



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΑΝΕΠΙΠΕΔΩΝ
ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ**



ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΜΑΚΡΗΣ

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

ΒΟΛΟΣ 2024

© 2024 Σπυρίδων Μακρής

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Γεώργιος Εφραιμίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής,
(Επιβλέπων) Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Γρηγόριος Τσινίδης, Επίκουρος Καθηγητής,
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

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

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Γεώργιο Εφραιμίδη, για την πολύτιμη βοήθεια, το πραγματικό ενδιαφέρον και την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Γρηγόριο Τσινίδη και την Λέκτορα κ. Πολυξένη Καλλιόγλου για την αποδοχή τους να είναι μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής. Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την βοήθεια και κατανόησή τους την περίοδο παραγωγής της εργασίας. Τέλος, θέλω να εκφράσω την απέραντη ευγνωμοσύνη μου στους γονείς και τα αδέρφια μου διότι χωρίς την υποστήριξή τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου, η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας δεν θα ήταν γεγονός.

Σπυρίδων Μακρής

ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΑΝΕΠΙΠΕΔΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Σπυρίδων Μακρής

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Εφραιμίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάζεται το κριτήριο διατμητικής αντοχής των Barton-Bandis το οποίο ερμηνεύει τα φαινόμενα κλίμακας που παρατηρούνται στις ασυνέχειες βραχώμαζας και στη συνέχεια μοντελοποιούνται μετρήσεις πεδίου με την χρήση του κριτηρίου αυτού. Με τον όρο φαινόμενο κλίμακας περιγράφεται η εξάρτηση της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών από την κλίμακα του δοκιμίου. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος της ασυνέχειας τόσο μικρότερη είναι η διατμητική της αντοχή. Σύμφωνα με τα φαινόμενα κλίμακας παρατηρούνται αποκλίσεις στα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών που αφορούν την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών σε σχέση με τα αποτελέσματα στο πεδίο. Αυτές οι διαφορές οφείλονται στο μέγεθος του εξεταζόμενου δοκιμίου, καθώς η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών στη κλίμακα του δοκιμίου στο εργαστήριο που λαμβάνεται δεν αντιστοιχεί στην κλίμακα της βραχώμαζας στο πεδίο. Αυτή την αναντιστοιχία προσπάθησαν να εξαλείψουν οι Barton και Bandis, προτείνοντας μία σχέση που αξιοποιεί τα αποτελέσματα στη κλίμακα του εργαστηρίου και τα ανάγει στην κλίμακα του πεδίου. Με τη βοήθεια του κριτηρίου Barton-Bandis γίνεται διόρθωση της τιμής της διατμητικής αντοχής ανεπίπεδων ασυνεχειών μέσω της διόρθωσης των τιμών του δείκτη τραχύτητας JRC και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη των τοιχωμάτων της ασυνέχειας (JCS) από την εργαστηριακή κλίμακα στη κλίμακα πεδίου. Η εργασία ολοκληρώνεται με την προσπάθεια επαλήθευσης αυτής της σχέσης με δεδομένα από μετρήσεις πεδίου, όπου συγκρίνονται τιμές από δημοσιευμένα, σε επιστημονικό περιοδικό, δοκιμή που έχει πραγματοποιηθεί στο πεδίο με τιμές που προκύπτουν χρησιμοποιώντας την σχέση του κριτηρίου Barton-Bandis. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης δείχνει καλή αντιστοίχιση των θεωρητικών τιμών και των τιμών μετρήσεων πεδίου.

Λέξεις Κλειδιά: Φαινόμενα Κλίμακας, Κριτήριο Barton-Bandis, Ασυνέχειες Βραχώμαζας, Διατμητική συμπεριφορά ασυνεχειών, Δείκτης τραχύτητας JRC.

SCALE EFFECTS AND SHEAR STRENGTH OF NON-PLANAR ROCK MASS DISCONTINUITIES

Spyridon Makris

University of Thessaly, Department of Civil Engineering

Supervisor: Georgios Efraimidis, Associate Professor

Abstract

In this thesis, the Barton-Bandis shear strength criterion which explains the scale effects observed in rock mass discontinuities is examined and then field measurements are modelled using this criterion. The term scale effect describes the dependence of the shear strength of the discontinuities on the scale of the sample. The longer the length of the discontinuity, the lower its shear strength. According to the scale effects, deviations in the laboratory test results concerning the shear strength of the discontinuities are observed compared to the results in the field. These differences are due to the size of the sample tested, as the shear strength of the discontinuities at the scale of the laboratory sample obtained does not correspond to the scale of the rock mass in the field. Barton and Bandis attempted to eliminate this mismatch by proposing a relationship that utilizes the results at the laboratory scale and reduces them to the field scale. The Barton-Bandis criterion is used to correct the value of the shear strength of non-planar discontinuities by correcting the values of the roughness index JRC and the uniaxial compressive strength of the discontinuity walls (JCS) from the laboratory scale to the field scale. The thesis concludes by attempting to verify this relationship with field measurement data, comparing values from a published test in a scientific journal that has been carried out in the field with values obtained using the Barton-Bandis criterion. The result of the comparison shows good agreement between theoretical values and field measurement values.

Keywords: *Scale effects, Barton-Bandis Criterion, Rock mass discontinuities, Shear Behavior of discontinuities, Joint Roughness Coefficient (JRC).*

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Ασυνέχειες Βραχώμαζας	15
1.1	Είδη Ασυνεχειών	16
1.2	Χαρακτηριστικά ασυνεχειών	18
1.2.1	Προσανατολισμος (orientation)	18
1.2.2	Απόσταση (spacing)	19
1.2.3	Εμμονή ή συνεχεια (persistence)	20
1.2.4	Αντοχή Τοιχωμάτων	21
1.2.5	Άνοιγμα (aperture)	22
1.2.6	Υλικό Πλήρωσης (filling)	23
1.2.7	Συνθήκες Υπόγειου Νερού	23
1.2.8	Αριθμός Συνόλων	24
1.2.9	Μέγεθος Μπλοκ	24
1.2.10	Τραχύτητα (roughness)	25
1.3	Διατμητική συμπεριφορά ασυνεχειών	26
1.3.1	Γωνία βασικής τριβής φb	26
1.3.2	Γωνία διαστολής dn	27
1.3.3	Συνιστώσα θραύσης ασπεριτών	28
Κεφάλαιο 2	Τραχειές ή Ανεπίπεδες Ασυνέχειες	30
2.1	Τραχύτητα των Ασυνεχειών	30
2.2	Δείκτης τραχύτητας ασυνεχειών JRC, JCS	31
2.3	Επιδράσεις της Κλίμακας	43
2.3.1	Επιδράσεις της κλίμακας στην διατμητική αντοχή ανεπίπεδων ασυνεχειών	43
2.3.2	Επιδράσεις της κλίμακας στον δείκτη τραχύτητας JRC	46
2.3.3	Πειραματικά και αριθμητικά δεδομένα	49
Κεφάλαιο 3	Κριτήριο Barton-Bandis	55
3.1	Κριτήριο Barton-Bandis για την περιγραφή των επιδράσεων κλίμακας στους δείκτες JRC-JCS	55
3.2	Μοντελοποίηση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων	61
3.2.1	Διαδικασία Μοντελοποίησης	61
3.2.2	Αποτελέσματα Μοντελοποίησης	65

Κεφάλαιο 4	Συζήτηση Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα	105
4.1	Αποτελέσματα και Συμπεράσματα	105
4.2	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	108
	Βιβλιογραφία	110

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1 Καταγραφή Τιμών μελέτης πεδίου σε Πίνακα.....	62
Πίνακας 3-2 Τυπική Καταγραφή διορθωμένων τιμών JRC_n για υποθετικό ζεύγος τιμών εργαστηρίου ($JRC_o=20$, $L_o=8cm$).....	64
Πίνακας 3-3 Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων JRC'_n για ζεύγος τιμών $L_o=5cm$, $JRC_o=5$	66
Πίνακας 3-4 Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=5cm$, $JRC_o=10$	68
Πίνακας 3-5 Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=5cm$, $JRC_o=15$	69
Πίνακας 3-6 Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=5cm$, $JRC_o=20$	71
Πίνακας 3-7 Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=6cm$, $JRC_o=5$	72
Πίνακας 3-8: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=6cm$, $JRC_o=10$	74
Πίνακας 3-9: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=6cm$, $JRC_o=15$	75
Πίνακας 3-10: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=6cm$, $JRC_o=20$	77
Πίνακας 3-11: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=7cm$, $JRC_o=5$	78
Πίνακας 3-12: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=7cm$, $JRC_o=10$	80
Πίνακας 3-13: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=7cm$, $JRC_o=15$	81
Πίνακας 3-14: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=7cm$, $JRC_o=20$	83
Πίνακας 3-15: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=8cm$, $JRC_o=5$	84
Πίνακας 3-16: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=8cm$, $JRC_o=10$	86

Πίνακας 3-17: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=8cm$, $JRC_o=15$	87
Πίνακας 3-18: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=8cm$, $JRC_o=20$	89
Πίνακας 3-19: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=9cm$, $JRC_o=5$	90
Πίνακας 3-20: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=9cm$, $JRC_o=10$	92
Πίνακας 3-21: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=9cm$, $JRC_o=15$	93
Πίνακας 3-22: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=9cm$, $JRC_o=20$	95
Πίνακας 3-23: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=10cm$, $JRC_o=5$	96
Πίνακας 3-24: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=10cm$, $JRC_o=10$	98
Πίνακας 3-25: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=10cm$, $JRC_o=15$	99
Πίνακας 3-26: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=10cm$, $JRC_o=20$	101
Πίνακας 3-27: Συνοπτικός Πίνακας Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος ανά ζεύγος τιμών εργαστηρίου L_o , JRC_o	102
Πίνακας 4-1: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=8cm$, $JRC_o=20$	105

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1 Γεωμετρικοί όροι προσανατολισμού ασυνέχειας. (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002). ...	19
Σχήμα 1-2 Μέτρηση αποστάσεων μεταξύ ασυνεχειών στο πεδίο (I.S.R.M., 1978).....	20
Σχήμα 1-3 Παραδείγματα εμμονής - σύνολα ασυνεχειών (I.S.R.M.,1978).....	21
Σχήμα 1-4 Είδη ανοίγματος ασυνεχειών (Σοφιανός & Νομικός, 2008).	22
Σχήμα 1-5 Επίδραση υλικού πλήρωσης στη διατμητική αντοχή της ασυνέχειας (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002).	23
Σχήμα 1-6 Αριθμός συνόλων (Σοφιανός & Νομικός, 2008).	24
Σχήμα 1-7 Παραδείγματα βραχόμαζας (α) ογκοτεμαχισμένη (β) ακανόνιστη (γ) πλακοειδής (δ) στηλοειδής (Σοφιανός & Νομικός, 2008).	25
Σχήμα 1-8 Τραχύτητα ασυνέχειας (Li & Huang, 2015).	26
Σχήμα 1-9 α) Ορθή ση και διατμητική τάση τ με αποτέλεσμα β) κατακόρυφη (ν) και διατμητική μετατόπιση (υ) κατά την διάτμηση ανεπίπεδης ασυνέχειας (Σχοινάς, 2003).	28
Σχήμα 1-10 Συσχέτιση διαστολής και διατμητική αντοχής κατά την διάτμηση (Barton, 1973).....	28
Σχήμα 2-1 Προεξοχές σε προφίλ ασυνέχειας.....	31
Σχήμα 2-2 Δοκιμή ολίσθησης (tilt test) στο εργαστήριο (Barton & Choubey, 1977) και σκαρίφημα αυτής (Νομικός, 2015).	32
Σχήμα 2-3 Δοκιμή ώθησης-έλξης (push-pull test) (Barton-Bandis,1980).....	33
Σχήμα 2-4 Μηχανικό Προφιλόμετρο (Νομικός, 2015).	34
Σχήμα 2-5 Τυπικά προφίλ τραχύτητας ασυνεχειών (Barton-Choubey, 1977).	35
Σχήμα 2-6 Προσέγγιση JRCn μέσω Πλάτους Προεξοχών (Hoek, 2007).	36
Σχήμα 2-7 Υπολογισμός Πλάτους Προεξοχών Ασυνεχειών (Morelli, 2014).....	37
Σχήμα 2-8 Κρουστική σφύρα Schmidt τύπου L (Torabi et al., 2008).....	38
Σχήμα 2-9 Διάγραμμα συσχέτισης θλιπτικής αντοχής με αναπηδήσεις σφύρας Schmidt (Νομικός, 2015).	39
Σχήμα 2-10 Δοκιμές υπολογισμού παραμέτρων τραχύτητας ασυνεχειών (Barton, 2013).	41
Σχήμα 2-11 Διατμητική συμπεριφορά ασυνεχειών (Barton-Bandis, 1981).....	43
Σχήμα 2-121 Μηχανισμοί διάταξης διαφορετικού μήκους ασυνεχειών σε κλίμακα βραχόμαζας (Barton-Bandis, 1982).....	44
Σχήμα 2-13 Φαινόμενα Κλίμακας α) στο δείκτη τραχύτητας JRC και β) στο δείκτη αντοχής των τοιχωμάτων JCS (Barton-Bandis, 1982).	47

Σχήμα 2-14 Φαινόμενα κλίμακας στον δείκτη τραχύτητας JRC_n από βιβλιογραφία για 4 ομάδες ασυνεχειών (Du et al 2015).	48
Σχήμα 2-15 Φαινόμενα κλίμακας στον δείκτη τραχύτητας JRC_n από βιβλιογραφία για μέσο δείγμα ασυνέχειας (Du et al 2015).	48
Σχήμα 2-16 Μέθοδος ψηφιοποίησης ασυνέχειας (Yong et al, 2017).	51
Σχήμα 2-17 Μέθοδος εύρεσης πλάτους προεξοχών μέσω ψηφιοποιημένου προφίλ ασυνέχειας (Yong et al, 2017).	52
Σχήμα 2-18 Ψηφιοποιημένο Προφίλ Ασυνέχειας στο Πεδίο (Yong et al, 2017).	53
Σχήμα 2-19 Διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC – Μήκους Ασυνέχειας (Yong et al, 2017).	54
Σχήμα 3-1 Μοντέλα περιγραφής διατμητικής συμπεριφοράς τοιχωμάτων ασυνεχειών.	58
Σχήμα 3-2 Αδιάστατο διάγραμμα συσχέτισης διατμητικής τάσης - διατμητικής παραμόρφωσης (Barton, 2013).	59
Σχήμα 3-3: Αντιστοίχιση Τιμών JRC_n - L_n ανά δείγμα μελέτης πεδίου.	62
Σχήμα 3-4: Διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n Μελέτης Πεδίου.	63
Σχήμα 3-5: Διαδικασία εύρεσης JRC_n μέσω διορθωτικής σχέσης Barton-Bandis.	64
Σχήμα 3-6 Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=5cm$, $JRC_0=5$	67
Σχήμα 3-7 Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=5cm$, $JRC_0=10$	68
Σχήμα 3-8 Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=5cm$, $JRC_0=15$	70
Σχήμα 3-9 Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=5cm$, $JRC_0=20$	71
Σχήμα 3-10: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=6cm$, $JRC_0=5$	73
Σχήμα 3-11: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=6cm$, $JRC_0=10$	74
Σχήμα 3-12: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=6cm$, $JRC_0=15$	76
Σχήμα 3-13: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=6cm$, $JRC_0=20$	77

Σχήμα 3-14: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=7\text{cm}$, $JRC_0=5$	79
Σχήμα 3-15: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=7\text{cm}$, $JRC_0=10$	80
Σχήμα 3-16: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=7\text{cm}$, $JRC_0=15$	82
Σχήμα 3-17: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=7\text{cm}$, $JRC_0=20$	83
Σχήμα 3-18: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=8\text{cm}$, $JRC_0=5$	85
Σχήμα 3-19: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=8\text{cm}$, $JRC_0=10$	86
Σχήμα 3-20: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=8\text{cm}$, $JRC_0=15$	88
Σχήμα 3-21: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=8\text{cm}$, $JRC_0=20$	89
Σχήμα 3-22: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=9\text{cm}$, $JRC_0=5$	91
Σχήμα 3-23: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=9\text{cm}$, $JRC_0=10$	92
Σχήμα 3-24: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=9\text{cm}$, $JRC_0=15$	94
Σχήμα 3-25: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=9\text{cm}$, $JRC_0=20$	95
Σχήμα 3-26: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=10\text{cm}$, $JRC_0=5$	97
Σχήμα 3-27: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=10\text{cm}$, $JRC_0=10$	98
Σχήμα 3-28: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=10\text{cm}$, $JRC_0=15$	100
Σχήμα 3-29: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=10\text{cm}$, $JRC_0=20$	101

Σχήμα 3-30: Διάγραμμα συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_o με Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων ανά μήκος ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου L_o	103
Σχήμα 3-31 Απόκλιση δείκτη τραχύτητας πεδίου Εξίσωσης Barton-Bandis JRC'_n με δείκτη τραχύτητας μελέτης πεδίου JRC_n συναρτήσει του μήκους της ασυνέχειας L_n	104
Σχήμα 4-1: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_o=8cm$, $JRC_o=20$	106
Σχήμα 4-2: Απόκλιση δείκτη τραχύτητας πεδίου Εξίσωσης Barton-Bandis JRC'_n με δείκτη τραχύτητας μελέτης πεδίου JRC_n συναρτήσει του μήκους της ασυνέχειας L_n	107

Κεφάλαιο 1 Ασυνέχειες Βραχόμαζας

Η Βραχομηχανική αποτελεί τον κλάδο της Γεωτεχνικής Μηχανικής που ασχολείται με τη μελέτη της συμπεριφοράς των πετρωμάτων/βράχων (rocks) και της βραχόμαζας (rock mass) υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης, είτε σε συνθήκες φυσικού περιβάλλοντος, είτε εργαστηρίου. Συνεργάζεται στενά με την επιστήμη της Εδαφομηχανικής και της Τεχνικής Γεωλογίας. Αυτό που την διαφοροποιεί σε σχέση με άλλες εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού είναι η ιδιαιτερότητα των βραχωδών υλικών που μελετά, τα οποία έχουν μηχανικές ιδιότητες που ποικίλουν ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν, σε αντίθεση με συμβατικά κατασκευαστικά υλικά όπως το σκυρόδεμα και ο χάλυβας που παρουσιάζουν τυποποιημένα χαρακτηριστικά. Απαραίτητος είναι ο διαχωρισμός του ακέραιου πετρώματος με την βραχόμαζα. Με τον όρο ακέραιο πέτρωμα (intact rock) ορίζουμε το τμήμα του πετρώματος που εντοπίζεται σε μικρή, συνήθως, κλίμακα άρρηκτο χωρίς δομικές ασυνέχειες, ενώ βραχόμαζα (rock mass) ονομάζουμε το σύνολο του πετρώματος, όπως συναντάται σε κλίμακα πεδίου (in situ), το οποίο εκτός του ακέραιου πετρώματος περιλαμβάνει και κάθε τμήμα αυτού με δομικές ασυνέχειες (βλ. Εικόνα 1). Η εκτίμηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας, αν και κρίσιμη για τον σχεδιασμό έργων σε πετρώματα, παραμένει ιδιαίτερα δύσκολη. Η πραγματοποίηση μεγάλων επιτόπιων δοκιμών είναι συχνά ανέφικτη, είτε λόγω τεχνικών προβλημάτων είτε λόγω του υψηλού κόστους. Επιπλέον, οι εργαστηριακές δοκιμές σε πετρώματα δεν αντιπροσωπεύουν πάντα πιστά τη συμπεριφορά της βραχόμαζας στο πραγματικό έργο. Έτσι, ακόμα και μετά από πολλά χρόνια μελέτης από την επιστημονική κοινότητα, η ακριβής εκτίμηση των χαρακτηριστικών αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας παραμένει μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη μηχανική των πετρωμάτων (Νομικός, 2015).



Εικόνα 1 - Βραχώμαζα (Σέριφος, 2020)

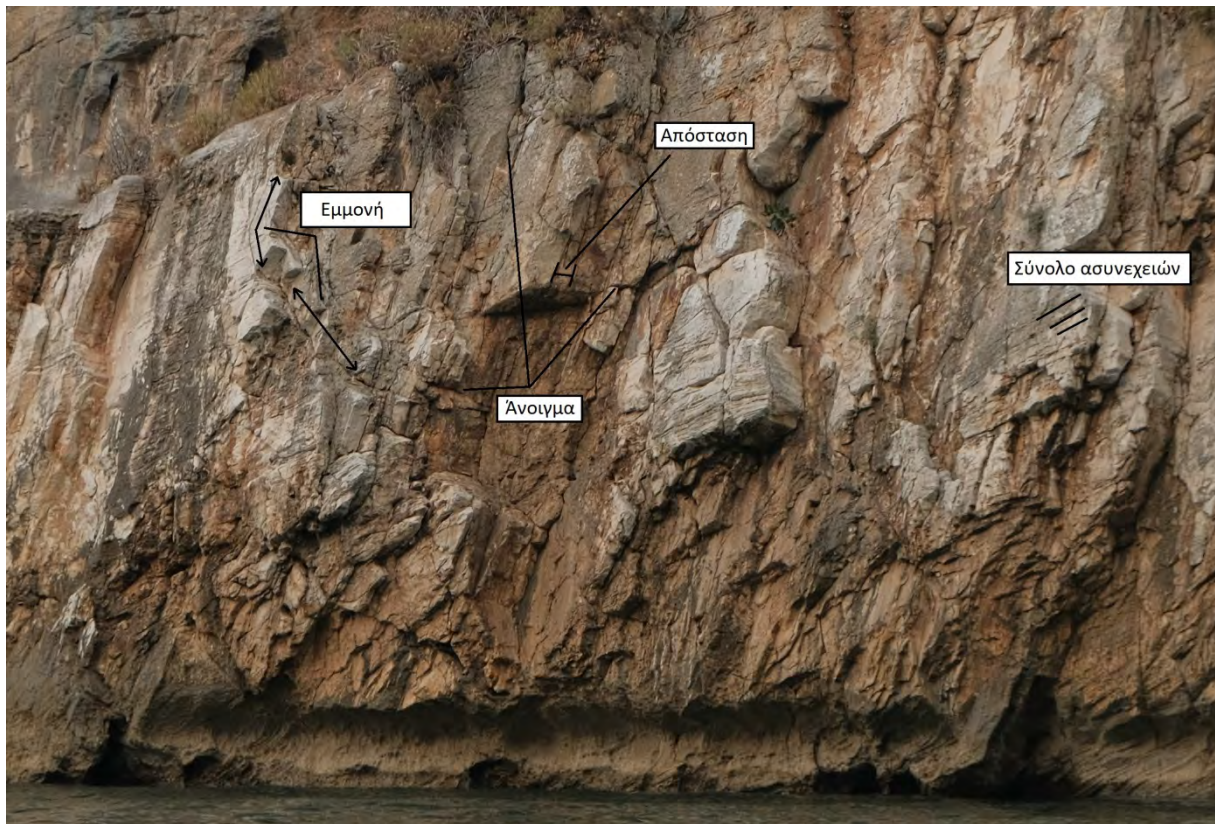
Οι ασυνέχειες ορίζονται ως επίπεδα που διακόπτουν την συνοχή του ακέραιου πετρώματος και παρουσιάζουν μηδενική εφελκυστική αντοχή. Επιπλέον επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά, τη σταθερότητα και τις υδραυλικές ιδιότητες της βραχώμαζας. (Εφραιμίδης, 2021). Ανεξαρτήτως της προέλευσής τους, οι ασυνέχειες έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό τη χαμηλή διατμητική αντοχή, η οποία μπορεί να δημιουργήσει σοβαρούς κινδύνους για τεχνικά και μεταλλευτικά έργα. Για αυτόν τον λόγο, η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν κατά την μελέτη σχεδιασμού, καθώς αποτελεί καθοριστικό παράγοντα σε πετρώματα με ασυνέχειες και ρωγμές.

1.1 Είδη Ασυνεχειών

Τα είδη των ασυνεχειών σε μία βραχώμαζα, αναλόγως την κλίμακα που εντοπίζονται, χωρίζονται σε μικροσκοπικές και μακροσκοπικές. Στις μικροσκοπικές ανήκουν οι πόροι, οι μικρορωγμές κλπ ενώ οι μακροσκοπικές διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- I. Στρώσεις (Bedding planes): Οι στρώσεις είναι ασυνέχειες που διαχωρίζουν ιζηματογενή πετρώματα, μπορούν να λειτουργήσουν ως πιθανές επιφάνειες για εκτεταμένες ολισθήσεις και συχνά παρουσιάζουν κυματοειδή μορφή.
- II. Ρήγματα (Faults): Τα ρήγματα είναι μεγάλες ασυνέχειες με σημαντική μετακίνηση των πλευρών τους που προκύπτουν από τεκτονικές δυνάμεις. Συνήθως γίνονται εύκολα αντιληπτά καθώς διαχωρίζουν το πέτρωμα, φέρνοντας σε επαφή πετρώματα διαφορετικές λιθολογίας και ηλικίας. Η παρουσία τους προσδίδει στο πέτρωμα χαμηλή διατμητική αντοχή και δυσκαμψία.
- III. Διακλάσεις (Joints): Οι διακλάσεις είναι ασυνέχειες χωρίς σημαντική μετακίνηση των πλευρών τους, οι οποίες σχηματίζονται λόγω τεκτονικών ή θερμοκρασιακών μεταβολών του πετρώματος. Συχνά εντοπίζονται συνδυαστικά η μία με την άλλη, σχηματίζοντας ένα σύστημα διακλάσεων όπου διαχωρίζει το πέτρωμα με συγκεκριμένο προσανατολισμό στο χώρο. (Εφραιμίδης 2021).

1.2 Χαρακτηριστικά ασυνεχειών



Εικόνα 2 – Αναπαράσταση Χαρακτηριστικών Ασυνεχειών (Πήλιο, 2021)

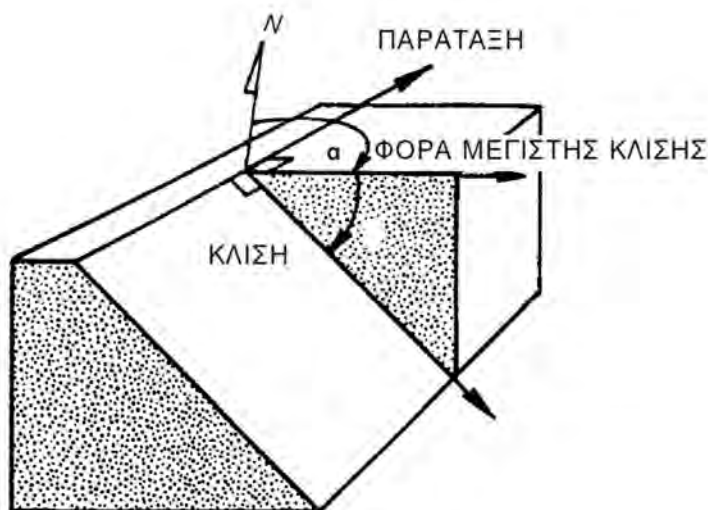
Η ακριβής περιγραφή των ασυνεχειών και η ανάλυση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών είναι κρίσιμες για την αξιολόγηση της βραχώμαζας και την πρόβλεψη της πιθανότητας και του τύπου αστοχίας της. Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Βραχομηχανικής (International Society for Rock Mechanics, I.S.R.M.), (Barton, 1978), υπάρχουν δέκα χαρακτηριστικά που περιγράφουν τις ασυνέχειες κι αυτά είναι ο προσανατολισμός, η απόσταση, η εμμονή, η αντοχή τοιχωμάτων, το άνοιγμα, το υλικό πλήρωσης, οι συνθήκες υπόγειου νερού, ο αριθμός συνόλων, το μέγεθος του μπλοκ και η τραχύτητα.

1.2.1 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ (ORIENTATION)

Ο προσανατολισμός μιας ασυνέχειας στο χώρο περιγράφεται από δύο γωνίες, την κλίση (dip) και τη διεύθυνση κλίσης (dip direction). Θεωρώντας τις ασυνέχειες ως επίπεδες επιφάνειες, η κλίση πρόκειται για τη μέγιστη γωνία που σχηματίζει η ασυνέχεια με το

οριζόντιο επίπεδο και λαμβάνει τιμές από 0° έως 90° . Η διεύθυνση της κλίσης είναι η γωνία που σχηματίζει η προβολή της μέγιστης κλίσης στο οριζόντιο επίπεδο με τον άξονα του βορρά, με δεξιόστροφη μέτρηση και λαμβάνει τιμές από 0° έως 360° . (Παπαθανασίου 2022). Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 1.1..

Ο προσανατολισμός είναι κρίσιμος παράγοντας για την ευστάθεια των πρανών, καθώς καθορίζει τις δυνατότητες κινηματικής αστάθειας λόγω πτώσης ή ολίσθησης τεμαχών (blocks) πετρώματος. Επίσης καθορίζει το σχήμα των άρρηκτων τμημάτων πετρωμάτων στα οποία διαιρείται η βραχώμαζα. (Νομικός 2015)



Σχήμα 1-1 Γεωμετρικοί όροι προσανατολισμού ασυνέχειας. (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002).

1.2.2 ΑΠΟΣΤΑΣΗ (SPACING)

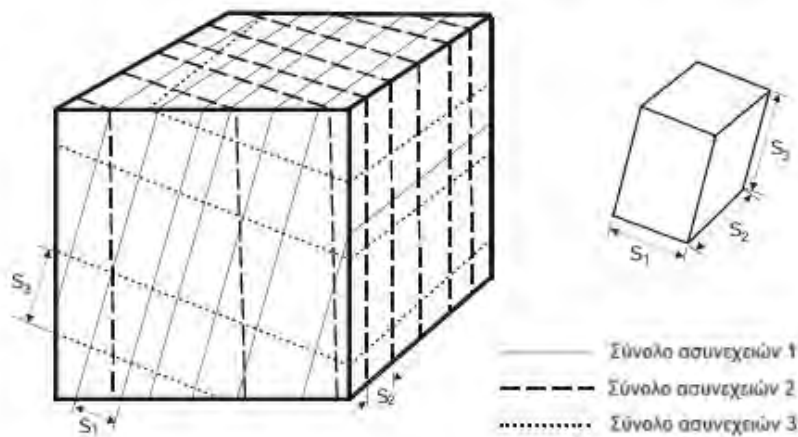
Ως απόσταση (spacing) των ασυνεχειών ορίζεται η μέση κάθετη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ασυνεχειών στο σύνολο της τεμαχισμένης βραχώμαζας (ISRM 1978). Αποτελεί βοηθητικό παράγοντα για τον προσδιορισμό του μεγέθους των επιμέρους τμημάτων της βραχώμαζας. Για την μέτρηση της απαιτείται μετροταινία, ιδανικά τοποθετημένη, κάθετα στο επίπεδο της ασυνέχειας. Διαφορετικά υπό γωνία α , για (n) κύρια συστήματα ασυνεχειών μετρούνται αποστάσεις $S_1, S_2, \dots, S_n$ μεταξύ των ασυνεχειών (βλ. Σχήμα 1.2). Το εύρος αυτών των αποστάσεων κυμαίνεται από εξαιρετικά μικρές ($<20\text{mm}$) έως εξαιρετικά

μεγάλες αποστάσεις (>6m). Ύστερα μπορούν να εκτιμηθούν ο δείκτης μεγέθους I_D και ο δείκτης J_V , στενά συνδεδεμένος με το δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD. Ο δείκτης I_D ορίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος των μέσων επί μέρους αποστάσεων κάθε συστήματος προς το συνολικό αριθμό των συστημάτων που διατέμνουν τη βραχόμαζα:

$$I_D = \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_n}{n} \quad (1.2.1)$$

Και ο J_V ως το συνολικό άθροισμα του επί μέρους μέσου αριθμού των ασυνεχειών ανά τρέχον μέτρο για κάθε σύστημα (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002):

$$J_V = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n} \quad (1.2.2)$$



Σχήμα 1-2 Μέτρηση αποστάσεων μεταξύ ασυνεχειών στο πεδίο (I.S.R.M., 1978).

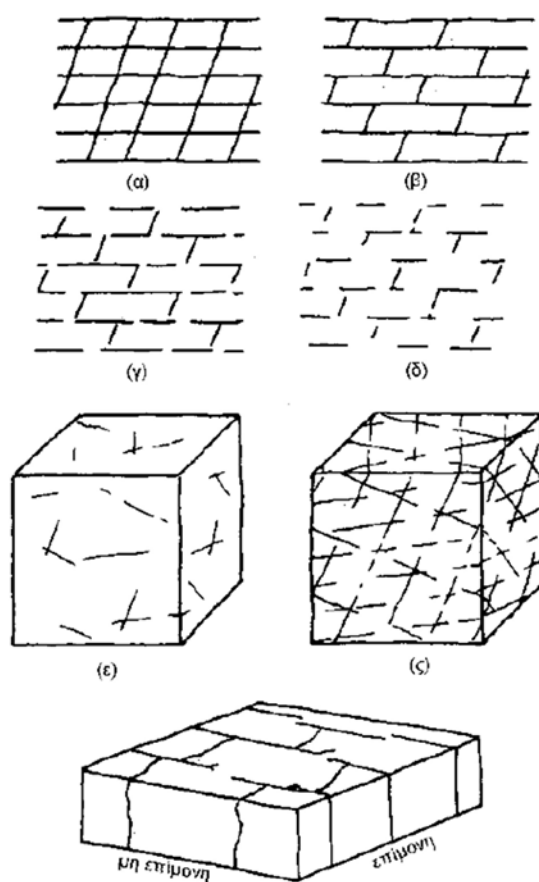
1.2.3 ΕΜΜΟΝΗ Η ΣΥΝΕΧΕΙΑ (PERSISTENCE)

Η εμμονή στις ασυνέχειες βραχόμαζας αναφέρεται στο μήκος του ίχνους μιας ασυνέχειας σε ένα επίπεδο. Με άλλα λόγια, είναι το μέγεθος που εκτείνεται μια ασυνέχεια μέσα στη βραχόμαζα. Αυτός ο παράγοντας καθορίζει το βαθμό στον οποίο η ασυνέχεια τέμνει τη βραχόμαζα και επηρεάζει τη σταθερότητα της. Μια εκτεταμένη ασυνέχεια που διαπερνά μεγάλο μέρος της βραχόμαζας μπορεί να προκαλέσει αστοχία με ολίσθηση κατά μήκος της. Αντίθετα, αν η ασυνέχεια τερματίζει σε ακέραιο πέτρωμα ή σε άλλες ασυνέχειες, η εμμονή μειώνεται και η αστοχία μπορεί να συμβεί σε πιο σύνθετη επιφάνεια. Σύμφωνα

με την ISRM (1981), η εμμονή μιας ασυνέχειας χαρακτηρίζεται ως εξής: πολύ μικρή, όταν είναι μικρότερη του 1 m, μικρή για 1-3 m, μέση για 3-10 m, μεγάλη για 10-20 m και πολύ μεγάλη για μήκος μεγαλύτερο των 20 m. Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα σύνολα που σχηματίζουν οι ασυνέχειες διαχωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

1. Συστημικά: Η ασυνέχεια εκτείνεται σε μεγάλο μήκος μέσα στην βραχώμαζα.
2. Μη συστημικά: Η ασυνέχεια τερματίζει σε ακέραιο πέτρωμα.
3. Υποσυστημικά: Η ασυνέχεια τέμνεται με άλλες ασυνέχειες δημιουργώντας σύνθετες επιφάνειες. (Σοφιανός & Νομικός, 2008)

Στο Σχήμα 1.3 απεικονίζονται διάφορα παραδείγματα εμμονής των ασυνεχειών.



Σχήμα 1-3 Παραδείγματα εμμονής - σύνολα ασυνεχειών (I.S.R.M.,1978).

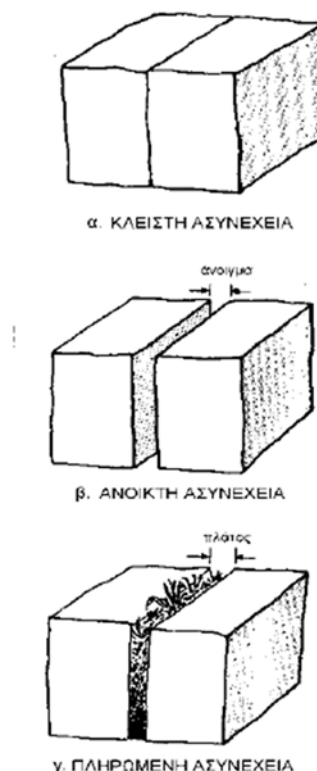
1.2.4 ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ

Λόγω της αποσάθρωσης που υφίσταται τα τοιχώματα της ασυνέχειας, η αντοχή τους είναι συνήθως μικρότερη από αυτή του άρρηκτου πετρώματος (Κούκης & Σαμπατακάκης,

2002). Η εκτίμηση της αντοχής γίνεται είτε βάσει του βαθμού αποσάθρωσης (υγιές, αποχρωματισμένο, αποσυντεθειμένο και διαμελισμένο πέτρωμα) είτε μέσω εργαστηριακών δοκιμών (Σοφιανός & Νομικός, 2008). Η πιο συνηθισμένη δοκιμή είναι με κρουστική σφύρα Schmidt, που καθορίζει τον δείκτη θλιπτικής αντοχής (JCS), ενώ υπάρχει και η μέθοδος με χρήση μαχαριδίου και γεωλογικού σφυριού (Barton, 1978).

