

Στους γονείς μου, Ευαγγελία και Γεώργιο

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Μ. Καββαδά, Αν. Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που με εμπιστεύτηκε αναθέτοντας μου την παρούσα προπτυχιακή διπλωματική εργασία, καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγηση και βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησής της.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Πέτρο Φορτσάκη, Υποψήφιο Διδάκτορα του Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη συμβολή του σε όλα τα στάδια της διπλωματικής μου εργασίας. Οι παρατηρήσεις του, η σωστή καθοδήγησή του, η συμπαράσταση αλλά και ο προσωπικός χρόνος που μου διέθεσε, αποτέλεσαν καθοριστικούς παράγοντες στην διεκπεραίωσή της.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αλέξανδρο Καλό, Υποψήφιο Διδάκτορα του Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη βοήθεια και τις εύστοχες παρατηρήσεις που μου προσέφερε στην προσομοίωση της ερπυστικής συμπεριφοράς του γεωυλικού και στη διαδικασία βαθμονόμησης του ερπυστικού προσομοιώματος.

Για το τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και τους φίλους μου για την έμπρακτη συμπαράσταση, υποστήριξη και υπομονή που έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πολλές φορές κατά τη διάνοιξη και κατασκευή σήραγγων, παρατηρούνται έντονες παραμορφώσεις στην άμεση υποστήριξη ή υψηλές πιέσεις επί της τελικής επένδυσης περιμετρικά της σήραγγας. Το γεγονός αυτό συχνά οφείλεται στο χρονικά εξαρτημένο φαινόμενο του ερπυσμού, η μελέτη του οποίου τις περισσότερες φορές παραλείπεται πριν ξεκινήσει η κατασκευή. Ωστόσο, στην περίπτωση που η σήραγγα διανοίγεται σε χαμηλής ποιότητας βραχώμαζα, οι συνέπειες του φαινομένου του ερπυσμού είναι δυνατό να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα που μπορεί να οδηγήσουν ακόμη και σε αστοχία του έργου.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να μελετηθεί η επίδραση του φαινομένου του ερπυσμού στην ανάπτυξη των φορτίων που καλείται να παραλάβει η τελική επένδυση σήραγγας κυκλικής διατομής ($D=10\text{m}$) και βάθους διάνοιξης $H=100\text{m}$ και η συσχέτιση των φορτίων αυτών με τις μηχανικές και ιξωδοελαστικές παραμέτρους του γεωυλικού.

Αρχικά, παρουσιάζονται όλα τα θεωρητικά στοιχεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας και στη συνέχεια, γίνεται η περιγραφή του προβλήματος που μελετήθηκε. Το πρόβλημα επιλύεται σε δύο διαστάσεις στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, ενώ το προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις δημιουργήθηκε στο σχεδιαστικό περιβάλλον του MSC Patran.

Έπειτα από εκτεταμένη έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με το φαινόμενο του ερπυσμού, πολύτιμη βοήθεια στην περαίωση της εργασίας προσέφεραν οι διδακτορικές διατριβές των Debernardi (2008) και Aristorenas (1987). Οι Debernardi (2008) και Aristorenas (1987) στο πλαίσιο των διδακτορικών τους διατριβών πραγματοποίησαν πειράματα ερπυσμού, για τη βαθμονόμηση των καταστατικών προσομοιωμάτων που πρότειναν. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για την προσομοίωση της ερπυστικής συμπεριφοράς της περιβάλλουσας βραχώμαζας χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα των Singh & Mitchell (1968). Ωστόσο, επιλέχθηκε να μην ποσοτικοποιηθεί η ερπυστική συμπεριφορά μέσω των παραμέτρων που υπεισέρχονται στο συγκεκριμένο καταστατικό προσομοίωμα, καθώς δεν είναι "φιλικές" και ευκολονόητες προς το μηχανικό. Προέκυψε λοιπόν, η ανάγκη έκφρασης τους ως προς κάποιες πιο "προσιτές", που να παραπέμπουν σε συγκεκριμένες ομάδες βραχώμαζας. Συνεπώς, από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των πειραμάτων που εκτέλεσαν οι Debernardi (2008) και Aristorenas (1987) η ερπυστική συμπεριφορά ποσοτικοποιήθηκε μέσω της παραμέτρου ϕ_{cr} , που αποτελεί το μέτρο της ερπυστικής παραμόρφωσης που είναι δυνατό να αναπτυχθεί.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε πλήθος αριθμητικών αναλύσεων, τα αποτελέσματα των οποίων μελετήθηκαν και συγκρίθηκαν ποσοτικά και ποιοτικά. Προέκυψαν αποτελέσματα για τις αναπτυσσόμενες μετατοπίσεις και πλαστικές παραμορφώσεις περιμετρικά της

σήραγγας, τις κατανομές των πιέσεων επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και επί της τελικής επένδυσης και τις επιπρόσθετες πιέσεις στην τελική επένδυση λόγω της επιβολής του ερπυσμού. Σημαντικό ρόλο στις αναλύσεις έλαβαν ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων K , ο δείκτης βραχόμαζας $\sigma_c/\rho_{o,m}$ και ο ερπυστικός συντελεστής ϕ_{cr} . Διατηρώντας κάθε φορά κάποιες παραμέτρους σταθερές, μελετήθηκε η επίδραση των παραμέτρων που μεταβάλλονται, στο φορτίο που καλείται να αναλάβει η τελική επένδυση. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην επίδραση της παραμέτρου ϕ_{cr} στην εκδήλωση του φαινομένου.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας συνοψίζεται το σύνολο των συμπερασμάτων που προέκυψαν καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της. Συμπερασματικά, παρατηρήθηκε πως η επιβολή του ερπυσμού προσαυξάνει τα φορτία που καλείται να παραλάβει η τελική επένδυση κατά ένα ποσοστό της τάξεως του 20-30%, ποσοστό σημαντικό ώστε το φαινόμενο να μην αγνοείται κατά το σχεδιασμό των σηράγγων.

ABSTRACT

The development of intense deformation of the temporary support section and high stresses on the final lining are widely observed during the excavation and construction of tunnels, especially in the case of unfavourable geotechnical conditions. The specific problems are usually assigned to the time-dependent behaviour of the surrounding geomaterial, the study of which is often ignored before the beginning of the construction. However, in cases of tunnels excavated into poor quality rock mass, the consequences of creep can cause serious problems that may even result in failure of the structure.

The present thesis intends to study the influence of the creep phenomenon on the development of the loads, which the final lining of a tunnel with circular cross section ($D=10\text{m}$) and excavation depth $H=100\text{m}$ is designed to undertake, as well as the correlation of these loads with the mechanical and viscoelastic parameters of the geomaterial.

Initially, the theory that was applied in the present diploma thesis is presented and the problem that was studied is described. The specific problem is solved through two-dimensional analysis using the finite element code ABAQUS 6.9.1, while the numerical model used in the analysis, was designed in the environment of MSC Patran.

Valuable data to the completion of the present thesis was offered by the PhD theses of Debernardi (2008) and Aristorenas (1987), after thorough search of the international bibliography referring to the creep phenomenon. Debernardi (2008) and Aristorenas (1987) carried out creep experiments in the frame of their PhD theses, in order to calibrate the constitutive models they proposed. The constitutive model of Singh & Mitchell (1968) was used for the simulation of the creeping behaviour of the surrounding rock mass in the present thesis. However, we choose not to quantify initially the creep behaviour through the parameters entered into the specific constitutive model, because they are not friendly and easy to understand. Therefore, it was required to express the above mentioned parameters according to more characteristic results by Debernardi (2008) and Aristorenas (1987), resulted in the quantification of the creeping behaviour through the parameter ϕ_{cr} , which depicts the amount of the creep deformation that can potentially be developed.

Subsequently, a large number of numerical analyses was carried out, the results of which were studied and compared qualitatively and quantitatively. These results refer to the developed deformations and plastic strains around the tunnel section, the stress distributions on the shotcrete and the final lining and the additional stresses on the final lining due to the imposition of creep. The impact of the horizontal stress ratio K , the geotechnical conditions index $\sigma_c/p_{0,m}$ and the creep coefficient ϕ_{cr} was the most significant, among all the parameters, in the analyses. Maintaining some parameters constant each time, the influence of the variable parameters, on the load to be undertaken by the final

lining of the tunnel was studied. Particular emphasis was placed on the effect of the parameter ϕ_{cr} on the occurrence of the phenomenon.

In the last chapter of the thesis all the conclusions obtained during its progress are summarized. Finally, it is observed that the imposition of creep increases the loads that final lining is designed to undertake at a rate of 20-30%, so the phenomenon of creep must be taken into account during the construction of tunnels.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ	2
2	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ	3
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
2.2	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	3
2.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	4
2.4	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	4
2.4.1	Σύστημα RMR	5
2.4.2	Σύστημα Q	5
2.4.3	Σύστημα GSI.....	5
2.5	ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.....	7
2.5.1	Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown	7
2.5.2	Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.....	7
2.5.3	Κριτήριο αστοχίας Drucker-Prager.....	8
3	ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ	11
3.1	ΠΕΡΙ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ.....	11
3.2	ΜΕΤΡΑ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ	12
3.2.1	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete)	12
3.2.2	Αγκύρια βράχου (rock bolts)	12
3.2.3	Δοκοί προπορείας (forepoling)	13
3.2.4	Μεταλλικά πλαίσια (steel sets)	14
3.3	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ.....	14
3.3.1	Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης.....	14
3.3.2	Μέθοδος Chern (1998).....	16
3.3.3	Μέθοδος Panet (1995)	17
3.3.4	Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης σε συνδυασμό με καμπύλες Panet-Chern	19
3.3.5	Μέθοδος “χαλάρωσης”	20
4	ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ	21

4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	21
4.2	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΤΕΛΙΚΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ.....	21
4.3	ΦΟΡΤΙΑ ΤΕΛΙΚΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ.....	22
4.3.1	Φορτία από την άμεση υποστήριξη.....	23
4.3.2	Φορτία από το περιβάλλον γεωυλικό.....	23
4.3.3	Σεισμικά φορτία.....	24
4.3.4	Φορτία από υδατικές πιέσεις.....	24
4.3.5	Φορτία από τη λειτουργία της σήραγγας.....	24
4.4	ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΕΛΙΚΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ.....	24
4.4.1	ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	25
4.4.1.1	Μέθοδος του δείκτη RMR.....	25
4.4.1.2	Μέθοδος NGI.....	25
4.4.1.3	Μέθοδος Terzaghi (1946).....	26
4.4.2	ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	27
4.4.2.1	Αναλυτική μέθοδος Terzaghi.....	27
4.4.2.2	Μέθοδος Protodyakonov (1948) (Ρωσική μέθοδος).....	29
5	ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΕΡΠΥΣΜΟΥ.....	31
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	31
5.2	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΕΡΠΥΣΜΟΥ.....	32
5.2.1	Φύση του γεωυλικού-μηχανικά χαρακτηριστικά.....	32
5.2.2	Επιβαλλόμενη ένταση και ρυθμός επιβολής φόρτισης.....	33
5.2.3	Θερμοκρασία και υδατική πίεση.....	34
5.3	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΕΡΠΥΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ.....	35

5.3.1	Εμπειρικά προσομοιώματα.....	35
5.3.1.1	Ερπυστικό προσομοίωμα Power-Law (Από: Betten, 2005)	35
5.3.1.2	Ερπυστικό προσομοίωμα Power-Law (Από: ABAQUS Documentation, 2009)	35
5.3.1.3	Ερπυστικό προσομοίωμα Singh & Mitchell (1968).....	36
5.3.2	Αναλυτικά προσομοιώματα	37
5.3.2.1	Ελαστικό στοιχείο.....	37
5.3.2.2	Ιξώδες στοιχείο.....	38
5.3.2.3	Στοιχείο Maxwell	39
5.3.2.4	Στοιχείο Kelvin-Voigt	39
5.3.2.5	Στοιχείο Burgers	40
6	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	43
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	43
6.2	ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	43
6.3	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....	46
6.4	ΒΗΜΑΤΑ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	48
7	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ.....	53
7.1	Επεξεργασία αποτελεσμάτων από Debernardi (2008)	53
7.2	Επεξεργασία αποτελεσμάτων από Aristorenas (1987)	64
7.3	Υπολογισμός των παραμέτρων του προσομοιώματος των Singh & Mitchell (1968)	74
8	ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	77
8.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	77
8.2	ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΤΑΣΕΩΝ (K).....	77
8.2.1	Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG).....	78
8.2.2	Συνολικές μετατοπίσεις (U).....	79
8.2.3	Πιέσεις στην τελική επένδυση (CPRESS)	80
8.2.4	Ερπυστικές παραμορφώσεις (CEMAG)	83
8.3	ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ.....	83
8.3.1	Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG).....	84
8.3.2	Συνολικές μετατοπίσεις (U).....	84
8.3.3	Πιέσεις στην τελική επένδυση (CPRESS)	85
8.3.4	Ερπυστικές παραμορφώσεις (CEMAG)	87

8.4	ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΡΠΥΣΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ (ϕ_{cr}).....	87
8.4.1	Ερπυστικές παραμορφώσεις (CEMAG)	88
8.4.2	Πιέσεις στην τελική επένδυση (CPRESS)	89
9	ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	91
9.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	91
9.2	ΠΑΡΑΘΕΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	91
9.2.1	Διαγραμματική απεικόνιση των πιέσεων ως προς διάφορες γεωτεχνικές και ερπυστικές παραμέτρους	98
9.2.2	Κατανομή των πιέσεων ως προς το λόγο σ_{cm}/ρ_0 με επίδραση του συντελεστή K	106
9.2.3	Κατανομή των πιέσεων ως προς το λόγο σ_{cm}/ρ_0 με επίδραση του συντελεστή ϕ_{cr} .	109
10	ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	113
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	117
	Ξενόγλωσση βιβλιογραφία.....	117
	Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία.....	119

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Γενικό διάγραμμα GSI (Marinos & Hoek, 2000).	6
Σχήμα 3.1: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης κυκλικής σήραγγας ακτίνας R.....	15
Σχήμα 3.2: Απομείωση της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης p_0 σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της σήραγγας.....	16
Σχήμα 3.3: Καμπύλη Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα.	18
Σχήμα 3.4: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με άμεση υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.	20
Σχήμα 4.1: Εκτίμηση φορτίων στην επένδυση σήραγγας κατά τη μέθοδο Terzaghi.....	28
Σχήμα 4.2: Εκτίμηση φορτίων στην επένδυση σήραγγας κατά τη μέθοδο Protodyakonov...	29
Σχήμα 5.1: Χαρακτηριστική καμπύλη ερπυστικής παραμόρφωσης-χρόνου.	32
Σχήμα 5.2: Ποιοτική απεικόνιση ερπυστικών παραμορφώσεων για διάφορα πετρώματα, υπό την επιβολή ίδιας τάσης.	33
Σχήμα 5.3: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών ερπυσμού για διάφορα επίπεδα επιβαλλόμενης έντασης (Bishop,1966; Από Singh & Mitchell, 1968).	34
Σχήμα 5.4: Εξάρτηση θερμοκρασίας και ερπυστικών παραμορφώσεων.	34
Σχήμα 5.5: Καμπύλη ερπυστικής παραμόρφωσης-χρόνου με βάση το προσομοίωμα Singh & Mitchell (1968) για διάφορες τιμές του συντελεστή m	37
Σχήμα 5.6: Το ελαστικό στοιχείο και η παραμόρφωσή του συναρτήσει του χρόνου.	38
Σχήμα 5.7: Το ιξώδες στοιχείο και η παραμόρφωσή του συναρτήσει του χρόνου.	38
Σχήμα 5.8: Το στοιχείο Maxwell και η παραμόρφωσή του συναρτήσει του χρόνου.	39
Σχήμα 5.9: Το στοιχείο Kelvin-Voigt και η παραμόρφωσή του συναρτήσει του χρόνου.....	40
Σχήμα 5.10: Το στοιχείο Burgers και η παραμόρφωσή του συναρτήσει του χρόνου.....	41
Σχήμα 6.1:Διάγραμμα $(t_{50\%}/t_d - t_d/t_1)$ για τον προσδιορισμό της παραμέτρου m	48
Σχήμα 7.1: Επίπεδα επιβαλλόμενης έντασης για το πείραμα αντοχής A11a.	55
Σχήμα 7.2: Διαδρομή (t-s) για το πείραμα A17a.	56
Σχήμα 7.3: Ερπυστική καμπύλη για $t=14\text{MPa}$ (σημείο G), $t=15\text{MPa}$ (σημείο H), $t=16\text{MPa}$ (σημείο I), $t=17\text{MPa}$ (σημείο J) του πειράματος A17a.	57
Σχήμα 7.4: Ερπυστική καμπύλη για $t=18\text{MPa}$ (σημείο K) και φωτογραφία δείγματος μετά το τέλος του πειράματος A17a.....	57
Σχήμα 7.5: Ερπυστικές καμπύλες για τα σημεία G, H, I, J του πειράματος A17a (μετά από ψηφιοποίηση της δοσμένης αντίστοιχης καμπύλης).....	58

Σχήμα 7.6: Καμπύλες ρυθμού παραμόρφωσης-χρόνου των σημείων G, H, I, J του πειράματος A17a.	58
Σχήμα 7.7: Ερπυστικές καμπύλες, μετά από ψηφιοποίηση, για τα σημεία C, D του πειράματος A17b.	59
Σχήμα 7.8: Διάγραμμα ($E-t/t_f$) από Debernardi (2008).....	60
Σχήμα 7.9: Ερπυστικές καμπύλες των πειραμάτων από Debernardi (2008).	62
Σχήμα 7.10: Διάγραμμα ($\phi_{cr}-t/t_f$) των συνολικών πειραμάτων από Debernardi (2008).	62
Σχήμα 7.11: Διάγραμμα ($t_{50\%}/t_f-t/t_f$) των συνολικών πειραμάτων από Debernardi (2008). ..	63
Σχήμα 7.12: Διάγραμμα ($\epsilon_{cr\infty}-t/t_f$) των συνολικών πειραμάτων από Debernardi (2008).....	63
Σχήμα 7.13: Διάγραμμα ($m-t/t_f$) των συνολικών πειραμάτων από Debernardi (2008).....	64
Σχήμα 7.14: Διάγραμμα ($\epsilon_{vol}-time$) του πειράματος 23-1 DC από Aristorenas (1987).	67
Σχήμα 7.15: Διάγραμμα ($\epsilon_{vol}-time$) του πειράματος 23-1 DC από Aristorenas (1987) (μετά από ψηφιοποίηση της αντίστοιχης δοσμένης καμπύλης).	67
Σχήμα 7.16: Διάγραμμα ($\gamma-time$) του πειράματος 23-1 DC από Aristorenas (1987) (μετά από ψηφιοποίηση της αντίστοιχης δοσμένης καμπύλης).....	68
Σχήμα 7.17: Διάγραμμα ($\gamma-time$) για το πείραμα 23-5 DC από Aristorenas (1987)(μετά από ψηφιοποίηση της αντίστοιχης δοσμένης καμπύλης).....	69
Σχήμα 7.18: Διάγραμμα ($\gamma-time$) για το πείραμα 23-9 DC από Aristorenas (1987) (μετά από ψηφιοποίηση της αντίστοιχης δοσμένης καμπύλης).....	69
Σχήμα 7.19: Διάγραμμα ($\gamma-time$) για το πείραμα 26B-6 DC από Aristorenas (1987) (μετά από ψηφιοποίηση της αντίστοιχης δοσμένης καμπύλης).....	70
Σχήμα 7.20: Διάγραμμα ($\gamma-time$) για το πείραμα 26B-8 DC από Aristorenas (1987) (μετά από ψηφιοποίηση της αντίστοιχης δοσμένης καμπύλης).....	70
Σχήμα 7.21: Καμπύλες κατακόρυφης παραμόρφωσης-χρόνου όλων των πειραμάτων από Aristorenas (1987).....	72
Σχήμα 7.22: Διάγραμμα ($\phi_{cr}-q/q_f$) όλων των πειραμάτων από Aristorenas (1987).....	72
Σχήμα 7.23: Διάγραμμα ($\epsilon_{cr,inf}-q/q_f$) όλων των πειραμάτων από Aristorenas (1987).	73
Σχήμα 7.24: Διάγραμμα ($t_{50\%}/t_{inf}-q/q_f$) όλων των πειραμάτων από Aristorenas (1987).....	74
Σχήμα 8.1: Βοηθητικό σχήμα για την απεικόνιση της γωνίας θ που ασκείται κάθε φορά η πίεση επί της τελικής επένδυσης.....	81
Σχήμα 8.2: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση και της γωνίας που ασκείται στην σήραγγα των αναλύσεων 20_a_329_A, 20_a_549_A και 20_a_759_A, με συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K=0.7, 1.0, 1.3$ αντίστοιχα και $GSI=20, \sigma_{ci}=10MPa, m_i=6$, στο 5° βήμα πριν την επιβολή ερπυσμού.	81

Σχήμα 8.3: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση και της γωνίας που ασκείται στην σήραγγα των αναλύσεων 20_a_329_A, 20_a_549_A και 20_a_759_A, με συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K=0.7, 1.0, 1.3$ αντίστοιχα και $GSI=20, \sigma_{ci}=10MPa, m_i=6$, στο 6° βήμα όπου εισέρχεται ο ερπυσμός.....	82
Σχήμα 8.4: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση και της γωνίας που ασκείται στη σήραγγα των αναλύσεων 20_a_548_A, 20_a_554_A και 20_a_561_A, για ποιότητα βραχώμαζας με $\sigma_{cm}/\rho_0=0.197, 0.233, 0.338$ αντίστοιχα, στο 5° βήμα πριν την επιβολή ερπυσμού.....	86
Σχήμα 8.5: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση και της γωνίας που ασκείται στη σήραγγα των αναλύσεων 20_a_548_A, 20_a_554_A και 20_a_561_A, για ποιότητα βραχώμαζας με $\sigma_{cm}/\rho_0=0.197, 0.233, 0.338$ αντίστοιχα, στο 6° βήμα όπου εισέρχεται ο ερπυσμός.....	86
Σχήμα 8.6: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση και της γωνίας που ασκείται στη σήραγγα των αναλύσεων 20_a_548_A, 20_a_548_B, 20_a_548_C και 20_a_548_D, για τέσσερις διαφορετικές τιμές των ζευγών $\phi_{cr,1}$ και $\phi_{cr,2}$, στο 6° βήμα όπου εισέρχεται ο ερπυσμός.....	89
Σχήμα 9.1: Βοηθητικό σχήμα για την απεικόνιση της γωνίας θ που ασκείται κάθε φορά η πίεση επί της τελικής επένδυσης.....	92
Σχήμα 9.2: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_338_D με $K=0.7$, η οποία παρουσιάζει μία αύξηση της πίεσης λόγω του ερπυσμού της τάξεως του 25%.....	92
Σχήμα 9.3: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_329_D με $K=0.7$, η οποία παρουσιάζει μία αύξηση της πίεσης λόγω του ερπυσμού της τάξεως του 18%.....	93
Σχήμα 9.4: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_558_D με $K=1.0$, η οποία παρουσιάζει μία αύξηση της πίεσης λόγω του ερπυσμού της τάξεως του 30%.....	93
Σχήμα 9.5: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_549_D με $K=1.0$, η οποία παρουσιάζει μία αύξηση της πίεσης λόγω του ερπυσμού της τάξεως του 21%.....	94
Σχήμα 9.6: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_762_D με $K=1.3$, η οποία παρουσιάζει μία αύξηση της πίεσης λόγω του ερπυσμού της τάξεως του 26%.....	94
Σχήμα 9.7: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_759_D με $K=1.3$, η οποία παρουσιάζει μία αύξηση της πίεσης λόγω του ερπυσμού της τάξεως του 20%.....	95

Σχήμα 9.8: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης και της μέσης πίεσης στην τελική επένδυση, ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_338_D με $K=0.7$	96
Σχήμα 9.9: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης και της μέσης πίεσης στην τελική επένδυση, ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_329_D με $K=0.7$	96
Σχήμα 9.10: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης και της μέσης πίεσης στην τελική επένδυση, ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_762_D με $K=1.3$	97
Σχήμα 9.11: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης και της μέσης πίεσης στην τελική επένδυση, ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_759_D με $K=1.3$	97
Σχήμα 9.12: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0).	98
Σχήμα 9.13: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού (σ_c / ρ_0)... ..	99
Σχήμα 9.14: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c / \rho_{0,m}$).	100
Σχήμα 9.15: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς το μέτρο ελαστικότητας E (MPa).	100
Σχήμα 9.16: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς τη γωνία εσωτερικής τριβής ϕ (deg).	101
Σχήμα 9.17: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης που ασκείται στην οροφή της σήραγγας μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{roof,cr}$) και της πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_{roof}), ως προς το συντελεστή οριζόντιων τάσεων K	102
Σχήμα 9.18: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης που ασκείται στην παρειά της σήραγγας μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{side,cr}$) και της πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_{side}), ως προς το συντελεστή οριζόντιων τάσεων K	102
Σχήμα 9.19: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς το συντελεστή οριζόντιων τάσεων K	103
Σχήμα 9.20: Διάγραμμα του λόγου των πιέσεων της τελικής επένδυσης πριν και μετά την επιβολή του ερπυσμού ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, των αναλύσεων 20_a_329_A, 20_a_549_A και 20_a_759_A με $K=0.7, 1.0, 1.3$ αντίστοιχα.	103

Σχήμα 9.21: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς τον ερπυστικό συντελεστή $\phi_{cr,1}$	104
Σχήμα 9.22: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς τον ερπυστικό συντελεστή $\phi_{cr,2}$	104
Σχήμα 9.23: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς την παράμετρο επίδρασης της τάσης του προσομοιώματος των Singh & Mitchell (1968), a	105
Σχήμα 9.24: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c/p_{0,m}$), για τρία διαφορετικά $K=0.7, 1.0, 1.3$	106
Σχήμα 9.25: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c/p_{0,m}$), για τρία διαφορετικά $K=0.7, 1.0, 1.3$, με $\phi_{cr,1}=0.4$ και $\phi_{cr,2}=0.6$	106
Σχήμα 9.26: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης που ασκείται στην οροφή της τελικής επένδυσης μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{roof,cr}$) και της πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_{roof}), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c/p_{0,m}$), για τρία διαφορετικά $K=0.7, 1.0, 1.3$	107
Σχήμα 9.27: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης που ασκείται στην οροφή της τελικής επένδυσης μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{roof,cr}$) και της πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_{roof}), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c/p_{0,m}$), για τρία διαφορετικά $K=0.7, 1.0, 1.3$, με $\phi_{cr,1}=0.4$ και $\phi_{cr,2}=0.6$	107
Σχήμα 9.28: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης που ασκείται στην παρειά της τελικής επένδυσης μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{side,cr}$) και της πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_{side}), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c/p_{0,m}$), για τρία διαφορετικά $K=0.7, 1.0, 1.3$	108
Σχήμα 9.29: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης που ασκείται στην παρειά της τελικής επένδυσης μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{side,cr}$) και της πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_{side}), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c/p_{0,m}$), για τρία διαφορετικά $K=0.7, 1.0, 1.3$, με $\phi_{cr,1}=0.4$ και $\phi_{cr,2}=0.6$	108
Σχήμα 9.30: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του	

ερπυσμού (p_m), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c/p_{0,m}$), για τέσσερις συνδυασμούς $\phi_{cr,1}$ και $\phi_{cr,2}$ 109

Σχήμα 9.31: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης που ασκείται στην οροφή της τελικής επένδυσης μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{roof,cr}$) και της πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_{roof}), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c/p_{0,m}$), για τέσσερις συνδυασμούς $\phi_{cr,1}$ και $\phi_{cr,2}$ 110

Σχήμα 9.32: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης που ασκείται στην παρειά της τελικής επένδυσης μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{side,cr}$) και της πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_{side}), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c/p_{0,m}$), για τέσσερις συνδυασμούς $\phi_{cr,1}$ και $\phi_{cr,2}$ 110

Σχήμα 9.33: Διάγραμμα του λόγου των πιέσεων της τελικής επένδυσης πριν και μετά την επιβολή του ερπυσμού ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, των αναλύσεων 20_a_548_A, 20_a_548_B, 20_a_548_C και 20_a_548_D, για τέσσερις συνδυασμούς $\phi_{cr,1}$ και $\phi_{cr,2}$ με σταθερό συντελεστή οριζόντιων τάσεων, $K=1.0$ 111

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1: Τιμές συντελεστών λ με βάση τη μέθοδο NGI.	26
Πίνακας 4.2: Τιμές της παραμέτρου HP με τη μέθοδο Terzaghi.	27
Πίνακας 4.3: Συντελεστές προσαύξησης λόγω ερπυστικών παραμορφώσεων.	30
Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτικός πίνακας των παραμέτρων των αναλύσεων.	46
Πίνακας 7.1: Διαστάσεις και βάρος των δειγμάτων άνθρακα.	54
Πίνακας 7.2: Μέσες τιμές φυσικών χαρακτηριστικών για το σχηματισμό του άνθρακα.	54
Πίνακας 7.3: Τελικά αποτελέσματα των πειραμάτων από Debernardi (2008).....	61
Πίνακας 7.4: Στοιχεία δειγμάτων σχιστόλιθου.	65
Πίνακας 7.5: Παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας των δειγμάτων σχιστόλιθου.	66
Πίνακας 7.6: Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των πειραμάτων από Aristorenas (1987).	71
Πίνακας 10.1: Συγκεντρωτικός πίνακας των παραμέτρων του ερπυσμού των αναλύσεων.	114

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Καλούπι σκυροδέτησης της τελικής επένδυσης (χελώνα).....	1
Εικόνα 3.1: Διάνοιξη σήραγγας με τη μέθοδο NATM.....	12
Εικόνα 3.2: Μέτρα προσωρινής υποστήριξης σήραγγας.....	13
Εικόνα 3.3: Ομπρέλα δοκών προπορείας.....	14
Εικόνα 4.1: Στεγανωτική μεμβράνη τελικής επένδυσης.....	22
Εικόνα 4.2: Μεταλλότυπος για τη σκυροδέτηση της τελικής επένδυσης (χελώνα).....	22
Εικόνα 6.1: Γεωμετρική απεικόνιση προβλήματος (παράθεση από το πρόγραμμα MSC Patran).....	44
Εικόνα 6.2: Μεγέθυνση στην περιοχή της σήραγγας και τους δακτυλίους. Το πάχος του κάθε δακτυλίου είναι 1.00 m (παράθεση από το πρόγραμμα MSC Patran).....	44
Εικόνα 6.3: Συνοριακές συνθήκες (χαρακτηριστικό απόσπασμα από το input file).....	45
Εικόνα 6.4: Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων (παράθεση από το πρόγραμμα MSC Patran).....	45
Εικόνα 6.5: Αρχικές γεωστατικές συνθήκες (απόσπασμα από το input file).....	48
Εικόνα 6.6: Κατανομή κατακόρυφων τάσεων στη γεωστατική κατάσταση (παράθεση από το πρόγραμμα Abaqus).....	49
Εικόνα 6.7: 3 ^ο Βήμα προσομοίωσης (απόσπασμα από το input file).....	50
Εικόνα 6.8: 4 ^ο Βήμα προσομοίωσης (απόσπασμα από το input file).....	50
Εικόνα 6.9: Κατανομή πιέσεων επί της τελικής επένδυσης στο 5 ^ο βήμα προσομοίωσης (παράθεση από το πρόγραμμα Abaqus).....	51
Εικόνα 6.10: 6 ^ο Βήμα προσομοίωσης (απόσπασμα από το input file).....	51
Εικόνα 6.11: Κατανομή ερπυστικών παραμορφώσεων στο 6 ^ο βήμα προσομοίωσης (παράθεση από το πρόγραμμα Abaqus).....	52
Εικόνα 7.1: Μηκοτομή της σήραγγας βάσης Lyon-Turin.....	53
Εικόνα 7.2: Παραμορφωμένη διατομή λόγω εκτεταμένων συγκλίσεων στη σήραγγα βάσης Lyon-Turin (Barla et al., 2010).....	54
Εικόνα 7.3: Δείγμα άνθρακα μετά το τέλος του πειράματος A11a (αστοχία).....	56
Εικόνα 7.4: Δείγμα μετά το τέλος του πειράματος A17d (αστοχία).....	60
Εικόνα 7.5: Αεροφωτογραφία της περιοχής πρόσβασης της σήραγγας Wisenburg από το λογισμικό Google Earth.....	65

Εικόνα 8.1: Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων των αναλύσεων 20_a_329_A, 20_a_549_A και 20_a_759_A, με συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K=0.7, 1.0, 1.3$ αντίστοιχα και $GSI=20, \sigma_{ci}=10MPa, m_i=6$	78
Εικόνα 8.2: Κατανομή συνολικών μετατοπίσεων των αναλύσεων 20_a_329_A, 20_a_549_A και 20_a_759_A, με συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K=0.7, 1.0, 1.3$ αντίστοιχα και $GSI=20, \sigma_{ci}=10MPa, m_i=6$	79
Εικόνα 8.3: Κατανομή πιέσεων στην τελική επένδυση των αναλύσεων 20_a_329_A, 20_a_549_A και 20_a_759_A, με συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K=0.7, 1.0, 1.3$ αντίστοιχα και $GSI=20, \sigma_{ci}=10MPa, m_i=6$	80
Εικόνα 8.4: Κατανομή παραμορφώσεων λόγω του φαινομένου του ερπυσμού των αναλύσεων 20_a_329_A, 20_a_549_A και 20_a_759_A, με συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K=0.7, 1.0, 1.3$ αντίστοιχα και $GSI=20, \sigma_{ci}=10MPa, m_i=6$	83
Εικόνα 8.5: Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων των αναλύσεων 20_a_548_A, 20_a_554_A και 20_a_561_A, για ποιότητα βραχόμαζας με $\sigma_{cm}/\rho_0=0.197, 0.233, 0.338$ αντίστοιχα.	84
Εικόνα 8.6: Κατανομή συνολικών μετατοπίσεων των αναλύσεων 20_a_548_A, 20_a_554_A και 20_a_561_A, για ποιότητα βραχόμαζας με $\sigma_{cm}/\rho_0=0.197, 0.233, 0.338$ αντίστοιχα.	85
Εικόνα 8.7: Κατανομή παραμορφώσεων λόγω του φαινομένου του ερπυσμού των αναλύσεων 20_a_548_A, 20_a_554_A και 20_a_561_A, για ποιότητα βραχόμαζας με $\sigma_{cm}/\rho_0=0.197, 0.233, 0.338$ αντίστοιχα.	87
Εικόνα 8.8: Κατανομή παραμορφώσεων λόγω του φαινομένου του ερπυσμού των αναλύσεων 20_a_548_A, 20_a_548_B, 20_a_548_C και 20_a_548_D, για τέσσερις συνδυασμούς $\phi_{cr,1}$ και $\phi_{cr,2}$ με σταθερό συντελεστή οριζόντιων τάσεων, $K=1.0$	88

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι σήραγγες είναι υπόγειες εκσκαφές και αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα έργα πολιτικού μηχανικού, διότι συνδέουν δυσπρόσιτες περιοχές και εξυπηρετούν κυρίως συγκοινωνιακές και όχι μόνο ανάγκες (π.χ. μεταφορά νερού, πετρελαίου κλπ.). Χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα δύσκολα έργα, καθώς η κατασκευή τους αποτελεί ένα πολυδιάστατο πρόβλημα που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και δε μπορεί να προσομοιωθεί μονοσήμαντα.

Στη συμβατική μέθοδο διάνοιξης αρχικά πραγματοποιείται η εκσκαφή με την τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης και τέλος η κατασκευή της τελικής επένδυσης. Η τελική επένδυση της σήραγγας, η κατασκευή της οποίας αποτελεί το σημαντικότερο στάδιο του έργου, τοποθετείται μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης και ισορρόπησης της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας. Κατασκευάζεται συνήθως από επί τόπου οπλισμένο σκυρόδεμα και προσφέρει αυξημένη ασφάλεια κατά τη διάρκεια της ζωής του έργου. Ωστόσο, ο καθορισμός των φορτίων που αναλαμβάνει η τελική επένδυση είναι μία ιδιαίτερα σύνθετη διαδικασία, διότι εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που δεν είναι μονοσήμαντα καθορισμένοι. Κάποια από τα σημαντικότερα φορτία που καλείται να παραλάβει η τελική επένδυση προέρχονται από την περιβάλλουσα βραχώμαζα της σήραγγας, η οποία ανάλογα με την ποιότητά της μπορεί να εμφανίζει έντονα ή ασθενή ερπυστικά φαινόμενα, από την άμεση υποστήριξη, από μελλοντικές κατασκευές και από σεισμικά φορτία.



Εικόνα 1.1: Καλούπι σκυροδέτησης της τελικής επένδυσης (χελώνα).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε συγκεκριμένα, η επιπρόσθετη φόρτιση που καλείται να αναλάβει η τελική επένδυση λόγω του χρονικά εξαρτημένου φαινομένου του ερπυσμού. Το φαινόμενο του ερπυσμού παρουσιάζεται κυρίως σε εδάφη και μαλακούς/αποσαθρωμένους βράχους και κατά τη διάρκειά του, το γεωυλικό συνεχίζει να

παραμορφώνεται υπό σταθερό εντατικό πεδίο. Η τελική επένδυση παρεμποδίζει την ανάπτυξη αυτών των παραμορφώσεων, με αποτέλεσμα την αύξηση της φόρτισής της. Σε πολλές μελέτες το φαινόμενο δε λαμβάνεται υπόψη, καθώς η προσομοίωσή του είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, χρονοβόρα και δαπανηρή. Για τους παραπάνω λόγους, παρά το πλήθος ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί για την κατανόηση του φαινομένου, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλές αμφιβολίες και αναπάντητα ερωτήματα.

1.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

Παρακάτω θα παρουσιαστούν συνοπτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν από την αρχή μέχρι το τέλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας:

- ✓ Παρουσίαση όλων των θεωρητικών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
- ✓ Επιλογή του καταστατικού προσομοιώματος των Singh & Mitchell για την περιγραφή της χρονικά εξαρτημένης συμπεριφοράς του γεωυλικού.
- ✓ Εκτεταμένη έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με το φαινόμενο του ερπυσμού και τις ερπυστικές παραμέτρους των γεωυλικών.
- ✓ Επεξεργασία των δεδομένων που βρέθηκαν, με σκοπό την αντιστοίχιση των παραμέτρων του προσομοιώματος των Singh & Mitchell με “φιλικές” προς το μηχανικό.
- ✓ Επιλογή συγκεκριμένων τιμών των παραπάνω παραμέτρων με βάση τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών.
- ✓ Δημιουργία του προσομοιώματος που μελετήθηκε στο σχεδιαστικό περιβάλλον του MSC Patran.
- ✓ Προσομοίωση μέσω διδιάστατων αναλύσεων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, της αλληλεπίδρασης του συστήματος βραχόμαζας-άμεσης υποστήριξης-τελικής επένδυσης, για βραχόμαζες με διαφορετικά μηχανικά και βισκώδη χαρακτηριστικά.
- ✓ Εξαγωγή αποτελεσμάτων και σύγκρισή τους μέσω ποιοτικών εικόνων και ποσοτικών διαγραμμάτων, καθώς και εκτίμηση της θέσης των μέγιστων πιέσεων επί της τελικής επένδυσης και της κατανομής τους. Θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη μεταβολή των πιέσεων που καλείται να αναλάβει η τελική επένδυση λόγω της επιβολής του φαινομένου του ερπυσμού και πως αυτό επηρεάζεται από τη μεταβολή συγκεκριμένων γεωλογικών παραμέτρων.

2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μηχανική συμπεριφορά του περιβάλλοντος γεωυλικού είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα κατά το σχεδιασμό της διάνοιξης και υποστήριξης των υπόγειων έργων. Το γεωλογικό υλικό λόγω διαφορετικής συμπεριφοράς διακρίνεται, στις θεωρήσεις του Μηχανικού, σε εδάφη και πετρώματα.

Έδαφος είναι ένα φυσικό συσσωμάτωμα ορυκτών κόκκων που μπορεί να διαχωριστεί με απλή μηχανική δράση όπως π.χ., με ανακίνηση μέσα σε νερό (Μαρίνος, 1993). **Πέτρωμα** είναι ένα φυσικό συσσωμάτωμα ορυκτών κόκκων που συνδέονται με ισχυρές και μόνιμες δυνάμεις συνοχής. Με τον όρο **βραχώμαζα** αναφερόμαστε στο σύνθετο υλικό που αποτελείται από τεμάχια άρρηκτου βράχου και τις ασυνέχειες.

Οι σήραγγες σε μεγάλα βάθη, με τις οποίες θα ασχοληθούμε στην παρούσα διπλωματική εργασία, διανοίγονται κυρίως εντός βραχωδών σχηματισμών. Επομένως, μας ενδιαφέρει να ερευνήσουμε την μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας.

2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Η συνολική συμπεριφορά της βραχώμαζας εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος (κύριο πέτρωμα), αλλά περισσότερο από τη δομή, δηλαδή το πλήθος των ομάδων των ασυνεχειών και των ιδιοτήτων τους. Ο μηχανικός, λοιπόν, πρέπει να αποφασίσει αν έχει ισότροπη ή όχι βραχώμαζα.

Ισότροπη ονομάζεται η βραχώμαζα που εμφανίζει τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες προς όλες τις διευθύνσεις, ενώ **ανισότροπη** είναι εκείνη που οι μηχανικές της ιδιότητες δεν παραμένουν σταθερές προς όλες τις διευθύνσεις. Όταν ο αριθμός των ομάδων ασυνεχειών είναι μέχρι τέσσερα, δημιουργούνται γεωμετρικές δομές του πετρώματος και το πέτρωμα παρουσιάζει ανισοτροπική συμπεριφορά. Αντίθετα όταν ο αριθμός των ομάδων είναι άνω του τέσσερα είναι δύσκολο να διακριθούν γεωμετρικές δομές και διευθύνσεις και η βραχώμαζα συμπεριφέρεται ισοτροπικά.

Τέλος, ανάλογα με τις ιδιότητες που παρουσιάζει το πέτρωμα ως προς το χώρο, διακρίνεται σε ομοιογενές και ανομοιογενές. **Ομοιογενή** ονομάζεται η βραχώμαζα που εμφανίζει τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες σε όλα της τα σημεία, ενώ **ανομοιογενή** όταν σε κάθε της σημείο παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες.

2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Η βραχώμαζα είναι συνήθως ρωγματωμένη και σπανίως ομοιογενής και ισότροπη. Για τον λόγο αυτό η εκτίμηση των τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων της γίνεται με έμμεσο τρόπο, μέσω της περιγραφής και ταξινόμησης της βραχώμαζας σε κατηγορίες. Οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή είναι οι εξής:

- **ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ:** Εξαρτάται από το είδος του πετρώματος, το βαθμό αποσάθρωσης και εκφράζεται μέσω της αντοχής που προκύπτει κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια του πετρώματος (σ_{ci}).
- **ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ (RQD):** Ο δείκτης RQD (Rock Quality Designation) βασίζεται στην μέτρηση του μήκους των τεμαχίων δειγματοληπτικής γεωτρήσεως που είναι άνω των 10cm. Υπολογίζεται ως το πηλίκο του αθροίσματος των μηκών αυτών των τεμαχίων προς το συνολικό μήκος της πυρηνοληψίας της γεώτρησης σαν ποσοστό %. Παρόλο, όμως, ότι αποτελεί έναν από τους συνηθέστερα χρησιμοποιούμενους δείκτες για την περιγραφή της βραχώμαζας, παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα. Είναι πολύ ευαίσθητος σε μικρές μεταβολές του μήκους των πυρήνων και στον τρόπο της δειγματοληψίας, ενώ εξαρτάται από το σχετικό προσανατολισμό της γεώτρησης ως προς τις ασυνέχειες της βραχώμαζας. Ταξινομεί τη βραχώμαζα από "Εξαιρετική" έως "Πολύ φτωχή".
- **ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ ΚΑΙ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ:** Καθορίζονται από τον αριθμό των ομάδων ασυνεχειών και την απόσταση τους σε κάθε ομάδα. Η κατάσταση των ασυνεχειών χαρακτηρίζεται από την τραχύτητα και το βαθμό εξαλλοίωσης.
- **ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ:** Η παρουσία νερού επηρεάζει αρνητικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας και ιδιαίτερα όταν έχουμε βραχώμαζες μικρής αντοχής. Αντίθετα, σε βραχώμαζες καλής ποιότητας η επιρροή του νερού είναι λιγότερο σημαντική έως και αμελητέα.

