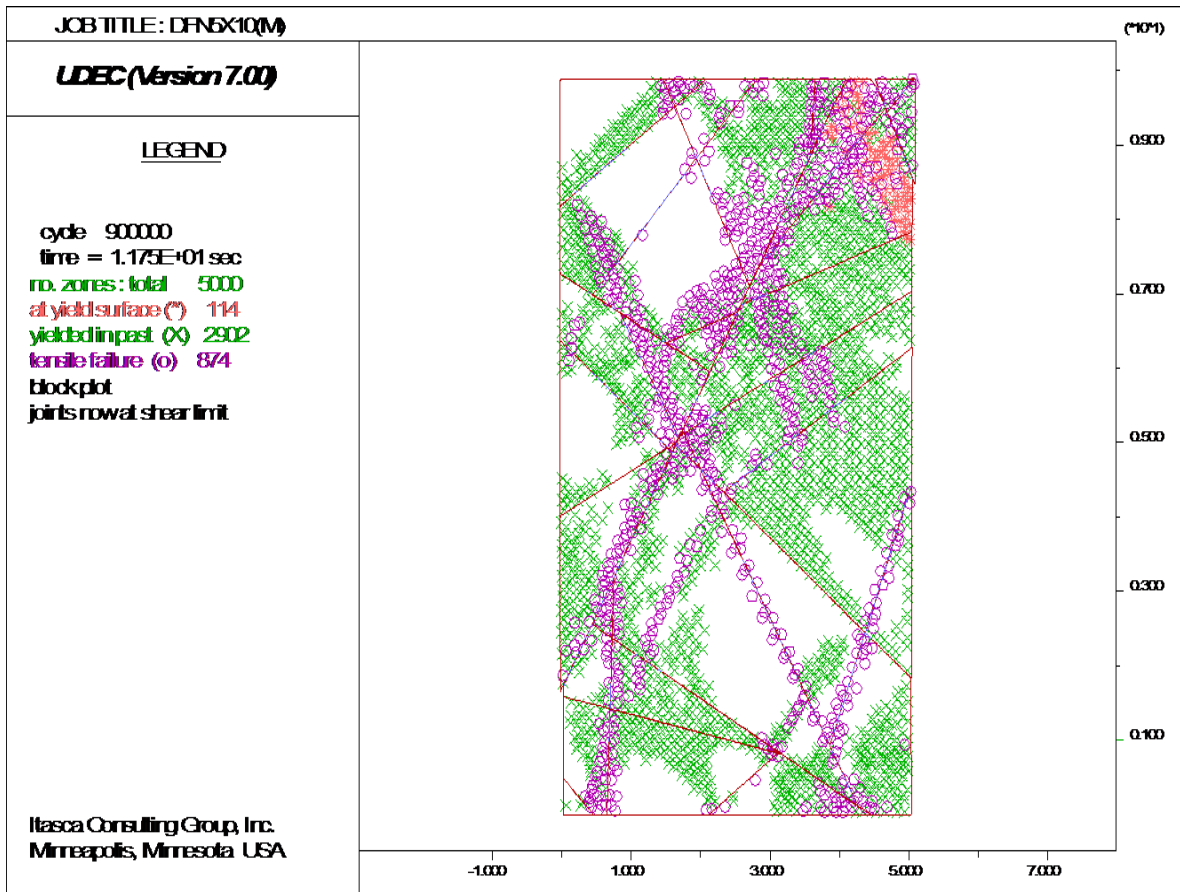
Διάγραμμα 48. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (L) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 11 Μρα.



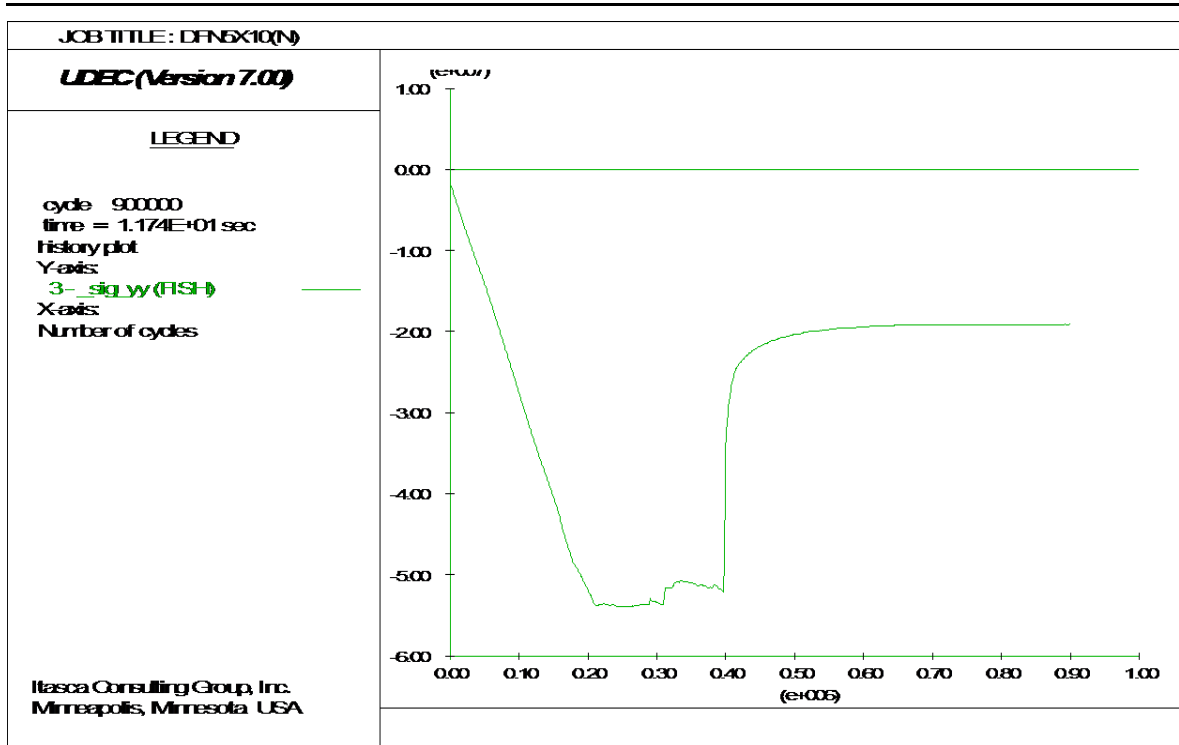
Σχήμα 81. Απεικόνιση δοκιμίου (L) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



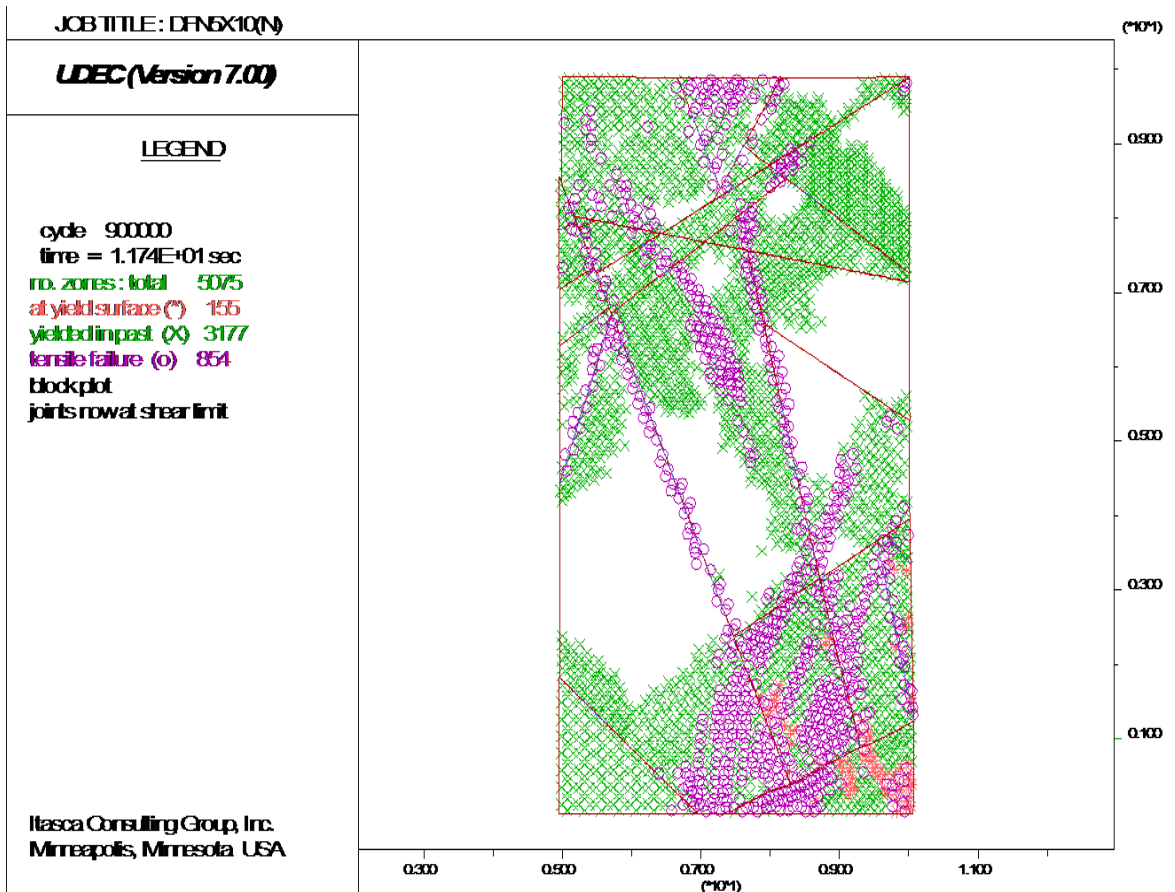
Διάγραμμα 49. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (M) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 13.5Μpa.



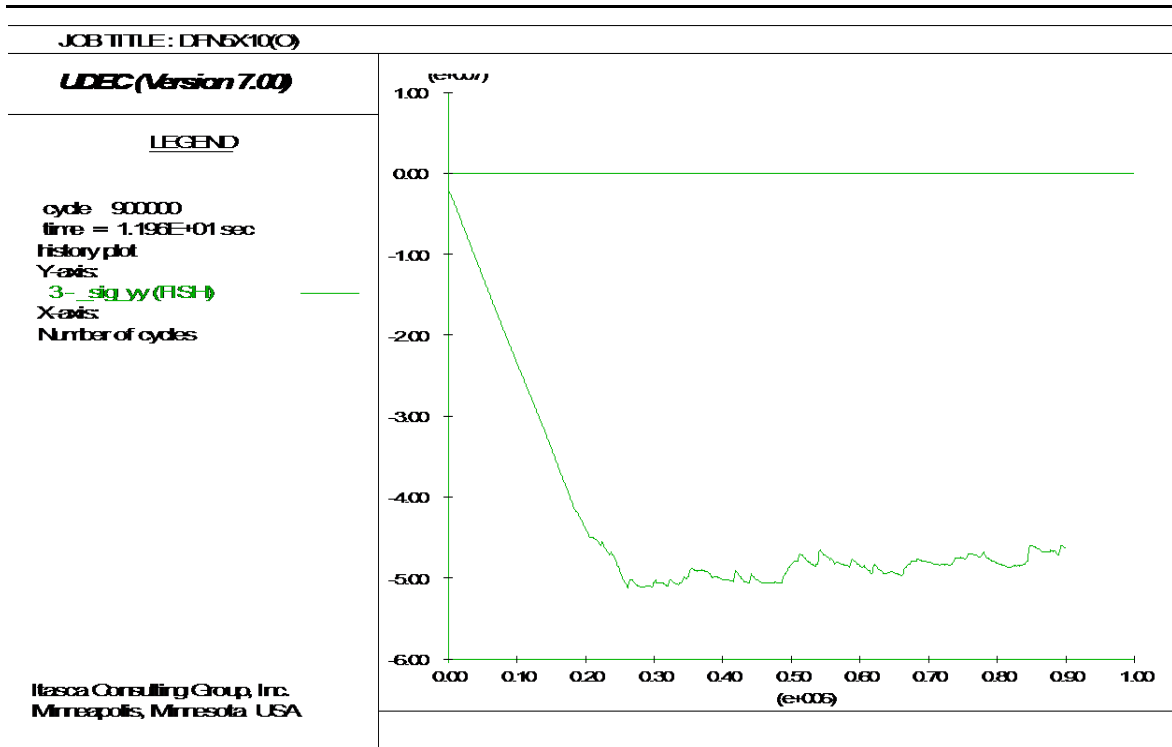
Σχήμα 82. Απεικόνιση δοκμίου (M) διαστάσεων 5x 10m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και η διαμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



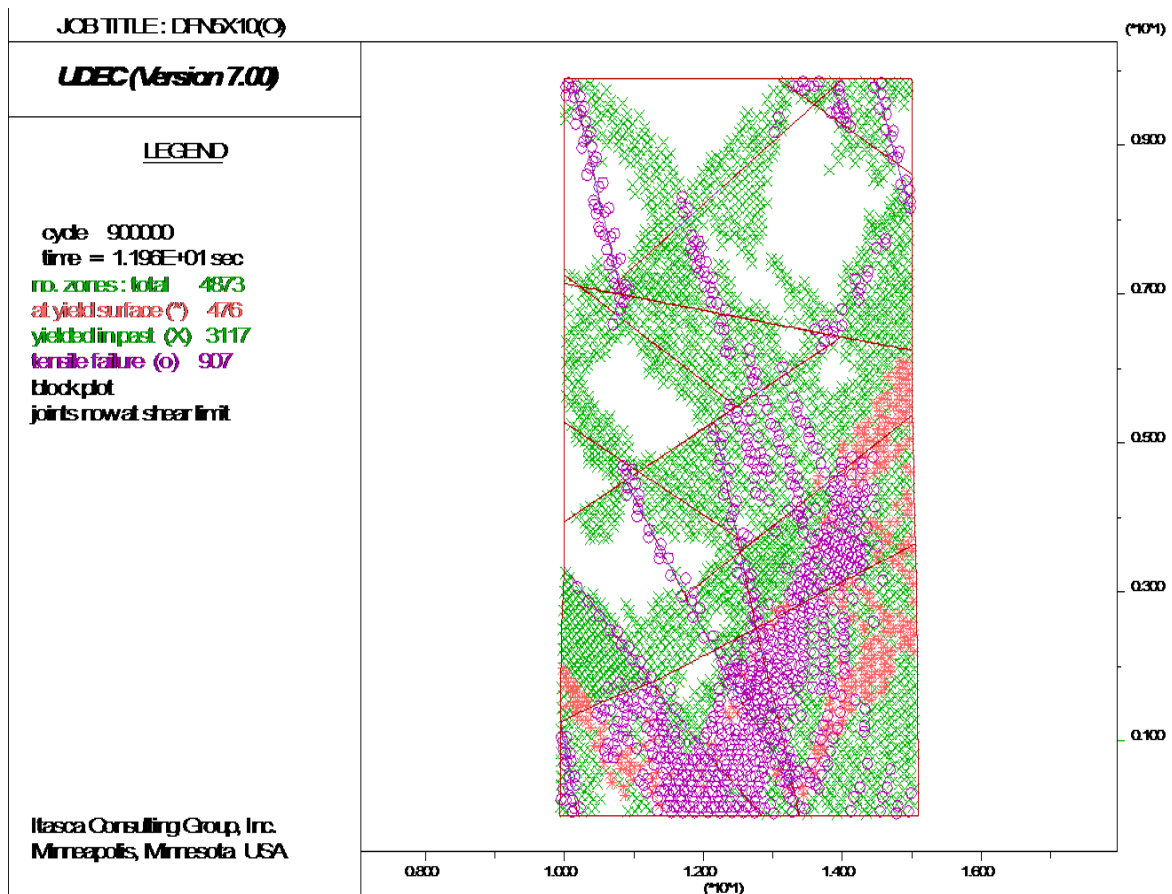
Διάγραμμα 50. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (N) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 44Μρα.