1.2.5 Άνοιγμα (APERTURE)

Το άνοιγμα αποτελεί την κάθετη απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων μιας ασυνέχειας δημιουργώντας ένα κενό χώρο που μπορεί να είναι πληρωμένος με αέρα, νερό ή κάποιο εδαφικό υλικό. Το άνοιγμα διαχωρίζεται σε κλειστό, ανοικτό ή διάκενο (Σχήμα 1.4) (Σοφιανός & Νομικός, 2008). Η μέτρησή του διαφοροποιείται αισθητά ανάλογα με το βάθος εξέτασης, καθώς όσο εισχωρούμε στη βραχώμαζα το πλάτος μειώνεται σε αντίθεση με την επιφάνεια που λόγω εξωτερικών συνήθως παραγόντων όπως η εκτόνωση τάσεων, συναντάται αυξημένο (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002).

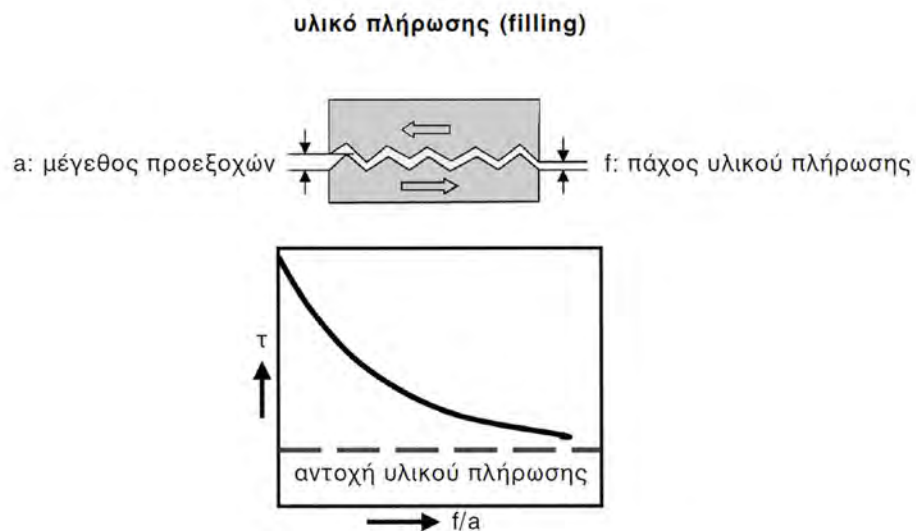


Σχήμα 1-4 Είδη ανοίγματος ασυνεχειών (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

1.2.6 ΥΛΙΚΟ ΠΛΗΡΩΣΗΣ (FILLING)

Το υλικό που βρίσκεται στον χώρο μεταξύ των τοιχωμάτων της ασυνέχειας ονομάζεται υλικό πλήρωσης (filling) και μπορεί να περιέχει διάφορα υλικά είτε χαμηλού συντελεστή τριβής όπως άργιλο, χλωρίτη, γραφίτη είτε υψηλού συντελεστή τριβής όπως χαλαζία ή ασβεστίτη (Νομικός 2015). Η ύπαρξη των παραπάνω υλικών εντός των ανοιγμάτων της ασυνέχειας επηρεάζει την διατμητική της αντοχή.

Το πάχος του υλικού πλήρωσης καθορίζει την διατμητική συμπεριφορά της ασυνέχειας καθώς όσο αυξάνεται μειώνει την διατμητική αντοχή της ασυνέχειας. Αν το πάχος του υλικού πλήρωσης ξεπεράσει το πάχος των προεξοχών της ασυνέχειας τότε η διατμητική αντοχή της ασυνέχειας ταυτίζεται με αυτήν του υλικού πλήρωσης (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1-5 Επίδραση υλικού πλήρωσης στη διατμητική αντοχή της ασυνέχειας (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002).

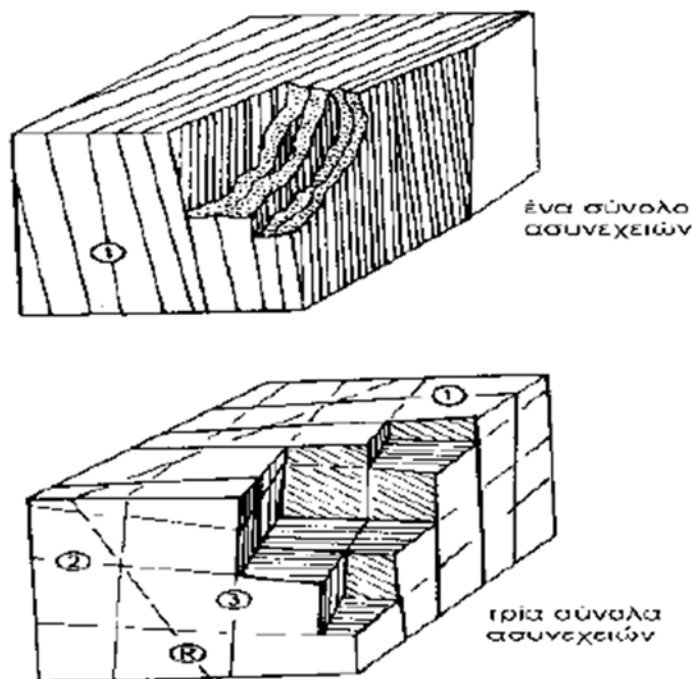
1.2.7 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

Οι συνθήκες υπόγειου νερού αναφέρονται στην ροή του νερού μέσω των ασυνεχειών. Η κυκλοφορία του νερού εξαρτάται άμεσα από το άνοιγμα και το υλικό πλήρωσης και επιδρά σημαντικά στην μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας. Παρατηρούνται φαινόμενα διάβρωσης και αποσάθρωσης των τοιχωμάτων και μείωσης της περατότητας της ασυνέχειας με αύξηση του όγκου του υλικού πλήρωσης.

Σύμφωνα με το I.S.R.M και για τις δύο περιπτώσεις ύπαρξης ή όχι υλικού πληρώσεως, οι ασυνέχειες ταξινομούνται σε 6 βαθμίδες από στεγνή ασυνέχεια χωρίς ροή νερού έως υγρή ασυνέχεια με συνεχή ροή.

1.2.8 ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΥΝΟΛΩΝ

Ο αριθμός των συνόλων αποτελεί τον αριθμό των οικογενειών των ασυνεχειών που εντοπίζονται στη βραχώμαζα. Επηρεάζουν τόσο την εμφάνιση καθώς και τον τρόπο με τον οποίο παραμορφώνεται και αστοχεί η βραχώμαζα. Με γνώμονα τον αριθμό των συνόλων, η βραχώμαζα ταξινομείται σε εννέα βαθμίδες από συμπαγές πέτρωμα ως συντριμμένο πέτρωμα. Στο Σχήμα 1.6 φαίνεται ο αριθμός των συνόλων ασυνεχειών (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

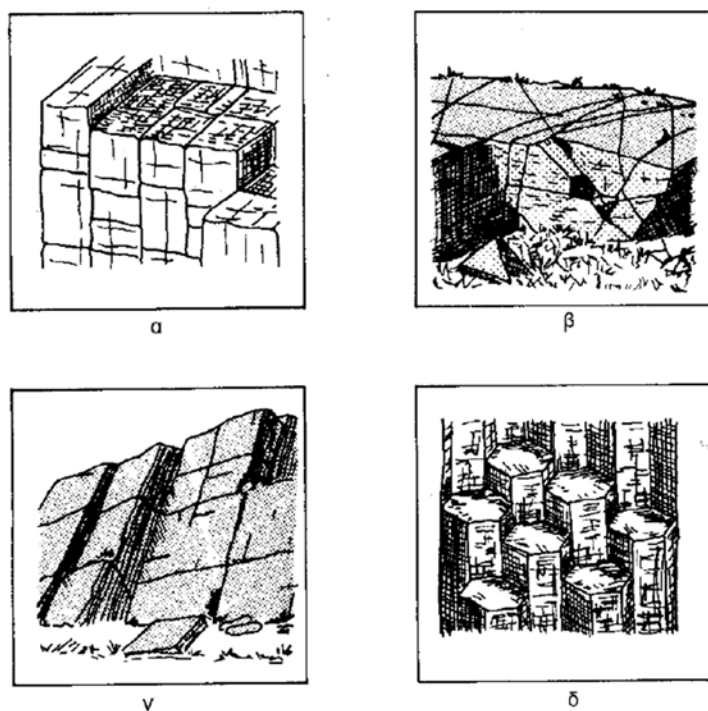


Σχήμα 1-6 Αριθμός συνόλων (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

1.2.9 ΜΕΓΕΘΟΣ ΜΠΛΟΚ

Το μέγεθος των μπλοκ αναφέρεται στα τεμάχια ακέραιου πετρώματος που ορίζουν οι αποστάσεις, οι εμμονές και ο αριθμός των συνόλων των ασυνεχειών (Σχήμα 1.7). Το μέγεθος τους καθορίζει τη μηχανική συμπεριφορά και την σταθερότητα της βραχώμαζας. Τα

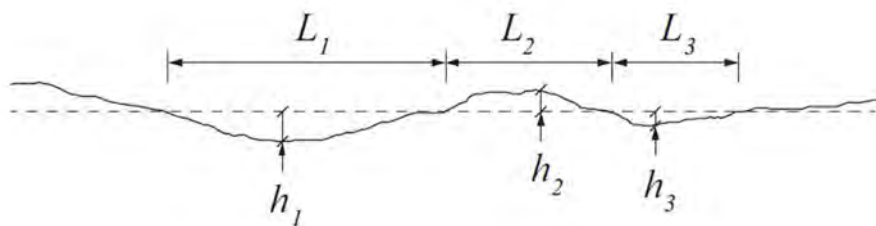
μικρότερα μπλοκ είναι συνήθως πιο ευαίσθητα σε αστοχίες. Επιπλέον σχετίζεται και με τον δείκτη ποιότητας της βραχώμαζας RQD.



Σχήμα 1-7 Παραδείγματα βραχώμαζας (α) ογκοτεμαχισμένη (β) ακανόνιστη (γ) πλακοειδής (δ) στηλοειδής (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

1.2.10 ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (ROUGHNESS)

Ένας από τα κυριότερα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών είναι η τραχύτητα. Με την τραχύτητα περιγράφονται οι μορφολογικές ανωμαλίες που παρατηρούνται στα τοιχώματα μιας ασυνέχειας και την καθιστούν ανεπίπεδη. Αυτές οι ανωμαλίες ή προεξοχές δημιουργούνται από το υλικό πλήρωσης και την ροή του νερού εντός των τοιχωμάτων της ασυνέχειας όπου με το πέρασμα των χρόνων διαμορφώνουν το σχήμα των προεξοχών (Σχήμα 1.8). Η τραχύτητα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην μηχανική συμπεριφορά των ασυνεχειών καθώς προσδίδει επιπλέον διατμητική αντοχή σε σχέση με μία επίπεδη, λεία ασυνέχεια αυξάνοντας την γωνία τριβής.



Σχήμα 1-8 Τραχύτητα ασυνέχειας (Li & Huang, 2015).

1.3 Διατμητική συμπεριφορά ασυνεχειών

1.3.1 ΓΩΝΙΑ ΒΑΣΙΚΗΣ ΤΡΙΒΗΣ φ_b

Η κυριότερη έκφραση αντοχής της βραχόμαζας είναι η αντίσταση σε ολίσθηση που επιτυγχάνεται μέσω της διατμητικής αντοχής. Τα φυσικά χαρακτηριστικά που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών και εν γένει της βραχόμαζας. Πέραν των παραπάνω χαρακτηριστικών, δύο κρίσιμοι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι η ορθή τάση σ_n που ασκείται κάθετα στην επιφάνεια της ασυνέχειας και το μήκος της ασυνέχειας L .

Κατά την διάτμηση μιας ανεπίπεδης ασυνέχειας ενεργοποιείται το φαινόμενο της τριβής. Στην ορθή τάση σ_n που επιβάλλεται αντιστοιχεί μία διατμητική τάση τ (Σχήμα 1.12α) κι έτσι προκύπτει ο συντελεστής στατικής τριβής (μ) από την σχέση:

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma_n} = \tan \varphi_b \text{ ή } \tau = \sigma_n \times \tan \varphi_b, \quad (1.3.1)$$

όπου φ_b είναι η γωνία βασικής τριβής.

Η γωνία βασικής τριβής (φ_b) ορίζεται ως η γωνία τριβής της βραχόμαζας όταν οι επιφάνειες της ασυνέχειας είναι απόλυτα λείες και δεν υπάρχουν ανωμαλίες ή προεξοχές που να επηρεάζουν τη διατμητική αντοχή. Με άλλα λόγια, είναι η γωνία τριβής της επιφάνειας του βράχου υπό ιδανικές συνθήκες, όπου η τραχύτητα της ασυνέχειας είναι μηδενική. Λαμβάνει τιμές από 25° έως 35° και είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος των ορθών

τάσεων και την κλίμακα (Νομικός, 2015). Ο υπολογισμός της πραγματοποιείται συνήθως μέσω δοκιμών άμεσης διάτμησης σε επίπεδες φυσικά λειασμένες επιφάνειες αλλά και δοκιμών ολίσθησης σε κεκλιμένη τράπεζα. Όταν οι επιφάνειες της ασυνέχειας έχουν υποστεί αλλοιώσεις τότε η αντίσταση περιγράφεται από την γωνία παραμένουσας τριβής (φ_{res}) και ισχύει ότι $\varphi_b > \varphi_{res}$. Η τιμή της φ_{res} προκύπτει από την εμπειρική Εξ.(1.3.2):

$$\varphi_{res} = (\varphi_b - 20^\circ) + 20 \frac{r}{R}, \quad (1.3.2)$$

όπου φ_b είναι η γωνία βασική τριβής και οι παράμετροι r και R , αντιστοιχούν στον αριθμό των αναπηδήσεων της κρουστικής σφαίρας Schmidt σε υγρή και ξηρή επιφάνεια, αντίστοιχα.

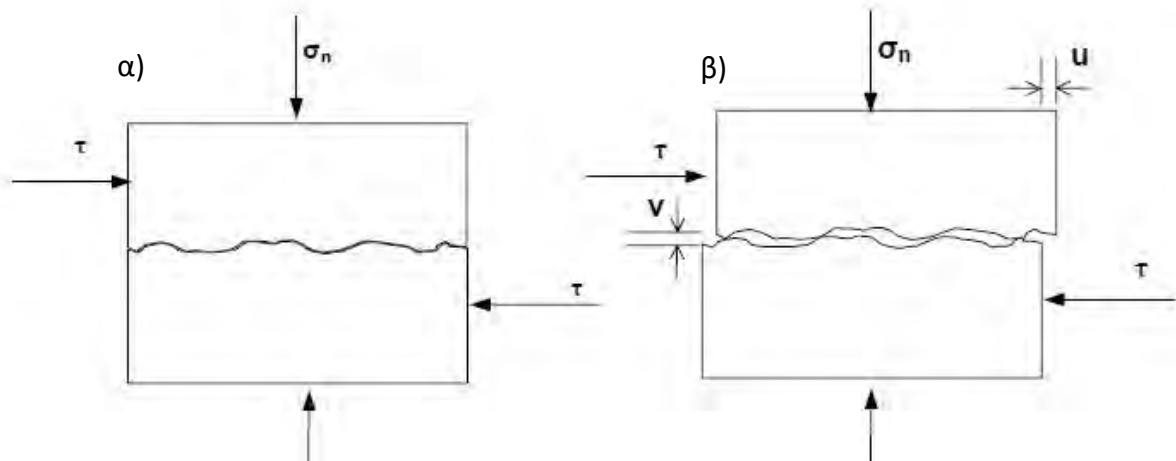
1.3.2 ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ d_n

Με την επιβολή ορθής τάσης σ_n και διατμητικής τάσης τ (Σχήμα 1.9α) και προτού αναπτυχθεί η μέγιστη διατμητική αντοχή τ_m , προηγείται μικρή οριζόντια μετατόπιση u των επιφανειών της ασυνέχειας. Με αυτή την μετατόπιση δημιουργούνται επαφές μεταξύ των προεξοχών των τοιχωμάτων της ασυνέχειας και ταυτόχρονα πραγματοποιείται μια κάθετη στο επίπεδο της ασυνέχειας μετατόπιση v , καθώς τα τοιχώματα προσπαθούν να κινηθούν αποφεύγοντας τις προεξοχές (Σχήμα 1.9β). Οι δύο μετατοπίσεις ορίζουν την γωνία διαστολής της ασυνέχειας:

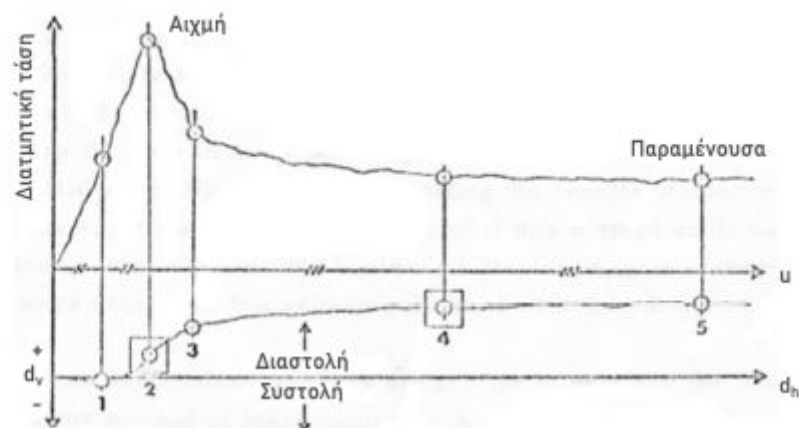
$$d_n = \frac{dv}{du}, \quad (1.3.3)$$

η οποία εκφράζει την μέση κλίση των σημειακών επαφών που αναπτύσσονται μεταξύ των ανεπίπεδων επιφανειών της ασυνέχειας. Η μέγιστη γωνία διαστολής αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή τ_m (αιχμή) που πραγματοποιείται σε μετατόπιση u_m . Τη στιγμή της μετατόπισης u_m , οι επαφές των μικροανωμαλιών είναι οι βέλτιστες που μπορούν να συνεισφέρουν στην αντίσταση έναντι της διάτμησης. Για μετατοπίσεις μεγαλύτερες από u_m δημιουργούνται λιγότερες επαφές μέσω των προεξοχών μεταξύ των τοιχωμάτων με

αποτέλεσμα της σταδιακή μείωση της διατμητικής αντοχής έως μία σταθερή τιμή που αντιστοιχεί στην παραμένουσα αντοχή (Σχήμα 1.10)



Σχήμα 1-9 α) Ορθή σ_n και διατμητική τάση τ με αποτέλεσμα β) κατακόρυφη (v) και διατμητική μετατόπιση (u) κατά την διάτμηση ανεπίπεδης ασυνέχειας (Σχοινάς, 2003).



Σχήμα 1-10 Συσχέτιση διαστολής και διατμητική αντοχής κατά την διάτμηση (Barton, 1973).

1.3.3 ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ ΘΡΑΥΣΗΣ ΑΣΠΕΡΙΤΩΝ S_A

Η γωνιακή συνιστώσα S_A εξαρτάται από την αντοχή των τοιχωμάτων και περιγράφει την τάση θραύσης των ασπεριτών (προεξοχών ή μικροανωμαλιών) των τοιχωμάτων της ασυνέχειας. Η ολική αντίσταση τριβής $\phi_{ολ}$ μίας ανεπίπεδης ασυνέχειας σε ολίσθηση προκύπτει από το άθροισμα των τριών γωνιακών παραμέτρων:

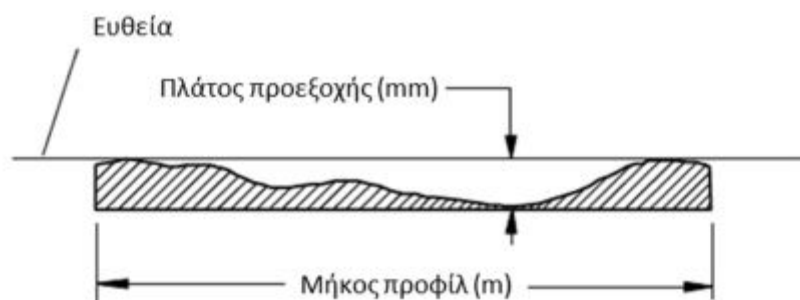
$$\varphi_{o\lambda} = \varphi_b + d_n + S_A . \quad (1.3.4)$$

Κεφάλαιο 2 Τραχιές ή Ανεπίπεδες Ασυνέχειες

2.1 Τραχύτητα των Ασυνεχειών

Ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών είναι η τραχύτητα. Με την τραχύτητα περιγράφονται οι μορφολογικές ανωμαλίες που παρατηρούνται στα τοιχώματα μιας ασυνέχειας και την καθιστούν ανεπίπεδη. Ως ανεπιπεδότητα ορίζεται η εγκάρσια απόκλιση της επιφάνειας της ασυνέχειας από την ιδεατή λεία της μορφή. Μέσω των αποκλίσεων αυτών δημιουργούνται συμπλοκές και εμποδίζεται η ολίσθηση κατά μήκος της επιφάνειας της ασυνέχειας.

Η τραχύτητα μιας ασυνέχειας καθορίζεται από την κύμανση και τις επιφανειακές ανωμαλίες (μικροανωμαλίες) στην επιφάνεια των τοιχωμάτων της. Η κύμανση αναφέρεται σε μεγάλης κλίμακας ασυνέχειες, όπου τα τοιχώματα τους είναι σε επαφή και μπορούν να προκαλέσουν διαστολή (φούσκωμα) κατά τη διατμητική μετατόπιση. Αυτές οι κυμάνσεις είναι τόσο μεγάλες που δεν εξομαλύνονται εύκολα κατά τη διάτμηση. Αντίθετα, οι επιφανειακές ανωμαλίες αφορούν τις ασυνέχειες μικρής κλίμακας με τοπικές προεξοχές και εσοχές που παρεκκλίνουν από το μέσο επίπεδο της ασυνέχειας (Σχήμα 2.1). Αυτές τείνουν να φθείρονται ή να καταστρέφονται κατά τη διάτμηση, εκτός αν τα τοιχώματα της ασυνέχειας έχουν μεγάλη αντοχή σε σχέση με την τοπική ορθή τάση. Στην τελευταία περίπτωση, η ασυνέχεια εμφανίζει διασταλτική συμπεριφορά ακόμα και σε μικρή κλίμακα. Στην πράξη, η κύμανση επηρεάζει την κατεύθυνση της διατμητικής μετατόπισης σε σχέση με το μέσο επίπεδο της ασυνέχειας, ενώ οι επιφανειακές ανωμαλίες επηρεάζουν τη διατμητική αντοχή σε δοκιμές μικρής κλίμακας, όπως οι εργαστηριακές δοκιμές ή οι επί τόπου δοκιμές (ISRM 1978).



Σχήμα 2-1 Προεξοχές σε προφίλ ασυνέχειας.

Όπως εύκολα μπορεί να συμπεράνει κανείς, η τραχύτητα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην μηχανική συμπεριφορά των ασυνεχειών καθώς προσδίδει επιπλέον διατμητική αντοχή σε σχέση με μία επίπεδη, λεία ασυνέχεια αυξάνοντας την γωνία τριβής της βραχόμαζας. Το γεγονός αυτό αυξάνει το ενδιαφέρον γύρω από την μελέτη των ασυνεχειών καθώς σε πολλά έργα όπως θεμελιώσεις, σήραγγες, φράγματα συνήθως οι ασυνέχειες λαμβάνονται υπόψιν ως λείες επιφάνειες με αποτέλεσμα την υποεκτίμηση της φέρουσας ικανότητας της βραχόμαζας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους κατασκευής των έργων με σκοπό την επίλυση του προβλήματος επιλέγοντας διάφορους τρόπους αντιμετώπισης όπως για παράδειγμα τη βελτίωση της αντοχής της βραχόμαζας μέσω ενισχύσεων ή την αλλαγή της μελέτης με επιλογή διαφορετικού σημείου κατασκευής. Τα παραπάνω πέραν του οικονομικού κόστους στοιχίζουν και σε χρόνο για το έργο, γεγονός που μπορεί να αποφευχθεί με την εφαρμογή των κατάλληλων γνώσεων περί τραχύτητας.

2.2 Δείκτης τραχύτητας ασυνεχειών (JRC) και δείκτης αντοχής των τοιχωμάτων της ασυνέχειας (JCS)

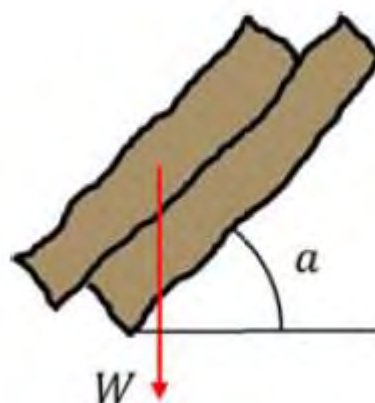
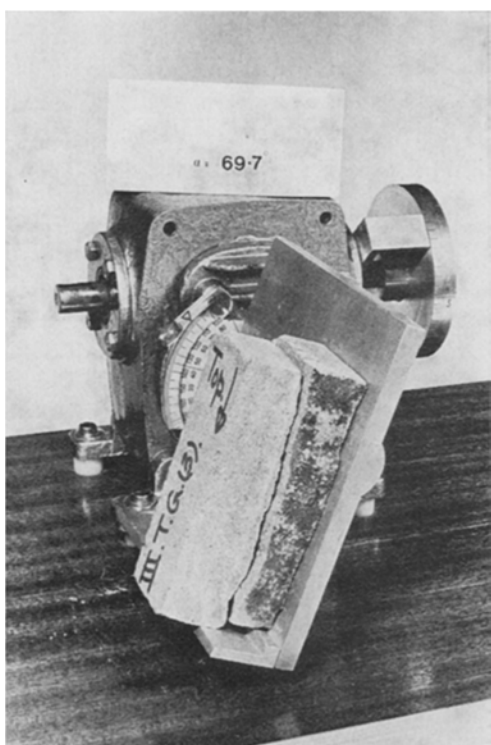
Η τυχαία μεταβλητότητα της γεωμετρίας των επιφανειών των ασυνεχειών δημιούργησε την ανάγκη για έναν δείκτη που να αντιπροσωπεύει την μέση τιμή ανεπιπεδότητας τους. Αυτή αποτυπώνεται στον δείκτη τραχύτητας JRC (Joint Roughness Coefficient). Ο δείκτης ποσοτικοποιεί την τραχύτητα σε μία κλίμακα τιμών από το 0 έως το 20, όπου η τιμή JRC=0 περιγράφει μία λεία επίπεδη ασυνέχεια και η τιμή JRC=20 μία τραχιά ανεπίπεδη ασυνέχεια. Οι μέθοδοι καταγραφής των ασυνεχειών πραγματοποιούνται με χειρωνακτικά μέσα αλλά τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και τεχνικές οπτικής

μέτρησης με την βοήθεια ψηφιακών μέσων όπως σαρωτές λέιζερ και τρισδιάστατη φωτογραμμετρία.

Μία από τις μεθόδους υπολογισμού του δείκτη τραχύτητας είναι με την δοκιμή ολίσθησης μπλοκ βράχου σε ξηρή κεκλιμένη ασυνέχεια (tilt test) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Η τιμή του JRC υπολογίζεται από τον τύπο:

$$JRC = \frac{\alpha - \varphi_r}{\log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)}, \quad (2.2.1)$$

όπου α είναι η γωνία κλίσης του επιπέδου που ολισθαίνει το μπλοκ βράχου λόγω του βάρους του W . Με φ_r συμβολίζεται η γωνία παραμένουσας τριβής όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 1. Ενώ η σ_n είναι η ορθή τάση που επιβάλλεται κάθετα στην επιφάνεια ολίσθησης εμβαδού A . Τέλος, ο δείκτης JCS (Joint Compressive Strength) αναφέρεται στην αντοχή των τοιχωμάτων της ασυνέχειας σε μονοαξονική θλίψη

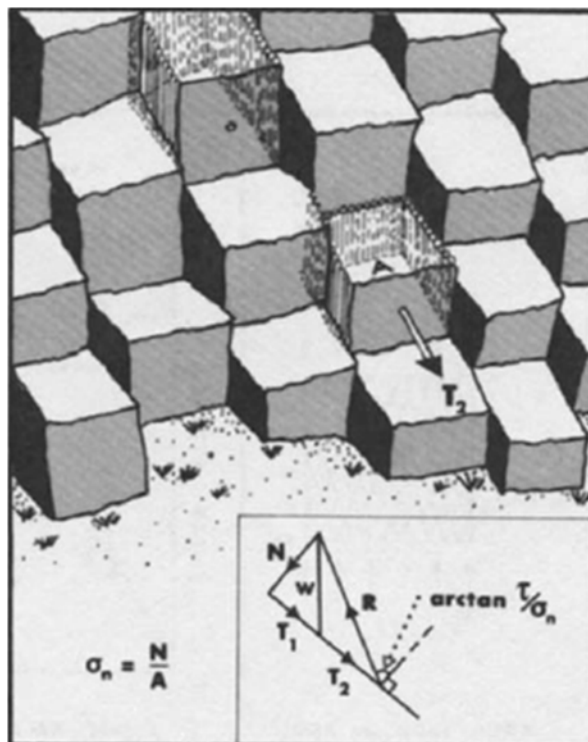


Σχήμα 2-2 Δοκιμή ολίσθησης (tilt test) στο εργαστήριο (Barton & Choubey, 1977) και σκαρίφημα αυτής (Νομικός, 2015).

Στην περίπτωση πολύ τραχειών ασυνεχειών που το άνω μπλοκ αδυνατεί να ολισθήσει και υπάρχει η πιθανότητα ανατροπής, πραγματοποιείται στο πεδίο η δοκιμή ώθησης-έλξης (push-pull test), όπου το άνω μπλοκ ωθείται ή τραβιέται παράλληλα προς το επίπεδο ολίσθησης και το κάτω μπλοκ τοποθετείται οριζόντια (βλ. Σχήμα 2.3). Ο υπολογισμός του JRC προκύπτει από τον τύπο:

$$JRC = \frac{\arctan\left[\left(\frac{T_1+T_2}{N}\right)\right] - \varphi_r}{\log_{10}\left(\frac{JCS}{N \cdot A}\right)}, \quad (2.2.2)$$

Όπου N η κάθετη στο επίπεδο ολίσθησης συνιστώσα του βάρους του άνω μπλοκ, T1 η παράλληλη στο επίπεδο ολίσθησης συνιστώσα του βάρους του άνω μπλοκ, T2 η δύναμη ώθησης ή έλξης που εφαρμόζεται παράλληλα στο επίπεδο ολίσθησης και A η επιφάνεια ολίσθησης.



Σχήμα 2-3 Δοκιμή ώθησης-έλξης (push-pull test) (Barton-Bandis,1980).

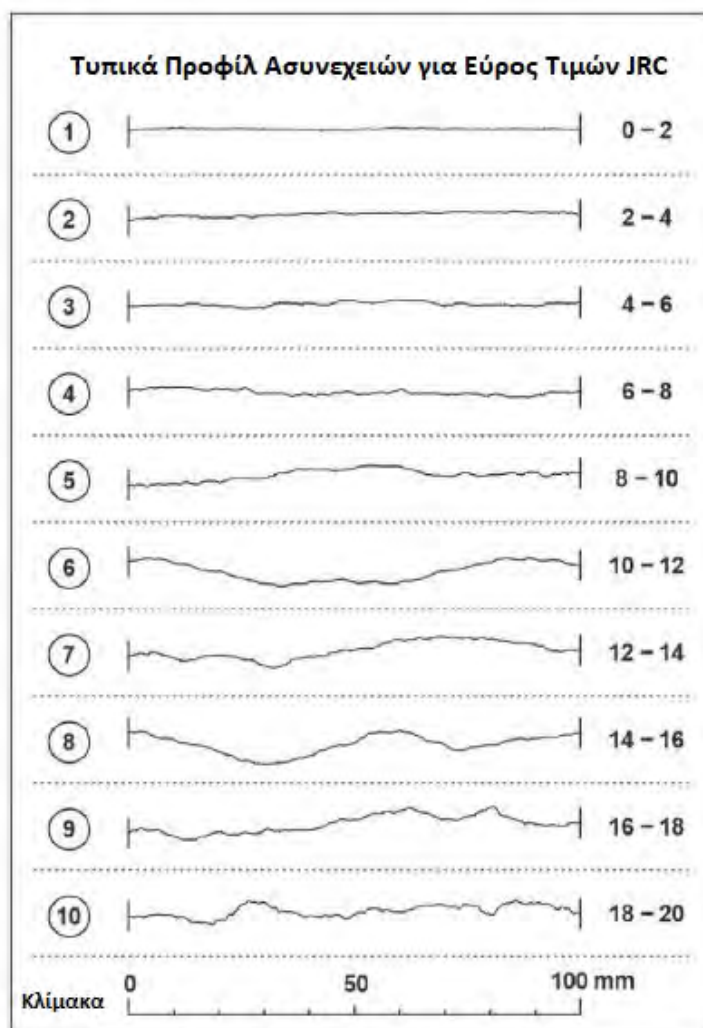
Ένας άλλος τρόπος καταγραφής μιας ανεπίπεδης (τραχιιάς) ασυνέχειας είναι με τη χρήση του μηχανικού προφίλομέτρου, μία συσκευή που αναπτύχθηκε για να μετρούνται ασυνέχειες στην κλίμακα των εργαστηριακών δοκιμών με τυπικό μήκος 10cm. Το

προφιλόμετρο αποτελείται από μία σειρά από κάθετες μεταλλικές ακίδες οι οποίες έρχονται σε επαφή με την ασυνέχεια και σχηματίζουν το προφίλ της (δηλ. ανάλογα με την μορφολογία της ασυνέχειας κινούνται ανοδικά ή καθοδικά) κατά μήκος μίας ευθείας (Σχήμα 2.4).



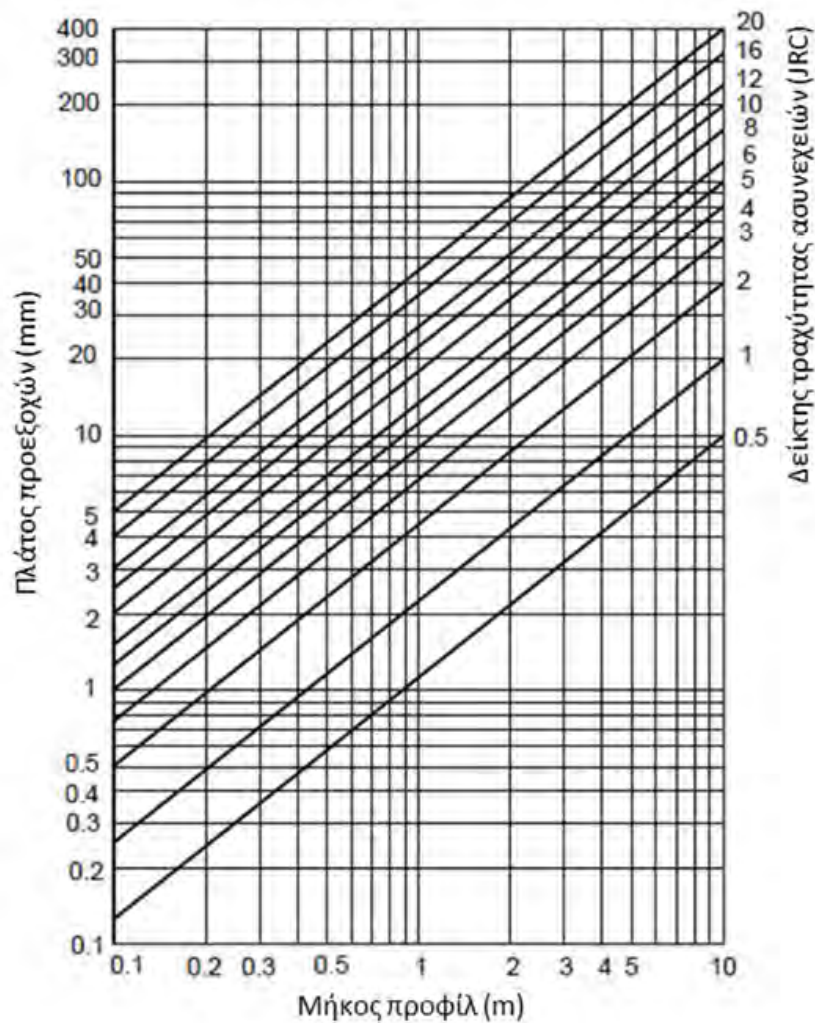
Σχήμα 2-4 Μηχανικό Προφιλόμετρο (Νομικός, 2015).

Τα προφίλ που προκύπτουν από την καταγραφή, συγκρίνονται οπτικά με τον πίνακα τυπικών προφίλ που αναπτύχθηκε από τους Barton και Choubey (1977) ύστερα από την επεξεργασία 136 δοκιμών όπου μέσω δοκιμών άμεσης διάτμησης υπολογίζονταν οι παράμετροι για να ευρεθεί ο δείκτης τραχύτητάς των δοκιμών. Η σύγκριση με τα τυπικά προφίλ οδηγεί στην αντίστοιχη τιμή του δείκτη τραχύτητας (Σχήμα 2.5). Η μέθοδος αυτή αν και περιέχει υποκειμενικότητα στην αξιολόγηση του προφίλ της ασυνέχειας εντούτοις βοηθά για μια πρώτη ενδεικτική ταξινόμηση της ασυνέχειας αλλά όχι για την τελική καταγραφή αυτής.