2.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Όπως έχει αναφερθεί, για την κατασκευή ενός υπόγειου έργου είναι απαραίτητος από τον μηχανικό ο προσδιορισμός όλων εκείνων των παραγόντων που είναι δυνατόν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά της βραχώμαζας. Το σύνολο των στοιχείων που συλλέγονται αξιοποιείται με την εφαρμογή των μεθόδων ταξινόμησης της βραχώμαζας. Η ταξινόμηση τυποποιεί τη βραχώμαζα σε κάποια κατηγορία και δίνει μία εκτίμηση για τη μηχανική συμπεριφορά της. Τα κυριότερα συστήματα ταξινόμησης παρουσιάζονται παρακάτω.

2.4.1 Σύστημα RMR

Το σύστημα RMR προτάθηκε από τον Bieniawski (1973, 1976). Βασίζεται στη συνεκτίμηση έξι παραγόντων: της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος, του βαθμού RQD, των αποστάσεων μεταξύ των ασυνεχειών, της κατάστασής τους, του προσανατολισμού τους σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου και της κατάστασης των υπόγειων νερών. Παίρνει τιμές από 0 έως 100 και η τελική του τιμή προκύπτει ως άθροισμα των παραπάνω παραγόντων, οι οποίοι βαθμονομούνται χωριστά. Χαρακτηρίζει τη βραχώμαζα από “Πολύ καλή” έως “Πολύ φτωχή”.

2.4.2 Σύστημα Q

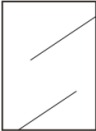
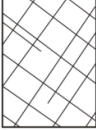
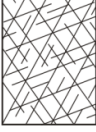



Το σύστημα Q προτάθηκε από τους Barton et al. (1974). Βασίζεται στη συνεκτίμηση έξι παραγόντων: του δείκτη κερματισμού (RQD), του αριθμού των συστημάτων των ασυνεχειών (J_n), του βαθμού τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών (J_r), του βαθμού εξαλλοιώσής τους (J_a), της επιρροής του υπόγειου νερού (J_w) και του συντελεστή απομείωσης λόγω υψηλών τάσεων (SRF). Παίρνει τιμές από 0 έως 400 ή και μεγαλύτερες για εξαιρετικά καλής ποιότητας βραχώμαζα. Σε αντίθεση με το σύστημα RMR, το σύστημα Q προκύπτει από το γινόμενο τριών λόγων:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$$

2.4.3 Σύστημα GSI

Ο δείκτης GSI προτάθηκε από τον Hoek (1995) και με βελτιώσεις από τον Hoek (1997). Βασίζεται στη συνεκτίμηση δύο παραγόντων: της δομής της βραχώμαζας και της κατάστασης των ασυνεχειών της. Αποτελεί σημαντικό στοιχείο στην επίλυση του κριτηρίου θραύσης Hoek και Brown και μπορεί να μας παράσχει τις παραμέτρους αντοχής m , s , a του κριτηρίου. Το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown προϋποθέτει για την εφαρμογή του ιστροπική συμπεριφορά της βραχώμαζας χωρίς προτιμητέες διευθύνσεις αστοχίας. Ομοίως περιορίζεται και η χρήση του GSI, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί με κάποια ανοχή και σε ανισότροπα μέσα όταν η θραύση δεν ελέγχεται από την ανισοτροπία.

Ο δείκτης GSI σχεδιάστηκε για να είναι συμβατός με το σύστημα RMR για βραχώμαζες με $RMR > 40$, ενώ για $RMR < 40$ το GSI πλεονεκτεί επειδή παρέχει καλύτερη διακριτοποίηση. Παίρνει τιμές από 0 έως 100, η διαδικασία ταξινόμησης είναι απλή και βασίζεται σε ένα απλό εικονογραφημένο πίνακα (Σχήμα 2.1). Ο δείκτης ταιριάζει πολύ καλά στα πετρώματα που συναντώνται στην Ελλάδα. Οι Hoek και Brown μάλιστα έχουν προτείνει μεθοδολογία για την εκτίμηση του GSI σε σχηματισμούς φλύσχη, σχηματισμού ιδιαίτερα συνήθη στην Ελλάδα.

<p>ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) (E. Hoek, Π. Μαρινός, 2000)</p> <p>Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών της βραχώμαζας εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI από τις καμπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI =35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γειτονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθειες που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως διατηρημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η αντοχή ορισμένων βραχομαζών μειώνεται από την παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μέτριας, πτωχής και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχειών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.</p> <p>ΔΟΜΗ</p>	<p>ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ</p> <p>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, υγείες, μη αποσπασθαιμένες επιφάνειες</p> <p>ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσπασθαιμένες και οξειδωμένες επιφάνειες</p> <p>ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίου αποσπασθαιμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες</p> <p>ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα</p> <p>ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσπασθαιμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης ή επιφλοιώσης</p>	<p>ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →</p>			
<p> ΑΡΡΗΚΤΗ Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση</p>	90			N/A	N/A
<p> ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ/ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ Αδιατάρακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών</p>	80	70			
<p> ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών</p>		60	50		
<p> ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ/ΠΤΥΧΩΜΕΝΗ Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας</p>			40	30	
<p> ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιώδων και αποστραγγυλωμένων τεμαχίων</p>				20	
<p> ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατηρημένη ασθενής βραχώμαζα. Η φύλλωση επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιώδων τεμαχίων (η κλίμακα σε αυτό το εικονίδιο δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονιδίων)</p>	N/A	N/A			10

Σχήμα 2.1: Γενικό διάγραμμα GSI (Marinos & Hoek, 2000).

2.5 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

2.5.1 Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown

Το κριτήριο έλαβε την τελική του μορφή από τους Hoek et al. (2002). Αρχικά δημιουργήθηκε για την αστοχία άρρηκτου βράχου, αλλά στη συνέχεια εισήχθησαν παράγοντες για τη μείωση των ιδιοτήτων, έτσι ώστε να προσαρμοστεί και για τις βραχώμαζες. Ακόμη, είχε αρχικά προσαρμοστεί πάνω στα διαθέσιμα συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας της εποχής, που ήταν το RMR του Bieniawski. Αρκετές όμως αδυναμίες στο δείκτη RMR, οδήγησαν στην εισαγωγή του δείκτη GSI.

Οι εξισώσεις του Hoek-Brown (με ταξινόμηση GSI) είναι:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right) \quad 2.1$$

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad 2.2$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad 2.3$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{20/3} \right) \quad 2.4$$

Όπου:

σ_1, σ_3 : οι κύριες τάσεις κατά την αστοχία.

σ_{ci} : η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ενός κυλινδρικού δοκιμίου του άρρηκτου βράχου.

m_b, m_i, s, a : αδιάστατες σταθερές που εξαρτώνται από την ποιότητα και την δομή της βραχώμαζας.

D : συντελεστής διαταραχής της βραχώμαζας, ο οποίος εξαρτάται από τη μέθοδο εκσκαφής και λαμβάνει τιμές από 0 έως 1.

2.5.2 Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Coulomb, 1776) θεωρείται κατάλληλο για να περιγράψει την αστοχία των ψαθυρών υλικών που παρουσιάζουν μεγαλύτερη τάση αστοχίας σε θλίψη από ότι σε εφελκυσμό. Επομένως, είναι το πιο ευρέως διαδεδομένο κριτήριο αστοχίας στη σύγχρονη γεωτεχνική μηχανική.

Σύμφωνα με τον Mohr-Coulomb, προσδιορίζονται οι κρίσιμοι συνδυασμοί των τάσεων που αντιστοιχούν σε καταστάσεις αστοχίας. Όταν η διατμητική τάση (τ) σε όλα τα επίπεδα ενός στοιχείου είναι μικρότερη από την αντίστοιχη διαθέσιμη διατμητική αντοχή, τότε το

στοιχείο δεν αστοχεί. Αστοχία έχουμε όταν η διατμητική τάση είναι ίση με την διατμητική αντοχή σε κάποιο επίπεδο του στοιχείου και μάλιστα εκδηλώνεται με ολίσθηση κατά μήκος του επιπέδου αυτού (επίπεδο αστοχίας).

Ο νόμος αστοχίας εκφράζεται συνήθως ως εξής:

$$\tau = c + \sigma' \tan \varphi \quad 2.5$$

Όπου (φ) είναι η γωνία τριβής και (c) είναι η πραγματική συνοχή του υλικού. Η έκφραση του νόμου ως προς τις κύριες τάσεις είναι η εξής:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \tan \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) \quad 2.6$$

Η μαθηματική έκφραση της εξίσωσης 2.6 δεν περιλαμβάνει την ενδιάμεση συνιστώσα των τάσεων (σ_2) γιατί αναφέρεται μόνο σε επίπεδα παράλληλα προς τον άξονα της (σ_2).

Το κριτήριο Mohr-Coulomb δεν μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά της βραχώμαζας υπό την κατάσταση αστοχίας, για το λόγο αυτό στα υπόγεια έργα είναι διαδεδομένο το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown. Πολλά όμως προγράμματα αναλύσεων δεν το χρησιμοποιούν το παραπάνω κριτήριο, γι' αυτό εμφανίστηκε η ανάγκη μετατροπής των παραμέτρων του κριτηρίου Hoek-Brown στις ισοδύναμες παραμέτρους του κριτηρίου Mohr-Coulomb, μέσω των σχέσεων:

$$\varphi' = \sin^{-1} \left[\frac{6a m_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6a m_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad 2.7$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + (6a m_b \sigma'_{3n})^{a-1}} / (1+a)(2+a)} \quad 2.8$$

$$\sigma'_{3n} = \frac{\sigma'_{3,max}}{\sigma_{ci}} \quad 2.9$$

Στην περίπτωση σηράγγων σε μεγάλα βάθη ισχύει:

$$\frac{\sigma'_{3,max}}{\sigma_{cm}} = 0.47 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94} \quad 2.10$$

2.5.3 Κριτήριο αστοχίας Drucker-Prager

Το κριτήριο Drucker-Prager παρουσιάστηκε από τους Drucker & Prager (1952) και χρησιμοποιείται για να περιγράψει υλικά τα οποία συμπεριφέρονται ελαστικά μέχρι την τάση αστοχίας, ενώ για τάσεις μεγαλύτερες από αυτή τα υλικά παραμορφώνονται

πλαστικά. Αποτελεί επέκταση του κριτηρίου Von Mises συσχετίζοντας την επιφάνεια διαρροής με τη μέση πίεση p_m . Ως παράμετροι αντοχής για τις αναλύσεις λαμβάνονται η γωνία τριβής β και η συνοχή d . Οι εκφράσεις του κριτηρίου δίνονται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$q = p \tan \beta + d \quad 2.11$$

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad 2.12$$

Όπου:

d, k : παράμετροι “αντοχής” κριτηρίου Drucker-Prager.

β, α : παράμετροι “γωνίας τριβής” κριτηρίου Drucker-Prager.

p : μέση τάση, q : διεκτροπική τάση.

I_1 : πρώτη αναλλοίωτη του τανυστή των τάσεων, όπου:

$$I_1 = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3 \quad 2.13$$

J_2 : δεύτερη αναλλοίωτη του διεκτροπικού τανυστή των τάσεων, όπου:

$$J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} = \frac{1}{6} \left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 \right] + \sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2 \quad 2.14$$

Η μετάβαση από το κριτήριο Mohr-Coulomb στο κριτήριο Drucker-Prager γίνεται μέσω των σχέσεων:

$$\tan \beta = \sqrt{3} \sin \varphi \quad 2.15$$

$$\frac{d}{c} = \sqrt{3} \cos \varphi \quad 2.16$$

3 ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

3.1 ΠΕΡΙ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Η διαδικασία διάνοιξης μιας σήραγγας χωρίζεται κυρίως σε τρεις φάσεις: την εκσκαφή, την τοποθέτηση άμεσης υποστήριξης και την κατασκευή της τελικής επένδυσης. Σε περιπτώσεις που η βραχόμαζα είναι πολύ καλής ποιότητας και το βάθος εκσκαφής δεν είναι πολύ μεγάλο, είναι δυνατό να παραλειφθεί το στάδιο της άμεσης υποστήριξης και η σήραγγα να παραμείνει ανυποστήρικτη.

Οι τρόποι διάνοιξης των σηράγγων είναι οι ακόλουθοι:

- Αυστριακή μέθοδος διάνοιξης σηράγγων
- Συρμοί ολομέτωπης κοπής με ή χωρίς ασπίδα
- Μηχανήματα σημειακής κοπής
- Εκσκαφής και επανεπίχωσης

Η επιλογή της μεθόδου γίνεται με βάση τις διαστάσεις και το μήκος της σήραγγας, την ποιότητα της βραχόμαζας και την ύπαρξη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Σε ετερογενείς βραχόμαζες επιλέγεται κυρίως η νέα Αυστριακή μέθοδος διάνοιξης, η οποία είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη, επειδή προσαρμόζεται στην εναλλαγή των γεωτεχνικών συνθηκών.

ΜΕΘΟΔΟΣ NATM (ΝΕΑ ΑΥΣΤΡΙΑΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ)

Η βασική αρχή της μεθόδου είναι ότι η διάνοιξη της σήραγγας και η κατασκευή της άμεσης υποστήριξης γίνονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να ενεργοποιηθεί η αντοχή της περιβάλλουσας βραχόμαζας μέσω της ελεγχόμενης σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας σε ικανό βαθμό, ώστε να μειωθούν αρκετά οι πιέσεις επί της άμεσης υποστήριξης, αλλά όχι τόσο, ώστε να προκληθεί αποδιοργάνωση της βραχόμαζας, με συνέπεια την αύξηση των πιέσεων στην άμεση υποστήριξη και τελικά την κατάρρευση της διατομής της σήραγγας. Παρέχεται η δυνατότητα δημιουργίας φαινομένων θόλου μέσα στη βραχόμαζα, αλλά περιορίζεται η αποσυμπίεση και η χαλάρωση του υλικού. Η διάνοιξη γίνεται με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής, σε μία ή περισσότερες φάσεις και η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος πραγματοποιείται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια. Σε ορισμένες περιπτώσεις, δεν κατασκευάζεται τελική επένδυση, αλλά η άμεση υποστήριξη σχεδιάζεται, ώστε να αναλάβει το σύνολο των φορτίων της περιβάλλουσας βραχόμαζας. Η μέθοδος NATM είναι ευέλικτη και μπορεί να εφαρμοστεί σε ξαφνικές γεωλογικές αλλαγές, δεν προκαλεί εμπόδια και συνωστισμό εξοπλισμού και υλικού στο εργοτάξιο, ενώ απαιτεί μικρότερο κόστος

επενδύσεων, καθώς η απαιτούμενη επένδυση είναι μικρότερη, αφού συμβάλλει στην ευστάθεια και η βραχώμαζα.



Εικόνα 3.1: Διάνοιξη σήραγγας με τη μέθοδο NATM.

3.2 ΜΕΤΡΑ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

3.2.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete)

Ο ρόλος του είναι πολύ βασικός στην άμεση επένδυση και υποστήριξη σήραγγων. Συμβάλλει στην προστασία των εργαζομένων κατά τη διάνοιξη, αποτρέποντας την πτώση μικρών τεμαχίων βράχου που μπορεί να προέκυψαν από την διατάραξη κατά τη διάνοιξη. Η αντοχή και η πλαστιμότητά του μπορούν να αυξηθούν με την προσθήκη μεταλλικών ινών οι οποίες δρουν ως οπλισμός. Η προσθήκη μεταλλικών ινών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως οπλισμού τείνει να αντικαταστήσει την όπλιση με μεταλλικά πλέγματα.

3.2.2 Αγκύρια βράχου (rock bolts)

Τα αγκύρια αποτελούνται συνήθως από χάλυβα και το στέλεχός τους μπορεί να είναι ολόσωμη ράβδος, κοίλη ράβδος ή άλλη διατομή με κατάλληλα διαμορφωμένη επιφάνεια έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη συνάφεια με το ένεμα. Τοποθετούνται στο θόλο ή στις παρειές της σήραγγας και αναλαμβάνουν φορτία αποτρέποντας διάφορες μορφές αστοχίας όπως, ολίσθηση όγκων πετρώματος κατά μήκος ασυνεχειών στις παρειές ή και κατάπτωση τεμαχίων βράχου. Το μήκος, ο κάρναβος τοποθέτησής τους και η αντοχή των αγκυρίων εξαρτώνται από την εμμονή, την απόσταση, τα διατμητικά χαρακτηριστικά και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών της περιβάλλουσας βραχώμαζας.

Τα αγκύρια διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- **Προεντεταμένα αγκύρια**, που αποτελούνται από χαλύβδινους τένοντες και βασίζονται στην ενεργητική φόρτιση της βραχώμαζας λόγω της προέντασης. Προεντεταμένα αγκύρια χρησιμοποιούνται σπάνια στην κατασκευή σήραγγων.
- **Παθητικά αγκύρια**, των οποίων η λειτουργία βασίζεται στη φόρτισή τους λόγω της παραμόρφωσης της βραχώμαζας. Διακρίνονται σε αγκύρια συνεχούς πρόσφυσης και σε αγκύρια πρόσφυσης άκρου.



Εικόνα 3.2: Μέτρα προσωρινής υποστήριξης σήραγγας.

3.2.3 Δοκοί προπορείας (forepoling)

Αποτελούνται από κοίλες δοκούς μεγάλης διαμέτρου και μήκους και τοποθετούνται στο θόλο της σήραγγας, υπό γωνία και κοντά στο μέτωπο εκσκαφής. Τοποθετούνται με στόχο τη βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής, αλλά και την προστασία των εργατών που εργάζονται σε αυτήν. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα των δοκών προπορείας στη μείωση των παραμορφώσεων και την ενίσχυση της ευστάθειας του μετώπου, έχει αμφισβητηθεί (Kamata & Mashimo, 2003, Lunardi, 2000). Η ακαμψία τους δεν επαρκεί για την παραλαβή των μεγάλων φορτίων που δέχεται ο πυρήνας του μετώπου, ενώ το κόστος εφαρμογής της μεθόδου είναι αρκετά σημαντικό.



Εικόνα 3.3: Ομπρέλα δοκών προπορείας.

3.2.4 Μεταλλικά πλαίσια (steel sets)

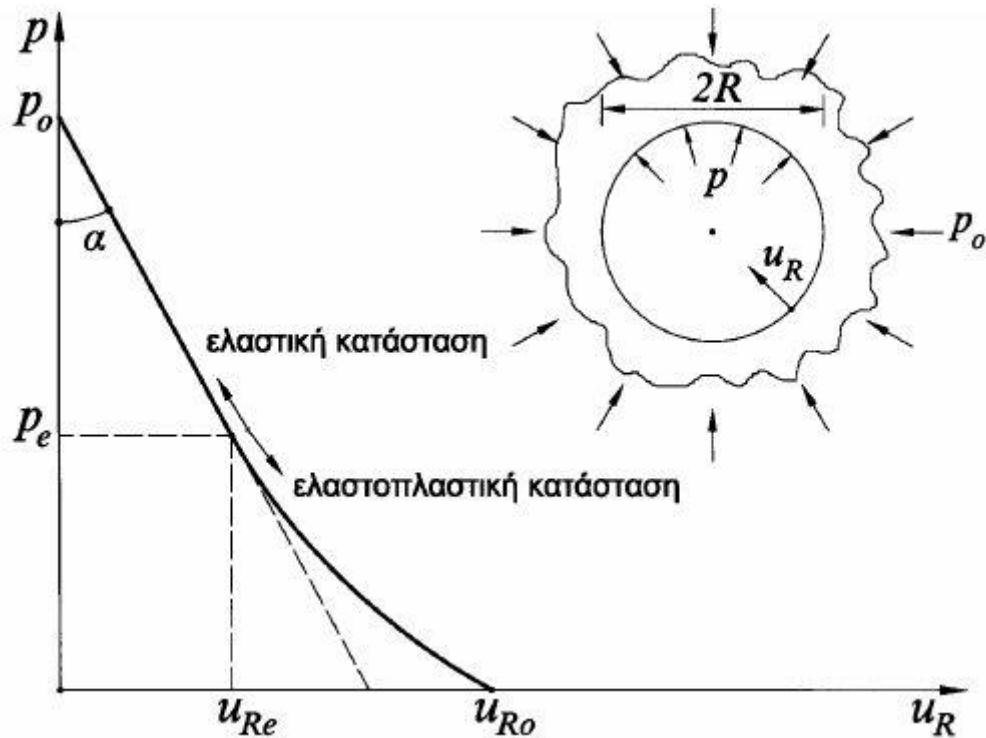
Τα μεταλλικά πλαίσια τοποθετούνται με στόχο την ενίσχυση του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, αλλά και την στήριξη των διατάξεων προπορείας. Για το λόγο αυτό, τα χαρακτηριστικά τους, βαριά ή ελαφρύτερα πλαίσια, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το αν έχουμε χρήση ελαφρών ή όχι διατάξεων προπορείας. Το βασικό πλεονέκτημά τους είναι η άμεση παραλαβή φορτίων μετά την τοποθέτηση και θεμελίωσή τους, σε αντίθεση με το σκυρόδεμα που απαιτεί κάποιο χρονικό διάστημα μέχρι να αναπτύξει τις αντοχές του.

3.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

3.3.1 Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης

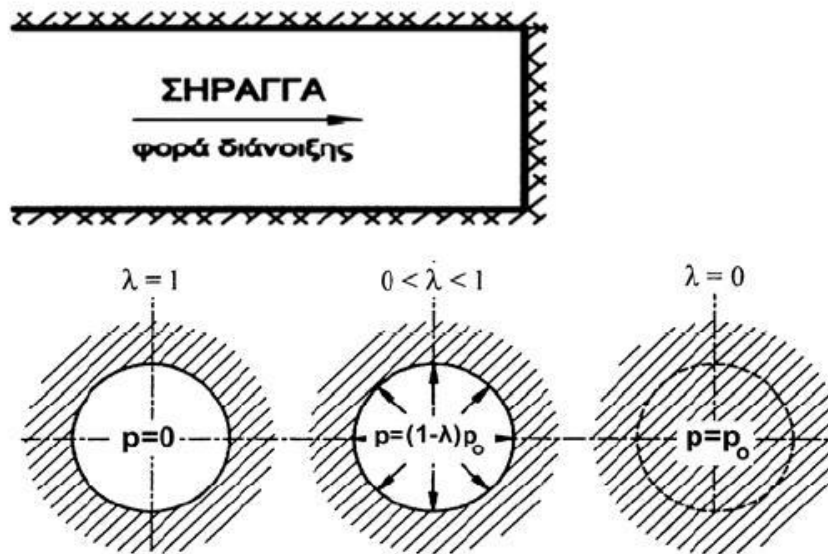
Με τη μέθοδο σύγκλισης-αποτόνωσης υπολογίζεται η πίεση που ασκεί η βραχόμαζα στην επένδυση της σήραγγας συναρτήσει της σύγκλισης (μετακίνησης) του τοιχώματος. Κατά τη διάνοιξη σηράγγων οι μετακινήσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά εμπρός από το μέτωπο διάνοιξης, δηλαδή πριν το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας φτάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Μάλιστα, ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής σύγκλισης, της τάξεως του 30-35%, συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο της σήραγγας. Η σύγκλιση της βραχόμαζας πριν την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης συντελεί στην αποτόνωση της βραχόμαζας και στη μείωση των πιέσεων που θα ασκηθούν σε αυτά. Σε κάθε θέση (x) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης $x-u_R$ μία τιμή της σύγκλισης του τοιχώματος (u_R). Για τη συγκεκριμένη τιμή (u_R) μέσω της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης αντιστοιχεί μία τιμή πίεσης (p), η οποία είναι μικρότερη από την αρχική

γεωστατική πίεση (p_0) ($p < p_0$). Η πίεση αυτή ονομάζεται “ισοδύναμη εσωτερική πίεση” γιατί προκαλεί την ίδια σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας με αυτήν που συμβαίνει σε απόσταση (x) από το μέτωπο της σήραγγας πριν από την τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης.



Σχήμα 3.1: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης κυκλικής σήραγγας ακτίνας R.

Η μέθοδος σύγκλισης-αποτόνωσης υποθέτει κυκλική σήραγγα, ενώ παρουσιάζει μεγαλύτερη αξιοπιστία σε μεγάλη βάθος διάνοιξης σηράγγων. Θεωρούμε ότι πριν τη διάνοιξη της σήραγγας επικρατούν συνθήκες αξονοσυμμετρίας με $K=1.0$, συνεπώς εφαρμόζεται ισότροπη γεωστατική ένταση $\sigma_v = \sigma_h = p_0$. Το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστικά – απολύτως πλαστικά και αστοχεί κατά το κριτήριο Mohr-Coulomb με παραμέτρους c και ϕ , ενώ οι παραμορφώσεις πραγματοποιούνται υπό σταθερό όγκο μετά την αστοχία. Τέλος, κατά την εκσκαφή, η αρχική πίεση (p_0) μειώνεται σταδιακά σε (p) και τελικώς μηδενίζεται.



Σχήμα 3.2: Απομείωση της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης p_0 σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της σήραγγας.

3.3.2 Μέθοδος Chern (1998)

Η μέθοδος Chern (1998) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή αποτόνωσης, συναρτήσει της απόστασης από το μέτωπο. Η σύγκλιση $u_{R(x)}$ του τοιχώματος ανυποστήρικτης σήραγγας στη θέση ($x < 0$) από το μέτωπο, δίνεται από τους Chern et al., 1998 από την εξίσωση:

$$u_{R(x)} = u_{R\infty} \left[1 + \exp\left(0.91 \frac{x}{R}\right) \right]^{-1.7} \quad 3.1$$

Όπου:

$u_{R(x)}$: η σύγκλιση του τοιχώματος ανυποστήρικτης σήραγγας σε απόσταση ($x < 0$) πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής.

$u_{R\infty}$: η τελική σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας σε μεγάλη απόσταση ($x = -\infty$) πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.

R: η ακτίνα της σήραγγας.

Η εξίσωση 3.1 ισχύει για κάθε τιμή του x , δηλαδή τόσο εντός της σήραγγας ($x < 0$), όσο και εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής ($x > 0$).

- **Εάν δεν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη**

Στην περίπτωση αυτή, ισχύει $\frac{u_R}{u_{R\infty}} = \lambda$ και προκύπτει:

$$\lambda = \left[1 + \exp\left(0.91 \frac{x}{R}\right) \right]^{-1.7} \quad 3.2$$

- **Εάν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη**

Στην περίπτωση αυτή, διακρίνουμε τις εξής δύο περιπτώσεις:

(α) Εάν $\varphi \neq 0$:

$$\frac{u_R}{u_{R\infty}} = \left\{ \frac{2}{(k-1)[(1-\lambda)N_s + 2/(k-1)]} \right\}^{(K+1)/(k-1)} \leftrightarrow \lambda = 1 - \frac{2}{(k-1)N_s} \left[\left(\frac{u_R}{u_{R\infty}} \right)^{-(k-1)/(K+1)} - 1 \right] \quad 3.3$$

(β) Εάν $\varphi = 0$:

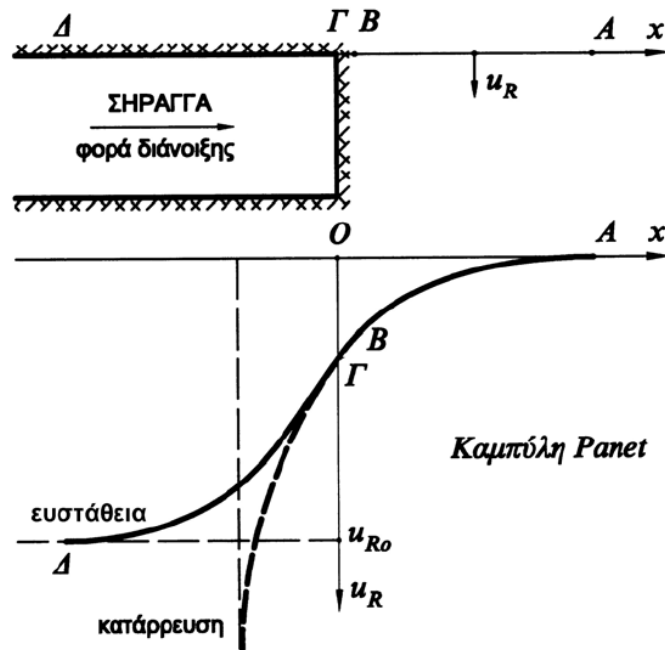
$$\frac{u_R}{u_{R\infty}} = \exp\left\{ -\frac{1}{2}(1-\lambda)N_s(K+1) \right\} \leftrightarrow \lambda = 1 - \frac{2}{(K+1)N_s} \left[-\ln\left(\frac{u_R}{u_{R\infty}} \right) \right] \quad 3.4$$

Συνδυάζοντας καταλλήλως τις ανωτέρω σχέσεις προκύπτει:

$$\lambda = f\left(\frac{x}{R}, N_s, k, K\right) \quad 3.5$$

3.3.3 Μέθοδος Panet (1995)

Η μέθοδος Panet (1995) καταλήγει μέσω αξονοσυμμετρικών αριθμητικών αναλύσεων της περιοχής του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας στην σχέση $u_R=f(x)$, υπολογίζει δηλαδή, τη μετακίνηση του τοιχώματος u_R συναρτήσει της αξονικής απόστασης x από το μέτωπο. Έπειτα τα αποτελέσματα αυτά συσχετίζονται με τα αποτελέσματα που δίνουν $u_R=g(\lambda)$ και προκύπτει η σχέση $\lambda=f(x)$. Οι σχέσεις Panet ισχύουν μόνο για $x < 0$, δηλαδή μόνο εντός της σήραγγας.



Σχήμα 3.3: Καμπύλη Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα.

- **Εάν δεν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη**

Από αξονοσυμμετρικές αριθμητικές αναλύσεις προκύπτει:

$$\frac{u_{R(x)}}{u_{R\infty}} = \left\{ 1 - 0.75 \left[\frac{1}{1 - (4/3)(x/R)} \right]^2 \right\} \quad 3.6$$

Ενώ από μονοδιάστατες αναλύσεις προκύπτει:

$$\frac{u_R}{u_{R\infty}} = \lambda \quad 3.7$$

Τελικά, με συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων προκύπτει:

$$\lambda = 1 - 0.75 \left[\frac{1}{1 - (4/3)(x/R)} \right]^2 \quad 3.8$$

- **Εάν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη**

Θεωρείται ότι η ελαστοπλαστική καμπύλη μετακινήσεων είναι ομοιόθετη της ελαστικής ως προς την αρχή των αξόνων με λόγο ομοιοθεσίας:

$$\frac{1}{\xi} = \frac{u_{R\infty}}{u_{R\infty,e}} > 1 \quad 3.9$$

Από μονοδιάστατες αναλύσεις υπολογίζουμε το ξ και από το συνδυασμό της ομοιοθεσίας της ελαστοπλαστικής καμπύλης με τον τύπο της ελαστικής καμπύλης, προκύπτει η σχέση Panet:

$$\frac{u_R}{u_{R\infty}} = \left\{ 1 - 0.75 \left[\frac{1}{1 - (4/3)(x/R)\xi} \right]^2 \right\} \quad 3.10$$

Τελικά, ανάλογα με το αν $\varphi=0$ ή $\varphi \neq 0$, προκύπτει η σχέση:

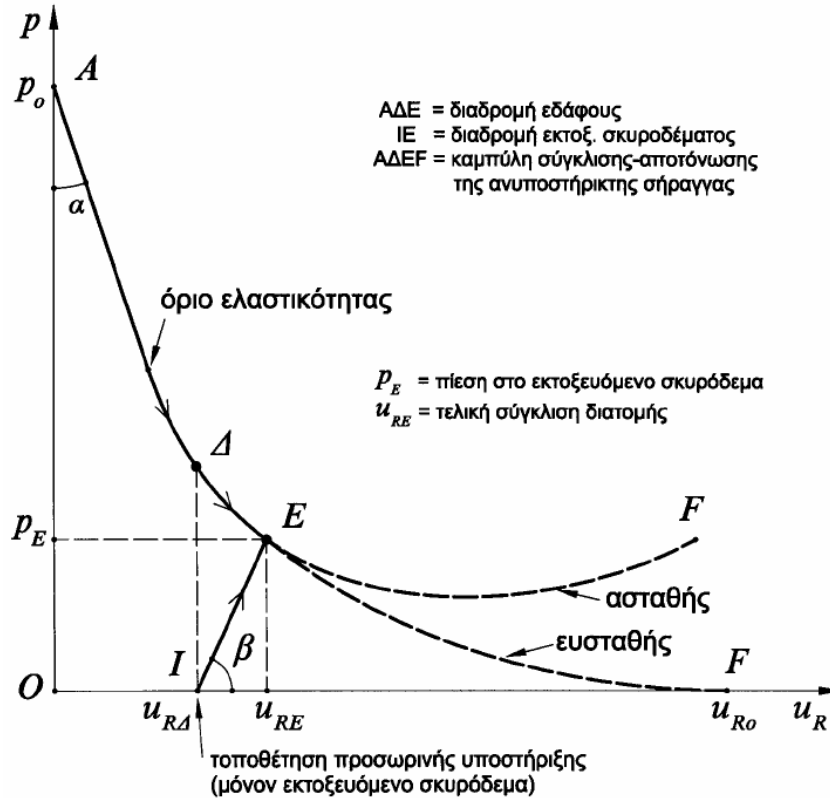
$$\lambda = f\left(\frac{x}{R}, N_s, k, K\right) \quad 3.11$$

3.3.4 Καμπύλες σύγκλισης – αποτόνωσης σε συνδυασμό με καμπύλες Panet-Chern

Ο συνδυασμός των καμπυλών Panet & Chern και της καμπύλης σύγκλισης – αποτόνωσης της ανυποστήρικτης διατομής επιτρέπει την εκτίμηση της σύγκλισης του τοιχώματος σε κάθε θέση (x) του άξονα της σήραγγας.

Αρχικά, υπολογίζεται ο συντελεστής υπερφόρτισης N_s και από την καμπύλη Panet ή Chern για τη συγκεκριμένη θέση (x) υπολογίζεται ο βαθμός αποτόνωσης (λ) και έπειτα, η ισοδύναμη εσωτερική πίεση $p=p_0(1-\lambda)$. Υπολογίζεται η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης με βάση τις ελαστικές παραμέτρους (E, ν) και τις παραμέτρους αντοχής (c, ϕ) του εδάφους. Τέλος, από την καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης και για την τιμή της πίεσης (p) που υπολογίστηκε παραπάνω, υπολογίζεται η σύγκλιση της διατομής (u_R).

Μέσω των καμπυλών Panet, λοιπόν, μπορεί να υπολογισθεί η εσωτερική πίεση (p) που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη απόσταση (x) τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης ως προς το μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας. Στη συνέχεια, η προσομοίωση της διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας γίνεται σε δύο φάσεις. Αρχικά, η εσωτερική πίεση μειώνεται από p_0 σε p, όπου $p < p_0$. Η σύγκλιση της διατομής που προκύπτει αντιστοιχεί στη μετακίνηση του τοιχώματος πριν από την τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης. Έπειτα, τοποθετούνται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης (αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, κλπ) και τελικά η εσωτερική πίεση από p, μηδενίζεται. Η μείωση της εσωτερικής πίεσης προκαλεί κάποια περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος και φόρτιση των μέτρων άμεσης υποστήριξης. Αντιλαμβανόμαστε, ότι όσο αργότερα τοποθετηθούν τα μέτρα άμεσης υποστήριξης τόσο μικρότερο φορτίο θα αναλάβουν και τόσο μεγαλύτερη θα είναι η συνολική σύγκλιση του τοιχώματος.



Σχήμα 3.4: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με άμεση υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

3.3.5 Μέθοδος “χαλάρωσης”

Ένας εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού των συγκλίσεων πριν την τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης είναι η μέθοδος της “χαλάρωσης”. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, απομειώνεται το μέτρο ελαστικότητας στο εσωτερικό της διατομής της σήραγγας, με συνέπεια την σύγκλιση του τοιχώματος, σύγκλιση που δημιουργεί αντίστοιχα η μείωση της εσωτερικής πίεσης που αναφέραμε παραπάνω.

Το απομειωμένο μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{(1-2\nu)(1-\lambda)}{(1-2\nu)+\lambda} \quad 3.12$$

Όπου:

E : απομειωμένο μέτρο ελαστικότητας της περιβάλλουσας βραχώμαζας.

E_0 : αρχικό μέτρο ελαστικότητας της περιβάλλουσας βραχώμαζας.

ν : λόγος Poisson της περιβάλλουσας βραχώμαζας.

λ : συντελεστής αποτόνωσης.

4 ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τελική επένδυση της σήραγγας αποτελεί μία κατασκευή τόσο γεωτεχνικής όσο και δομοστατικής φύσεως, η οποία τοποθετείται μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης και ισορρόπησης της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας.

Η άμεση υποστήριξη στοχεύει στη δημιουργία ενός ασφαλούς περιβάλλοντος εργασίας κατά τη διάρκεια της διάνοιξης. Η τελική επένδυση τοποθετείται με σκοπό την ανάληψη των φορτίσεων που αναμένεται να προκύψουν στην τεχνική διάρκεια ζωής του έργου, τη δημιουργία μίας ασφαλούς, σταθερής και ανθεκτικής διατομής, εξασφαλίζοντας μία μακροχρόνια περίοδο λειτουργικότητας. Ο σχεδιασμός της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της σήραγγας και τις απαιτήσεις που ορίζει ο κύριος του έργου, όσον αφορά στο συντελεστή ασφαλείας του έργου, την αισθητική και το κόστος.

4.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΤΕΛΙΚΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Η τελική (μόνιμη) επένδυση της σήραγγας κατασκευάζεται όταν το σύστημα της αρχικής υποστήριξης έχει φθάσει σε συνθήκες ισορροπίας. Η τελική επένδυση προσφέρει αυξημένη ασφάλεια στο χρόνο ζωής του έργου, δημιουργεί μία ομοιόμορφη εσωτερική επιφάνεια και βελτιώνει τη στεγανότητά της. Η τελική επένδυση των σηράγγων κατασκευάζεται, συνήθως, από οπλισμένο σκυρόδεμα, έγχυτο επί τόπου.

Στο πρώτο στάδιο κατασκευής της τελικής επένδυσης περιλαμβάνεται η τοποθέτηση γεωυφάσματος. Οι υδατοστεγανωτικές μεμβράνες είναι συνήθως από PVC ή από πολυαιθυλένιο και τοποθετούνται μεταξύ της άμεσης και της οριστικής επένδυσης της σήραγγας, προστατευόμενες με γεωυφάσματα. Στη συνέχεια τοποθετείται ο οπλισμός και τέλος το σκυρόδεμα με τη χρήση ειδικού μεταλλότυπου.



Εικόνα 4.1: Στεγανωτική μεμβράνη τελικής επένδυσης.



Εικόνα 4.2: Μεταλλότυπος για τη σκυροδέτηση της τελικής επένδυσης (χελώνα).

4.3 ΦΟΡΤΙΑ ΤΕΛΙΚΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Όπως αναφέρθηκε, η τελική επένδυση είναι αναγκαία, μεταξύ άλλων, και για την ανάληψη των φορτίων που αναμένεται να αναπτυχθούν κατά την τεχνική διάρκεια ζωής της σήραγγας. Παρακάτω αναλύονται τα σημαντικότερα από αυτά.

4.3.1 Φορτία από την άμεση υποστήριξη

Τα αγκύρια, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τα χαλύβδινα πλαίσια είναι στοιχεία της άμεσης υποστήριξης που συνήθως αγνοείται η δράση τους στην τελική επένδυση. Μερικές φορές όμως, είναι πιθανή η συνεισφορά τους στην ανάληψη φορτίων της τελικής επένδυσης.

▪ Αγκύρια

Η σταδιακή αποφόρτιση των αγκυρίων της άμεσης υποστήριξης, που προκαλείται από την διάβρωσή τους αλλά και την παγίωση της κεφαλής τους στην τελική επένδυση, σε περίπτωση γεωυλικού με έντονη ερπυστική συμπεριφορά, έχει σαν συνέπεια την φόρτιση της τελικής επένδυσης. Συνήθως, η δράση των αγκυρίων στην τελική επένδυση των σηράγγων αγνοείται.

▪ Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Η φόρτιση της τελικής επένδυσης από το εκτοξευμένο σκυρόδεμα οφείλεται στην έντονη ερπυστική συμπεριφορά του και στη μειωμένη ανθεκτικότητά του (Μπακογιάννης, 2004). Ο υπολογισμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος γίνεται με θεώρηση συντελεστή ασφαλείας προσωρινού έργου. Για να ληφθεί υπόψη στην τελική επένδυση, θα πρέπει να θεωρηθεί συντελεστής ασφαλείας μόνιμου έργου με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του και μεταφορά του φορτίου που δεν μπορεί να αναλάβει στην τελική επένδυση. Το φορτίο τελικά είναι η διαφορά του συντελεστή ασφαλείας και ερπυσμού του εκτοξευόμενου και οπλισμένου σκυροδέματος, της άμεσης και τελικής επένδυσης αντίστοιχα.

▪ Χαλύβδινα πλαίσια

Η αποφόρτισή τους οφείλεται στην ανεπαρκή επικάλυψη και στη διάβρωση που προκαλείται από τη δράση του υπόγειου νερού.

4.3.2 Φορτία από το περιβάλλον γεωυλικό

Το περιβάλλον γεωυλικό κατά τη διάρκεια ζωής του έργου, υπόκειται σε μεταβολές των μηχανικών-φυσικοχημικών ιδιοτήτων του, που αυξάνουν τα φορτία που πρέπει να αναλάβουν τα μέτρα άμεσης υποστήριξης. Τέτοια φαινόμενα είναι ο ερπυσμός και η διόγκωση.

Ο **ερπυσμός**, φαινόμενο το οποίο θα αναλυθεί εκτενώς παρακάτω, είναι ένας από τους βασικούς λόγους της ανάγκης κατασκευής της τελικής επένδυσης. Είναι ένα χρονικά εξαρτώμενο φαινόμενο κατά τη διάρκεια του οποίου παρατηρείται αύξηση των παραμορφώσεων, ενώ το μέτρο των επιβαλλόμενων τάσεων παραμένει σταθερό. Η τελική επένδυση παρεμποδίζει την εξέλιξη αυτών των παραμορφώσεων με αποτέλεσμα την αύξηση της φόρτισής της. Είναι ένα πολύπλοκης φύσης φαινόμενο το οποίο όμως δεν θα

πρέπει να αγνοείται, κυρίως σε σήραγγες με μεγάλο ύψος υπερκειμένων και φτωχής ποιότητας βραχώμαζες.

Η **διόγκωση** είναι επίσης φαινόμενο χρονικά εξαρτώμενο, που οφείλεται στην προσρόφηση ποσότητας ύδατος από το γεωυλικό, με αποτέλεσμα τη διόγκωσή του. Η τελική επένδυση εμποδίζει την διόγκωση, άρα αυξάνονται οι πιέσεις από το γεωυλικό σε αυτήν.

4.3.3 Σεισμικά φορτία

Η θέση της σήραγγας αποτελεί σημαντικό στοιχείο για τη συμπεριφορά της κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος. Σε σήραγγες που διασχίζουν ρήγματα και κλιτυοσήραγγες η σεισμική δράση μπορεί να προκαλέσει μόνιμες μετακινήσεις και σοβαρές βλάβες στο έργο. Ακόμη, όταν η σήραγγα είναι εύκαμπτη σε σχέση με το περιβάλλον γεωυλικό, η τελική επένδυση ακολουθεί τις παραμορφώσεις του γεωυλικού χωρίς να αναπτύσσεται επιπλέον φόρτιση. Οι σεισμικές παραμορφώσεις απορροφώνται από τους αρμούς που κατασκευάζονται. Αντίθετα, όταν η σήραγγα είναι δύσκαμπτη σε σχέση με το γεωυλικό, το έργο ανθίσταται και αναπτύσσεται πρόσθετη ένταση στην τελική επένδυση.

4.3.4 Φορτία από υδατικές πιέσεις

Τα φορτία από υδατικές πιέσεις εξαρτώνται από τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα σε σχέση με τη σήραγγα. Όταν η σήραγγα βρίσκεται κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα έχουμε εξωτερικές υδατικές πιέσεις, ενώ όταν λειτουργεί ως αγωγός μεταφοράς του ύδατος έχουμε εσωτερικές πιέσεις. Το σύστημα αποστράγγισης στεγάνωσης πρέπει πάντα να πραγματοποιείται και η εξασφάλιση της τεχνικής διάρκειας ζωής του είναι ένα πολύ κρίσιμο και σημαντικό θέμα.