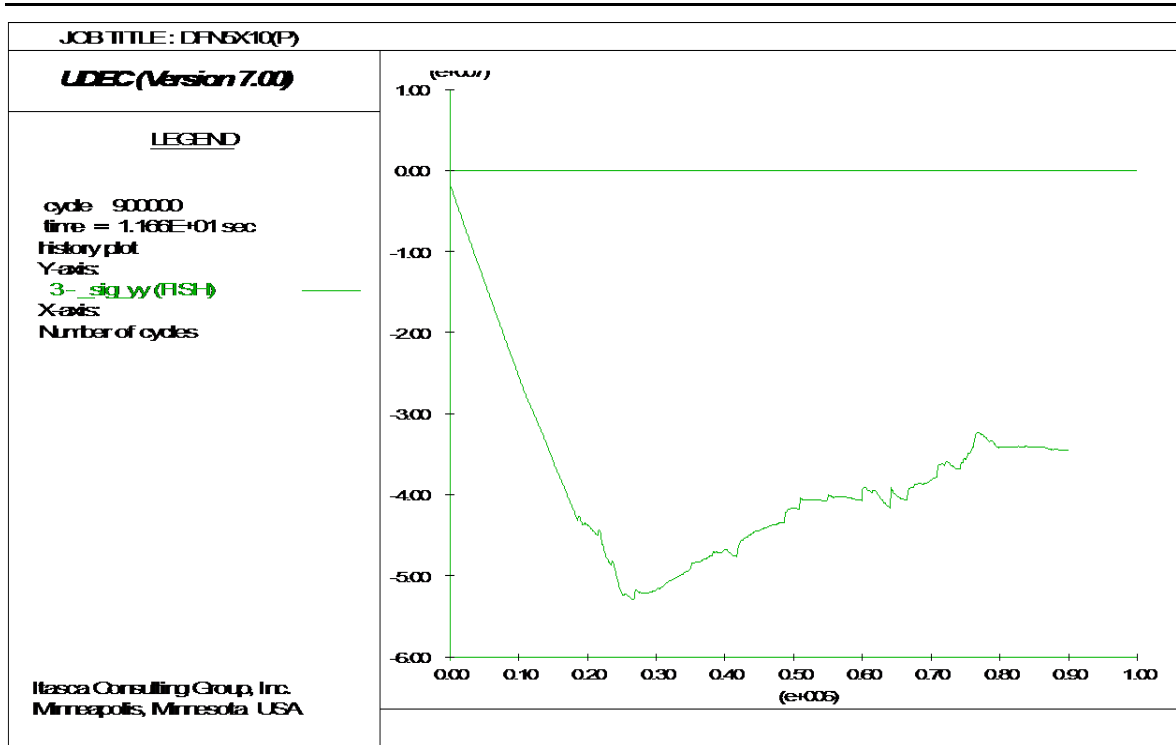
Σχήμα 83. Απεικόνιση δοκίμιου (N) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και μερικός η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



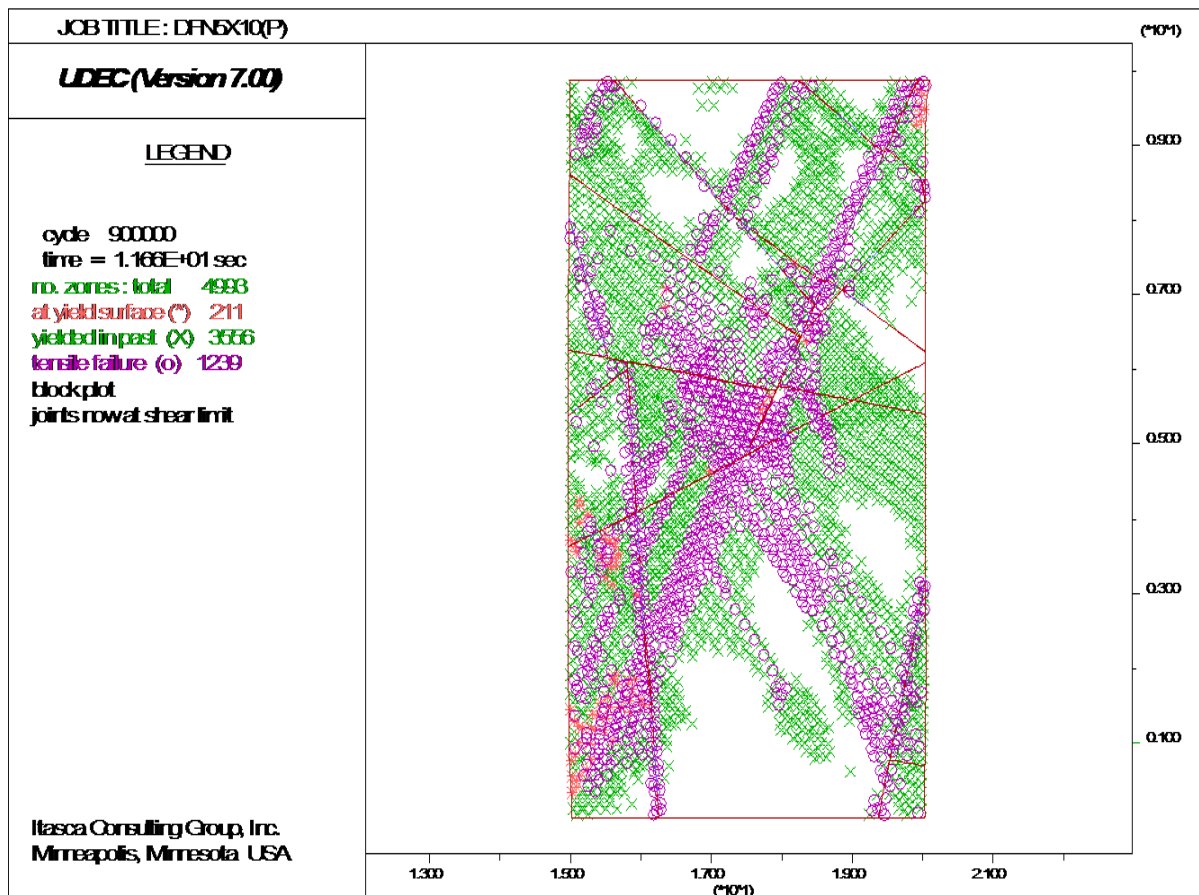
Διάγραμμα 51. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (O) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 50.5Μpa.



Σχήμα 84. Απεικόνιση δοκίμιου (O) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.

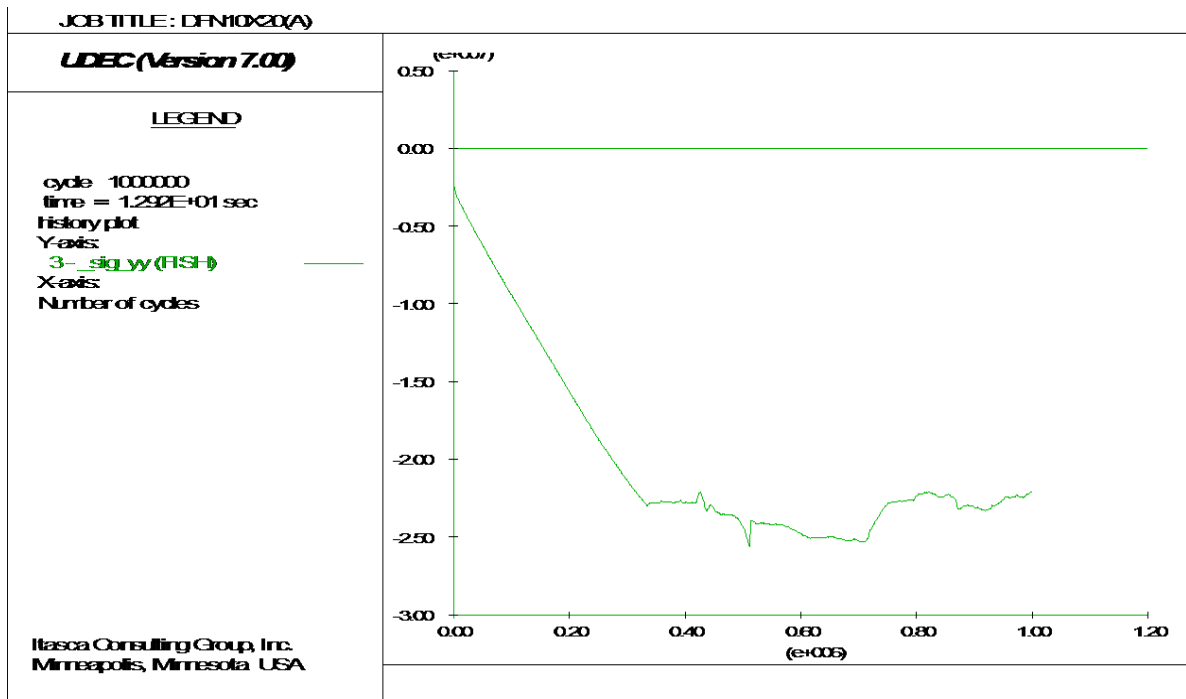


Διάγραμμα 52. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (P) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 52Μpa.

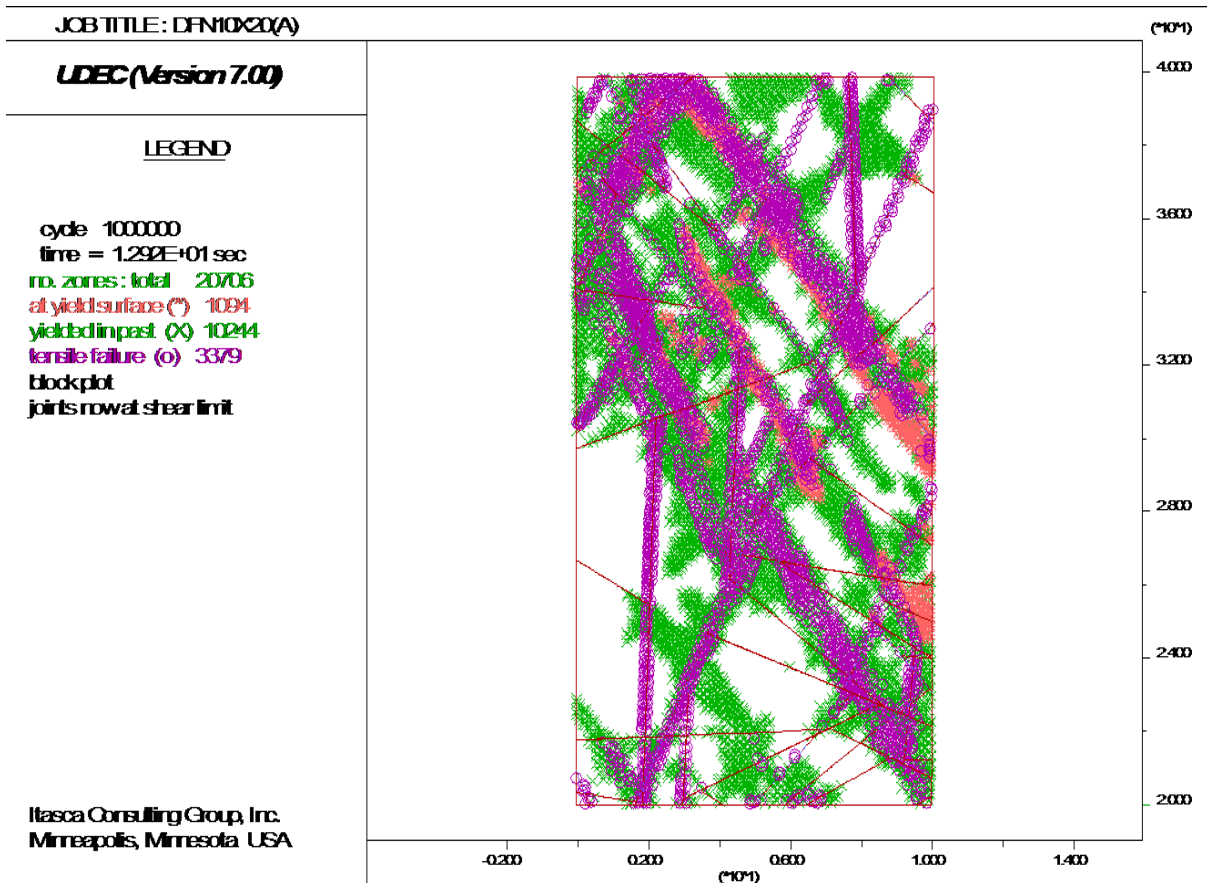


Σχήμα 85. Απεικόνιση δοκιμίου (P) διαστάσεων 5x10m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.

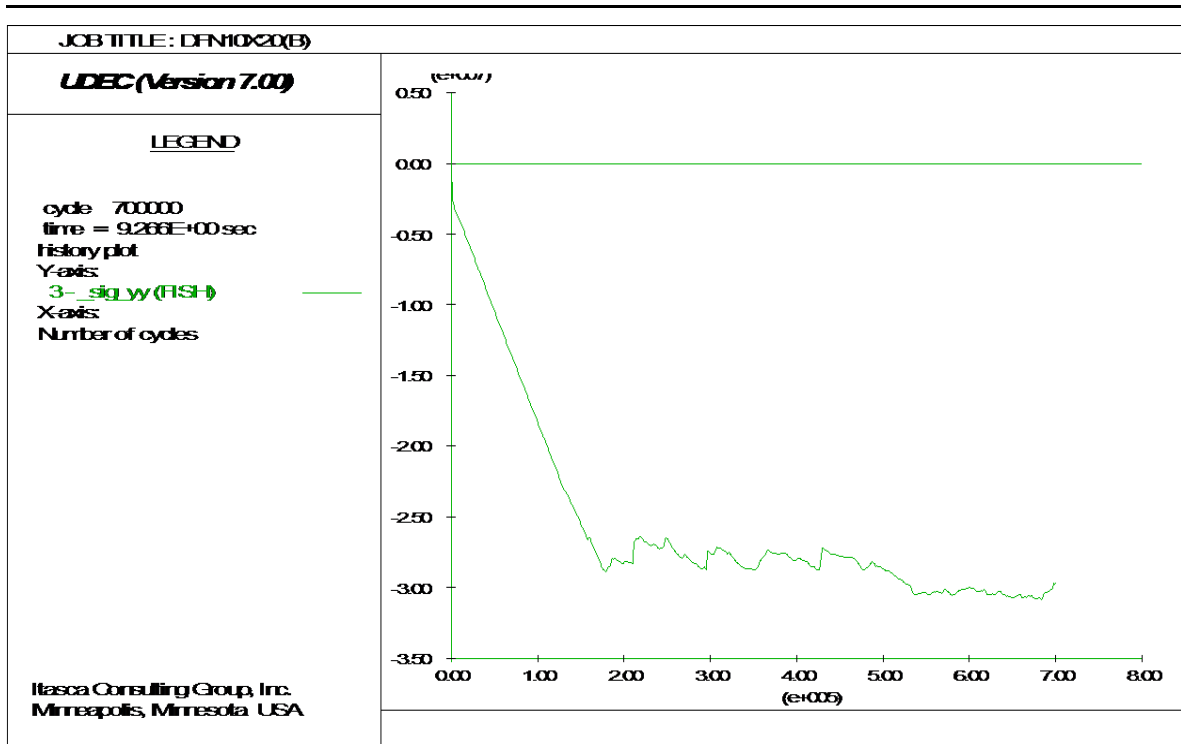
5.2.4. Αποτελέσματα δοκιμών διαστάσεων 10x20 m



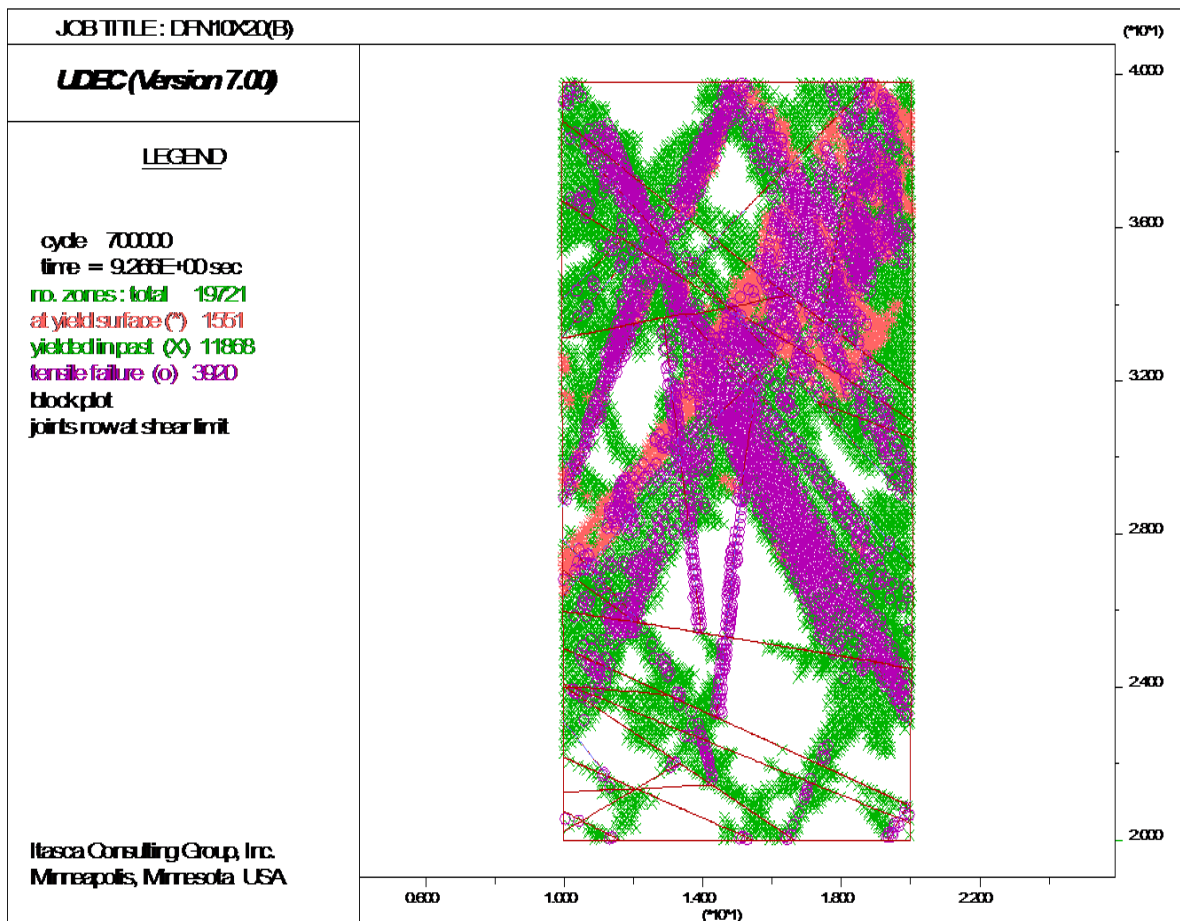
Διάγραμμα 53. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (A) διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 25Μpa.