Σχήμα 2-5 Τυπικά προφίλ τραχύτητας ασυνεχειών (Barton-Choubey, 1977).

Τέλος μία επιπλέον μέθοδος προσέγγισης του δείκτη JRC είναι με χρήση του διαγράμματος στο Σχήμα 2.6 όπου αξιοποιείται το πλάτος των προεξοχών σε δεδομένο μήκος ασυνέχειας (m). Πιο συγκεκριμένα τοποθετώντας έναν χάρακα κατά μήκος της ασυνέχειας μεταξύ δύο κορυφώσεών της εντοπίζεται το μέγιστο πλάτος των ανωμαλιών και καταγράφεται σε mm (βλ. Σχήμα 2.7)



Σχήμα 2-6 Προσέγγιση JRC μέσω πλάτους προεξοχών (Barton, 1981).

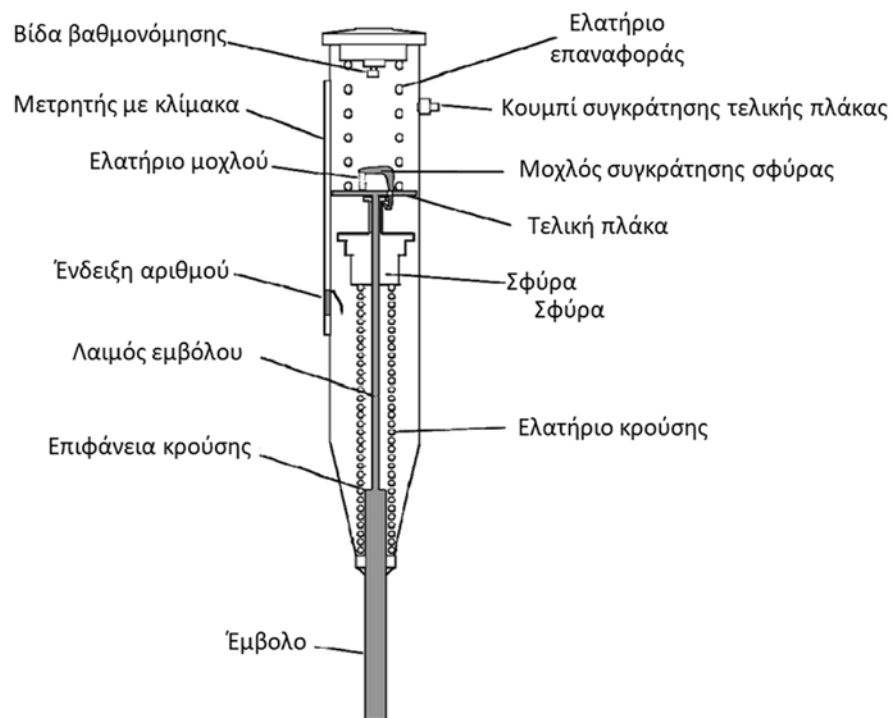


Σχήμα 2-7 Υπολογισμός πλάτους προεχόντων ασυνεχειών (Morelli, 2014).

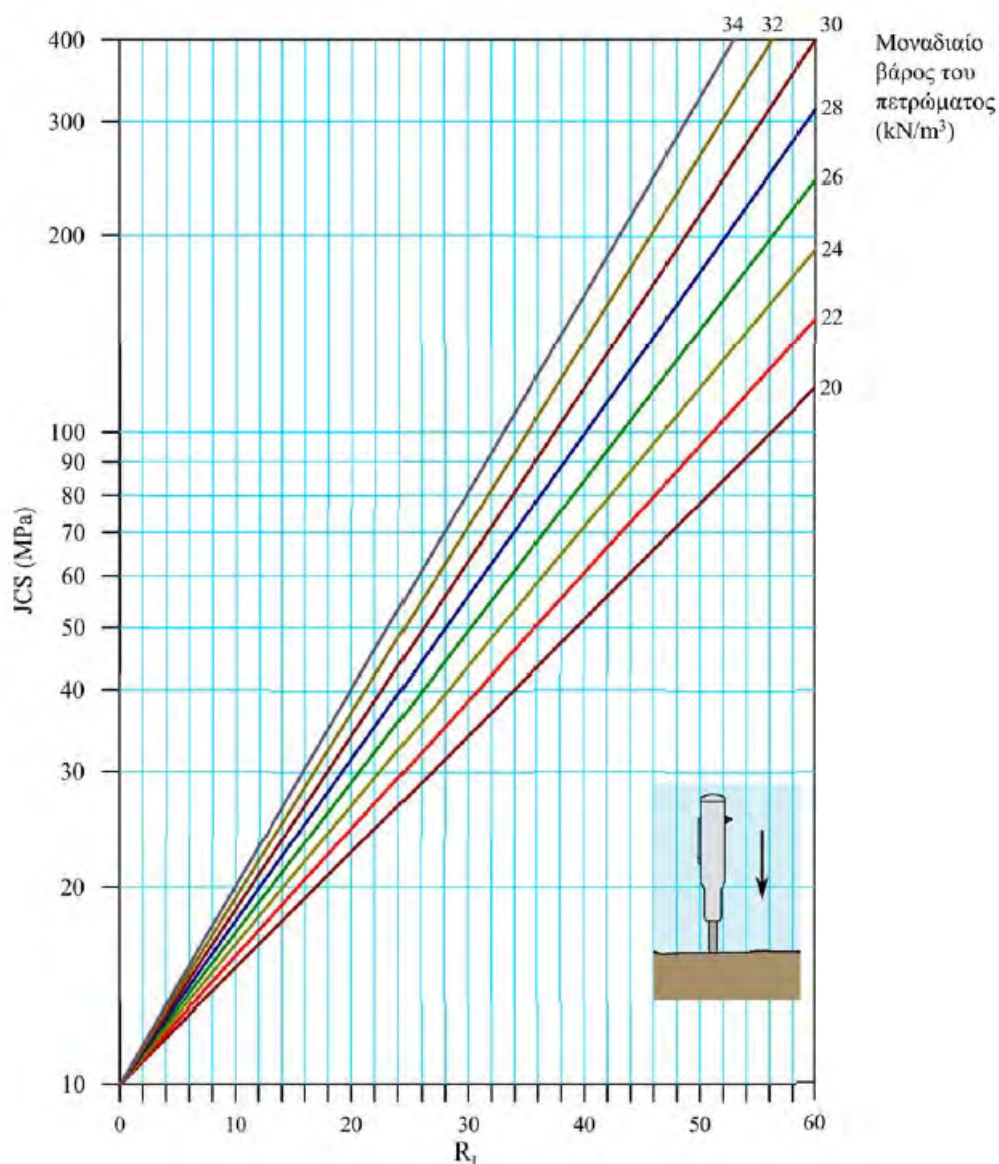
Σχετικά με τον δείκτη αντοχής των τοιχωμάτων της ασυνέχειας JCS, η τιμή του διαφέρει ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι αποσαθρωμένης επιφάνειας. Ειδικότερα, στην περίπτωση όπου η επιφάνεια της τραχύτητας δεν παρουσιάζει αποσάθρωση, τότε ο JRC ταυτίζεται με την αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη σ_c , η οποία μπορεί να ευρεθεί μέσω δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης ή σημειακής φόρτισης σε δοκίμια που προέρχονται από το άρρηκτο πέτρωμα. Στην περίπτωση που οι επιφάνειες της ασυνέχειας παρουσιάζουν αποσάθρωση τότε ο JCS θα έχει τιμή έως και $\frac{1}{4}$ της σ_c . Ο συνηθέστερος τρόπος υπολογισμού του JCS είναι από τη δοκιμή κρουσιμέτρησης με χρήση σφύρας Schmidt τύπου L (Σχήμα 2.8) απευθείας στην επιφάνεια του τοιχώματος της ασυνέχειας (Barton & Choubey, 1977). Η τιμή του προκύπτει από τον τύπο:

$$JCS = 10^{(0.00088R_\gamma + 1,01)}, \quad (2.2.1)$$

όπου όπου R είναι ο αριθμός αναπήδησης της σφύρας Schmidt, γ η ξηρή πυκνότητα του πετρώματος (KN/m^3) και ο δείκτης JCS δίνεται σε MPa. Επιπλέον η τιμή μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της χρήσης του διαγράμματος στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2-8 Κρουστική σφύρα Schmidt τύπου L (Torabi et al., 2008).



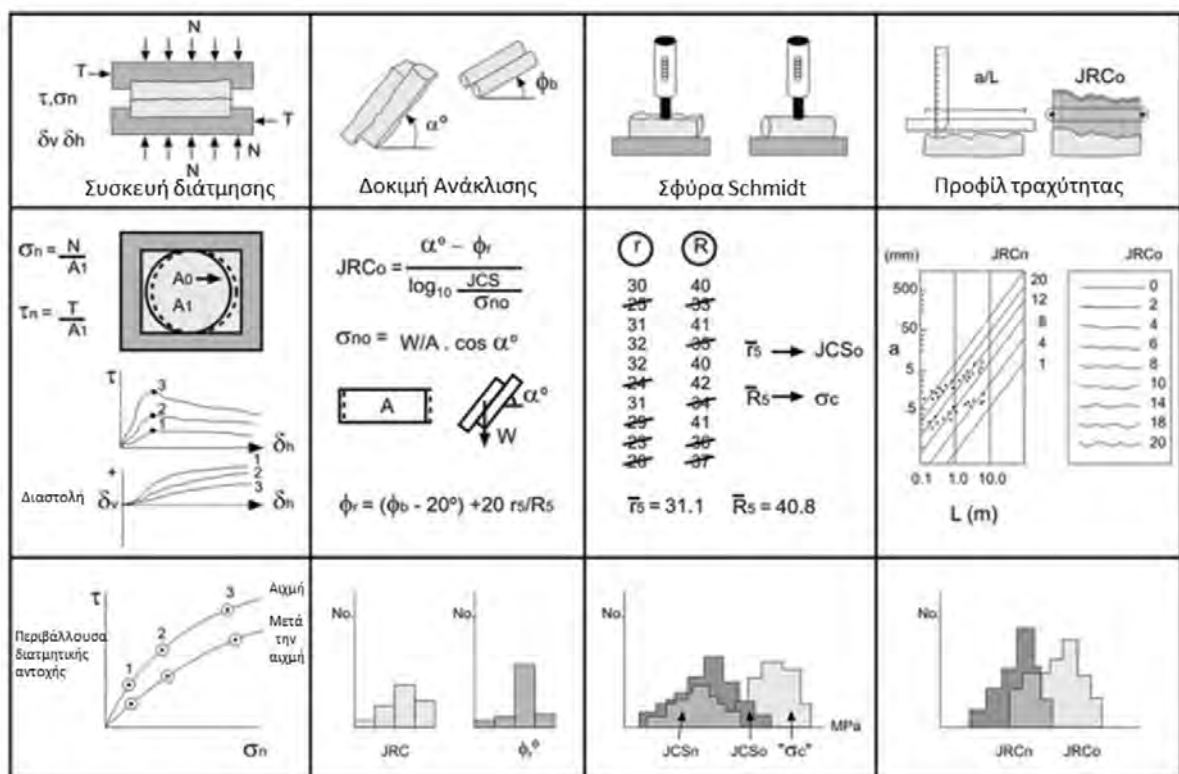
Σχήμα 2-9 Διάγραμμα συσχέτισης θλιπτικής αντοχής με αναπηδήσεις σφύρας Schmidt (Νομικός, 2015).

Όλες οι παραπάνω μέθοδοι συνοψίζονται στο Σχήμα 2.10, όπου στην πρώτη στήλη απεικονίζεται η δοκιμή άμεσης διάτμησης, στην δεύτερη στήλη η δοκιμή ολίσθησης για την εύρεση του JRC και γωνίας παραμένουσας τριβής, στην τρίτη στήλη η δοκιμή της κρουστικής σφύρας Schmidt με τις αναπηδήσεις σε υγρό (r) και ξηρό (R) βράχο για την εύρεση και του JCS και στην τελευταία στήλη η προσέγγιση του δείκτη τραχύτητας με την μέθοδο καταγραφής των προεξοχών ως προς το μήκος της ασυνέχειας αλλά και το προφιλόμετρο.

Στην δεύτερη γραμμή παρουσιάζονται εξισώσεις και πίνακες που αξιοποιούνται αλλά και κάποια πρώτα τυπικά αποτελέσματα που συνεισφέρουν στην τελική εξαγωγή αποτελεσμάτων των δοκιμών. Πιο συγκεκριμένα, για την δοκιμή της άμεσης διάτμησης ορίζεται η ορθή και διατμητική τάση και αποτυπώνεται η συσκευή άμεσης διάτμησης. Το πρώτο διάγραμμα φανερώνει αποτελέσματα τιμών διατμητικής τάσης συναρτήσει της διατμητικής μετατόπισης, ενώ το δεύτερο διάγραμμα παρουσιάζει την διαστολή της ασυνέχειας, δηλαδή την ανάπτυξη της κάθετης μετατόπισης συναρτήσει της διατμητικής μετατόπισης. Τα σημεία 1,2,3 είναι εκεί όπου συναντάται η μέγιστη διατμητική αντοχή για κάθε δείγμα και η χρονική στιγμή χαρακτηρίζεται ως “αιχμή” (peak) δηλαδή το μέγιστο σημείο της καμπύλης. Για κάθε επόμενη στιγμή πέραν της μέγιστης τιμής (αιχμή) η διατμητική αντοχή φθίνει. Για την δοκιμή της ανάκλισης (tilt test) ορίζεται ο τύπος εύρεσης του δείκτη τραχύτητας JRC_0 η ορθή τάση σ_{no} καθώς και η γωνίας παραμένουσας τριβής ϕ_r . Για την δοκιμή της κρουστικής σφαίρας Schmidt παρουσιάζονται αποτελέσματα τιμών αναπηδήσεων σε υγρή (r) και ξηρή (R) επιφάνεια καθώς και οι μέσες τιμές τους. Τέλος για τον υπολογισμό του δείκτη τραχύτητας JRC μέσω των προεξοχών και του μήκους της ασυνέχειας, παρουσιάζεται το διάγραμμα που αξιοποιεί τις τιμές των μετρήσεων για την εύρεσή του δείκτη τραχύτητας. Επίσης παρουσιάζονται και τα τυπικά προφίλ ασυνέχειας για οπτική σύγκριση των αποτελεσμάτων του προφίλομέτρου.

Στην τρίτη γραμμή παρουσιάζονται τα διαγράμματα που απεικονίζουν τα τελικά τυπικά αποτελέσματα των δοκιμών και συνοψίζουν τα συμπεράσματα που εξάγονται για κάθε δοκιμή ή μέθοδο που ακολουθείται. Ειδικότερα για την δοκιμή άμεσης διάτμησης το τελικό διάγραμμα διατμητικής αντοχής-ορθής τάσης έχει προκύψει από τα σημεία της καμπύλης του διαγράμματος διατμητικής αντοχής-διατμητικής μετατόπισης. Η περιβάλλουσα αστοχίας που περιέχει τα σημεία μέγιστης διατμητικής αντοχής 1,2,3 παίρνει τις μεγαλύτερες τιμές και οι υπόλοιπες περιβάλλουσες είναι μικρότερες. Στην δοκιμή της ολίσθησης ή ανάκλισης (tilt test) το διάγραμμα παρουσιάζει την πορεία των τιμών του δείκτη τραχύτητας από την στιγμή που η γωνία κλίσης α είναι ίση με το μηδέν έως την στιγμή λίγο μετά την ολίσθηση. Ο δείκτης τραχύτητας και αντίστοιχα η γωνία τριβής που ενεργοποιείται λαμβάνουν τις μεγαλύτερες τιμές τους την στιγμή της οριακής αστοχίας δηλαδή την στιγμή πριν την ολίσθηση. Στην δοκιμή της κρουστικής σφύρας Schmidt καθώς

και στη μέθοδο του προφίλομέτρου για την εύρεση των δεικτών JCS και JRC αντίστοιχα, τα διαγράμματα που προκύπτουν αποδεικνύουν την διαφορά των τιμών των αποτελεσμάτων του εργαστηρίου έναντι των αποτελεσμάτων στο πεδίο. Αναλυτικότερα τα αποτελέσματα του εργαστηρίου έχουν μεγαλύτερες τιμές από ότι αυτά του πεδίου φανερώνοντας με αυτόν τον τρόπο την επίδραση της κλίμακας στη μηχανική συμπεριφορά της ασυνέχειας. Οι επιδράσεις της κλίμακας (ή αλλιώς τα φαινόμενα κλίμακας) αναπτύσσονται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο.

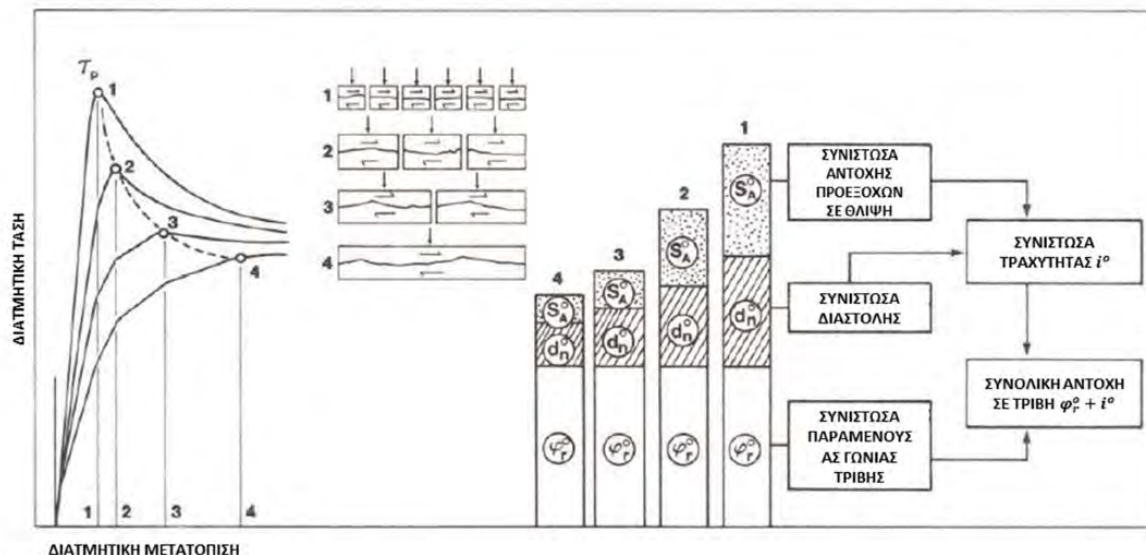


Σχήμα 2-10 Δοκιμές υπολογισμού παραμέτρων τραχύτητας ασυνεχειών (Barton, 2013).

2.3 Επιδράσεις της Κλίμακας

2.3.1 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΑΝΕΠΙΠΕΔΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

Ύστερα από δοκιμές άμεσης διάτμησης που πραγματοποίησαν σε δοκίμια με διαφορετικό μήκος ασυνέχειας το 1981, οι Barton-Bandis κατέληξαν στο Σχήμα 2.11 σχετικά με την συμπεριφορά των ασυνεχειών σε διάτμηση. Με την ύπαρξη διατμητικής μετατόπισης τα τοιχώματα μιας ανεπίπεδης (τραχιάς) ασυνέχειας αρχίζουν να συμπλέκουν δημιουργώντας επαφές που αντιστέκονται στην διατμητική τάση (ενεργοποίηση τραχύτητας) μέχρι τη στιγμή που αρχίζουν να θραύονται οι προεξοχές τους και να μειώνεται η αντίστασή τους.



Σχήμα 2-11 Διατμητική συμπεριφορά ασυνεχειών (Barton-Bandis, 1981).

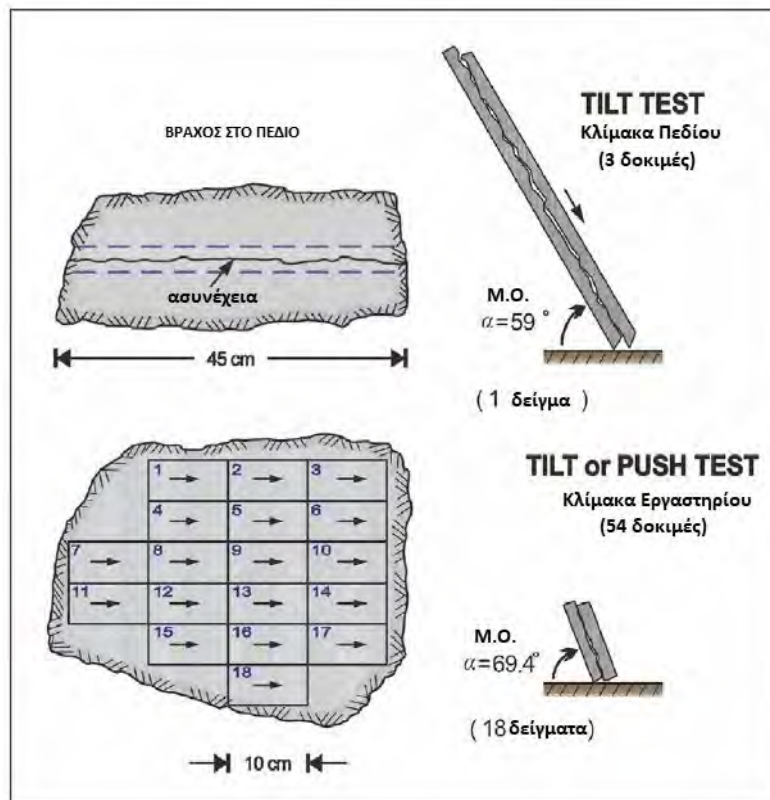
Η καμπύλη διατμητικής τάσης τ – διατμητικής παραμόρφωσης (μετατόπισης) u παρουσιάζει ταχεία άνοδο των τάσεων, μέχρι την επίτευξη της μέγιστης διατμητικής αντοχής τ_{peak} που αντιστοιχεί σε χαρακτηριστικό σημείο παραμόρφωσης (μέγιστη διατμητική μετατόπιση) u_{peak} . Στη συνέχεια, όσο αυξάνεται η μετατόπιση, η διατμητική τάση σταδιακά μειώνεται, ώσπου να φτάσει σε μία σταθερή τιμή, γνωστή ως παραμένουσα διατμητική αντοχή τ_{res} (Σχοινιάς, 2003).

Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν και την συνοπτική καταγραφή τους στο Σχήμα 2.11, παρατηρήθηκε το φαινόμενο της κλίμακας, το οποίο περιγράφει την εξάρτηση της συμπεριφοράς του βράχου ανάλογα με την κλίμακα που εξετάζεται. Ειδικότερα, τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν την διατμητική αντοχή και αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 2, μελετώντας ασυνέχειες μικρού μεγέθους παρουσιάζουν αισθητή διαφορά σε σύγκριση με μεγαλύτερου μήκους ασυνέχειες. Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώνεται ότι όσο το μήκος μίας ασυνέχειας αυξάνεται τότε:

1. Αυξάνεται η διατμητική μετατόπιση u_m που απαιτείται για την ενεργοποίηση της μέγιστης διατμητικής αντοχής του.
2. Μειώνεται η γωνία μέγιστης διαστολής d_n^0 και η συνιστώσα θραύσης ασπεριτών s_A^0 .
3. Μειώνεται η μέγιστη διατμητική αντοχή της ασυνέχειας τ_m .

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται η χρησιμότητα της διαπίστωσης αυτής, καθώς στην κλίμακα του πεδίου, όπου οι ασυνέχειες εκτείνονται έως και πολλά μέτρα, η διατμητική αντοχή διαφοροποιείται αισθητά σε σχέση με μικρότερα δείγματα που λαμβάνονται για εργαστηριακές δοκιμές. Ο κυριότερος παράγοντας της μείωσης της διατμητικής αντοχής, όσο αυξάνεται το μήκος της ασυνέχειας, είναι η μείωση της μέγιστης γωνίας διαστολής.

Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζονται γραφικά οι δοκιμές ολίσθησης που πραγματοποίησαν οι Barton-Bandis σε δείγματα διαφορετικού μεγέθους από την ίδια ασυνέχεια ενός βράχου για την μέτρηση της διατμητικής αντοχής. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση έλαβαν δείγμα μήκους 45cm όπου ύστερα από 3 δοκιμές ο μέσος όρος της γωνίας ολίσθησης ήταν $\alpha=59^\circ$. Ενώ στην δεύτερη περίπτωση έλαβαν 18 δείγματα μήκους 10cm από την ίδια ασυνέχεια και ύστερα από 3 δοκιμές στο καθένα προέκυψε ο μέσος όρος της γωνίας ολίσθησης $\alpha=69,4^\circ$.



Σχήμα 2-12 Δοκιμή ολίσθησης ενός μπλοκ βράχου σε διαφορετικές κλίμακες (Barton-Bandis, 1977).

Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι οι ασυνέχειες μικρού μήκους παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από τις ασυνέχειες μεγάλου μήκους αφού απαιτείται μεγαλύτερη γωνία κλίσης για να ολισθήσουν και κατ'επέκταση μεγαλύτερη διατμητική τάση. Στις μικρές κλίμακες οι προεξοχές είναι πιο απότομες και αυτό ενισχύει την διατμητική αντοχή, σε αντίθεση με τις μεγάλες κλίμακες όπου οι ανεπιπεδότητες, παρά το μεγάλο μήκος τους, ουσιαστικά είναι πιο ομαλές, δημιουργώντας λιγότερες συμπλοκές μεταξύ των τοιχωμάτων τους.

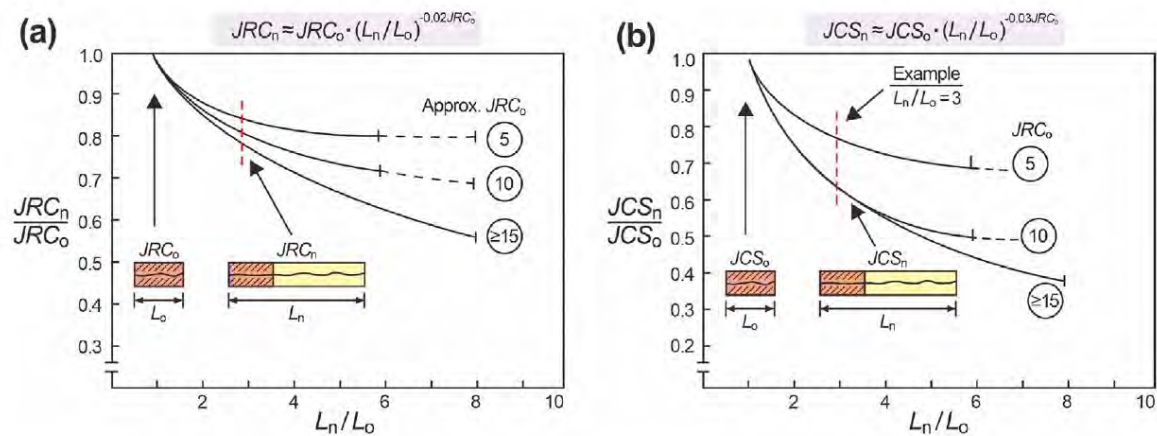
2.3.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΣΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ JRC ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ JCS

Από την επίδραση της κλίμακας επηρεάζονται άμεσα και οι δείκτες JRC και JCS, οι τιμές των οποίων μειώνονται με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας. Για την αποφυγή λανθασμένων συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα του εργαστηρίου και την επίλυση των φαινομένων κλίμακας προσεγγίζοντας τα ρεαλιστικά δεδομένα, προτάθηκαν από τους Barton-Bandis (1982) οι Εξισώσεις 2.3.1 και 2.3.2. Ειδικότερα, αναπτύχθηκε για κάθε δείκτη μία σχέση που ανάγει την τιμή που προήλθε από το δείγμα του εργαστηρίου (μικρής κλίμακας ασυνέχειες) στην τιμή του πεδίου (μεγάλης κλίμακας ασυνέχειες) που άμεσα μας ενδιαφέρει.

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0.02JRC_0}, \quad (2.3.1)$$

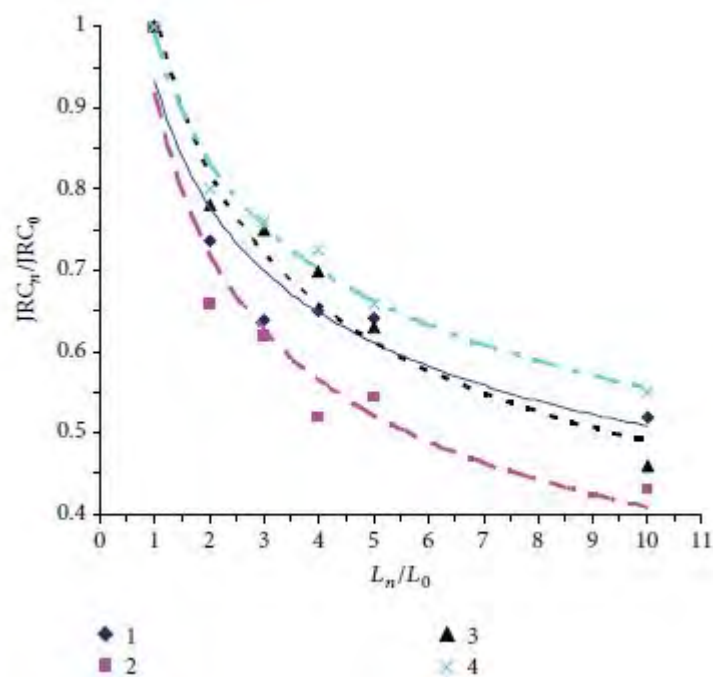
$$JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0.03JRC_0}, \quad (2.3.2)$$

όπου ο δείκτης (ο) αναφέρεται στις τιμές που λαμβάνουμε από τις δοκιμές του εργαστηρίου, ενώ ο δείκτης (η) στις ζητούμενες διορθωμένες τιμές του πεδίου. Το L αναφέρεται στο μήκος της υπό εξέταση ασυνέχειας. Οι παραπάνω εξισώσεις προέκυψαν από έρευνα και δοκιμές που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.13 όπου διαπιστώνεται και οπτικά η «μειωτική» επίδραση της κλίμακας στις τιμές JRC και JCS. Πιο ειδικά, με αύξηση του μήκους της ασυνέχειας (δηλαδή μεγαλύτερος λόγος L_n/L_0) προκύπτει εκθετική μείωση των δεικτών τραχύτητας και αντοχής τοιχωμάτων αντίστοιχα (μικρότερος λόγος JRC_n/JRC_0 και JCS_n/JCS_0).

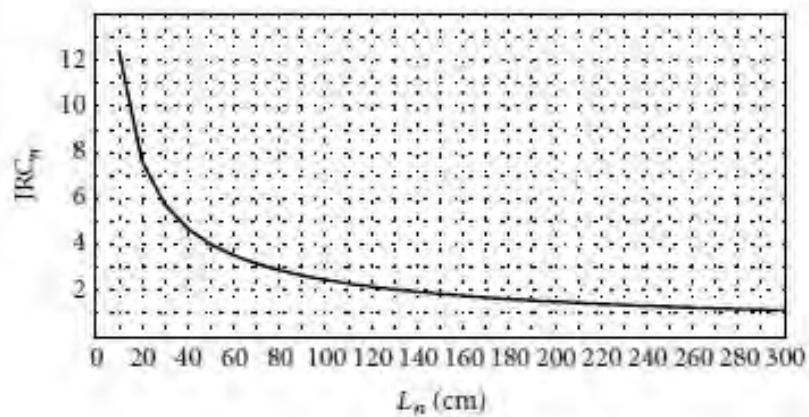


Σχήμα 2-13 Φαινόμενα Κλίμακας α) στο δείκτη τραχύτητας JRC και β) στο δείκτη αντοχής των τοιχωμάτων JCS (Barton-Bandis, 1982).

Από την βιβλιογραφία εντοπίστηκε μία δημοσίευση από τους Du et al (2015) που κατέγραψε τα αποτελέσματα από παλαιότερες στατιστικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε 1023 προφύλ ανεπίπεδων ασυνεχειών και επιβεβαιώνουν την ύπαρξη των φαινομένων κλίμακας. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 2.14 παρουσιάζεται η «μειωτική» επίδραση της κλίμακας στον δείκτη τραχύτητας πεδίου JRC_n ως προς το δείκτη τραχύτητας του εργαστηρίου JRC_0 για 4 διαφορετικές ομάδες δειγμάτων. Ενώ στο Σχήμα 2.15 παρουσιάζεται η επίδραση της κλίμακας στον δείκτη τραχύτητας JRC_n για το μέσο δείγμα ασυνέχειας που έλαβαν.



Σχήμα 2-14 Φαινόμενα κλίμακας στον δείκτη τραχύτητας JRC_n από βιβλιογραφία για 4 ομάδες ασυνεχειών (Du et al 2015).



Σχήμα 2-15 Φαινόμενα κλίμακας στον δείκτη τραχύτητας JRC_n από βιβλιογραφία για μέσο δείγμα ασυνέχειας (Du et al 2015).

2.3.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Οι διορθωτικές εξισώσεις 2.3.1 και 2.3.2 που παρουσιάστηκαν παραπάνω προέκυψαν από αποτελέσματα ερευνών που πραγματοποιήθηκαν το 1982. Έκτοτε χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό για την παρατήρηση της διατμητικής συμπεριφοράς των ανεπίπεδων ασυνεχειών σε δείγματα που υπόκεινται σε δοκιμές στο εργαστήριο. Όμως δημιουργείται η ανάγκη να επαληθευτούν για την αξιοπιστία τους και την εγκυρότητά τους. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί συγκρίνοντας αποτελέσματα από δοκιμές πεδίου (δείγματα με μεγάλες ασυνέχειες για αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα χωρίς την επίδραση της κλίμακας) με τις διορθωμένες τιμές από τις εξισώσεις που προτάθηκαν. Ωστόσο οι μελέτες πεδίου εκλείπουν λόγω του κόστους αλλά και του χρόνου που απαιτείται για την πραγματοποίησή τους. Η αντίστοιχη βιβλιογραφία είναι περιορισμένη και η εύρεση αποτελεσμάτων από μελέτες πεδίου είναι δύσκολη καθώς οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί τα προηγούμενα χρόνια αντλούν δεδομένα κυρίως από διερεύνηση μικρών ασυνεχειών. Από την βιβλιογραφία εντοπίστηκε μια μελέτη με αποτελέσματα από το πεδίο μέσω μίας μεθόδου που θα παρουσιαστεί παρακάτω (και ελέγχθηκε για την αξιοπιστία της) και όχι από συνηθισμένες δοκιμές πεδίου.

Πειραματικά και Αριθμητικά Δεδομένα από τη Βιβλιογραφία

Οι Yong et al (2017) προσπάθησαν να αναπτύξουν μία μέθοδο για την μέτρηση του δείκτη τραχύτητας μεγάλων ασυνεχειών που να συνυπολογίζει τα φαινόμενα κλίμακας αλλά και να εφαρμόζει μία υπολογιστική προσέγγιση για ποσοτική αξιολόγηση του JRC αξιοποιώντας τη σχέση του πλάτους των προεξοχών με το μήκος της ασυνέχειας.