4.3.5 Φορτία από τη λειτουργία της σήραγγας

Πρόκειται για φορτία που προκύπτουν λόγω χρήσης της σήραγγας, όπως παραδείγματος χάρη τα φορτία των οχημάτων ή συρμών που κινούνται εντός της σήραγγας. Φορτία που προκαλούνται από την πρόσκρουση οχήματος, έκρηξη, πυρκαγιά, αλλά και από την τοποθέτηση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού ή επικαλύψεων για αισθητικούς λόγους.

4.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΕΛΙΚΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Για τον προσδιορισμό των φορτίων που ασκούνται στην τελική επένδυση χρησιμοποιούνται οι εξής κατηγορίες μεθόδων:

- Εμπειρικές μέθοδοι
- Αναλυτικές μέθοδοι
- Αριθμητικές μέθοδοι

4.4.1 ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Μέσω εμπειρικών τύπων οι μέθοδοι αυτοί μας δίνουν το κατακόρυφο και οριζόντιο φορτίο που ασκείται στην τελική επένδυση. Κάθε μία μέθοδος βασίζεται σε παραδοχές, κυρίως σε σχέση με το βάθος της σήραγγας, την ενδοσιμότητα της επένδυσης και την ενεργοποίηση της περιβάλλουσας βραχώμαζας στην ανάληψη φορτίων.

4.4.1.1 Μέθοδος του δείκτη RMR

Η μέθοδος προτάθηκε από τον Unal (1983) και δίνει την κατακόρυφη (p_v) και οριζόντια (p_h) πίεση στην επένδυση της σήραγγας. Είναι αποτέλεσμα παρατήρησης σηράγγων εύρους 5-10 μέτρων, που διανοίχθηκαν με τη μέθοδο NATM σε βραχώμαζες με $RMR > 50$ και βάθους μέχρι 100 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους. Τα φορτία που προκύπτουν επί της τελικής επένδυσης είναι σχετικά μικρά γιατί κατά τη διάνοιξη ενεργοποιείται η αντοχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας, ενώ η αντοχή αυτή δεν μειώνεται σημαντικά λόγω του μικρού βαθμού ερπυσμού της βραχώμαζας με $RMR > 50$.

$$p_v = \gamma H_t \quad 4.1$$

$$H_t = \left(\frac{100 - RMR}{100} \right) B \quad 4.2$$

$$p_h = \lambda p_v \quad 4.3$$

Όπου:

B: εύρος της σήραγγας.

γ : ειδικό βάρος της βραχώμαζας.

RMR: δείκτης ποιότητας της βραχώμαζας (κατά Bieniawski).

λ : συντελεστής που μπορεί να εκτιμηθεί όπως στη μέθοδο NGI.

4.4.1.2 Μέθοδος NGI

Η μέθοδος, η οποία προτάθηκε από τους Barton et al. (1974), βασίζεται στον εμπειρικό δείκτη ποιότητας της βραχώμαζας Q που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad 4.4$$

όπου:

RQD: Δείκτης Ποιότητας Βραχώμαζας.

J_n : συντελεστής αριθμού ασυνεχειών.

J_r : συντελεστής τραχύτητας ασυνεχειών.

J_a : συντελεστής εξαλλοίωσης ασυνεχειών.

J_w : συντελεστής παρουσίας νερού.

SRF: συντελεστής τασικού πεδίου (Stress Relief Factor).

Υπολογίζεται η κατακόρυφη πίεση στην οροφή της σήραγγας και η οριζόντια πίεση στις παρειές, εφόσον η σήραγγα έχει διανοιχθεί με τη μέθοδο NATM και τα μέτρα υποστήριξης έχουν προκύψει βάση της μεθόδου NGI για βραχώμαζες σχετικά καλής ποιότητας ($Q > 0.05$). Συνεπώς, τα φορτία που προκύπτουν για βραχώμαζες με $Q < 0.05$ είναι υπερβολικά μεγάλα.

$$p_v = \left(\frac{2}{3J_r} \right)^{\frac{1}{2}} J_n^2 Q^{\frac{-1}{3}} \quad 4.5$$

$$p_h = \lambda p_v \quad 4.6$$

Όπου:

Πίνακας 4.1: Τιμές συντελεστών λ με βάση τη μέθοδο NGI.

Q	λ
$Q > 10$	0.58
$0.1 < Q < 10$	0.74
$Q < 0.1$	1.0

4.4.1.3 Μέθοδος Terzaghi (1946)

Η μέθοδος, η οποία προτάθηκε από τον Terzaghi (1946), αναπτύχθηκε για σήραγγες όπου μπορεί να αναπτυχθεί το φαινόμενο θόλου πάνω από τη στέψη της σήραγγας, δηλαδή για σήραγγες με πάχη υπερκειμένων $D > 1.5(b+h)$. Η μέθοδος αυτή προτάθηκε στη δεκαετία του 1940 για σήραγγες εύρους έως 5 μέτρων και άμεση υποστήριξη με ξυλοδοκούς ή χαλύβδινα πλαίσια, δηλαδή πριν από την εφαρμογή των σύγχρονων μεθόδων υποστήριξης σήραγγων με αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η κατακόρυφη πίεση γαιών στην οροφή της σήραγγας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$p_v = \gamma H_p \quad 4.7$$

όπου οι τιμές του φορτιζοντος ύψους γαιών (H_p) δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4.2: Τιμές της παραμέτρου H_p με τη μέθοδο Terzaghi.

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	ΥΨΟΣ H_p
Συμπαγής βράχος πρακτικώς χωρίς διακλάσεις	0
Συμπαγής βραχώμαζα με μικρό αριθμό τυχαίων διακλάσεων	$0 \div 0.10b$
Συμπαγής βραχώμαζα με τυχαίες μικρές διακλάσεις	$0 \div 0.25b$
Κερματισμένη βραχώμαζα σε επιμέρους συμπαγή τεμάχια με ανοιχτές ή κλειστές διακλάσεις χωρίς υλικό πλήρωσης	$0.25 \div 0.35(b+h)$
Βραχώμαζα ως άνω αλλά εντονότερα κερματισμένη	$0.35 \div 1.00(b+h)$
Κατακερματισμένη βραχώμαζα με ικανοποιητική εμπλοκή μεταξύ των τεμαχίων	$1.0 \div 1.5(b+h)$
Απόθεση πυκνής άμμου	$0.60 \div 1.40(b+h)$
Απόθεση χαλαρής άμμου	$1.00 \div 1.40(b+h)$
Συνθλίβοντα εδάφη, σήραγγες σε μικρά βάθη	$1.10 \div 2.10(b+h)$
Συνθλίβοντα εδάφη, σήραγγες σε μεγάλα βάθη	$2.10 \div 4.50(b+h)$

Όπου:

b: εύρος της σήραγγας.

h: ύψος της σήραγγας.

4.4.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

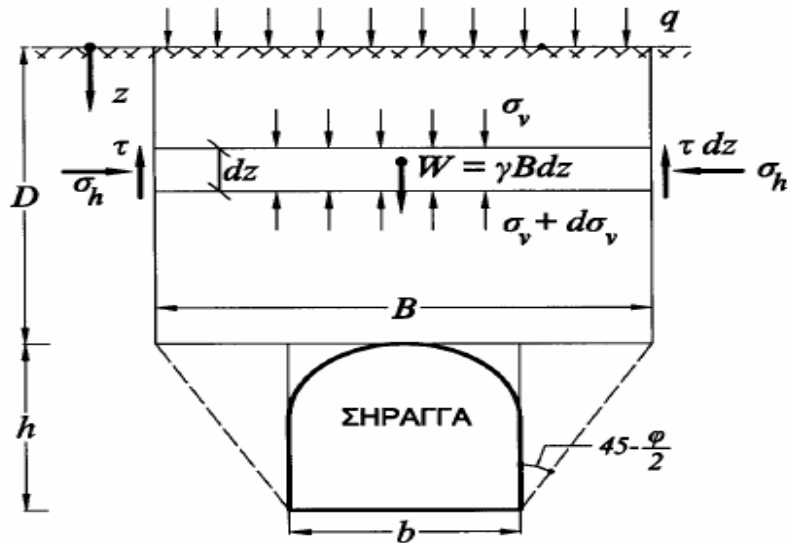
Οι αναλυτικές μέθοδοι βασίζονται στην εκτίμηση των διαστάσεων μιας εδαφικής μάζας πάνω από τη στέψη της σήραγγας η οποία φορτίζει την επένδυση. Η τελική φόρτιση προκύπτει μέσω αναλυτικών σχέσεων, οι οποίες έχουν ως κύριες παραμέτρους τα χαρακτηριστικά του γεωυλικού και τις διαστάσεις της σήραγγας.

4.4.2.1 Αναλυτική μέθοδος Terzaghi

Η αναλυτική μέθοδος Terzaghi (1943) βασίζεται στην τοξωτή λειτουργία του εδάφους και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το βάθος στο οποίο διανοίγεται η σήραγγα.

▪ Σήραγγες σε μικρά βάθη ($D < 2.5 B$)

Λόγω της μικρής απόστασης της σήραγγας από την επιφάνεια του εδάφους, δεν είναι δυνατόν να αναπτυχθεί πλήρως εδαφικό τόξο πάνω από τη στέψη της σήραγγας.



Σχήμα 4.1: Εκτίμηση φορτίων στην επένδυση σήραγγας κατά τη μέθοδο Terzaghi.

Με την ισορροπία του στοιχείου πάχους dz , καταστρώνεται μια διαφορική εξίσωση η οποία με την επίλυση της και με την επιβολή των συνοριακών συνθηκών καταλήγει στις βασικές εξισώσεις υπολογισμού των φορτίων στην τελική επένδυση.

$$p_v = qe^{-\Lambda D} + \frac{1}{\Lambda} \left(\gamma - \frac{2c}{B} \right) (1 - e^{-\Lambda D}) \quad 4.8$$

$$p_h = (p_v + \gamma d) \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) s \quad 4.9$$

$$\Lambda = \frac{2K}{B} \tan \phi \quad 4.10$$

Όπου, K = συντελεστής οριζόντιων τάσεων, για τον οποίο η σύσταση του Terzaghi είναι $K=1$, p_v = η πίεση στην οροφή της σήραγγας, p_h = η οριζόντια τάση στο επίπεδο της σήραγγας, θεωρώντας ότι στην παρειά της σήραγγας αναπτύσσεται ενεργητική κατάσταση τάσεων. Τα υπόλοιπα μεγέθη διακρίνονται στο Σχήμα 4.1.

▪ Σήραγγες σε μεγάλα βάθη ($D > 2.5 B$)

Η κατασκευή της σήραγγας δεν επηρεάζει τις ανώτερες εδαφικές στρώσεις, οι οποίες απλώς φορτίζονται με το βάρος τους το υποκείμενο εδαφικό τόξο. Θεωρώντας ότι το εδαφικό τόξο αναπτύσσεται μέχρι ύψους $H=2.5B$ πάνω από τη στέψη της σήραγγας, οι ανώτερες εδαφικές στρώσεις ασκούν μία γεωστατική πίεση:

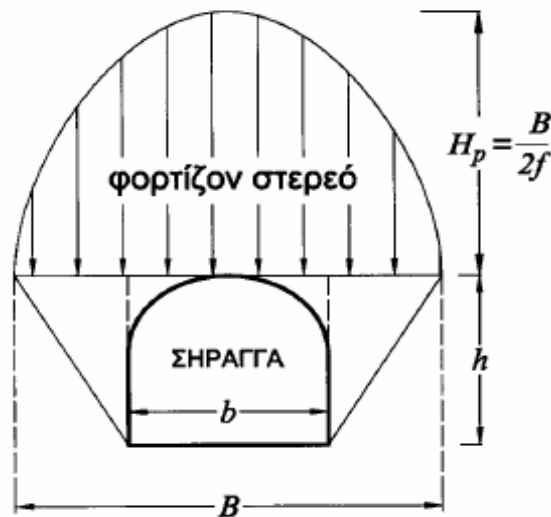
$$q = \gamma(D - H) \quad 4.11$$

ενώ το κατακόρυφο φορτίο πάνω από τη στέψη της σήραγγας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$p_v = \gamma(D-H)e^{-\lambda H} + \frac{1}{\Lambda} \left(\gamma - \frac{2c}{B} \right) (1 - e^{-\lambda H}) \quad 4.12$$

Το οριζόντιο φορτίο (p_h) υπολογίζεται όπως και στην περίπτωση των σηράγγων σε μικρά βάθη.

4.4.2.2 Μέθοδος Protodyakonov (1948) (Ρωσική μέθοδος)



Σχήμα 4.2: Εκτίμηση φορτίων στην επένδυση σήραγγας κατά τη μέθοδο Protodyakonov.

Η μέθοδος Protodyakonov (1948) αναπτύχθηκε για σήραγγες σε σχετικά μικρά βάθη και βραχώδεις σχετικώς καλής ποιότητας με $RMR > 40$. Διαφορετικά δίνει υπερβολικά μικρές τιμές της πίεσης στην επένδυση της σήραγγας. Επίσης, η μέθοδος θεωρεί ότι η εδαφική μάζα που φορτίζει τη στέψη της σήραγγας είναι παραβολική και έχει μέγιστο ύψος (πάνω από τη στέψη της σήραγγας) ίσο με $H_p = \frac{B}{2f}$ με $B = b + 2h \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)$

Όπου:

b, h : το εύρος και το ύψος της σήραγγας αντίστοιχα.

f : εμπειρικός συντελεστής που λαμβάνει τις εξής τιμές:

- Συνεκτικά εδαφικά υλικά: $f = \frac{c}{\sigma_c} + \tan \varphi$, σ_c = αντοχή του εδάφους σε ανεμπόδιση θλίψη.
- Βραχώδη υλικά: $f = \frac{\sigma_c}{100}$, σ_c = αντοχή της βραχώδους σε μονοαξονική θλίψη (kg/cm^2)

Η κατακόρυφη πίεση γαιών στη στέψη της σήραγγας έχει παραβολική κατανομή με μέγιστη τιμή στο μέσον της στέψης:

$$p_{v,max} = \gamma H_p$$

4.13

Η οριζόντια πίεση στο τοίχωμα της σήραγγας μπορεί να υπολογισθεί με παραδοχή αντίστοιχη με την παραδοχή της μεθόδου Terzaghi. Για τον υπολογισμό των τελικών φορτίων σχεδιασμού της τελικής επένδυσης, συνίσταται μία προσαύξηση των ανωτέρων τιμών, λόγω επιρροής ερπυστικών φαινομένων, σύμφωνα με τον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Συντελεστές προσαύξησης λόγω ερπυστικών παραμορφώσεων.

ΠΙΕΣΗ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗΣ
P_v	1.50
P_h	0.2÷1.2

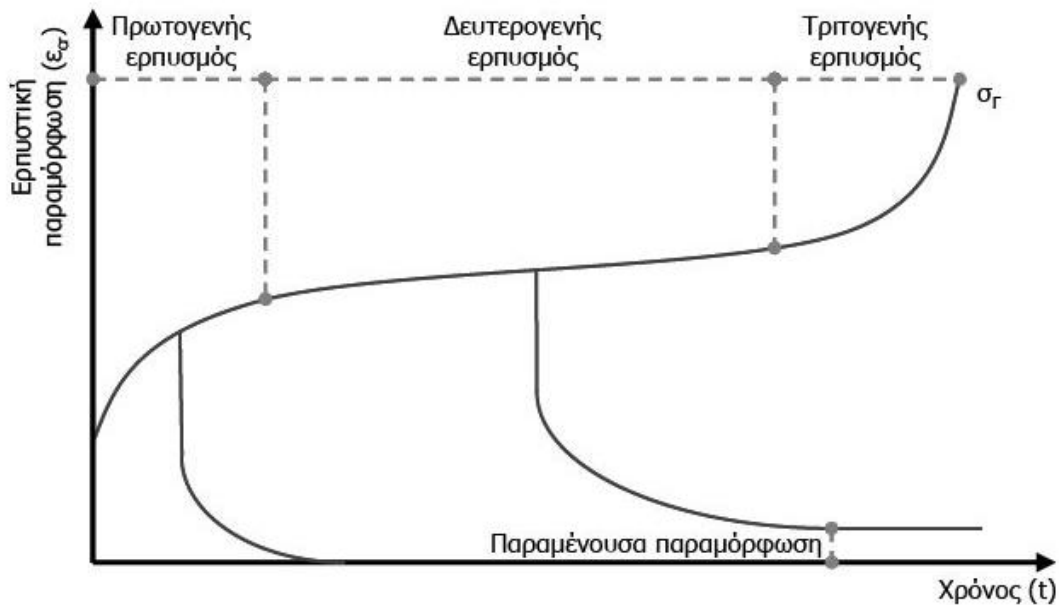
5 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΕΡΠΥΣΜΟΥ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πολλές φορές η μηχανική συμπεριφορά αρκετών γεωυλικών επηρεάζεται από φαινόμενα τα οποία εξαρτώνται από το χρονικό παράγοντα, ο οποίος εκφράζεται είτε μέσω της χρονικής διάρκειας της φόρτισης, είτε μέσω του ρυθμού επιβολής της. Τα υλικά αυτά ονομάζονται βισκώδη ή ιξώδη και περιγράφονται από τη θεωρία της βισκοελαστικότητας. Ο ερπυσμός είναι ένα φαινόμενο που ανήκει στην παραπάνω κατηγορία, δηλαδή χρονικά εξαρτημένης συμπεριφοράς.

Ερπυσμός ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο παρατηρείται συνεχής αύξηση των παραμορφώσεων των υλικών συναρτήσει του χρόνου, υπό την επίδραση σταθερής τάσεως, υπό σταθερή θερμοκρασία. Όσον αφορά στις σήραγγες, που μας απασχολούν στην παρούσα διπλωματική εργασία, η κατασκευή της άμεσης και τελικής υποστήριξης παρεμποδίζει την ανάπτυξη των παραμορφώσεων που προκαλούνται από τον άμεσο και βραχυχρόνιο ερπυσμό αντίστοιχα, με αποτέλεσμα την αύξηση των πιέσεων στο κέλυφος της σήραγγας. Επομένως, το φαινόμενο του ερπυσμού μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την κατασκευή της σήραγγας, αλλά και γενικά, διάφορα έργα πολιτικού μηχανικού, συνεπώς η κατανόηση και ερμηνεία του αποκτούν ιδιαίτερη βαρύτητα.

Από δοκιμές ερπυσμού προκύπτει η χαρακτηριστική καμπύλη παραμόρφωσης-χρόνου (καμπύλη ερπυσμού), στην οποία διακρίνονται όλες οι φάσεις του ερπυσμού (Σχήμα 5.1). Στις δοκιμές από τις οποίες εξάγεται η καμπύλη, αρχικά, επιβάλλεται μία τάση με ταχεία αύξηση, η οποία στη συνέχεια διατηρείται σταθερή. Λόγω της ελαστικής αντίδρασης του υλικού παρατηρείται μία στιγμιαία παραμόρφωση, η οποία ακολουθείται από τον **πρωτογενή** (μεταβατικό) ερπυσμό, όπου έχουμε αύξηση των ερπυστικών παραμορφώσεων με μειούμενο ρυθμό. Ο πρωτογενής ερπυσμός προσεγγίζει ένα σταθερό ρυθμό μεταβολής των ερπυστικών παραμορφώσεων, ο οποίος οριοθετεί τη μετάβαση στο **δευτερογενή** (σταθερό) ερπυσμό. Με τη φόρτιση πέρα από κάποιο όριο, το δευτερογενή ερπυσμό ακολουθεί ο **τριτογενής** (επιταχυνόμενος) ερπυσμός. Στο σημείο αυτό έχουμε αύξηση των ερπυστικών παραμορφώσεων με αυξανόμενο ρυθμό, καταλήγοντας σε αστοχία.



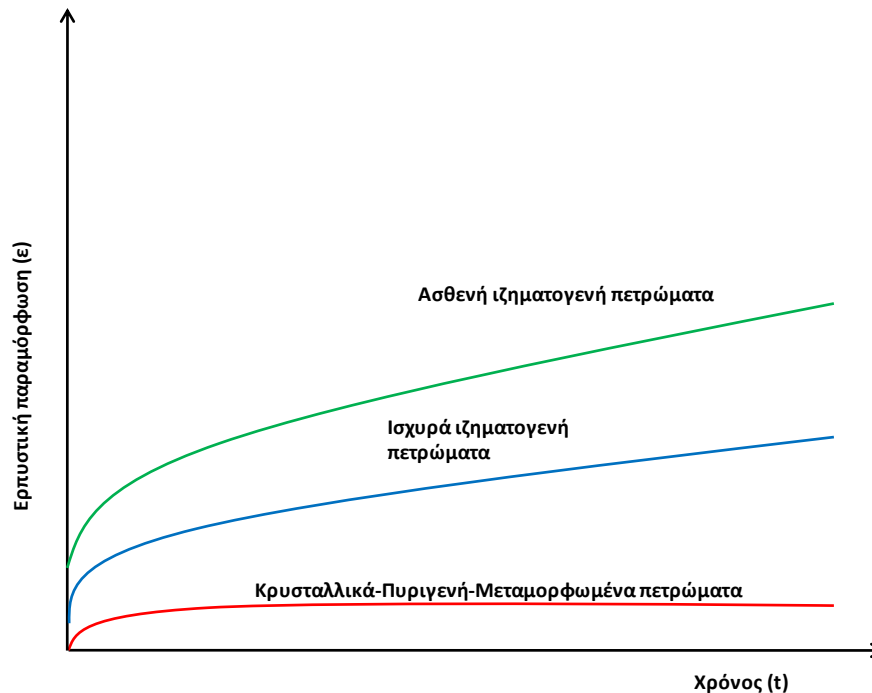
Σχήμα 5.1: Χαρακτηριστική καμπύλη ερπυστικής παραμόρφωσης-χρόνου.

5.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΕΡΠΥΣΜΟΥ

Η εμφάνιση του φαινομένου του ερπυσμού, τόσο σε βραχώδη όσο και σε εδαφικά γεωυλικά, επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, οι οποίοι έχουν αναγνωριστεί και μελετηθεί από διάφορους ερευνητές. Για την αποτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης ερπυσμού, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλοι οι γνωστοί παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν το φαινόμενο, έστω και ποιοτικά, αν η ποσοτική ανάλυση τους δεν είναι εφικτή. Το σύνολο των παραγόντων αυτών αναλύεται συνοπτικά παρακάτω.

5.2.1 Φύση του γεωυλικού-μηχανικά χαρακτηριστικά

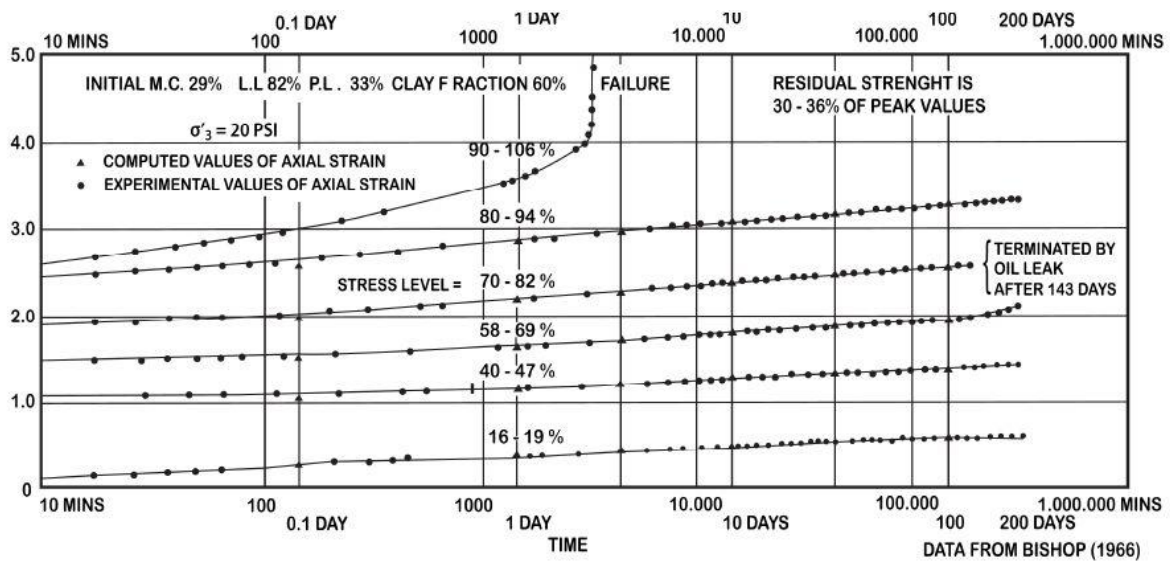
Σε ασθενή βραχώδη γεωυλικά, όπως είναι οι σχιστόλιθοι, οι ιλυόλιθοι, το ορυκτό αλάτι και η ποτάσα, η ερπυστική συμπεριφορά είναι έντονη και το φαινόμενο του ερπυσμού εμφανίζεται σαν ροή μάζας. Στα ισχυρά ιζηματογενή πετρώματα, η ερπυστική συμπεριφορά είναι λιγότερο έντονη, ενώ στα κρυσταλλικά, μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα, όπως ο γρανίτης, ο ασβεστόλιθος, τα μάρμαρα, για να παρουσιαστεί ερπυσμός πρέπει η επιβαλλόμενη τάση να είναι ικανή να μεταβάλλει το δίκτυο των μικρορωγμών (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2: Ποιοτική απεικόνιση ερπυστικών παραμορφώσεων για διάφορα πετρώματα, υπό την επιβολή ίδιας τάσης.

5.2.2 Επιβαλλόμενη ένταση και ρυθμός επιβολής φόρτισης

Το μέγεθος της επιβαλλόμενης έντασης επηρεάζει το μέγεθος των ερπυστικών παραμορφώσεων και συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το φορτίο που ασκείται σε ένα γεωλικό, τόσο αυξάνονται το μέγεθος και ο ρυθμός των ερπυστικών παραμορφώσεων, ενώ ο χρόνος για την αστοχία μικραίνει. Γενικά, όταν η επιβαλλόμενη ένταση είναι μικρή αναπτύσσεται μόνο πρωτογενής ερπυσμός, ενώ με απομάκρυνση της φόρτισης οι ερπυστικές παραμορφώσεις μηδενίζονται. Για μεγαλύτερη ένταση, παρατηρούμε ανάπτυξη πρωτογενούς και δευτερογενούς ερπυσμού, η απομάκρυνση της οποίας οδηγεί σε παραμένουσες παραμορφώσεις. Τέλος, για πολύ μεγάλη ένταση αναπτύσσεται τριτογενής ερπυσμός οδηγώντας το γεωλικό σε αστοχία. Στο Σχήμα 5.3 διακρίνεται η έντονη αυτή επίδραση του επιπέδου της επιβαλλόμενης έντασης στην ερπυστική παραμόρφωση.

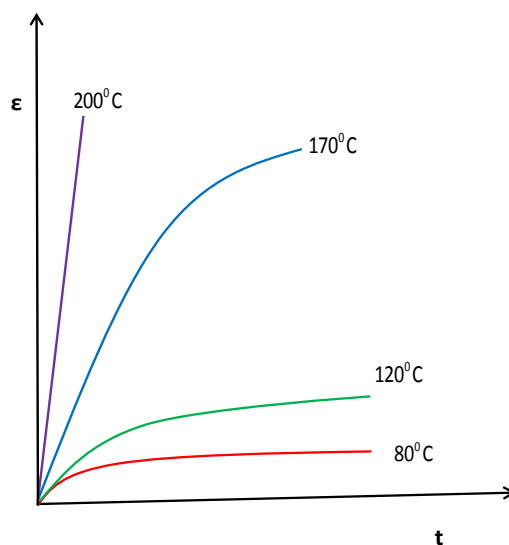


Σχήμα 5.3: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών ερπυσμού για διάφορα επίπεδα επιβαλλόμενης έντασης (Bishop,1966; Από Singh & Mitchell, 1968).

Η ταχύτητα επιβολής της φόρτισης επηρεάζει εξίσου σημαντικά το μέγεθος της ερπυστικής παραμόρφωσης. Όσο αυξάνεται ο χρόνος επιβολής της φόρτισης, παρατηρείται ανάπτυξη ερπυστικών παραμορφώσεων με αποτέλεσμα σταδιακή μείωση της δυσκαμψίας και της τάσης αστοχίας.

5.2.3 Θερμοκρασία και υδατική πίεση

Η αύξηση της τιμής της θερμοκρασίας, αυξάνει το ρυθμό παραμόρφωσης λόγω ερπυσμού (Σχήμα 5.4). Αυτό οφείλεται στην επίδραση που έχει η θερμοκρασία στη δομή των υλικών. Για παράδειγμα, στους βραχώδεις σχηματισμούς, λόγω της διαφορετικής θερμικής διαστολής γειτονικών κρυστάλλων στη μάζα του πετρώματος, δημιουργούνται θερμικές διαρρήξεις που επιταχύνουν το φαινόμενο του ερπυσμού.



Σχήμα 5.4: Εξάρτηση θερμοκρασίας και ερπυστικών παραμορφώσεων.

Τέλος, η ύπαρξη νερού στους πόρους ενός πετρώματος, μειώνει την αντοχή του. Συνεπώς, καθώς αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας στο πέτρωμα, αυξάνεται το μέγεθος και ο ρυθμός των παραμορφώσεων λόγω ερπυσμού.

5.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΕΡΠΥΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Για την κατανόηση της χρονικά εξαρτώμενης μηχανικής συμπεριφοράς των γεωυλικών, χρησιμοποιούνται διάφορα προσομοιώματα, τα οποία μπορούν να χωριστούν, σύμφωνα με τους Liingaard et al. (2004), σε εμπειρικά και αναλυτικά προσομοιώματα. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου του ερπυσμού, κανένα προσομοίωμα δεν το περιγράφει επαρκώς λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους που το επηρεάζουν.

5.3.1 Εμπειρικά προσομοιώματα

Από πολλά πειράματα μονοαξονικής θλίψης έχουν προκύψει εμπειρικές σχέσεις οι οποίες προσεγγίζουν ικανοποιητικά την ερπυστική συμπεριφορά ενός γεωυλικού, χωρίς όμως να την εξηγούν επαρκώς. Γενικά, οι εμπειρικές αυτές σχέσεις περιέχουν εκθετικές, λογαριθμικές, παραβολικές ή υπερβολικές συναρτήσεις. Προσομοιώματα εκθετικής ή λογαριθμικής μορφής χρησιμοποιούνται κυρίως για την περιγραφή του πρωτογενούς και ενός μεγάλου μέρους του δευτερογενούς ερπυσμού. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται παρακάτω τα εμπειρικά προσομοιώματα Power-Law (Από: Betten, 2005), Power-Law (Από: ABAQUS Documentation, 2009) και Singh & Mitchell (1968).

5.3.1.1 Ερπυστικό προσομοίωμα Power-Law (Από: Betten, 2005)

$$\varepsilon_{cr} = A\sigma^n t^m \quad 5.1$$

Όπου:

ε_{cr} : ερπυστική παραμόρφωση.

A, n, m: ερπυστικές παράμετροι γεωυλικού.

σ : επιβαλλόμενη διεκτροπική τάση q.

5.3.1.2 Ερπυστικό προσομοίωμα Power-Law (Από: ABAQUS Documentation, 2009)

$$\varepsilon_{cr} = \frac{A}{1+m} q^n t^{m+1} \quad 5.2$$

Όπου:

ε_{cr} : ερπυστική παραμόρφωση.

A, n, m: ερπυστικές παράμετροι γεωυλικού.

q: χαρακτηριστική ερπυστική τάση.

5.3.1.3 Ερπυστικό προσομοίωμα Singh & Mitchell (1968)

Από πειράματα ερπυσμού σε εδαφικά υλικά, το προσομοίωμα Singh & Mitchell (1968) καταλήγει ότι ο λογάριθμος του ρυθμού αύξησης της παραμόρφωσης είναι γραμμικά ανάλογος του λογάριθμου του χρόνου σύμφωνα με τη σχέση:

$$\log \dot{\varepsilon}_{cr} = m \log t \quad 5.3$$

Ακόμη, ο ρυθμός αύξησης της ερπυστικής παραμόρφωσης μεταβάλλεται εκθετικά ως προς το μέγεθος της επιβαλλόμενης διεκτροπικής τάσης.

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = A \varepsilon^{\bar{\alpha} \bar{D}} \left(\frac{t_1}{t} \right)^m \quad 5.4$$

$$\bar{\alpha} = \alpha D_{max} \quad 5.5$$

$$\bar{D} = \frac{D}{D_{max}} \quad 5.6$$

Όπου:

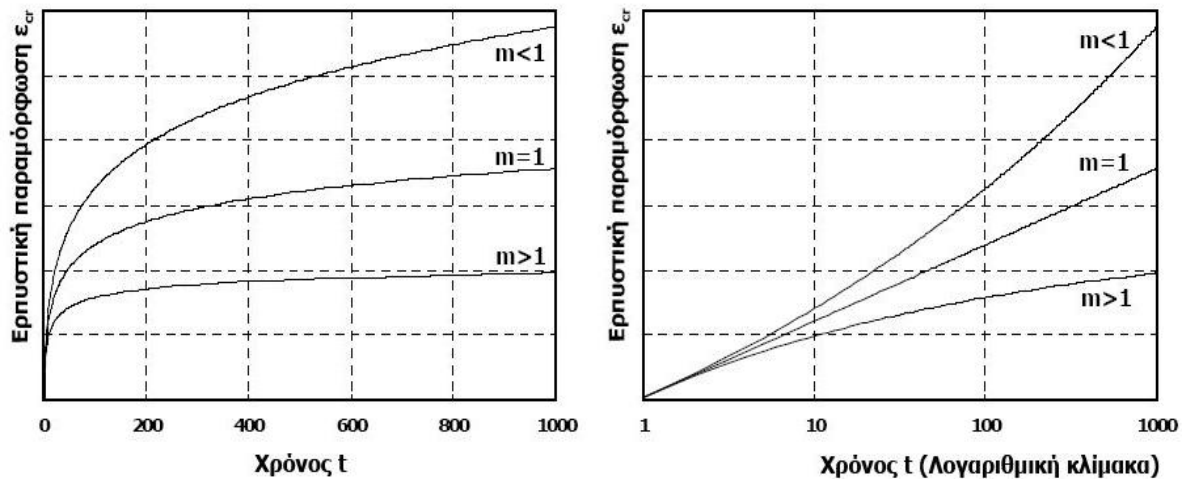
ε_{cr} : ερπυστική παραμόρφωση.

A, α , m: ερπυστικές παράμετροι γεωυλικού.

D: διεκτροπική τάση.

t_1 : χαρακτηριστική χρονική στιγμή.

Η τιμή της σταθεράς m επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την μορφή της καμπύλης ερπυστικής παραμόρφωσης. Για τιμές $m \leq 1$ η καμπύλη είναι συνεχώς αύξουσα, ενώ για τιμές $m > 1$ παρουσιάζει ασύμπτωτη όταν $t \rightarrow \infty$.



Σχήμα 5.5: Καμπύλη ερπυστικής παραμόρφωσης-χρόνου με βάση το προσομοίωμα Singh & Mitchell (1968) για διάφορες τιμές του συντελεστή m .

5.3.2 Αναλυτικά προσομοιώματα

Τα αναλυτικά προσομοιώματα προσφέρουν πλήρη μαθηματική περιγραφή της χρονικά εξαρτημένης συμπεριφοράς των υλικών και αποτελούνται από μηχανικά στοιχεία, όπως ελατήρια (ελαστικό στοιχείο), αποσβεστήρες (ιζώδες στοιχείο) και ολισθητήρες (πλαστικό στοιχείο). Τα προσομοιώματα αυτά είναι χρήσιμα για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών και επιτρέπουν τη διατύπωση καταστατικών νόμων. Διάφοροι συνδυασμοί των παραπάνω στοιχείων μπορούν να δώσουν μία μεγάλη ποικιλία μοντέλων ανάλογα με το αν συνδέονται παράλληλα ή σε σειρά.

5.3.2.1 Ελαστικό στοιχείο

Ένα στοιχείο χαρακτηρίζεται ως ελαστικό, όταν εκδηλώνει το σύνολο των παραμορφώσεων του ακαριαία με την επιβολή φόρτισης. Απομάκρυνση της φόρτισης έχει σαν αποτέλεσμα την επιστροφή του υλικού στην αρχική του κατάσταση. Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών αυτών προσομοιάζεται με ένα απλό ελατήριο (Σχήμα 5.6). Τα υλικά αυτά ακολουθούν το νόμο του Hooke και η σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης είναι γραμμική και ανεξάρτητη του χρόνου.

$$\sigma = K\varepsilon$$

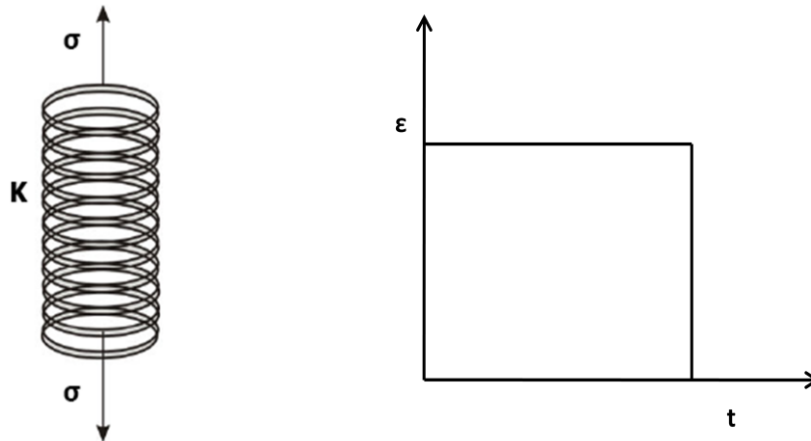
5.7

Όπου:

σ : ορθή ή διατμητική τάση.

K : σταθερά ελατηρίου (μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο διάτμησης).

ε : ορθή ή διατμητική παραμόρφωση.



Σχήμα 5.6: Το ελαστικό στοιχείο και η παραμόρφωσή του συναρτήσει του χρόνου.

5.3.2.2 Ιξώδες στοιχείο

Ιξώδες ονομάζεται το στοιχείο, στο οποίο ο ρυθμός μεταβολής της παραμόρφωσης είναι ανάλογος της επιβαλλόμενης τάσης. Το ιξώδες στοιχείο δεν λαμβάνει υπόψη την αρχική ελαστική παραμόρφωση, ενώ για κάθε νέα φόρτιση δημιουργεί νέες παραμορφώσεις, ανεξαρτήτως από το αν έχει υπάρξει προηγούμενη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να μην είναι δυνατή η προσομοίωση της συμπεριφοράς των διαφόρων υλικών. Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών αυτών προσομοιώνεται με έναν αποσβεστήρα (Σχήμα 5.7) και η μαθηματική σχέση που περιγράφει τη συμπεριφορά τους είναι η εξής:

$$\sigma = \eta \dot{\epsilon}$$

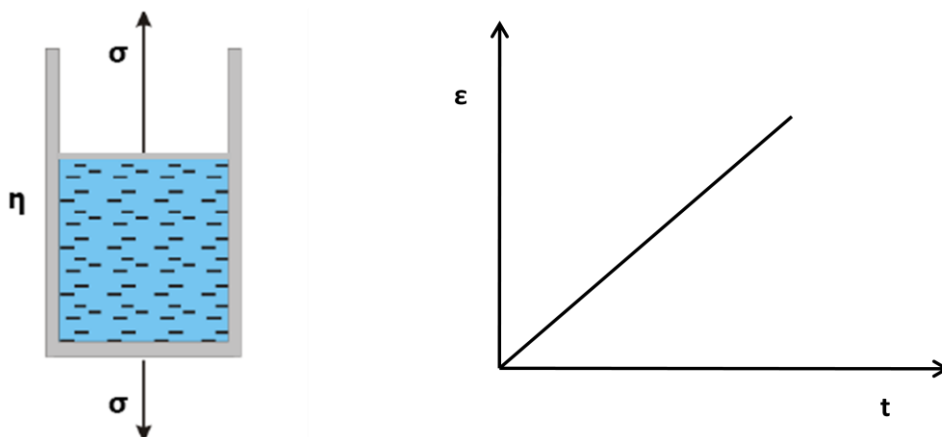
5.8

Όπου:

σ : ορθή ή διατμητική τάση.

η : σταθερά ιξώδους στοιχείου.

ϵ : ορθή ή διατμητική παραμόρφωση.



Σχήμα 5.7: Το ιξώδες στοιχείο και η παραμόρφωσή του συναρτήσει του χρόνου.

5.3.2.3 Στοιχείο Maxwell

Το στοιχείο Maxwell αποτελείται από ένα ελαστικό και ένα ιξώδες στοιχείο συνδεδεμένα σε σειρά (Σχήμα 5.8). Η τάση που εφαρμόζεται και στα δύο στοιχεία είναι η ίδια και η μαθηματική σχέση που περιγράφει την συμπεριφορά του υλικού είναι η ακόλουθη:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{K} + \frac{\sigma_0}{\eta} t \quad 5.9$$

Όπου:

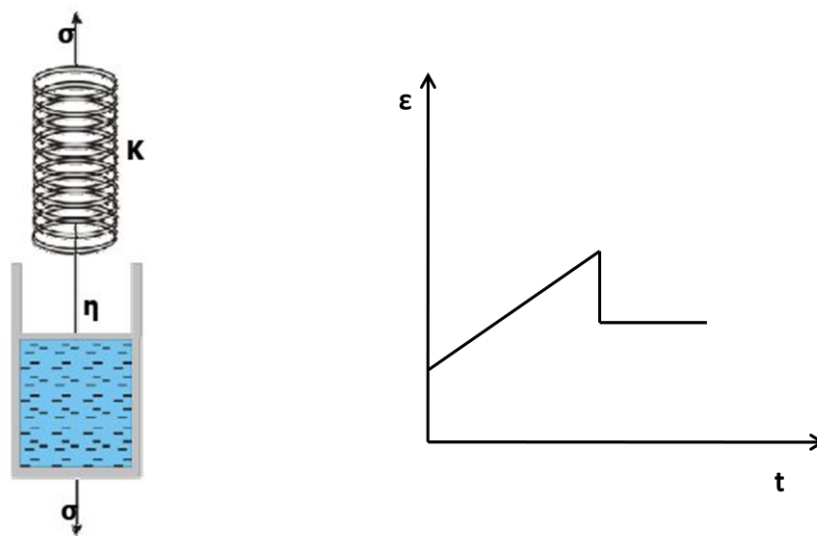
σ_0 : επιβαλλόμενη ορθή ή διατμητική τάση.

K : σταθερά ελαστικού στοιχείου (μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο διάτμησης).

η : σταθερά ιξώδους στοιχείου.

ε : ορθή ή διατμητική παραμόρφωση.

t : χρόνος.



Σχήμα 5.8: Το στοιχείο Maxwell και η παραμόρφωσή του συναρτήσει του χρόνου.

Λόγω της ύπαρξης του ελαστικού στοιχείου, με την επιβολή της φόρτισης το στοιχείο Maxwell παραμορφώνεται ελαστικά. Με την πάροδο του χρόνου, λόγω της ύπαρξης του ιξώδους στοιχείου, η συνολική παραμόρφωση αυξάνεται με σταθερό ρυθμό. Η απομάκρυνση της σταθερής φόρτισης έχει σαν αποτέλεσμα το μηδενισμό της ελαστικής παραμόρφωσης, ενώ η ιξώδης παραμόρφωση παραμένει.

5.3.2.4 Στοιχείο Kelvin-Voigt

Το στοιχείο Kelvin-Voigt αποτελείται από ένα ελαστικό και ένα ιξώδες στοιχείο συνδεδεμένα παράλληλα (Σχήμα 5.9).

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{K} \left(1 - e^{-(K/\eta)t} \right) \quad 5.10$$

Όπου:

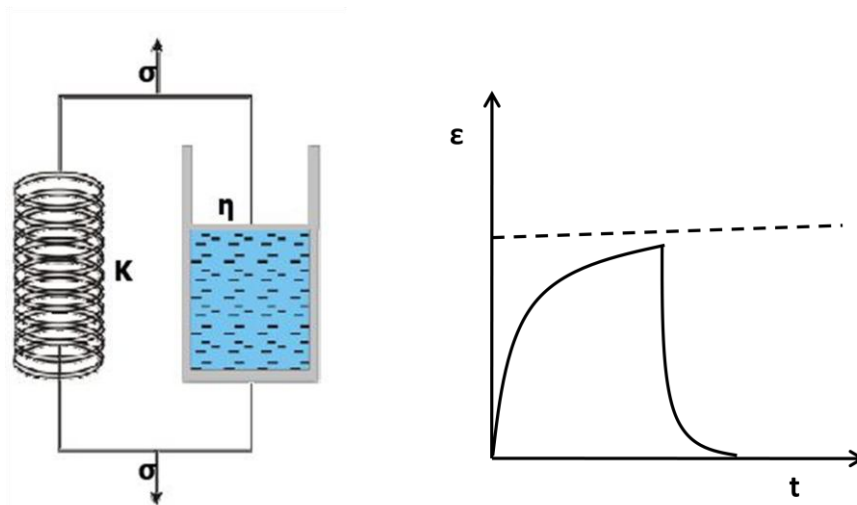
σ_0 : επιβαλλόμενη ορθή ή διατμητική τάση.