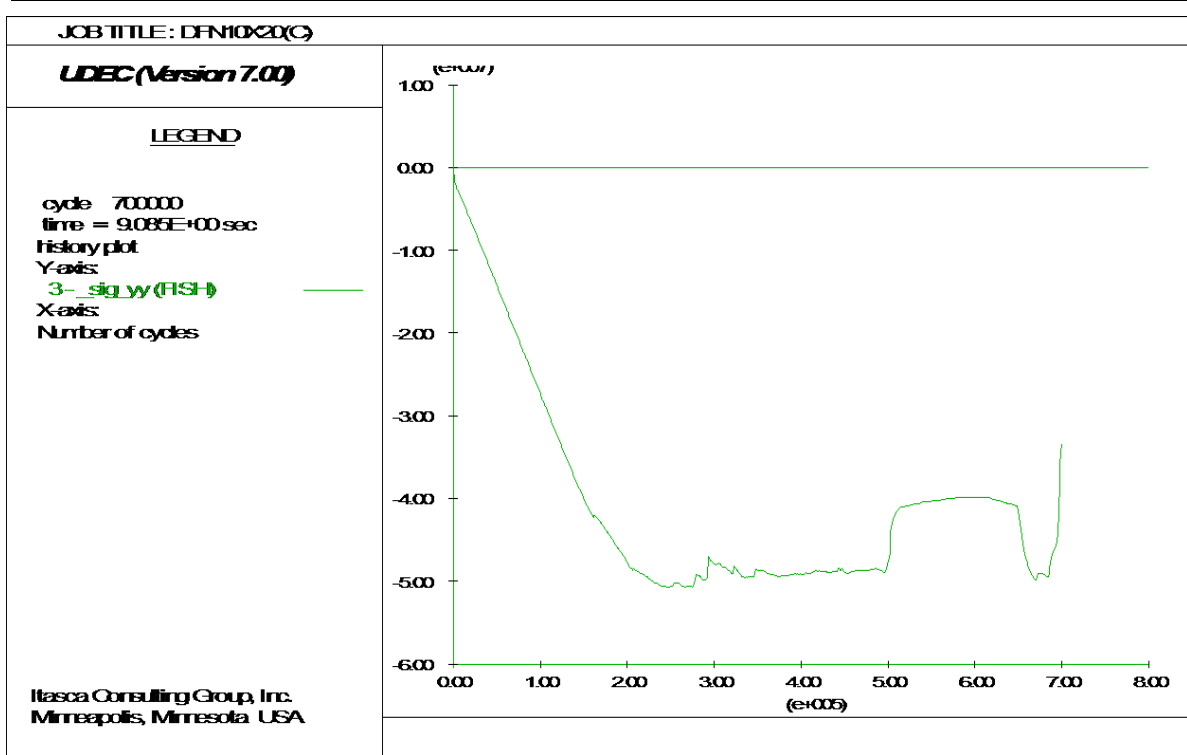
Σχήμα 86. Απεικόνιση δοκιμίου (A) διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



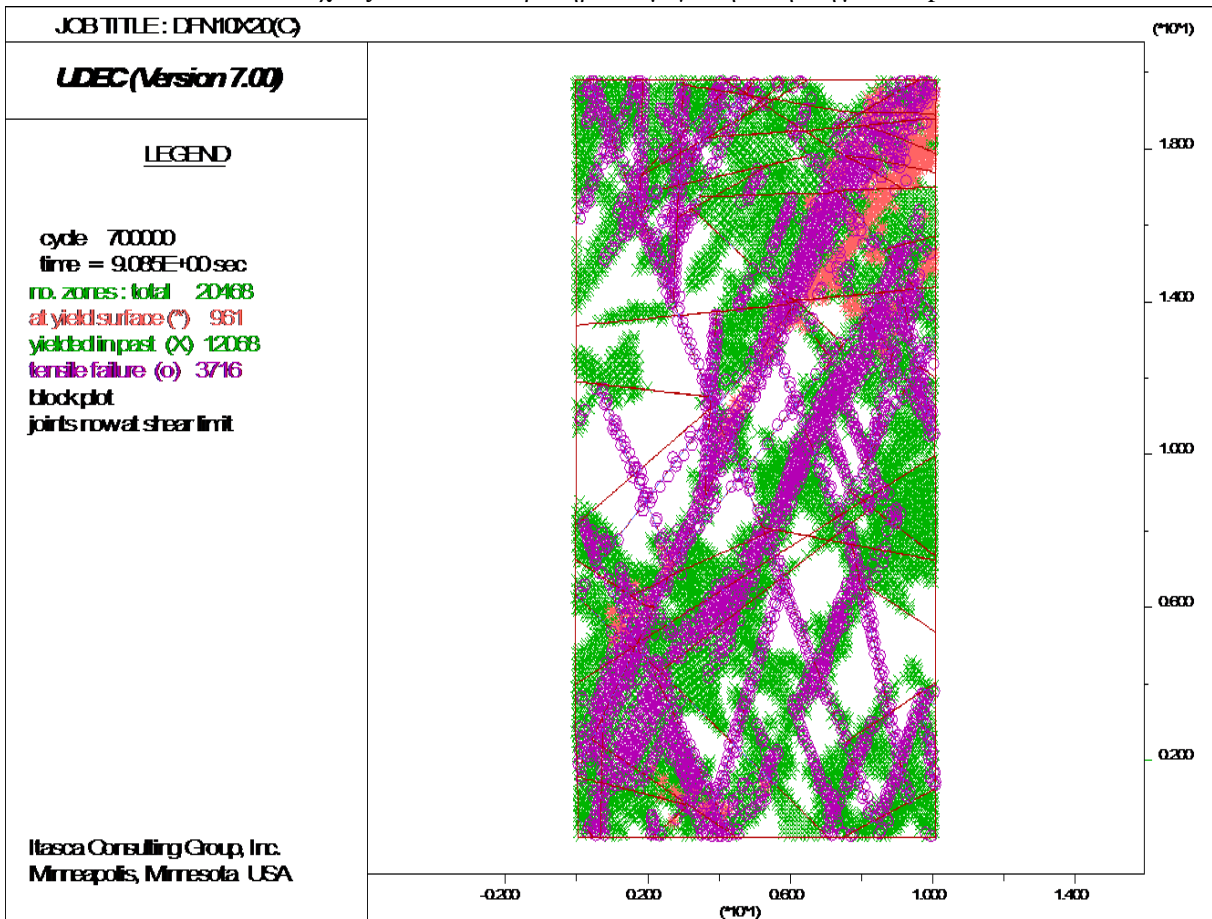
Διάγραμμα 54. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (B) διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 31Μρα.



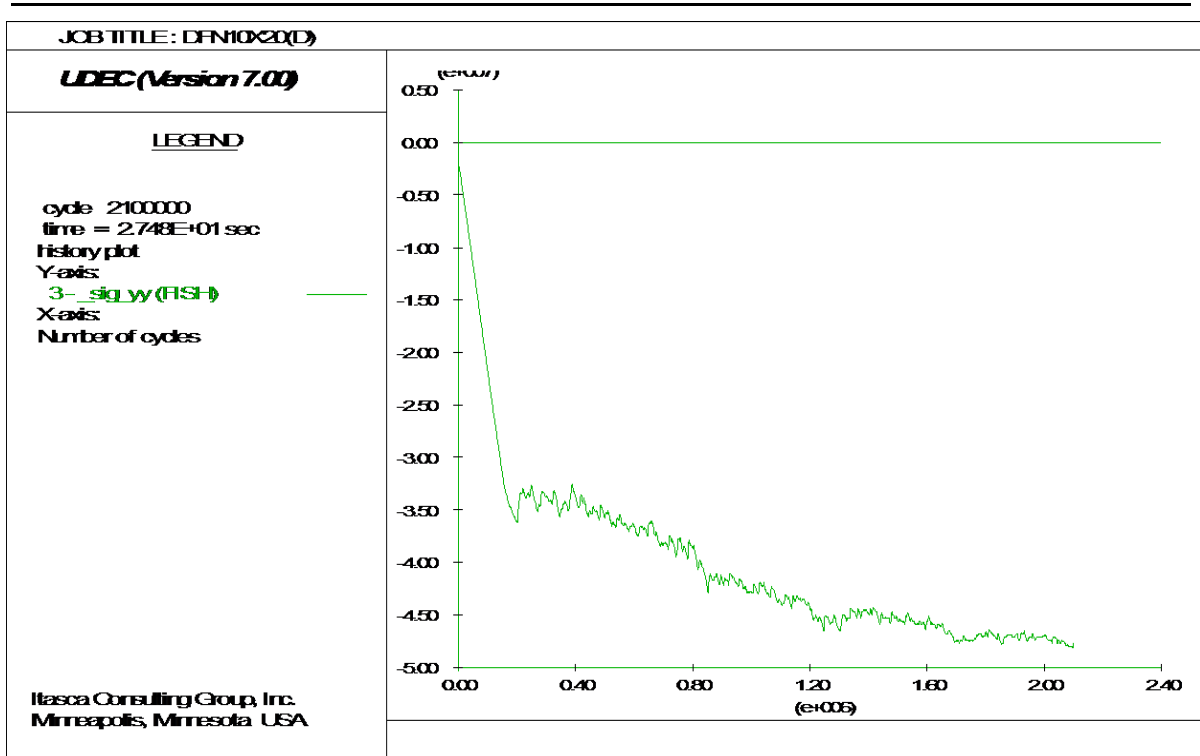
Σχήμα 87. Απεικόνιση δοκιμίου (B) διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και μερικώς η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



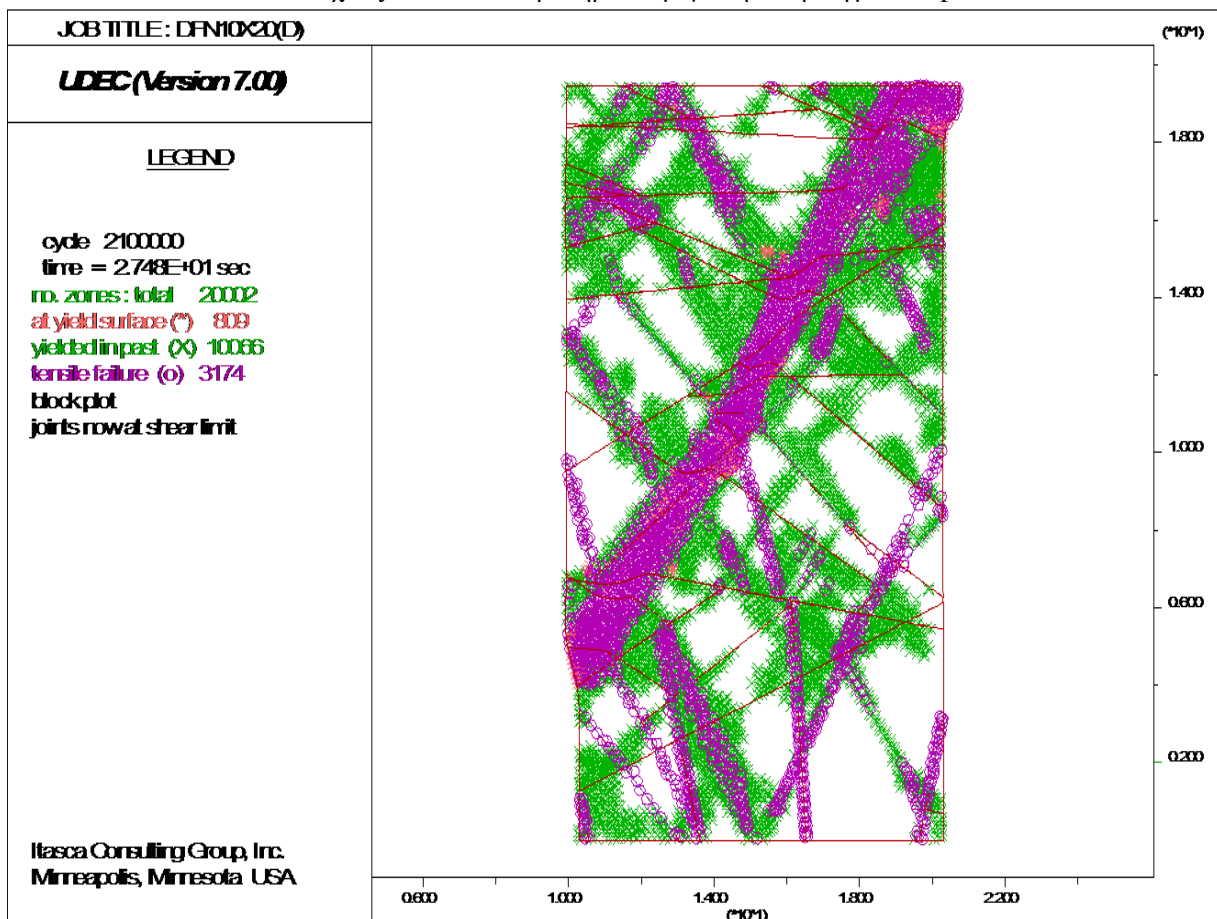
Διάγραμμα 55. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (C) διαστάσεων 10x20mm με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 50Μpa.



Σχήμα 88. Απεικόνιση δοκίμιου (C) διαστάσεων 10x20mm με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.

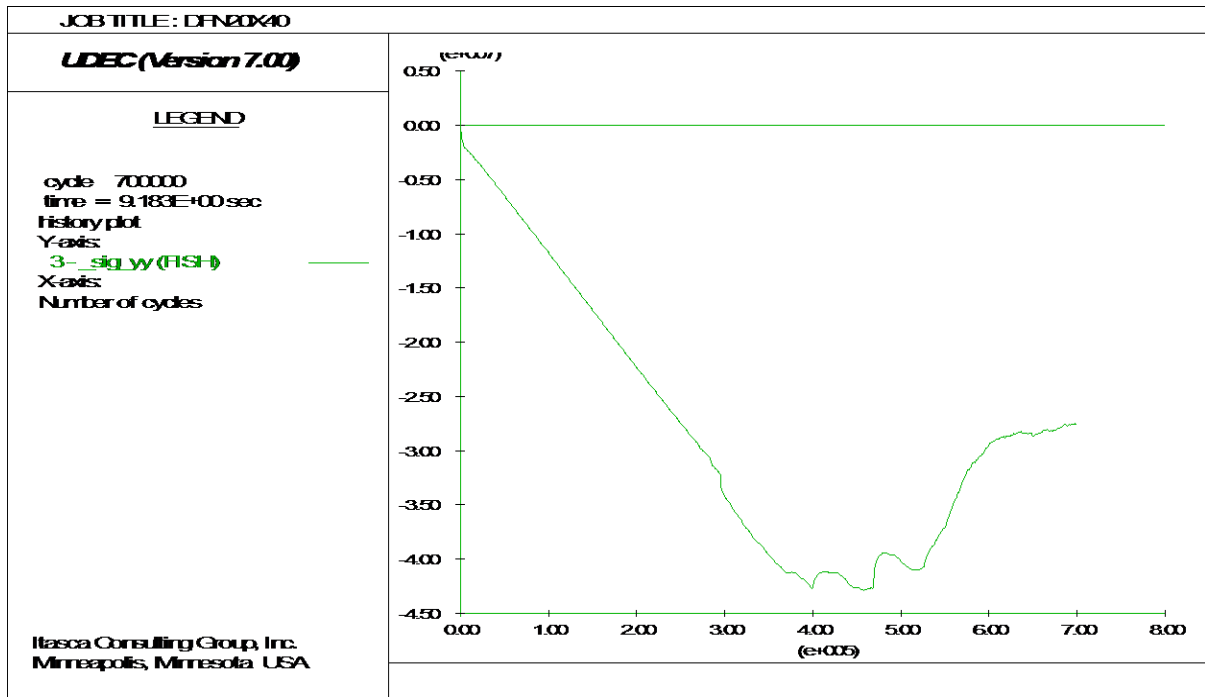


Διάγραμμα 56. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (D) διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 48Μpa.

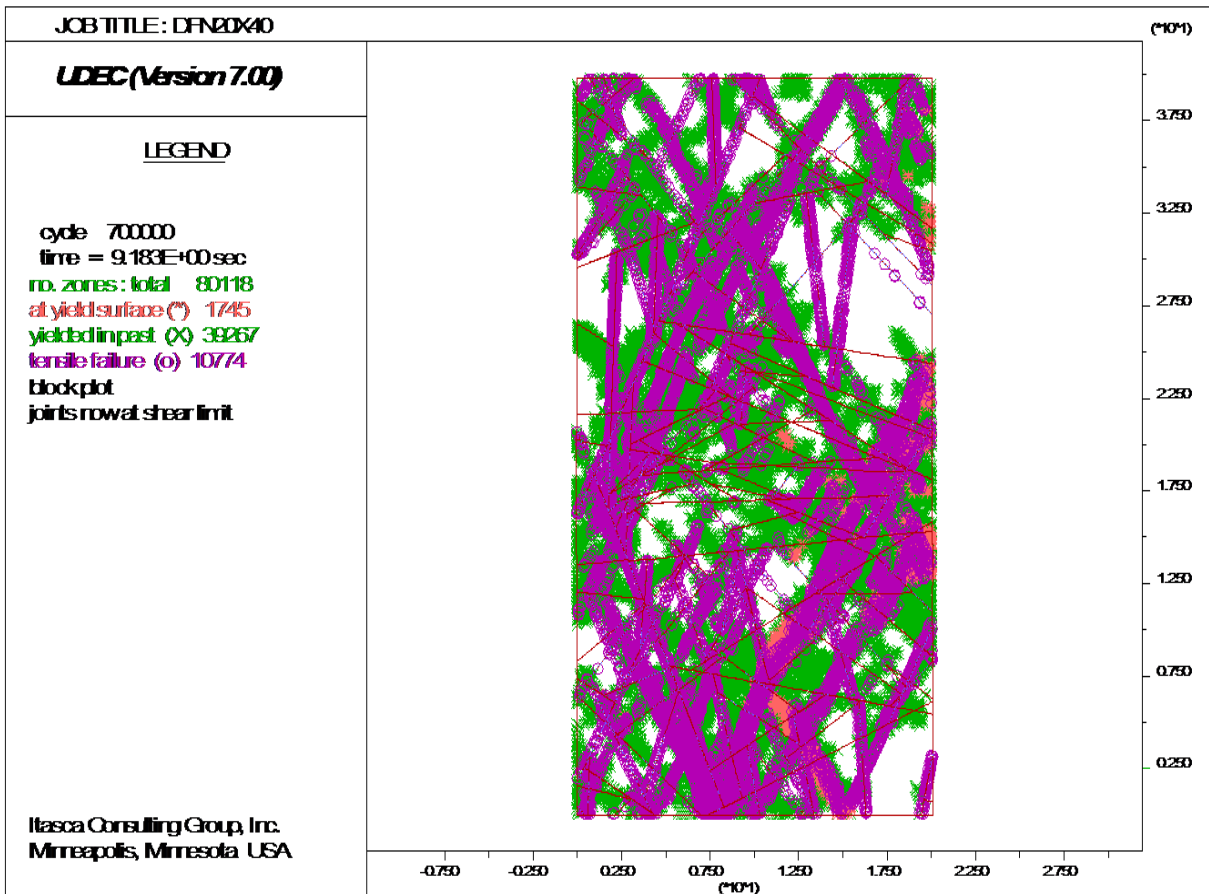


Σχήμα 89. Απεικόνιση δοκίμιου (D) διαστάσεων 10x20m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και η διαμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.