Στην διερεύνηση μεγάλων ασυνεχειών υπάρχουν ωστόσο περιορισμοί και αφορούν στην μέθοδο καταγραφής των ασυνεχειών και στη μέθοδο αξιολόγησης. Τα όργανα μέτρησης πρέπει να χαρακτηρίζονται από υψηλή ακρίβεια και ευκολία χρήσης στο πεδίο. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται οπτικά όργανα μέτρησης για τον προσδιορισμό των ασυνεχειών στο πεδίο. Αυτού του είδους οι μετρήσεις ελαχιστοποιούν τον χρόνο που απαιτείται ωστόσο υστερούν σε ακρίβεια καθώς παρεμβάλλονται εμπόδια όπως το έδαφος ή φυτά πλησίον της ασυνέχειας, ο ελλιπής φωτισμός καθώς και διαφορές στα χρώματα των πετρωμάτων. Επιπλέον είναι αρκετά δαπανηρές και δύσκολες να εφαρμοστούν. Για αυτό

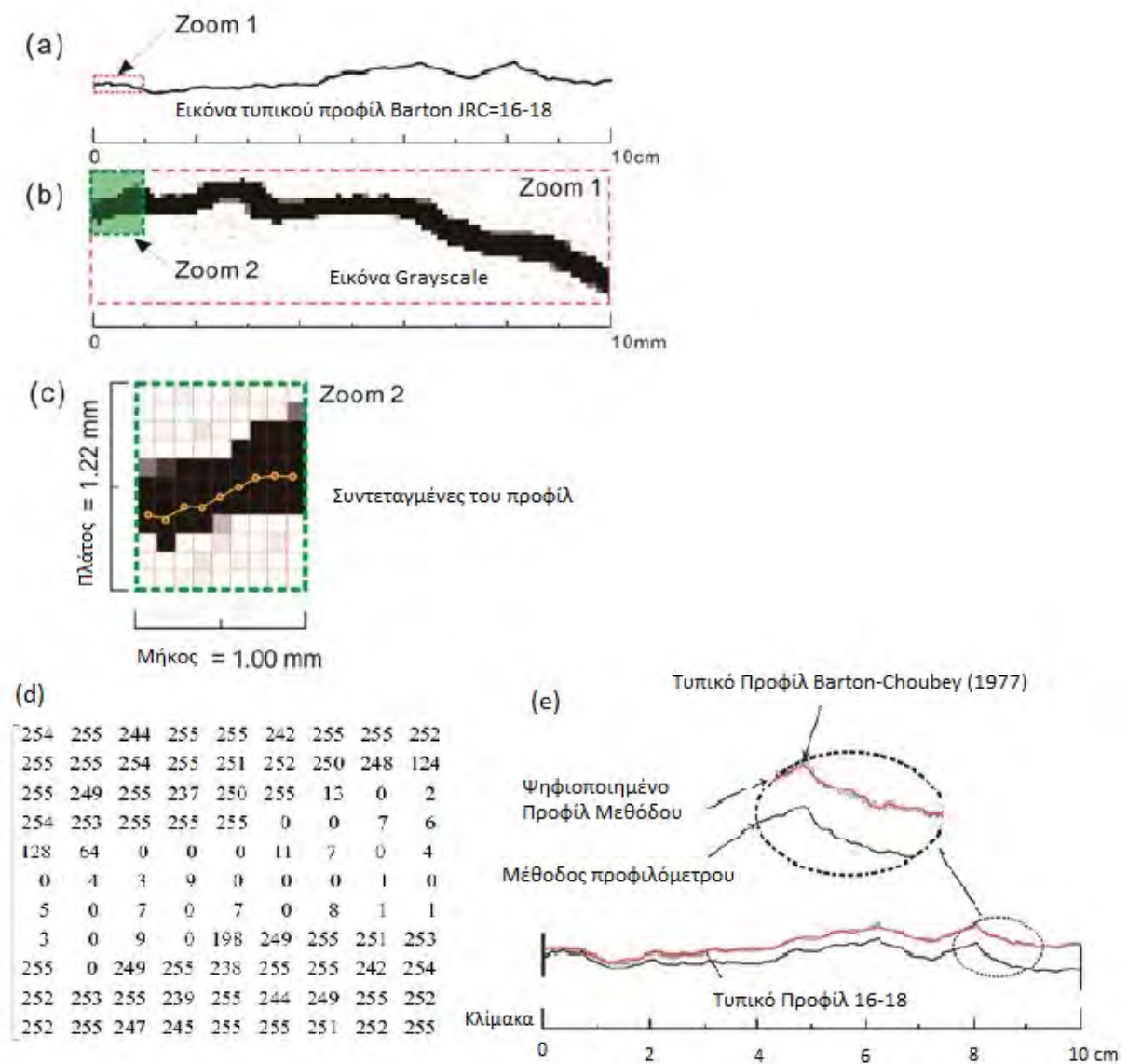
συνήθως προτιμώνται μέθοδοι με μηχανικά όργανα. Όμως κι αυτές οι μέθοδοι περιορίζονται σε δείγματα με μικρό μέγεθος και είναι αρκετά χρονοβόρες με αποτέλεσμα να εφαρμόζονται σπάνια. Έτσι συνηθέστερος τρόπος εύρεσης του δείκτη τραχύτητας είναι μέσω της γραφικής λύσης του Barton με τα 10 τυπικά προφίλ ασυνεχειών που αξιοποιεί το πλάτος των προεξοχών και το μήκος της ασυνέχειας. Ωστόσο κι αυτός ο τρόπος αξιολόγησης δεν είναι ο ιδανικός καθώς εμπεριέχει υποκειμενικότητα στην συλλογή των δεδομένων. Έτσι οδηγήθηκαν στην παρακάτω μέθοδο καταγραφής.

Εναλλακτική Μέθοδος καταγραφής ασυνεχειών

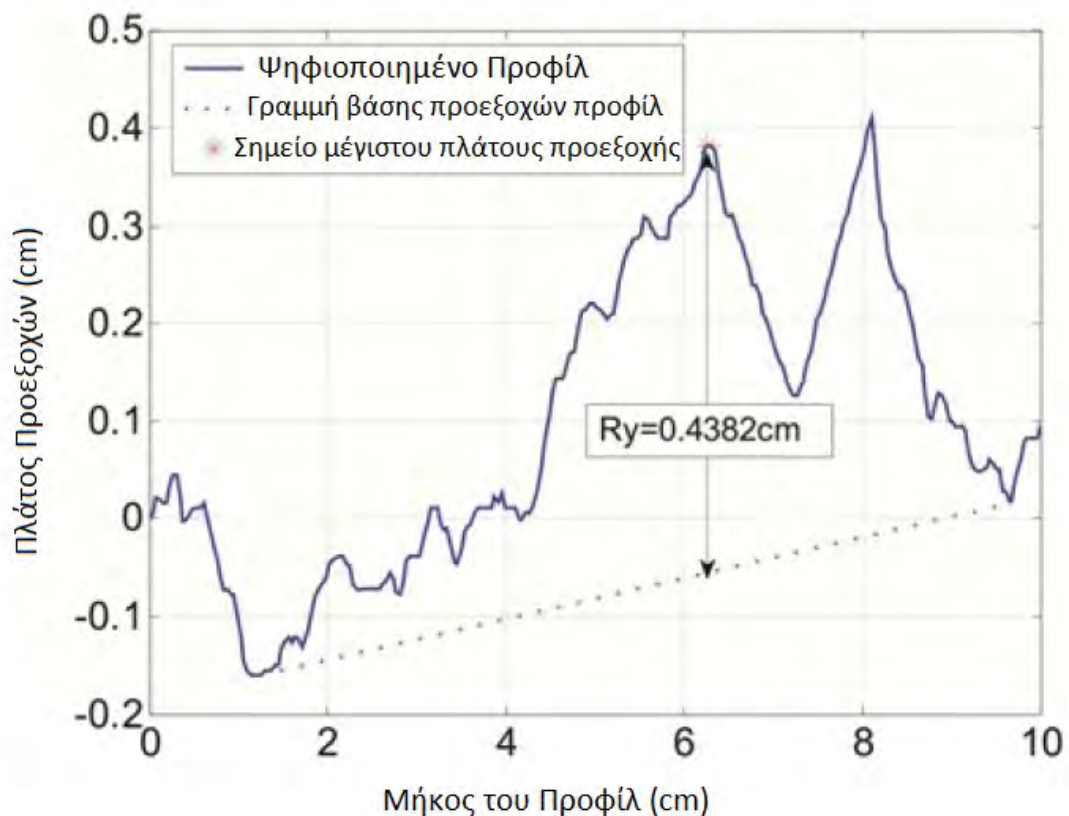
Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας της μεθόδου που προτάθηκε ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Αρχικά λαμβάνεται ως δείγμα το τυπικό προφίλ του Barton JRC=16-18. Αφού μετατρέπεται σε ψηφιακή εικόνα (Σχήμα 2.16a), το προφίλ αποτυπώνεται σε εικόνα με την μέθοδο grayscale ή αλλιώς κλίμακα του γκρι (τα πρώτα 10mm της ασυνέχειας φαίνονται με zoom 1 στο Σχήμα 2.16b) και με την χρήση Matlab εξάγονται σε μητρώο οι συντεταγμένες της καμπύλης από την εικόνα που εκφράζουν τις αποχρώσεις του γκρι και κατ' επέκταση το προφίλ της ασυνέχειας (το πρώτο 1mm της ασυνέχειας φαίνεται με zoom 2 στο Σχήμα 2.16c). Από το εξαγόμενο μητρώο (Σχήμα 2.16d) ψηφιοποιούνται οι συντεταγμένες των σημείων του προφίλ για δεδομένο μήκος ασυνέχειας. Στη συνέχεια συγκρίνεται το προφίλ της ψηφιοποιημένης μεθόδου με το προφίλ της μεθόδου του προφίλομέτρου για το τυπικό προφίλ 16-18 (Σχήμα 2.16e), όπου το πρώτο παρουσιάζει μικρότερο σφάλμα, οπότε μπορούμε να προχωρήσουμε στην αξιοποίηση του ψηφιοποιημένου προφίλ. Για τον υπολογισμό του δείκτη τραχύτητας υπολογίστηκε μέσω του ψηφιοποιημένου προφίλ το πλάτος των προεξοχών R_y (σε cm) (Σχήμα 2.17), και η τιμή του JRC προέκυψε μέσω του τύπου:

$$JRC = 400 \times \frac{R_y}{L_n} \quad (2.3.10),$$

όπου L_n το μήκος του προφίλ της ασυνέχειας (σε cm). Η τιμή βρέθηκε εντός των ορίων 16-18 (όπως θα περιμέναμε, καθώς επιλέχθηκε το τυπικό προφίλ του Barton 16-18), οπότε **η μέθοδος χαρακτηρίζεται αποδεκτή ώστε να προχωρήσουμε με ασφάλεια στην αξιοποίηση των δεδομένων της μελέτης.**



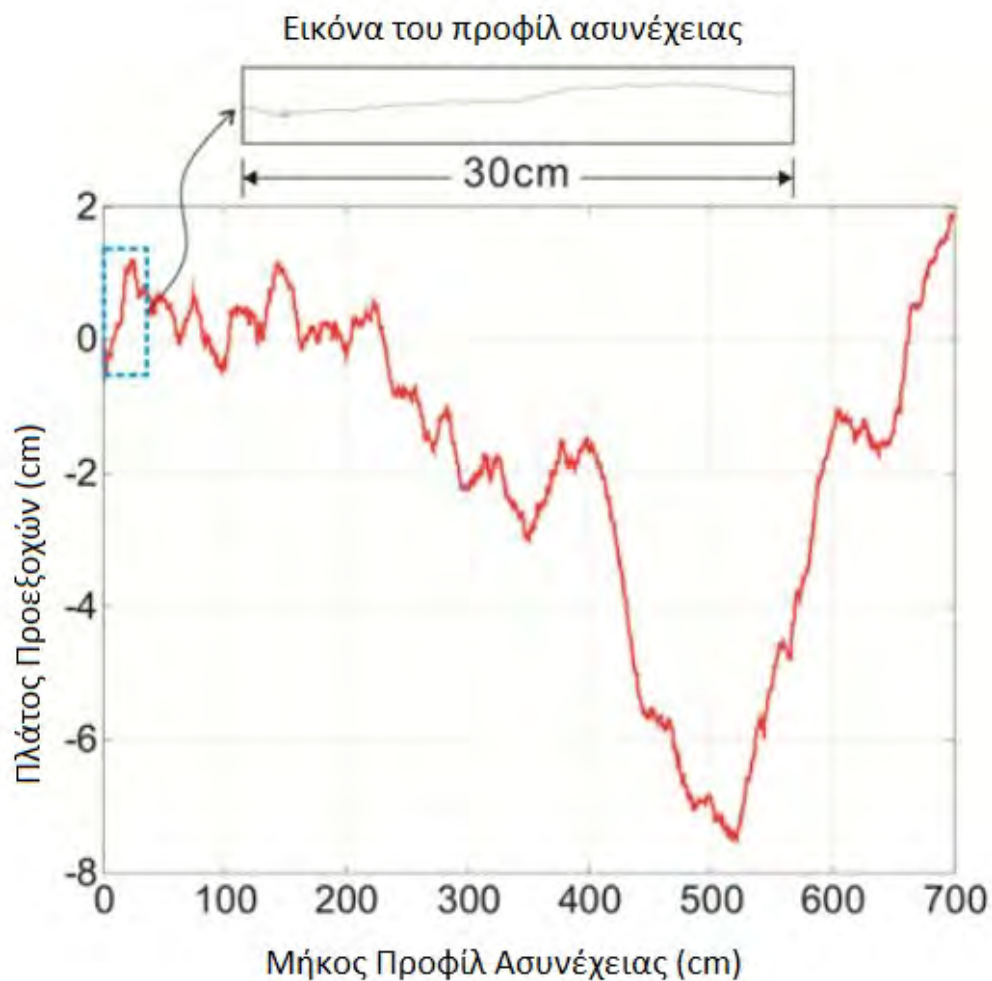
Σχήμα 2-16 Μέθοδος ψηφιοποίησης ασυνέχειας (Yong et al, 2017).



Σχήμα 2-17 Μέθοδος εύρεσης πλάτους προεξοχών μέσω ψηφιοποιημένου προφίλ ασυνέχειας (Yong et al, 2017).

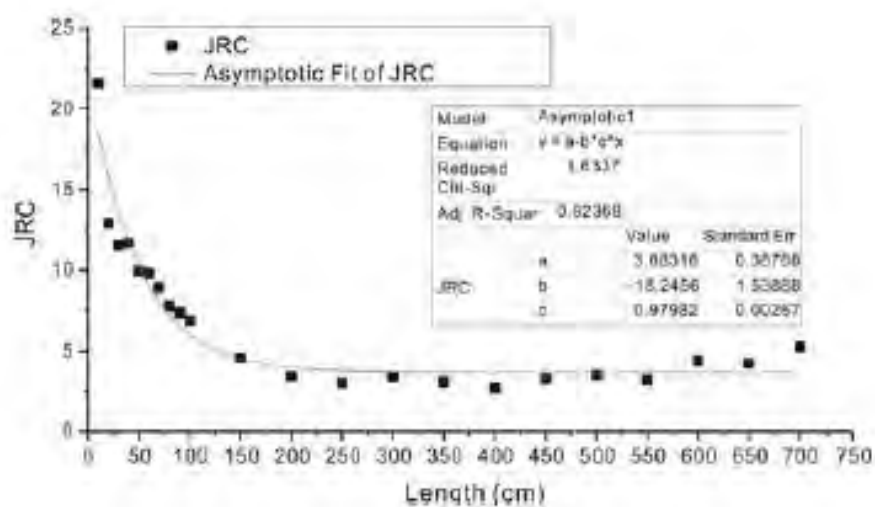
Δεδομένα Μελέτης Πεδίου

Στην πόλη Changshan City της Κίνας μετρήθηκε στο πεδίο με προφίλογράφο δείγμα ανεπίπεδης ασυνέχειας 700cm. Στη συνέχεια σαρώθηκε η καταγραφή από τον προφίλογράφο και έγινε ψηφιακή εικόνα. Με τη μέθοδο που περιεγράφηκε παραπάνω σχηματίστηκε το ψηφιοποιημένο προφίλ της ασυνέχειας (Σχήμα 2.18). Έγινε σύγκριση των πρώτων 30cm μεταξύ αρχικής ψηφιακής εικόνας και ψηφιοποιημένου προφίλ προκειμένου να ελεγχθεί η ψηφιοποίηση του προφίλ. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης ήταν θετικό κι ενθαρρυντικό για περαιτέρω ανάλυση του ψηφιοποιημένου προφίλ της ασυνέχειας, αφού τα δύο προφίλ παρουσίαζαν ομοιότητα.



Σχήμα 2-18 Ψηφιοποιημένο Προφίλ Ασυνέχειας στο Πεδίο (Yong et al, 2017).

Για να ελεγχθεί το φαινόμενο κλίμακας λήφθηκαν δείγματα από το ψηφιοποιημένο προφίλ μήκους 10, 20, 30, ..., 650, 700cm. Με τον τύπο που αξιοποιεί το πλάτος των προεξοχών (2.3.10) προέκυψαν οι τιμές του δείκτη τραχύτητας ασυνεχειών JRC κάθε δείγματος και σχηματίστηκε το διάγραμμα με τις τιμές ανά μήκος ασυνέχειας που περιγράφει την μελέτη πεδίου (Σχήμα 2.19). Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η επεξεργασία των τιμών του διαγράμματος και η αξιοποίηση τους για την παραγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τα φαινόμενα κλίμακας.



Σχήμα 2-19 Διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC – Μήκους Ασυνέχειας (Yong et al, 2017).

Κεφάλαιο 3 Κριτήριο Barton-Bandis

3.1 Κριτήριο Barton-Bandis για την περιγραφή των επιδράσεων κλίμακας στους δείκτες JRC-JCS

Η πρώτη προσπάθεια περιγραφής της διατμητικής συμπεριφοράς μιας ασυνέχειας βασίστηκε στο αρχικό γραμμικό μοντέλο Mohr-Coulomb που περιγράφεται ως γνωστόν από την Εξίσωση 3.1.1:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi, \quad (3.1.1)$$

όπου τ η διατμητική αντοχή, σ_n η επιβαλλόμενη ορθή τάση, c η συνοχή του εδάφους και φ η γωνία τριβής του εδάφους.

Ωστόσο ο όρος της συνοχής c δεν συναντάται στα βραχώδη εδάφη αφού αναφέρεται στην δυνατότητα των εδαφικών σωματιδίων να συγκρατούνται. Στη βραχομηχανική, χρησιμοποιείται συμβατικά για να περιγράψει τη τεταγμένη στο διάγραμμα $\tau - u$ για μηδενική ορθή τάση (Hoek, 1983). Ύστερα κι από έρευνα διαπιστώθηκε ότι η διατμητική συμπεριφορά των ασυνεχειών περιγράφεται καλύτερα από μη-γραμμικά μοντέλα (Barton 1973, 2013). Έτσι, πέρα από την γωνία τριβής φ που επιδρά στην διάτμηση προτάθηκε από τον Patton ο όρος της γωνίας ανεπιτεδότητας i που σχετίζεται με την γωνία απόκλισης των προεξοχών της ασυνέχειας ως προς τη διεύθυνση που ασκείται η διατμητική τάση και σχηματίστηκε η Εξίσωση 3.1.2:

$$\tau = \sigma_n \tan(\varphi + i). \quad (3.1.2)$$

Ύστερα από εκτενή έρευνα και δοκιμές άμεσης διάτμησης η γωνία ανεπιτεδότητας i εκφράστηκε από τον Barton (1973) συναρτήσει των δεικτών τραχύτητας JRC, αντοχής των τοιχωμάτων JCS της ασυνέχειας και της ορθής επιβαλλόμενης τάσης σ_n , από την σχέση 3.1.3:

$$i = JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right). \quad (3.1.3)$$

Συνδυάζοντας τις Εξισώσεις 3.1.2 και 3.1.3 προέκυψε η εμπειρική σχέση 3.1.4 γνωστή και ως κριτήριο Barton-Bandis για την περιγραφή της διατμητικής αντοχής ανεπίπεδων ασυνεχειών:

$$\tau = \sigma_n \tan[JRC \log_{10}(\frac{JCS}{\sigma_n}) + \varphi_r] . \quad (3.1.4)$$

Από το κριτήριο μπορεί να υπολογιστεί και ο δείκτης τραχύτητας JRC αν είναι γνωστά τα μεγέθη της μέγιστης διατμητικής αντοχής τ_{max} σε δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση σ_n , ο δείκτης JCS και η γωνία παραμένουσας τριβής φ_r :

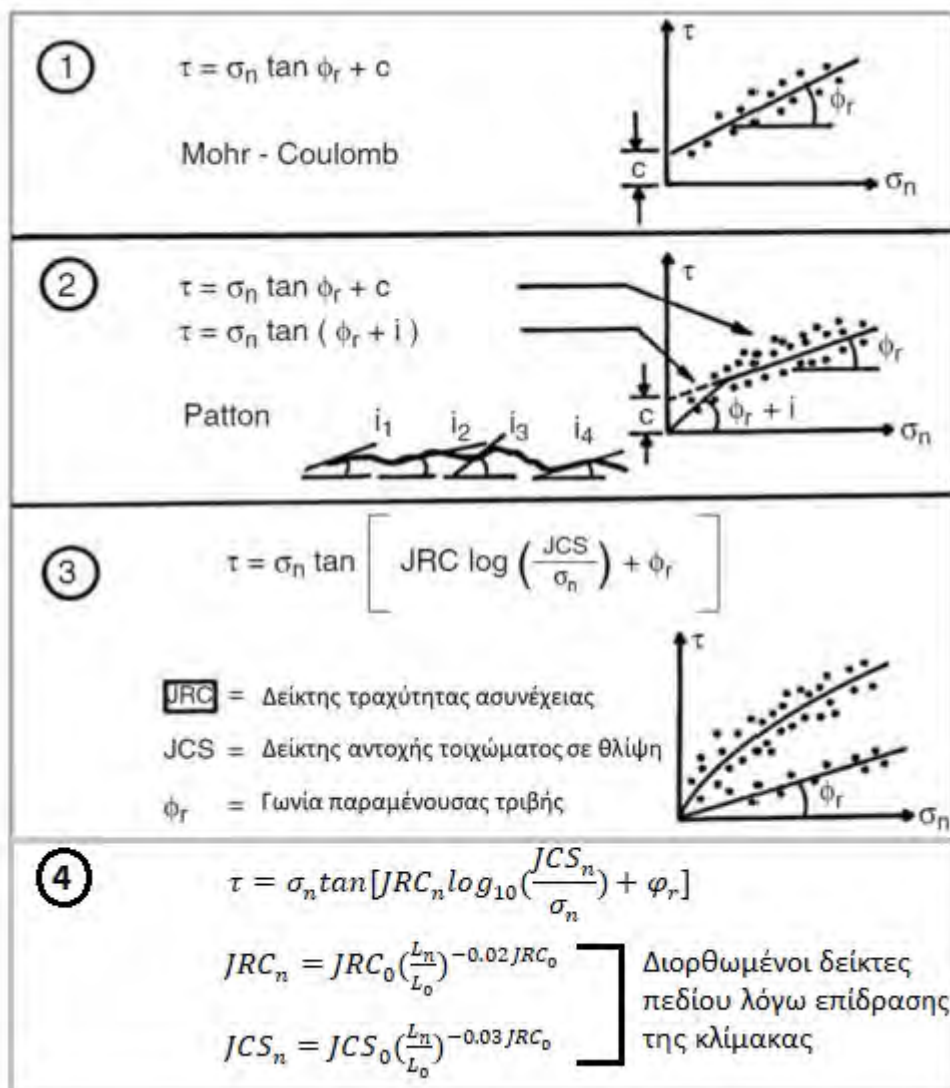
$$JRC = \frac{\tan^{-1}(\frac{\tau_m}{\sigma_n}) - \varphi_r}{\log(\frac{JCS}{\sigma_n})} . \quad (3.1.5)$$

Το κριτήριο αυτό περιγράφει την διατμητική συμπεριφορά μιας ανεπίπεδης ασυνέχειας αξιοποιώντας δείκτες με φυσική σημασία. Ωστόσο έχει κάποιους περιορισμούς για τιμές του λόγου $(\frac{JCS}{\sigma_n})$, δηλ. $1 < (\frac{JCS}{\sigma_n}) < 100$, ενώ για τιμές $(\frac{JCS}{\sigma_n}) > 100$ η εξίσωση παύει να ισχύει καθώς τείνει στο άπειρο και προτείνεται η εξίσωση:

$$\tau = \sigma_n \tan(70^\circ) . \quad (3.1.6)$$

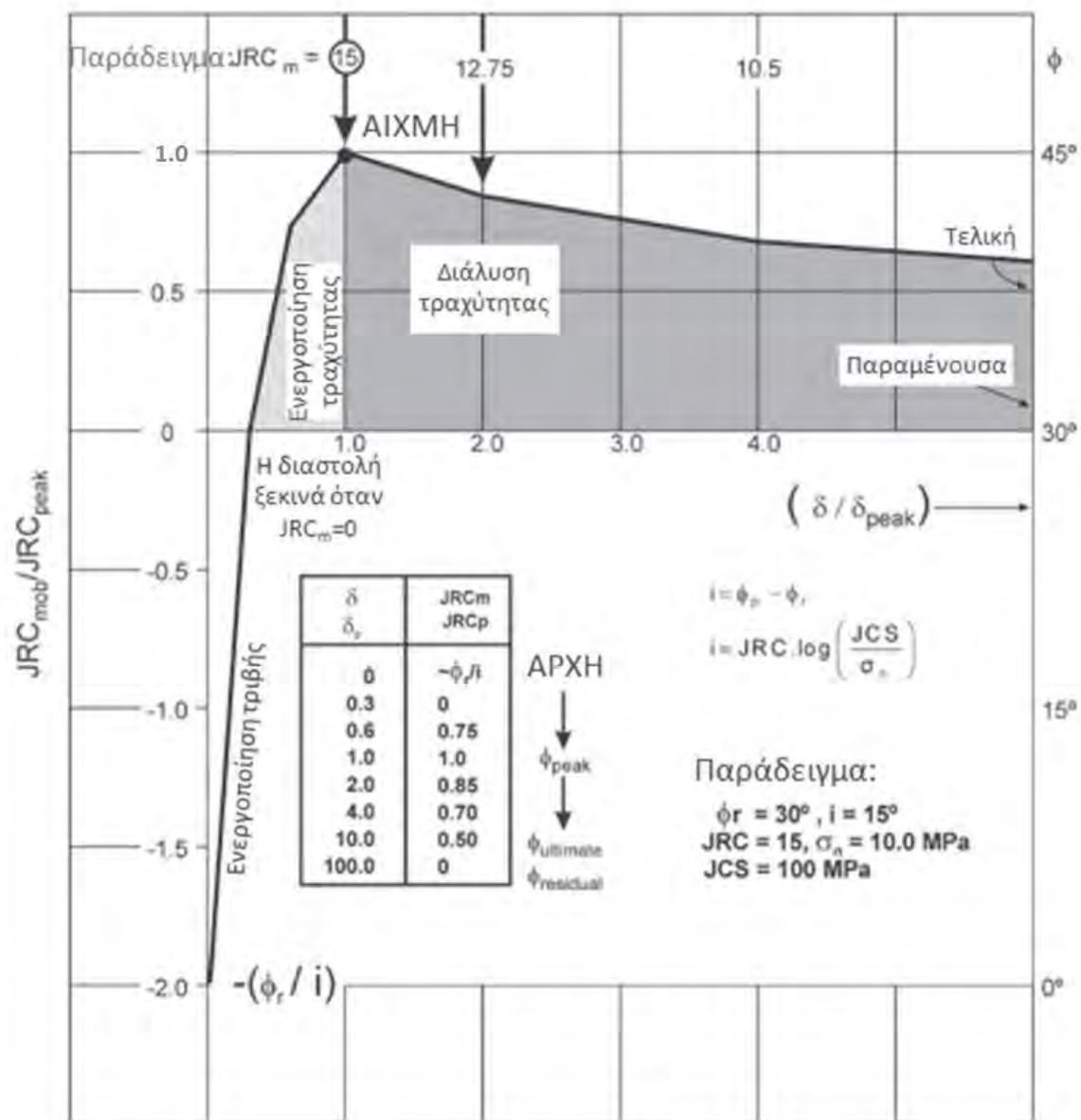
Τα 3 μοντέλα περιγραφής διατμητικής συμπεριφοράς των τοιχωμάτων των ασυνεχειών που παρουσιάστηκαν παραπάνω συνοψίζονται στο Σχήμα 3.1. Στην τελευταία γραμμή (4) του Σχήματος 3.1 εισάγεται μια πιο προηγμένη εξίσωση για την αντοχή σε διάτμηση, ενσωματώνοντας τη διόρθωση των δεικτών τραχύτητας και αντοχής λόγω της επίδρασης της κλίμακας. Οι δείκτες JRC_n και JCS_n είναι διορθωμένες τιμές του δείκτη τραχύτητας ασυνεχειών (JRC) και του δείκτη αντοχής τοιχώματος σε θλίψη (JCS), λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του μήκους της ασυνέχειας. Καθώς το μήκος της ασυνέχειας (L_n) αυξάνεται, η τραχύτητα και η αντοχή τοιχωμάτων μειώνονται, δεδομένου ότι οι μεγαλύτερες ασυνέχειες τείνουν να έχουν πιο ομαλές επιφάνειες και συνεπώς μικρότερη αντίσταση σε διάτμηση. Η εξίσωση λαμβάνει υπόψιν αυτήν τη μείωση, διορθώνοντας τις τιμές του JRC και του JCS και παρέχοντας μια πιο ρεαλιστική εκτίμηση της αντοχής σε διάτμηση για μεγάλες ασυνέχειες. Η αντοχή σε διάτμηση υπολογίζεται πλέον με τη χρήση των διορθωμένων τιμών και

εξακολουθεί να εξαρτάται από την ορθή τάση σ_n και τη γωνία παραμένουσας τριβής φ_r . Το πλεονέκτημα που προσφέρει αυτή η προσέγγιση είναι η ακρίβεια που επιτρέπει σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Σε μεγάλες γεωλογικές επιφάνειες, οι αρχικές εργαστηριακές τιμές των JRC και JCS δεν είναι αντιπροσωπευτικές, και η διόρθωσή τους καθιστά τη μοντελοποίηση της διάτμησης πιο ρεαλιστική. Το μοντέλο γίνεται έτσι πιο ευέλικτο και εφαρμόζεται καλύτερα στις πραγματικές συνθήκες πεδίου, όπου η διάτμηση παρουσιάζει μικρότερη αντίσταση σε μεγαλύτερες επιφάνειες ασυνέχειας λόγω της πιο ήπιας γεωμετρίας τους. Με αυτόν τον τρόπο, οι εξισώσεις στο πλαίσιο 4 προσφέρουν μια πιο αξιόπιστη πρόβλεψη της αντοχής σε διάτμηση, ιδιαίτερα σε μεγάλα γεωτεχνικά έργα, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της κλίμακας.



Σχήμα 3-1 Μοντέλα περιγραφής διατμητικής συμπεριφοράς τοιχωμάτων ασυνεχειών.

Από το κριτήριο Barton-Bandis σχηματίστηκε το διάγραμμα του Σχήματος 3.2 (Barton et. al, 1985) που παρουσιάζει την σχέση διατμητικής τάσης με την διατμητική παραμόρφωση χωρίς συγκεκριμένες διαστάσεις, εμπειρικά, από πληθώρα δοκιμών ασυνεχειών που εμφάνισαν παρόμοια διατμητική συμπεριφορά για διάφορες τιμές των παραμέτρων JRC, JCS, φ_r υπό ορθή τάση σ_n .



Σχήμα 3-2 Διάγραμμα συσχέτισης αδιάστατου λόγου δεικτών JRC (συνδέεται με την διατμητική τάση) - και αδιάστατου λόγου οριζόντιων μετατοπίσεων (διατμητική παραμόρφωση), (Barton, 2013).

Το διάγραμμα παρουσιάζει τιμές JRC_{mob}/JRC_{peak} στον κατακόρυφο άξονα και τιμές δ/δ_{peak} (οριζόντια μετατόπιση) στον οριζόντιο. Ο δείκτης τραχύτητας JRC_{mob} αναφέρεται στην τιμή του δείκτη κατά τη διάρκεια της διάτμησης της ασυνέχειας ενώ αυτός μεταβάλλεται (mob=mobilized). Το δ_{peak} αναφέρεται στην διατμητική μετατόπιση των τοιχωμάτων την στιγμή που επιτυγχάνεται η μέγιστη διατμητική αντοχή και συνδυάζεται με την μέγιστη τιμή

του δείκτη τραχύτητας JRC_{peak} . Η στιγμή αυτή σύμφωνα με τους Barton και Bandis (1982) επιτυγχάνεται σε μετατόπιση ίση με το 1% του μήκους της ασυνέχειας κι επειδή συνήθως πραγματοποιούνται δοκιμές σε δείγματα των 100mm αυτή ισούται με 1mm μετατόπισης. Για την εύρεση του δ_{peak} σχηματίστηκε η εμπειρική σχέση:

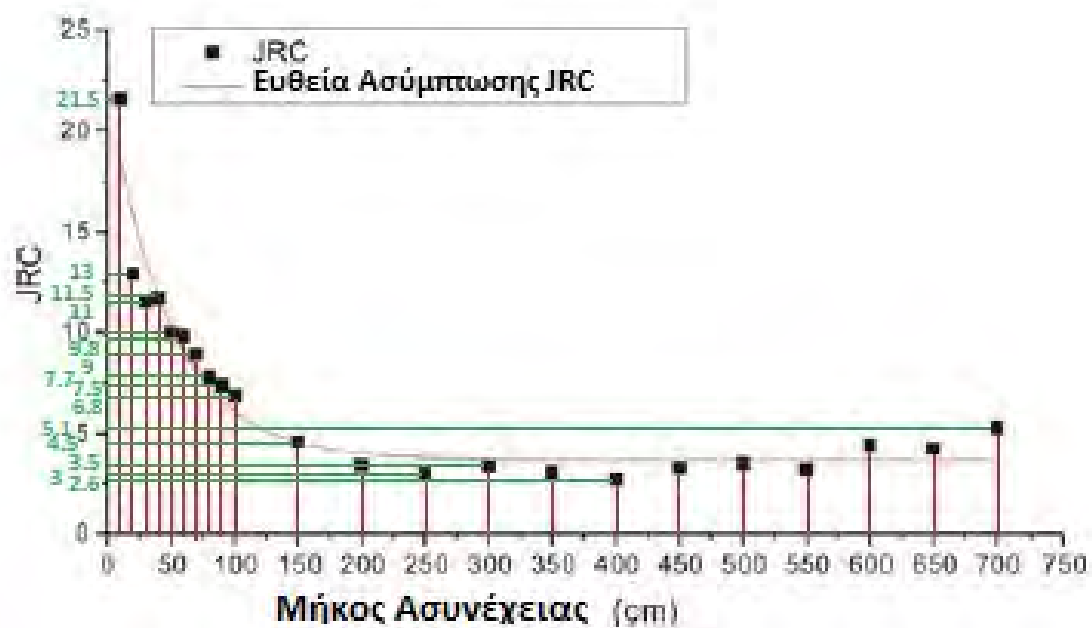
$$\delta_{peak} = \frac{L_n}{500} \left(\frac{JRC_n}{L_n} \right)^{0.33} . \quad (3.1.7)$$

Στο διάγραμμα παρατηρούμε ότι οι αρνητικές τιμές στον κατακόρυφο άξονα σχετίζονται με τη φάση της προ-αιχμής όπου δεν έχει ακόμα ενεργοποιηθεί πλήρως η τραχύτητα της επιφάνειας. Η περιοχή των αρνητικών τιμών αναπαριστά τη φάση κατά την οποία η επιφάνεια δεν συνεισφέρει ακόμα σημαντικά στην αντίσταση της διάτμησης μέσω της τραχύτητας. Δηλαδή, η τραχύτητα της επιφάνειας δεν έχει αρχίσει να ενεργοποιείται πλήρως και η τριβή που αναπτύσσεται δεν συνεισφέρει ουσιαστικά στη γεωμετρία της τραχύτητας. Καθώς η φόρτιση αυξάνεται και η καμπύλη περνάει από το μηδέν, η τραχύτητα αρχίζει να ενεργοποιείται σταδιακά. Σε αυτό το σημείο, η επιφάνεια αρχίζει να αντιδρά στην εφαρμογή της διάτμησης και η συνεισφορά της τραχύτητας στην αντίσταση της τριβής αυξάνεται. Στη συνέχεια, όταν η καμπύλη φτάσει στο 1 (που αντιστοιχεί στο σημείο αιχμής, η τραχύτητα έχει ενεργοποιηθεί πλήρως και συνεισφέρει μέγιστα στην τριβή και την αντίσταση κατά της διάτμησης. Μετά το σημείο αυτό και για όσο συνεχίζεται η διάτμηση, η τραχύτητα αρχίζει να μειώνεται καθώς οι επιφάνειες λειαίνονται και η αντίσταση από την τραχύτητα φθίνει έως μία παραμένουσα τιμή. Συνοψίζοντας, οι αρνητικές τιμές αντιπροσωπεύουν την αρχική φάση χαμηλής αντίστασης, όπου η τριβή δεν έχει πλήρως ενεργοποιηθεί. Καθώς η φόρτιση αυξάνεται, η τραχύτητα ενεργοποιείται, φτάνοντας στο μέγιστο σημείο της (αιχμή), και στη συνέχεια μειώνεται λόγω της διάτμησης, οδηγώντας στην μείωση της τραχύτητας. Παρά την παρόμοια ανάπτυξη των τιμών των δεικτών JRC_{mob}/JRC_{peak} και δ/δ_{peak} για πληθώρα ασυνεχειών με διαφορετικά χαρακτηριστικά, η καμπύλη μπορεί να γίνεται πιο απότομη ή πιο ομαλή χωρίς όμως να αποκλίνει από την πορεία που διακρίνουμε στο διάγραμμα του Σχήματος 3.2.

3.2 Μοντελοποίηση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων

3.2.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η μοντελοποίηση των αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων προέκυψε από το διάγραμμα που παρουσιάζει τις τιμές του δείκτη τραχύτητας JRC συναρτήσει του μήκους της ασυνέχειας (Σχήμα 2.15) της μελέτης πεδίου που παρουσιάστηκε παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά αντιστοιχήθηκαν οπτικά οι τιμές ανά δείγμα (Σχήμα 3.3) για να μπορέσει να γίνει ακριβής καταγραφή τους με σκοπό την βέλτιστη επεξεργασία και αξιοποίησή τους. Η αντιστοίχιση πραγματοποιήθηκε χαράσσοντας μία κατακόρυφη (κόκκινη) και μία οριζόντια (πράσινη) γραμμή από κάθε σταθερό σημείο της καμπύλης έως ότου συναντήσουμε τους άξονες μήκους ασυνέχειας και JRC αντίστοιχα προκειμένου να λάβουμε τις τιμές (δηλ. τις συντεταγμένες των σημείων). Τα ζεύγη τιμών που λήφθηκαν ανά σταθερό σημείο καταγράφηκαν στον Πίνακα 3.1 και αποτελούν τα αποτελέσματα της μελέτης πεδίου που πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο της ψηφιοποίησης που παρουσίασαν οι Yong et al (2017). Από τα ζεύγη τιμών σχηματίστηκε στο Excel διάγραμμα (Σχήμα 3.4) που στην ουσία ταυτίζεται με το διάγραμμα από όπου αντλήσαμε τα δεδομένα (Σχήμα 3.3), προκειμένου να συγκριθεί με το διάγραμμα της μεθόδου του Barton-Bandis που η ανάπτυξή του θα περιγραφεί στη συνέχεια. Από αυτή τη σύγκριση θα μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την λειτουργία του κριτηρίου Barton-Bandis και κατά πόσο οι προτεινόμενες σχέσεις του (Εξισώσεις 2.3.1 και 2.3.2) περιγράφουν με ικανοποιητική προσέγγιση τα φαινόμενα κλίμακας που παρατηρούνται στη μελέτη πεδίου.