K : σταθερά ελαστικού στοιχείου (μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο διάτμησης).

η : σταθερά ιξώδους στοιχείου.

ε : ορθή ή διατμητική παραμόρφωση.

t : χρόνος.



Σχήμα 5.9: Το στοιχείο Kelvin-Voigt και η παραμόρφωσή του συναρτήσει του χρόνου.

Με την επιβολή φόρτισης στο στοιχείο Kelvin-Voigt, ο ιξώδης αποσβεστήρας προβάλλει αντίσταση και η παραμόρφωση που αναπτύσσεται είναι μηδενική. Με την πάροδο του χρόνου, ο αποσβεστήρας αρχίζει να παραμορφώνεται, με αποτέλεσμα ένα μέρος της τάσης που αναλαμβάνει, να μεταβιβάζεται στο ελαστικό στοιχείο. Συνεπώς, η τάση του ιξώδους στοιχείου μειώνεται και τείνει βαθμιαία να μεταβιβαστεί πλήρως στο ελαστικό στοιχείο. Η συμπεριφορά αυτή ονομάζεται καθυστερημένη ελαστικότητα (delayed elasticity). Αν απομακρύνουμε τη φόρτιση, τότε η παραμόρφωση μετά από κάποιο χρονικό διάστημα τείνει να μηδενιστεί.

5.3.2.5 Στοιχείο Burgers

Συνδυάζοντας τα στοιχεία Maxwell και Kelvin-Voigt σε σειρά προκύπτει το στοιχείο Burgers (Σχήμα 5.10).

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{K_2} + \frac{\sigma_0}{K_1} \left[1 - e^{-k_1 t / \eta_1} \right] + \frac{\sigma_0}{\eta} t \quad 5.11$$

Όπου:

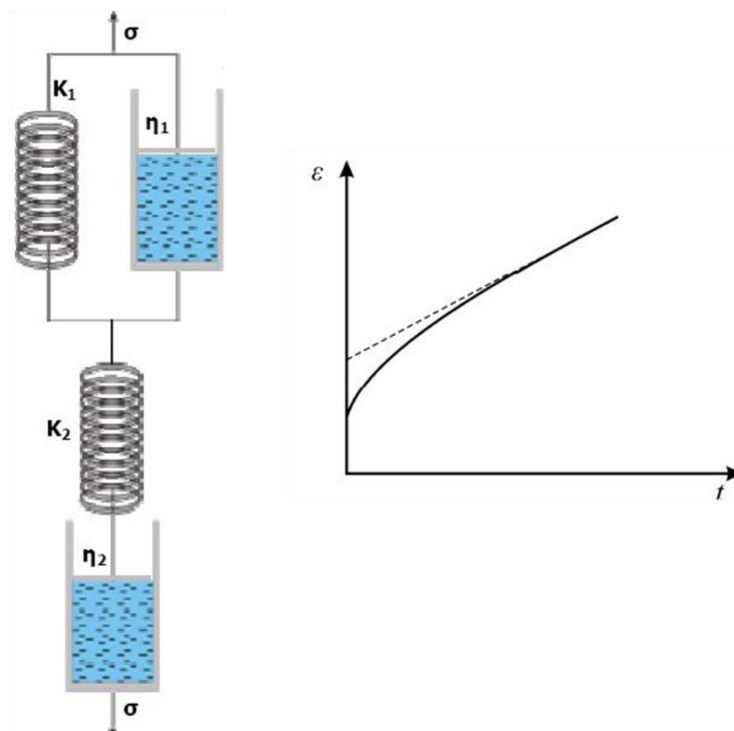
σ_0 : ορθή ή διατμητική τάση.

K_1, K_2 : σταθερές ελαστικών στοιχείων (μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο διάτμησης).

η_1, η_2 : σταθερές ιξώδων στοιχείων.

ε : ορθή ή διατμητική παραμόρφωση.

t : χρόνος.



Σχήμα 5.10: Το στοιχείο Burgers και η παραμόρφωσή του συναρτήσει του χρόνου.

Σε χρόνο $t=0$, αναπτύσσεται μία αρχική παραμόρφωση που μεταβάλλεται με μειούμενο ρυθμό εκθετικά με το χρόνο και τείνει ασυμπτωτικά σε ένα σταθερό ρυθμό μεταβολής της παραμόρφωσης. Το στοιχείο αυτό είναι το απλούστερο που μπορεί να περιγράψει την καμπύλη ερπυσμού ενός υλικού μέχρι την έναρξη του τριτογενούς ερπυσμού.

6 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

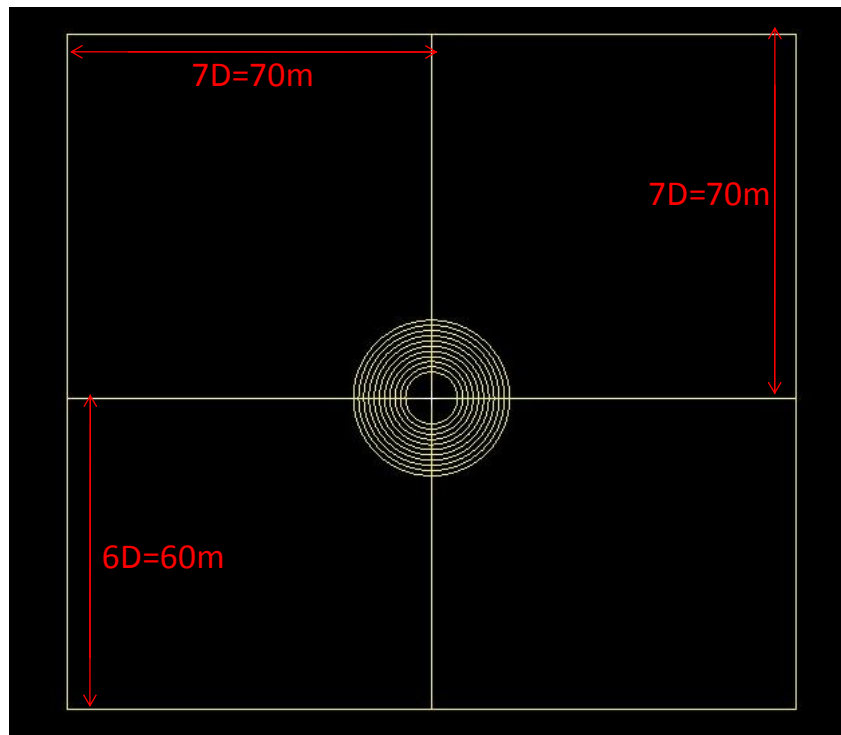
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως έχει προαναφερθεί, είναι έπειτα από μία εκτεταμένη έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία και επεξεργασία των δεδομένων που βρέθηκαν, να βαθμονομηθεί το ερπυστικό προσομοίωμα του προβλήματός μας. Στη συνέχεια, γίνεται διερεύνηση της επιπρόσθετης πίεσης που καλείται να παραλάβει η τελική επένδυση της σήραγγας λόγω της επιβολής του φαινομένου του ερπυσμού και πως αυτό επηρεάζεται από τη μεταβολή συγκεκριμένων γεωλογικών παραμέτρων.

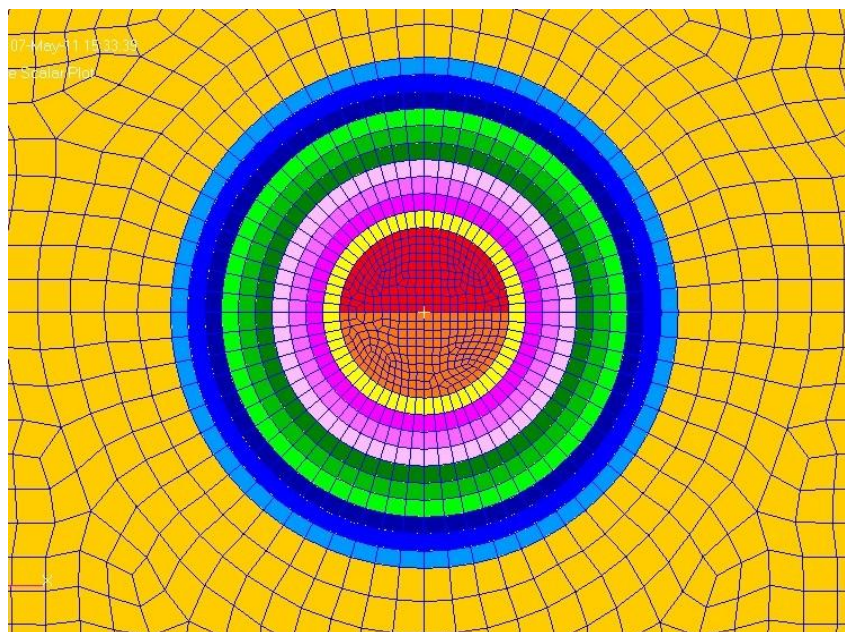
Για τη γεωμετρική απεικόνιση του προβλήματος και τη διακριτοποίηση του καννάβου χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό περιβάλλον του MSC Patran, ενώ η ανάλυση του προβλήματος έγινε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS 6.9.1, από το οποίο έγινε η εξαγωγή των αριθμητικών και γραφικών αποτελεσμάτων.

6.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η γεωμετρία του προβλήματος και η διακριτοποίηση του καννάβου (ορθογωνικού σχήματος) έγιναν με τη βοήθεια του προγράμματος MSC Patran. Δημιουργήθηκε κυκλική σήραγγα διαμέτρου $D=10\text{m}$ με ύψος των υπερκειμένων γαιών ίσο με $7D=70\text{m}$. Η απόσταση από το κάτω όριο του προσομοιώματος και το κέντρο της κυκλικής σήραγγας (άξονας $y-y$) ελήφθη ίση με $6D=60\text{m}$, ενώ από το πλευρικό όριο (άξονας $x-x$) η απόσταση ελήφθη ίση με $7D=70\text{m}$. Το ύψος των υπερκειμένων γαιών αντιστοιχεί στην απόσταση του κέντρου της σήραγγας από την επιφάνεια του εδάφους και για λόγους οικονομίας χρόνου των αναλύσεων διατηρήθηκε σταθερό. Θεωρούμε, λοιπόν, ότι το ύψος των 70m είναι επαρκές για την προσομοίωση της περιοχής επιρροής. Αν παρόλα αυτά, θελήσουμε να μεταβάλλουμε το ύψος, προσομοιώνονται τα πρώτα 70m και το ύψος του γεωυλικού που απομένει λαμβάνεται ως ομοιόμορφη πίεση στο άνω όριο του προσομοιώματος. Έπειτα, δημιουργήθηκαν 11 ομόκεντροι κύκλοι, συνεπώς 10 δακτύλιοι, ανά 1 μέτρο γύρω από τη σήραγγα (Εικόνα 6.2), στην εξωτερική δηλαδή βραχόμαζα.



Εικόνα 6.1: Γεωμετρική απεικόνιση προβλήματος (παράθεση από το πρόγραμμα MSC Patran).



Εικόνα 6.2: Μεγέθυνση στην περιοχή της σήραγγας και τους δακτυλίους. Το πάχος του κάθε δακτυλίου είναι 1.00 m (παράθεση από το πρόγραμμα MSC Patran).

Στη βάση και τα πλευρικά όρια του κανάβου ορίστηκαν οι κινηματικές συνοριακές συνθήκες. Στόχος ήταν η παρεμπόδιση των οριζόντιων μετακινήσεων στα πλευρικά όρια, η παρεμπόδιση οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων στο κάτω όριο του προσομοιώματος, ενώ το άνω όριο παρέμεινε ελεύθερο. Συγκεκριμένα, στο αριστερό και δεξί άκρο του προσομοιώματος τοποθετήθηκαν κυλίσεις, ώστε να επιτρέπεται η κατακόρυφη μετακίνηση χωρίς την ανάπτυξη διατμητικών τάσεων και συνεπώς, πλευρικής παραμόρφωσης, ενώ στο κάτω όριο τοποθετήθηκαν αρθρώσεις (Εικόνα 6.3).

```

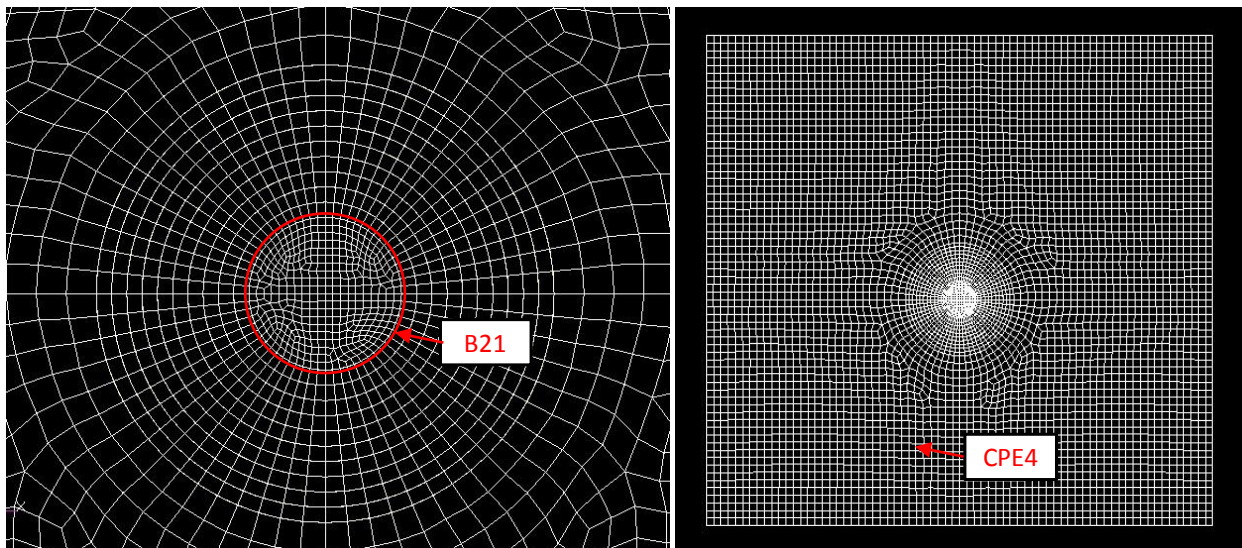
**
** dapedo
**
** *BOUNDARY
    9253, 1,,      0.
    9253, 2,,      0.
    9284, 1,,      0.
    9284, 2,,      0.
    9285, 1,,      0.
    9285, 2,,      0.

** r_pareia
**
** *BOUNDARY
    7987, 1,,      0.
    8022, 1,,      0.
    8023, 1,,      0.
    8024, 1,,      0.
    8025, 1,,      0.
    8026, 1,,      0.

```

Εικόνα 6.3: Συνοριακές συνθήκες (χαρακτηριστικό απόσπασμα από το input file).

Τα υλικά του προβλήματος προσομοιώνονται με πεπερασμένα στοιχεία. Η εξωτερική βραχόμαζα προσομοιώνεται με συνεχή στερεά ορθογωνικά στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης τεσσάρων κόμβων ή αλλιώς ορθογωνικά στοιχεία πλάκας τεσσάρων κόμβων (CPE4), ενώ η άμεση υποστήριξη, δηλαδή στην περίπτωση μας το εκτοξευμένο σκυρόδεμα και η τελική επένδυση προσομοιώθηκαν με γραμμικά δικομβικά στοιχεία δοκού ορθογωνικής διατομής (B21) (Εικόνα 6.4).



Εικόνα 6.4: Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων (παράθεση από το πρόγραμμα MSC Patran).

Στην κρίσιμη περιοχή, δηλαδή στην περιοχή γύρω από τη σήραγγα η οποία μας ενδιαφέρει περισσότερο, έγινε πύκνωση των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ όσο εκτεινόμαστε προς τα όρια του προσομοιώματος έγινε σταδιακή αραιώση. Εντός της σήραγγας, τα τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία έχουν μήκος 1.00m, ενώ εκτός αυτής το μήκος τους είναι 2.00m. Σκοπός ήταν να δημιουργηθεί ένας, κατά το δυνατό, πιο ομοιόμορφος κάνναβος, με καλή ποιότητα πεπερασμένων στοιχείων.

Αξίζει να σημειωθεί, πως για την πραγματοποίηση των αναλύσεων στο πρόγραμμα ABAQUS, έπρεπε να οριστεί η διεπιφάνεια μεταξύ βραχόμαζας και εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Τα επιφανειακά στοιχεία της βραχόμαζας και τα γραμμικά στοιχεία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ορίζονται από τους ίδιους κόμβους, συνεπώς για την αποφυγή αυτού του προβλήματος ορίστηκαν νέοι κόμβοι για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, με διαφορετική αρίθμηση αλλά κοινές συντεταγμένες με εκείνες της βραχόμαζας. Η ίδια

ακριβώς διαδικασία ακολουθήθηκε και για τη δημιουργία της διεπιφάνειας μεταξύ βραχώμαζας και τελικής επένδυσης. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να παίρνουμε αποτελέσματα στην αντίστοιχη διεπιφάνεια κάθε φορά, δηλαδή είτε του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είτε της τελικής επένδυσης.

6.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Πριν την πραγματοποίηση των αριθμητικών αναλύσεων προσδιορίστηκαν, μέσω υπολογιστικών φύλλων Excel, όλες οι παράμετροι που υπεισέρχονται σε αυτές, η μεταβολή των οποίων διαφοροποιεί τα αποτελέσματά τους. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6.1) παρουσιάζονται οι γεωτεχνικές-εδαφικές παράμετροι, οι παράμετροι άμεσης υποστήριξης και τελικής επένδυσης και τέλος, οι παράμετροι του φαινομένου του ερπυσμού.

Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτικός πίνακας των παραμέτρων των αναλύσεων.

	Παράμετρος	Τιμές	Μονάδες μέτρησης
Παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας	H	100	m
	K	0.7, 1.0, 1.3	
	GSI	20, 25, 30	
	σ_{ci}	4, 6, 8, 10	MPa
	m_i	6	
	D	0	
	γ	0.025	MN/m ³
	ν	0.3	
	v_{shot}	0.2	
	h_{shot}	20	cm
	E_{shot}	20000	MPa
	$v_{f,l}$	0.2	
	$h_{f,l}$	60	cm
	$E_{f,l}$	29000	MPa
	E	474.275-1000.00	MPa
	E_{conf}	8.731-102.197	MPa
	β	28.437-38.798	deg
d	0.156-0.294	MPa	
Παράμετροι ερπυσμού	$\phi_{cr,1}$ ($q/q_f=30\%$)	0.2, 0.4	
	$\phi_{cr,2}$ ($q/q_f=70\%$)	0.25, 0.30, 0.50, 0.60	
	t_d	1200	μήνες
	$t_{50\%}/t_d$	0.1	μήνες
	m	0.8	
	a	2.6761-3.1319	
	A	7.557×10^{-07} - 2.583×10^{-06}	

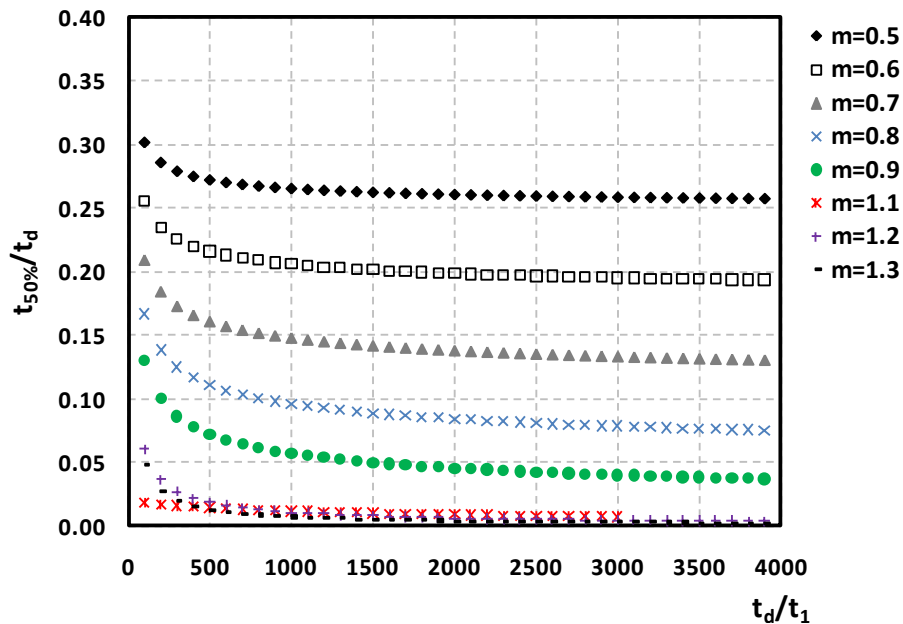
Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν ορίστηκαν, κατά το κριτήριο Hoek-Brown, ο γεωλογικός δείκτης GSI, η αντοχή του άρρηκτου βράχου σε ανεμπόδιση θλίψη σ_{ci} και ο παράγοντας γεωυλικού m_i . Το φαινόμενο του ερπυσμού εμφανίζεται κυρίως σε ασθενή γεωυλικά, συνεπώς οι τιμές του γεωλογικού δείκτη GSI κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα

και συγκεκριμένα λαμβάνουν τις τιμές 20, 25 και 30. Ως κριτήριο αστοχίας χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο Drucker-Prager, του οποίου οι παράμετροι β και d προσδιορίστηκαν μέσω υπολογιστικών φύλλων Excel σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

Αρχικά, σύμφωνα με τις εξισώσεις (2.2), (2.3), (2.4) υπολογίζονται οι σταθερές m_b , s και a του κριτηρίου Hoek-Brown, στις οποίες υπεισέρχονται οι παράμετροι GSI, m_i και D που παρουσιάζονται παραπάνω (Πίνακας 6.1). Στη συνέχεια, οι παράμετροι του κριτηρίου Hoek-Brown μετατρέπονται σε ισοδύναμα μεγέθη συνοχής και γωνίας εσωτερικής τριβής του κριτηρίου Mohr-Coulomb, σύμφωνα με τις εξισώσεις (2.7), (2.8), (2.9). Τέλος, υπολογίζονται οι ισοδύναμες παράμετροι του κριτηρίου Drucker-Prager, σύμφωνα με τις εξισώσεις (2.15), (2.16) του Κεφαλαίου 2.

Επιπλέον, καθορίστηκε το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (h_{shot}) όσο και αυτό της τελικής επένδυσης ($h_{f,i}$), ενώ αξίζει να αναφερθεί πως το απομειωμένο μέτρο ελαστικότητας (E_{conf}) υπολογίστηκε με βάση τις καμπύλες Chern (Chern et al., 1998). Τέλος, σε όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, το βήμα εκσκαφής θεωρήθηκε 1m.

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων αποτελεί μία σύνθετη διαδικασία, ειδικά όσον αφορά τον προσδιορισμό των παραμέτρων που προσδιορίζουν το φαινόμενο του ερπυσμού. Όπως περιγράφεται εκτενέστερα παρακάτω, με τη χρήση των αποτελεσμάτων των ερπυστικών πειραμάτων που εκτέλεσαν οι Debernardi (2008) και Aristorenas (1987) βρέθηκε ένα εύρος που κυμαίνονται οι τιμές των παραμέτρων του ερπυσμού, ϕ_{cr} , $t_{50\%}/t_d$ και m . Το ϕ_{cr} , σύμφωνα με τα αποτελέσματα από Aristorenas (1987), κυμαίνεται μεταξύ 0.1-1.0. Οι τιμές όμως αυτές του ϕ_{cr} είναι πρακτικά μεγαλύτερες από αυτές που προσδιορίστηκαν βάσει των εργαστηριακών δοκιμών. Το γεγονός αυτό οφείλεται αφενός, στο ότι τα πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί σε δοκίμια άρρηκτου βράχου, ενώ στην πραγματικότητα στο σύνολο της βραχώμαζας που περιβάλλει τη σήραγγα, υπάρχουν και ασυνέχειες που προσφέρουν επιπλέον παραμόρφωση, άρα αύξηση του ερπυστικού συντελεστή. Αφετέρου, ο χρόνος εκτέλεσης των πειραμάτων στο εργαστήριο είναι σαφώς πολύ μικρότερος από το χρόνο που χρειάζονται να αναπτυχθούν οι τελικές ερπυστικές παραμορφώσεις στη φύση. Επιπλέον, από τα πειράματα των Debernardi (2008) και Aristorenas (1987) ο λόγος $t_{50\%}/t_d$ βρέθηκε ότι κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.0-0.3 και 0.1-0.4 αντίστοιχα. Τελικά επιλέχθηκαν οι τιμές που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 6.1). Συγκεκριμένα, ο χρόνος σχεδιασμού t_d ελήφθη ίσος με 1200 μήνες, ενώ θεωρήθηκε ότι το 50% της τελικής ερπυστικής παραμόρφωσης ολοκληρώνεται περίπου στο 10% του συνολικού χρόνου ($t_{50\%}/t_d=0.1$). Στο διάγραμμα ($t_{50\%}/t_d-t_d/t_1$) παρουσιάζονται οι καμπύλες για διάφορες τιμές της παραμέτρου m , ενώ η λύση για τις παραπάνω τιμές δίνει m περίπου 0.8 (Σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα ($t_{50\%}/t_d - t_d/t_1$) για τον προσδιορισμό της παραμέτρου m.

Όπως περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 7.3, υπολογίζονται με βάση τις τιμές αυτές που επιλέχθηκαν, όλες οι παράμετροι του ερπυστικού προσομοιώματος των Singh & Mitchell (1968) (A, m, a).

6.4 ΒΗΜΑΤΑ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Τα βήματα εκσκαφής καθορίζουν το ρυθμό με τον οποίο προχωράει η εκσκαφή της σήραγγας, προσομοιώνεται δηλαδή, ανά στάδιο η διάνοιξη και η κατασκευή. Αρχικά, αφού έχει καθοριστεί πλήρως το προσομοίωμα, πρέπει να οριστούν οι αρχικές γεωστατικές συνθήκες (initial conditions). Στο στάδιο αυτό, για τα όρια του προσομοιώματος (+γ, -γ), ορίζεται η πίεση που ασκείται λόγω του γεωυλικού που δεν έχει προσομοιωθεί και ο τρόπος με τον οποίο οι γεωστατικές τάσεις θα μεταβάλλονται με το βάθος. Στην προκειμένη περίπτωση (Εικόνα 6.5) το ύψος των υπερκείμενων γαιών είναι 100m, συνεπώς προκύπτει πίεση 750kPa, ενώ ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων K ισούται με 1.0.

```

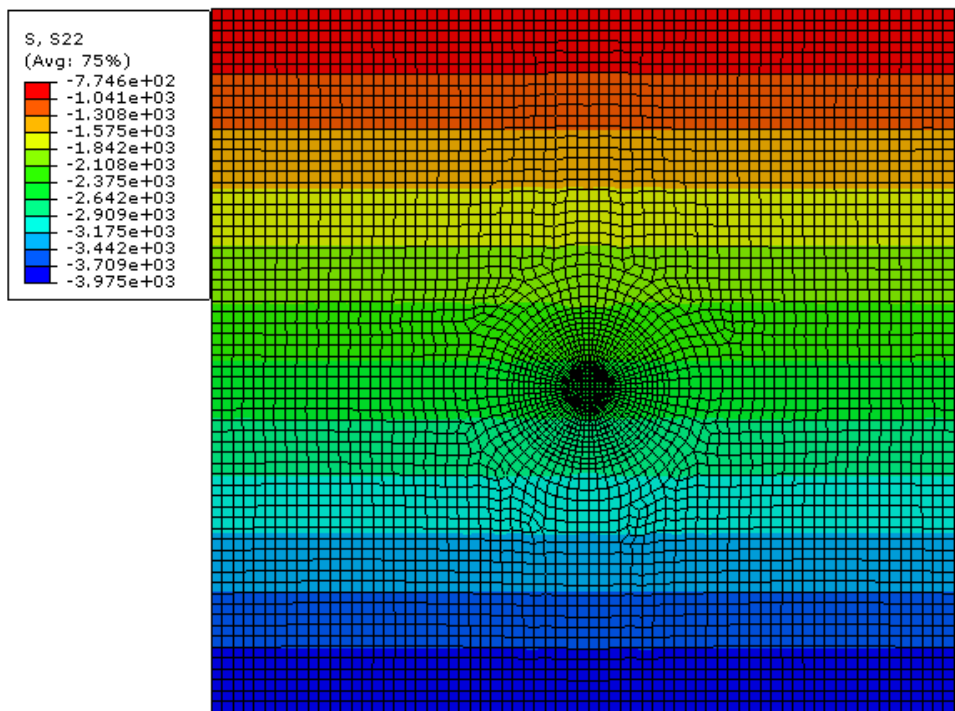
**  ΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛ
**  ΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛ  INITIAL CONDITIONS  ΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛ
**  ΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛ
**
**
**
**
**INITIAL CONDITIONS, TYPE=STRESS, GEOSTATIC
G_SOIL, -750, 70, -4000, -60, 1
**
**

```

Εικόνα 6.5: Αρχικές γεωστατικές συνθήκες (απόσπασμα από το input file).

1^ο ΒΗΜΑ: Το πρώτο βήμα είναι το γεωστατικό όπου δίνουμε βαρύτητα στο γεωυλικό καθώς και τη γεωστατική πίεση που ασκείται στην κορυφή του προσομοιώματος, εφόσον το υπερκείμενο γεωυλικό βρίσκεται άνω των 70m. Στο βήμα αυτό οι παραμορφώσεις είναι

πρακτικά μηδενικές, ενώ αφαιρείται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα καθώς η εκσκαφή της σήραγγας δεν έχει ξεκινήσει ακόμη.



Εικόνα 6.6: Κατανομή κατακόρυφων τάσεων στη γεωστατική κατάσταση (παράθεση από το πρόγραμμα ABAQUS).

2^ο ΒΗΜΑ: Όπως έχουμε αναφέρει και στο Κεφάλαιο 3.3, κατά τη διάνοιξη σήραγγων οι μετακινήσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά εμπρός από το μέτωπο διάνοιξης, δηλαδή πριν το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας φτάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Στο δεύτερο βήμα λοιπόν, αρχίζει η απομείωση του μέτρου ελαστικότητας του γεωυλικού που βρίσκεται εντός της σήραγγας, ώστε να προσομοιωθούν οι παραπάνω συγκλίσεις.

3^ο ΒΗΜΑ: Στο τρίτο βήμα αρχίζει η διάνοιξη της σήραγγας και τοποθετούνται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης, όπου στην περίπτωση μας είναι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η διάνοιξη της σήραγγας γίνεται με αφαίρεση του γεωυλικού στο εσωτερικό της, πράγμα το οποίο προσομοιώνεται με τη μείωση ακόμη περισσότερο, σε σχέση με το προηγούμενο βήμα, του μέτρου ελαστικότητας, στα 20kPa (πρακτικά το μέτρο ελαστικότητας έχει μηδενιστεί). Η σταδιακή απομείωση γίνεται μέσω υπορουτίνας σε γλώσσα Fortran.

```
** ##### STEP 3 #####
**
**
**
**
**STEP, UNSYMM=YES, INC=10000000000
**
**STATIC
0.1,1,0.0000000001,0.2
**
**
**MODEL CHANGE, ADD
G_SHOTA
G_SHOTB
**
**
**
** ΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛ
**
**
**
**OUTPUT, FIELD, FREQ=2
**NODE OUTPUT
U,
**
**
**OUTPUT, FIELD, FREQ=2
**ELEMENT OUTPUT
S,E,PE,PEMAG,CE,SF,CEMAG,MISES,PRESS
**
**
**CONTACT OUTPUT
CSTRESS
**
**
**END STEP
```

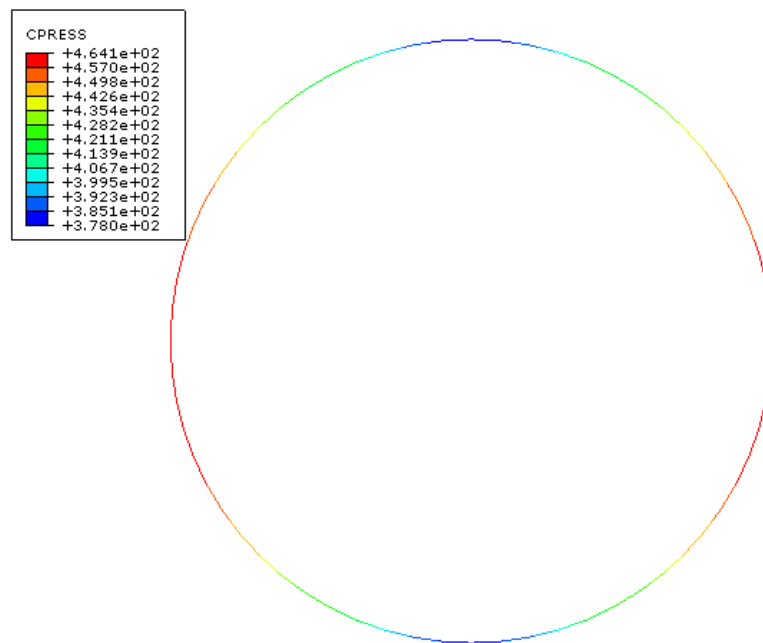
Εικόνα 6.7: 3^ο Βήμα προσομοίωσης (απόσπασμα από το input file).

4^ο ΒΗΜΑ: Στο τέταρτο βήμα, όπως φαίνεται και από την ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 6.8), τοποθετείται η τελική επένδυση της σήραγγας.

```
** ##### STEP 4 #####
**
**
**
**
**STEP, UNSYMM=YES, INC=10000000000
**
**STATIC
0.1,1,0.0000000001,0.2
**
**
**MODEL CHANGE, ADD
p_f1
**
**
**
** ΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛΛ
**
**
**
**OUTPUT, FIELD, FREQ=2
**NODE OUTPUT
U,
**
**
**OUTPUT, FIELD, FREQ=2
**ELEMENT OUTPUT
S,E,PE,PEMAG,CE,SF,CEMAG,MISES,PRESS
**
**
**CONTACT OUTPUT
CSTRESS
**
**
**END STEP
```

Εικόνα 6.8: 4^ο Βήμα προσομοίωσης (απόσπασμα από το input file).

5^ο ΒΗΜΑ: Στο πέμπτο βήμα απενεργοποιούνται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης και συνεπώς, αφαιρείται το υλικό των μέτρων που έχουν τοποθετηθεί στο 3^ο βήμα.



Εικόνα 6.9: Κατανομή πιέσεων επί της τελικής επένδυσης στο 5^ο βήμα προσομοίωσης (παράθεση από το πρόγραμμα ABAQUS).

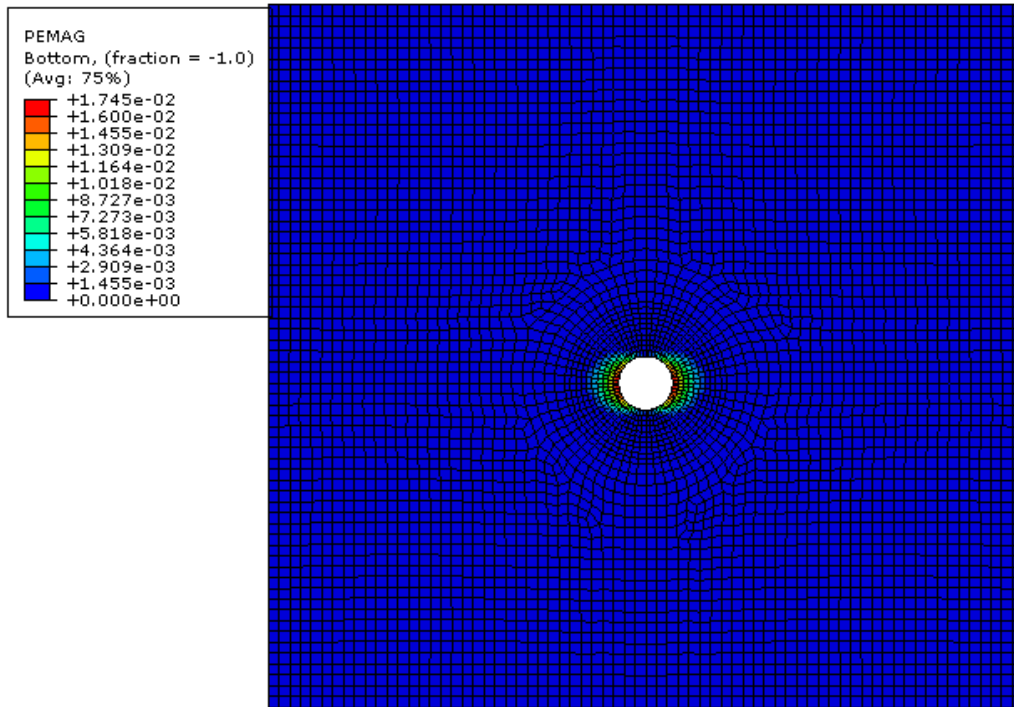
6^ο ΒΗΜΑ: Στο έκτο και τελευταίο υπολογιστικό βήμα εισάγεται το φαινόμενο του ερπυσμού. Ο χρόνος σχεδιασμού t_d , ο χρόνος που αντιπροσωπεύει την τεχνική διάρκεια του έργου, θεωρήθηκε ίσος με 1200 μήνες.

```

** ##### STEP 6 #####
**
**
**
**
**STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000
**
**
**VISCO, CETOL=0.00001
1,1200,0.0000000001,4
**
**
**CONTROLS, PARAMETERS=LINE SEARCH
4, 4.0, 0.25, 0.25, 0.25, 0.15
**
**

```

Εικόνα 6.10: 6^ο Βήμα προσομοίωσης (απόσπασμα από το input file).



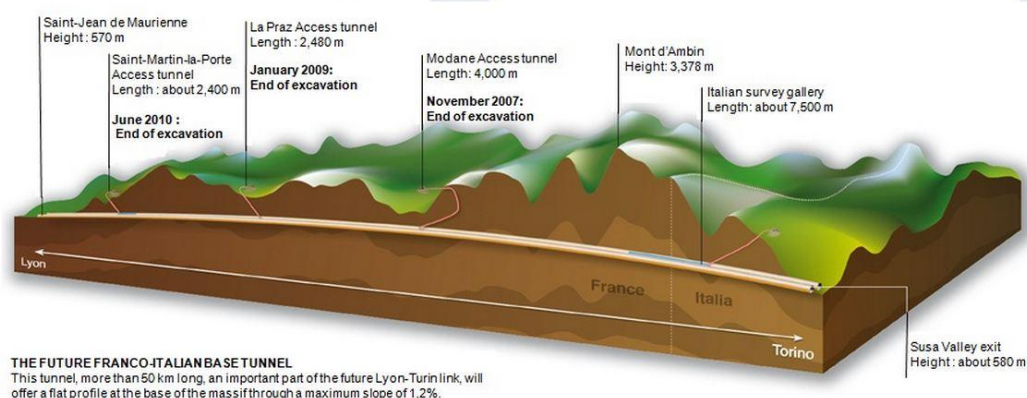
Εικόνα 6.11: Κατανομή ερπυστικών παραμορφώσεων στο 6^ο βήμα προσομοίωσης (παράθεση από το πρόγραμμα ABAQUS).

7 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

Ο ερπυσμός είναι ένα χρονικά εξαρτημένο φαινόμενο, η επίδραση του οποίου μπορεί να επιφέρει σοβαρές επιπτώσεις στη διάνοιξη των σηράγγων, έως και αστοχία του έργου, καθώς αυξάνει τα φορτία που οφείλει να αναλάβει η τελική επένδυση. Γι' αυτό το λόγο, πολλοί μελετητές, μεταξύ των οποίων οι Debernardi (2008) και Aristorenas (1987) στο πλαίσιο των διδακτορικών τους διατριβών πραγματοποίησαν πειράματα ερπυσμού σε δείγματα άνθρακα και σχιστολίθου αντίστοιχα, με σκοπό τη βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος που πρότεινε ο καθένας και τη μελέτη του φαινομένου του ερπυσμού κατά τη διάνοιξη σηράγγων. Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής, τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων επεξεργάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του προσομοιώματός μας.

7.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων από Debernardi (2008)¹

Ο Debernardi (2008) μελέτησε την ερπυστική συμπεριφορά του σχηματισμού του άνθρακα, με δείγματα από τη σήραγγα βάσης Lyon-Turin και πιο συγκεκριμένα από την περιοχή της σήραγγας πρόσβασης Saint Martin La Porte. Η σήραγγα βάσης Lyon-Turin είναι μία από τις μεγαλύτερες σε μήκος σήραγγες (53km) (Εικόνα 7.1), ενώ η σήραγγα πρόσβασης Saint Martin La Porte έχει συνολικό μήκος 2050m. Κατά την κατασκευή της, κυρίως σε τμήματα όπου κυριαρχούσε η ύπαρξη χαμηλής ποιότητας βραχωδών σχηματισμών (μαύροι σχιστόλιθοι, ψαμμίτες, άνθρακας, αργιλικόι σχιστόλιθοι, κατακλασίτες), εκδηλώθηκαν έντονες συγκλίσεις οι οποίες προκάλεσαν σοβαρές δυσκολίες και προβλήματα στην εκτέλεση του έργου (Εικόνα 7.2). Συνεπώς, η μελέτη της ερπυστικής συμπεριφοράς του άνθρακα, καθώς παρουσιάζεται από τους κυριότερους ασθενείς σχηματισμούς της περιοχής που διανοίχθηκε η σήραγγα, αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον.



Εικόνα 7.1: Μηκοτομή της σήραγγας βάσης Lyon-Turin.

¹ Τα στοιχεία της συγκεκριμένης παραγράφου προέρχονται κυρίως από τη διδακτορική διατριβή του D. Debernardi "Viscoplastic behaviour and design of tunnels" και από το άρθρο των Barla et al., (2010).



Εικόνα 7.2: Παραμορφωμένη διατομή λόγω εκτεταμένων συγκλίσεων στη σήραγγα βάσης Lyon-Turin (Barla et al., 2010).

Για τα πειράματά του ο Debernardi (2008), καθώς δεν ήταν εφικτό να ληφθούν δείγματα άνθρακα απευθείας από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας, χρησιμοποίησε δείγματα από γειτονική γεώτρηση, στο ίδιο περίπου βάθος με το υπό μελέτη τμήμα, με τα χαρακτηριστικά του παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7.1: Διαστάσεις και βάρος των δειγμάτων άνθρακα.

Δείγμα	Διάμετρος (mm)	Ύψος (mm)	Βάρος (gr)
A11a	50.0	100.1	348
A17a	50.1	100.0	347
A17b	50.1	100.3	347
A17c	50.0	54.5	189
A17d	50.0	100.0	350
A17e	50.0	50.84	--

Παρακάτω δίνονται ακόμη κάποιες μέσες τιμές φυσικών ιδιοτήτων του σχηματισμού του άνθρακα.

Πίνακας 7.2: Μέσες τιμές φυσικών χαρακτηριστικών για το σχηματισμό του άνθρακα.