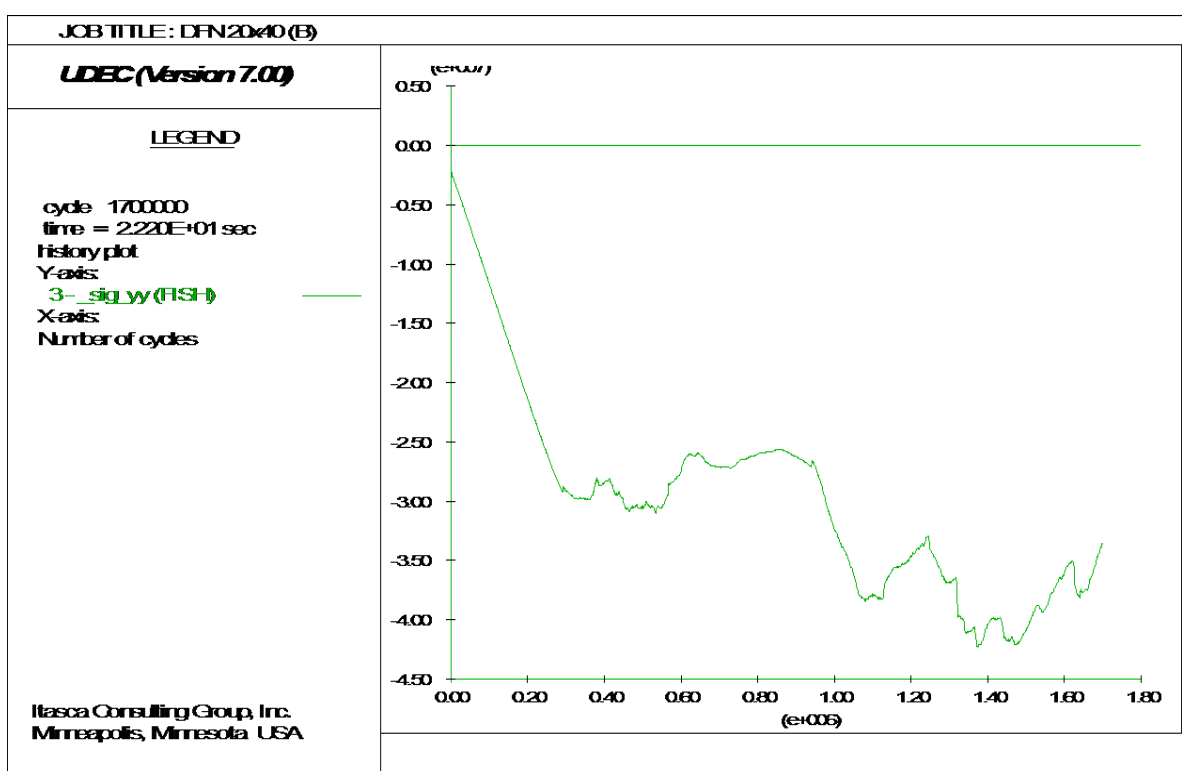
5.2.5. Αποτελέσματα δοκιμών διαστάσεων 20x40 m



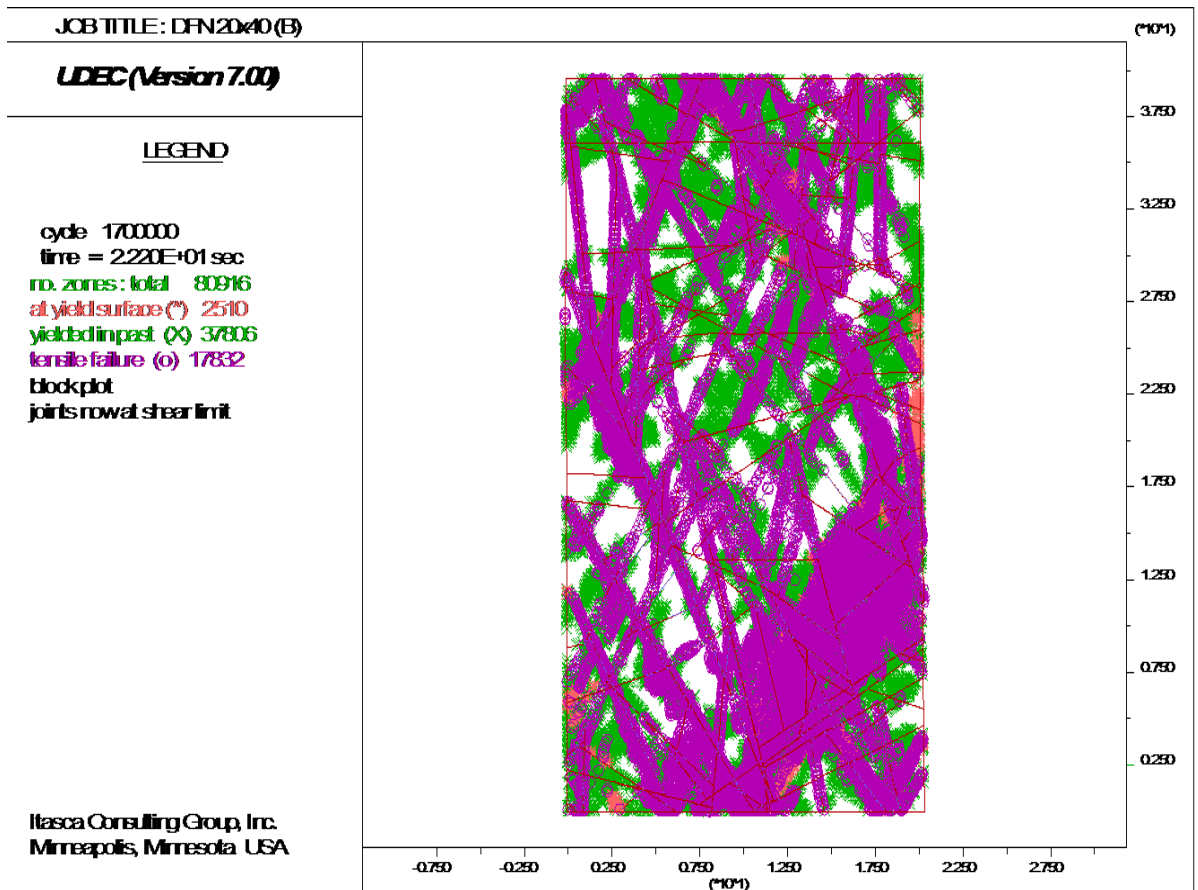
Διάγραμμα 57. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (A) διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 42Μρα.



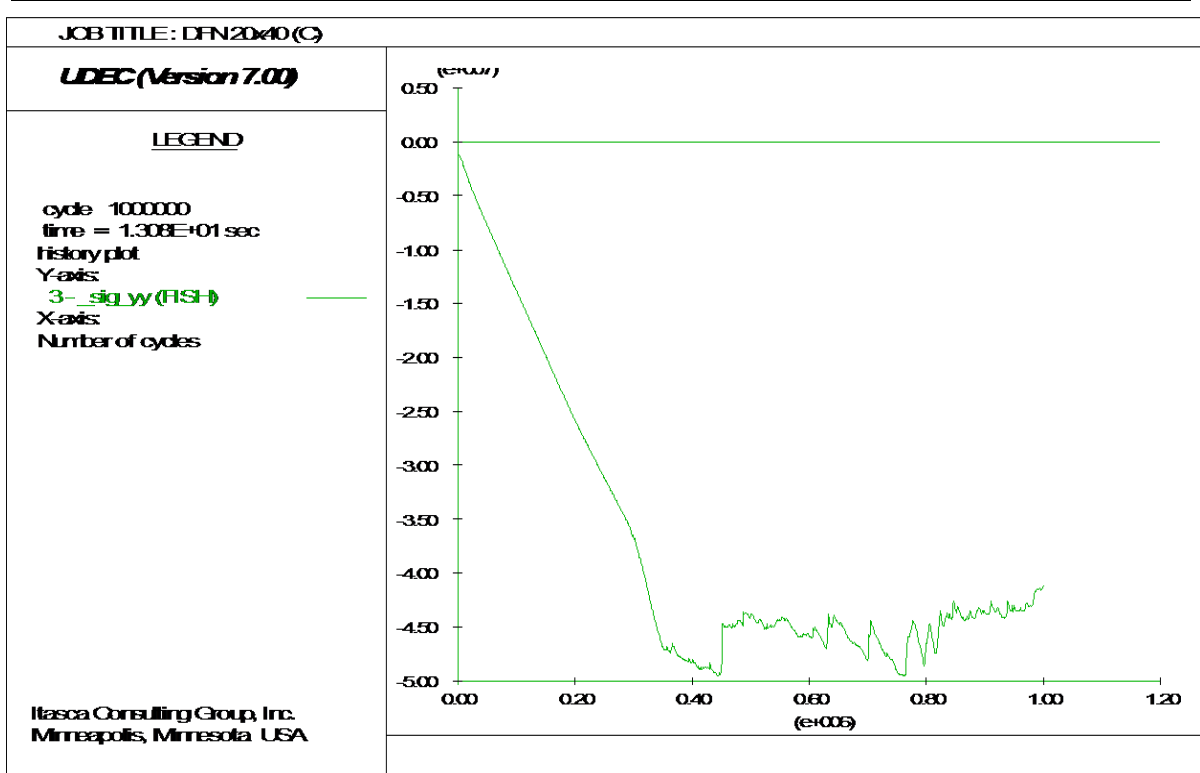
Σχήμα 90. Απεικόνιση δοκιμίου (A) διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



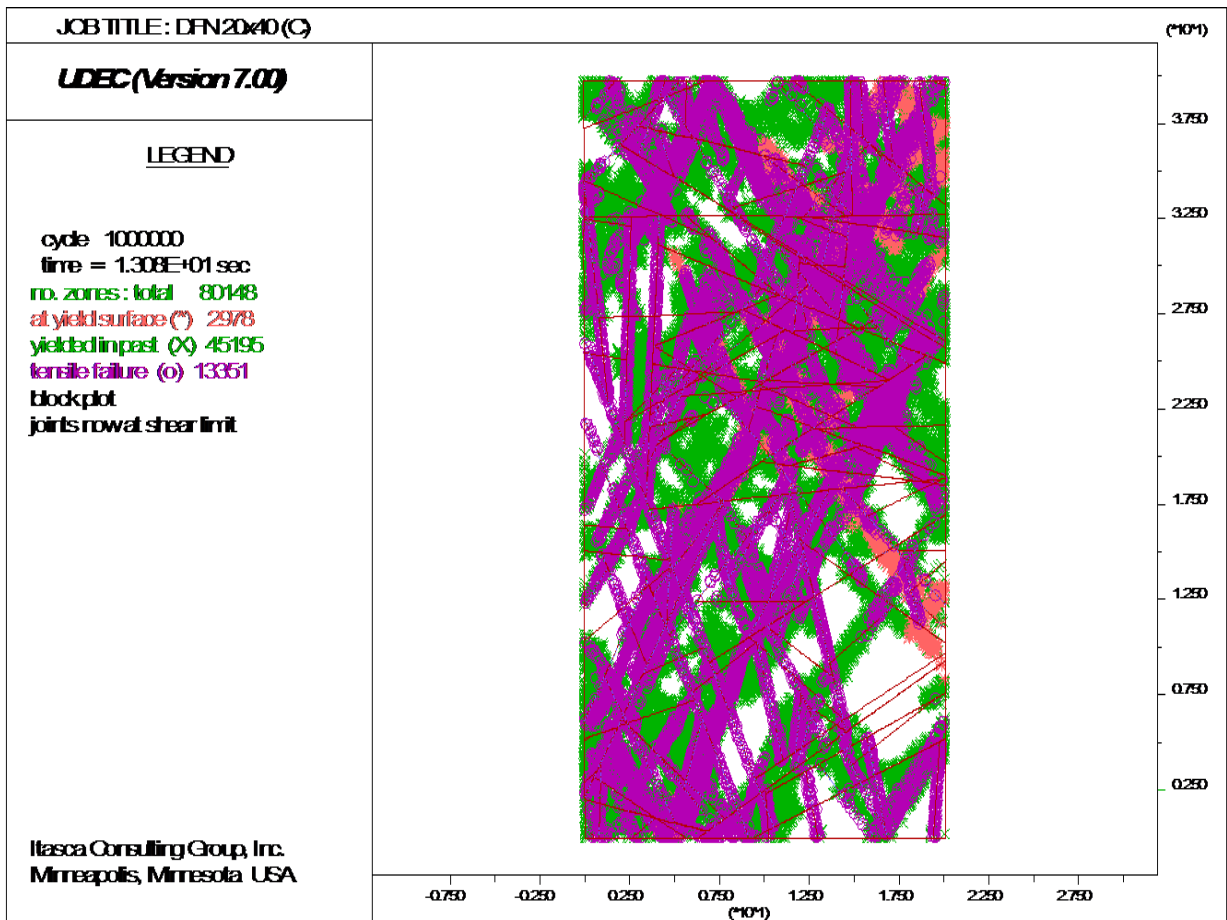
Διάγραμμα 58. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (B) διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 42Μpa.



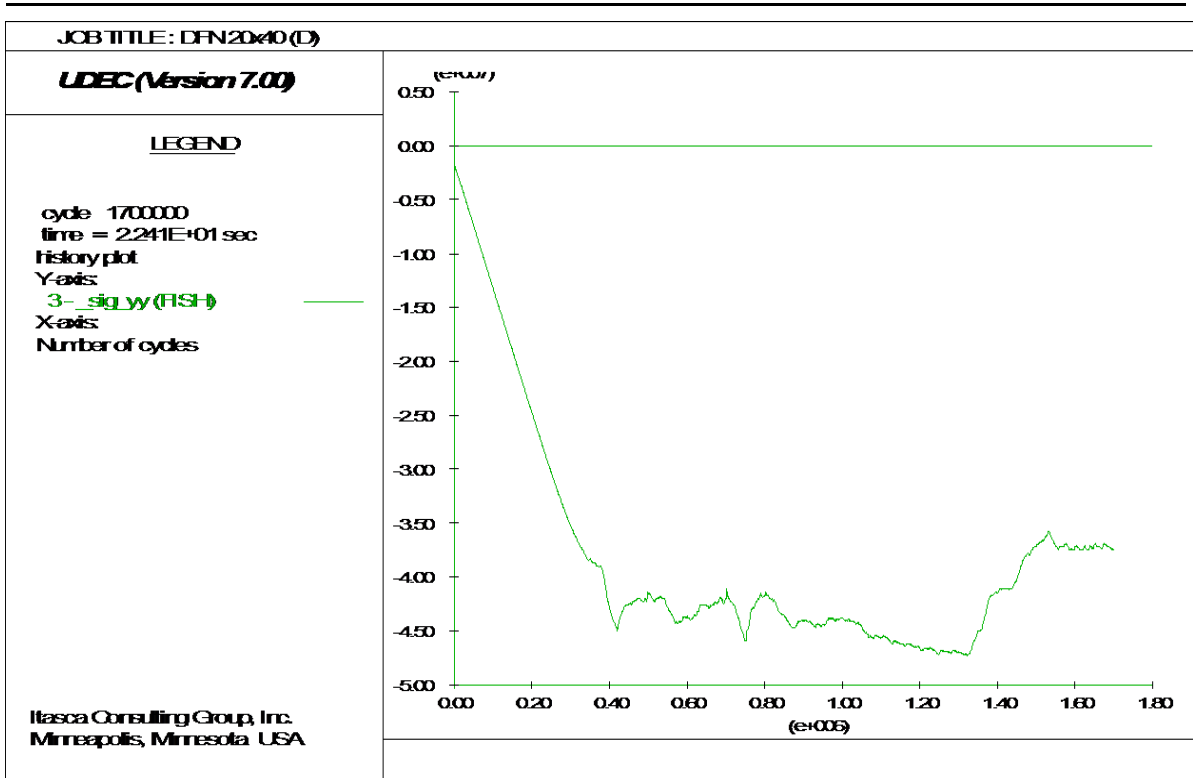
Σχήμα 91. Απεικόνιση δοκίμιου (B) διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος καθώς και η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεπειών.



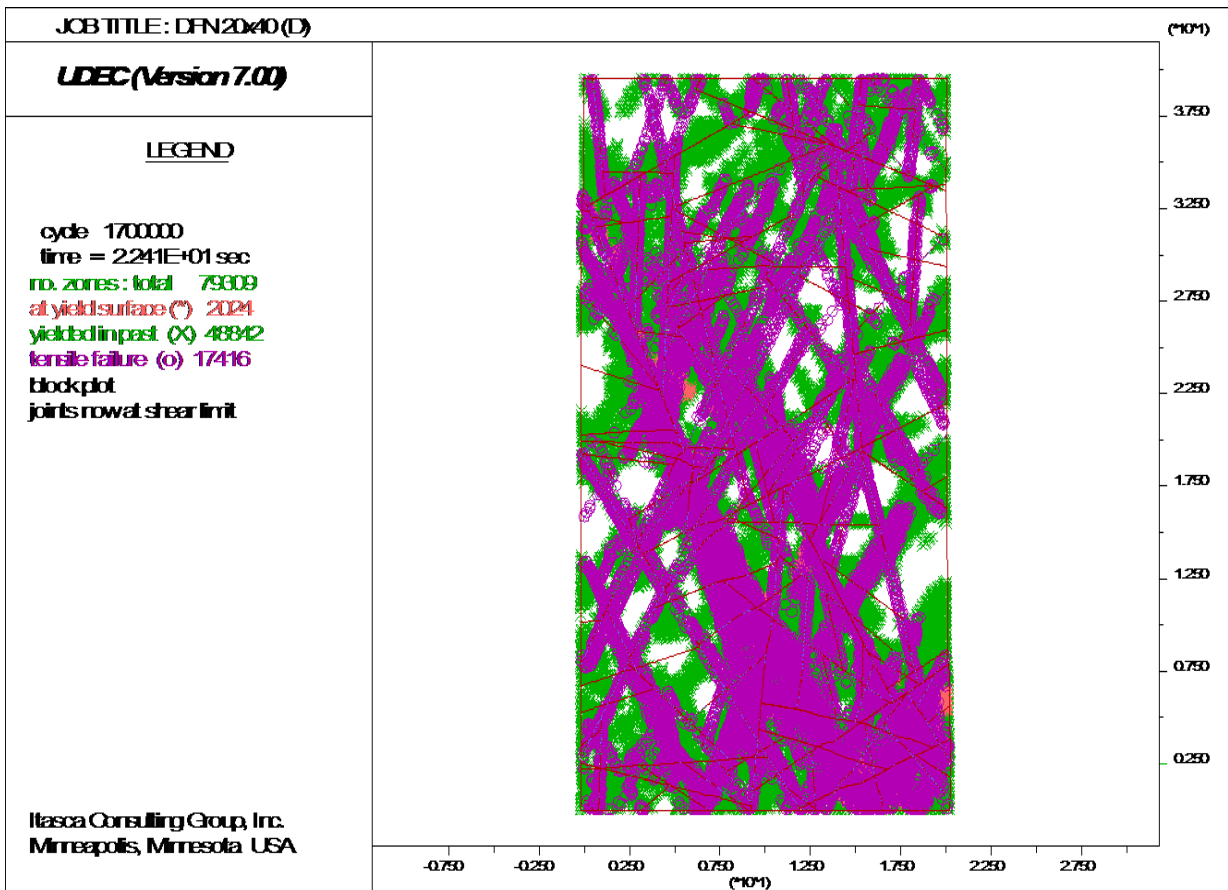
Διάγραμμα 59. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (C) διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 49Μpa.



Σχήμα 92. Απεικόνιση δοκίμιου (C) διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.