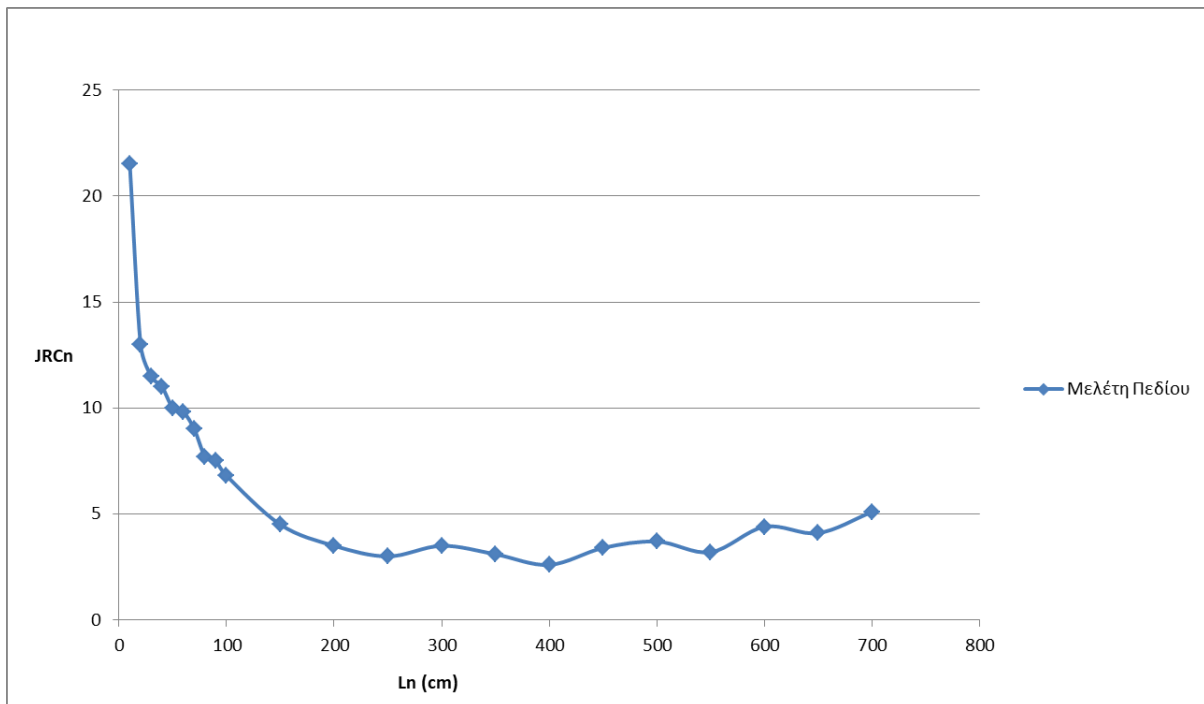


Σχήμα 3-3: Αντιστοίχιση τιμών JRC_n - L_n ανά δείγμα μελέτης πεδίου.

L_n (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150
JRC_n	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5

L_n (cm)	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
JRC_n	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1

Πίνακας 3-1 Καταγραφή τιμών μελέτης πεδίου σε Πίνακα.



Σχήμα 3-4: Διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n μελέτης πεδίου.

Για την ανάπτυξη της μεθόδου του Barton-Bandis απαιτούνται τιμές από δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο, ώστε εφαρμόζοντας σε αυτές τις τιμές τη σχέση 2.3.1 να καταλήξουμε στις διορθωμένες τιμές που ανταποκρίνονται στο πεδίο και εξαλείφουν τα φαινόμενα κλίμακας. Λόγω της έλλειψης τιμών από το εργαστήριο, καθώς δεν έχει πραγματοποιηθεί κάποια δοκιμή στην μελέτη της βιβλιογραφίας παρά μόνο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πεδίου, κρίνεται αναγκαίο να βρεθεί μέσω υποθέσεων το συγκεκριμένο ζεύγος τιμών (JRC_0 , L_0). Έτσι με τη μέθοδο της δοκιμής και του σφάλματος χρησιμοποιώντας τη σχέση 2.3.1 έγιναν κάποιες αρχικές υποθέσεις για τις τιμές του δείκτη τραχύτητας (JRC_0) και του μήκους της ασυνέχειας (L_0) που αφορά το δείγμα εργαστηρίου. Στη συνέχεια, γνωρίζοντας το μήκος της ασυνέχειας των διαφόρων δειγμάτων στο πεδίο (L_n) από την μελέτη πεδίου, προκύπτει κάθε φορά, με τη μέθοδο Barton-Bandis, ο αντίστοιχος δείκτης τραχύτητας (JRC_n) πεδίου για το κάθε δείγμα. Η παραπάνω διαδικασία απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5.

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02 JRC_0}$$

Σχήμα 3-5: Διαδικασία εύρεσης JRC_n μέσω της διορθωτικής σχέσης Barton-Bandis.

Για κάθε ζεύγος τιμών εργαστηρίου (JRC_0 , L_0) που προκύπτει από υπόθεση, εξάγεται μέσω της σχέσης μία τιμή για τον δείκτη τραχύτητας του πεδίου όπου μαζί με το γνωστό μήκος ασυνέχειας στο πεδίο σχηματίζουν ένα ζεύγος τιμών (L_n , JRC_n). Το ζεύγος αυτό αποτελεί την τιμή αναγωγής λόγω κλίμακας και είναι αυτό που μπορεί να συγκριθεί άμεσα με το αντίστοιχο ζεύγος τιμών της μελέτης πεδίου από την βιβλιογραφία. Επειδή τα αποτελέσματα από το πεδίο αφορούν διάφορα μήκη ασυνέχειας (L_n), η σχέση του Σχήματος 3.5 εξάγει τον δείκτη τραχύτητας λαμβάνοντας τιμές από τα αντίστοιχα μήκη κάθε φορά. Τα διάφορα ζεύγη τιμών (L_n , JRC'_n) καταγράφονται σε πίνακα (βλ. Πίνακας 3.2) και στη συνέχεια μεταφέρονται σε διάγραμμα ώστε να προκύψει η αντίστοιχη καμπύλη προς σύγκριση.

L_n (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150
JRC'_n	18,3	13,9	11,8	10,5	9,6	8,9	8,4	8,0	7,6	7,3	6,2

L_n (cm)	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
JRC'_n	5,5	5,0	4,7	4,4	4,2	4,0	3,8	3,7	3,6	3,4	3,3

Πίνακας 3-2 Τυπική Καταγραφή διορθωμένων τιμών JRC_n για υποθετικό ζεύγος τιμών εργαστηρίου ($JRC_0=20$, $L_0=8\text{cm}$).

Η παραπάνω διαδικασία αυτοματοποιείται μέσω Excel έτσι ώστε υποθέτοντας απλώς διάφορα ζεύγη τιμών για δείκτη τραχύτητας (JRC_0) και μήκος ασυνέχειας (L_0) του

δείγματος στο εργαστήριο να εξάγεται άμεσα το διάγραμμα (JRC_n , L_n) προς **οπτική σύγκριση**.

Πέρα από την οπτική σύγκριση, για να διαπιστωθεί κατά πόσο συγκλίνουν ή αποκλίνουν οι δύο καμπύλες αριθμητικά, χρησιμοποιείται και το **Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (ΜΤΣ)** που δίνεται από τον τύπο:

$$\text{Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα} = \frac{1}{\omega} \sum_{i=1}^{\omega} (JRC'_n i - JRC_n i)^2 \quad (3.1.8)$$

όπου JRC'_n είναι η διορθωμένη τιμή από το κριτήριο Barton-Bandis και JRC_n η τιμή από την μελέτη πεδίου.

Πιο συγκεκριμένα, για το σφάλμα υπολογίζεται η διαφορά των τιμών JRC_n των δύο μεθόδων (που προκύπτει για δεδομένο μήκος ασυνέχειας πεδίου L_n , $i=1$) και υψώνεται στο τετράγωνο. Το ίδιο επαναλαμβάνεται για $i=2,3,\dots,\omega$. Στη συνέχεια αθροίζονται οι τετραγωνικές διαφορές για κάθε μήκος ασυνέχειας (για $i=1$ έως ω) και διαιρούνται με τον αριθμό των διαφορετικών μηκών ασυνέχειας ω . Η παραπάνω διαδικασία μας οδηγεί στον μέσο όρο των τετραγωνικών σφαλμάτων, ο οποίος αποτελεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα για τις τιμές των καμπυλών που έχουν δημιουργηθεί από τις δύο μεθόδους.

Στην συνέχεια ακολουθεί η παραπάνω διαδικασία ξεκινώντας με τις υποθέσεις για τις τιμές του εργαστηρίου εφαρμόζοντας ωστόσο έναν περιορισμό. Ο περιορισμός αφορά στην υπόθεση του μήκους της ασυνέχειας στο εργαστήριο L_0 και συγκεκριμένα στο να λαμβάνει τιμές μικρότερες από 10cm. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην έρευνα του πεδίου της βιβλιογραφίας το μικρότερο μήκος της ασυνέχειας που εντοπίστηκε έφτανε μέχρι τα 10 cm. Οπότε θα ήταν αδύνατον να λαμβάνουμε στο εργαστήριο δείγμα από ασυνέχεια με μήκος μεγαλύτερο από αυτό που εντοπίζεται στο πεδίο.

3.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Συνολικά λήφθηκαν 26 ζεύγη τιμών JRC_0 - L_0 (4 διαφορετικοί δείκτες τραχύτητας δείγματος εργαστηρίου για κάθε ένα από 6 διαφορετικά μήκη ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου) από τα οποία υπολογίστηκαν και σχηματίστηκαν τα εξής:

- α) Διορθωτικές Τιμές JRC'_n πεδίου εφαρμόζοντας την σχέση 2.3.1.

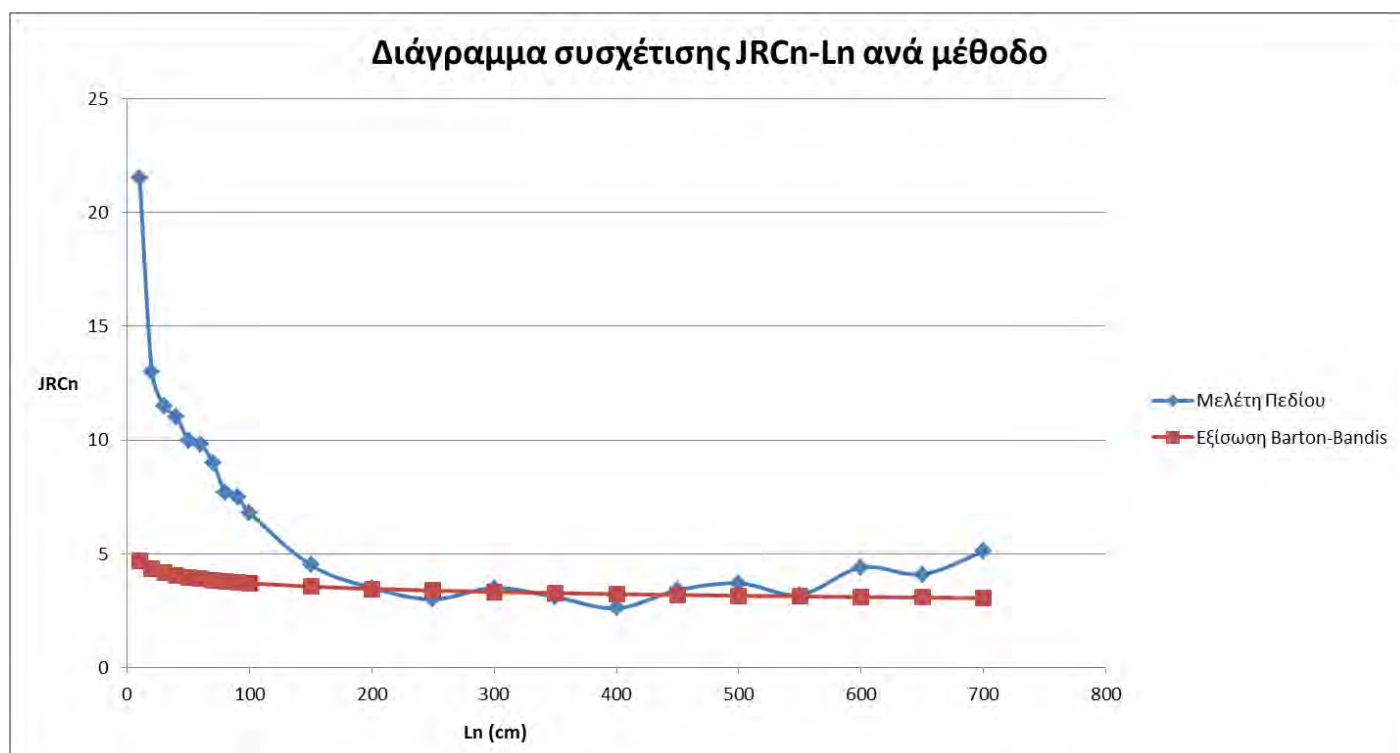
- b) Τετραγωνικό Σφάλμα για κάθε τιμή JRC'_n σε σύγκριση με JRC_n για τα δεδομένα μήκη ασυνέχειας πεδίου ($L_n=10,20,30,...,700$ cm).
- c) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα που προκύπτει από τα επιμέρους τετραγωνικά σφάλματα.
- d) Διάγραμμα τιμών διορθωμένου δείκτη τραχύτητας JRC'_n-L_n σε σύγκριση με τιμές μελέτης πεδίου JRC_n-L_n .

Παρακάτω ακολουθούν τα 26 αποτελέσματα της μοντελοποίησης:

- 1) Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_o=5cm$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_o=5$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.3 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , b) Τετραγωνικό σφάλμα των δύο μεθόδων, c) Μέσο τετραγωνικό σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και d) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.6).

	Lo (cm)	5																							
	JRCo	5																							
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700		
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1		
a	JRC'n	4,7	4,4	4,2	4,1	4,0	3,9	3,8	3,8	3,7	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	3,3	3,2	3,2	3,2	3,1	3,1	3,1	3,1		
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	283,41	74,77	53,59	48,15	36,34	34,81	26,62	15,29	14,10	9,57	0,89	0,00	0,15	0,03	0,03	0,39	0,04	0,30	0,01	1,70	1,05	4,20		
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	27,5																							

Πίνακας 3-3 Αποτελέσματα διορθωτικών τιμών (ή τιμών αναγωγής) και μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεθόδων JRC'_n για ζεύγος τιμών $L_o=5cm$, $JRC_o=5$.



Σχήμα 3-6 Διάγραμμα συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=5\text{cm}$, $JRC_0=5$.

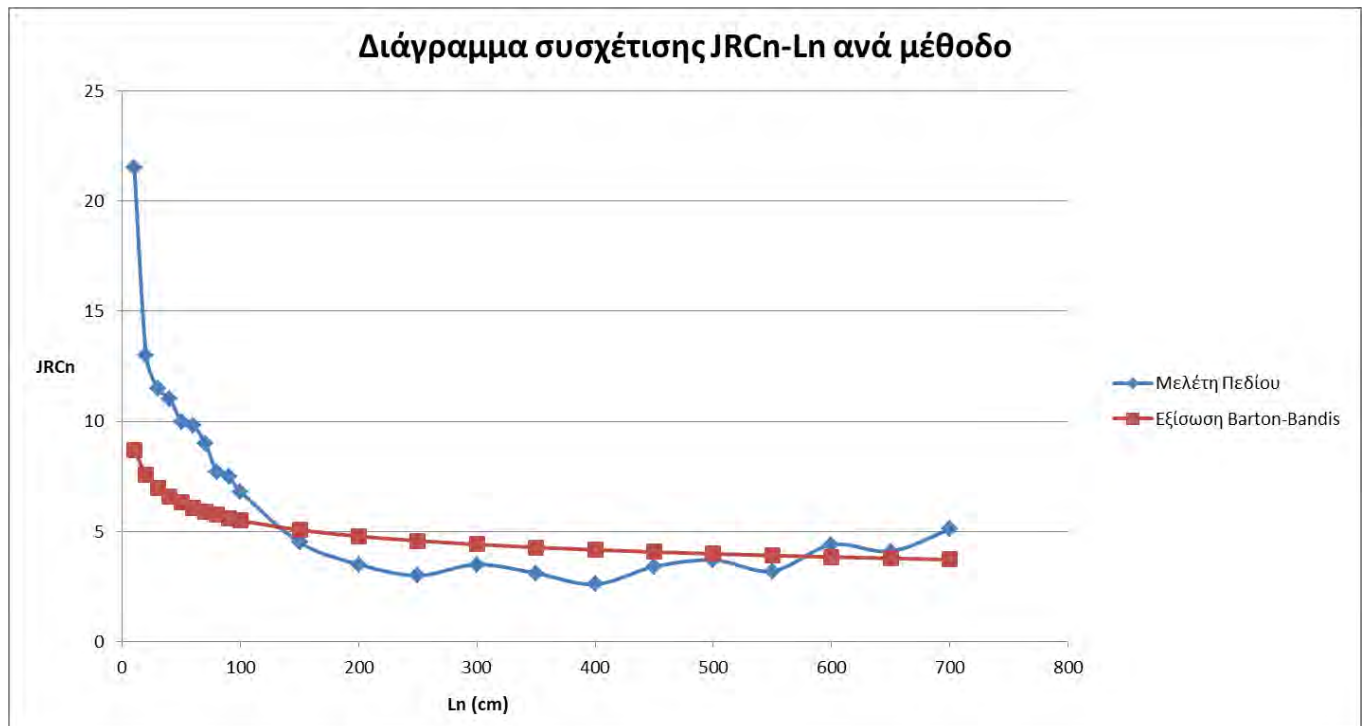
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο μεθόδων είναι αρκετά μεγάλες για μήκη ασυνέχειας έως 100cm ενώ από 150cm και πάνω οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές με τις τιμές σε κάποια μήκη ασυνέχειας να ταυτίζονται. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MT\bar{\Sigma}=27,5$. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει μεν την μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας αλλά όχι σε ικανοποιητικό βαθμό. Οι μεταβολές του δείκτη τραχύτητας από τα μικρά έως τα μεγαλύτερα μήκη ασυνεχειών είναι σχετικά μικρές.

- 2) Για μήκος ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_0=5\text{cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_0=10$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.4 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , β) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, γ) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και δ) το διάγραμμα τιμών

δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.7).

	Lo (cm)	5																						
	JRCo	10																						
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1	
a	JRC'n	8,7	7,6	7,0	6,6	6,3	6,1	5,9	5,7	5,6	5,5	5,1	4,8	4,6	4,4	4,3	4,2	4,1	4,0	3,9	3,8	3,8	3,7	
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	163,70	29,39	20,36	19,38	13,62	13,81	9,62	3,83	3,57	1,71	0,32	1,64	2,47	0,83	1,38	2,44	0,44	0,08	0,50	0,32	0,10	1,90	
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	13,2																						

Πίνακας 3-4 Αποτελέσματα διορθωτικών τιμών JRC'_n και ΜΤΣ των δύο μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_0=5\text{cm}$, $JRC_0=10$.



Σχήμα 3-7 Διάγραμμα συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=5\text{cm}$, $JRC_0=10$.

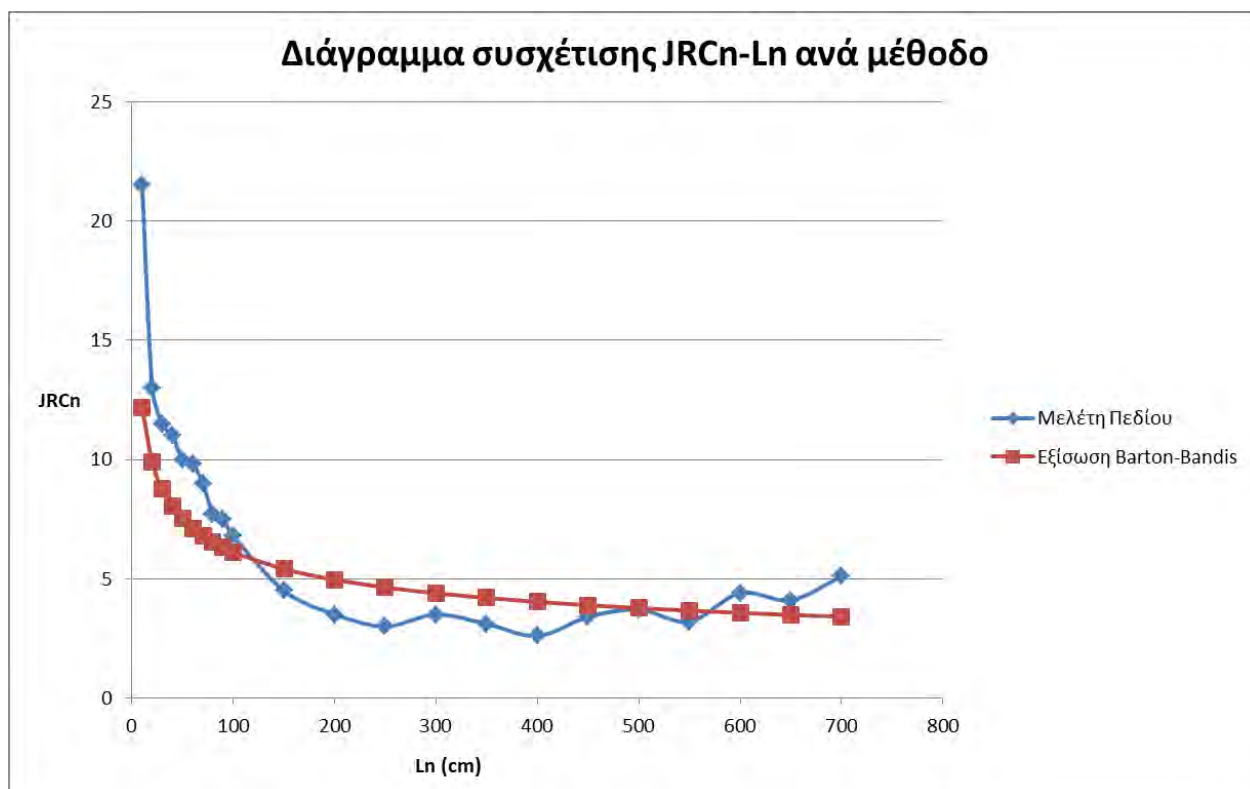
Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο μεθόδων είναι αρκετά μεγάλες για μήκη ασυνέχειας έως 100cm ενώ από 150cm (περίπου) και πάνω οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές. Επίσης, οι τιμές του JRC_n για κάποια μήκη ασυνέχειας που

προκύπτουν από τις δύο μεθόδους ταυτίζονται. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MT\bar{\Sigma}=13,2$. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει μεν την μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας αλλά και σε αυτή την περίπτωση για μεγάλα μήκη ασυνεχειών η μείωση αυτή δεν είναι σε έντονο βαθμό.

- 3) Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_0=5\text{cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_0=15$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.5 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , b) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, c) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και d) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.8).

	Lo (cm)	5																									
	JRCo	15																									
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700				
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1				
a	JRC'n	12,2	9,9	8,8	8,0	7,5	7,1	6,8	6,5	6,3	6,1	5,4	5,0	4,6	4,4	4,2	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4				
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	86,79	9,63	7,49	8,77	6,16	7,19	4,86	1,37	1,43	0,48	0,82	2,13	2,69	0,80	1,20	2,04	0,24	0,00	0,21	0,69	0,38	2,87				
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	6,7																									

Πίνακας 3-5 Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_0=5\text{cm}$, $JRC_0=15$.



Σχήμα 3-8 Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=5\text{cm}$, $JRC_0=15$.

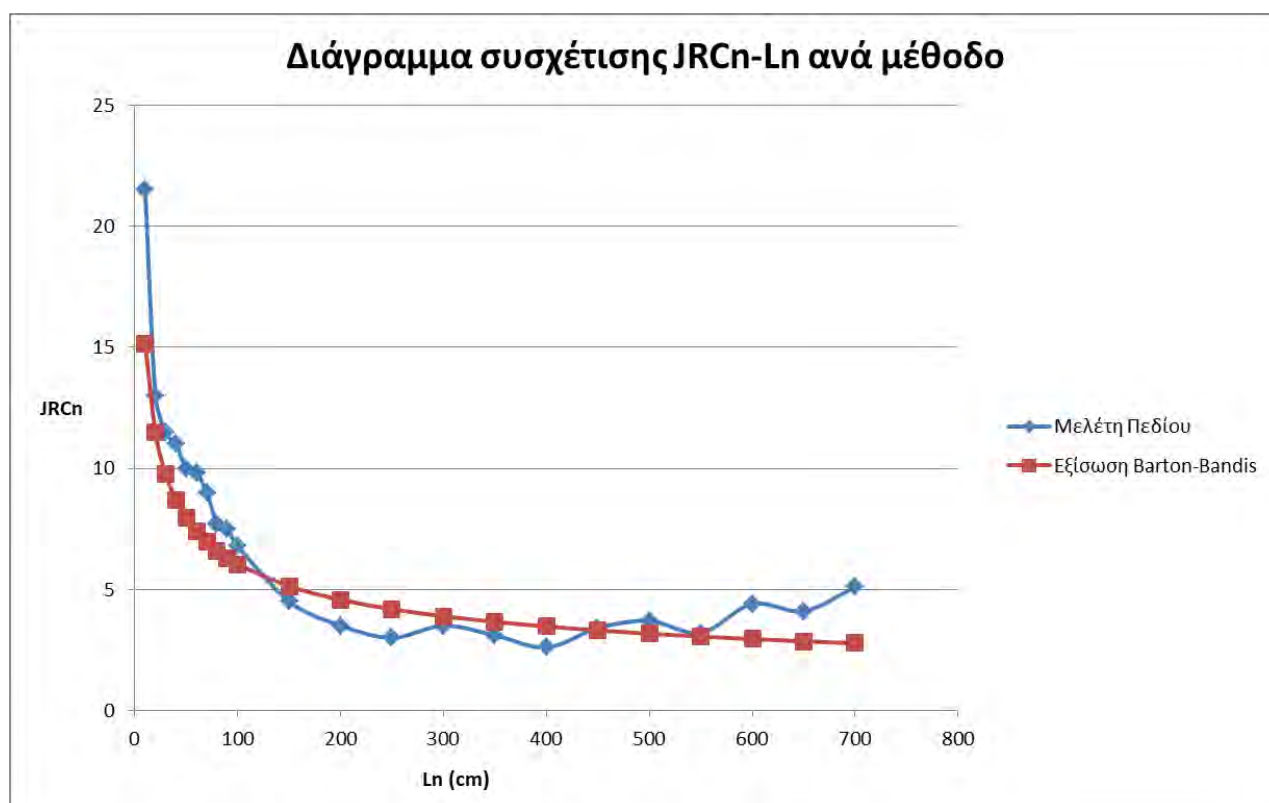
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι για αυτήν την περίπτωση οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο μεθόδων δεν είναι αρκετά μεγάλες για όλα τα μήκη των ασυνεχειών. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με 6,7. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει ικανοποιητική μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται εκθετικά με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας. Επιπλέον μέχρι τα μήκη ασυνέχειας 100cm παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών του δείκτη τραχύτητας, ενώ μετά τα 150cm παρατηρείται μία σχετική σταθεροποίηση στις τιμές.

- 4)** Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_0=5\text{cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_0=20$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.6 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , β) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, γ) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και δ) το διάγραμμα τιμών

δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.9).

	Lo (cm)	5																						
	JRCo	20																						
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1	
a	JRC'n	15,2	11,5	9,8	8,7	8,0	7,4	7,0	6,6	6,3	6,0	5,1	4,6	4,2	3,9	3,7	3,5	3,3	3,2	3,1	2,9	2,9	2,8	
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	40,23	2,29	3,00	5,26	4,15	5,75	4,16	1,22	1,45	0,59	0,40	1,15	1,40	0,15	0,31	0,75	0,01	0,28	0,02	2,11	1,55	5,43	
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	3,7																						

Πίνακας 3-6 Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_0=5\text{cm}$, $JRC_0=20$.



Σχήμα 3-9 Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=5\text{cm}$, $JRC_0=20$.

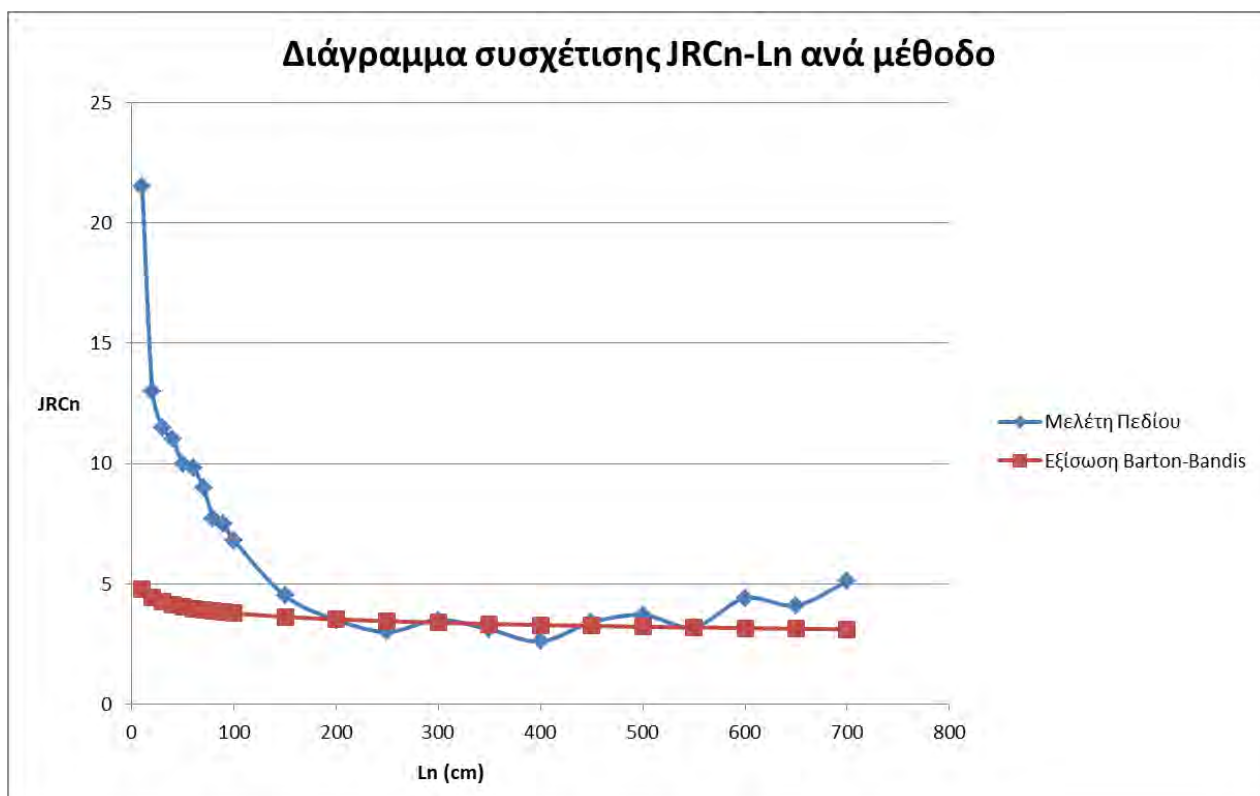
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι τιμές JRC_n μεταξύ των δύο μεθόδων είναι αρκετά κοντά σχεδόν για όλα τα μήκη των ασυνεχειών. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με 3,7. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει εμφανή μειωτική επίδραση αυξανόμενης της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη

τραχύτητας μειώνονται εκθετικά με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας. Επιπλέον μέχρι τα μήκη ασυνέχειας 100cm παρατηρείται εμφανής διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών του δείκτη τραχύτητας ενώ μετά τα 150cm παρατηρείται μία ταύτιση στις τιμές των δύο μεθόδων.

- 5) Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_o=6\text{cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_o=5$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.7 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , b) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, c) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και d) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.10).

	Lo (cm)	6																						
	JRCo	5																						
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1	
a	JRC'n	4,8	4,4	4,3	4,1	4,0	4,0	3,9	3,9	3,8	3,8	3,6	3,5	3,4	3,4	3,3	3,3	3,2	3,2	3,2	3,1	3,1		
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	280,53	73,40	52,47	47,11	35,47	33,97	25,90	14,75	13,59	9,16	0,77	0,00	0,20	0,01	0,05	0,47	0,02	0,24	0,00	1,55	0,94	3,97	
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	27,0																						

Πίνακας 3-7 Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=6\text{cm}$, $JRC_o=5$.



Σχήμα 3-10: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών L₀=6cm, JRC₀=5.

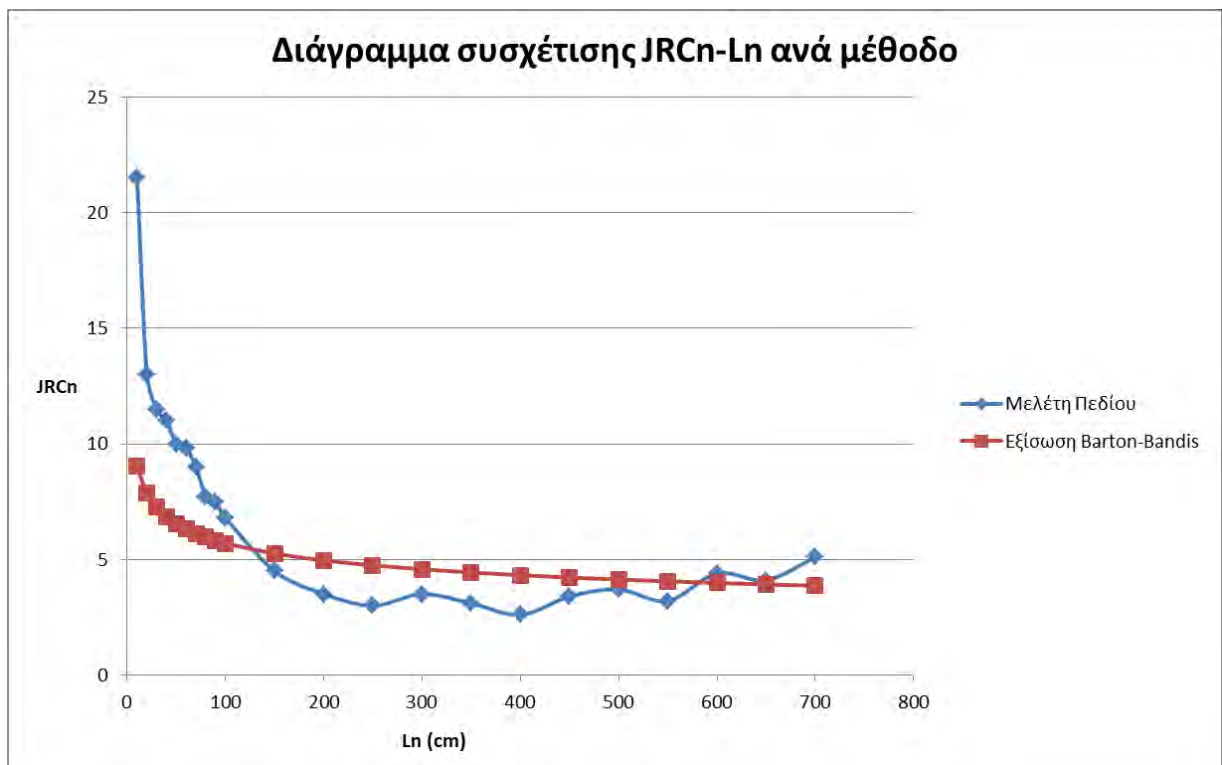
Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο μεθόδων είναι αρκετά μεγάλες για μήκη ασυνέχειας έως 100cm ενώ από 150cm και πάνω οι αποκλίσεις είναι σχετικά μικρές ενώ για κάποια μήκη ασυνέχειας οι τιμές των δύο διαγραμμάτων ταυτίζονται. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με MTΣ=27,0. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει μεν την μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας, αλλά όχι σε έντονο βαθμό.

- 6)** Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου **L₀=6cm** και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου **JRC₀=10** και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n, προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.8 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n, b) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, c) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και d) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη

πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.10).

	Lo (cm)	6																								
	JRCo	10																								
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700			
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1			
a	JRC'n	9,0	7,9	7,2	6,8	6,5	6,3	6,1	6,0	5,8	5,7	5,3	5,0	4,7	4,6	4,4	4,3	4,2	4,1	4,1	4,0	3,9	3,9			
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	155,53	26,42	18,08	17,28	11,94	12,18	8,31	3,04	2,83	1,22	0,57	2,13	3,04	1,15	1,78	2,95	0,67	0,18	0,72	0,18	0,03	1,54			
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	12,4																								

Πίνακας 3-8: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=6\text{cm}$, $JRC_o=10$.



Σχήμα 3-11: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_o=6\text{cm}$, $JRC_o=10$.