Ειδικό βάρος (γ)	17.29 KN/m ³
Ειδικό βάρος στερεών κόκκων (G_s)	1.99
Πορώδες (n)	15.94%
Δείκτης πόρων (e)	0.19
Φυσική υγρασία (w_n)	3.36%
Βαθμός κορεσμού (S)	35.26%
Όριο υδαρότητας (w_L)	36.21%
Όριο πλαστικότητας (w_p)	25.71%
Δείκτης πλαστικότητας (IP)	10.56%
Περιεκτικότητα σε CaCO ₃	0.70%

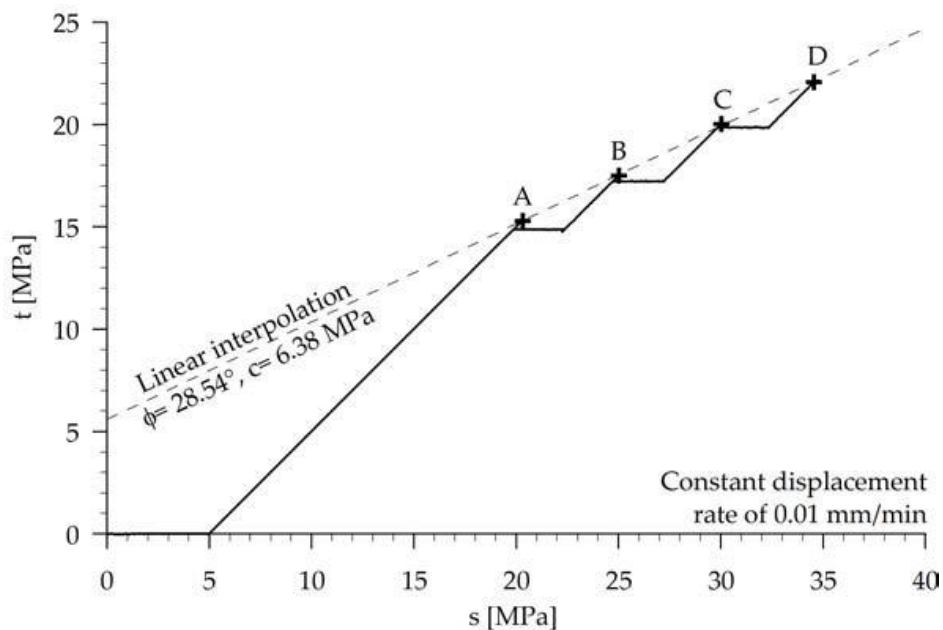
Πραγματοποιήθηκαν τρία πειράματα τριαξονικής δοκιμής (A11a, A17a, A17b) και ένα μονοαξονικής θλίψης (A17d) με σκοπό να προσδιοριστεί η αντοχή του άνθρακα, αλλά και η συμπεριφορά του όσον αφορά στο χρονικά εξαρτημένο φαινόμενο του ερπυσμού.

Το πείραμα A11a πραγματοποιήθηκε ώστε να προσδιοριστεί η αντοχή του άνθρακα. Σε ένα μόνο κυλινδρικό δοκίμιο και για επιβολή τεσσάρων συνδυασμών διεκτροπικής (t)-μέσης (s) τάσης προέκυψε το διάγραμμα (t-s) (Σχήμα 7.1), όπου στο σημείο D το δείγμα αστόχησε (Εικόνα 7.3). Σύμφωνα με τον Debernardi (2008), η διεκτροπική (t) και μέση (s) τάση υπολογίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad 7.1$$

$$t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad 7.2$$

Από το πείραμα A11a προσδιορίστηκε η συνοχή (c) και η γωνία εσωτερικής τριβής (φ) 6.38MPa και 28.54° αντίστοιχα. Ωστόσο, στα πειράματα που ακολουθούν χρησιμοποιήθηκαν, όπως αναφέρει ο Debernardi, οι τιμές c=3.50MPa και φ=34°.

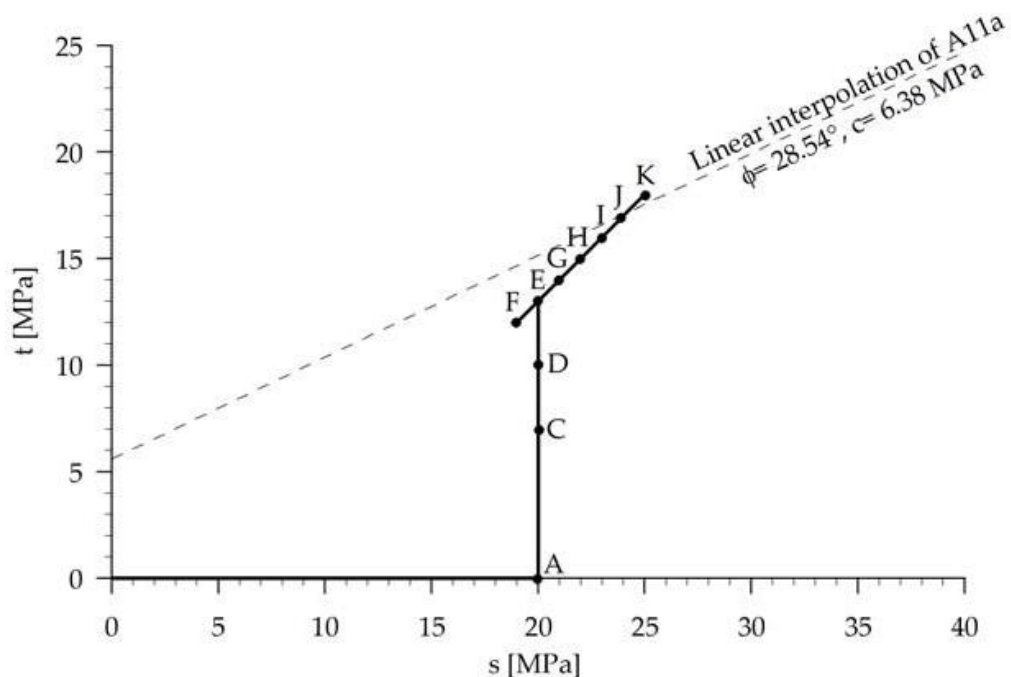


Σχήμα 7.1: Επίπεδα επιβαλλόμενης έντασης για το πείραμα αντοχής A11a.



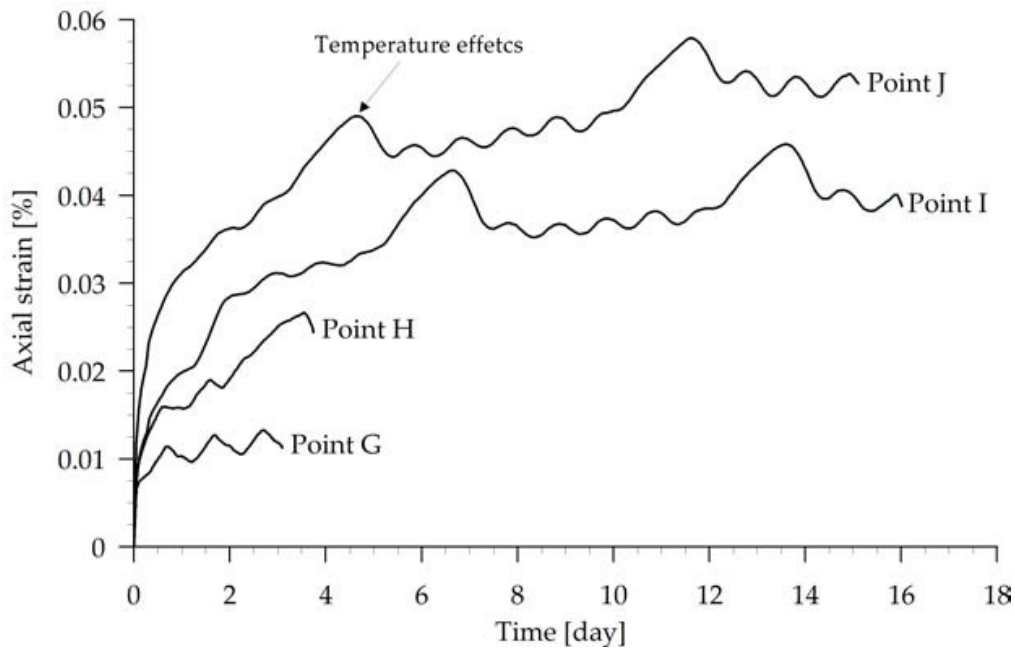
Εικόνα 7.3: Δείγμα άνθρακα μετά το τέλος του πειράματος A11a (αστοχία).

Στο πείραμα A17a μελετήθηκε η ερπυστική συμπεριφορά του άνθρακα σε διάφορους συνδυασμούς διεκτροπικής (t) και μέσης τάσης (s). Η διαδρομή που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.2, ενώ για κάθε σημείο εξάγεται η καμπύλη αξονικής ερπυστικής παραμόρφωσης (axial stress) και χρόνου (time).



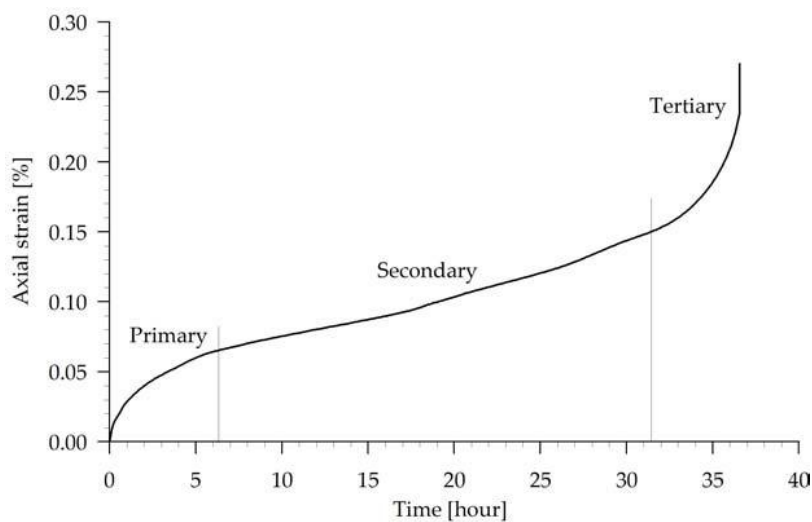
Σχήμα 7.2: Διαδρομή (t - s) για το πείραμα A17a.

Ενδεικτικά, παρουσιάζονται παρακάτω οι καμπύλες ερπυστικής παραμόρφωσης-χρόνου στα σημεία G, H, I, J. Η ανομοιομορφία των καμπυλών, όπως αναφέρει ο Debernardi (2008), πιθανώς οφείλεται στη διαφοροποίηση της θερμοκρασίας, εντός του εργαστηρίου, κατά τη διάρκεια που εκτελέστηκε το πείραμα.



Σχήμα 7.3: Ερπυστική καμπύλη για $t=14\text{MPa}$ (σημείο G), $t=15\text{MPa}$ (σημείο H), $t=16\text{MPa}$ (σημείο I), $t=17\text{MPa}$ (σημείο J) του πειράματος A17a.

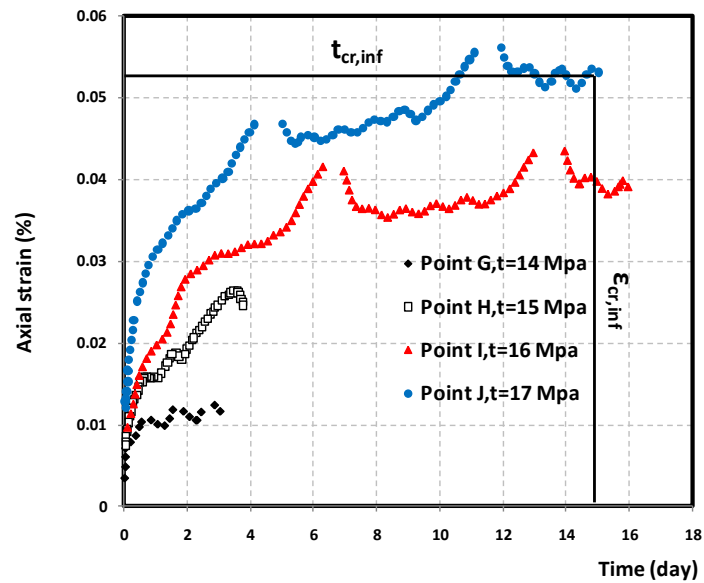
Στο σημείο K για $t=18\text{MPa}$, παρουσιάστηκε τριτογενής ερπυσμός και το δείγμα αστόχησε εντός 36 ωρών.



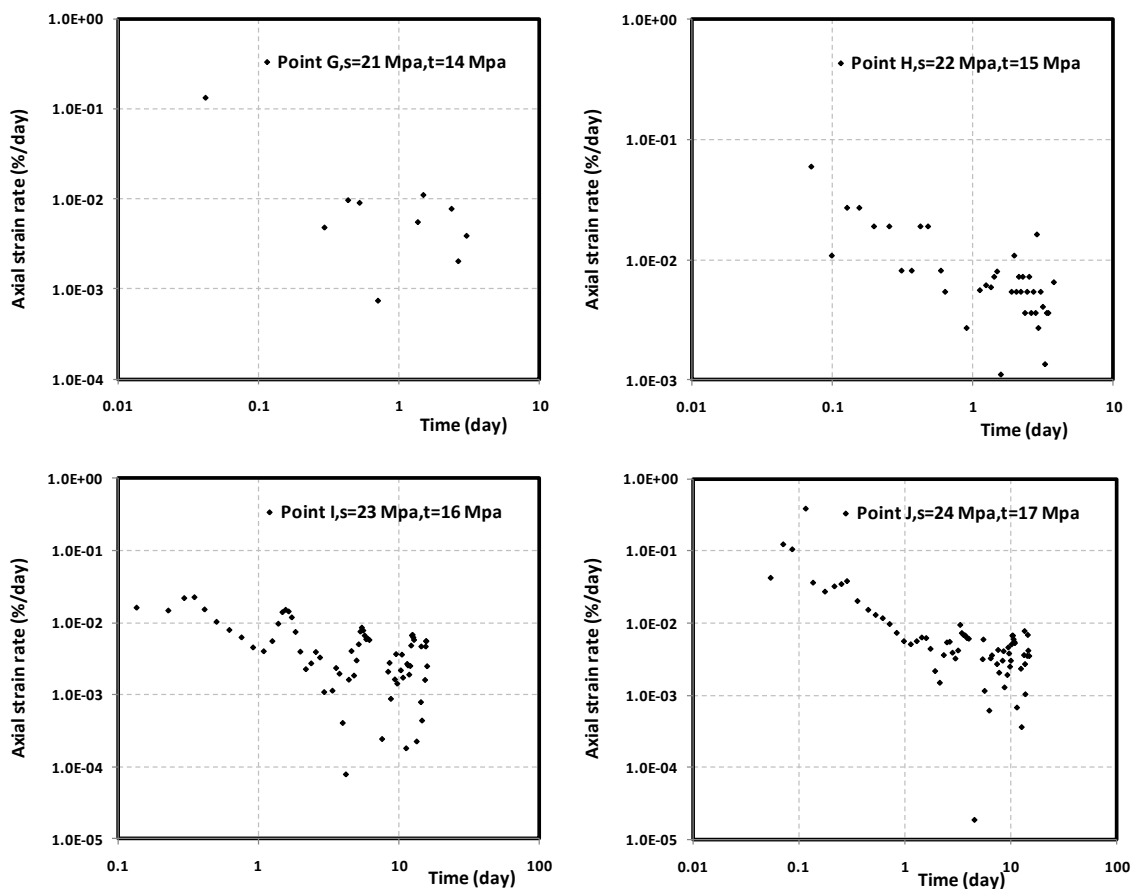
Σχήμα 7.4: Ερπυστική καμπύλη για $t=18\text{MPa}$ (σημείο K) και φωτογραφία δείγματος μετά το τέλος του πειράματος A17a.

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι καμπύλες D, G, H, I, J, καθώς το σημείο K όπου παρουσιάστηκε αστοχία δεν θεωρείται χαρακτηριστικό ώστε να εξάγουμε αποτελέσματα. Με χρήση λοιπόν, του προγράμματος Getdata Digitizer 2.22 ψηφιοποιήθηκαν οι καμπύλες και περάστηκαν όλες τις συντεταγμένες (s,t) σε φύλλο εργασίας του Microsoft Excel. Στη συνέχεια, τα διαγράμματα αξονικής παραμόρφωσης-

χρόνου μετατράπηκαν σε ρυθμό αξονικής παραμόρφωσης ανά μέρα και δημιουργήθηκαν οι νέες καμπύλες.



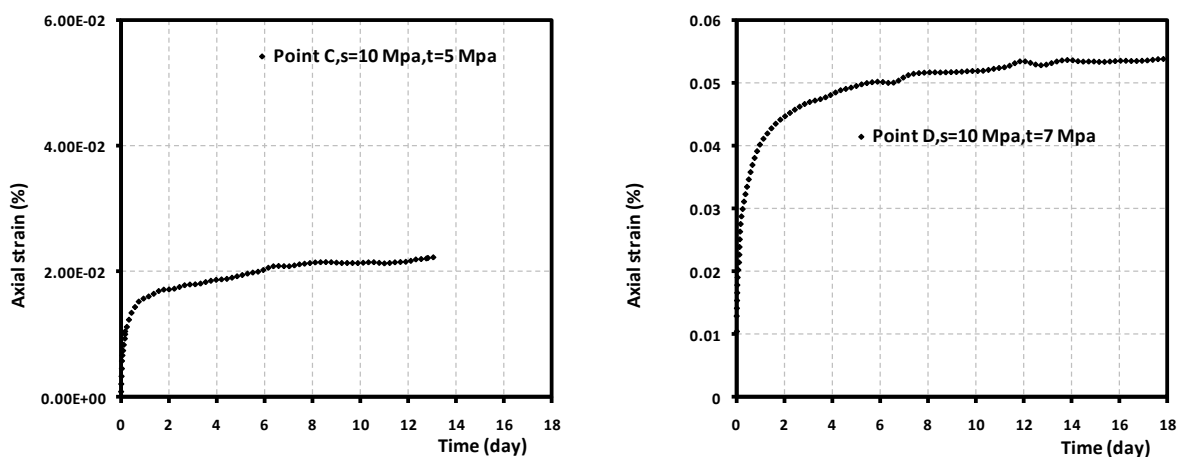
Σχήμα 7.5: Ερπυστικές καμπύλες για τα σημεία G, H, I, J του πειράματος A17a (μετά από ψηφιοποίηση της δοσμένης αντίστοιχης καμπύλης).



Σχήμα 7.6: Καμπύλες ρυθμού παραμόρφωσης-χρόνου των σημείων G, H, I, J του πειράματος A17a.

Έχοντας τις συντεταγμένες των καμπυλών βρίσκουμε για κάθε ένα σημείο (D, G, H, I, J) την τελική ερπυστική παραμόρφωση ($\epsilon_{cr,inf}$), τον αντίστοιχο χρόνο ($t_{cr,inf}$) (Σχήμα 7.6), καθώς και την ερπυστική παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο 50% της τελικής. Τέλος, έχοντας βρει το t_f της αστοχίας δημιουργούμε το πηλίκο (t/t_f) για κάθε καμπύλη και βρίσκουμε τελικά το ϕ_{cr} , το οποίο μας ενδιαφέρει και περιγράφεται παρακάτω (Κεφάλαιο 7.3).

Στο πείραμα A17b διακρίνουμε τα σημεία A, B, C, D, E όπου στα A, B δεν έχουμε διεκτροπική τάση, δηλαδή διατμητικό ερπυσμό. Όπως αναφέρει ο Debernardi (2008), ο ογκομετρικός ερπυσμός προκαλεί πολύ μικρότερες παραμορφώσεις σε σχέση με τον διατμητικό, συνεπώς τα σημεία A, B δε λαμβάνονται υπόψη. Ερπυστικά πειράματα πραγματοποιήθηκαν ακόμη στα σημεία C, D με $s=10\text{MPa}$, $t=5$ και $t=7\text{MPa}$ αντίστοιχα, ενώ στο σημείο E για $t=7.36\text{MPa}$ αναπτύχθηκε αστοχία. Οι καμπύλες ψηφιοποιήθηκαν όπως περιγράφηκε παραπάνω, και καταλήξαμε ομοίως στα ϕ_{cr} των καμπυλών C, D.



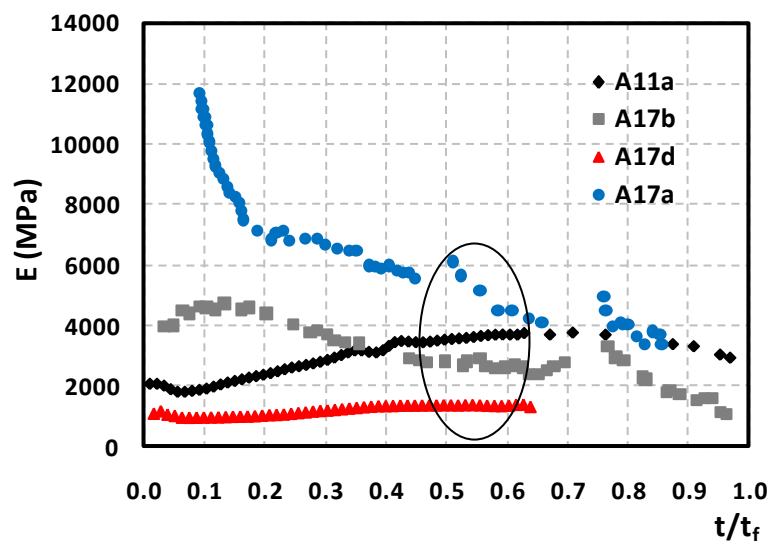
Σχήμα 7.7: Ερπυστικές καμπύλες, μετά από ψηφιοποίηση, για τα σημεία C, D του πειράματος A17b.

Τέλος, στο A17d πραγματοποιήθηκε πείραμα μονοαξονικής θλίψης με αξονική πίεση (σ_a) στα 6 και 8MPa αντίστοιχα. Ενδιαφέρον παρουσίασε το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια του δεύτερου ερπυστικού πειράματος, με αξονική πίεση στα 8MPa, αναπτύχθηκε τριτογενής ερπυσμός και το δείγμα έφτασε στην αστοχία μόλις σε 33 λεπτά, σε αντίθεση με το πείραμα A17a που αστόχησε σε 36 ώρες (Εικόνα 7.4).



Εικόνα 7.4: Δείγμα μετά το τέλος του πειράματος A17d (αστοχία).

Σε όλα τα πειράματα που περιγράφηκαν παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε το μέτρο ελαστικότητας, E (MPa), του πειράματος A17d της μονοαξονικής θλίψης, δηλαδή το μικρότερο μεταξύ όλων. Υπολογίστηκε περίπου στο 50% της αντοχής, όπως σημειώνεται στο Σχήμα 7.8 και τελικώς χρησιμοποιήθηκε $E=1330\text{MPa}$.

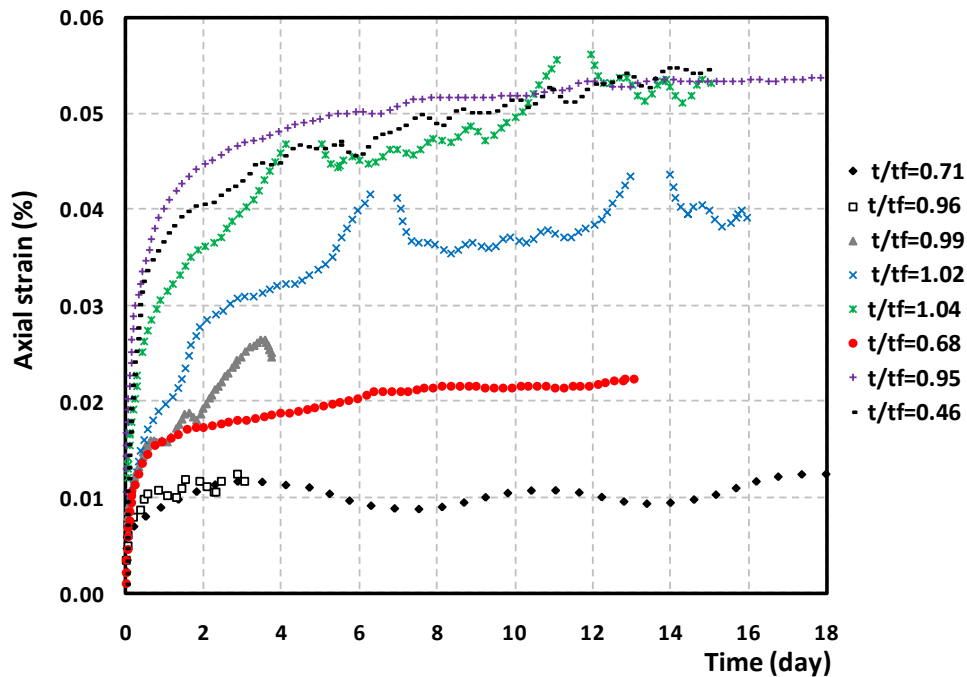


Σχήμα 7.8: Διάγραμμα ($E-t/t_f$) από Debernardi (2008).

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Πίνακας 7.3) με τα αποτελέσματα που εξάγαμε από το κάθε πείραμα ξεχωριστά, καθώς και ένα διάγραμμα με τις ερπυστικές καμπύλες όλων των πειραμάτων (Σχήμα 7.9). Το γεγονός ότι κάποιες τιμές των (t/t_f) του πίνακα ξεπερνούν τη μονάδα, οφείλεται εν μέρει, στο ότι έχουν υπολογιστεί με μέσες τιμές των παραμέτρων (c, ϕ).

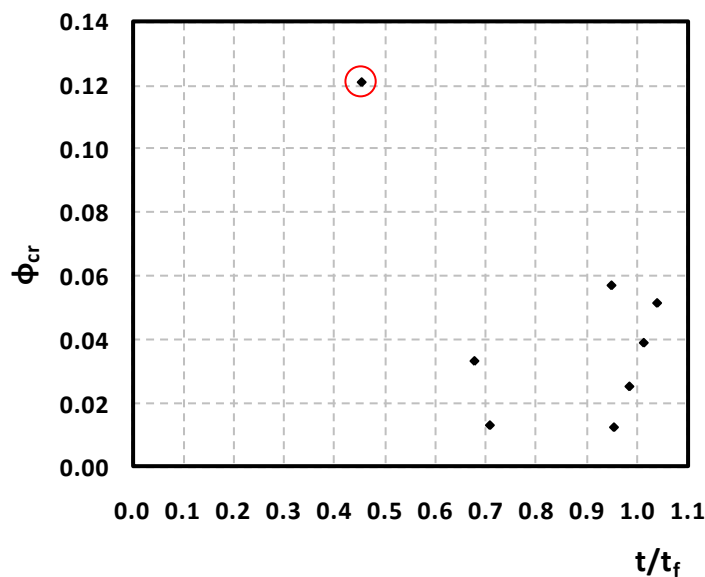
Πείραμα	Σημείο	s (MPa)	t (MPa)	c (MPa)	ϕ (°)	E (MPa)	t/t _f	$\epsilon_{cr,inf}$ (%)	t _{50%} /t _{inf}	ϕ_{cr}	m	Παρατηρήσεις
A17a	D	20	10	3.5	34	1330	0.71	0.0091	0.0005	0.013	-	Πολύ μικρός χρόνος ανάπτυξης του 50% της $\epsilon_{cr,inf}$
A17a	G	21	14	3.5	34	1330	0.96	0.0117	0.018	0.012	1.18	-
A17a	H	22	15	3.5	34	1330	0.99	0.0246	0.075	0.025	0.93	-
A17a	I	23	16	3.5	34	1330	1.02	0.0392	0.063	0.039	0.78	-
A17a	J	24	17	3.5	34	1330	1.04	0.0531	0.038	0.052	0.98	-
A17b	C	10	5	3.5	34	1330	0.68	0.0224	0.019	0.033	0.81	-
A17b	D	10	7	3.5	34	1330	0.95	0.0537	0.001	0.057	1.07	-
A17d	A	3	3	3.5	34	1330	0.46	0.0546	0.0196	0.121	1	Δεν συνάδει με τα υπόλοιπα σημεία.

Πίνακας 7.3: Τελικά αποτελέσματα των πειραμάτων από Debernardi (2008).



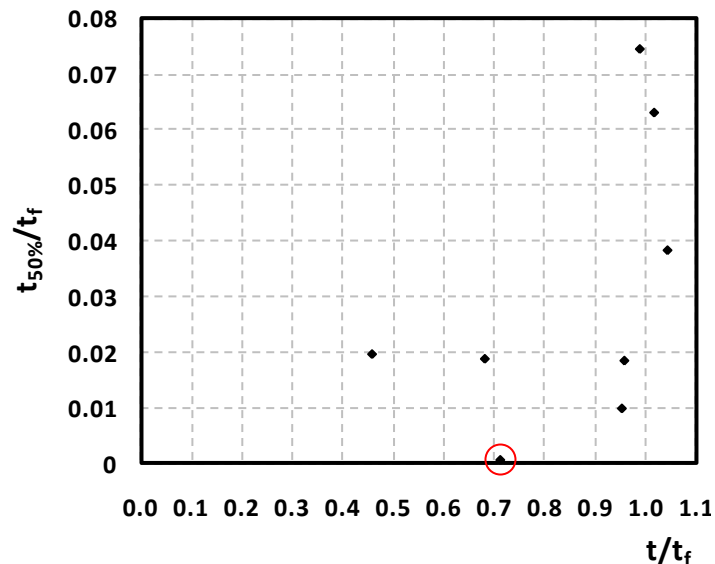
Σχήμα 7.9: Ερπυστικές καμπύλες των πειραμάτων από Debernardi (2008).

Από το Σχήμα 7.9, παρατηρούμε την εξάρτηση της ερπυστικής παραμόρφωσης από το επίπεδο της επιβαλλόμενης διεκτροπικής τάσης. Αύξηση της τάσης συνεπάγεται, συνήθως, εντονότερες παραμορφώσεις. Για χαμηλά επίπεδα έντασης παρατηρείται μόνο πρωτογενής ή και δευτερογενής ερπυσμός, ενώ για υψηλά παρουσιάζεται τριτογενής ερπυσμός με αποτέλεσμα την αστοχία του δοκιμίου. Ωστόσο, λόγω των λίγων σε αριθμό πειραμάτων αλλά και την ιδιαίτερη πολυπλοκότητα στην εκτέλεσή τους, είναι πρακτικά αδύνατο να οριστούν με ακρίβεια τα διάφορα επίπεδα της έντασης όπου πραγματοποιείται η μετάβαση από το ένα στάδιο ερπυσμού στο άλλο.



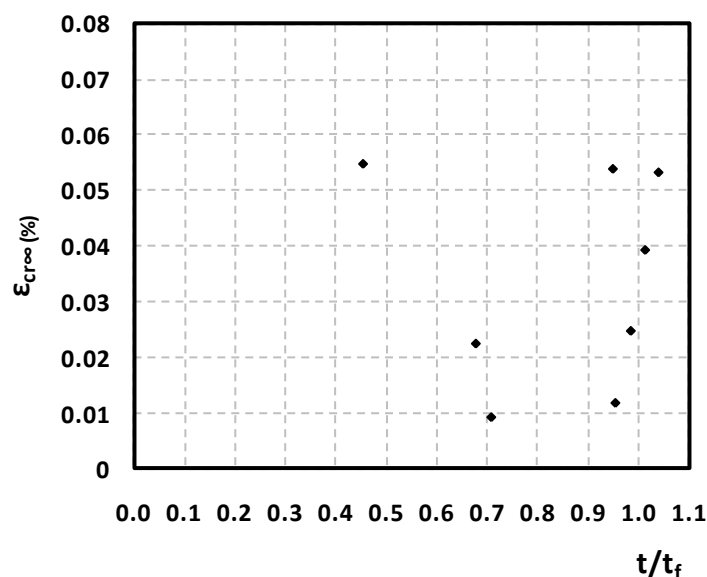
Σχήμα 7.10: Διάγραμμα $(\phi_{cr}-t/t_f)$ των συνολικών πειραμάτων από Debernardi (2008).

Από το Σχήμα 7.10, παρατηρείται πως κάποιες τιμές των t/t_f ξεπερνούν τη μονάδα, πράγμα το οποίο πρακτικά δεν υφίσταται. Το γεγονός αυτό οφείλεται εν μέρει, στο ότι οι τιμές έχουν υπολογιστεί με μέσες τιμές παραμέτρων (c , ϕ), οι οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω. Διακρίνεται εύκολα επίσης, πως το σημείο A που αντιστοιχεί στο πείραμα A17d δε συνάδει με τα υπόλοιπα σημεία τα οποία κυμαίνονται μεταξύ του 0.02-0.06 του ϕ_{cr} , συνεπώς επιλέγεται να μη ληφθεί υπόψη στα αποτελέσματα (σημείο που σημειώνεται με κόκκινο κύκλο).



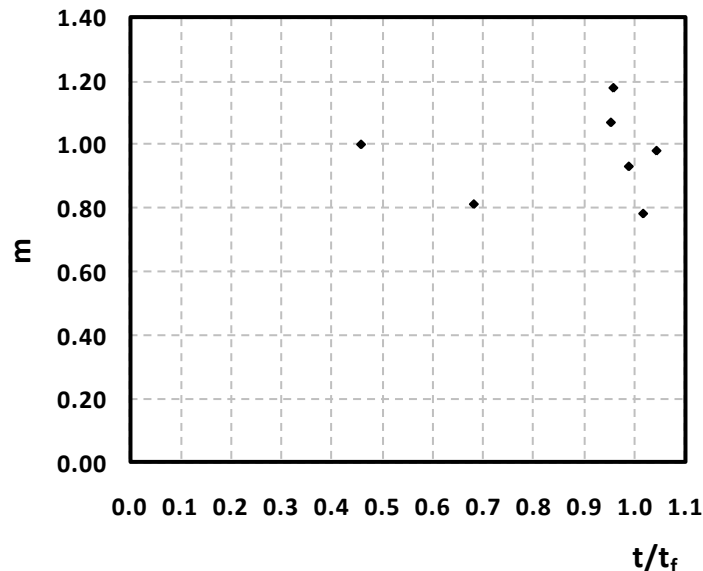
Σχήμα 7.11: Διάγραμμα ($t_{50\%}/t_f-t/t_f$) των συνολικών πειραμάτων από Debernardi (2008).

Ομοίως, στο Σχήμα 7.11, παρατηρείται πως για το σημείο D του πειράματος A17a, ο χρόνος που αναπτύσσεται το 50% της τελικής ερπυστικής παραμόρφωσης είναι πάρα πολύ μικρός σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία και συνεπώς, επιλέγεται να μη ληφθεί υπόψη (σημείο που σημειώνεται με κόκκινο κύκλο).



Σχήμα 7.12: Διάγραμμα ($\epsilon_{cr00}-t/t_f$) των συνολικών πειραμάτων από Debernardi (2008).

Στο Σχήμα 7.12, διακρίνουμε ότι υπάρχει μία σχετικά λογική εξέλιξη του $\varepsilon_{cr\infty}$ σε σχέση με το t/t_f , ανοδική όσο αυξάνεται η επιβαλλόμενη ένταση, με εξαίρεση το σημείο του πειράματος A17d στο σημείο Α. Αποφασίζεται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το συγκεκριμένο σημείο να παραληφθεί και μη ληφθεί υπόψη στην εξαγωγή των αντιπροσωπευτικών τιμών.



Σχήμα 7.13: Διάγραμμα ($m-t/t_f$) των συνολικών πειραμάτων από Debernardi (2008).

Από το Σχήμα 7.13, παρατηρείται πως δεν υπάρχει εξάρτηση της τιμής του m από το επίπεδο της τάσης, αλλά κυμαίνεται μεταξύ ενός εύρους τιμών 0.8-1.2. Η κλίση m υπολογίζεται από την εξίσωση:

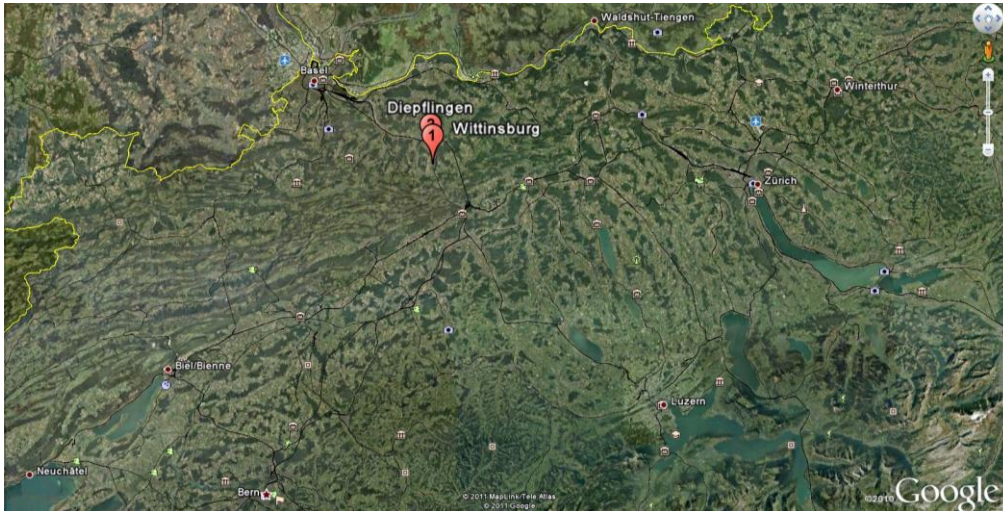
$$m = \frac{\Delta \log(\dot{\varepsilon})}{\Delta \log(t)} \quad 7.3$$

Σύμφωνα με την N.Hunaj-Sarihan (2009), αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών έδειξαν ότι το m κυμαίνεται γενικά, μεταξύ 0.7-0.8 (Tavenas et.al. 1978), 0.5-1.3 (Lacasse and Berre 2005) και 0.9-1.3 (Mansour et.al. 2008).

7.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων από Aristorenas (1987)²

Ο Aristorenas (1987) στη διδακτορική του διατριβή μελέτησε την ερπυστική συμπεριφορά του σχιστόλιθου και εκτέλεσε πειράματα ερπυσμού, με δείγματα από τις περιοχές Diepflingen και Wittinsburg της σήραγγας Wisenburg στην Ελβετία.

² Τα στοιχεία της συγκεκριμένης παραγράφου προέρχονται κυρίως από τη διδακτορική διατριβή του G.V.Aristorenas "Time-dependent behaviour of tunnels excavated in shale".



Εικόνα 7.5: Αεροφωτογραφία της περιοχής πρόσβασης της σήραγγας Wisenburg από το λογισμικό Google Earth.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια στοιχεία των δειγμάτων σχιστόλιθου, τα οποία ο Aristorenas (1987) χρησιμοποίησε στις εργαστηριακές του δοκιμές.

Πίνακας 7.4: Στοιχεία δειγμάτων σχιστόλιθου.

Δείγμα	Προέλευση	Γεωλογικός σχηματισμός	Βάθος (m)
23-1	Diepflingen	Opalinus Shale	22
23-5	Diepflingen	Opalinus Shale	50
23-6	Diepflingen	Opalinus Shale	55
23-9	Diepflingen	Lias α Shale	73
23-10	Diepflingen	Lias α Shale	77
26B-4	Wittinsburg	Opalinus Shale	38
26B-6	Wittinsburg	Opalinus Shale	47
26B-8	Wittinsburg	Opalinus Shale	58

Για τις ανάγκες του διδακτορικού του, ο Aristorenas (1987) εκτέλεσε 15 πειράματα τριαξονικής δοκιμής από τα οποία, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν μόνο εκείνα τα οποία πραγματοποιήθηκαν υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (DC). Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7.5) παρουσιάζονται, για τα πειράματα που μας αφορούν, οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας.

Πίνακας 7.5: Παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας των δειγμάτων σχιστόλιθου.

Πείραμα	23-1	23-5	23-9	26B-6	26B-8
Οχταεδρική τάση (MPa)	0.8	1.3	2.5	1.8	2.1
Διατμητική αντοχή (MPa)	1.30	1.96	2.66	2.40	3.0
Συνοχή, c (MPa)	0.79	0.38	0.90	1.60	1.31
Γωνία τριβής, φ (°)	27	63.4	36.7	20.3	32.5
Διατμητική παραμόρφωση στην αστοχία (%)	1.55	1.66	1.05	1.38	1.05
Τέμνον μέτρο διάτμησης στο 50% της αντοχής (MPa)	162.5	146.7	560.6	200.1	428.6
Μέτρο ελαστικότητας, E (MPa)	420	380	1460	520	1110

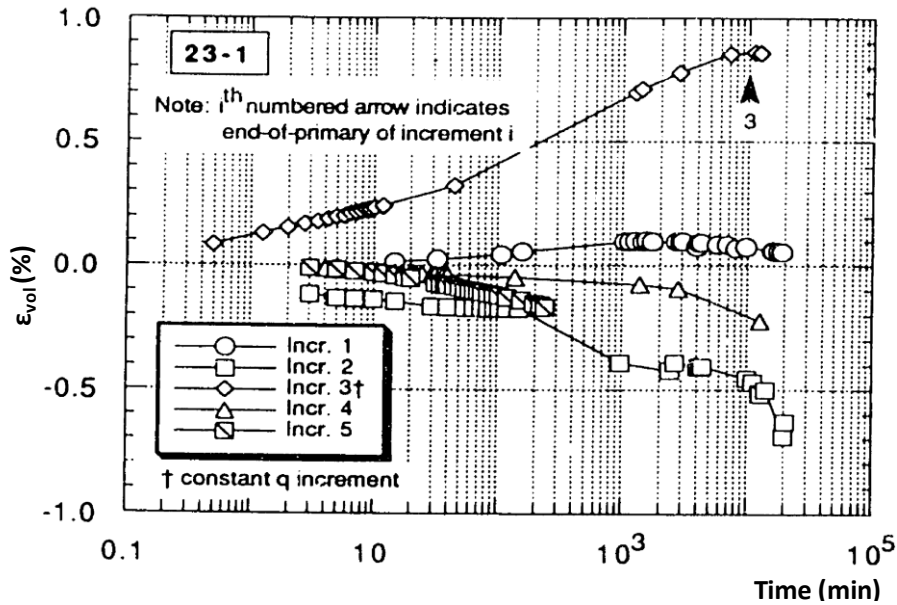
Ενδεικτικά, θα αναλυθεί ένα από τα παραπάνω πειράματα, καθώς όλα τα υπόλοιπα ακολουθούν την ίδια περίπου λογική. Στο πείραμα 23-1 DC για διάφορα επίπεδα (σ_{c0-q}) ο Aristorenas (1987) παρουσίασε τα αποτελέσματά του σε διαγράμματα ογκομετρικής παραμόρφωσης-χρόνου (ϵ_{vol} -time) (Σχήμα 7.14) και διατμητικής παραμόρφωσης-χρόνου (γ -time) (Σχήμα 7.16). Η οχταεδρική και διεκτροπική τάση, καθώς και η ογκομετρική και διατμητική παραμόρφωση υπολογίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\sigma_{oct} = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \quad 7.4$$

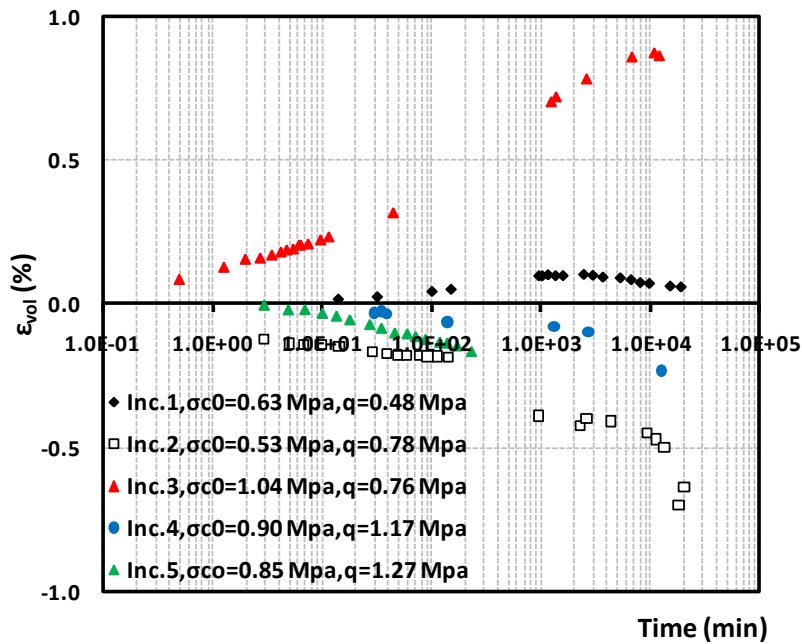
$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad 7.5$$

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = \epsilon_1 + 2\epsilon_3 \quad 7.6$$

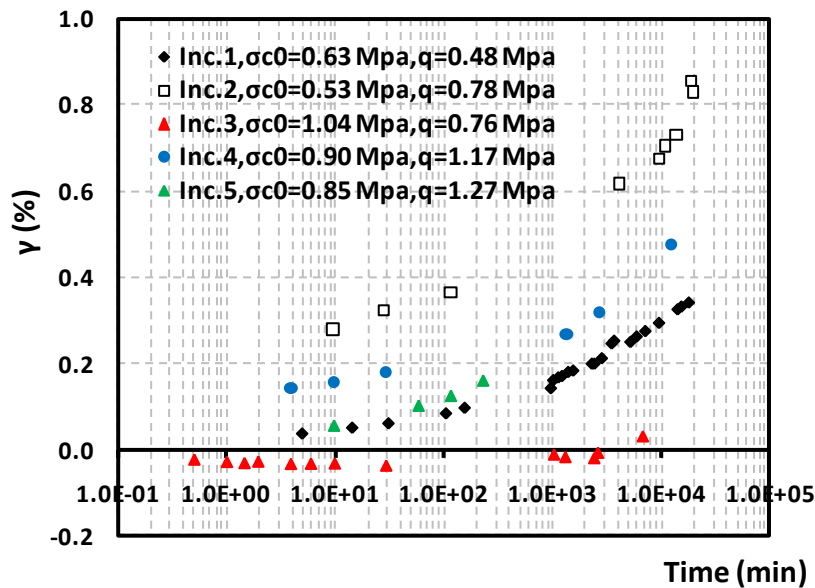
$$\gamma = \epsilon_1 - \epsilon_3 \quad 7.7$$



Σχήμα 7.14: Διάγραμμα (ϵ_{vol} -time) του πειράματος 23-1 DC από Aristorenas (1987).