Διάγραμμα 60. Καμπύλη τάσης-υπολογιστικών βημάτων για το δοκίμιο (D) διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες από DFN. Παρατηρείται μέγιστη τάση ίση με 47Μρα.



Σχήμα 93. Απεικόνιση δοκίμιου (D) διαστάσεων 20x40m με ασυνέχειες από DFN. Διακρίνεται σαν αστοχία η πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς και η διατμητική αστοχία και ολίσθηση των ασυνεχειών.

5.3. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα και σχολιασμός αυτών

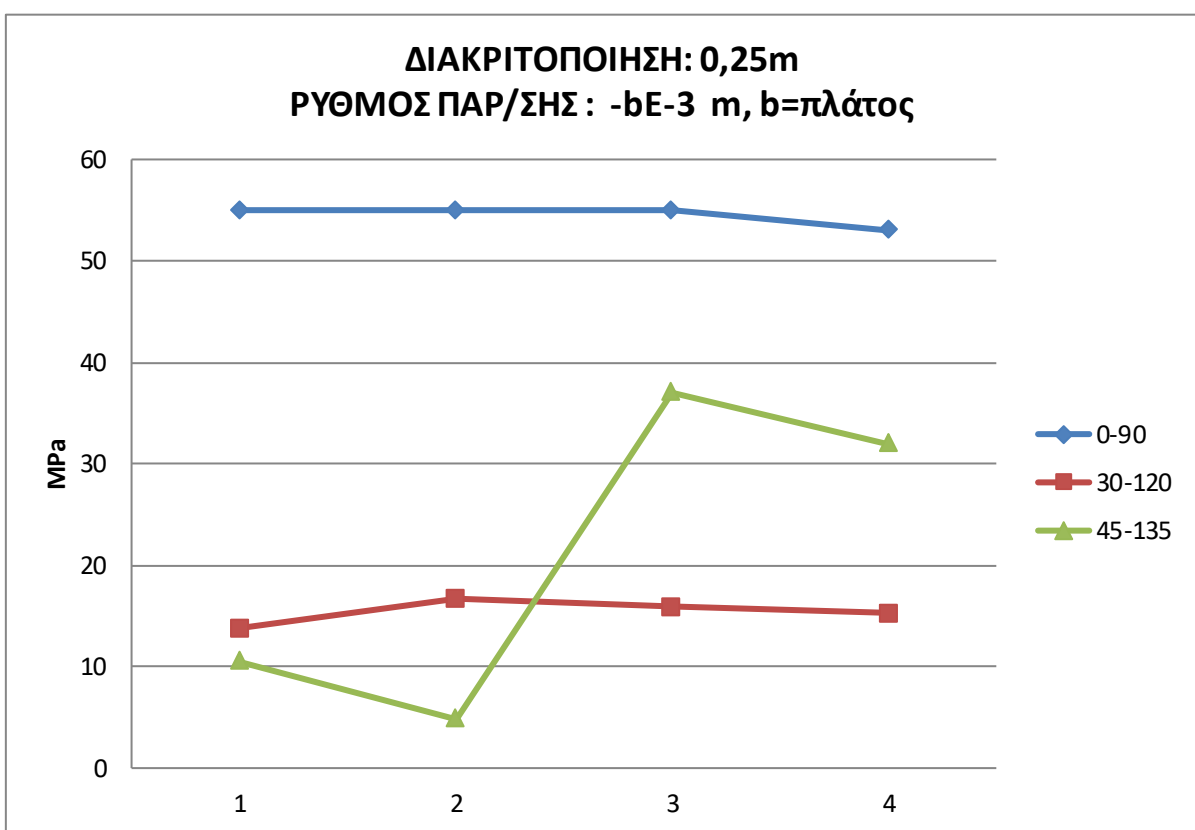
Με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων γίνεται μια προσπάθεια ομαδοποίησης και αντιπαραβολής των αποτελεσμάτων με τέτοιο τρόπο ώστε να διατυπώνονται τα φαινόμενα κλίμακας. Έτσι, δημιουργήθηκαν διάφοροι πίνακες οι οποίοι συγκεντρώνουν τις τιμές της μέγιστης αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων βραχομάζας που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές. Απεικονίζοντας στην συνέχεια τις τιμές αυτές σε διαγράμματα μπορούμε να διαπιστώσουμε τη σχέση μεταξύ της κλίμακας και της αντοχής της βραχομάζας.

5.3.1. Πίνακες και διαγράμματα για τα δοκίμια με οικογένειες κάθετων ασυνεχειών

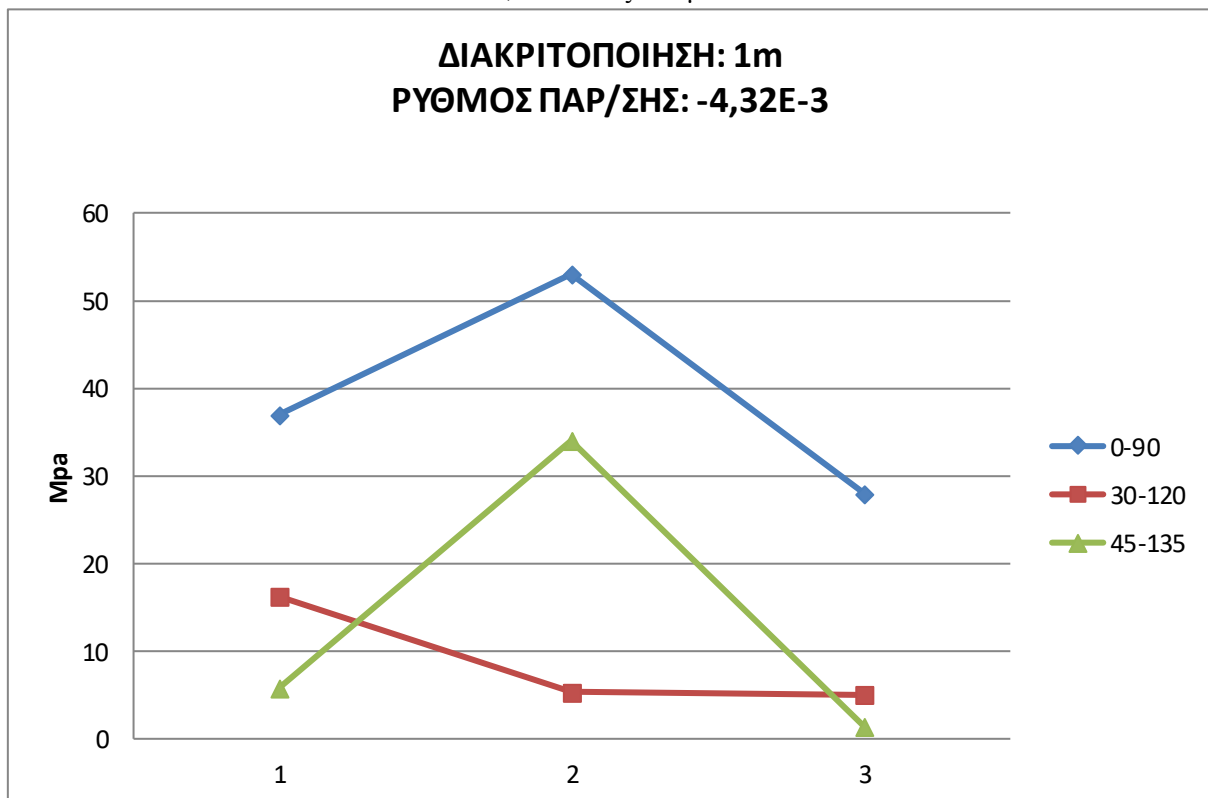
Στη συνέχεια παρατίθεται ο πίνακας που περιλαμβάνει τις τιμές της μέγιστης αντοχής των δοκιμίων που απαρτίζονται από οικογένειες κάθετων ασυνεχειών. Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα που προκύπτουν από τις τιμές αυτές με αυτό τον τύπο δοκιμίων δεν εμφανίζεται μια ξεκάθαρη σχέση μεταξύ της αντοχής της βραχομάζας και της κλίμακας των δοκιμίων. Έτσι, προτού προχωρήσουμε στον επόμενο τύπο δοκιμίων αποφασίστηκε να γίνουν μερικές ακόμα προσομοιώσεις στα ίδια δοκίμια αλλά με διαφορετικό ρυθμό παραμόρφωσης και διαφορετική διακριτοποίηση σε περίπτωση που αυτές οι προσομοιώσεις διατυπώνουν καλύτερα τα φαινόμενα της κλίμακας. Οι πίνακες και τα διαγράμματα που περιέχουν τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων δοκιμίων, κατανομημένα ανά κλίση ασυνεχειών και διαστάσεις, παρατίθενται παρακάτω:

Πίνακας 4. Πίνακας συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων της αντοχής των δοκιμών με οικογένειες κάθετων ασυνεχειών.

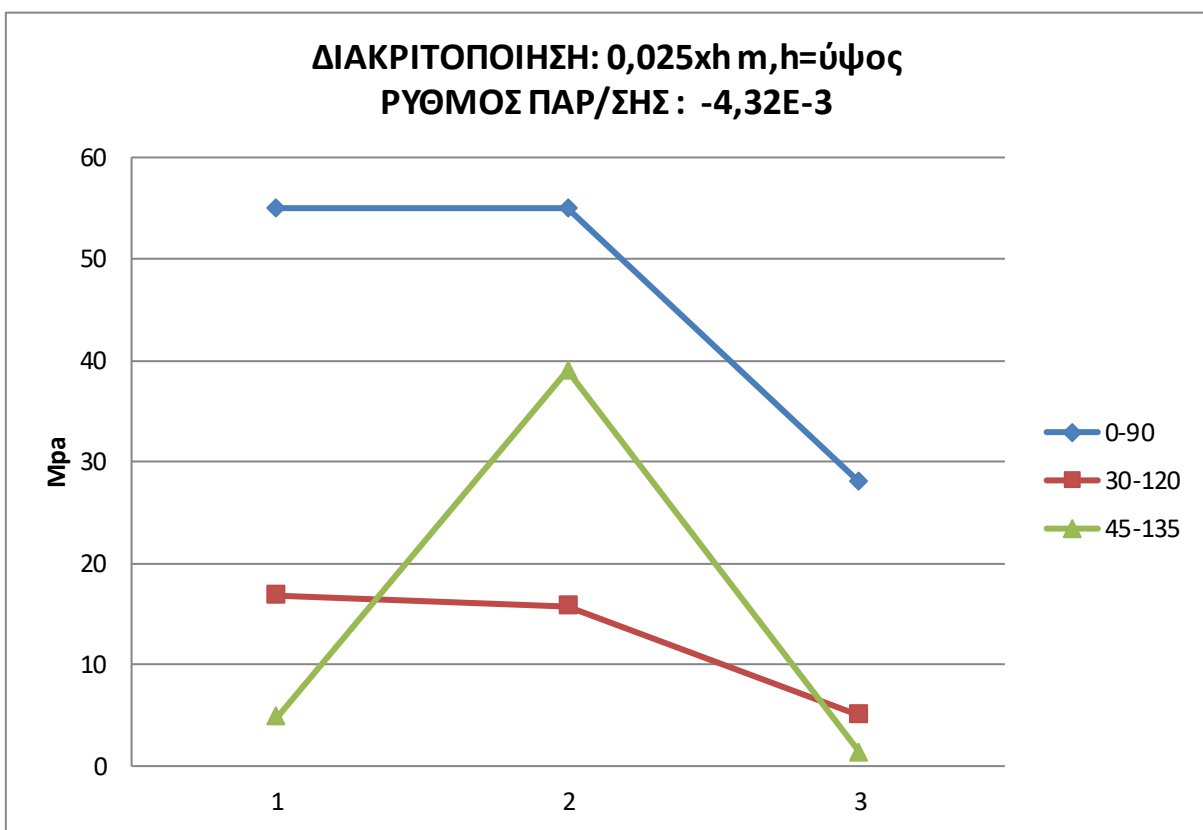
ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ		1 m	0,025xh m ,h=ύψος	0,25 m	
ΡΥΘΜΟΣ ΠΑΡ/ΣΗΣ		-4,32E-3	-4,32E-3	-bE-3 b=πλάτος	
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ		ΚΛΙΣΗ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ(Mpa)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ(Mpa)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ(Mpa)
1	2,5x5	0-90			55
		30-120			13.8
		45-135			10.5
2	5X10	0-90	37	55	55
		30-120	16.2	16.8	16.7
		45-135	5.8	4.8	4.8
3	10X20	0-90	52	52	55
		30-120	5.3	15.8	15.9
		45-135	34	39	37
4	20X40	0-90	28	28	53
		30-120	5	5	15.3
		45-135	1.4	1.4	32



Διάγραμμα 61. Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής-μεγέθους δοκιμίων (2.5x5.0 (no.1) - 20x40 (no.4)) για τα δοκίμια με οικογένειες κάθετων ασυνεχειών με διακριτοποίηση 0.25m και ρυθμό παραμόρφωσης $-be-3$ m/s, b : πλάτος δοκιμίων.



Διάγραμμα 62. Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής-μεγέθους δοκιμίων (5x10 (no.1) - 20x40 (no.3)) για τα δοκίμια με οικογένειες κάθετων ασυνεχειών με διακριτοποίηση 1 m και ρυθμό παραμόρφωσης $-4.32e-3$ m/s.



Διάγραμμα 63. Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής-μεγέθους δοκιμίων (5x10 (no.1) - 20x40 (no.3)) για τα δοκίμια με οικογένειες κάθετων ασυνεχειών με 0,025xh m, h : ύψος και ρυθμό παραμόρφωσης -4.32×10^{-3} m/s.

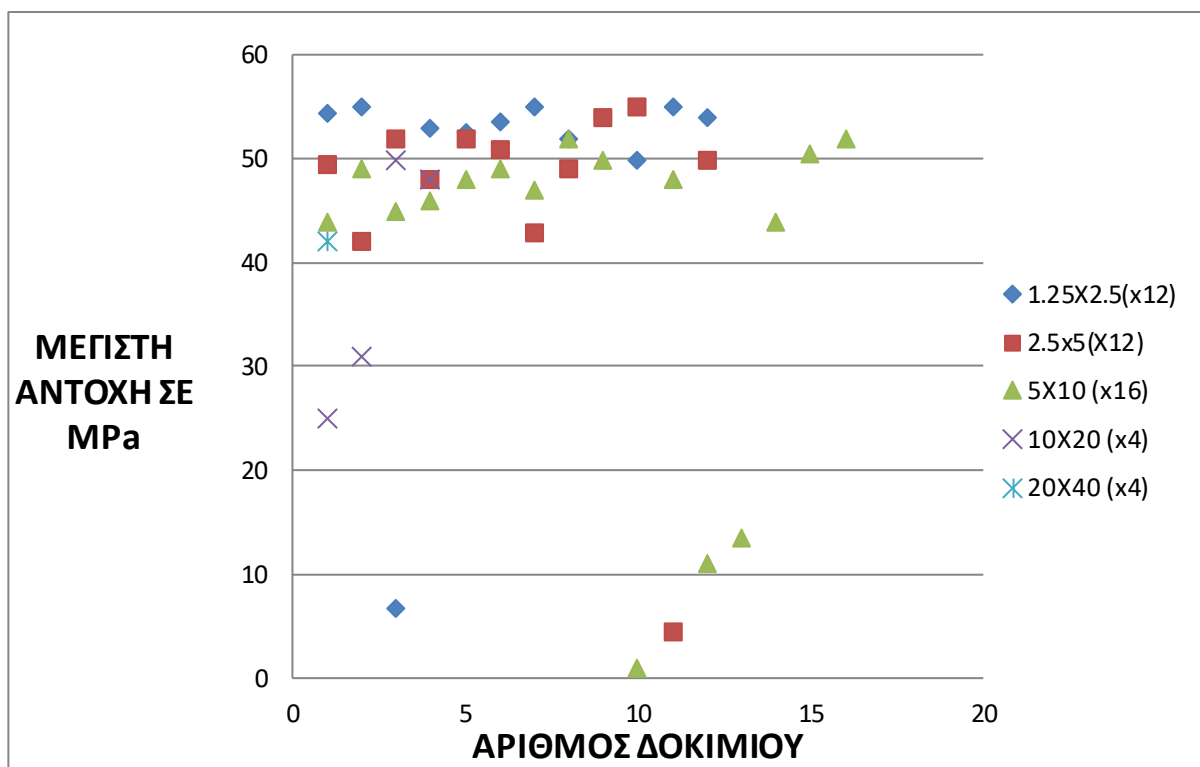
5.3.2. Πίνακες και διαγράμματα για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN

Όμοιοι πίνακες και διαγράμματα κατασκευάζονται και για τον δεύτερο τύπο δοκιμίων, αυτά που περιέχουν ασυνέχειες από το DFN. Η διαφοροποίηση η οποία συμβαίνει είναι ότι υπολογίζεται ένας μέσος όρος των τιμών της μέγιστης αντοχής για κάθε μέγεθος δοκιμίου και στη συνέχεια από αυτές τις μέσες τιμές δημιουργούνται τα διαγράμματα που διατυπώνουν μια σχέση κλίμακας και θλιπτικής αντοχής της βραχομάζας. Υπογραμμισμένα με χρώματα είναι τα δοκίμια που παρουσιάζουν μέγιστη(πράσινο), μέση(γκρι), ελάχιστη(κόκκινο), από τα οποία δημιουργούνται τα επόμενα μικρότερων διαστάσεων για να συνεχιστούν οι δοκιμές.