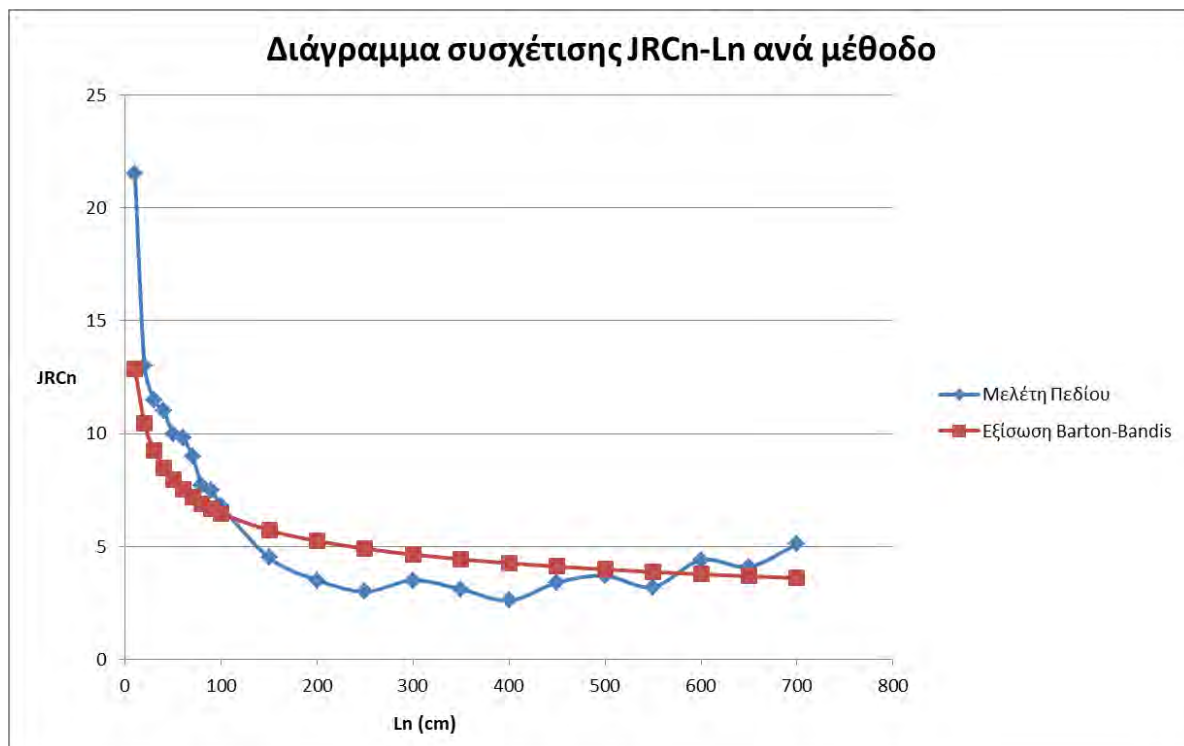
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο μεθόδων είναι αρκετά μεγάλες για μήκη ασυνέχειας έως 100cm ενώ από 150cm και πάνω οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές με τις τιμές σε κάποια μήκη ασυνέχειας να ταυτίζονται. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MTΣ=12,4$. Επίσης το διάγραμμα της

μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει μεν την μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας αλλά όχι σε έντονο βαθμό.

- 7) Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_o=6\text{cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_o=15$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.9 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , β) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, γ) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και δ) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.12).

	Lo (cm)	6																					
	JRCo	15																					
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1
a	JRC'n	12,9	10,5	9,3	8,5	7,9	7,5	7,2	6,9	6,7	6,4	5,7	5,2	4,9	4,6	4,4	4,3	4,1	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	74,50	6,49	5,04	6,30	4,24	5,21	3,32	0,65	0,71	0,12	1,47	3,02	3,61	1,30	1,77	2,74	0,50	0,08	0,45	0,40	0,18	2,26
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	5,7																					

Πίνακας 3-9: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=6\text{cm}$, $JRC_o=15$.



Σχήμα 3-12: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_o=6\text{cm}$, $JRC_o=15$.

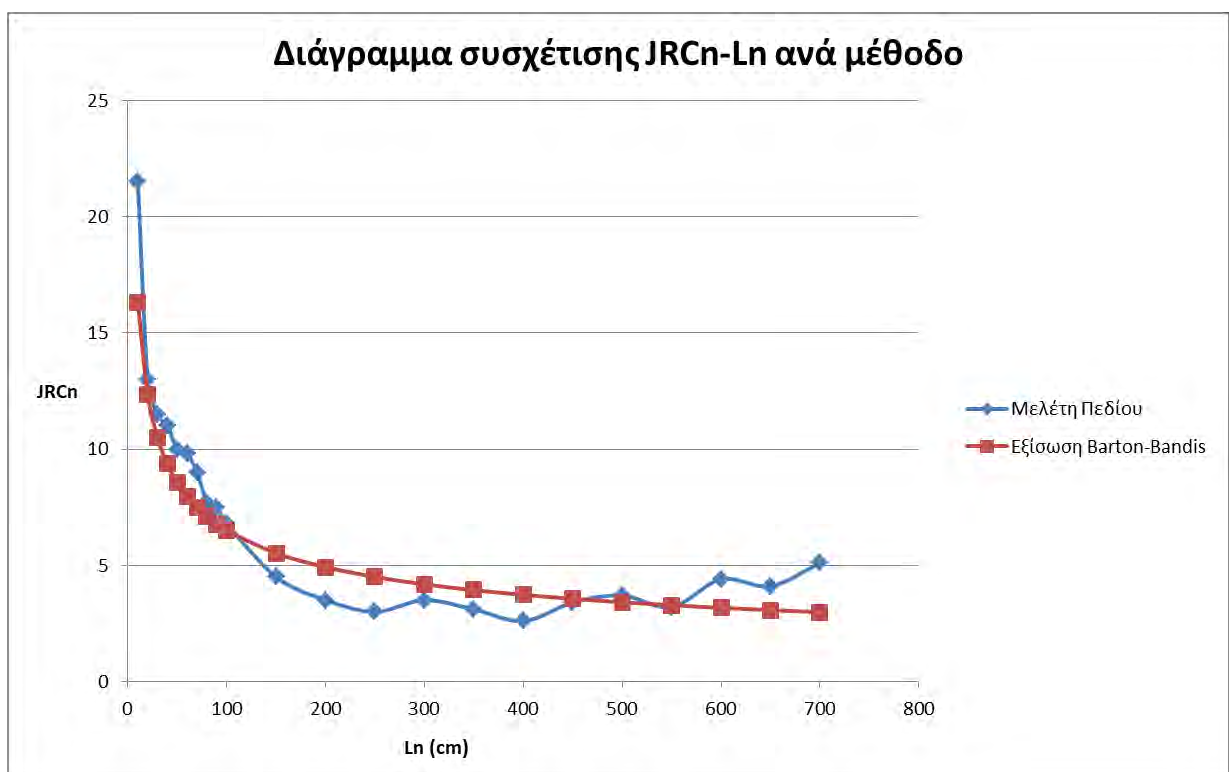
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο μεθόδων δεν είναι αρκετά μεγάλες για όλα τα μήκη των ασυνεχειών. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MTΣ=5,7$. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει έντονη μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται εκθετικά με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας. Επιπλέον για μήκη ασυνέχειας έως 100cm παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών του δείκτη τραχύτητας για τα δύο διαγράμματα, ενώ για μήκη ασυνεχειών μεγαλύτερα των 150cm παρατηρούνται τιμές με μικρή απόκλιση.

- 8)** Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_o=6\text{cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_o=20$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.10 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , b) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, c) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και d) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη

πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.13).

	Lo (cm)	6																											
	JRCo	20																											
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700						
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1						
a	JRC'n	16,3	12,4	10,5	9,4	8,6	8,0	7,5	7,1	6,8	6,5	5,5	4,9	4,5	4,2	3,9	3,7	3,6	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0						
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	27,00	0,41	0,99	2,68	2,06	3,38	2,29	0,36	0,53	0,10	1,04	2,01	2,25	0,47	0,69	1,27	0,02	0,08	0,01	1,51	1,06	4,49						
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	2,5																											

Πίνακας 3-10: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών L₀=6cm, JRC₀=20.



Σχήμα 3-13: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών L₀=6cm, JRC₀=20.

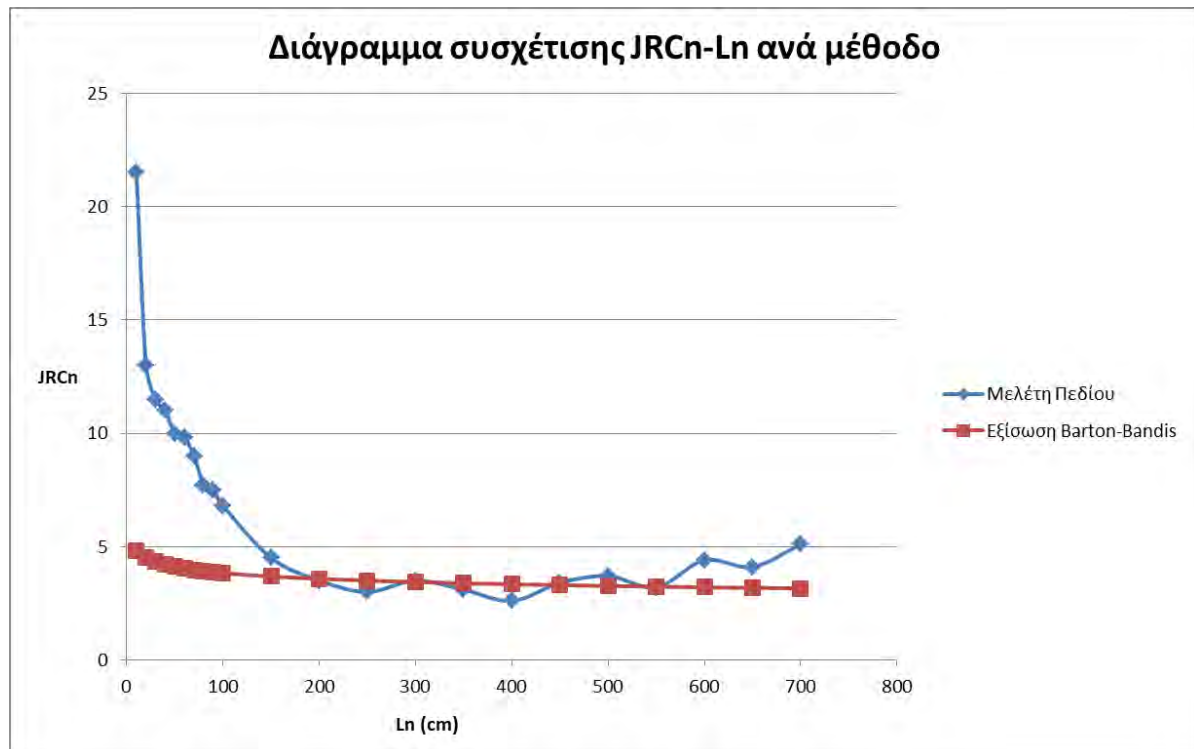
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι τιμές JRC_n μεταξύ των δύο μεθόδων είναι αρκετά κοντά για όλα τα μήκη των ασυνεχειών. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με ΜΤΣ=2,5. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει έντονη μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται εκθετικά με την

αύξηση του μήκους της ασυνέχειας. Επιπλέον για μήκη ασυνέχειας έως 100cm παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών του δείκτη τραχύτητας των δύο διαγραμμάτων ενώ μετά τα 150cm παρατηρείται μία ταύτιση των τιμών.

- 9) Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_0=7\text{cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_0=5$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.11 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , b) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, c) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και d) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.14).

	L_0 (cm)	7																							
	JRC_0	5																							
	L_n (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700		
	JRC_n	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1		
a	JRC'_n	4,8	4,5	4,3	4,2	4,1	4,0	4,0	3,9	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,4	3,3	3,3	3,3	3,2	3,2	3,2	3,2		
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	278,06	72,22	51,51	46,24	34,72	33,25	25,28	14,30	13,15	8,81	0,67	0,01	0,25	0,00	0,08	0,54	0,01	0,19	0,00	1,43	0,85	3,78		
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	26,6																							

Πίνακας 3-11: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_0=7\text{cm}$, $JRC_0=5$.



Σχήμα 3-14: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=7\text{cm}$, $JRC_0=5$.

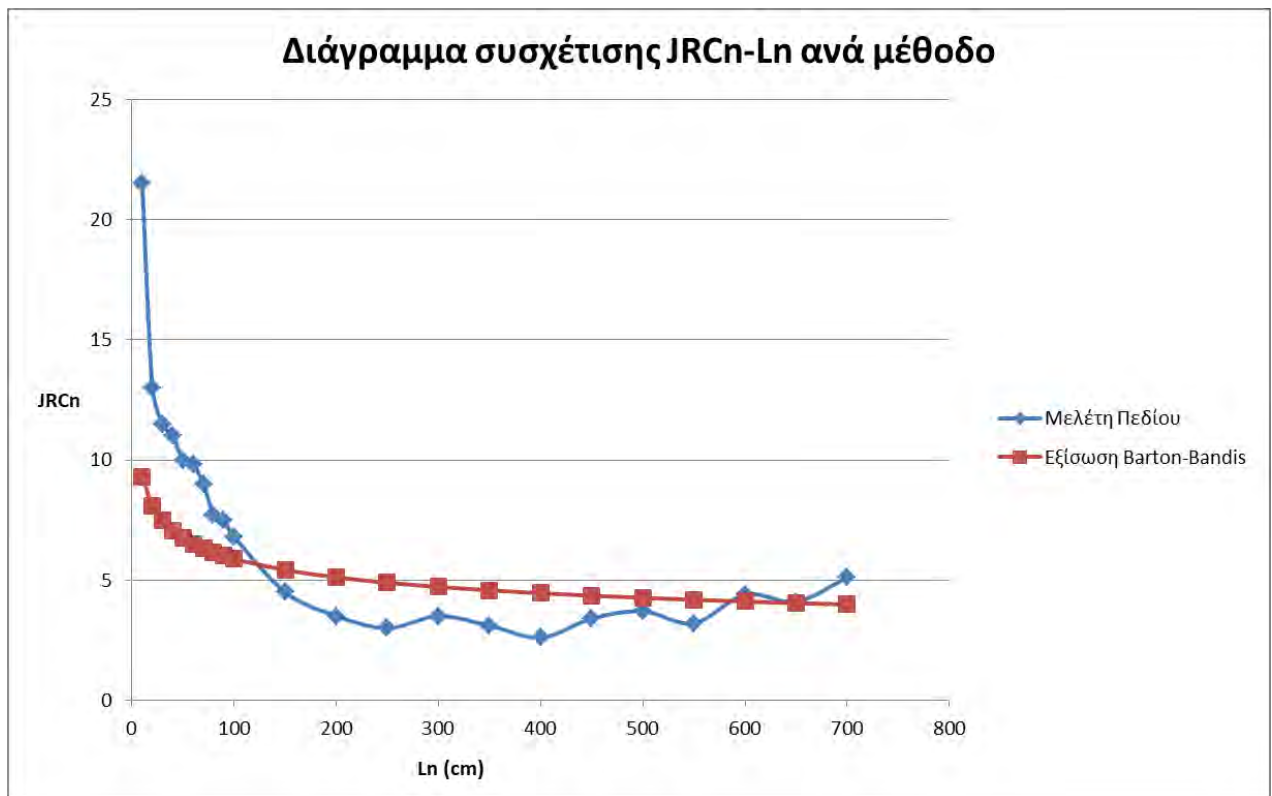
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο διαγραμμάτων είναι αρκετά μεγάλες για μήκη ασυνέχειας έως 100cm ενώ από 150cm και πάνω οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές με τις τιμές σε κάποια μήκη ασυνέχειας να ταυτίζονται. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MTΣ=26,6$. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει μεν μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας, αλλά όχι σε έντονο βαθμό.

- 10)** Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_0=7\text{cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_0=10$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.12 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , β) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, γ) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και δ) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές ι) από την μελέτη

πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.15).

	Lo (cm)	7																							
	JRCo	10																							
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700		
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1		
a	JRC'n	9,3	8,1	7,5	7,1	6,7	6,5	6,3	6,1	6,0	5,9	5,4	5,1	4,9	4,7	4,6	4,5	4,3	4,3	4,2	4,1	4,0	4,0		
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	148,56	23,95	16,20	15,55	10,57	10,84	7,24	2,42	2,25	0,86	0,84	2,61	3,58	1,48	2,17	3,43	0,90	0,31	0,96	0,09	0,00	1,25		
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	11,6																							

Πίνακας 3-12: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών L_o=7cm, JRC_o=10.



Σχήμα 3-15: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών L_o=7cm, JRC_o=10.

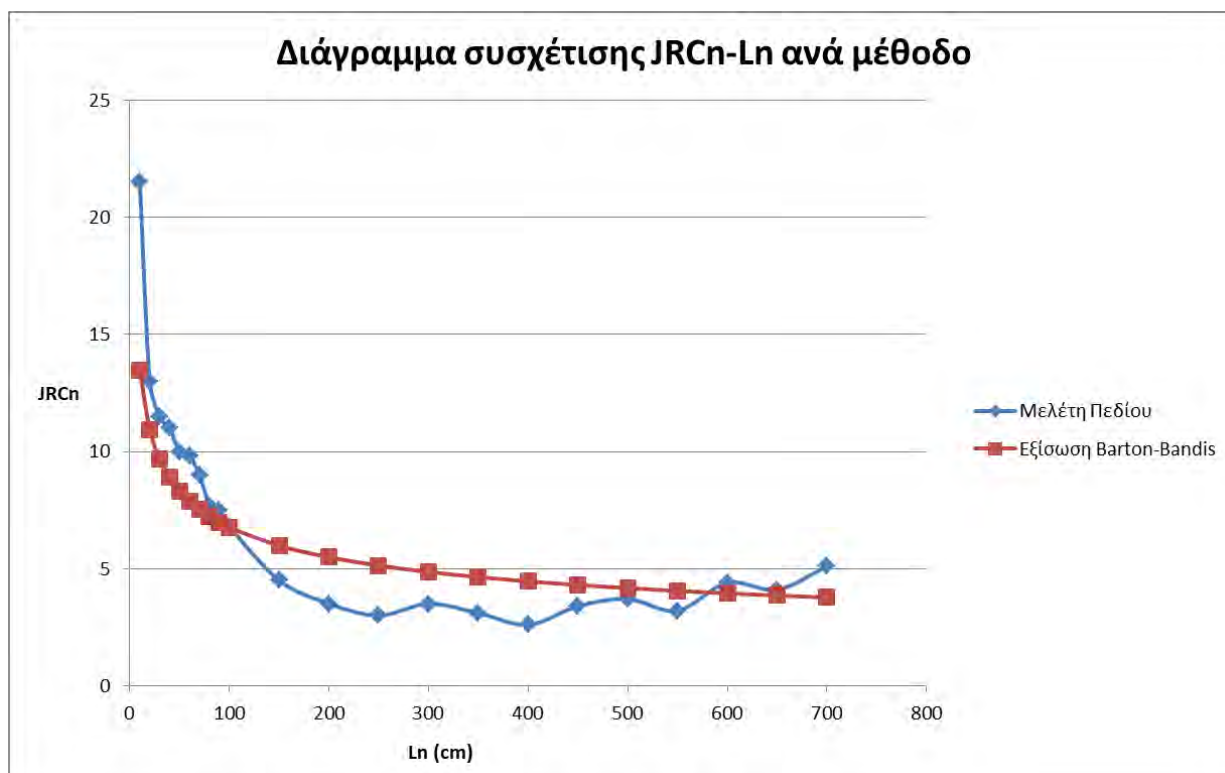
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο διαγραμμάτων είναι αρκετά μεγάλες για μήκη ασυνέχειας έως 100cm ενώ από 150cm και πάνω οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές με τις τιμές σε κάποια μήκη ασυνέχειας να ταυτίζονται. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με ΜΤΣ=11,6. Επίσης το

διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει μεν την μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας αλλά όχι σε έντονο βαθμό.

11) Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_o=7\text{cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_o=15$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.13 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , b) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, c) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και d) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.16).

	Lo (cm)	7																							
	JRC_o	15																							
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700		
	JRC_n	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1		
a	JRC'_n	13,5	10,9	9,7	8,9	8,3	7,9	7,5	7,2	7,0	6,8	6,0	5,5	5,1	4,9	4,6	4,5	4,3	4,2	4,1	3,9	3,9	3,8		
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	64,35	4,21	3,26	4,44	2,83	3,71	2,20	0,23	0,28	0,00	2,19	3,95	4,54	1,84	2,37	3,45	0,81	0,22	0,72	0,21	0,06	1,77		
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	4,9																							

Πίνακας 3-13: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=7\text{cm}$, $JRC_o=15$.



Σχήμα 3-16: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_o=7\text{cm}$, $JRC_o=15$.

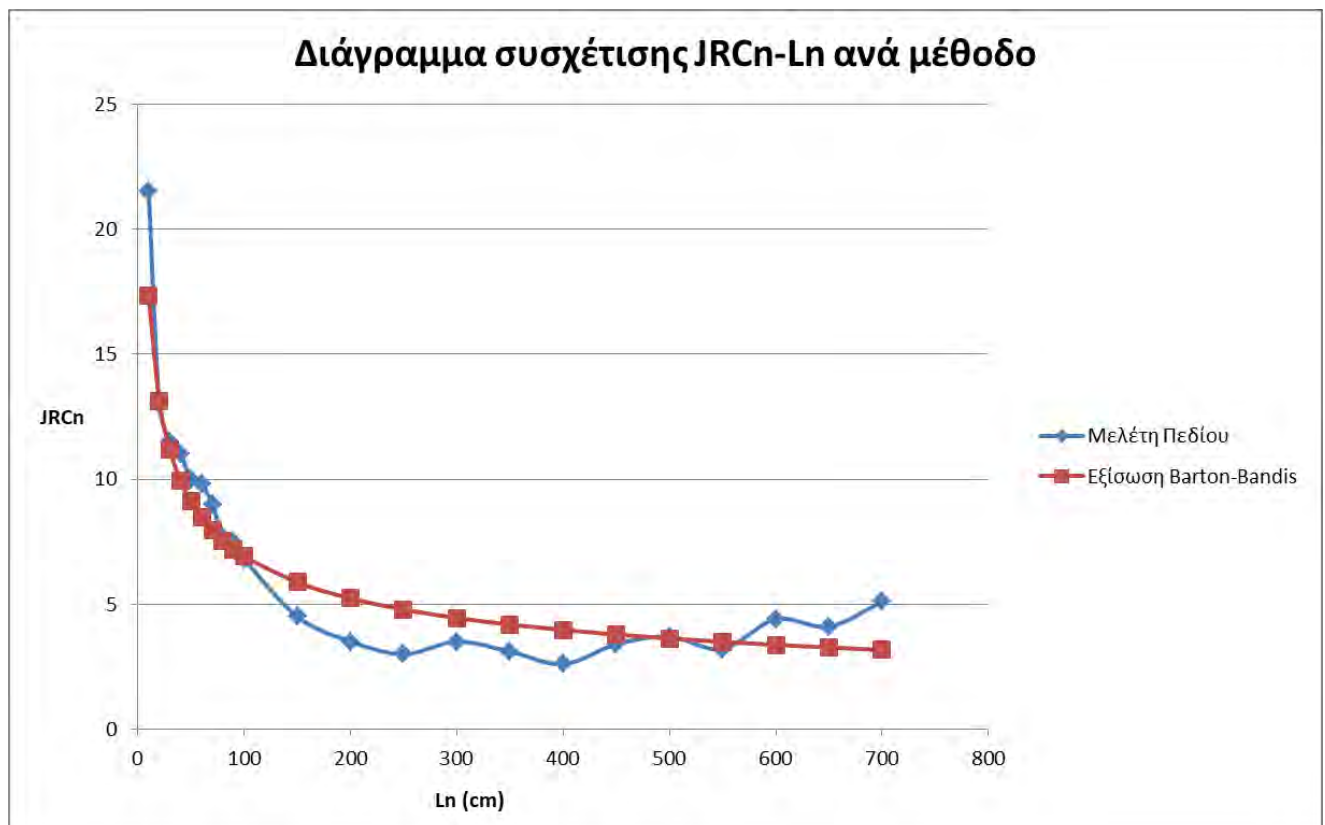
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο διαγραμμάτων δεν είναι αρκετά μεγάλες για όλα τα μήκη των ασυνεχειών. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MTΣ=4,9$. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει εμφανή μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται εκθετικά με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας. Επιπλέον για μήκη ασυνέχειας έως 100cm παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών του δείκτη τραχύτητας των δύο διαγραμμάτων, ενώ μετά τα 150cm παρατηρείται μικρή απόκλιση στις τιμές.

- 12)** Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_o=7\text{cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_o=20$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.14 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , b) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, c) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και d) το διάγραμμα τιμών

δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.17).

	Lo (cm)	7																						
	JRCo	20																						
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1	
a	JRC'n	17,3	13,1	11,2	10,0	9,1	8,5	8,0	7,5	7,2	6,9	5,9	5,2	4,8	4,4	4,2	4,0	3,8	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	17,30	0,02	0,11	1,08	0,79	1,77	1,08	0,02	0,09	0,01	1,88	3,00	3,19	0,90	1,17	1,86	0,15	0,01	0,08	1,06	0,70	3,73	
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	1,8																						

Πίνακας 3-14: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_0=7\text{cm}$, $JRC_0=20$.



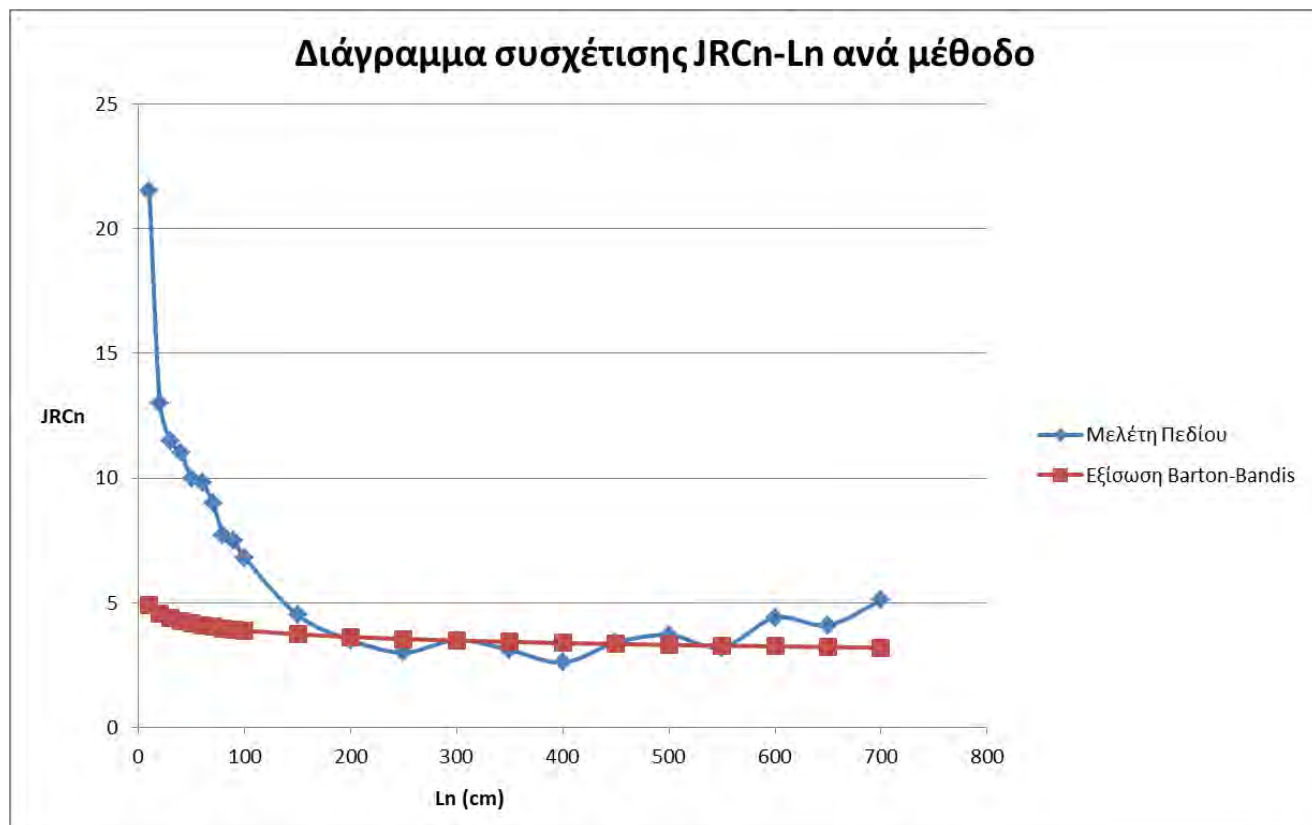
Σχήμα 3-17: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=7\text{cm}$, $JRC_0=20$.

Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι τιμές JRC_n μεταξύ των δύο διαγραμμάτων είναι αρκετά κοντά για όλα τα μήκη των ασυνεχειών. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MTΣ=1.8$. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει έντονη μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται εκθετικά με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας. Επιπλέον για μήκη ασυνέχειας έως 100cm παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών του δείκτη τραχύτητας των δύο διαγραμμάτων ενώ μετά τα 150cm παρατηρείται σύγκλιση των τιμών.

13) Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_o=8cm$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_o=5$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.15 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , b) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, c) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και d) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.18).

	Lo (cm)	8																					
	JRCo	5																					
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1
a	JRC'n	4,9	4,6	4,4	4,3	4,2	4,1	4,0	4,0	3,9	3,9	3,7	3,6	3,5	3,5	3,4	3,4	3,3	3,3	3,3	3,2	3,2	3,2
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	275,90	71,20	50,68	45,47	34,07	32,63	24,75	13,90	12,78	8,50	0,59	0,02	0,30	0,00	0,11	0,61	0,00	0,15	0,01	1,33	0,77	3,62
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	26.2																					

Πίνακας 3-15: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=8cm$, $JRC_o=5$.



Σχήμα 3-18: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=8\text{cm}$, $JRC_0=5$.

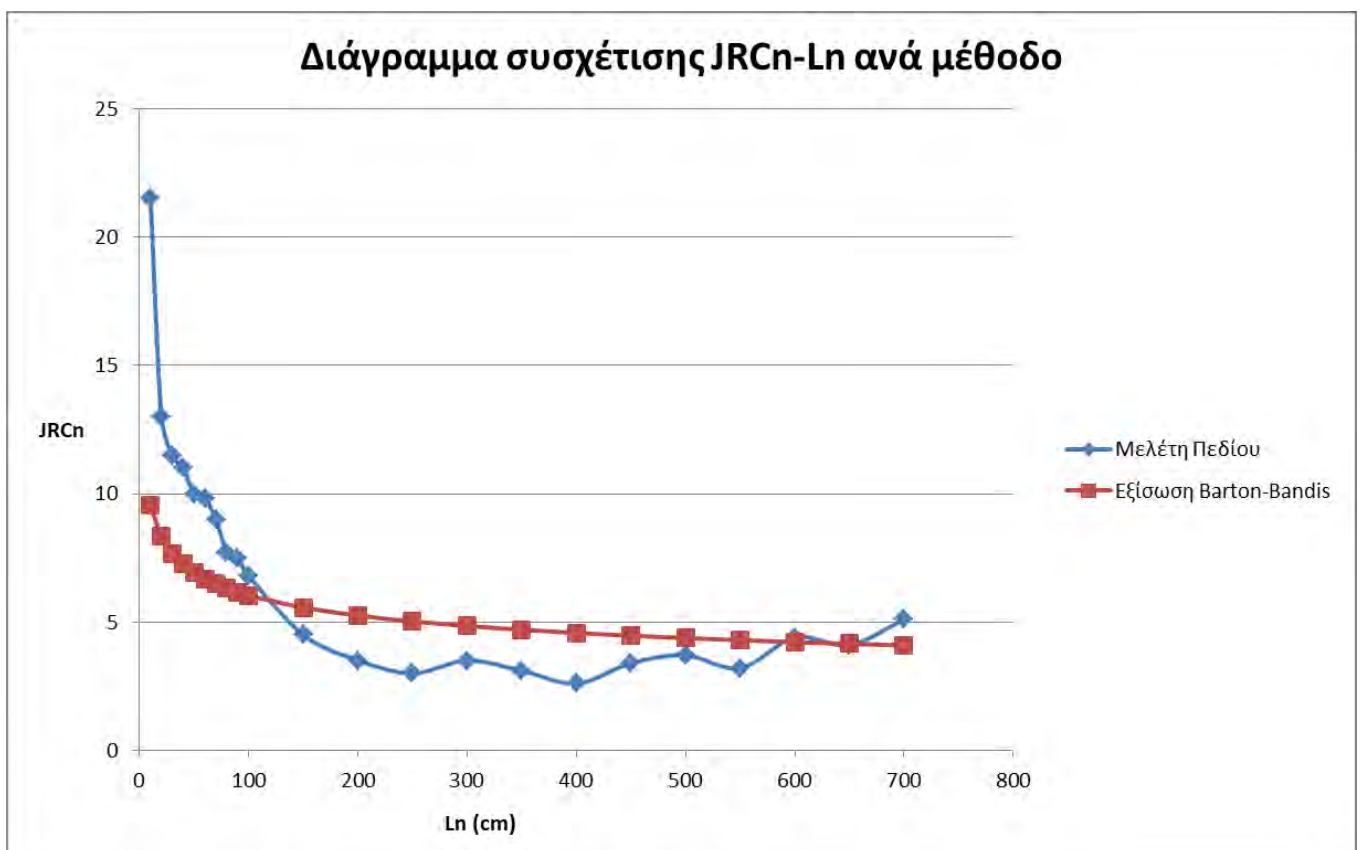
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο διαγραμμάτων είναι αρκετά μεγάλες για μήκη ασυνέχειας έως 100cm ενώ από 150cm και πάνω οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές με τις τιμές σε κάποια μήκη ασυνέχειας να ταυτίζονται. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MTΣ=26,2$. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει μεν μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας, αλλά όχι σε έντονο βαθμό.

- 14)** Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_0=8\text{cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_0=10$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.16 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , β) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, γ) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και δ) το διάγραμμα τιμών

δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.19).

	Lo (cm)	8																						
	JRCo	10																						
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1	
a	JRC'n	9,6	8,3	7,7	7,2	6,9	6,7	6,5	6,3	6,2	6,0	5,6	5,3	5,0	4,8	4,7	4,6	4,5	4,4	4,3	4,2	4,1	4,1	
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	142,48	21,85	14,62	14,08	9,42	9,71	6,35	1,93	1,79	0,59	1,13	3,07	4,10	1,81	2,55	3,89	1,14	0,45	1,19	0,03	0,00	1,02	
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	11,1																						

Πίνακας 3-16: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_0=8\text{cm}$, $JRC_0=10$.



Σχήμα 3-19: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=8\text{cm}$, $JRC_0=10$.

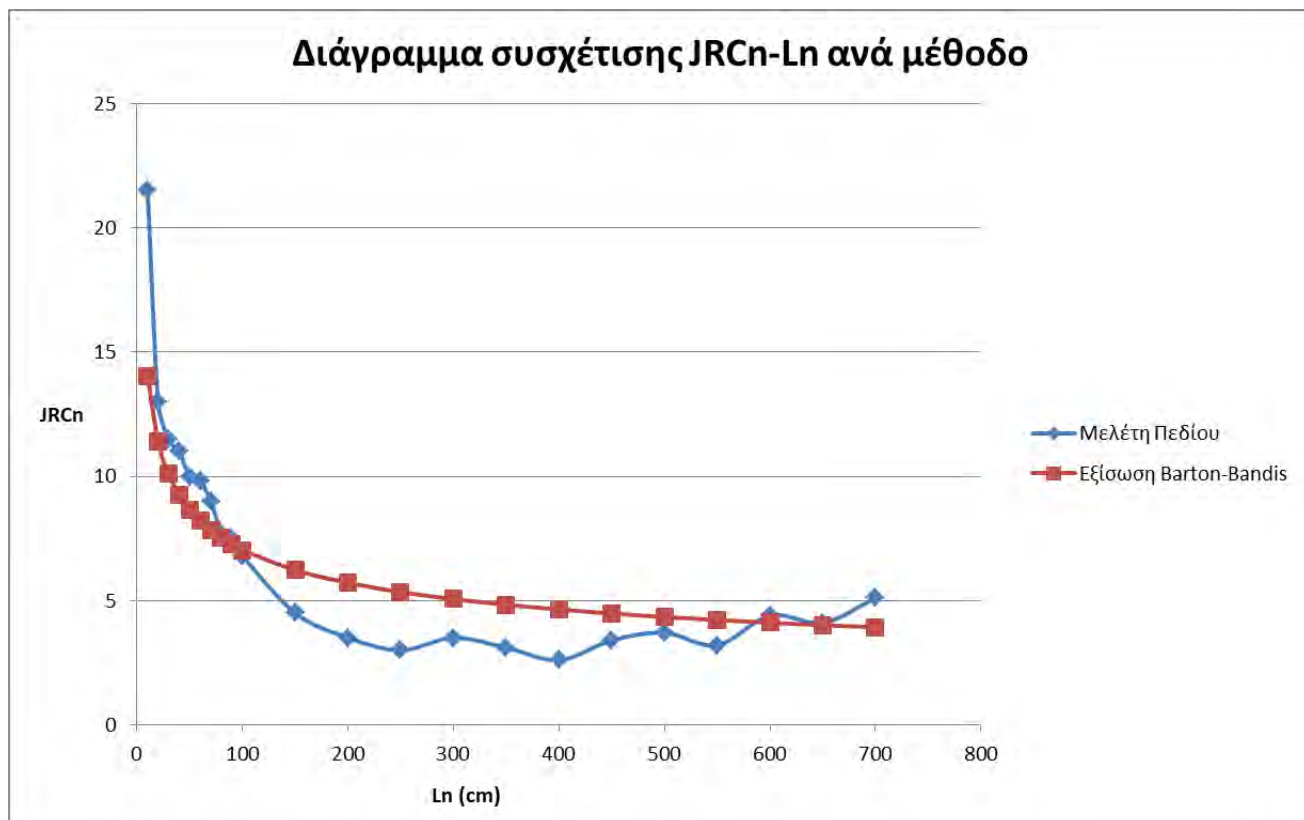
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο διαγραμμάτων είναι αρκετά μεγάλες για μήκη ασυνέχειας έως 100cm ενώ από 150cm και πάνω οι αποκλίσεις είναι μικρότερες με τις τιμές σε κάποια μήκη ασυνέχειας να

ταυτίζονται. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MT\bar{\Sigma}=11,1$. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας αλλά όχι σε έντονο βαθμό.

15) Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_o=8\text{cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_o=15$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.17 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , b) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, c) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και d) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.20).

	Lo (cm)	8																							
	JRCo	15																							
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700		
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1		
a	JRC'n	14,0	11,4	10,1	9,3	8,7	8,2	7,8	7,5	7,3	7,0	6,2	5,7	5,3	5,1	4,8	4,6	4,5	4,3	4,2	4,1	4,0	3,9		
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	55,82	2,58	1,99	3,04	1,81	2,57	1,38	0,03	0,06	0,05	2,98	4,89	5,48	2,42	2,99	4,16	1,16	0,41	1,03	0,09	0,01	1,39		
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	4,4																							

Πίνακας 3-17: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=8\text{cm}$, $JRC_o=15$.



Σχήμα 3-20: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=8\text{cm}$, $JRC_0=15$.

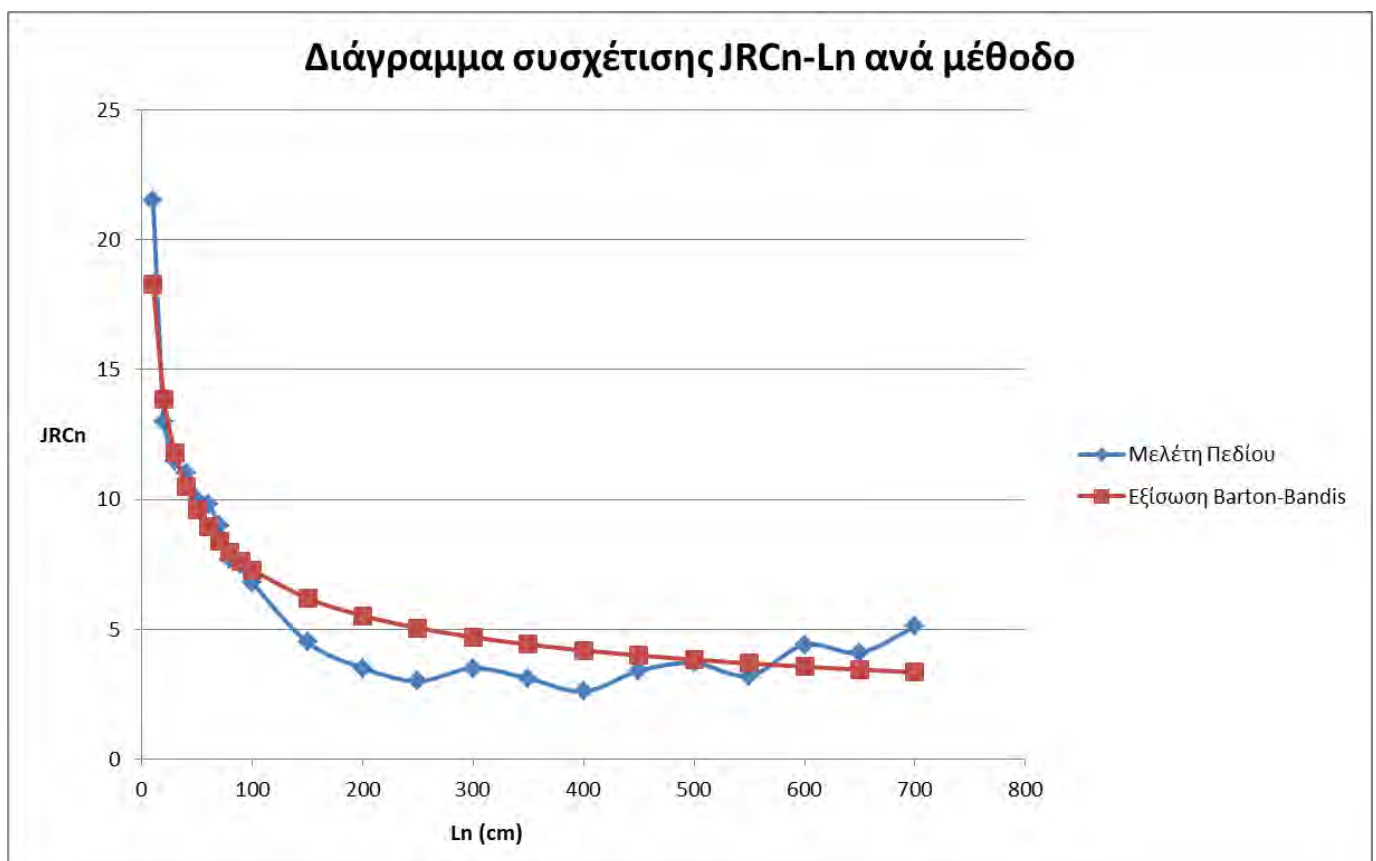
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο διαγραμμάτων δεν είναι αρκετά μεγάλες για όλα τα μήκη των ασυνεχειών. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MT\bar{\Sigma}=4,4$. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει εμφανή μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται εκθετικά με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας. Επιπλέον για μήκη ασυνέχειας έως 100cm παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών του δείκτη τραχύτητας των δύο διαγραμμάτων, ενώ μετά τα 150cm παρατηρείται σύγκλιση των τιμών.

- 16)** Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_0=8\text{cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_0=20$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.18 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , β) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων,

c) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και d) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.21).

	Lo (cm)	8																					
	JRCo	20																					
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1
a	JRC'n	18,3	13,9	11,8	10,5	9,6	8,9	8,4	8,0	7,6	7,3	6,2	5,5	5,0	4,7	4,4	4,2	4,0	3,8	3,7	3,6	3,4	3,3
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	10,29	0,74	0,08	0,24	0,15	0,75	0,36	0,07	0,01	0,23	2,86	4,08	4,19	1,42	1,72	2,50	0,35	0,02	0,23	0,71	0,43	3,08
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	1,6																					

Πίνακας 3-18: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_0=8\text{cm}$, $JRC_0=20$.



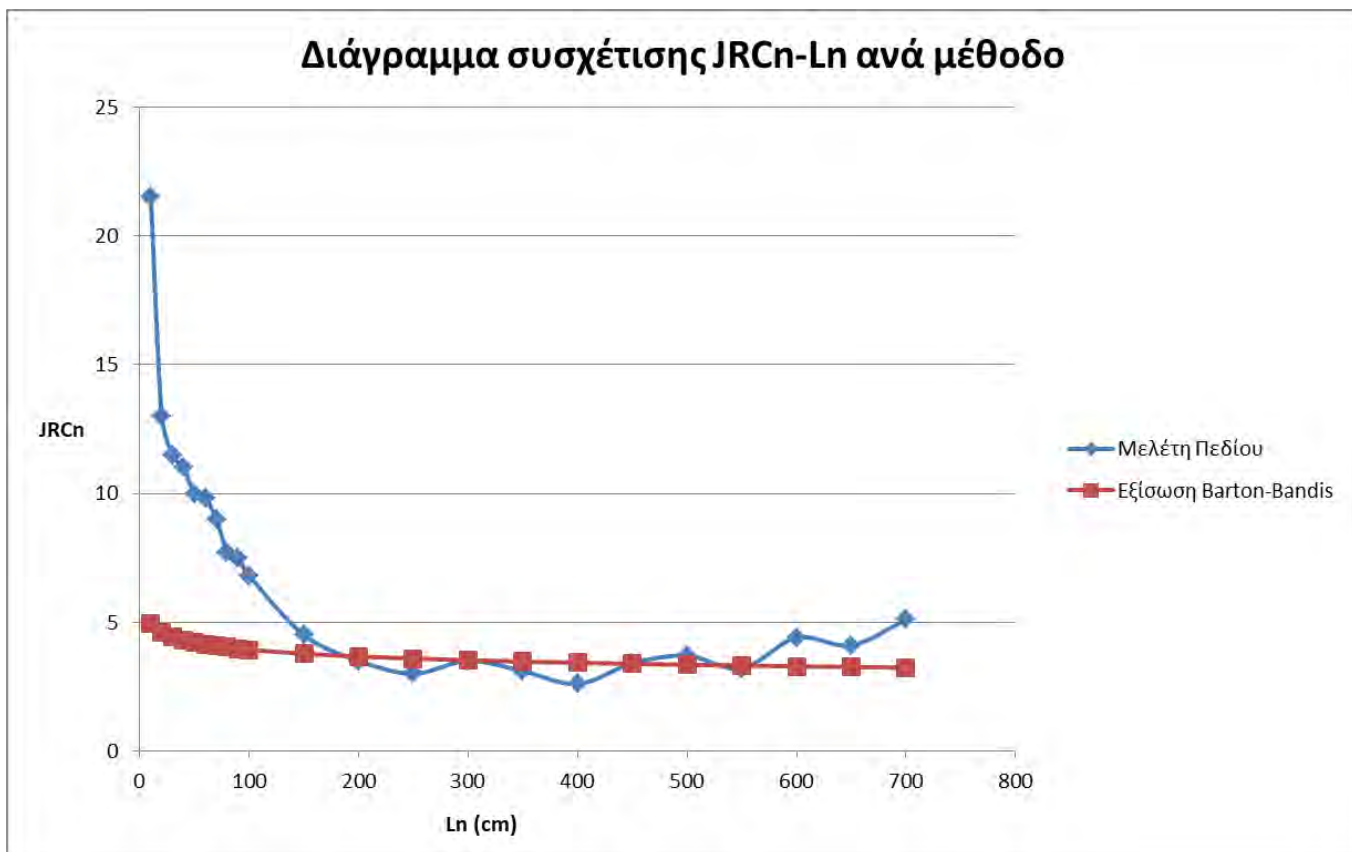
Σχήμα 3-21: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=8\text{cm}$, $JRC_0=20$.

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι οι τιμές JRC_n μεταξύ των δύο διαγραμμάτων είναι αρκετά κοντά για όλα τα μήκη των ασυνεχειών. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MTΣ=1,6$. Το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει εμφανή μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται εκθετικά με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας. Επιπλέον για μήκη ασυνέχειας έως 100cm παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών του δείκτη τραχύτητας των δύο διαγραμμάτων ενώ για μήκη ασυνέχειας μεγαλύτερα των 150cm παρατηρείται σχετική σύγκλιση των τιμών.

17) Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_0=9cm$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_0=5$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.19 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , b) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, c) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και d) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.22).

	L_0 (cm)	9																							
	JRC_0	5																							
	L_n (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700		
	JRC_n	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1		
a	JRC'_n	4,9	4,6	4,4	4,3	4,2	4,1	4,1	4,0	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,5	3,4	3,4	3,3	3,3	3,3	3,3	3,2		
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	273,98	70,29	49,94	44,79	33,50	32,08	24,28	13,55	12,45	8,24	0,53	0,03	0,34	0,00	0,13	0,67	0,00	0,13	0,01	1,24	0,71	3,48		
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	25,9																							

Πίνακας 3-19: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_0=9cm$, $JRC_0=5$.



Σχήμα 3-22: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=9\text{cm}$, $JRC_0=5$.

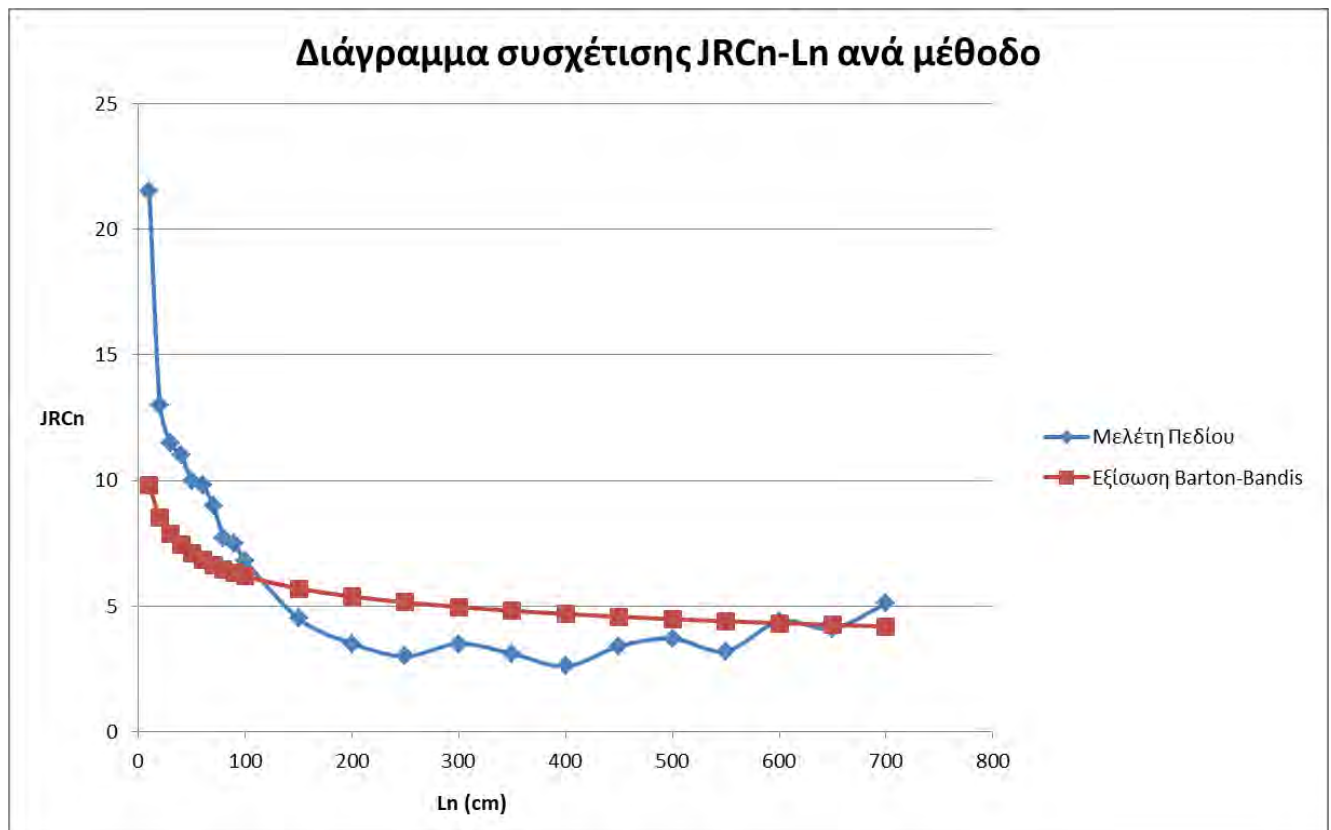
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο διαγραμμάτων είναι αρκετά μεγάλες για μήκη ασυνέχειας έως 100cm ενώ από 150cm και πάνω οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές με τις τιμές σε κάποια μήκη ασυνέχειας να ταυτίζονται. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MT\bar{\Sigma}=25,9$. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει μεν μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας, αλλά όχι σε έντονο βαθμό.

- 18)** Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_0=9\text{ cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_0=10$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.20 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , β) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, γ) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και δ) το διάγραμμα τιμών

δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.23).

	Lo (cm)	9																						
	JRCo	10																						
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1	
a	JRC'n	9,8	8,5	7,9	7,4	7,1	6,8	6,6	6,5	6,3	6,2	5,7	5,4	5,1	5,0	4,8	4,7	4,6	4,5	4,4	4,3	4,2	4,2	
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	137,09	20,03	13,25	12,81	8,43	8,75	5,59	1,54	1,42	0,39	1,43	3,53	4,59	2,13	2,92	4,33	1,38	0,60	1,42	0,01	0,02	0,83	
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	10,6																						

Πίνακας 3-20: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_0=9\text{cm}$, $JRC_0=10$.



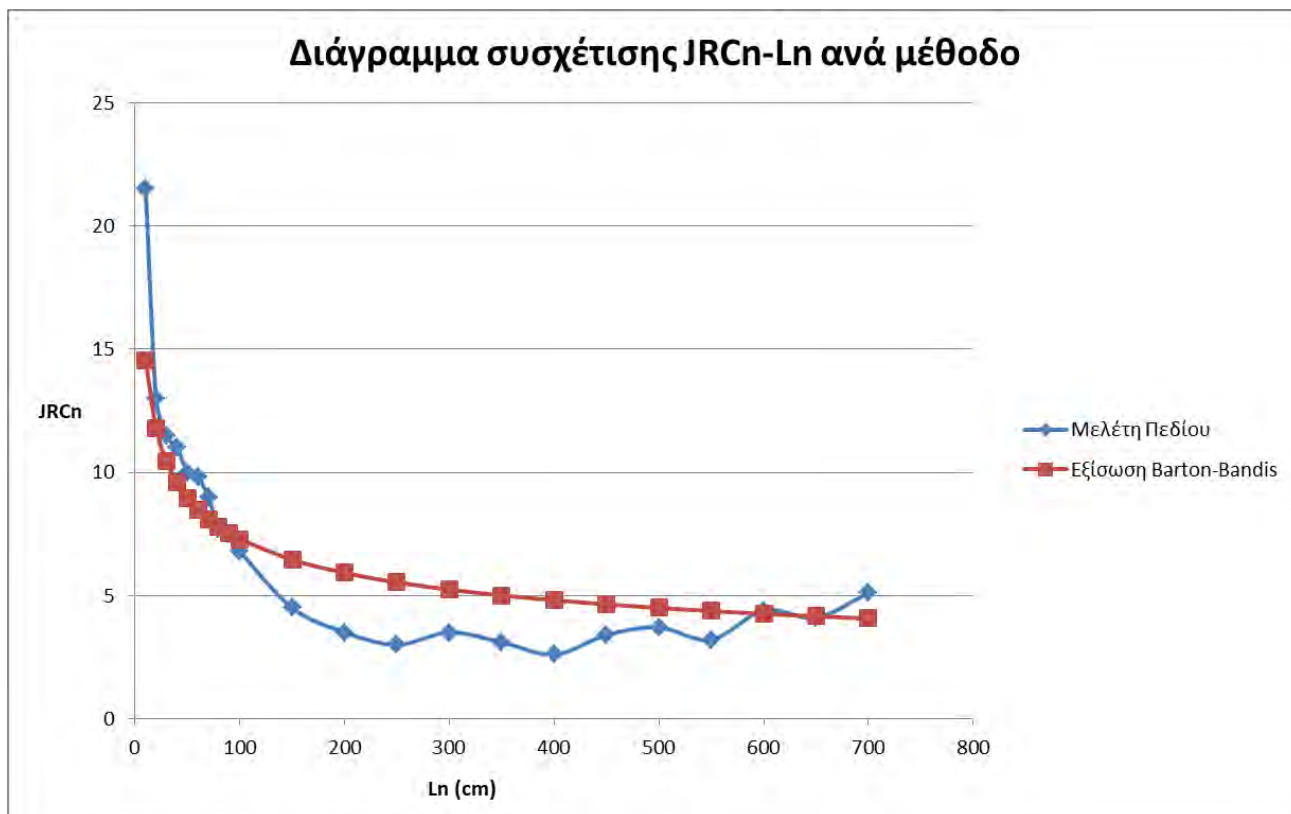
Σχήμα 3-23: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=9\text{cm}$, $JRC_0=10$.

Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο διαγραμμάτων είναι αρκετά μεγάλες για μήκη ασυνέχειας έως 100cm ενώ από 150cm και πάνω οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές με τις τιμές σε κάποια μήκη ασυνέχειας να ταυτίζονται. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MTS=10,6$. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει μεν την μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας αλλά όχι σε έντονο βαθμό.

19) Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_o=9$ cm και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_o=15$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.21 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , b) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, c) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και d) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.24).

	Lo (cm)	9																					
	JRCo	15																					
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1
a	JRC'n	14,5	11,8	10,5	9,6	9,0	8,5	8,1	7,8	7,5	7,3	6,4	5,9	5,5	5,2	5,0	4,8	4,6	4,5	4,4	4,3	4,2	4,1
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	48,54	1,43	1,10	1,99	1,07	1,72	0,80	0,01	0,00	0,23	3,80	5,84	6,42	3,02	3,62	4,86	1,53	0,63	1,36	0,02	0,00	1,08
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	4.0																					

Πίνακας 3-21: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=9$ cm, $JRC_o=15$.



Σχήμα 3-24: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=9\text{cm}$, $JRC_0=15$.

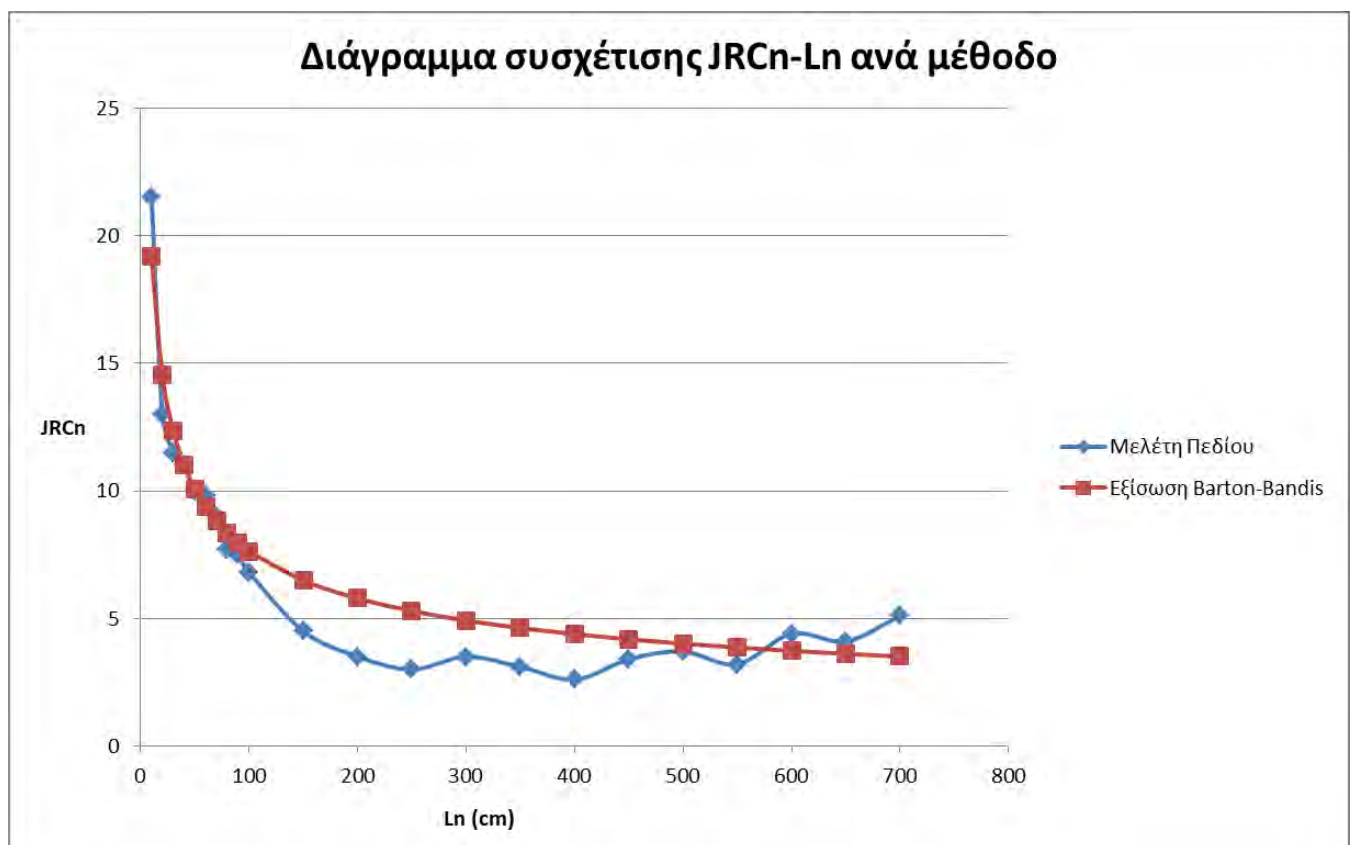
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο διαγραμμάτων δεν είναι αρκετά μεγάλες για όλα τα μήκη των ασυνεχειών. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MT\bar{\Sigma}=4,0$. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει ευκρινή μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται εκθετικά με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας. Επιπλέον για τα μήκη ασυνέχειας έως 250cm παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών του δείκτη τραχύτητας, ενώ μετά τα 250cm παρατηρείται σύγκλιση των τιμών.

20) Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_0=9\text{ cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_0=20$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.22 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , β) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, γ) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και δ) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές ι) από την μελέτη

πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.25).

	Lo (cm)	9																						
	JRCo	20																						
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1	
a	JRC'n	19,2	14,5	12,4	11,0	10,1	9,4	8,8	8,3	8,0	7,6	6,5	5,8	5,3	4,9	4,6	4,4	4,2	4,0	3,9	3,7	3,6	3,5	
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	5,41	2,35	0,73	0,00	0,01	0,19	0,04	0,42	0,21	0,69	3,96	5,22	5,25	2,01	2,33	3,18	0,61	0,10	0,44	0,45	0,24	2,54	
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	1,7																						

Πίνακας 3-22: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_0=9\text{cm}$, $JRC_0=20$.



Σχήμα 3-25: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=9\text{cm}$, $JRC_0=20$.

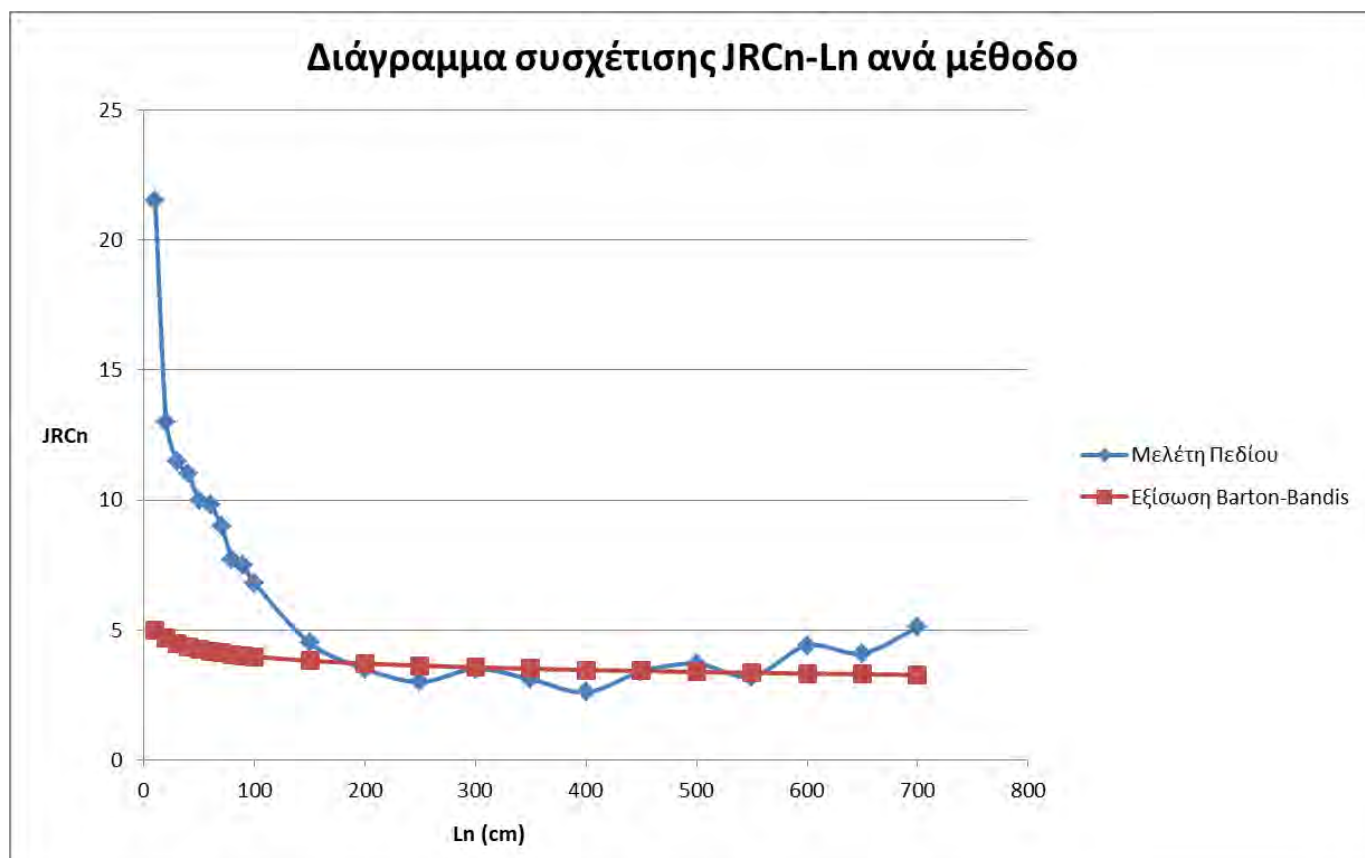
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι τιμές JRC_n μεταξύ των δύο διαγραμμάτων είναι αρκετά κοντά για όλα τα μήκη των ασυνεχειών. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα

υπολογίστηκε ίσο με $MT\sigma=1,7$. Το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει έντονη μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται εκθετικά με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας. Επιπλέον μέχρι τα μήκη ασυνέχειας 100cm παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών του δείκτη τραχύτητας των δύο διαγραμμάτων ενώ μετά τα 300cm παρατηρείται μία σταθεροποίηση στις τιμές.

21) Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_0=10\text{cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_0=5$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.23 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , b) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, c) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και d) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.26).

	Lo (cm)	10																							
	JRCo	5																							
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700		
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1		
a	JRC'n	5,0	4,7	4,5	4,4	4,3	4,2	4,1	4,1	4,0	4,0	3,8	3,7	3,6	3,6	3,5	3,5	3,4	3,4	3,3	3,3	3,3	3,3		
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	272,25	69,47	49,28	44,19	32,99	31,59	23,85	13,24	12,15	8,00	0,47	0,04	0,39	0,00	0,16	0,74	0,00	0,10	0,02	1,17	0,65	3,35		
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	25,6																							

Πίνακας 3-23: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_0=10\text{cm}$, $JRC_0=5$.



Σχήμα 3-26: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=10\text{cm}$, $JRC_0=5$.

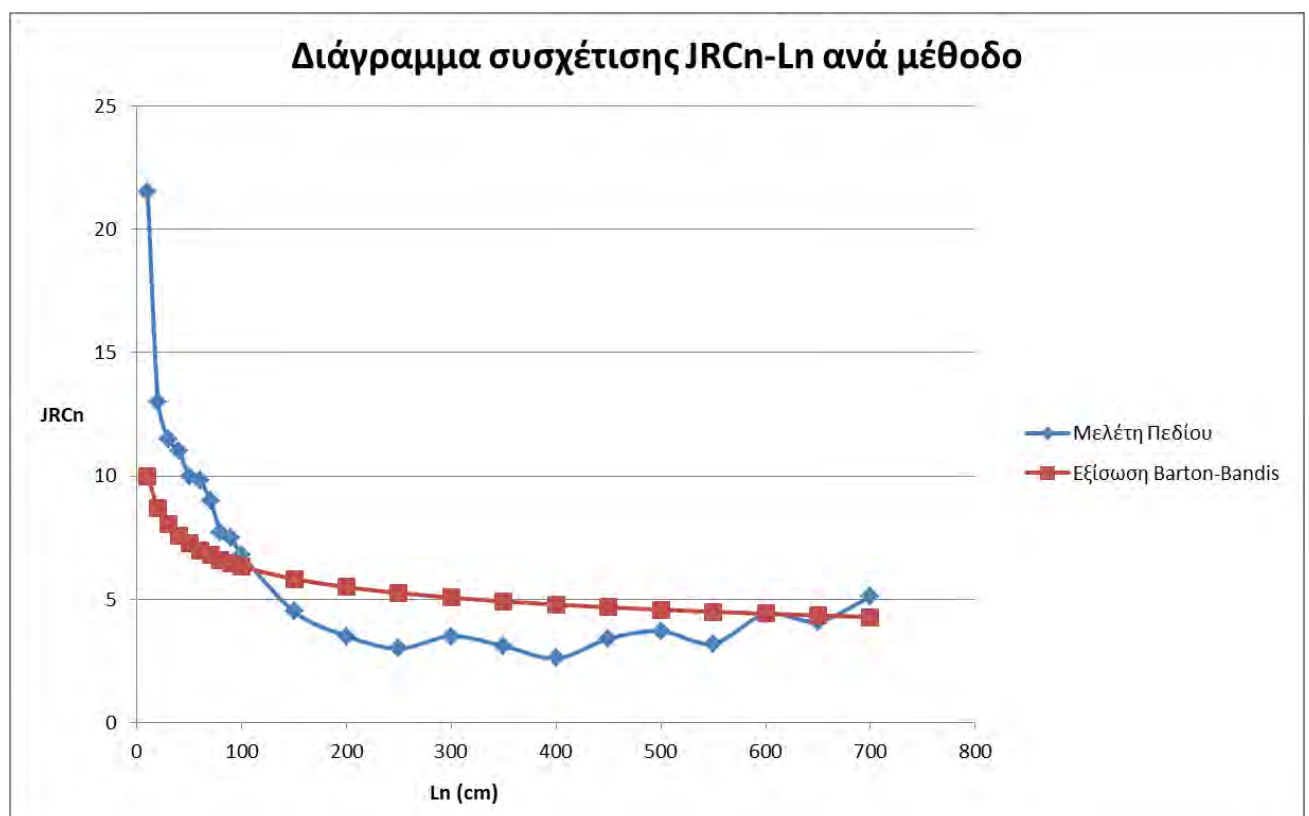
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο διαγραμμάτων είναι αρκετά μεγάλες για μήκη ασυνέχειας έως 100cm ενώ από 150cm και πάνω οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές. Για τιμές μήκους ασυνέχειας μεγαλύτερες από 200 cm οι τιμές των δύο διαγραμμάτων ταυτίζονται. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MTΣ=25,6$. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει μεν μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας, αλλά όχι σε έντονο βαθμό. Για μήκος ασυνέχειας μεγαλύτερο από 150cm οι τιμές του δείκτη τραχύτητας παίρνουν την ίδια περίπου τιμή ($JRC=4$).

22) Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_0=10\text{ cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_0=10$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.24

για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , β) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, γ) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και δ) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.27).

	Lo (cm)	10																						
	JRCo	10																						
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1	
a	JRC'n	10,0	8,7	8,0	7,6	7,2	7,0	6,8	6,6	6,4	6,3	5,8	5,5	5,3	5,1	4,9	4,8	4,7	4,6	4,5	4,4	4,3	4,3	
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	132,25	18,44	12,06	11,71	7,57	7,91	4,95	1,22	1,12	0,24	1,74	3,97	5,08	2,45	3,28	4,76	1,61	0,76	1,66	0,00	0,06	0,68	
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	10,2																						

Πίνακας 3-24: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_o=10\text{cm}$, $JRC_o=10$.