Σχήμα 7.15: Διάγραμμα (ϵ_{vol} -time) του πειράματος 23-1 DC από Aristorenas (1987) (μετά από ψηφιοποίηση της αντίστοιχης δοσμένης καμπύλης).



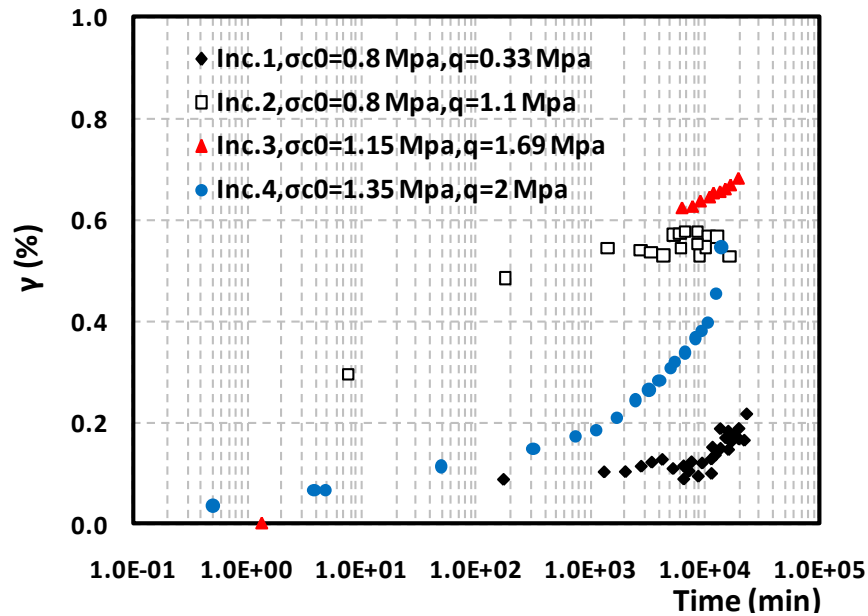
Σχήμα 7.16: Διαγράμμα (γ-time) του πειράματος 23-1 DC από Aristorenas (1987) (μετά από ψηφιοποίηση της αντίστοιχης δοσμένης καμπύλης).

Για κάθε στάδιο φόρτισης του πειράματος 23-1 DC (Inc.1, 2, 3, 4, 5) έχουμε τα διαγράμματα (ϵ_{vol} -time) και (γ-time), τα οποία ψηφιοποιήθηκαν με χρήση του προγράμματος Getdata Digitizer 2.22 και τα αποτελέσματα μεταφέρθηκαν σε φύλλο εργασίας του Microsoft Excel. Η ογκομετρική παραμόρφωση για κάθε στάδιο φόρτισης, μετατράπηκε σε κατακόρυφη παραμόρφωση ϵ_1 , όπου σύμφωνα με τις εξισώσεις 7.6, 7.7 ισχύει:

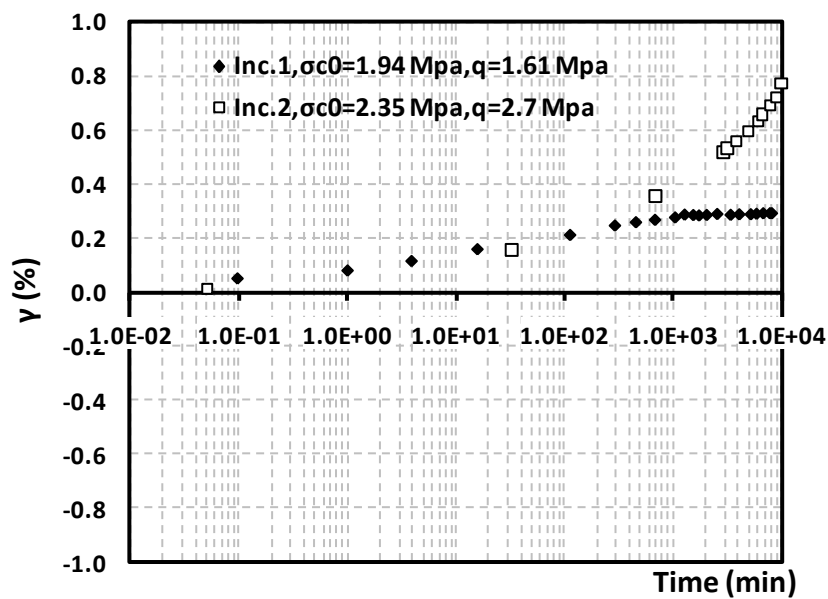
$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_{vol} + 2\gamma}{3} \quad 7.8$$

Στη συνέχεια, απαιτώντας το σ_{oct} να ισούται με τη δοσμένη τιμή και παράλληλα να ικανοποιείται το κριτήριο του Mohr-Coulomb, υπολογίζεται το q_f και τελικά το ζητούμενο ϕ_{cr} , όπως περιγράφεται παρακάτω (Κεφάλαιο 7.3).

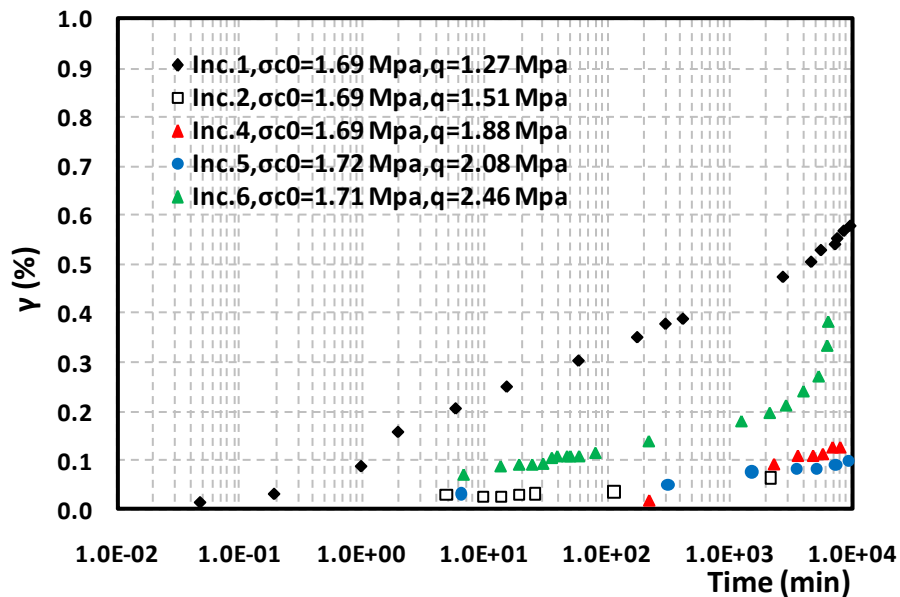
Ακριβώς η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα υπόλοιπα πειράματα από τα οποία καταλήξαμε ομοίως στα αντίστοιχα ϕ_{cr} για κάθε επίπεδο έντασης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα διατμητικής παραμόρφωσης-χρόνου (γ-time) από το πρόγραμμα Getdata Digitizer 2.22 για τα πειράματα 23-5, 23-9, 23B-6, 23B-8.



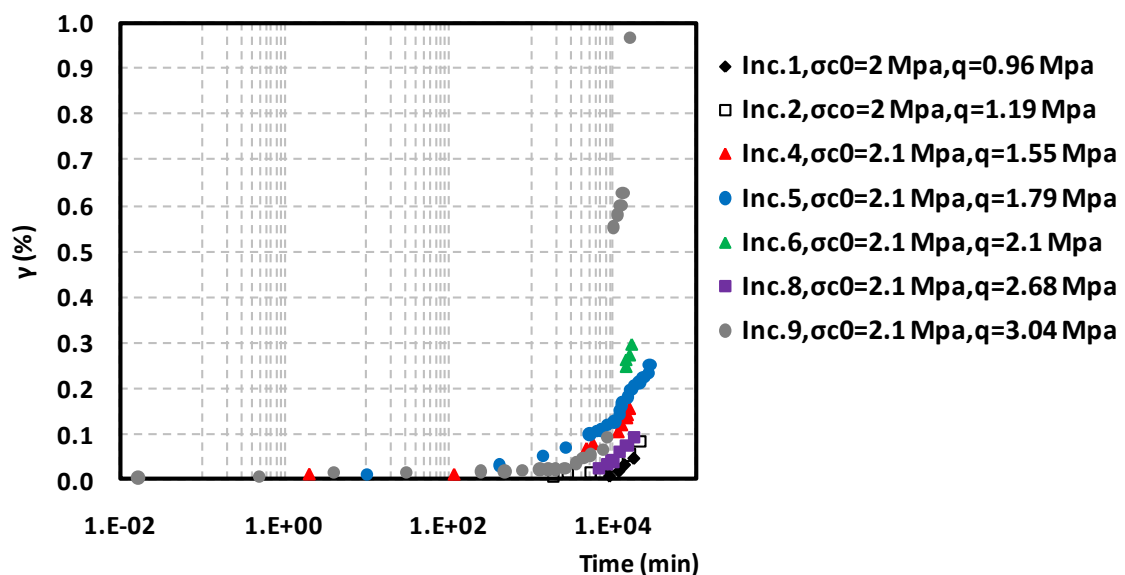
Σχήμα 7.17: Διάγραμμα (γ -time) για το πείραμα 23-5 DC από Aristorenas (1987)(μετά από ψηφιοποίηση της αντίστοιχης δοσμένης καμπύλης).



Σχήμα 7.18: Διάγραμμα (γ -time) για το πείραμα 23-9 DC από Aristorenas (1987) (μετά από ψηφιοποίηση της αντίστοιχης δοσμένης καμπύλης).



Σχήμα 7.19: Διάγραμμα (γ -time) για το πείραμα 26B-6 DC από Aristorenas (1987) (μετά από ψηφιοποίηση της αντίστοιχης δοσμένης καμπύλης).

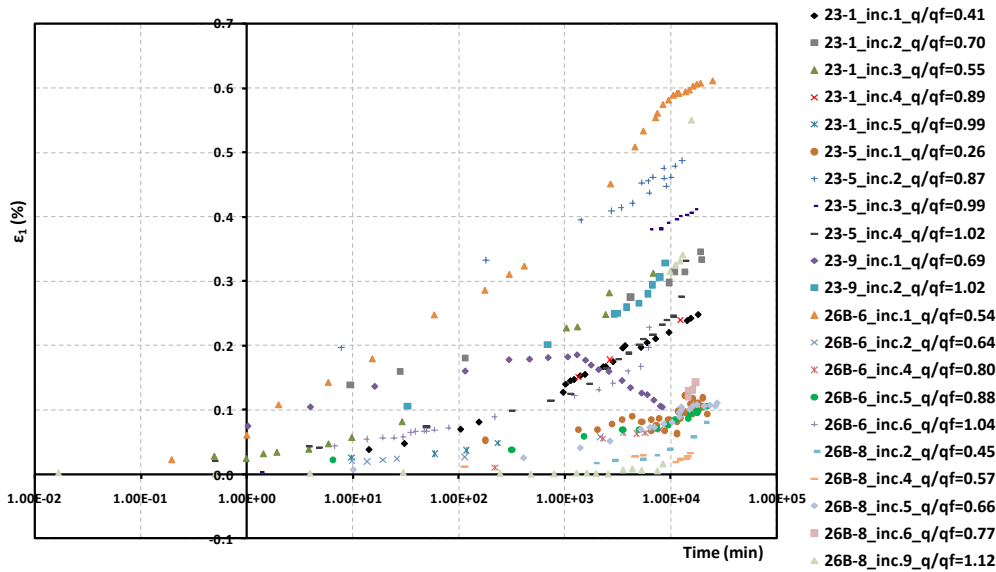


Σχήμα 7.20: Διάγραμμα (γ -time) για το πείραμα 26B-8 DC από Aristorenas (1987) (μετά από ψηφιοποίηση της αντίστοιχης δοσμένης καμπύλης).

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Πίνακας 7.6) με όλα τα αποτελέσματα των πειραμάτων, καθώς και τα διαγράμματα των $(\phi_{cr}-q/q_f)$, $(t_{50\%}/t_{inf}-q/q_f)$, $(\epsilon_{cr,inf}-q/q_f)$ και κατακόρυφης παραμόρφωσης-χρόνου (ϵ_1 -time).

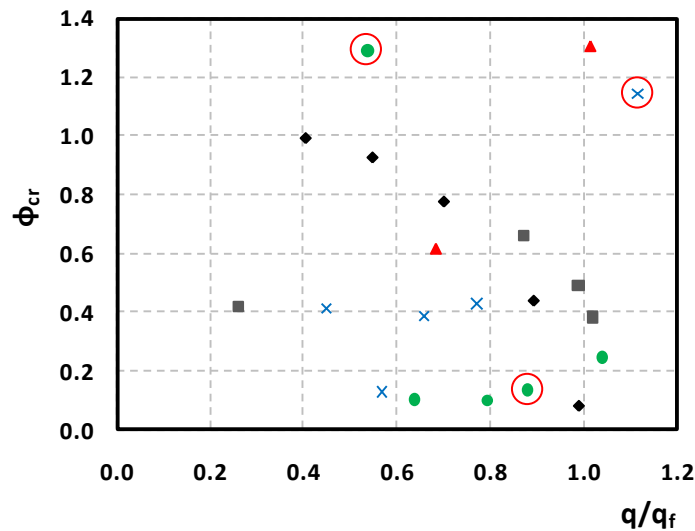
Πείραμα	Στάδιο φόρτισης	σ_{co} (MPa)	q (MPa)	c (MPa)	ϕ (°)	E (MPa)	ϕ_{cr}	q/qf	$\epsilon_{cr,inf}$ (%)	$t_{50\%}/t_{inf}$	m	Παρατηρήσεις
23-1 DC	1	0.63	0.48	0.79	27	420	0.99	0.41	0.25	0.053	0.81	-
23-1 DC	2	0.53	0.78	0.79	27	420	0.78	0.70	0.33	0.0059	0.69	-
23-1 DC	3	1.04	0.76	0.79	27	420	0.93	0.55	0.31	0.152	0.75	Η διασμητική τάση διατηρείται σταθερή.
23-1 DC	4	0.90	1.17	0.79	27	420	0.44	0.89	0.24	0.109	0.73	-
23-1 DC	5	0.85	1.27	0.79	27	420	0.08	0.99	0.05	0.252	-	1. Μικρή διάρκεια της δοκιμής σε σχέση με τα άλλα στάδια φόρτισης. 2. Μη ρεαλιστική τιμή του m.
23-5 DC	1	0.8	0.33	0.38	63.4	380	0.42	0.26	0.09	0.060	-	Μη ρεαλιστική τιμή του m.
23-5 DC	2	0.8	1.1	0.38	63.4	380	0.66	0.87	0.49	0.014	0.75	-
23-5 DC	3	1.15	1.69	0.38	63.4	380	0.49	0.99	0.41	0.376	0.88	-
23-5 DC	4	1.35	2	0.38	63.4	380	0.38	1.02	0.33	0.233	0.69	-
23-9 DC	1	1.94	1.61	0.9	36.7	1450	0.62	0.69	0.10	0.00012	1.03	Έγτονη εγκάρσια εφελκυστική παραμόρφωση.
23-9 DC	2	2.35	2.7	0.9	36.7	1450	1.30	1.02	0.33	0.078	0.54	-
26B-6 DC	1	1.70	1.27	1.6	20.3	520	1.29	0.54	0.61	0.012	1.00	Η συνιστώσα της στερεοποίησης ήταν πολύ σημαντική.
26B-6 DC	2	1.70	1.51	1.6	20.3	520	0.10	0.64	0.06	1	0.58	-
26B-6 DC	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Περιορισμένη ευκρίνεια στα δοσμένα διαγράμματα.
26B-6 DC	4	1.70	1.88	1.6	20.3	520	0.10	0.80	0.07	0.288	0.85	-
26B-6 DC	5	1.70	2.08	1.6	20.3	520	0.14	0.88	0.11	0.069	0.56	-
26B-6 DC	6	1.70	2.46	1.6	20.3	520	0.25	1.04	0.23	0.197	0.41	-
26B-8 DC	1	2	0.96	1.31	32.5	1110	-	-	-	-	-	Περιορισμένη ευκρίνεια στα δοσμένα διαγράμματα.
26B-8 DC	2	2	1.19	1.31	32.5	1110	0.41	0.45	0.08	0.755	-	Μη ρεαλιστική τιμή του m.
26B-8 DC	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Περιορισμένη ευκρίνεια στα δοσμένα διαγράμματα.
26B-8 DC	4	2.1	1.55	1.31	32.5	1110	0.13	0.57	0.03	0.299	-	Μη ρεαλιστική τιμή του m.
26B-8 DC	5	2.1	1.79	1.31	32.5	1110	0.39	0.66	0.11	0.189	0.61	-
26B-8 DC	6	2.1	2.1	1.31	32.5	1110	0.43	0.77	0.14	0.855	-	Μη ρεαλιστική τιμή του m.
26B-8 DC	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Περιορισμένη ευκρίνεια στα δοσμένα διαγράμματα.
26B-8 DC	8	2.1	2.68	1.31	32.5	1110	0.008	0.99	0.003	-	-	Περιορισμένη ευκρίνεια στα δοσμένα διαγράμματα.
26B-8 DC	9	2.1	3.04	1.31	32.5	1110	1.14	1.12	0.55	0.629	0.23	Ερπυστική αστοχία.

Πίνακας 7.6: Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των πειραμάτων από Aristorenas (1987).



Σχήμα 7.21: Καμπύλες κατακόρυφης παραμόρφωσης-χρόνου όλων των πειραμάτων από Aristorenas (1987).

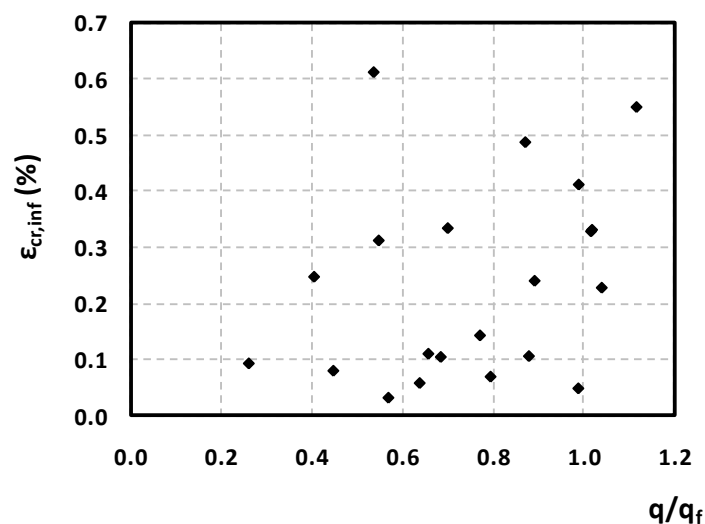
Η κατακόρυφη παραμόρφωση, ε_1 , ακολουθεί παρόμοια λογική με τα διαγράμματα διατμητικής παραμόρφωσης-χρόνου. Η ε_1 εξαρτάται μεταξύ άλλων από τις παραμέτρους c , ϕ , E , όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση αλλάζουν για κάθε πείραμα. Παρατηρείται πως για καλύτερης ποιότητας γεωυλικά, η κατακόρυφη παραμόρφωση είναι κατά κύριο λόγο μικρότερη σε σχέση με χαμηλότερης ποιότητας. Ακόμη, διακρίνεται η εξάρτησή της από το επίπεδο έντασης που επιβάλλεται, όπου συνηθέστερα, η ε_1 αυξάνεται με την αύξηση του q/q_f .



Σχήμα 7.22: Διάγραμμα (ϕ_{cr} - q/q_f) όλων των πειραμάτων από Aristorenas (1987).

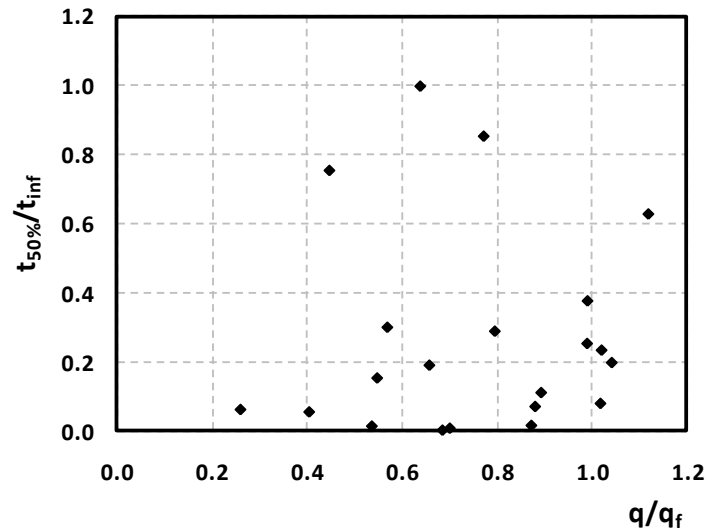
Ο ερπυστικός συντελεστής ϕ_{cr} κυμαίνεται, στα πειράματα από Aristorenas (1987), μεταξύ των τιμών 0.1-1.0, τιμές μεγαλύτερες σε σχέση με τα αποτελέσματα από Debernardi (2008). Αυτό οφείλεται εν μέρει, στο ότι ο Debernardi (2008) εκτέλεσε πειράματα ερπυσμού σε γεωυλικό με $c=3.5\text{MPa}$ και $\phi=34^\circ$, υλικό δηλαδή πολύ καλύτερης ποιότητας, συνεπώς

αναμένουμε και μικρότερες ερπυστικές παραμορφώσεις σε σχέση με τα πειράματα από Aristorenas (1987). Ακόμη, σε ορισμένες περιπτώσεις, παρατηρείται μία πτωτική τάση του ϕ_{cr} , χωρίς να γίνεται σαφές πως αύξηση του επιπέδου της επιβαλλόμενης έντασης συνεπάγεται συνήθως, αύξηση της ερπυστικής παραμόρφωσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι η ερπυστική παράμετρος ϕ_{cr} είναι αντίστροφα ανάλογη του όρου q/q_f , με αποτέλεσμα το ϕ_{cr} να μην είναι πάντα αυξητικό. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί, πως οι τιμές του ϕ_{cr} είναι πρακτικά μεγαλύτερες από αυτές που προσδιορίστηκαν βάσει των εργαστηριακών δοκιμών. Το γεγονός αυτό οφείλεται αφενός, στο ότι τα πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί σε δοκίμια άρρηκτου βράχου, ενώ στην πραγματικότητα στο σύνολο της βραχώμαζας που περιβάλλει τη σήραγγα, υπάρχουν και ασυνέχειες που προσφέρουν επιπλέον παραμόρφωση, άρα αύξηση του ερπυστικού συντελεστή. Αφετέρου, ο χρόνος εκτέλεσης των πειραμάτων στο εργαστήριο είναι σαφώς πολύ μικρότερος από το χρόνο που χρειάζονται να αναπτυχθούν οι τελικές ερπυστικές παραμορφώσεις στη φύση. Τα σημεία που σημειώνονται με κόκκινο κύκλο αποφασίζεται να μη ληφθούν υπόψη, όπως αναφέρεται παραπάνω (Πίνακας 7.6).



Σχήμα 7.23: Διάγραμμα ($\varepsilon_{cr,inf}$ - q/q_f) όλων των πειραμάτων από Aristorenas (1987).

Από το Σχήμα 7.23 και τις τιμές του Πίνακα 7.6 παρατηρείται με μεγαλύτερη σαφήνεια, ότι όσο αυξάνεται η επιβαλλόμενη ένταση (q/q_f), αυξάνεται και η ερπυστική παραμόρφωση. Το εύρος τιμών του $\varepsilon_{cr,inf}$ κυμαίνεται μεταξύ 0.05-0.3%.



Σχήμα 7.24: Διάγραμμα ($t_{50\%}/t_{inf}-q/q_f$) όλων των πειραμάτων από Aristorenas (1987).

Στο Σχήμα 7.24, παρατηρείται πως ο λόγος ($t_{50\%}/t_{inf}$) κυμαίνεται μεταξύ, κυρίως, ενός εύρους τιμών 0.1-0.4. Οι πολύ μικρές τιμές ωστόσο που διακρίνουμε, δηλώνουν πως η τελική ερπυστική παραμόρφωση αναπτύχθηκε πάρα πολύ γρήγορα, με αποτέλεσμα ο λόγος ($t_{50\%}/t_{inf}$) να είναι σχεδόν μηδενικός. Τα συγκεκριμένα σημεία, δε λαμβάνονται υπόψη καθώς δεν κρίνονται ρεαλιστικά.

Σε όλα τα παραπάνω διαγράμματα, το γεγονός ότι κάποιες τιμές των q/q_f ξεπερνούν τη μονάδα, οφείλεται εν μέρει, στο ότι έχουν υπολογιστεί με μέσες τιμές παραμέτρων (c, ϕ).

7.3 Υπολογισμός των παραμέτρων του προσομοιώματος των Singh & Mitchell (1968)

Σκοπός της παραπάνω διαδικασίας που περιγράφηκε, είναι να εκφραστούν οι παράμετροι του προσομοιώματος των Singh & Mitchell (1968) (A, m, a), το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία, ως προς κάποιες πιο “φιλικές” προς το μηχανικό. Ξεκινώντας από την εξίσωση των Singh & Mitchell (1968) (Εξίσωση 7.9), θα υπολογιστούν οι παράμετροι A, m, a , με χρήση των αποτελεσμάτων που εξάγαμε από την επεξεργασία των ερπυστικών πειραμάτων του Debernardi (2008) και Aristorenas (1987).

$$\dot{\varepsilon} = Ae^{ad} \left(\frac{t_1}{t} \right)^m \quad 7.9$$

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση 7.9 και για $t_1=1$ προκύπτει:

$$\varepsilon = c + \frac{A}{1-m} e^{ad} t^{(1-m)}, c = \varepsilon_1 - \frac{A}{1-m} e^{ad}, \text{ για } m \neq 1 \quad 7.10$$

Για $\varepsilon_1=0$ στη εξίσωση 7.10 προκύπτει:

$$\varepsilon = \frac{A}{1-m} e^{aD} (t^{(1-m)} - 1) \Leftrightarrow \varepsilon = \frac{A}{m-1} e^{aD} (1 - t^{(1-m)}) \quad 7.11$$

Για να επιλύσουμε την εξίσωση 7.11 χρειαζόμαστε δύο χαρακτηριστικούς χρόνους, οι οποίοι ορίστηκαν αυθαίρετα και δύο πειράματα σε δύο διαφορετικά επίπεδα έντασης. Αρχικά, επελέγη ο χρόνος $t_{50\%}$, στον οποίο έχει πραγματοποιηθεί το 50% της τελικής ερπυστικής παραμόρφωσης και ο χρόνος στο άπειρο, t_{∞} . Για πρακτικούς όμως λόγους, καθώς ο χρόνος ∞ δεν υφίσταται σε ένα τεχνικό έργο, ο χρόνος t_{∞} αποφασίστηκε να αντικατασταθεί με ένα συγκεκριμένο χρόνο σχεδιασμού, t_d . Ο χρόνος t_d είναι ο χρόνος που εμείς θεωρούμε ότι αντιπροσωπεύει την τεχνική διάρκεια του έργου. Θέτοντας, λοιπόν, στην εξίσωση 7.11 $t_{50\%}$ και t_d αντίστοιχα, καταλήγουμε σε δύο εξισώσεις, από τη διαίρεση των οποίων προκύπτει ο υπολογισμός της παραμέτρου m :

$$\frac{\varepsilon_{cr,t_{50\%}}}{\varepsilon_{cr,t_d}} = \frac{(1 - t_{50\%}^{1-m})}{(1 - t_d^{1-m})} = \frac{1}{2} \Rightarrow t_d^{1-m} - 2t_{50\%}^{1-m} + 1 = 0 \quad 7.12$$

Ο ερπυστικός συντελεστής ϕ_{cr} , αδιάστατο μέγεθος, το εύρος του οποίου υπολογίστηκε παραπάνω, ορίζεται ως το πηλίκο της ερπυστικής παραμόρφωσης σε χρόνο t_d προς την ελαστική παραμόρφωση ε_{el} .

$$\varepsilon_{el} = q/q_f \left(\frac{\sigma_c}{E} \right) \quad 7.13$$

$$\phi_{cr} = \frac{\varepsilon_{cr,t_d}}{\varepsilon_{el}} = \frac{A}{m-1} (1 - t_d^{1-m}) \frac{E}{\sigma_c} \left(\frac{e^{a(q/q_f)}}{q/q_f} \right) \quad 7.14$$

Αντικαθιστώ για δύο διαφορετικά επίπεδα έντασης $D_1=(q/q_f)_1$ και $D_2=(q/q_f)_2$ αντίστοιχα στην εξίσωση 7.14 και από διαίρεση των δύο κατά μέλη προκύπτει ο υπολογισμός της παραμέτρου a :

$$a = \frac{\ln \left[\left(\phi_{cr,2} / \phi_{cr,1} \right) (q/q_f)_2 / (q/q_f)_1 \right]}{(q/q_f)_2 - (q/q_f)_1} \quad 7.15$$

Τελικά, αφαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις που προκύπτουν από την 7.14 για D_1 και D_2 , καταλήγουμε στον προσδιορισμό της παραμέτρου A :

$$A = \frac{\sigma_c}{E} \frac{(\phi_{cr,2} - \phi_{cr,1})(m-1)}{(1 - t_d^{1-m}) \left[\left(e^{a(q/q_f)_2} / (q/q_f)_2 \right) - \left(e^{a(q/q_f)_1} / (q/q_f)_1 \right) \right]} \quad 7.16$$

Οι παράμετροι A και a λαμβάνουν τιμές μεγαλύτερες του μηδενός. Συνεπώς, από την εξίσωση 7.15, όπου ο παρανομαστής είναι πάντα θετικός αφού $(q/q_f)_2 > (q/q_f)_1$, προκύπτει ο παρακάτω περιορισμός:

$$a > 0 \Rightarrow \ln \left(\frac{\phi_{cr,2} (q/q_f)_2}{\phi_{cr,1} (q/q_f)_1} \right) > 0 \Rightarrow \frac{\phi_{cr,2}}{\phi_{cr,1}} > \frac{(q/q_f)_1}{(q/q_f)_2} \quad 7.17$$

8 ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

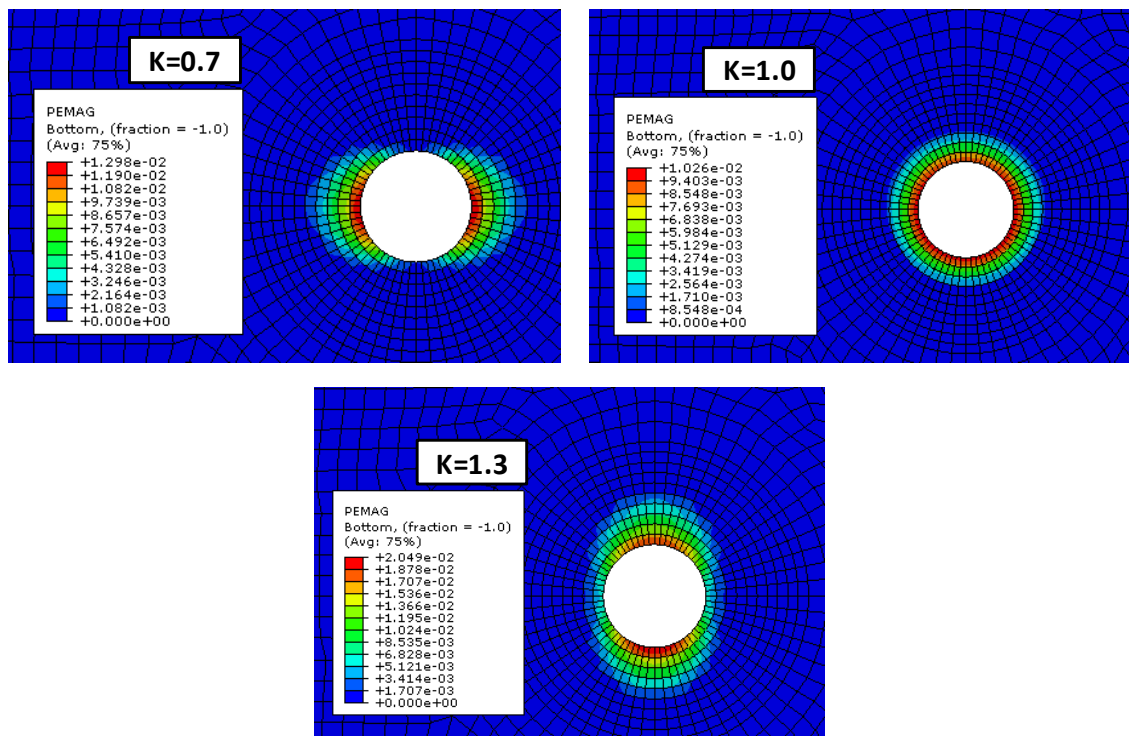
Το προσομοίωμα το οποίο περιγράφηκε αναλυτικά παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε για τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων όλων των παραμετρικών αναλύσεων. Στο παρακάτω κεφάλαιο θα παρουσιαστούν γραφικά και θα συγκριθούν ποιοτικά, τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από κάποιες ενδεικτικές αριθμητικές αναλύσεις στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS 6.9.1. Η διαδικασία αυτή θα πραγματοποιηθεί διατηρώντας κάθε φορά κάποιες παραμέτρους των αναλύσεων σταθερές και μελετώντας την επίδραση των παραμέτρων που μεταβάλλονται, στα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει σύγκριση των πλαστικών παραμορφώσεων - πλαστικών ζωνών που αναπτύσσονται γύρω από τη σήραγγα (PEMAG), των συνολικών μετατοπίσεων των εδαφικών στοιχείων του προσομοιώματος (U), των πιέσεων επί της τελικής επένδυσης πριν, αλλά και μετά την επιβολή του ερπυσμού (CPRESS) και των παραμορφώσεων λόγω του φαινομένου του ερπυσμού στην περιβάλλουσα βραχόμαζα (CEMAG).

8.2 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΤΑΣΕΩΝ (K)

Για τη μελέτη της επίδρασης του συντελεστή οριζόντιων τάσεων (K) επιλέχθηκαν τρεις αναλύσεις με $K=0.7$, $K=1.0$ και $K=1.3$ αντίστοιχα, οι οποίες έχουν κοινές τις παραμέτρους που εκφράζουν τις ιδιότητες της βραχόμαζας, $GSI=20$, $\sigma_{ci}=10\text{MPa}$, $m_i=6$, καθώς και τους ερπυστικούς συντελεστές $\phi_{cr,1}=0.2$ και $\phi_{cr,2}=0.25$.

8.2.1 Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG)



Εικόνα 8.1: Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων των αναλύσεων 20_a_329_A, 20_a_549_A και 20_a_759_A, με συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K=0.7, 1.0, 1.3$ αντίστοιχα και $GSI=20, \sigma_{ci}=10MPa, m_i=6$.

Από την Εικόνα 8.1, παρατηρείται πως για συντελεστή οριζόντιων τάσεων μικρότερο της μονάδας και συγκεκριμένα $K=0.7$, η πλαστική ζώνη αναπτύσσεται κυρίως στις παρειές της σήραγγας με μέγιστη τιμή πλαστικής παραμόρφωσης $PEMAG_{max}=1.298 \times 10^{-02}$, για $K=1.3$ η πλαστική ζώνη αναπτύσσεται στην κορυφή και στο δάπεδο της σήραγγας με $PEMAG_{max}=2.049 \times 10^{-02}$, ενώ για $K=1.0$ η μέγιστη τιμή των πλαστικών παραμορφώσεων, $PEMAG_{max}=1.026 \times 10^{-02}$, αναπτύσσεται ομοιόμορφα περιμετρικά της σήραγγας.

Στη συνέχεια θα γίνει μία προσπάθεια προσέγγισης όλων των παραπάνω παρατηρήσεων σε θεωρητικό επίπεδο. Στην οροφή της σήραγγας η κατακόρυφη τάση (σ_{v0}) είναι ακτινική και η οριζόντια ($\sigma_{h0}=K\sigma_{v0}$) είναι εφαπτομενική, ενώ αντίστοιχα στις παρειές η οριζόντια είναι ακτινική και η κατακόρυφη εφαπτομενική. Ακόμη, γνωρίζουμε πως καθώς “προχωράει” η εκσκαφή της σήραγγας μειώνονται οι ακτινικές τάσεις (σ_r) και αυξάνονται οι εφαπτομενικές (σ_θ).

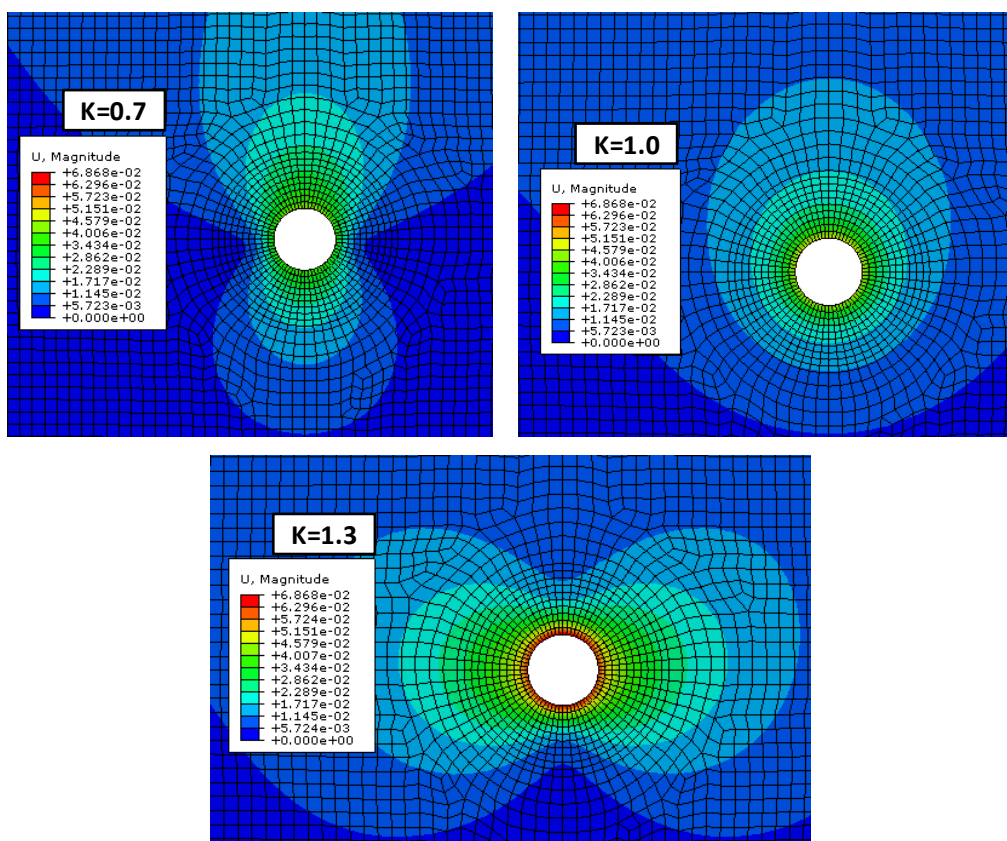
Εξετάζοντας αρχικά την περίπτωση όπου $K=0.7 (<1.0)$, η οριζόντια τάση είναι μικρότερη από την κατακόρυφη. Σύμφωνα με τα παραπάνω και με χρήση του κύκλου Mohr, για ένα σημείο στην οροφή της σήραγγας, καθώς “προχωράει” η εκσκαφή, η διαφορά ($\sigma_{v0}-\sigma_{h0}$) μειώνεται. Ομοίως, για τις παρειές της σήραγγας η διαφορά ($\sigma_{v0}-\sigma_{h0}$) ολοένα και μεγαλώνει. Συνεπώς, ο κύκλος Mohr των παρειών της σήραγγας θα φτάσει πρώτος στην περιβάλλουσα αστοχίας και στις περιοχές αυτές θα αναπτυχθούν πρώτα πλαστικές παραμορφώσεις.

Αντιθέτως, στην περίπτωση όπου $K=1.3$ (>1.0), η οριζόντια τάση είναι μεγαλύτερη από την κατακόρυφη. Καθώς “προχωράει” η εκσκαφή, ο κύκλος Mohr για ένα σημείο στην οροφή ή στο δάπεδο αντίστοιχα της σήραγγας, θα φτάσει πρώτος στην περιβάλλουσα αστοχίας σε σχέση με τον κύκλο στις παρειές. Αυτό συμβαίνει διότι η διαφορά, όπου τώρα είναι ($\sigma_{ho}-\sigma_{vo}$), δηλαδή η διάμετρος του κύκλου, ολοένα και αυξάνεται. Συνεπώς, αναμένουμε να αναπτυχθούν μεγαλύτερες πλαστικές παραμορφώσεις στην οροφή σε σχέση με τις παρειές της σήραγγας. Τέλος, στην περίπτωση όπου $K=1.0$ ($\sigma_{ho}=\sigma_{vo}$) η κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων εμφανίζεται ομοιόμορφη περιμετρικά της σήραγγας.

Διαπιστώνουμε λοιπόν, πως τα αποτελέσματα των τριών ενδεικτικών αναλύσεων που εξάγαμε από το πρόγραμμα ABAQUS 6.9.1, συμπίπτουν με τα όσα θεωρητικά περιγράφηκαν παραπάνω.

8.2.2 Συνολικές μετατοπίσεις (U)

Για να γίνουν εύκολα συγκρίσιμα τα αποτελέσματα των συνολικών μετατοπίσεων των τριών αναλύσεων που έχουν επιλεχθεί, βρέθηκε η μέγιστη και ελάχιστη τιμή τους και όλα τα υπομνήματα έχουν τα ίδια ακρότατα (Εικόνα 8.2).



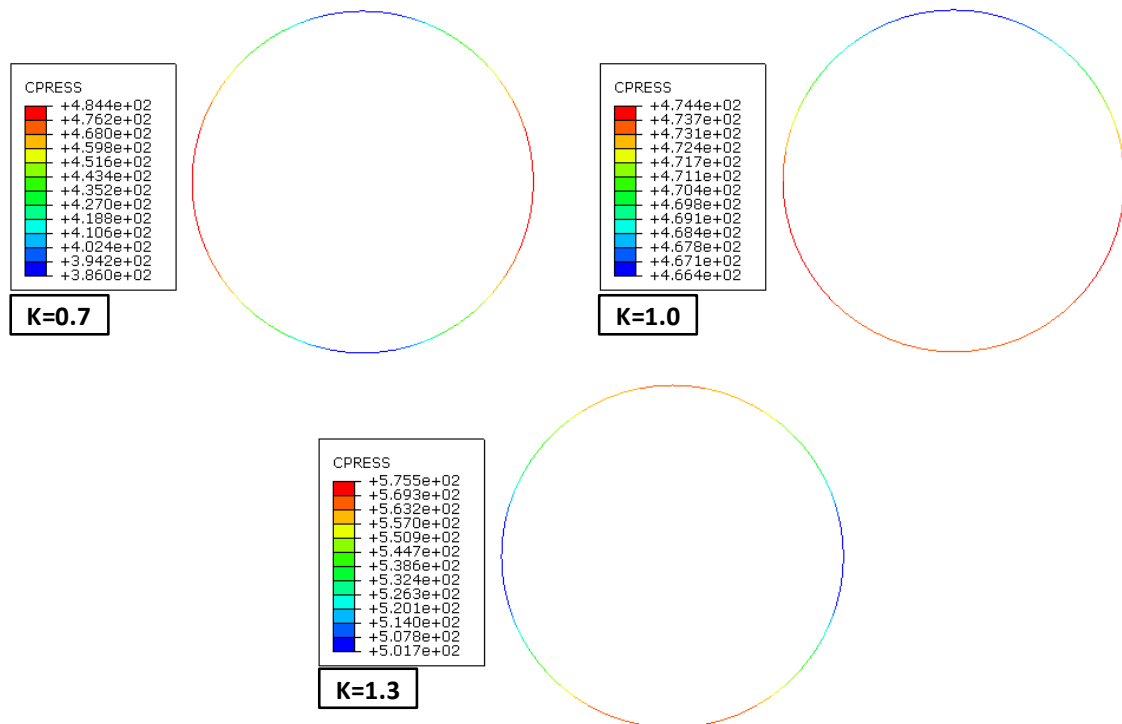
Εικόνα 8.2: Κατανομή συνολικών μετατοπίσεων των αναλύσεων 20_a_329_A, 20_a_549_A και 20_a_759_A, με συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K=0.7, 1.0, 1.3$ αντίστοιχα και $GSI=20, \sigma_{ci}=10MPa, m_i=6$.