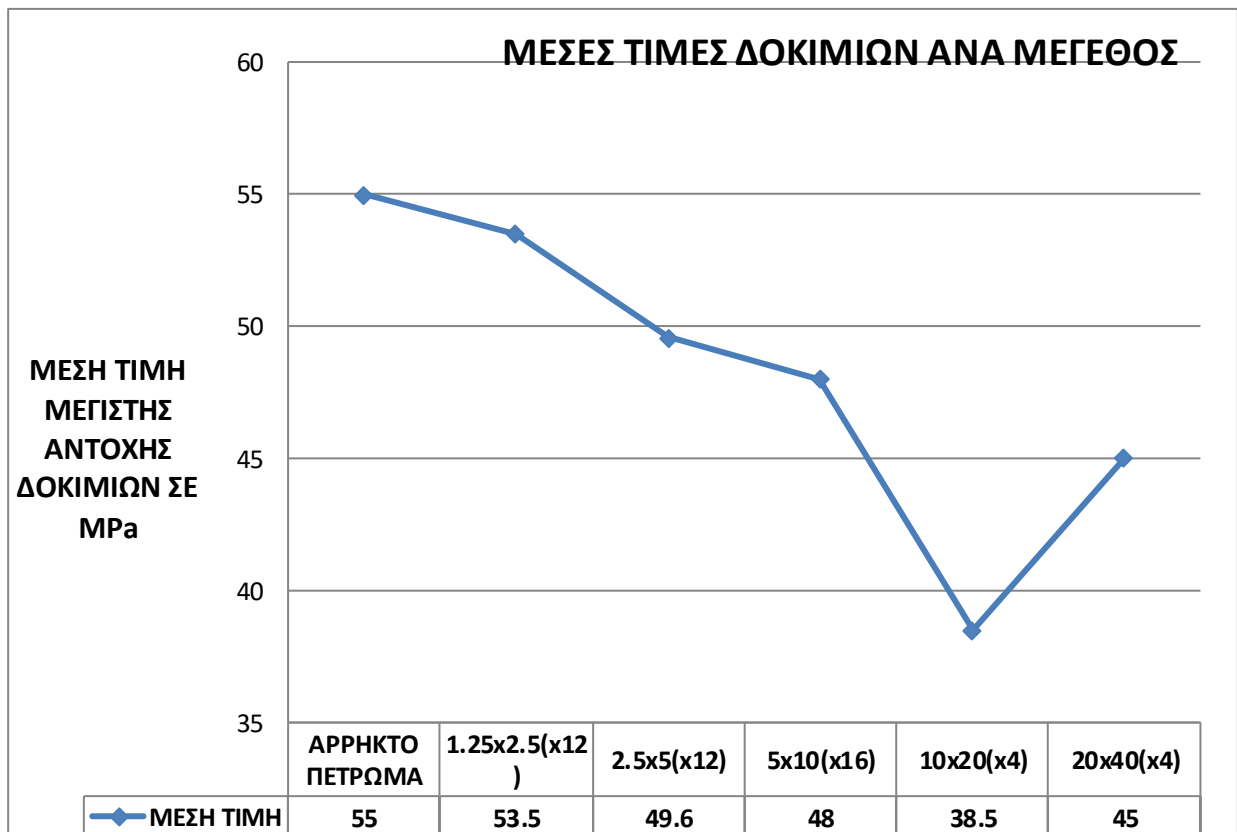
Ακόμα, σημαντικά δεδομένα εξάγονται μέσω του προγράμματος UDEC για κάθε δοκίμιο με ασυνέχειες από DFN, τα οποία αφορούν την επιφάνεια και τον αριθμό των άρρηκτων μπλοκ πετρώματος που απαρτίζουν τα δοκίμια, καθώς και το συνολικό μήκος των ασυνεχειών. Από αυτά τα δεδομένα υπολογίζονται χρήσιμοι δείκτες που βοηθούν στην αξιολόγηση της βραχομάζας για κάθε διάσταση δοκιμίων. Οι πίνακες με τα αποτελέσματα και τα δεδομένα που εξάγονται παρατίθενται στη συνέχεια:

Πίνακας 5. Πίνακας συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων της αντοχής των δοκιμών με ασυνέχειες από DFN.

ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ Μpa								
ΜΕΓΕΘΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	20X40 (x4)	10X20 (x4)	5X10 (x16)	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΕΣ ΤΙΜΕΣ	2.5x5(X12)	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΕΣ ΤΙΜΕΣ	1.25X2.5(x12)	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΕΣ ΤΙΜΕΣ
ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ								
1	42	25	44		49.5		54.5	
2	42	31	49		42		55	
3	49	50	45		52			6.8
4	47	48	46		48		53	
5			48		52		52.5	
6			49		51		53.5	
7			47		43		55	
8			52		49		52	
9			50		54		54	
10				1	55		50	
11			48			4.5	55	
12				11	50		54	
13				13.5				
14			44					
15			50.5					
16			52					
AVERAGE	45	38.5	48.0385		49.6		53.5	



Διάγραμμα 64. Διασπορά των τιμών της αντοχής των δοκιμών σε θλίψη για κάθε μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.



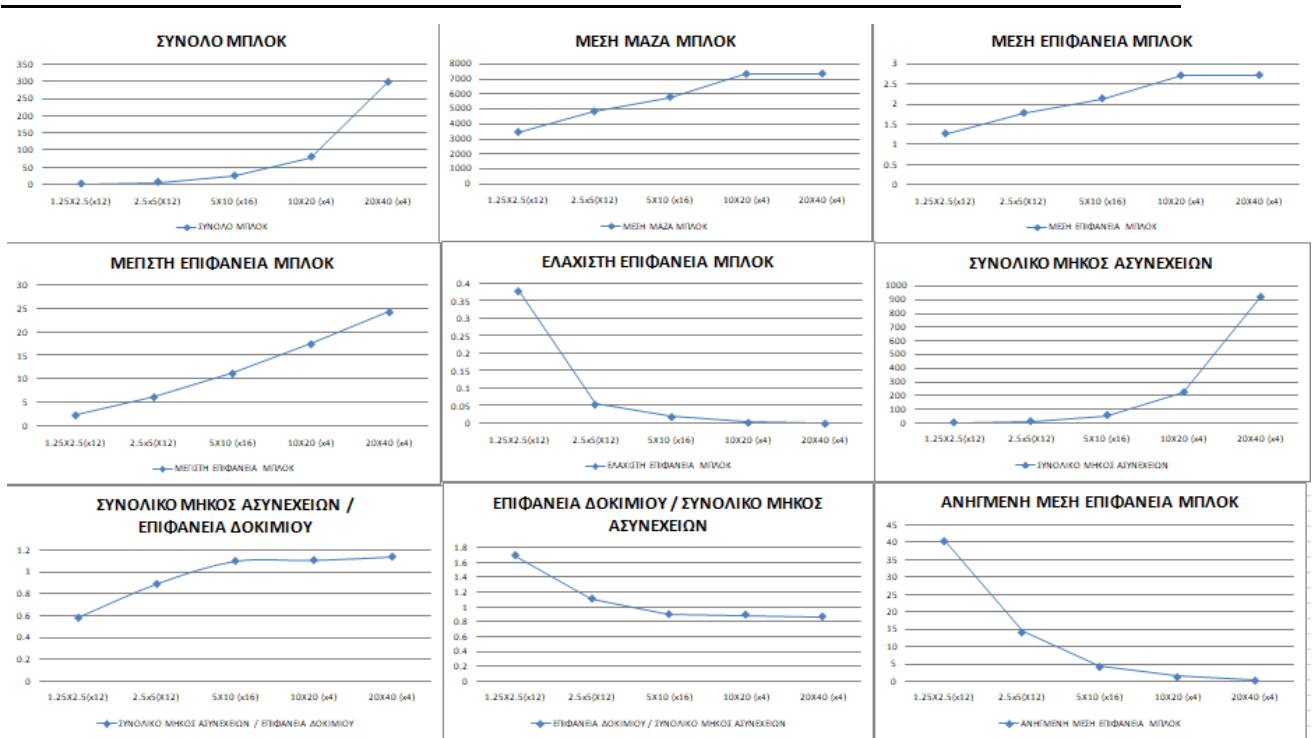
Διάγραμμα 65. Μέσες τιμές της αντοχής των δοκιμών σε θλίψη ανά μέγεθος δοκιμίου για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.

Πίνακας 6. Πίνακας με τις μέσες τιμές χρήσιμων δεδομένων ανά μέγεθος δοκιμίου για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN. Οι αναλυτικοί πίνακες με τα δεδομένα από τα οποία προκύπτουν οι μέσες τιμές παρατίθενται στο παράρτημα της εργασίας.

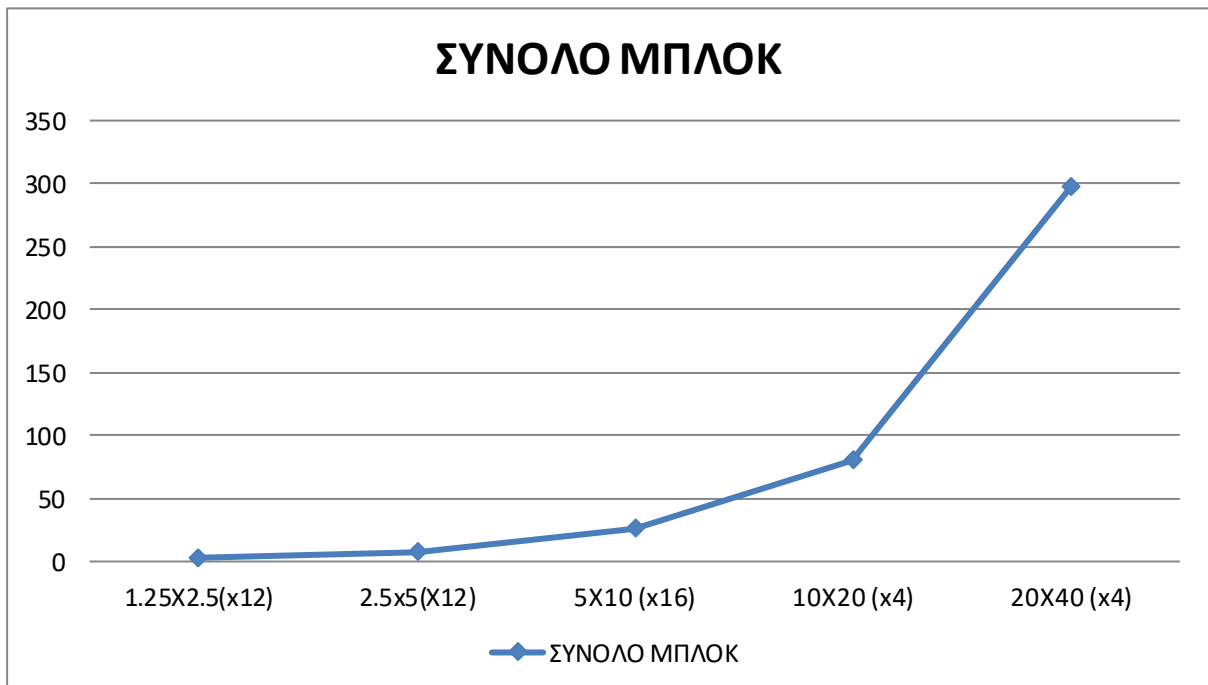
ΣΥΝΟΛΟ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΣΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ/ΣΥΝΟΛΟ ΜΠΛΟΚ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ / ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΜΕΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ
--------------	-----------------	----------------------	--------------------	---------------------	-------------------------	--------------------------	---------------	---------------------------	--	--	-------------------------------

1.25X2.5(x12)	3	3421.8	1.267	6592.8	1028.2	2.441	0.380	21.75	1.83	0.552	0.586	40.55
2.5x5(x12)	8	4801.1	1.778	17004.6	149.31	6.298	0.055	134.58	11.18	1.387	0.894	14.22
5X10 (x16)	26.62	5765.6	2.135	30571.2	52.99	11.323	0.019	668.62	55.15	2.168	1.103	4.27
10X20 (x4)	81	7301.7	2.7045	47472.5	9.87	17.582	0.0036	2681.72	222.28	2.871	1.111	1.35
20X40 (x4)	297.25	7326.5	2.7135	65862.5	1.47	24.392	0.00054	11036.25	914.10	3.091	1.142	0.33

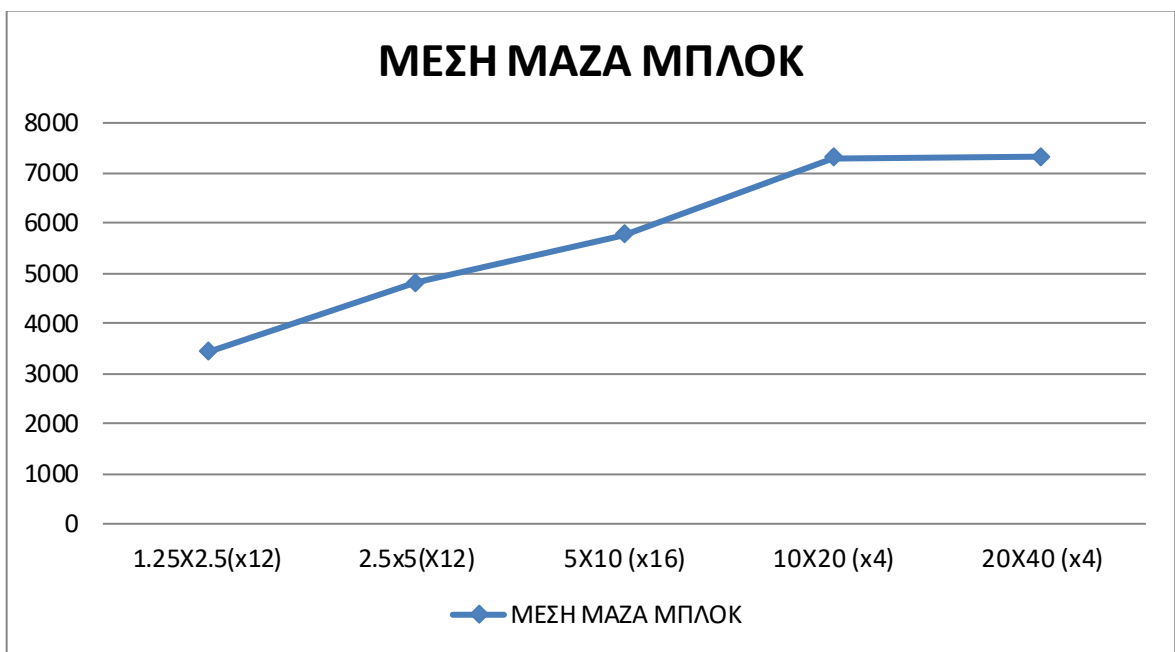
Σε αυτό το σημείο, από τον προηγούμενο πίνακα, μπορούν να υπολογισθούν κάποιοι χρήσιμοι δείκτες που χαρακτηρίζουν ποιοτικά τα δοκίμια. Παραθέτοντας τις τιμές των δεικτών αυτών, αλλά και των δεδομένων που προκύπτουν από το UDEC, σε διαγράμματα μπορούμε να αποτυπώσουμε τις μεταβολές των τιμών αυτών σε σχέση με το μέγεθος. Στις επόμενες σελίδες παρατίθενται αναλυτικά τα εν λόγω διαγράμματα:



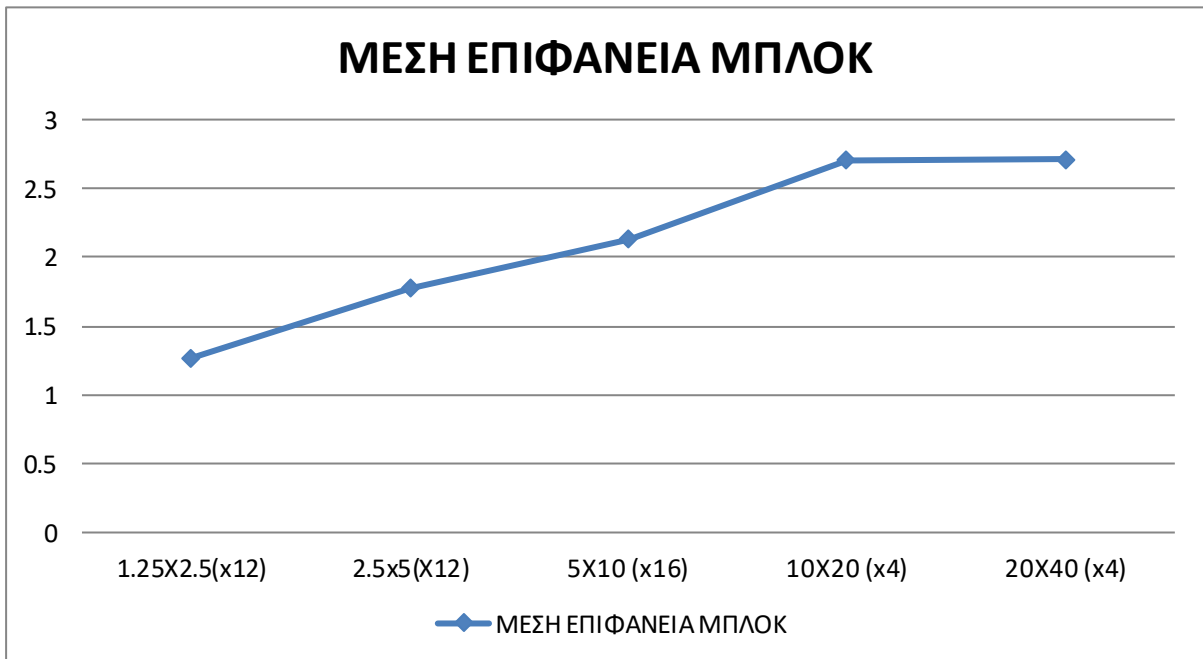
Σχήμα 94. Συνολική απεικόνιση των διαγραμμάτων με τις μεταβολές των τιμών των δεδομένων των δοκιμών με ασυνέχειες από DFN που εξήχθησαν από το UDEC.



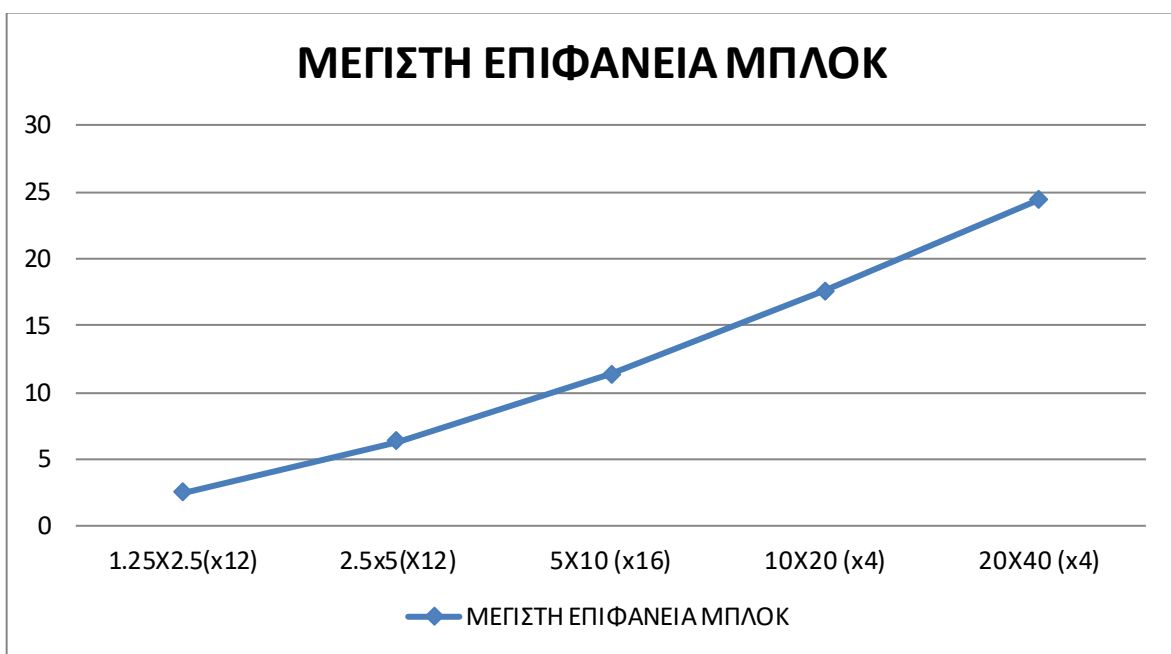
Διάγραμμα 66. Διάγραμμα της μέσης τιμής του συνόλου των άρρηκτων μπλοκ των δοκιμών, ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.