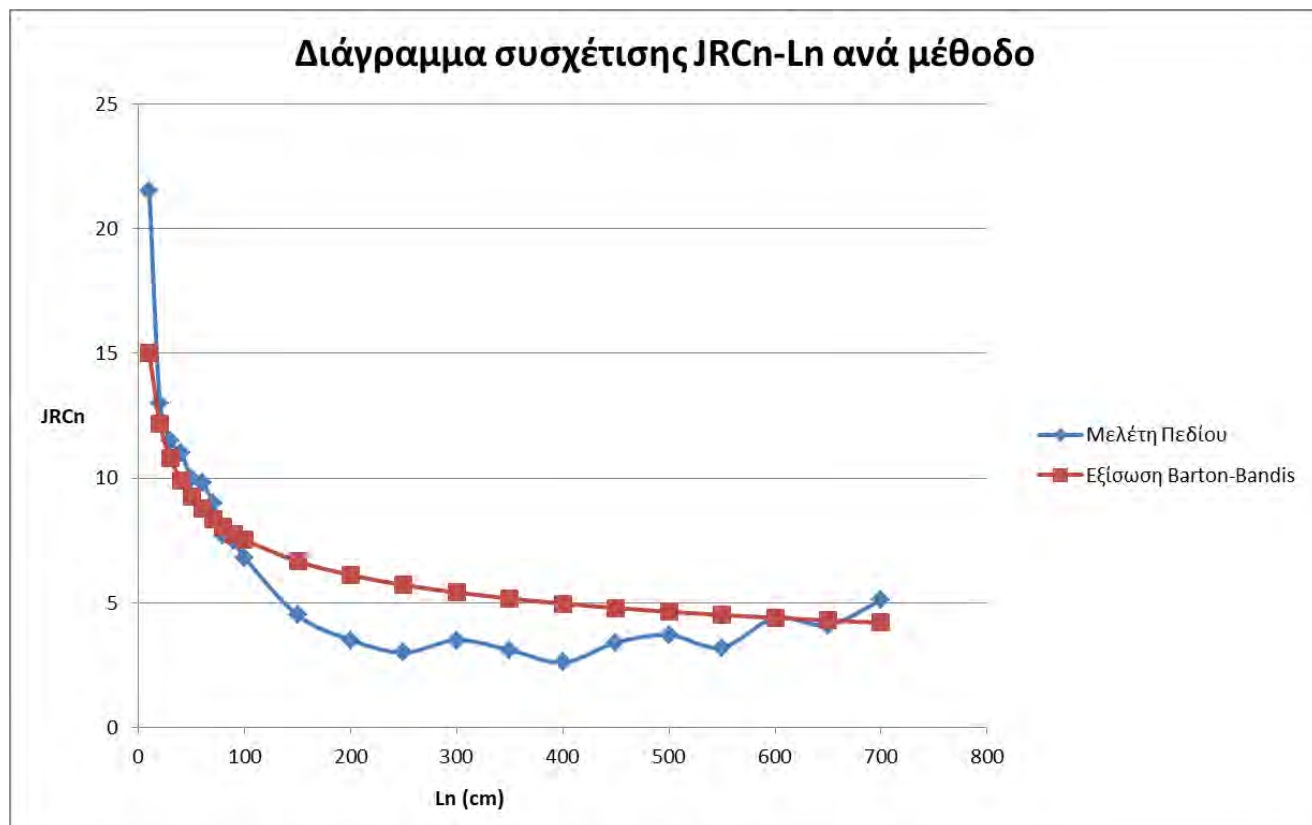
Σχήμα 3-27: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_o=10\text{cm}$, $JRC_o=10$.

Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο διαγραμμάτων είναι αρκετά μεγάλες για μήκη ασυνέχειας έως 100cm ενώ από 150cm και πάνω οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές με τις τιμές σε κάποια μήκη ασυνέχειας να ταυτίζονται. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MTΣ=10,2$. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει μεν την μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας αλλά όχι σε έντονο βαθμό.

23) Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_0=10$ cm και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_0=15$ και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.25 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω διορθωτικής σχέσης JRC'_n , β) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, γ) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και δ) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές ι) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.27).

	L_0 (cm)	10																							
	JRC_0	15																							
	L_n (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700		
	JRC_n	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1		
a	JRC'_n	15,0	12,2	10,8	9,9	9,3	8,8	8,4	8,0	7,8	7,5	6,7	6,1	5,7	5,4	5,2	5,0	4,8	4,6	4,5	4,4	4,3	4,2		
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	42,25	0,67	0,51	1,22	0,55	1,08	0,40	0,11	0,07	0,52	4,65	6,79	7,35	3,64	4,25	5,57	1,93	0,88	1,71	0,00	0,04	0,82		
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	3,9																							

Πίνακας 3-25: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_0=10$ cm, $JRC_0=15$.



Σχήμα 3-28: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=10\text{cm}$, $JRC_0=15$.

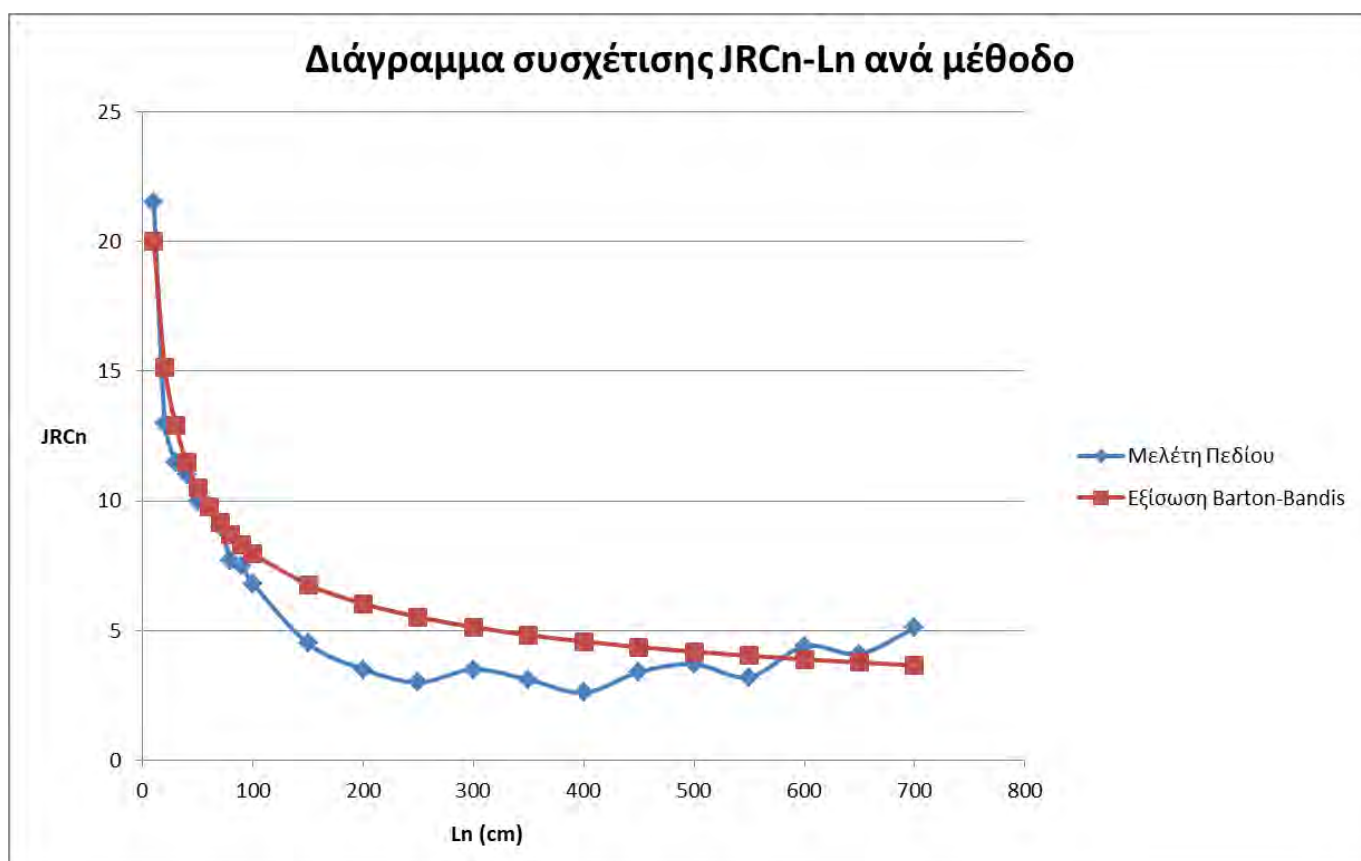
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές των τιμών JRC_n μεταξύ των δύο διαγραμμάτων δεν είναι αρκετά μεγάλες για όλα τα μήκη των ασυνεχειών. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MT\bar{\Sigma}=3,9$. Επίσης το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει πολύ έντονη μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται εκθετικά με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας. Επιπλέον για μήκη ασυνέχειας έως 100cm παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών του δείκτη τραχύτητας των δύο διαγραμμάτων, ενώ μετά τα 150cm παρατηρείται μία σχετική σταθεροποίηση στις τιμές.

24) Για υπόθεση μήκους ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου $L_0=10\text{ cm}$ και δείκτη τραχύτητας εργαστηρίου $JRC_0=20$ (ασυνέχειες με την μέγιστη τραχύτητα) και γνωρίζοντας από την μελέτη πεδίου τον δείκτη τραχύτητας JRC_n και το μήκος της ασυνέχειας L_n , προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3.26 για α) δείκτη τραχύτητας μέσω

διορθωτικής σχέσης JRC'_n , b) Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων, c) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων καθώς και d) το διάγραμμα τιμών δείκτη τραχύτητας JRC_n - μήκους ασυνέχειας L_n που λαμβάνει τιμές i) από την μελέτη πεδίου της βιβλιογραφίας καθώς και ii) από την Εξίσωση 2.3.1 των Barton-Bandis για την διόρθωση των φαινομένων κλίμακας (βλ. Σχήμα 3.29).

	Lo (cm)	10																										
	JRCo	20																										
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700					
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1					
a	JRC'n	20,0	15,2	12,9	11,5	10,5	9,8	9,2	8,7	8,3	8,0	6,8	6,0	5,5	5,1	4,8	4,6	4,4	4,2	4,0	3,9	3,8	3,7					
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	2,25	4,65	1,93	0,24	0,26	0,00	0,03	1,01	0,65	1,35	5,15	6,42	6,34	2,66	2,97	3,89	0,93	0,23	0,68	0,26	0,11	2,09					
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	2,0																										

Πίνακας 3-26: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_0=10\text{cm}$, $JRC_0=20$.



Σχήμα 3-29: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=10\text{cm}$, $JRC_0=20$.

Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι τιμές JRC_n μεταξύ των δύο διαγραμμάτων είναι αρκετά κοντά για όλα τα μήκη των ασυνεχειών. Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα υπολογίστηκε ίσο με $MTΣ=2,0$. Το διάγραμμα της μεθόδου Barton-Bandis παρουσιάζει έντονη μειωτική επίδραση της κλίμακας καθώς οι τιμές του δείκτη τραχύτητας μειώνονται εκθετικά με την αύξηση του μήκους της ασυνέχειας. Επιπλέον μέχρι τα μήκη ασυνέχειας 100cm παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών του δείκτη τραχύτητας των δύο διαγραμμάτων ενώ μετά τα 250cm παρατηρείται μία σταθεροποίηση στις τιμές.

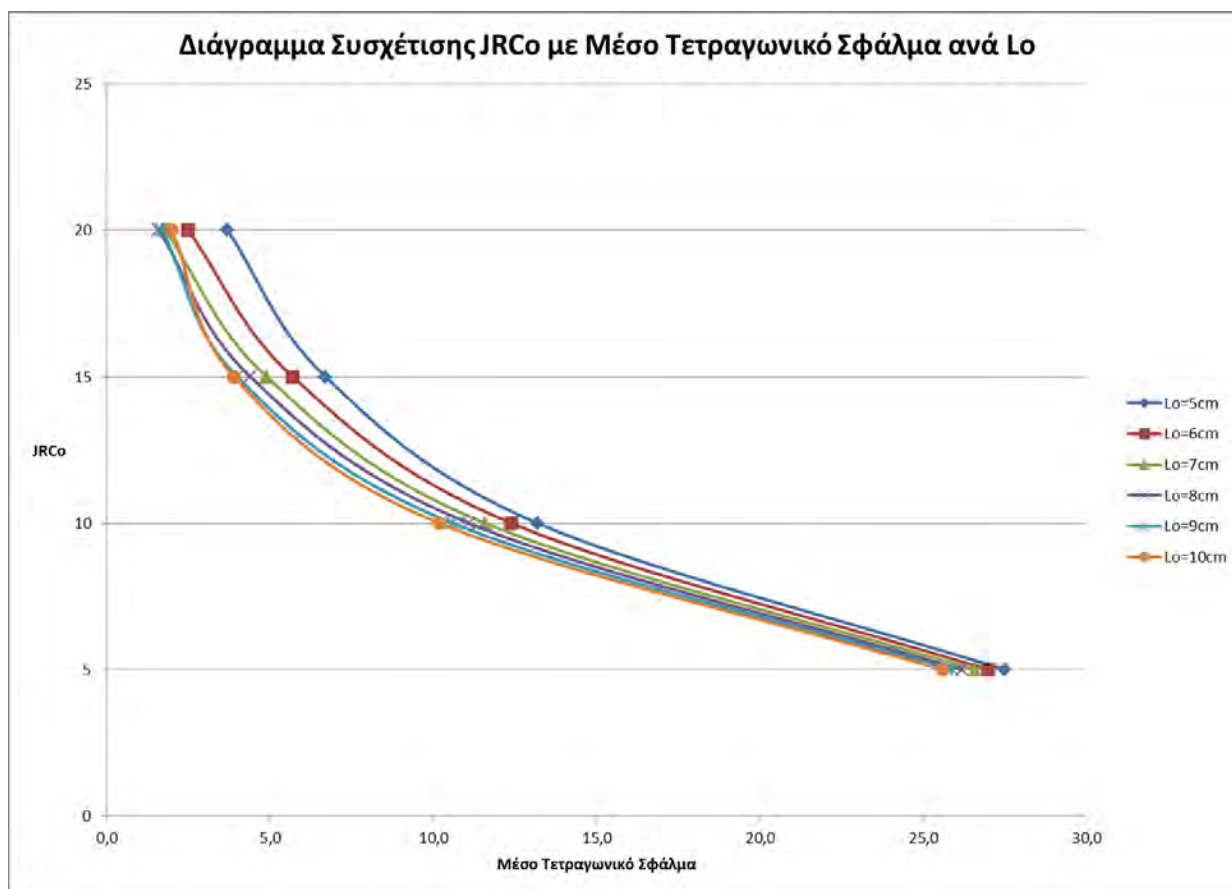
Οι τιμές των Μέσω Τετραγωνικών Σφαλμάτων για τα διάφορα ζεύγη τιμών JRC_o , L_o που έγινε υπόθεση, παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.27. Το ζεύγος τιμών που παρουσίασε το μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι **$L_o=8$ cm, $JRC_o=20$** .

L_o (cm)	5	5	5	5	6	6	6	6	7	7	7	7
JRC_o	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
Μέσο Τετρ. Σφάλμα	27,5	13,2	6,7	3,7	27,0	12,4	5,7	2,5	26,6	11,6	4,9	1,8

L_o (cm)	8	8	8	8	9	9	9	9	10	10	10	10
JRC_o	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
Μέσο Τετρ. Σφάλμα	26,2	11,1	4,4	1,6	25,9	10,6	4,0	1,7	25,6	10,2	3,9	2

Πίνακας 3-27: Συνοπτικός Πίνακας Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος ανά ζεύγος τιμών εργαστηρίου L_o , JRC_o .

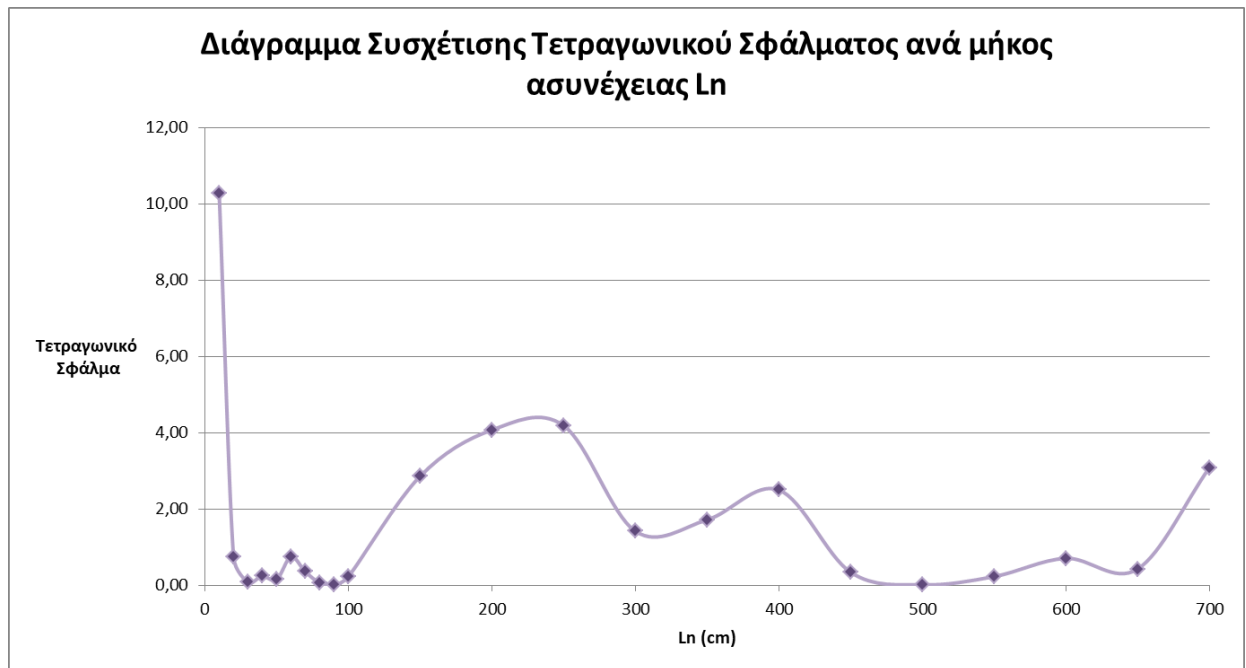
Από τις τιμές του Πίνακα 3.27 σχηματίστηκε το διάγραμμα στο Σχήμα 3.30 που αναπαριστά γραφικά τη συσχέτιση του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος των δύο μεθόδων με την τιμή υπόθεσης του δείκτη τραχύτητας JRC_o , ανά δείγματος εργαστηρίου με συγκεκριμένο μήκος ασυνέχειας L_o .



Σχήμα 3-30: Διάγραμμα συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_o με Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα των δύο μεθόδων ανά μήκος ασυνέχειας δείγματος εργαστηρίου L_o .

Από τον Πίνακα 3.27 καθώς και το Σχήμα 3.30 γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι για όλα τα μήκη ασυνεχειών που δοκιμάστηκαν ως δείγματα εργαστηρίου, τα μικρότερα σφάλματα παρουσιάστηκαν για υψηλότερες τιμές του δείκτη τραχύτητας, με την ιδανικότερη τιμή για το καθένα να είναι $JRC_o=20$. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές του ΜΤΣ για τις ασυνέχειες με L_o 7,8,9 cm ήταν 1,8-1,6-1,7 αντίστοιχα. Έτσι επιλέχθηκε για δείγμα εργαστηρίου το ζεύγος τιμών με το μικρότερο ΜΤΣ, δηλαδή αυτό για **$L_o=8$ cm, $JRC_o=20$** . Εφαρμόζοντας την διορθωτική σχέση 2.3.1 για την επίδραση της κλίμακας με αυτό το ζεύγος τιμών δείγματος εργαστηρίου, προκύπτει ο διορθωμένος δείκτης τραχύτητας JRC'_n για κάθε μήκος ασυνέχειας L_n στο πεδίο όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.21. Από τα Τετραγωνικά Σφάλματα που

προκύπτουν συγκρίνοντας τις τιμές του δείκτη τραχύτητας JRC'_n της Εξίσωσης Barton-Bandis με την τιμή του δείκτη τραχύτητας JRC_n της μελέτης πεδίου της βιβλιογραφίας σχηματίζεται το διάγραμμα του Σχήματος 3.31 που τα αναπαριστά ανά μήκος ασυνέχειας πεδίου L_n .



Σχήμα 3-31 Απόκλιση του διορθωμένου δείκτη τραχύτητας πεδίου της εξίσωσης Barton-Bandis (JRC'_n) με το δείκτη τραχύτητας μελέτης πεδίου (JRC_n) συναρτήσει του μήκους της ασυνέχειας L_n .

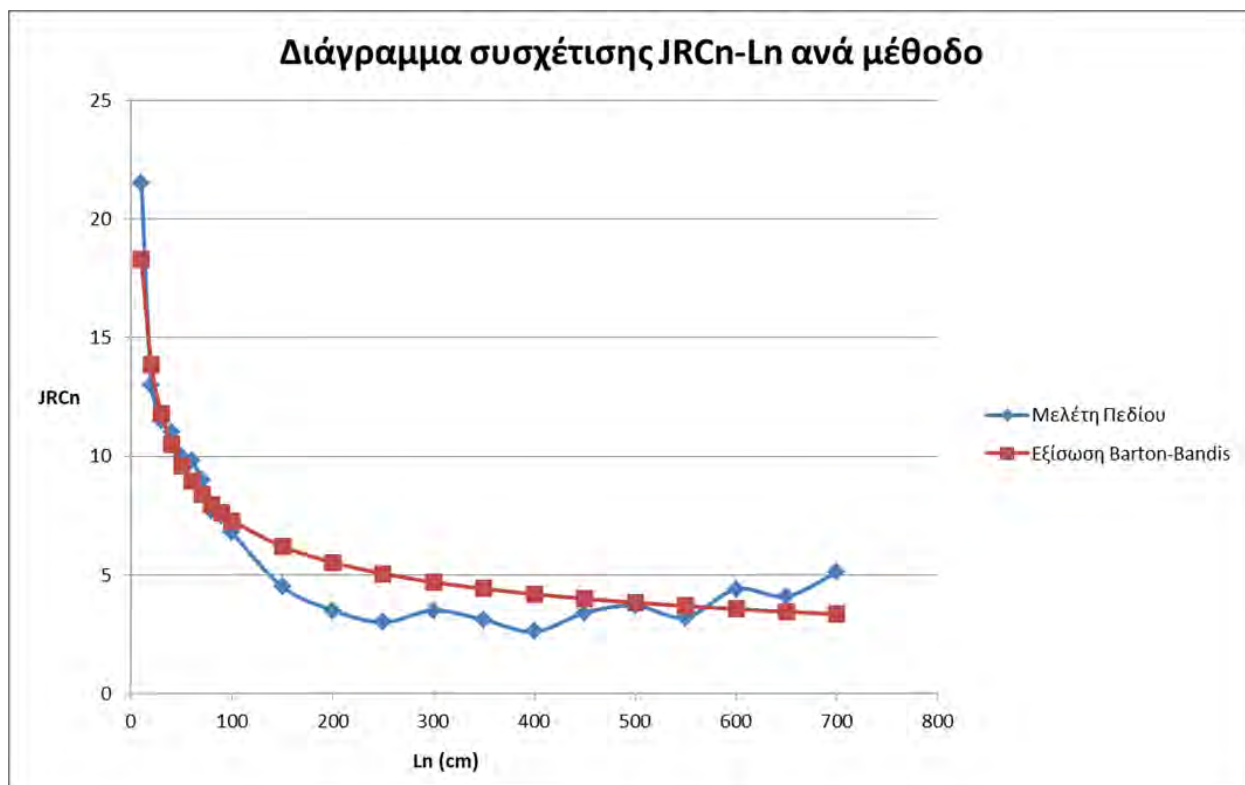
Κεφάλαιο 4 Συζήτηση Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα

4.1 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

Από την μοντελοποίηση των δεδομένων της εργασίας των Yong et al (2017) σχηματίστηκε ο Πίνακας 4.1 από τον οποίο προέκυψαν οι καμπύλες τιμών του δείκτη τραχύτητας JRC_n της μελέτης πεδίου από την βιβλιογραφία και της διορθωτικής εξίσωσης Barton-Bandis όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1 αλλά και το διάγραμμα που παρουσιάζει την απόκλιση των τιμών των δύο καμπυλών (βλ. Σχήμα 4.2).

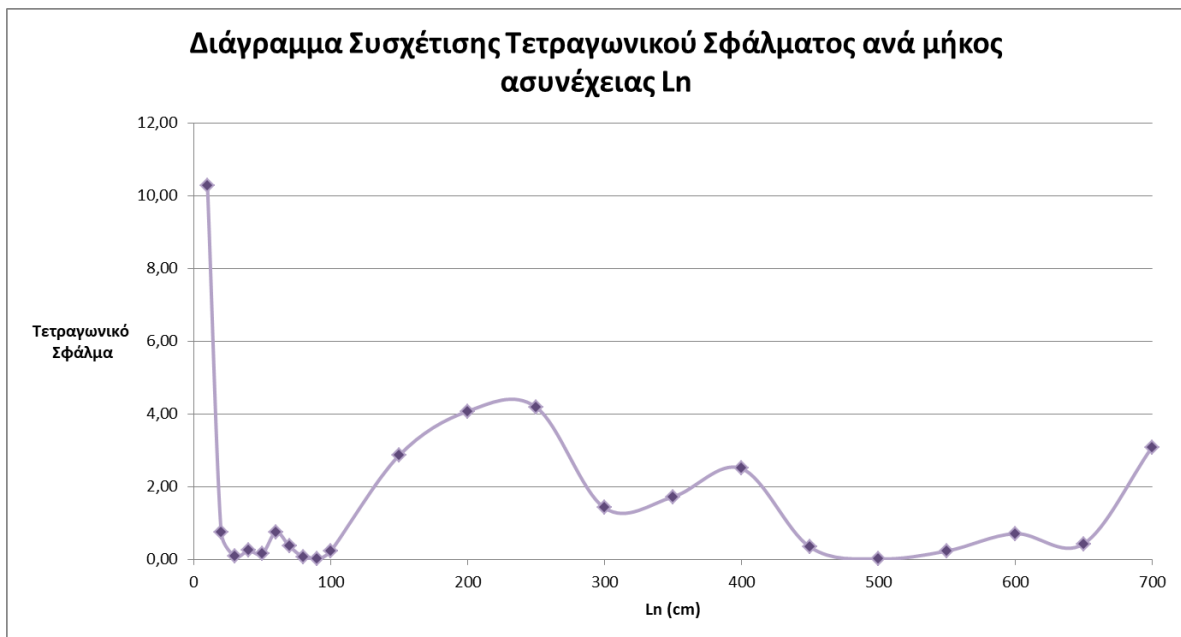
	Lo (cm)	8																					
	JRCo	20																					
	Ln (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
	JRCn	21,5	13	11,5	11	10	9,8	9	7,7	7,5	6,8	4,5	3,5	3	3,5	3,1	2,6	3,4	3,7	3,2	4,4	4,1	5,1
a	JRC'n	18,3	13,9	11,8	10,5	9,6	8,9	8,4	8,0	7,6	7,3	6,2	5,5	5,0	4,7	4,4	4,2	4,0	3,8	3,7	3,6	3,4	3,3
b	Τετραγωνικό Σφάλμα	10,29	0,74	0,08	0,24	0,15	0,75	0,36	0,07	0,01	0,23	2,86	4,08	4,19	1,42	1,72	2,50	0,35	0,02	0,23	0,71	0,43	3,08
c	Μέσο Τετρ. Σφάλμα	1,6																					

Πίνακας 4-1: Αποτελέσματα Διορθωτικών Τιμών JRC'_n και Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος μεθόδων για ζεύγος τιμών $L_0=8cm$, $JRC_0=20$.



Σχήμα 4-1: Διάγραμμα Συσχέτισης δείκτη τραχύτητας JRC_n – μήκους ασυνέχειας L_n ανά μέθοδο για ζεύγος τιμών $L_0=8\text{cm}$, $JRC_0=20$.

Το διάγραμμα συγκρίνει την τιμή JRC_n (Συντελεστής Τραχύτητας Ασυνέχειας) με το μήκος ασυνέχειας (L_n) και παρουσιάζει δύο καμπύλες: μία η οποία προκύπτει από την Μελέτη Πεδίου των Yong et al (2017) (μπλε γραμμή) και μία για την Εξίσωση Barton-Bandis (κόκκινη γραμμή). Και οι δύο καμπύλες ξεκινούν από τις υψηλότερες τιμές του JRC_n , και μειώνονται απότομα για μικρά μήκη ασυνέχειας (μέχρι περίπου τα 100cm). Μετά από αυτή την απότομη πτώση, οι τιμές σταθεροποιούνται σε χαμηλότερα επίπεδα, κάτω από το $JRC=10$. Η καμπύλη της εξίσωσης Barton-Bandis παραμένει σχετικά σταθερή με τιμές γύρω από το 5, ενώ η καμπύλη της μελέτης πεδίου παρουσιάζει ελαφρές αυξομειώσεις (JRC μεταξύ 4 και 5). Για μεγαλύτερα μήκη ασυνέχειας, μετά τα 500 cm, η μπλε καμπύλη της μελέτης πεδίου εμφανίζει περισσότερες διακυμάνσεις, ενώ η κόκκινη καμπύλη της εξίσωσης Barton-Bandis παραμένει πιο σταθερή, με τάση σταθεροποίησης στην οριζόντια διεύθυνση. Γενικά, η μελέτη πεδίου δείχνει μεγαλύτερη μεταβλητότητα, ειδικά σε μεγάλα μήκη ασυνέχειας, ενώ η εξίσωση Barton-Bandis παρέχει πιο ομαλή μετάβαση από τιμή σε τιμή και με μικρότερες διακυμάνσεις.



Σχήμα 4-2: Απόκλιση δείκτη τραχύτητας πεδίου Εξίσωσης Barton-Bandis JRC'_n με δείκτη τραχύτητας μελέτης πεδίου JRC_n συναρτήσεως του μήκους της ασυνέχειας L_n .

Από το διάγραμμα των αποκλίσεων του Σχήματος 4.2 συμπεραίνουμε ότι για μικρά μήκη ασυνέχειας στο πεδίο οι τιμές μεταξύ της πραγματικής μετρούμενης τραχύτητας στο πεδίο με τις προβλέψεις που προκύπτουν από την εξίσωση Barton-Bandis οριακά συμπίπτουν με εξαίρεση την πιο μικρή τιμή του L_n . Ενώ όσο μελετάμε την τραχύτητα της ασυνέχειας για μεγαλύτερα μήκη και συγκεκριμένα πάνω από 100cm παρουσιάζονται αποκλίσεις. Για μήκη ασυνεχειών από 100 cm έως 500 cm παρατηρούνται μεγαλύτερες αποκλίσεις ενώ για μήκη ασυνεχειών από 500 cm έως 700 cm οι αποκλίσεις είναι μικρότερες. Διαπιστώνεται ότι η εξίσωση που πρότειναν οι Barton-Bandis για την διόρθωση (αναγωγή) της επίδρασης κλίμακας περιγράφει επαρκώς το φαινόμενο και είναι αξιόπιστη καθώς επαληθεύεται στην πράξη αφού συνάδει με τα δεδομένα μίας δημοσιευμένης μελέτης που πραγματοποιήθηκε στο πεδίο. Οι καμπύλες τιμών και στις δύο περιπτώσεις καταδεικνύουν την μειωτική επίδραση της κλίμακας στον δείκτη τραχύτητας. Δηλαδή όσο αυξάνεται το μήκος της, υπό εξέταση, ασυνέχειας τόσο μειώνεται ο δείκτης τραχύτητας και κατ'επέκταση και η διατμητική αντοχή της ασυνέχειας. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι για τις ασυνέχειες μικρού μεγέθους ο δείκτης τραχύτητας διαφοροποιείται αισθητά για μικρές αλλαγές του

μήκους, ενώ στις ασυνέχειες μεγάλου μεγέθους (πάνω από 150cm) οι τιμές του δείκτη τραχύτητας παρουσιάζουν μία σχετική σταθεροποίηση. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι στα μικρά μήκη οι προεξοχές είναι πιο απότομες και καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό την τραχύτητα, ενώ στα μεγαλύτερα μήκη οι ανεπιπεδότητες παρέχουν μια πιο ομαλή απεικόνιση της ασυνέχειας σχηματίζοντας λιγότερες συμπλοκές μεταξύ των τοιχωμάτων τους με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή έναντι διάτμησης. Αυτή η διαφοροποίηση στο δείκτη τραχύτητας υπογραμμίζει τη σημασία της κλίμακας στην αξιολόγηση της τραχύτητας και της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών, με τα διαγράμματα (δείκτη τραχύτητας – μήκους ανεπίπεδης ασυνέχειας) να προσφέρουν μια οπτική αναπαράσταση αυτών των παρατηρήσεων. Εν κατακλείδι, η εξίσωση που προτάθηκε από τους Barton-Bandis αποτελεί ισχυρό βοήθημα στην μελέτη των ασυνεχειών βραχώμαζας στο πεδίο διότι καταφέρνει να εξάγει ρεαλιστικές τιμές για τον δείκτη τραχύτητας στο πεδίο, αξιοποιώντας τις τιμές των δοκιμών από δείγματα του εργαστηρίου, παρακάμπτοντας τη δαπανηρή και χρονοβόρα διαδικασία εργαστηριακών δοκιμών διάτμησης στο πεδίο.

4.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται κατανοητό ότι οι ασυνέχειες είναι κρίσιμα στοιχεία για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των βραχομαζών. Η ακριβής καταγραφή τους, όμως, είναι επίπονη και χρονοβόρα, απαιτώντας συχνά την επιτόπια παρατήρηση και λεπτομερή ανάλυση των δεδομένων, με την σχετική βιβλιογραφία να είναι περιορισμένη. Η χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence - AI) θα μπορούσε να συνεισφέρει στην μελέτη των ασυνεχειών και συγκεκριμένα i) στην αυτόματη καταγραφή και χαρτογράφηση ασυνεχειών με ανάπτυξη αυτοματοποιημένων συστημάτων που μπορούν να αναλύουν in-situ φωτογραφίες, βίντεο ή δεδομένα από σαρωτές λέιζερ και drones και ii) στην δημιουργία μίας βάσης δεδομένων από δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί στο πεδίο με ταυτόχρονη ποιοτική σύγκριση και ταξινόμηση των αποτελεσμάτων τους, με σκοπό την βελτιστοποίηση της εξίσωσης Barton-Bandis.

Βιβλιογραφία

- **Δούτσος, Θ.**, (2014). *Γεωλογία: Αρχές και Εφαρμογές*. Αθήνα. Εκδόσεις Liberal Books.
- **Εφραιμίδης, Γ.**, (2021). *Βραχομηχανική: Σημειώσεις του μαθήματος*. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Βόλος.
- **Κούκης, Γ., Σαμπατακάκης, Ν.**, (2002). *Τεχνική Γεωλογία. Μηχανική Περιγραφή Ασυνεχειών Βραχωδών Σχηματισμών*. Αθήνα. Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- **Μπαντής Σ.Κ.**, *Βραχομηχανική: Σημειώσεις μαθημάτων*, Α.Π.Θ., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Θεσσαλονίκη (2000).
- **Νομικός, Π.** (2015). *Εισαγωγή στη μηχανική των πετρωμάτων* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-615>.
- **Παπαθανασίου, Γ.** (2022). *Τεχνική Γεωλογία και Γεωλογικοί Κίνδυνοι* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-96>.
- **Σοφιανός, Α.Ι., Νομικός, Π.Π.**, (2008). *Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων*. ΕΜΠ, ΔΠΜΣ/ΣΚΥΕ
- **Σχοινάς, Χ.**, (2003). *Καταστατικά Ομοιώματα Προσδιορισμού του Μέτρου Παραμορφωσιμότητας Βραχωδών Μαζών υπό Σύνθετες Συνοριακές Συνθήκες*. Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα.
- **Χατζηπαναγιώτου Α.**, “Σύγχρονες μέθοδοι προσδιορισμού του δείκτη τραχύτητας των ασυνεχειών (JRC) διακλασμένου βράχου”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (Μάρτιος 2023).

- **Bandis, S.C., Lumsden, A. C., Barton, N. R.,** (1983). *Fundamentals of Rock Joint Deformation*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. 20(6), 249-268.
- **Barton N., Wang Ch., Yong R.,** (2023). *Advances in joint roughness coefficient (JRC) and its engineering applications*, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. (Article in press).
- **Barton, N.,** (1973). *Review of a new shear-strength criterion for rock joints*. Engineering Geology, 7: 287-332.
- **Barton, N.,** (1976). *The shear strength of rock and rock joints*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 13(9), 255–279. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(76\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)90003-6)
- **Barton, N.,** (1978). *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*: International Society for Rock Mechanics. Pergamon Press, Great Britain.
- **Barton, N.,** (1982). *Modelling Rock Joint Behavior from In Situ Block Tests: Implications for Nuclear Waste Repository Design*. ONWI-308, prepared by Terra Tek, Inc. for Office of Nuclear Waste Isolation, Battelle Memorial Institute, Columbus, OH.
- **Barton, N.,** (2013). *Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 5, 249-261.
- **Barton, N., Bandis, S.,** (1980). *Technical Note: Some Effects of Scale on the Shear Strength of Joint*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. 17, 69-73.
- **Barton, N., Bandis, S.,** (1982). *Effect of block size on the shear behavior of jointed rocks*. Proceedings. Symposium on Rock Mechanics. 739-760.
- **Barton, N., Bandis, S.,** (1990). *Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice*. *Rock Joints*, Barton & Stephansson (eds). Balkema, Rotterdam. ISBN 90 6191 1095.
- **Barton, N., Bandis, S., Bakhtar, K.,** (1985). *Strength, Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joints*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. 22(3), 121-140.

- **Barton, N., Choubey, V.,** (1977). *The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice*. Rock Mechanics 10, 1-54.
- **Hempen, G. L.,** (2018). *Blasting*. Encyclopedia of Engineering Geology, 62–63. https://doi:10.1007/978-3-319-73568-9_30.
- **Hoek, E.,** (1983). Strength of jointed rock masses, 23rd. Rankine Lecture. Geotechnique 33, No 3, Fig. 21.
- **Torabi, S., Sereshki, F., Zaré, M., Javanshir, M.,** (2008). *An Empirical Approach in Prediction of the Roof Rock Strength in Underground Coal Mines*. Coal Operators' Conference.
- **Yong R., Fu X., Huang M., Liang Q., Du S.-G.,** (2017). *A rapid field measurement method for the determination of Joint Roughness Coefficient of large rock joint surfaces*. KSCE Journal of Civil Engineering, 22(1):101-109.