Από την Εικόνα 8.2, παρατηρείται πως για συντελεστή οριζόντιων τάσεων μικρότερο της μονάδας και συγκεκριμένα για $K=0.7$, οι μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις εμφανίζονται στην οροφή της σήραγγας. Για $K=1.0$ οι συνολικές μετατοπίσεις εμφανίζονται σχεδόν ομοιόμορφα γύρω από τη σήραγγα, παρουσιάζοντας την μέγιστη τιμή τους, που είναι εμφανώς μικρότερη από προηγουμένως, στην οροφή της σήραγγας. Τέλος, για $K=1.3$ οι μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις, που έχουν την μεγαλύτερη τιμή από τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, εμφανίζονται στις παρειές της σήραγγας.

Συγκρίνοντας την Εικόνα 8.1 με την Εικόνα 8.2, μια σημαντική παρατήρηση είναι πως για κάθε περίπτωση διαφορετικού συντελεστή οριζόντιων τάσεων, οι μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις εμφανίζονται στις περιοχές με τις ελάχιστες πλαστικές παραμορφώσεις.

8.2.3 Πιέσεις στην τελική επένδυση (CPRESS)

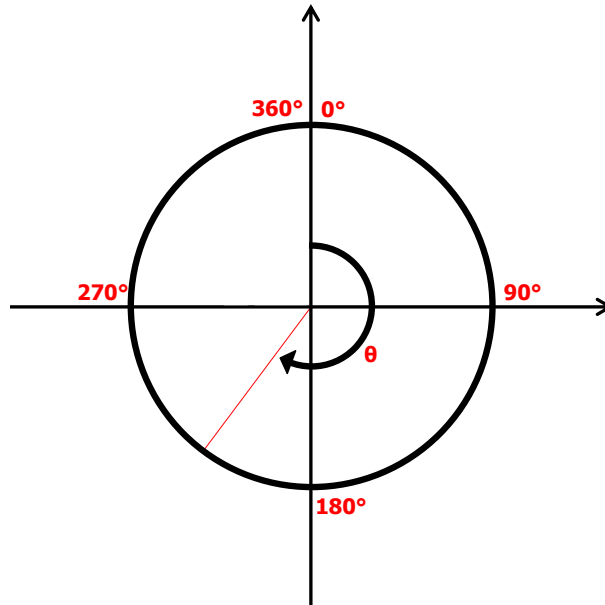
Η μεταβολή του συντελεστή οριζόντιων τάσεων K , επιφέρει μεταβολές στην κατανομή και τις τιμές των πιέσεων επί της τελικής επένδυσης της σήραγγας.



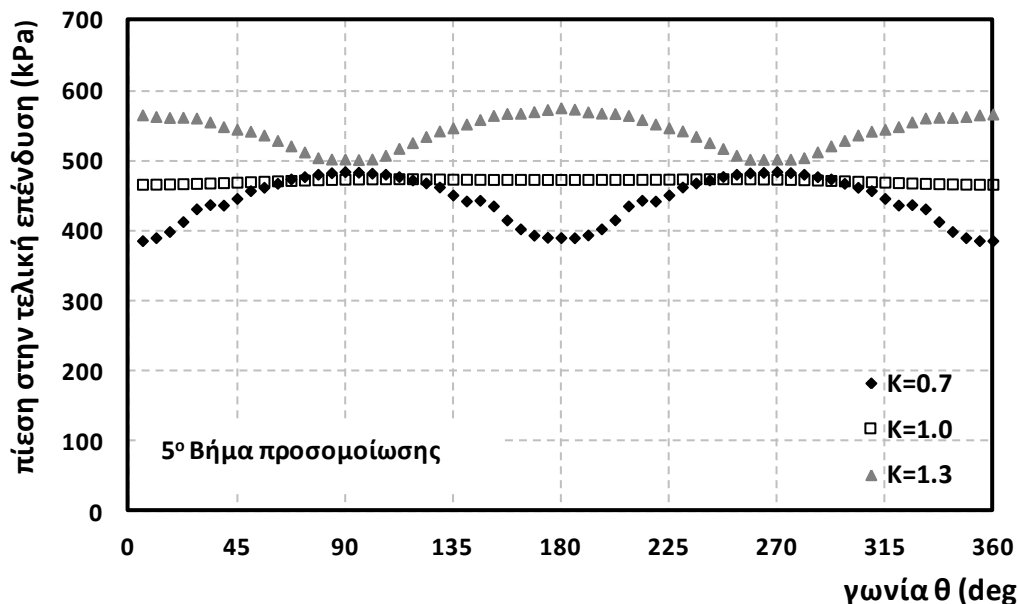
Εικόνα 8.3: Κατανομή πιέσεων στην τελική επένδυση των αναλύσεων 20_a_329_A, 20_a_549_A και 20_a_759_A, με συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K=0.7$, 1.0 , 1.3 αντίστοιχα και $GSI=20$, $\sigma_c=10MPa$, $m_i=6$.

Για την καλύτερη και ευκρινέστερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων που διακρίνονται στην Εικόνα 8.3, δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα της πίεσης επί της τελικής επένδυσης και της γωνίας που ασκείται, σε φύλλο εργασίας του Microsoft Excel. Απεικονίζοντας την κυκλική σήραγγα του προβλήματός μας σύμφωνα με το Σχήμα 8.1 παρακάτω, στις 0° και 360° αντιστοιχεί η οροφή της σήραγγας, στις 90° η δεξιά παρειά, στις 180° το δάπεδο και στις

270° η αριστερή παρειά της σήραγγας. Η δεξιόστροφη γωνία θ , όπως διακρίνεται στο παρακάτω σχήμα, δείχνει κάθε φορά σε πιο σημείο ασκείται η πίεση στην τελική επένδυση.



Σχήμα 8.1: Βοηθητικό σχήμα για την απεικόνιση της γωνίας θ που ασκείται κάθε φορά η πίεση επί της τελικής επένδυσης.



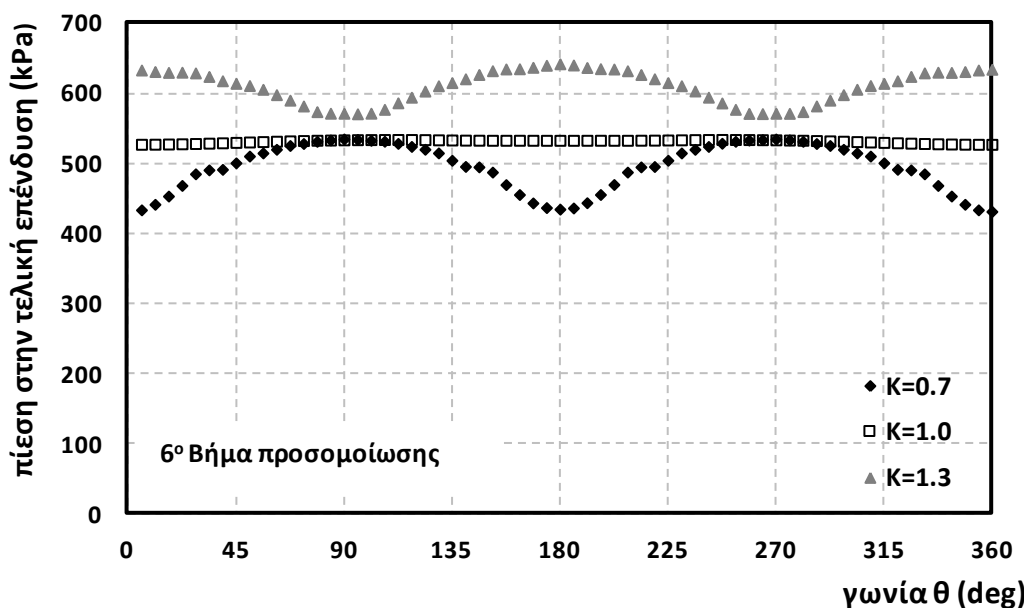
Σχήμα 8.2: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση και της γωνίας που ασκείται στην σήραγγα των αναλύσεων 20_a_329_A, 20_a_549_A και 20_a_759_A, με συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K=0.7, 1.0, 1.3$ αντίστοιχα και $GSI=20, \sigma_{ci}=10MPa, m_i=6$, στο 5° βήμα πριν την επιβολή ερπυσμού.

Από το Σχήμα 8.2, παρατηρείται πως για $K=0.7 (<1.0)$ η μέγιστη πίεση στην τελική επένδυση εμφανίζεται στις παρειές της σήραγγας, ενώ για $K=1.3 (>1.0)$, η μέγιστη πίεση εμφανίζεται στην κορυφή και στο δάπεδο. Όταν $K=1.0$, η πίεση ασκείται σχεδόν ομοιόμορφα περιμετρικά της σήραγγας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι για συντελεστή οριζόντιων τάσεων (K) ίσο με τη μονάδα, η μέγιστη πίεση είναι μικρότερη (474.4kPa) σε σχέση με αυτή για $K=0.7$

(484.4kPa), ενώ για $K=1.3$ είναι μεγαλύτερη και από τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις και συγκεκριμένα ίση με 575.5kPa. Από $K=0.7$ σε $K=1.0$ δηλαδή, η πίεση παρουσιάζει πολύ μικρή μείωση, ενώ από $K=0.7$ σε $K=1.3$ παρατηρείται πιο σημαντική αύξηση στην πίεση της τελικής επένδυσης της σήραγγας.

Συγκριτικά με την Εικόνα 8.1, παρατηρείται πως η κατανομή των μέγιστων πλαστικών παραμορφώσεων είναι σχεδόν όμοια με την κατανομή των πιέσεων επί της τελικής επένδυσης περί τη διατομή, δηλαδή εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές τους στις ίδιες περιοχές. Επίσης, σε σύγκριση με την Εικόνα 8.2, σε κάθε περίπτωση, είναι φανερό πως οι μέγιστες πιέσεις της τελικής επένδυσης ασκούνται στις περιοχές με τις ελάχιστες συνολικές μετατοπίσεις.

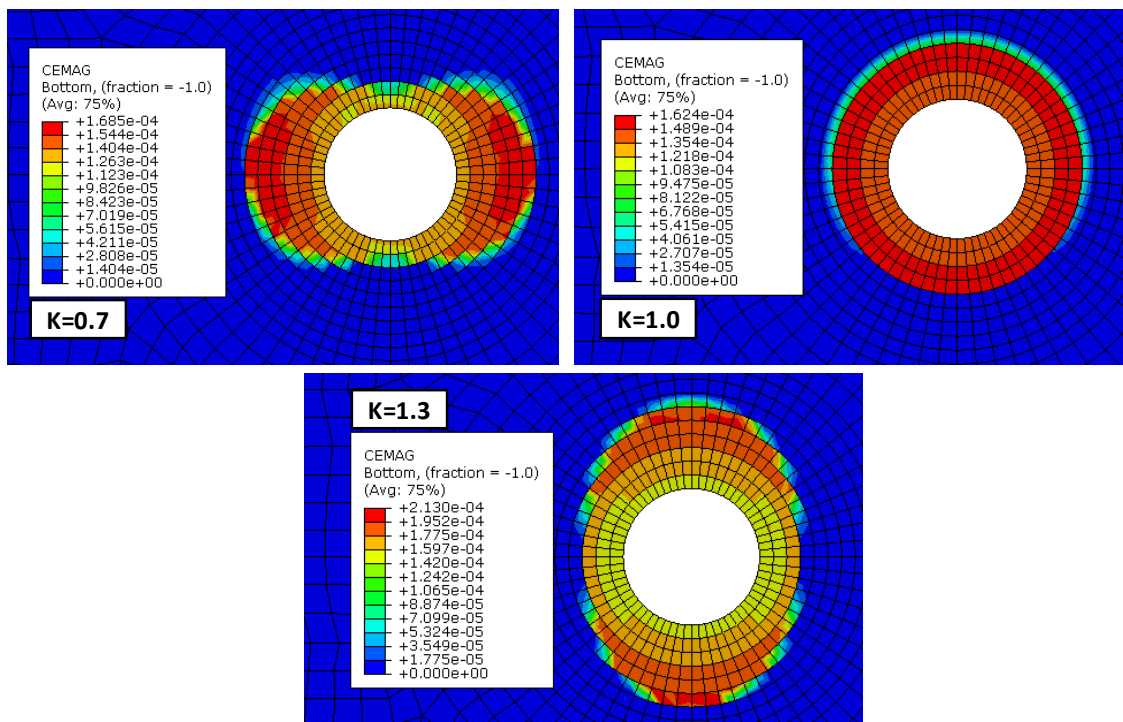
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποτελεί η σύγκριση των πιέσεων επί της τελικής επένδυσης πριν και μετά το φαινόμενο του ερπυσμού. Δημιουργήθηκε για το σκοπό αυτό παρόμοιο διάγραμμα με το παραπάνω (Σχήμα 8.2), αλλά με τις πιέσεις του 6^{ου} βήματος προσομοίωσης όπου εισάγεται πλέον ο ερπυσμός (Σχήμα 8.3).



Σχήμα 8.3: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση και της γωνίας που ασκείται στην σήραγγα των αναλύσεων 20_a_329_A, 20_a_549_A και 20_a_759_A, με συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K=0.7, 1.0, 1.3$ αντίστοιχα και $GSI=20, \sigma_{ci}=10MPa, m_i=6$, στο 6^ο βήμα όπου εισέρχεται ο ερπυσμός.

Όπως είναι αναμενόμενο η κατανομή των πιέσεων παραμένει η ίδια, ενώ διαφοροποιούνται οι τιμές των μεγίστων. Παρατηρείται ότι από το 5^ο στο 6^ο βήμα προσομοίωσης υπάρχει, λόγω του φαινομένου του ερπυσμού, μία αύξηση των πιέσεων στην τελική επένδυση, της τάξεως του 10%, για τις συγκεκριμένες παραμέτρους.

8.2.4 Ερπυστικές παραμορφώσεις (CEMAG)



Εικόνα 8.4: Κατανομή παραμορφώσεων λόγω του φαινομένου του ερπυσμού των αναλύσεων 20_a_329_A, 20_a_549_A και 20_a_759_A, με συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K=0.7, 1.0, 1.3$ αντίστοιχα και $GSI=20, \sigma_{ci}=10\text{MPa}, m_i=6$.

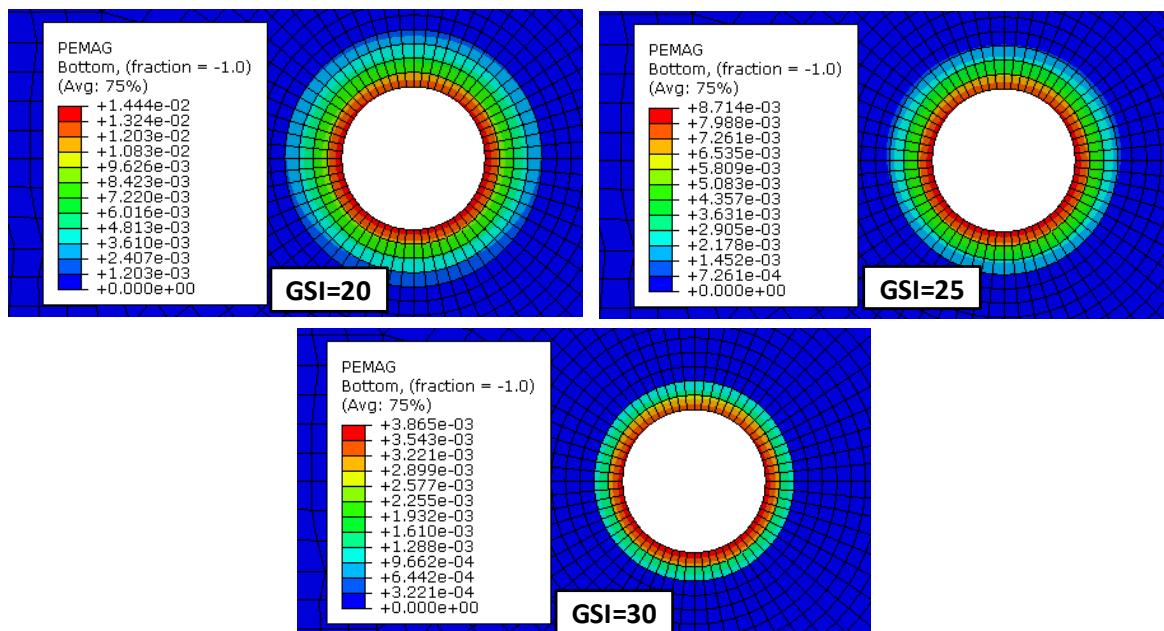
Σύμφωνα με την Εικόνα 8.4, για $K=0.7$ η μέγιστη ερπυστική παραμόρφωση εμφανίζεται στις παρειές της σήραγγας και σε κάποια απόσταση από αυτή, για $K=1.3$ εμφανίζεται στην κορυφή και στο δάπεδο, ενώ για $K=1.0$ η κατανομή των παραμορφώσεων είναι ομοιόμορφη περιμετρικά. Ακόμη, παρατηρείται πως από $K=0.7$ σε $K=1.0$ η τιμή της ερπυστικής παραμόρφωσης παρουσιάζει πολύ μικρή μείωση, ενώ από $K=0.7$ σε $K=1.3$ η μεταβολή της τιμής της παραμόρφωσης λόγω του ερπυσμού αυξάνεται.

Συγκριτικά με την Εικόνα 8.1 και Εικόνα 8.3, οι πλαστικές παραμορφώσεις και οι πιέσεις στην τελική επένδυση εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές τους στις ίδιες περιοχές με τις παραμορφώσεις λόγω του φαινομένου του ερπυσμού.

8.3 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Για τη μελέτη της επίδρασης της ποιότητας της βραχώμαζας επιλέχθηκαν τρεις αναλύσεις με ($GSI=20, \sigma_{ci}=8\text{MPa}, m_i=6, \sigma_{cm}/\rho_0=0.197$), ($GSI=25, \sigma_{ci}=8\text{MPa}, m_i=6, \sigma_{cm}/\rho_0=0.233$), ($GSI=30, \sigma_{ci}=10\text{MPa}, m_i=6, \sigma_{cm}/\rho_0=0.338$) αντίστοιχα, οι οποίες έχουν κοινό το συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K=1.0$, καθώς και τους ερπυστικούς συντελεστές $\phi_{cr,1}=0.2$ και $\phi_{cr,2}=0.25$.

8.3.1 Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG)



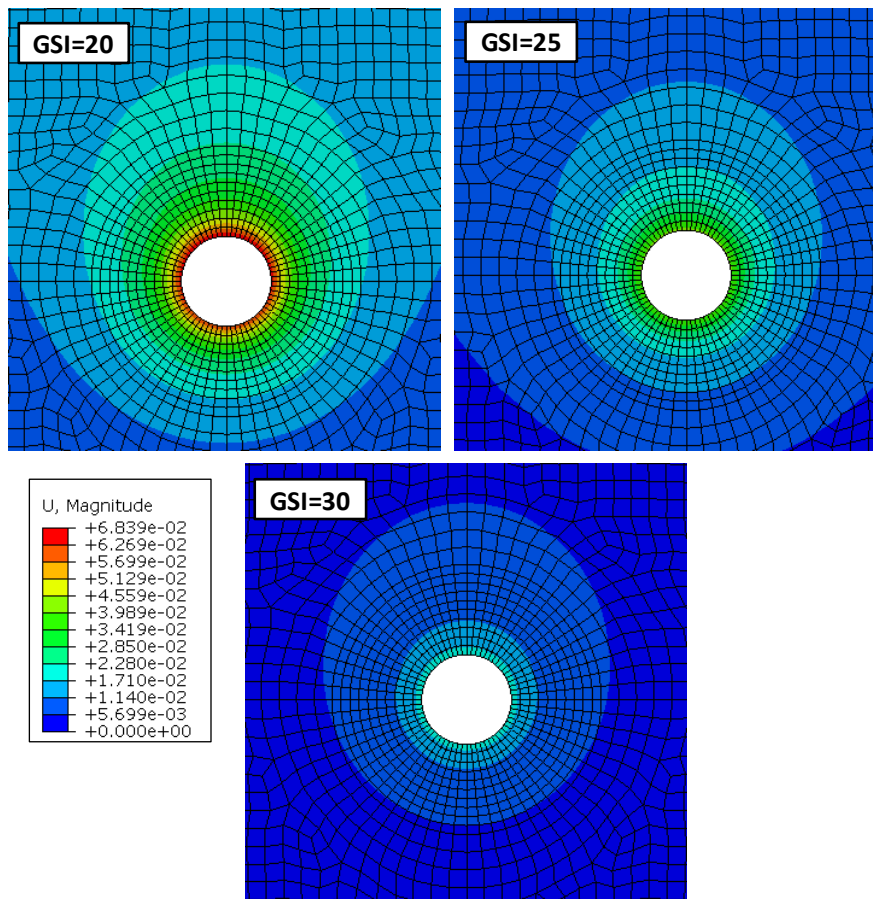
Εικόνα 8.5: Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων των αναλύσεων 20_a_548_A, 20_a_554_A και 20_a_561_A, για ποιότητα βραχόμαζας με $\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.197, 0.233, 0.338$ αντίστοιχα.

Από την Εικόνα 8.5, διακρίνεται πως η κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων είναι ομοιόμορφα κατανομημένη περιμετρικά της σήραγγας, όπως άλλωστε είναι αναμενόμενο, καθώς και στις τρεις περιπτώσεις ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων ισούται με τη μονάδα ($K=1.0$).

Παρατηρείται πως όσο καλύτερης ποιότητας είναι η βραχόμαζα, δηλαδή όσο το GSI αυξάνεται, μειώνεται η περιοχή που εκτείνεται η πλαστική ζώνη, ενώ η μέγιστη τιμή της ολοένα και μικραίνει.

8.3.2 Συνολικές μετατοπίσεις (U)

Για να είναι ευκολότερη η σύγκριση των μετατοπίσεων, βρέθηκε το μέγιστο και το ελάχιστο των τριών περιπτώσεων ποιότητας βραχόμαζας και δημιουργήθηκε το υπόμνημα της παρακάτω εικόνας με τα συγκεκριμένα ακρότατα.



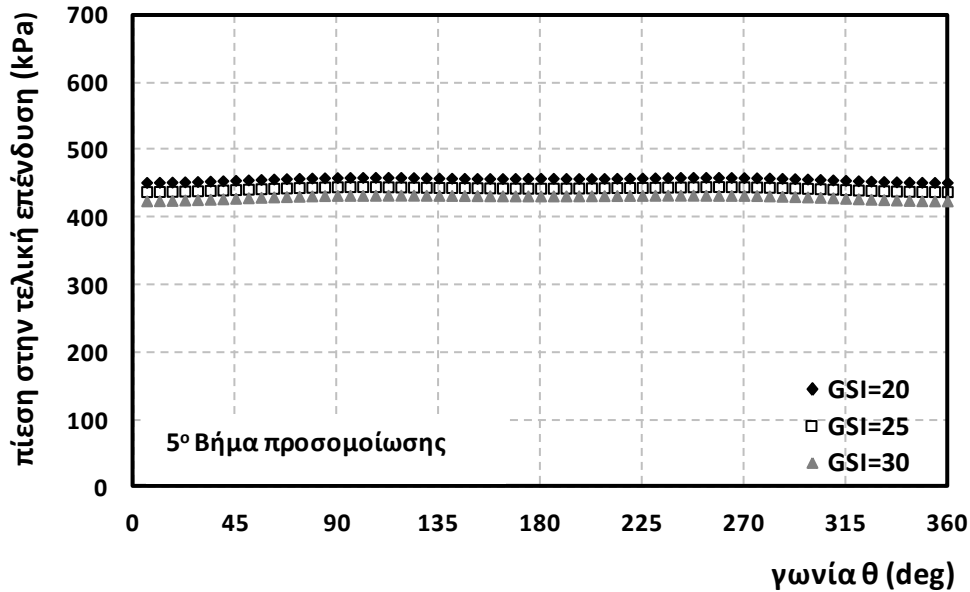
Εικόνα 8.6: Κατανομή συνολικών μετατοπίσεων των αναλύσεων 20_a_548_A, 20_a_554_A και 20_a_561_A, για ποιότητα βραχόμαζας με $\sigma_{cm}/\rho_0=0.197, 0.233, 0.338$ αντίστοιχα.

Παρατηρείται από την Εικόνα 8.6, ότι ανεξάρτητα από την ποιότητα της βραχόμαζας, η κατανομή των μετατοπίσεων, η περιοχή που επηρεάζεται από αυτές, αλλά και το σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη μετατόπιση είναι κοινά για τις τρεις περιπτώσεις. Είναι εμφανές πως αυτό που επηρεάζεται όσο βελτιώνεται η ποιότητα της βραχόμαζας είναι η μέγιστη τιμή των μετατοπίσεων. Συγκεκριμένα, για GSI=30 η μέγιστη μετατόπιση είναι πολύ μικρή σε σχέση με την μετατόπιση για GSI=20. Για χαμηλότερης ποιότητας βραχόμαζα, με GSI=25, αυξάνεται η τιμή της μέγιστης μετατόπισης αλλά όχι τόσο όσο για GSI=20.

Συνοψίζοντας, όσο βελτιώνεται η ποιότητα της βραχόμαζας, δηλαδή αυξάνεται η τιμή του δείκτη GSI, μειώνεται η τιμή της μέγιστης μετατόπισης, η οποία εμφανίζεται κάθε φορά στη οροφή της σήραγγας.

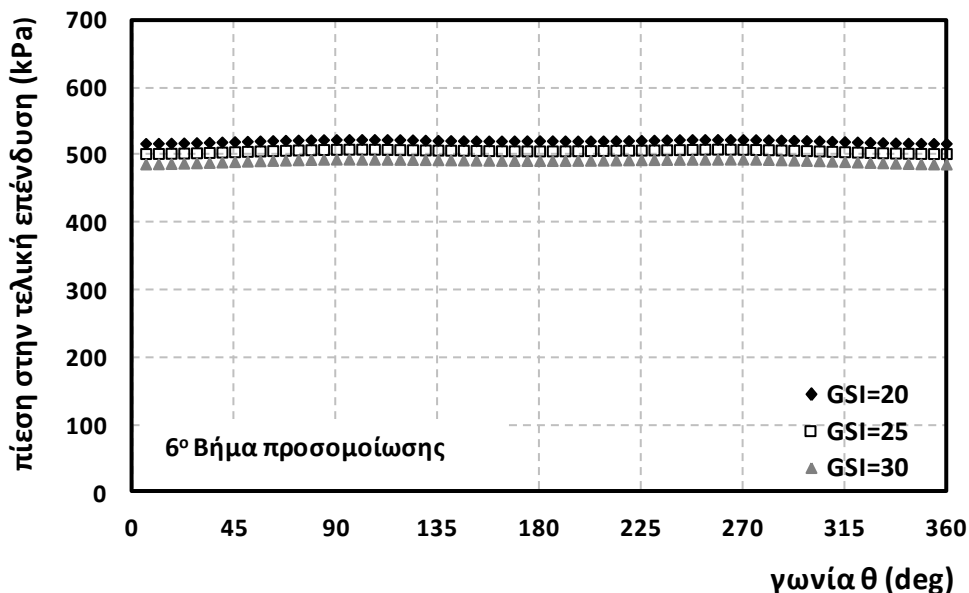
8.3.3 Πιέσεις στην τελική επένδυση (CPRESS)

Όπως ήταν αναμενόμενο, η κατανομή των πιέσεων στην τελική επένδυση είναι ομοιόμορφη περιμετρικά της σήραγγας, γι' αυτό και στο Σχήμα 8.4 διακρίνουμε τρεις ευθείες γραμμές.



Σχήμα 8.4: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση και της γωνίας που ασκείται στη σήραγγα των αναλύσεων 20_a_548_A, 20_a_554_A και 20_a_561_A, για ποιότητα βραχώμαζας με $\sigma_{cm}/\rho_0=0.197, 0.233, 0.338$ αντίστοιχα, στο 5° βήμα πριν την επιβολή ερπυσμού.

Όσο η ποιότητα της βραχώμαζας βελτιώνεται, δηλαδή ο δείκτης GSI αυξάνεται από 20 σε 30, παρατηρείται πως η πίεση που παραλαμβάνει η τελική επένδυση της σήραγγας ολοένα και μικραίνει. Αυτό συμβαίνει, καθώς η βραχώμαζα καλύτερης ποιότητας παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή και δυνατότητα να αυτουποστηρίζεται, συνεπώς η πίεση που καλείται να αναλάβει η τελική επένδυση μειώνεται.

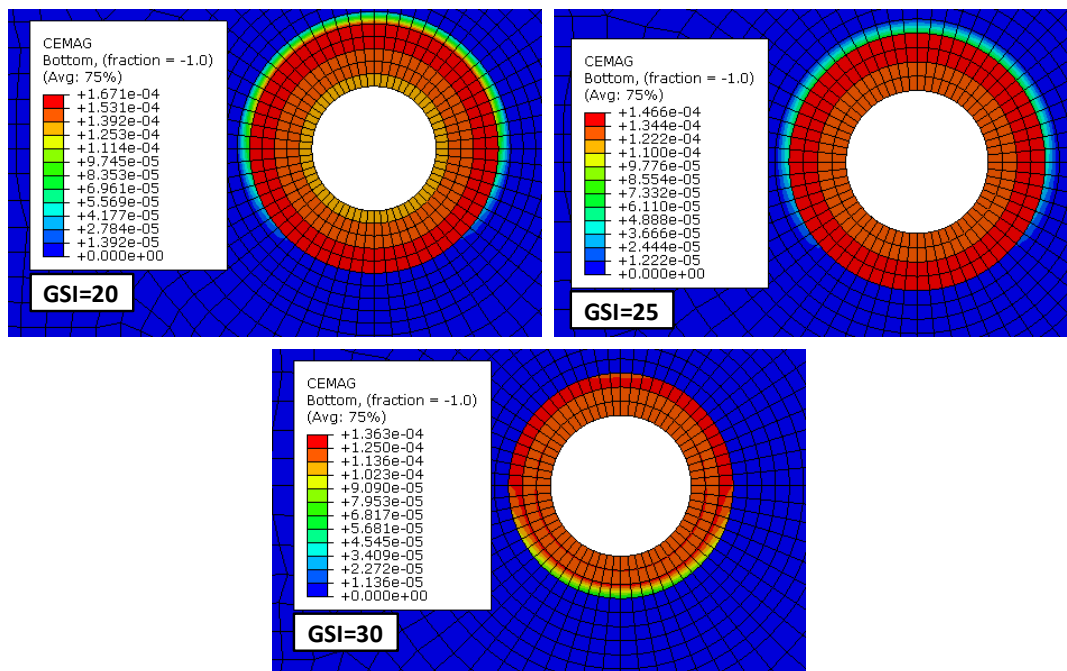


Σχήμα 8.5: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση και της γωνίας που ασκείται στη σήραγγα των αναλύσεων 20_a_548_A, 20_a_554_A και 20_a_561_A, για ποιότητα βραχώμαζας με $\sigma_{cm}/\rho_0=0.197, 0.233, 0.338$ αντίστοιχα, στο 6° βήμα όπου εισέρχεται ο ερπυσμός.

Σε σύγκριση με το 6° βήμα προσομοίωσης, όπου εισέρχεται και το φαινόμενο του ερπυσμού, παρατηρείται πως η κατανομή της πίεσης που δέχεται η τελική επένδυση

παραμένει η ίδια με το 5^ο βήμα προσομοίωσης, ενώ αυτό που μεταβάλλεται και συγκεκριμένα αυξάνεται, είναι η μέγιστη τιμή της. Ο ερπυσμός είναι ένα χρονικά εξαρτώμενο φαινόμενο κατά τη διάρκεια του οποίου παρατηρείται αύξηση των παραμορφώσεων, ενώ το μέτρο των επιβαλλόμενων τάσεων παραμένει περίπου σταθερό. Η τελική επένδυση παρεμποδίζει την εξέλιξη αυτών των παραμορφώσεων με αποτέλεσμα την αύξηση της φόρτισής της. Ομοίως με παραπάνω, όσο βελτιώνεται η ποιότητα της βραχόμαζας μειώνεται η πίεση που έχει να παραλάβει η τελική επένδυση.

8.3.4 Ερπυστικές παραμορφώσεις (CEMAG)



Εικόνα 8.7: Κατανομή παραμορφώσεων λόγω του φαινομένου του ερπυσμού των αναλύσεων 20_a_548_A, 20_a_554_A και 20_a_561_A, για ποιότητα βραχόμαζας με $\sigma_{cm}/p_0=0.197, 0.233, 0.338$ αντίστοιχα.

Η κατανομή των παραμορφώσεων λόγω του φαινομένου του ερπυσμού είναι ομοιόμορφη περιμετρικά της σήραγγας, γεγονός αναμενόμενο, καθώς ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων ισούται με τη μονάδα. Όσο βελτιώνεται η ποιότητα της βραχόμαζας, δηλαδή ο δείκτης GSI αυξάνεται από 20 σε 30, η μέγιστη τιμή των ερπυστικών παραμορφώσεων, η οποία εμφανίζεται σε κάποια απόσταση από αυτή, μειώνεται. Παρατηρείται πως η βελτίωση της ποιότητας της βραχόμαζας επηρεάζει τις πλαστικές παραμορφώσεις και τις ερπυστικές παραμορφώσεις της περιβάλλουσας βραχόμαζας σχεδόν κατά τον ίδιο τρόπο.

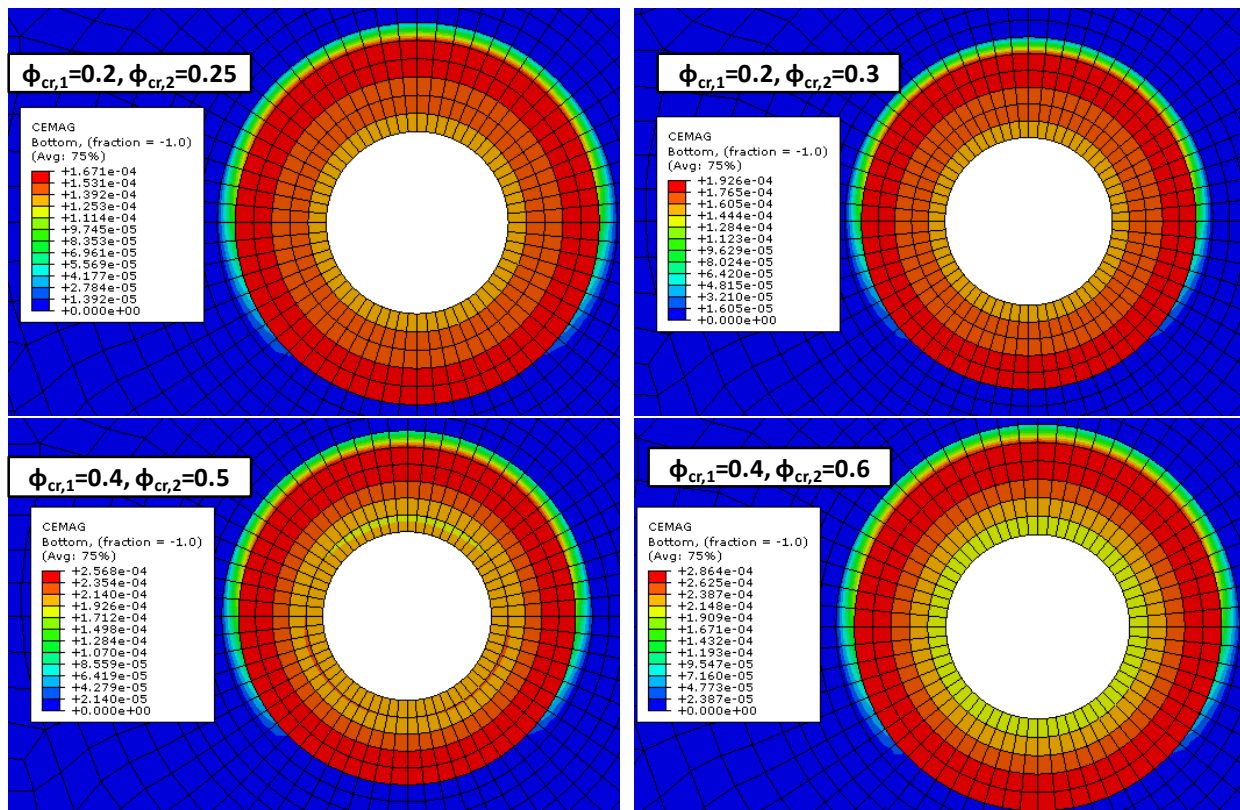
8.4 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΡΠΥΣΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ (ϕ_{cr})

Για τη μελέτη της επίδρασης του ερπυστικού συντελεστή (ϕ_{cr}) επιλέχθηκαν οι τέσσερις αναλύσεις με ($\phi_{cr,1}=0.2$ και $\phi_{cr,2}=0.25$), ($\phi_{cr,1}=0.2$ και $\phi_{cr,2}=0.30$), ($\phi_{cr,1}=0.4$ και $\phi_{cr,2}=0.5$), ($\phi_{cr,1}=0.4$ και $\phi_{cr,2}=0.6$) αντίστοιχα, οι οποίες έχουν κοινό το συντελεστή οριζόντιων τάσεων

$K=1.0$, καθώς και τις παραμέτρους που εκφράζουν τις ιδιότητες της βραχώμαζας, $GSI=20$, $m_i=6$ και $\sigma_{ci}=8\text{MPa}$.

8.4.1 Ερπυστικές παραμορφώσεις (CEMAG)

Η μεταβολή του ερπυστικού συντελεστή ϕ_{cr} δε μεταβάλλει ιδιαίτερα τις συνολικές μετατοπίσεις και πλαστικές παραμορφώσεις ούτε στο εύρος στο οποίο εκτείνονται, αλλά ούτε και στις τιμές τους. Ένα μέγεθος το οποίο αξίζει να σχολιαστεί για το πώς μεταβάλλεται, είναι το μέγεθος των ερπυστικών παραμορφώσεων (CEMAG).

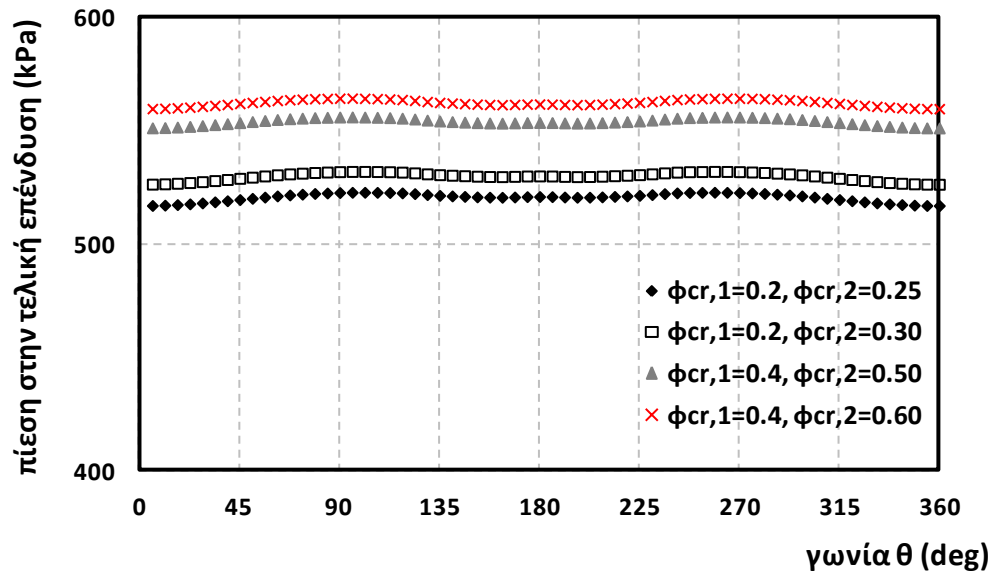


Εικόνα 8.8: Κατανομή παραμορφώσεων λόγω του φαινομένου του ερπυσμού των αναλύσεων 20_a_548_A, 20_a_548_B, 20_a_548_C και 20_a_548_D, για τέσσερις συνδυασμούς $\phi_{cr,1}$ και $\phi_{cr,2}$ με σταθερό συντελεστή οριζόντιων τάσεων, $K=1.0$.

Από την Εικόνα 8.8, παρατηρείται πως η κατανομή των ερπυστικών παραμορφώσεων είναι η αναμενόμενη για $K=1.0$, δηλαδή ομοιόμορφη περιμετρικά της σήραγγας και για τις τέσσερις περιπτώσεις. Το εύρος της περιοχής που εκτείνονται οι ερπυστικές παραμορφώσεις είναι κοινό, ενώ η μέγιστη τιμή τους εμφανίζεται 8m από το κέντρο της σήραγγας. Όπως διακρίνεται από τα υπομνήματα της παραπάνω εικόνας, διαπιστώνεται πως όσο μεγαλώνει ο ερπυστικός συντελεστής αυξάνεται και η τιμή του μέγιστου της παραμόρφωσης λόγω του φαινομένου του ερπυσμού. Συγκεκριμένα, για την εν λόγω περίπτωση, για αύξηση του $\phi_{cr,1}$ και $\phi_{cr,2}$ από (0.20 και 0.25) σε (0.40 και 0.60) αντίστοιχα, πραγματοποιήθηκε αύξηση της τιμής της παραμόρφωσης περίπου της τάξεως του 41%.

8.4.2 Πιέσεις στην τελική επένδυση (CPRESS)

Η σύγκριση των πιέσεων επί της τελικής επένδυσης της σήραγγας ανάλογα με τη μεταβολή του ερπυστικού συντελεστή ϕ_{cr} , πραγματοποιείται μέσω του διαγράμματος της πίεσης και της γωνίας που ασκείται στην κυκλική σήραγγα (Σχήμα 8.6).



Σχήμα 8.6: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση και της γωνίας που ασκείται στη σήραγγα των αναλύσεων 20_a_548_A, 20_a_548_B, 20_a_548_C και 20_a_548_D, για τέσσερις διαφορετικές τιμές των ζευγών $\phi_{cr,1}$ και $\phi_{cr,2}$, στο 6° βήμα όπου εισέρχεται ο ερπυσμός.

Από το Σχήμα 8.6, παρατηρείται πως η πίεση επί της τελικής επένδυσης αυξάνεται όσο αυξάνεται το $\phi_{cr,1}$ και $\phi_{cr,2}$. Συγκεκριμένα, για αύξηση από (0.20 και 0.25) σε (0.20 και 0.30) η αλλαγή είναι αρκετά μικρή, ενώ για αύξηση από (0.20 και 0.25) σε (0.40 και 0.60) η τιμή της πίεσης αυξάνεται κατά ποσοστό της τάξεως του 23%.

9 ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

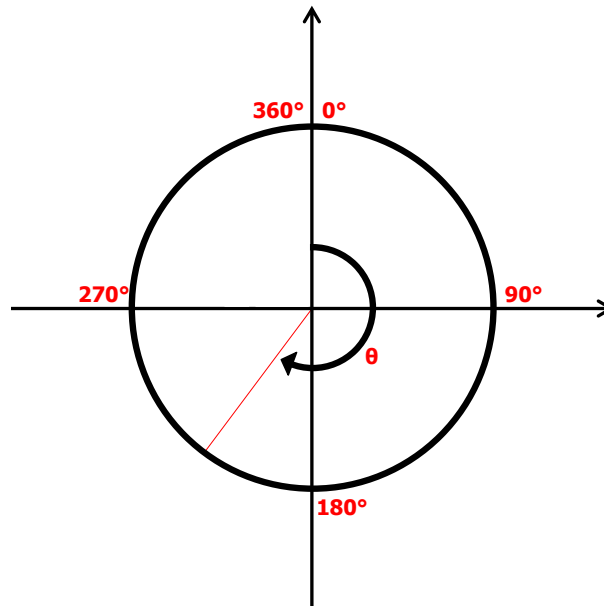
Μετά την ποιοτική αξιολόγηση-σύγκριση των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων στο Κεφάλαιο 1, πραγματοποιείται παρακάτω η ποσοτική επεξεργασία αυτών. Γίνεται παράθεση διαγραμμάτων που δείχνουν τη σχέση των εκάστοτε γεωτεχνικών-ερπυστικών παραμέτρων των αναλύσεων, με τα διάφορα εντατικά μεγέθη (κυρίως των πιέσεων επί της τελικής επένδυσης πριν και μετά την επιβολή του ερπυσμού) που προέκυψαν από τις αναλύσεις.