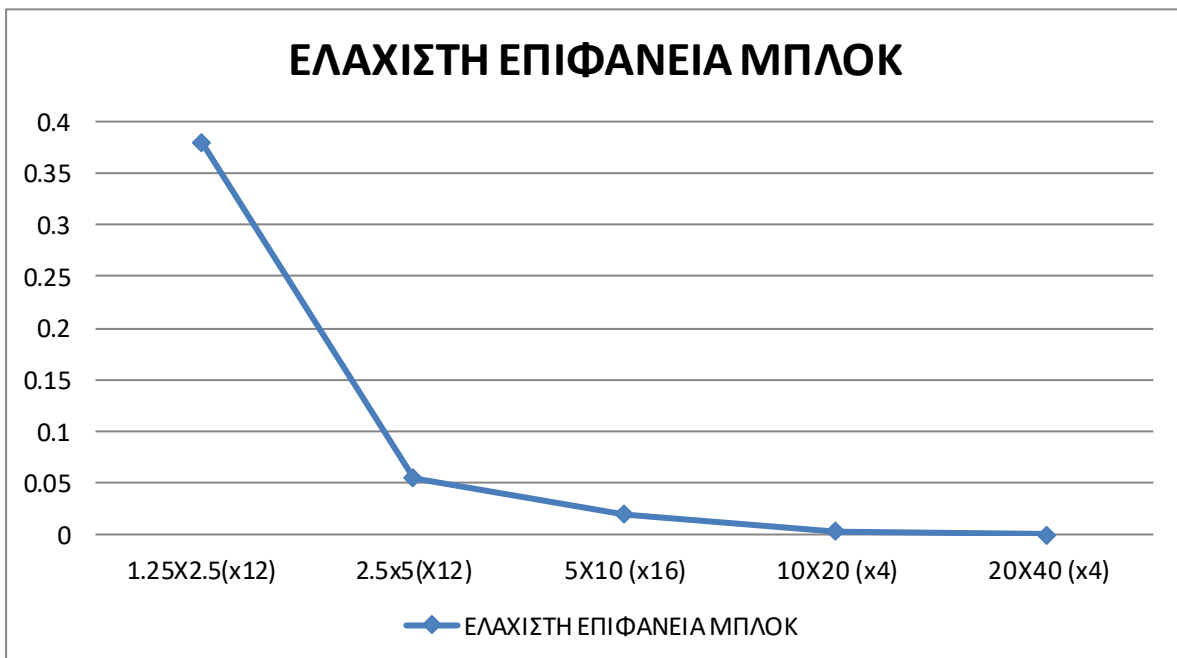
Διάγραμμα 68. Διάγραμμα της μέσης τιμής της μάζας, σε kg, των άρρηκτων μπλοκ των δοκιμίων, ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.



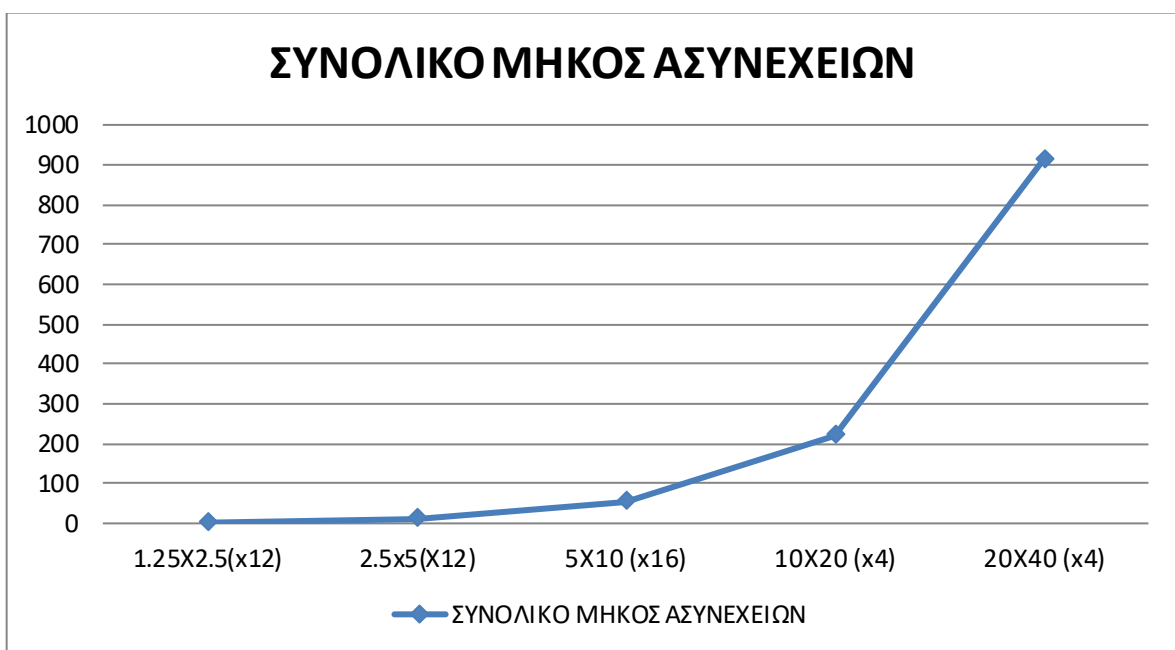
Διάγραμμα 67. Διάγραμμα της μέσης τιμής της μέσης επιφάνειας, σε m², των άρρηκτων μπλοκ των δοκιμίων, ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.



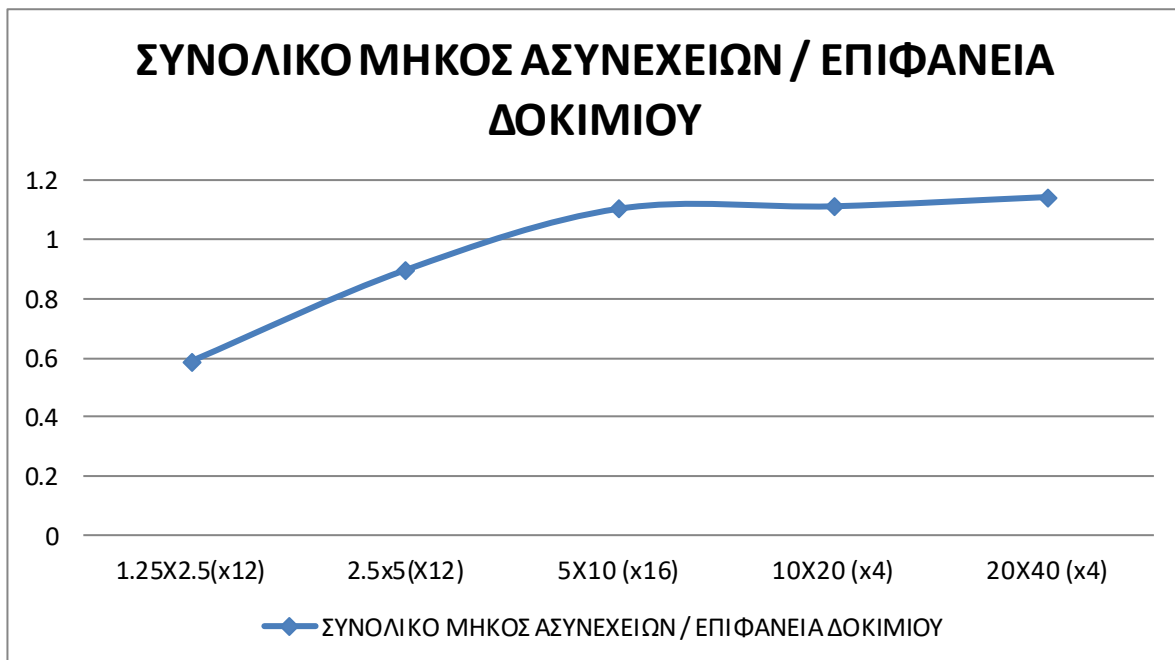
Διάγραμμα 69. Διάγραμμα της μέσης τιμής της μέγιστης επιφάνειας, σε m², των άρρηκτων μπλοκ των δοκιμίων, ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.



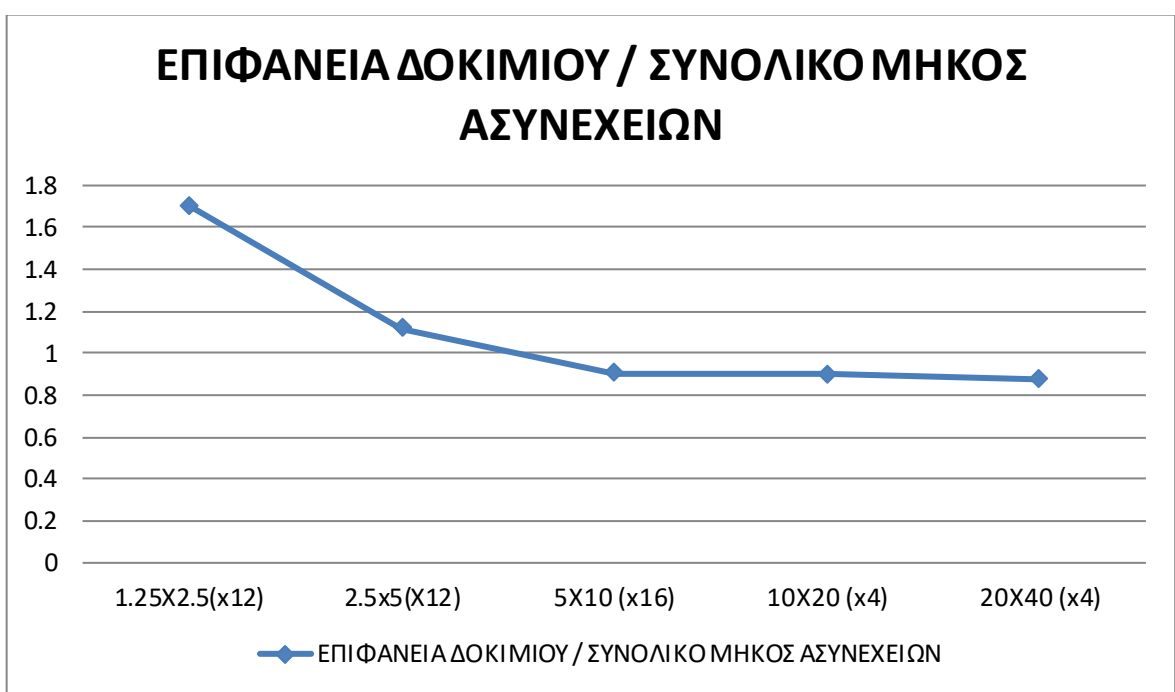
Διάγραμμα 70. Διάγραμμα της μέσης τιμής της ελάχιστης επιφάνειας, σε m², των άρρηκτων μπλοκ των δοκιμίων, ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.



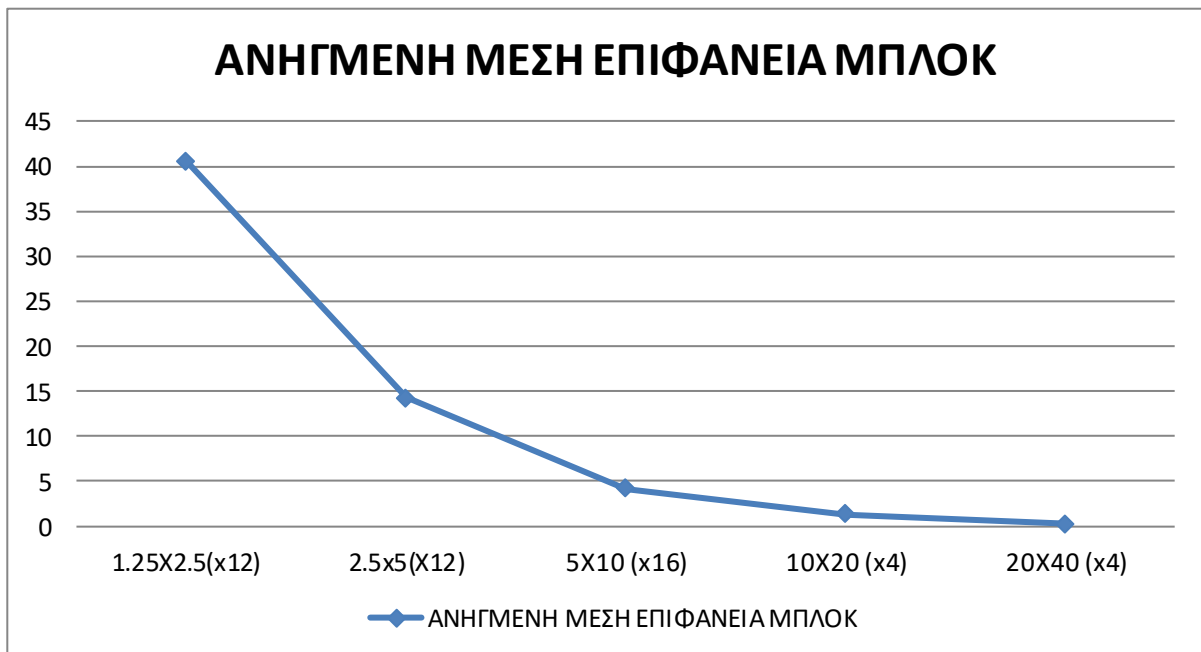
Διάγραμμα 71. Διάγραμμα της μέσης τιμής του συνολικού μήκους ασυνεχειών, σε m, των δοκιμίων, ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.



Διάγραμμα 72. Διάγραμμα του λόγου της μέσης τιμής του συνολικού μήκους ασυνεχειών προς την επιφάνεια του δοκιμίου, σε m⁻¹, ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.



Διάγραμμα 73. Διάγραμμα του αντίστροφου λόγου της μέσης τιμής του συνολικού μήκους ασυνεχειών προς την επιφάνεια του δοκιμίου, σε m, ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.



Διάγραμμα 74. Διάγραμμα της μέσης τιμής της μέσης ανηγμένης επιφάνειας, στα 100, των άρρηκτων μπλοκ των δοκιμίων, ανά μέγεθος δοκιμίου, για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας παρουσιάστηκαν οι ιδιαιτερότητες που προκύπτουν από την επίδραση της κλίμακας στην αντοχή της βραχομάζας. Η αντοχή της βραχομάζας είναι ένα μέγεθος κρίσιμο για το σχεδιασμό και την υλοποίηση έργων σε πετρώματα. Τα φαινόμενα κλίμακας στη μηχανική πετρωμάτων είναι ένα ζήτημα που έχει διερευνηθεί αρκετά από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα και διάφορες θεωρίες έχουν αναπτυχθεί.

Με τη χρήση σύγχρονων εργαλείων αριθμητικού κώδικα και τη δημιουργία αριθμητικών μοντέλων μπορούν να προσομοιωθούν δοκίμια μεγάλου μεγέθους που είναι τεχνικά αδύνατο να αναλυθούν σε πειραματικές διατάξεις και να εκτιμηθεί η επίδραση της κλίμακας. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις των προσομοιωμάτων που δημιουργήθηκαν σε αυτή την εργασία, αναλύονται στη συνέχεια.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών - προσομοιωμάτων με οικογένειες κάθετων ασυνεχειών προκύπτουν:

- Η επίδραση της κλίμακας είναι σημαντικά μεγαλύτερη στα δοκίμια των οποίων τα επίπεδα αδυναμίας έχουν κλίση ίση με 45°-135°. Αντιθέτως, στα δοκίμια με κλίση ασυνεχειών 0-90° και 30°-120°, παρατηρείται ελάχιστη μείωση της αντοχής σε σχέση με την αύξηση του μεγέθους των δοκιμών, με τα δοκίμια με ασυνέχειες κλίσης 30°-120° να παρουσιάζουν μικρότερη, περίπου τη μισή, αντοχή από αυτή των δοκιμών με οριζόντιες και κάθετες ασυνέχειες, τα οποία είχαν αντοχή κοντά σε αυτή του άρρηκτου πετρώματος. Αυτό εκτιμάται ότι συμβαίνει διότι όσο οι κλίσεις των ασυνεχειών των δοκιμών απομακρύνονται από τις 45-135 μοίρες και πλησιάζουν τις 0-90 τόσο περισσότερο το άρρηκτο πέτρωμα λαμβάνει μέρος στην αστοχία των δοκιμών και λιγότερο η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών με συνέπεια την αύξηση της αντοχής της βραχομάζας.
- Στα δοκίμια με κλίση ασυνεχειών 45° -135° τα οποία είναι και τα πιο επισφαλή, δεν υπάρχει γραμμική αύξηση της αντοχής σε σχέση με την αύξηση του μεγέθους τους. Στα δοκίμια αυτά παρατηρείται η παρουσία «σκαλοπατιού» μικρή μείωση και διαδοχικά απότομη αύξηση της αντοχής τους με την αύξηση του μεγέθους τους. Αυτό εκτιμάται ότι συμβαίνει διότι υπάρχει ένας κρίσιμος αριθμός μπλοκ άρρηκτου πετρώματος που προστίθεται κάθε φορά στα δοκίμια όταν υπάρχει

αύξηση του μεγέθους τους, καθώς η απόσταση των ασυνεχειών παραμένει σταθερή, ενώ η επιφάνεια των δοκιμών αυξάνεται γεωμετρικά. Αυτός ο αριθμός των προστιθέμενων μπλοκ από ένα σημείο και μετά προσδίδει και μεγαλύτερη αντοχή στα δοκίμια, καθώς επιτρέπει την καλύτερη αλληλοεμπλοκή των άρρηκτων μπλοκ, όπως επίσης και όλο και περισσότερα μέρη άρρηκτου πετρώματος προστίθενται, με αποτέλεσμα να λαμβάνουν μεγαλύτερο μέρος στην διαδικασία της αστοχίας, και η αντοχή των δοκιμών συνεπώς να αυξάνεται.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών - προσομοιωμάτων με ασυνέχειες από DFN προκύπτουν:

- Η σημαντική μείωση της αντοχής της βραχομάζας σε σχέση με την αύξηση του μεγέθους της. Παρατηρείται σχεδόν γραμμική μείωση της αντοχής της βραχομάζας ξεκινώντας από τα δοκίμια με το μικρότερο μέγεθος 1.25x2.50m μέχρι και τα δοκίμια μεγέθους 10x20m. Τα δοκίμια διαστάσεων 20x40m παρουσιάζουν αντοχή που ανέρχεται στο 80% της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος και μεγαλύτερη από αυτή των δοκιμών με τις αμέσως μικρότερες διαστάσεις (10x20m). Η απότομη μείωση και τελικώς η μικρή αύξηση της αντοχής της βραχομάζας που παρατηρείται, εκτιμάται ότι οφείλεται στο γεγονός ότι όλο και περισσότερα επίπεδα αδυναμίας λαμβάνουν μέρος στην αστοχία των δοκιμών καθώς αυξάνεται το μέγεθος τους μέχρις ότου δημιουργηθεί ένα «ισότροπο» δοκίμιο στις διαστάσεις 20x40 όπου και παρατηρείται αυτή η θετική μεταβολή της αντοχής.
- Η ύπαρξη ενός δείκτη που σχετίζεται με την αντοχή της βραχομάζας. Από τα διαγράμματα των δεικτών που προέκυψαν από τα δεδομένα που εξήχθησαν από το UDEC παρατηρείται πως η διακύμανση ενός δείκτη φέρει ομοιότητες με τη διακύμανση της αντοχής των δοκιμών. Συγκεκριμένα ο λόγος *συνολικό μήκος ασυνεχειών / επιφάνεια δοκιμίου* που ουσιαστικά αντιπροσωπεύει το μήκος των ασυνεχειών στη μοναδιαία επιφάνεια, διαφέρει από τους υπόλοιπους. Ενώ αρχικά παρατηρείται αυξητική τάση του δείκτη, στις διαστάσεις 10x20m η μεταβολή είναι σχεδόν μηδενική. Στις διαστάσεις αυτές παρατηρείται και η μεγαλύτερη διασπορά των τιμών της αντοχής και εκτιμάται ότι οφείλεται στο γεγονός πως τα δοκίμια αυτών των διαστάσεων έχουν και τη μεγαλύτερη ανισοτροπία. Όλοι οι υπόλοιποι δείκτες έχουν σταθερή ή αναμενόμενη βάση στατιστικής από το DFN μεταβολή.

- Τα δοκίμια με τις χαμηλότερες τιμές αντοχής ακόμα και αν αυτές απορρίφθηκαν στατιστικά λόγω μεγάλης απόκλισης, παρουσίασαν συνήθως ένα διαμήκες επίπεδο αδυναμίας και κλίσης κοντά στις 45° ή 135° από τον οριζόντιο άξονα.

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι ο μηχανισμός αστοχίας της βραχομάζας είναι μια σύνθετη διαδικασία, όπου η επίδραση των φαινομένων κλίμακας αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην διαδικασία αυτή, και για τη σωστή εκτίμηση της αντοχής θα πρέπει η εκτίμηση των παραμέτρων αστοχίας να συμβαίνει στο εύροστης κλίμακας ενδιαφέροντος. Τα φαινόμενα κλίμακας αποτελούν ένα περίπλοκο φαινόμενο που περιλαμβάνει πολλούς παράγοντες και σίγουρα η περαιτέρω ανάλυσή του θα επιφέρει σημαντικά ευρήματα.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Alber M. (2001). Incorporation of discontinuity related anisotropy into rock mass classification. *Felsbau* 4/2001, pp. 55-60.
- [2] Cundall P. , Pierce M. , Mas Ivars D. (2008). *Quantifying the Size Effect of Rock Mass Strength*. Australian Centre for Geomechanics, Perth.
- [3] Heuze E. (1979). *Scale Effects in the Determination of Rock Mass Strength and Deformability*. Article for *Rock Mechanics*, Vol. 12/3-4
- [4] Itasca Consulting Group (2019). *Οδηγός χρήστη αριθμητικού κώδικα UDEC*.
Ανάκτηση από: <https://www.itascacg.com/software/downloads/udec-downloads>
- [5] Schultz R. (1996). *Relative scale and the strength and deformability of rock masses*. Great Britain : *Journal of Structural Geology*.
- [6] Shengdi H. , Yandong L. , Adnan A. (2018). *A comparative study of UDEC simulations of an unsupported rock tunnel*. Article for *Tunnelling and Underground Space Technology* Volume 72, February 2018.
- [7] Xiabing L. , Shaohui H. , Dahai W. (2020). *Numerical Analysis of the Anisotropy and Scale Effects on the Strength Characteristics of Defected Rockmass*. Article for *Advances in Civil Engineering* Volume 2020.
- [8] York G. , Canbulat I. (1998). *The scale effect, critical rock mass strength and pillar system design*. Article for *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* JANUARY/FEBRUARY 1998.
- [9] Μαρίνος Β. , Μαρίνος Π. , Hoek E. (2004). *Γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI. Εφαρμογή, συστάσεις, περιορισμοί και πεδία μεταβολών ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος*. ΑΠΘ
- [10] Νομικός Π. (2015). *Εισαγωγή στη μηχανική των πετρωμάτων*. Αθήνα: Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράματα και Βοηθήματα.

- [11] Τομπουλίδου Σ. (2015). *Επίδραση της ανισοτροπίας και της κλίμακας στην ευστάθεια βραχωδών πρανών*. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [12] Χαλακατεβάκης Ν. (2010). *Αναλυτικός υπολογισμός κερματισμένης βραχώμαζας*. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 7. Πίνακας δεδομένα για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN διαστάσεων 20x40

ΜΕΓΕΘΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		20x40 (x4)		Πίνακας 7. Πίνακας δεδομένα για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN διαστάσεων 20x40												
				ΑΝΤΟΧΗ ΒΡ/ΖΑΣ	ΣΥΝΟΛΟ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΣΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ/ΣΥΝΟΛΟ ΜΠΛΟΚ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ / ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΜΕΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ
ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	1	42	264	8.18E+03	3.03E+00	6.45E+04	2.98E+00	2.39E+01	1.10E-03	10515	7	878.2446	3.326684356	1.097805	837	3.79E-01
	2	42	340	6.35E+03	2.35E+00	5.10E+04	6.05E-01	1.89E+01	2.24E-04	11645	562	961.0047	2.826484577	1.201255	945	2.94E-01
	3	49	289	7.47E+03	2.77E+00	6.49E+04	4.83E-01	2.40E+01	1.79E-04	11093	098	919.3299	3.181072352	1.149162	387	3.46E-01
	4	47	296	7.30E+03	2.70E+00	8.31E+04	1.82E+00	3.08E+01	6.76E-04	10892	87	897.8332	3.033220564	1.122291	609	3.38E-01

5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
AVERAGE			297.25	7326.5	2.7135	65862. 5	1.4723 5	24.3925	0.00054 515	11036. 25	914.1031 557	3.091865462	1.142628 945	0.339187 5

Πίνακας 8. Πίνακας με δεδομένα για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN διαστάσεων 10x20

ΜΕΓΕΘΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		10X20 (x4)	Πίνακας 8. Πίνακας με δεδομένα για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN διαστάσεων 10x20											
			ΑΝΤΟΧΗ ΒΡ/ΖΑΣ	ΣΥΝΟΛΟ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΣΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ/ΣΥΝΟΛΟ ΜΠΛΟΚ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ / ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ
ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	1	25	76	7.11E+03	2.63E+00	4.17E+04	2.88E+00	1.55E+01	1.07E-03	2532	205.8818	2.708971053	1.029409	1.32E+00
	2	31	51	1.06E+04	3.92E+00	6.45E+04	1.03E+01	2.39E+01	3.82E-03	2168	183.1308	3.5908	0.915654	1.96E+00
	3	50	120	4.50E+03	1.67E+00	3.28E+04	2.98E+00	1.22E+01	1.10E-03	3444	281.5199	2.345999167	1.4075995	8.34E-01
	4	48	77	7.01E+03	2.60E+00	5.08E+04	2.33E+01	1.88E+01	8.64E-03	2583	218.6	2.838961039	1.093	1.30E+00

5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
AVERAGE			81	7301.7 5	2.7045	47472. 5	9.875	17.5825	0.00365 725	2681.7 5	222.2831 25	2.871182815	1.111415 625	1.35225

Πίνακας 9. Πίνακας με δεδομένα για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN διαστάσεων 5x10

ΜΕΓΕΘΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		5X10 (x16)												
ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ		ΑΝΤΟΧΗ ΒΡ/ΖΑΣ	ΣΥΝΟΛΟ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΣΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ/ΣΥΝΟΛΟ ΜΠΛΟΚ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ / ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΜΕΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ
1	44	22	6.14E+03	2.27E+00	2.72E+04	2.63E+02	1.01E+01	9.75E-02	649	52.6926	2.395118182	1.053852	4.55E+00	
2	49	17	7.94E+03	2.94E+00	4.07E+04	2.88E+00	1.51E+01	1.07E-03	526	41.6351	2.449123529	0.832702	5.88E+00	
3	45	20	6.75E+03	2.50E+00	3.68E+04	5.37E+00	1.36E+01	1.99E-03	537	45.4034	2.27017	0.908068	5.00E+00	
4	46	17	7.94E+03	2.94E+00	3.96E+04	1.15E+02	1.47E+01	4.26E-02	532	44.82425	2.636720588	0.896485	5.88E+00	

5	48	21	6.43E+0	2.38E+0	3.33E+	1.61E+0	1.23E+0	5.95E-02	524	44.5973	2.123680952	0.891946	4.76E+00
			3	0	04	2	1						
6	49	35	3.86E+0	1.43E+0	2.44E+	2.19E+0	9.05E+0	8.12E-03	763	66.1488	1.889965714	1.322976	2.86E+00
			3	0	04	1	0						
7	47	25	5.40E+0	2.00E+0	2.16E+	1.80E+0	7.99E+0	6.65E-03	788	62.9007	2.516028	1.258014	4.00E+00
			3	0	04	1	0						
8	52	13	1.04E+0	3.85E+0	5.81E+	1.07E+0	2.15E+0	3.95E-02	329	29.4698	2.266907692	0.589396	7.69E+00
			4	0	04	2	1						
9	50	52	2.60E+0	9.62E-01	2.24E+	7.46E-01	8.28E+0	2.76E-04	1020	79.62098	1.531172692	1.592419	1.92E+00
			3		04		0					6	
10	1	43	3.14E+0	1.16E+0	2.44E+	7.46E-01	9.03E+0	2.76E-04	949	77.88722	1.811330698	1.557744	2.32E+00
			3	0	04		0					4	
11	48	37	3.65E+0	1.35E+0	1.68E+	1.03E+0	6.21E+0	3.83E-03	760	66.3617	1.793559459	1.327234	2.70E+00
			3	0	04	1	0						
12	11	21	6.43E+0	2.38E+0	2.30E+	1.97E+0	8.51E+0	7.29E-03	590	50.397	2.399857143	1.00794	4.76E+00
			3	0	04	1	0						
13	13.5	34	3.97E+0	1.47E+0	1.74E+	7.46E-01	6.43E+0	2.76E-04	860	69.60687	2.047260912	1.392137	2.94E+00

				3	0	04		0		1		42	
14		44	24	5.63E+0	2.09E+0	3.05E+	6.27E+0	1.13E+0	2.32E-02	664	52.8316	2.201316667	1.056632 4.17E+00
				3	0	04	1	1					
15		50.5	23	5.87E+0	2.17E+0	2.24E+	3.60E+0	8.31E+0	1.34E-02	635	52.0851	2.264569565	1.041702 4.35E+00
				3	0	04	1	0					
16		52	22	6.14E+0	2.27E+0	5.08E+	2.33E+0	1.88E+0	8.64E-03	572	46.0097	2.09135	0.920194 4.55E+00
				3	0	04	1	1					
AVERAGE			26.62	5765.68	2.13553	30571.	52.9935	11.3231	0.019625	668.6	55.15450	2.168008237	1.103090 4.27106
			5	75	125	25	625	25	806	25	756		151 25

Πίνακας 10. Πίνακας με δεδομένα για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN διαστάσεων 2.5x5.0

ΜΕΓΕΘΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		2.5x5(Χ 12)	Πίνακας 10. Πίνακας με δεδομένα για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN διαστάσεων 2.5x5.0											
			ΑΝΤΟΧΗ ΒΡ/ΖΑΣ	ΣΥΝΟΛΟ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΣΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ/ΣΥΝΟΛΟ ΜΠΛΟΚ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ/ΔΟΚΙΜΙΟΥ
ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	1	49.5	11	3.07E+03	1.14E+00	7.00E+03	2.77E+02	2.59E+00	1.03E-01	215	17.6093	1.600845455	1.408744	9.096
	2	42	6	5.63E+03	2.08E+00	2.54E+03	2.27E+00	9.41E+00	8.42E-04	79	7.1687	1.194783333	0.573496	16.664
	3	52	8	4.22E+03	1.56E+00	1.09E+03	2.79E+02	4.04E+00	1.03E-01	183	14.3582	1.794775	1.148656	12.504
	4	48	11	3.07E+03	1.14E+00	1.26E+03	2.15E+02	4.66E+00	7.96E-02	156	13.2965	1.208772727	1.06372	9.088

				3		4	2	0						
5	52	4	8.44E+0	3.13E+00	3.24E+0	6.74E+0	1.20E+0	2.50E-02	36	3.9697	0.992425	0.317576	25	
			3		4	1	1							
6	51	4	8.44E+0	3.13E+00	2.36E+0	3.91E+0	8.75E+0	1.45E-01	56	6.0965	1.524125	0.48772	25	
			3		4	2	0							
7	43	6	5.63E+0	2.08E+00	1.72E+0	1.00E+0	6.36E+0	3.72E-02	92	8.4544	1.409066667	0.676352	16.664	
			3		4	2	0							
8	49	7	4.82E+0	1.79E+00	2.01E+0	2.50E+0	7.44E+0	9.25E-02	150	10.9914	1.5702	0.879312	14.288	
			3		4	2	0							
9	54	9	3.75E+0	1.39E+00	1.17E+0	3.60E+0	4.32E+0	1.34E-02	162	12.8761	1.430677778	1.030088	11.112	
			3		4	1	0							
10	55	9	3.75E+0	1.39E+00	1.75E+0	1.56E+0	6.50E+0	5.77E-02	133	11.058	1.228666667	0.88464	11.112	
			3		4	2	0							
11	4.5	13	2.59E+0	9.61E-01	8.55E+0	9.39E+0	3.17E+0	3.48E-03	210	17.5797	1.352284615	1.406376	7.684	
			3		3	0	0							
12	50	8	4.22E+0	1.56E+00	1.72E+0	9.39E+0	6.35E+0	3.48E-03	143	10.7737	1.3467125	0.861896	12.504	
			3		4	0	0							

AVERAGE	13													
	14													
	15													
	16													
			8	4801.16 667	1.778291 667	17004.6 667	149.313 333	6.2985	0.055299 192	134.583 333	11.18601 667	1.387777895	0.894881 333	14.22633 333

Πίνακας 11. Πίνακας με δεδομένα για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN διαστάσεων 1.25x2.50

ΜΕΓΕΘΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		1.25X2.5(x12)	Πίνακας 11. Πίνακας με δεδομένα για τα δοκίμια με ασυνέχειες από DFN διαστάσεων 1.25x2.50											
			ΑΝΤΟΧΗ ΒΡ/ΖΑΣ	ΣΥΝΟΛΟ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΣΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΜΑΖΑ ΜΠΛΟΚ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΠΛΟΚ	ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ/ΣΥΝΟΛΟ ΜΠΛΟΚ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ/ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ
ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	1	54.5	3	2.81E+0	1.04E+0	7.81E+0	1.30E+0	2.89E+0	4.81E-03	10	1.0719	0.3573	0.343008	33.344
	2	55	1	8.44E+0	3.13E+0	8.44E+0	8.44E+0	3.13E+0	3.13E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0	100
	3	6.8	4	2.11E+0	7.80E-01	4.58E+0	2.27E+0	1.70E+0	8.42E-04	34	3.4714	0.86785	1.110848	24.9696
	4	53	4	2.11E+0	7.82E-	6.77E+0	3.35E+0	2.51E+0	1.24E-02	35	2.5617	0.640425	0.819744	25.0208

				3	01	3	1	0						
5	52.5	2	4.22E+0	1.56E+0	7.83E+0	6.06E+0	2.90E+0	2.25E-01	16	1.879	0.9395	0.60128	50.016	
			3	0	3	2	0							
6	53.5	2	4.22E+0	1.56E+0	8.37E+0	6.74E+0	3.10E+0	2.50E-02	4	0.2946	0.1473	0.094272	49.984	
			3	0	3	1	0							
7	55	2	4.22E+0	1.56E+0	7.84E+0	5.97E+0	2.90E+0	2.21E-01	16	1.2443	0.62215	0.398176	50.016	
			3	0	3	2	0							
8	52	2	4.22E+0	1.56E+0	8.38E+0	6.11E+0	3.10E+0	2.26E-02	8	0.554	0.277	0.17728	50.016	
			3	0	3	1	0							
9	54	4	2.11E+0	7.81E-	5.90E+0	4.55E+0	2.18E+0	1.68E-02	29	2.3303	0.582575	0.745696	24.9984	
			3	01	3	1	0							
10	50	5	1.69E+0	6.25E-	5.39E+0	7.36E+0	2.00E+0	2.73E-02	47	3.6201	0.72402	1.158432	20	
			3	01	3	1	0							
11	55	3	2.81E+0	1.04E+0	3.35E+0	2.34E+0	1.24E+0	8.67E-01	32	2.7016	0.9005333333	0.864512	33.344	
			3	0	3	3	0							
12	54	4	2.11E+0	7.81E-	4.47E+0	6.08E+0	1.65E+0	2.25E-02	30	2.278	0.5695	0.72896	25.0016	
			3	01	3	1	0							

AVERAGE	13													
	14													
	15													
	16													
				3421.83	1.26747	6592.83	1028.29	0.380847	1.833908		0.586850			
			3	333	5	333	283	2.44175	525	21.75	333	0.552346111	667	40.5592