Σκοπός όλης της παραπάνω διαδικασίας είναι να μελετηθεί η επιπρόσθετη φόρτιση της τελικής επένδυσης της σήραγγας λόγω του φαινομένου του ερπυσμού και η επίδραση σε αυτή της διαφοροποίησης των μηχανικών και ιξωδοελαστικών παραμέτρων του γεωυλικού. Συγκεκριμένα, θα γίνει προσπάθεια εντοπισμού των “κρίσιμων” παραμέτρων, η μεταβολή των οποίων ασκεί έντονη επιρροή στο υπό μελέτη φαινόμενο.

9.2 ΠΑΡΑΘΕΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

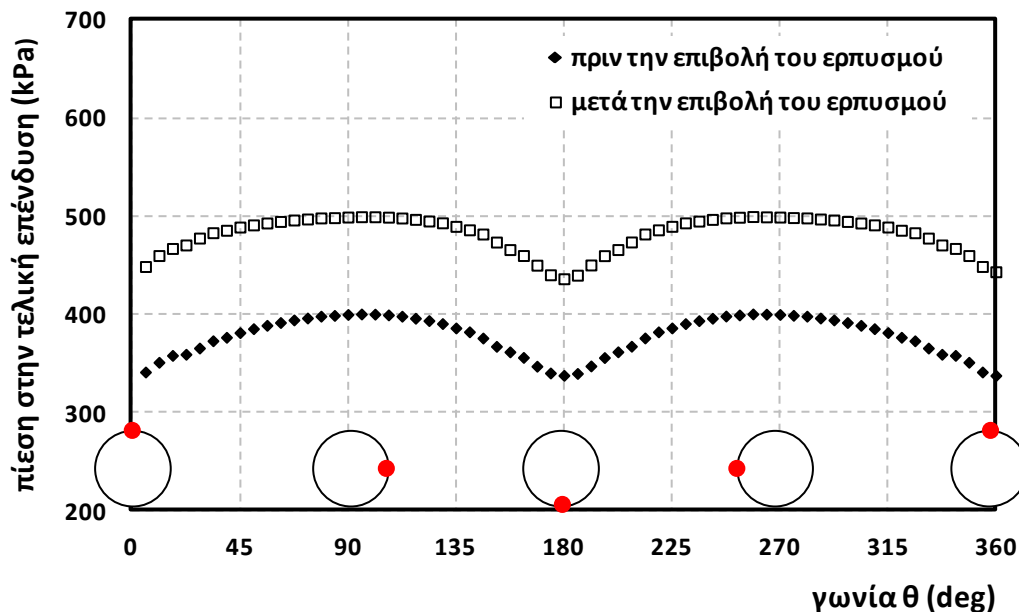
Παρακάτω παρουσιάζονται έξι διαγράμματα της πίεσης που παραλαμβάνει η τελική επένδυση πριν και μετά τον ερπυσμό ως προς τη γωνία που αυτή ασκείται περιμετρικά της σήραγγας. Από την ομάδα των αναλύσεων με $\phi_{cr,1}=0.4$ και $\phi_{cr,2}=0.6$, επιλέχθηκαν δύο αναλύσεις από κάθε μία περίπτωση συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K=0.7, 1.0, 1.3$, από τις οποίες η πρώτη παρουσίασε μεγάλη αύξηση της πίεσης λόγω ερπυσμού και η δεύτερη παρουσίασε μικρή αύξηση.

Απεικονίζοντας την κυκλική σήραγγα του προβλήματός μας σύμφωνα με το παρακάτω Σχήμα 9.1, στις 0° και 360° αντιστοιχεί η οροφή της σήραγγας, στις 90° η δεξιά παρειά, στις 180° το δάπεδο και στις 270° η αριστερή παρειά της σήραγγας. Υπενθυμίζεται ότι η δεξιόστροφη γωνία θ , όπως διακρίνεται στο σχήμα, δείχνει κάθε φορά σε πιο σημείο ασκείται η πίεση στην τελική επένδυση της σήραγγας.

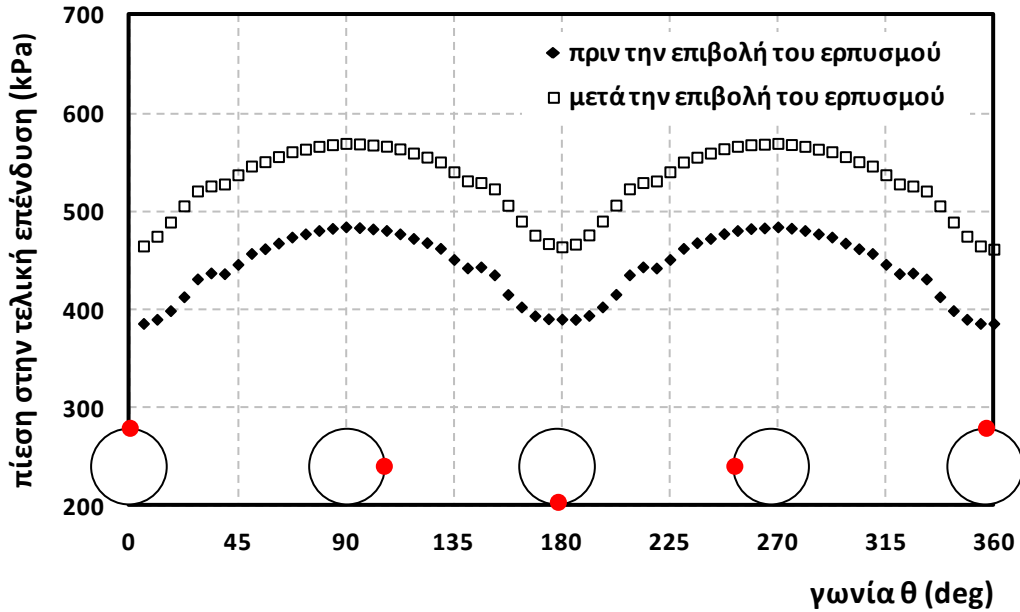


Σχήμα 9.1: Βοηθητικό σχήμα για την απεικόνιση της γωνίας θ που ασκείται κάθε φορά η πίεση επί της τελικής επένδυσης.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν, οι πέντε κύκλοι απεικονίζουν πιο ξεκάθαρα, με το κόκκινο σημείο, σε ποια θέση περιμετρικά της σήραγγας ασκείται η πίεση επί της τελικής επένδυσης.

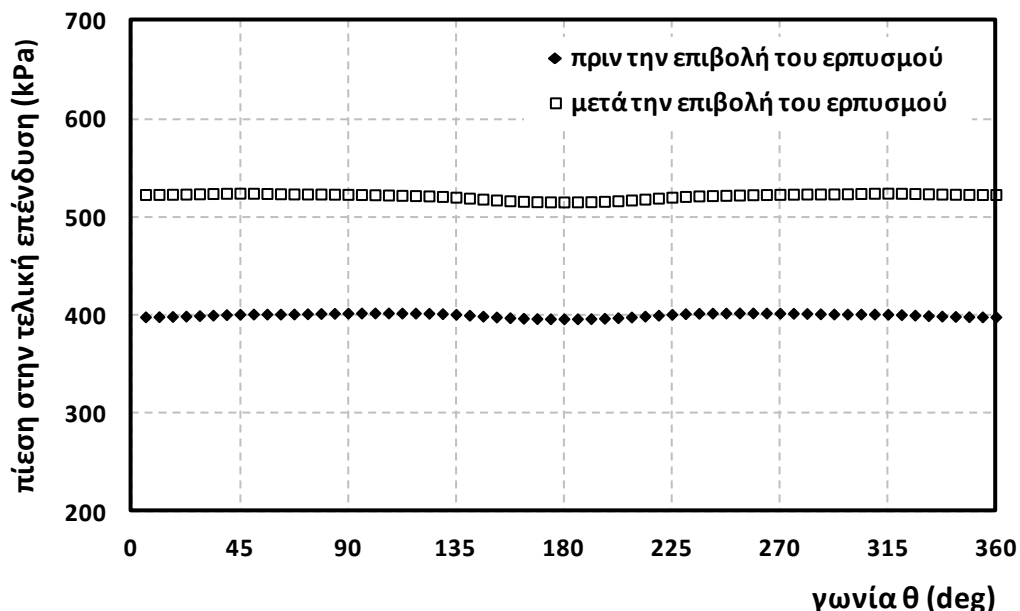


Σχήμα 9.2: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_338_D με $K=0.7$, η οποία παρουσιάζει μία αύξηση της πίεσης λόγω του ερπυσμού της τάξεως του 25%.

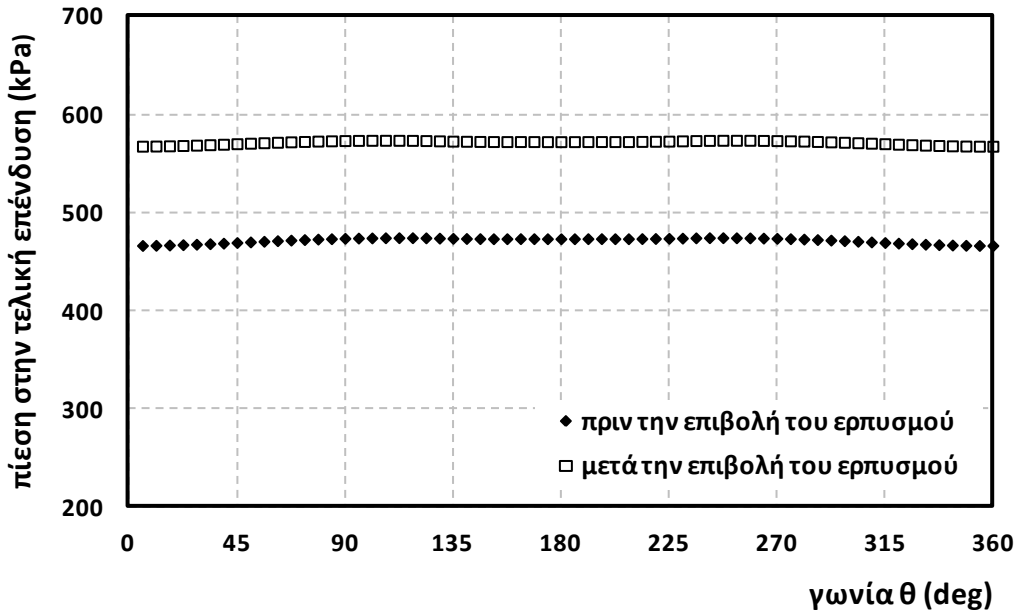


Σχήμα 9.3: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_329_D με $K=0.7$, η οποία παρουσιάζει μία αύξηση της πίεσης λόγω του ερπυσμού της τάξεως του 18%.

Από το Σχήμα 9.2 και το Σχήμα 9.3, παρατηρείται πως η επιβολή του ερπυσμού δεν αλλάζει την κατανομή των πιέσεων που αναπτύσσονται περιμετρικά της σήραγγας. Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές τους εμφανίζονται στις ίδιες περιοχές τόσο στο 5^ο όσο και στο 6^ο βήμα προσομοίωσης, δηλαδή πριν και μετά την επιβολή του ερπυσμού. Όπως διαπιστώθηκε και στο Κεφάλαιο 1, για συντελεστή οριζόντιων τάσεων μικρότερο της μονάδας ($K < 1$), η μέγιστη πίεση εμφανίζεται στις παρειές της σήραγγας, ενώ η μικρότερη στην οροφή και το δάπεδο.

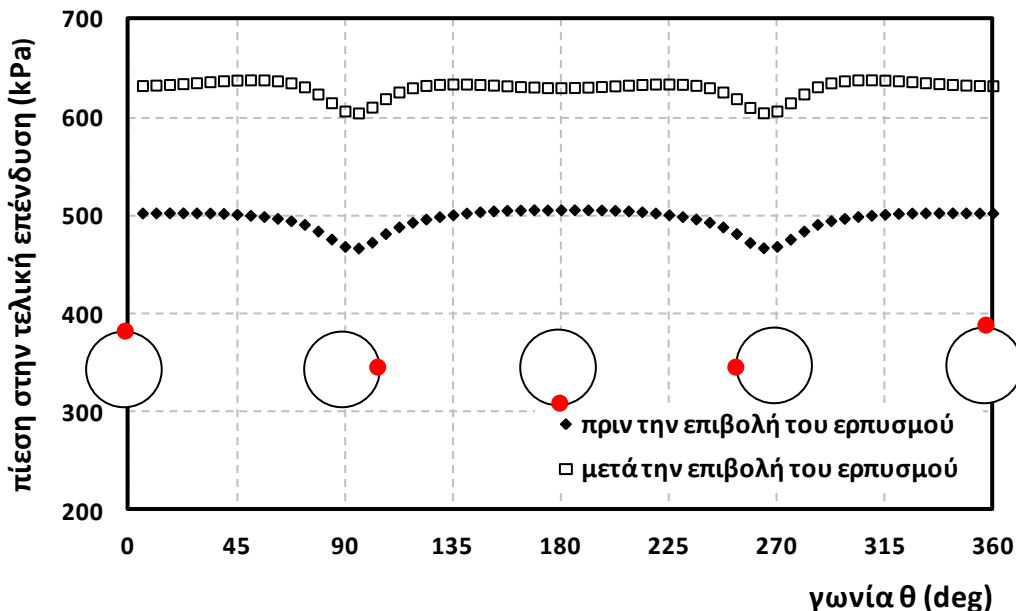


Σχήμα 9.4: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_558_D με $K=1.0$, η οποία παρουσιάζει μία αύξηση της πίεσης λόγω του ερπυσμού της τάξεως του 30%.

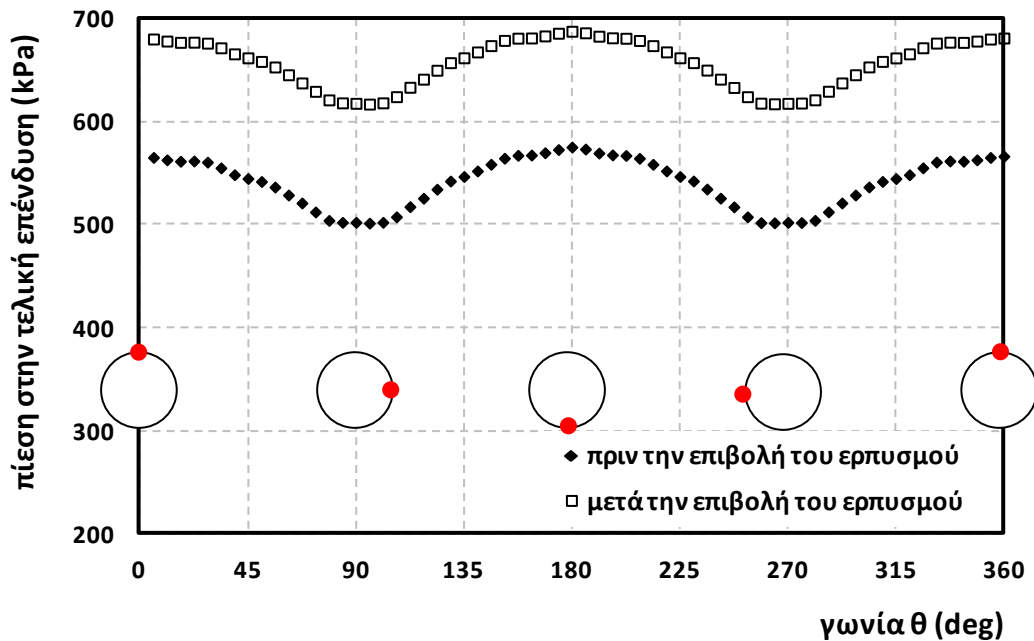


Σχήμα 9.5: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_549_D με $K=1.0$, η οποία παρουσιάζει μία αύξηση της πίεσης λόγω του ερπυσμού της τάξεως του 21%.

Για $K=1.0$ η πίεση είναι ομοιόμορφα κατανομημένη περιμετρικά της σήραγγας ($\sigma_{v0}=\sigma_{h0}$), συνεπώς το διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση ως προς τη γωνία θ που ασκείται είναι πρακτικά μία ευθεία. Ομοίως με παραπάνω, παρατηρείται πως η επιβολή του ερπυσμού δεν μεταβάλλει την κατανομή των πιέσεων, παρά μόνο τη μέγιστη τιμή τους, η οποία παρουσιάζει μία αύξηση της τάξεως του 20-30%.



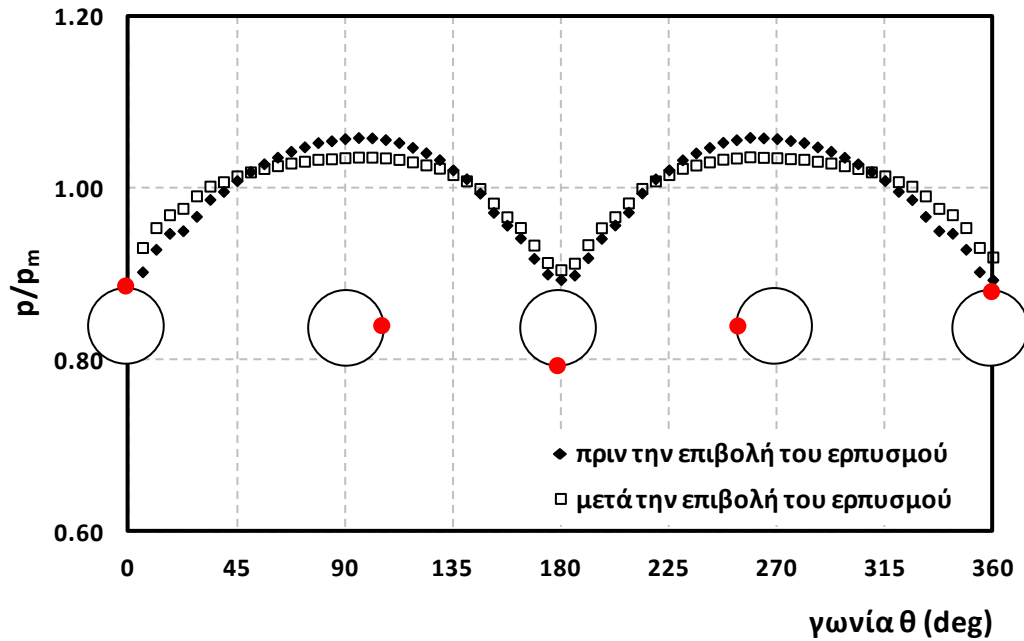
Σχήμα 9.6: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_762_D με $K=1.3$, η οποία παρουσιάζει μία αύξηση της πίεσης λόγω του ερπυσμού της τάξεως του 26%.



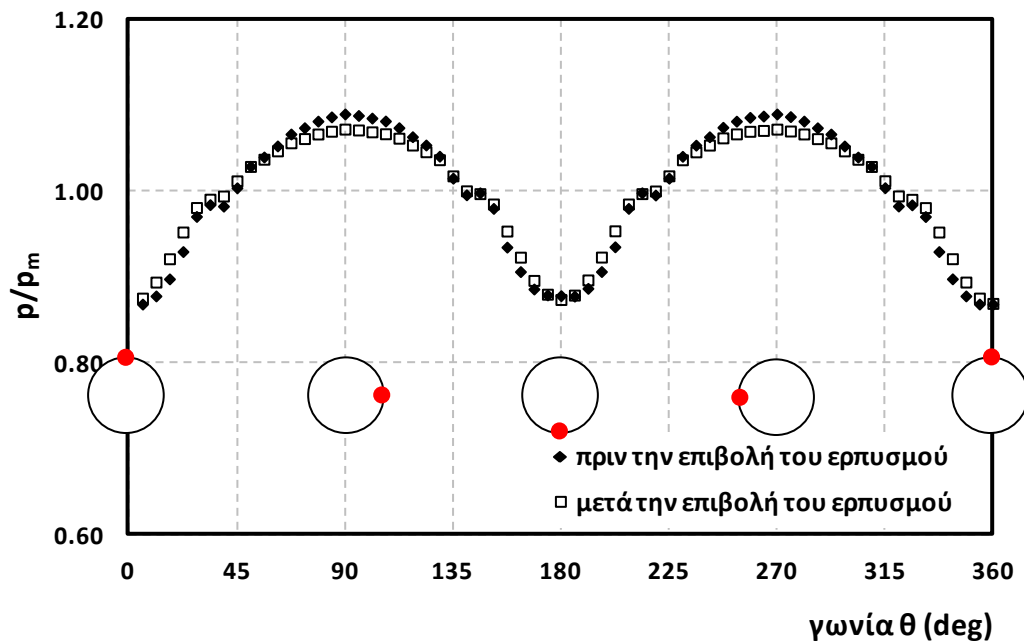
Σχήμα 9.7: Διάγραμμα της πίεσης στην τελική επένδυση ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_759_D με $K=1.3$, η οποία παρουσιάζει μία αύξηση της πίεσης λόγω του ερπυσμού της τάξεως του 20%.

Από το Σχήμα 9.6 και Σχήμα 9.7, διακρίνεται πως για συντελεστή οριζόντιων τάσεων μεγαλύτερο της μονάδας ($K=1.3$) οι μέγιστες πιέσεις ασκούνται στην οροφή και στο δάπεδο της σήραγγας, το οποίο έχει διαπιστωθεί και στην ποιοτική επεξεργασία των αποτελεσμάτων (Κεφάλαιο 1). Ομοίως, στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν αλλάζει η κατανομή των πιέσεων περιμετρικά της σήραγγας, αλλά παρατηρείται μία αύξηση της πίεσης λόγω του ερπυσμού της τάξεως του 20-25%.

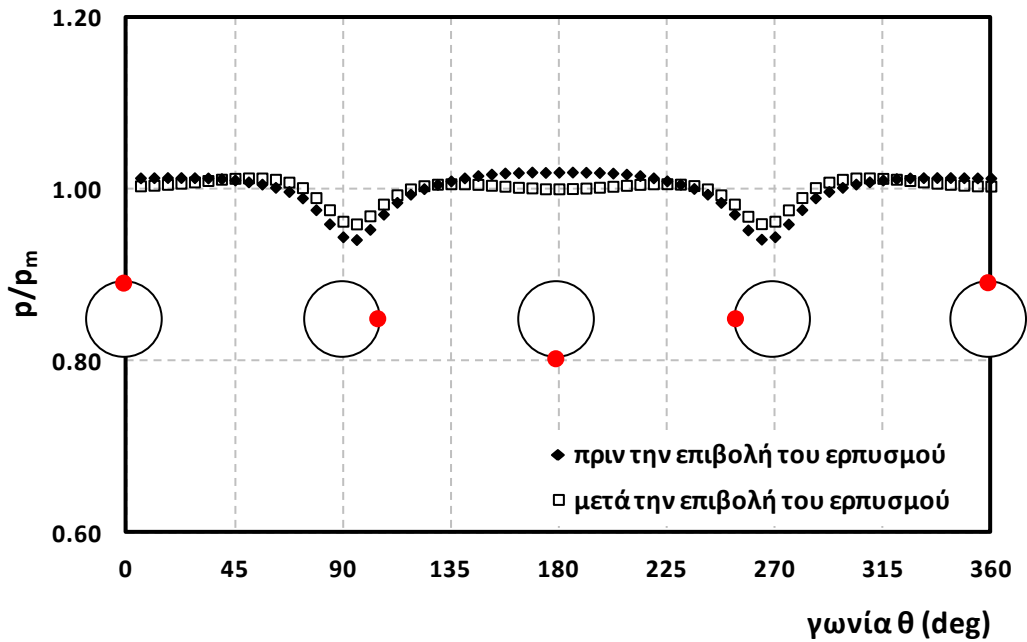
Όπως παρατηρείται στα παρακάτω τέσσερα διαγράμματα, συμπερασματικά η επιβολή του ερπυσμού δεν μεταβάλλει την κατανομή των πιέσεων που ασκούνται στην τελική επένδυση της σήραγγας. Ωστόσο, ομοιομορφοποιεί τις πιέσεις σε όρους αποστάσεως από τη μέση τιμή αυτών.



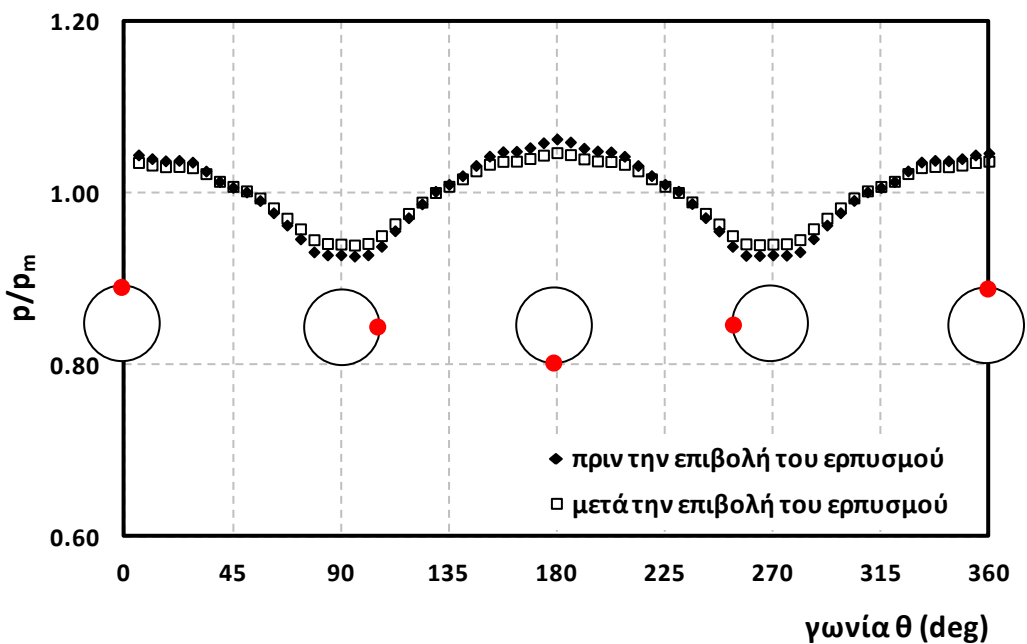
Σχήμα 9.8: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης και της μέσης πίεσης στην τελική επένδυση, ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_338_D με K=0.7.



Σχήμα 9.9: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης και της μέσης πίεσης στην τελική επένδυση, ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_329_D με K=0.7.

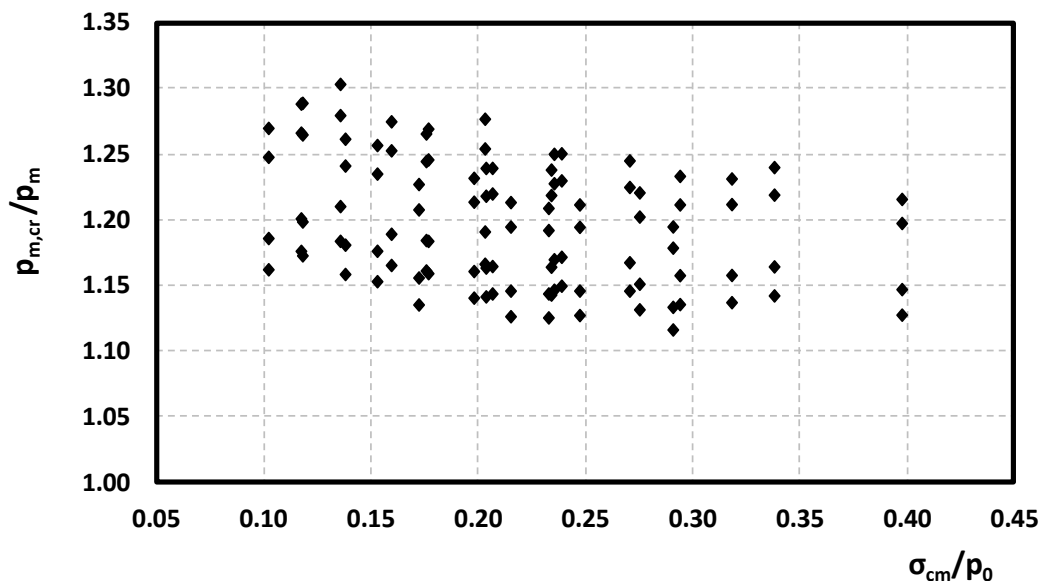


Σχήμα 9.10: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης και της μέσης πίεσης στην τελική επένδυση, ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_762_D με K=1.3.



Σχήμα 9.11: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης και της μέσης πίεσης στην τελική επένδυση, ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, της ανάλυσης 20_a_759_D με K=1.3.

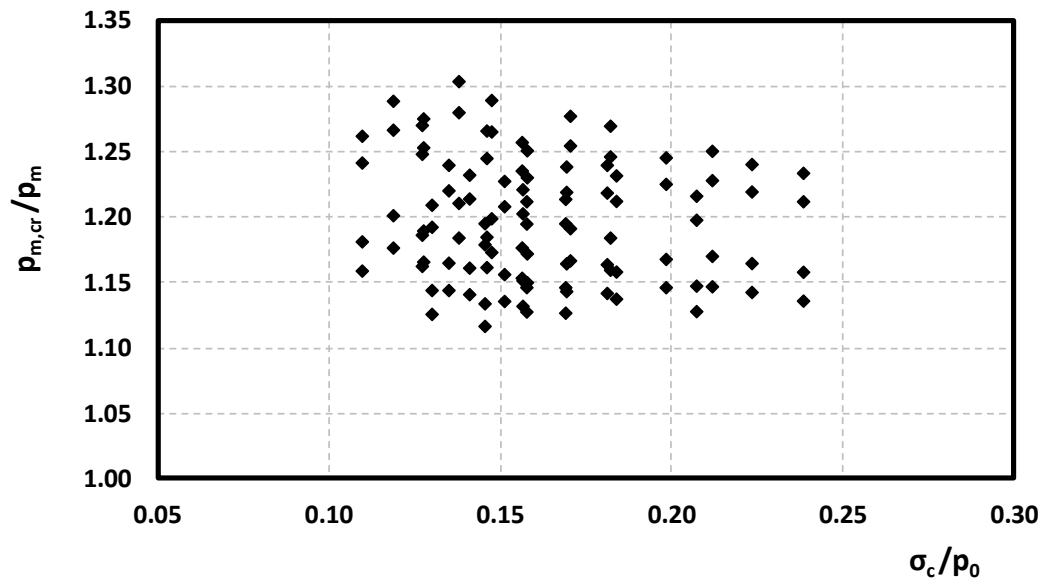
9.2.1 Διαγραμματική απεικόνιση των πιέσεων ως προς διάφορες γεωτεχνικές και ερπυστικές παραμέτρους



Σχήμα 9.12: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0).

Η επιλογή του λόγου (σ_{cm}/ρ_0) ως δείκτη ποιότητας της βραχώμαζας έγινε, καθώς αποτελεί ένα μέγεθος που μπορεί να ποσοτικοποιήσει τόσο τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας όσο και το μέγεθος των φορτίων που αναπτύσσονται. Ο δείκτης γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) αποτελεί ουσιαστικά το λόγο “αντοχής” (αντοχή βραχώμαζας σε όρους του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown) προς τη “δράση” (γεωστατικές τάσεις). Όσο ο λόγος μεγαλώνει, οι γεωτεχνικές συνθήκες είναι ευμενέστερες.

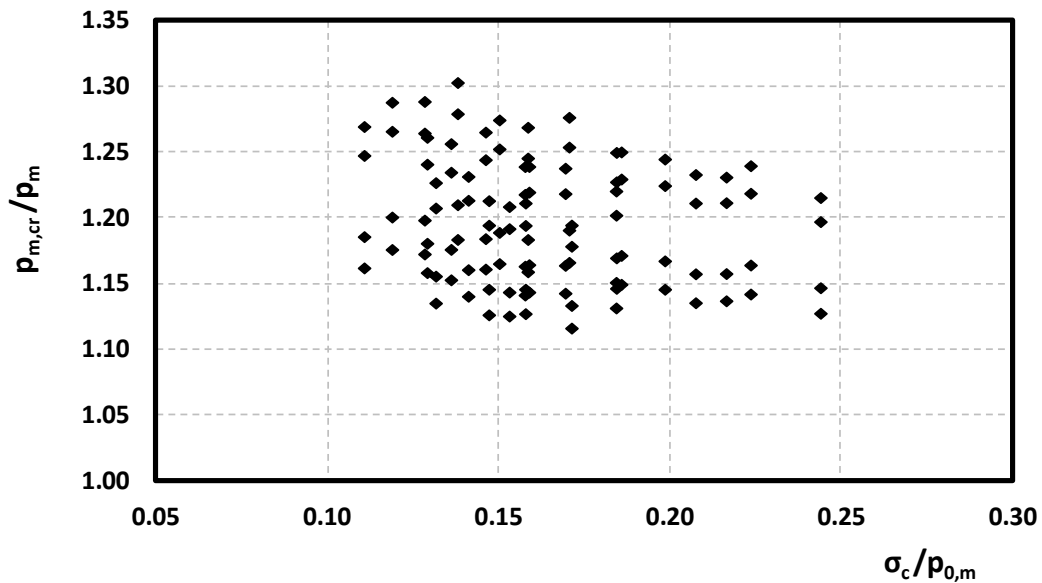
Από το Σχήμα 9.12, πράγματι όσο βελτιώνεται η ποιότητα της βραχώμαζας, διακρίνεται μία μείωση του λόγου των μέσων πιέσεων, μετά και πριν την επιβολή του ερπυσμού, που ασκούνται στην τελική επένδυση της σήραγγας. Παρατηρείται, επίσης, αρκετά μεγάλη διασπορά των τιμών, λόγω των πολλών παραμέτρων που υπεισέρχονται στον όρο (σ_{cm}/ρ_0). Γενικά, οι τιμές του λόγου ($p_{m,cr}/p_m$) ως προς το λόγο (σ_{cm}/ρ_0) κυμαίνονται από 1.10 έως 1.30.



Σχήμα 9.13: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού (σ_c/ρ_0).

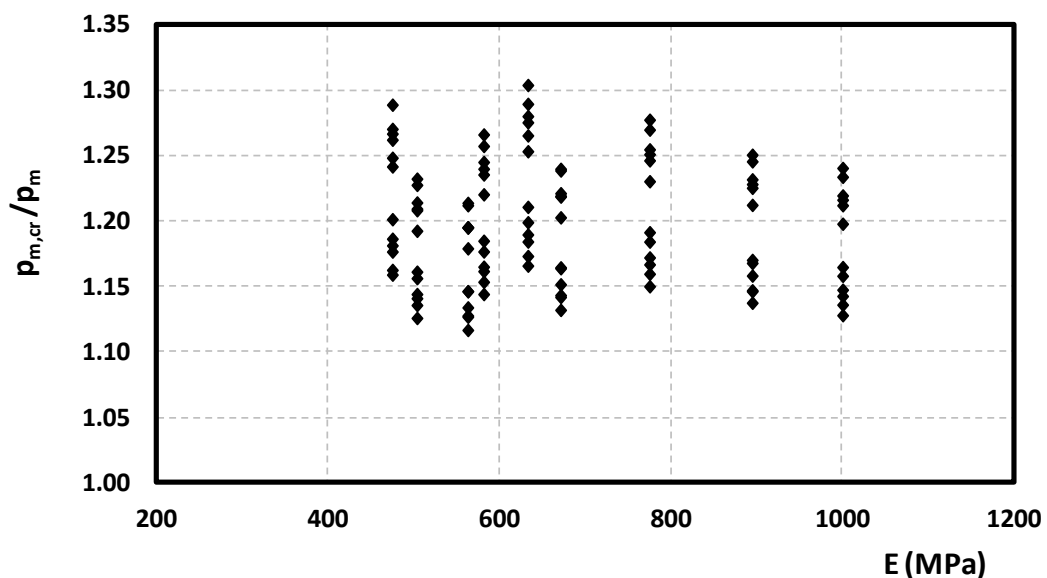
Το σ_c αποτελεί την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού, το οποίο εξαρτάται από τις παραμέτρους c και ϕ του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb. Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι παράμετροι αντοχής στις αριθμητικές αναλύσεις ορίστηκαν με το κριτήριο αστοχίας Drucker-Prager, το οποίο έχει πολύ καλή αντιστοιχία με το κριτήριο Mohr-Coulomb, καθώς και τα δύο έχουν γραμμική περιβάλλουσα αστοχίας. Για το λόγο αυτό, θα περιμέναμε στο διάγραμμα των πιέσεων ως προς το λόγο (σ_c/ρ_0) μία καλύτερη και ευκρινέστερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων.

Σε σχέση με το Σχήμα 9.12 λοιπόν, παρατηρείται πως μικραίνει το εύρος των τιμών κατά τον οριζόντιο άξονα και ομοίως με παραπάνω, όσο ο λόγος (σ_c/ρ_0) μεγαλώνει η πίεση που ασκείται στην τελική επένδυση λόγω του ερπυσμού μειώνεται. Ομοίως με παραπάνω, οι τιμές του λόγου ($p_{m,cr}/p_m$) ως προς το λόγο (σ_c/ρ_0) κυμαίνονται από 1.10 έως 1.30.



Σχήμα 9.14: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c/p_{0,m}$).

Η μέση γεωστατική τάση ορίζεται ως $p_{0,m} = \gamma H(1+K)/2$, όπου εισέρχεται πλέον και ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων K . Το διάγραμμα του λόγου των πιέσεων ($p_{m,cr}/p_m$) ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές σε σχέση με το Σχήμα 9.13. Λόγω του ($p_{0,m}$) παρατηρείται μόνο μία ελαφρώς μεγαλύτερη διασπορά των αποτελεσμάτων, ενώ η μειωτική τάση του λόγου των πιέσεων εξακολουθεί να ισχύει καθώς βελτιώνονται οι γεωτεχνικές συνθήκες, δηλαδή όσο οδηγούμαστε προς τα δεξιά του διαγράμματος.

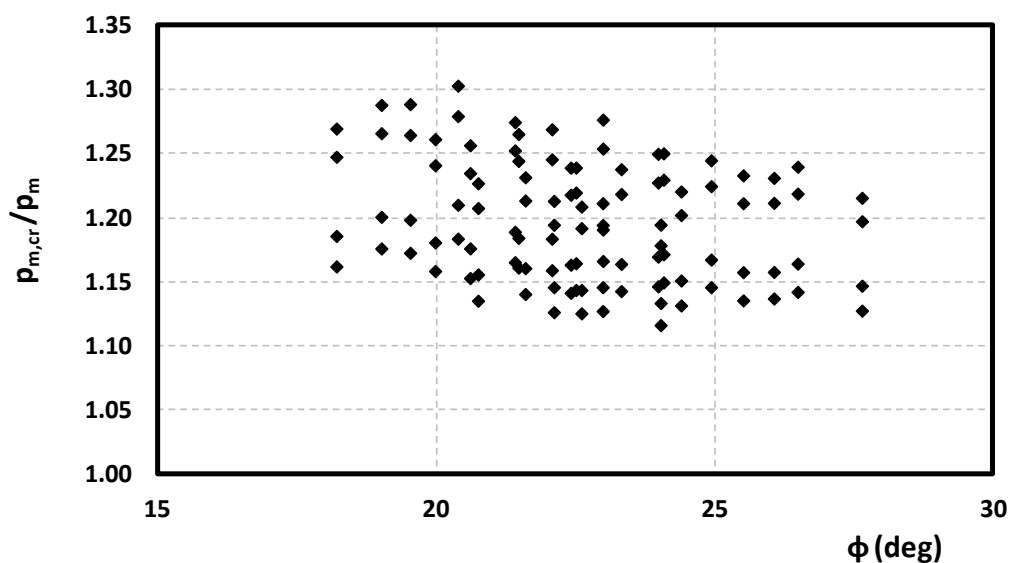


Σχήμα 9.15: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς το μέτρο ελαστικότητας E (MPa).

Από το Σχήμα 9.15, δεν παρατηρείται μία σαφής τάση του λόγου των πιέσεων μετά και πριν την επιβολή του ερπυσμού ως προς το μέτρο ελαστικότητας E . Ωστόσο, όπως έχει προαναφερθεί στον υπολογισμό των παραμέτρων του προσομοιώματος (Κεφάλαιο 7.3) ισχύει:

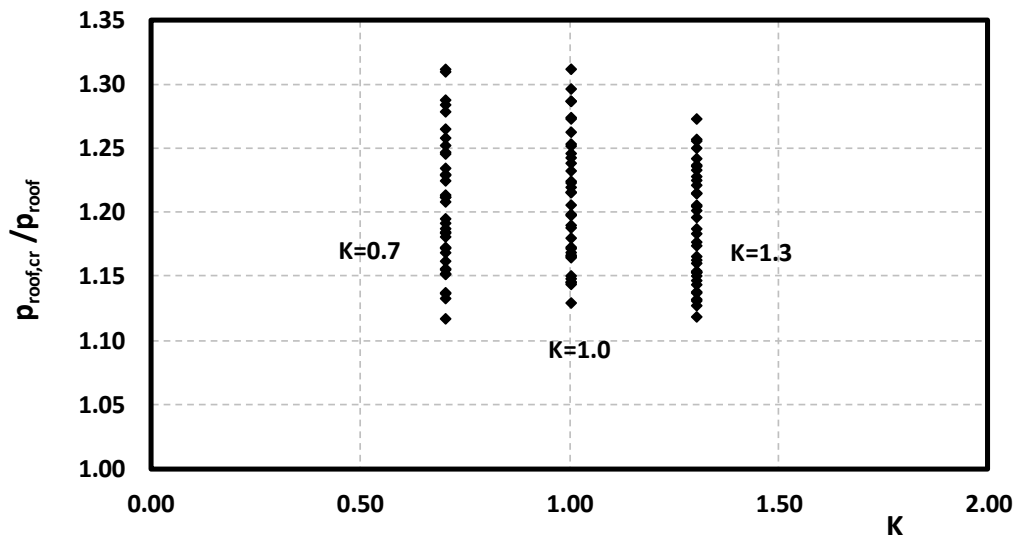
$$\varphi_{cr} = \frac{\varepsilon_{cr,t_d}}{\varepsilon_{el}} = \frac{\varepsilon_{cr,t_d}}{(\sigma_c / E)(q/q_f)}$$

Για σταθερό ερπυστικό συντελεστή φ_{cr} και σταθερή αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης σ_c , παρατηρείται πως όσο το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται οι τελικές ερπυστικές παραμορφώσεις, άρα και οι παράμετροι του προσομοιώματος των Singh & Mitchell (1968) που εισάγονται στις αναλύσεις, μειώνονται έτσι ώστε να διατηρηθεί το φ_{cr} σταθερό.



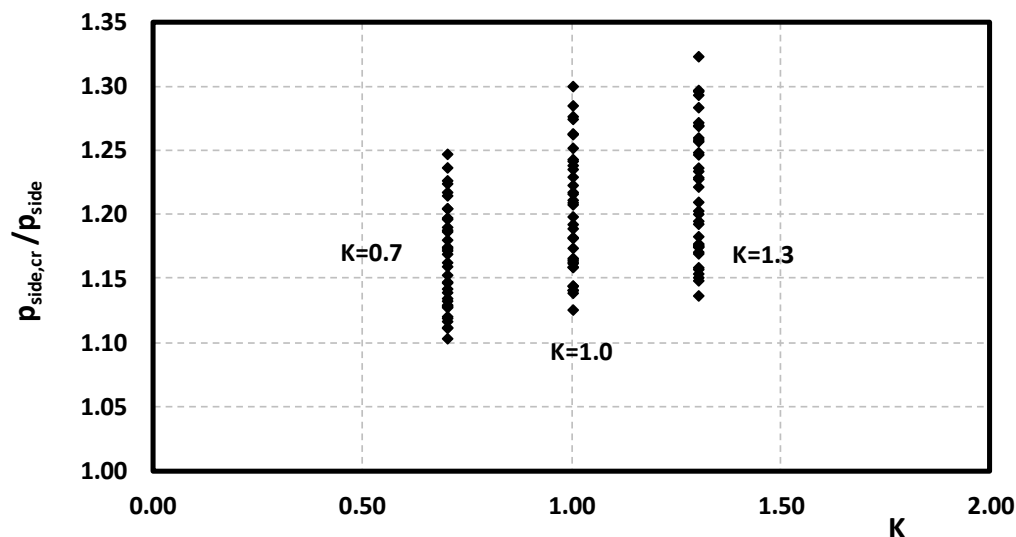
Σχήμα 9.16: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς τη γωνία εσωτερικής τριβής ϕ (deg).

Από το Σχήμα 9.16, παρατηρείται πως όσο η γωνία εσωτερικής τριβής αυξάνεται πραγματοποιείται μία μικρή μείωση του λόγου των πιέσεων που ασκούνται στην τελική επένδυση λόγω του ερπυσμού.



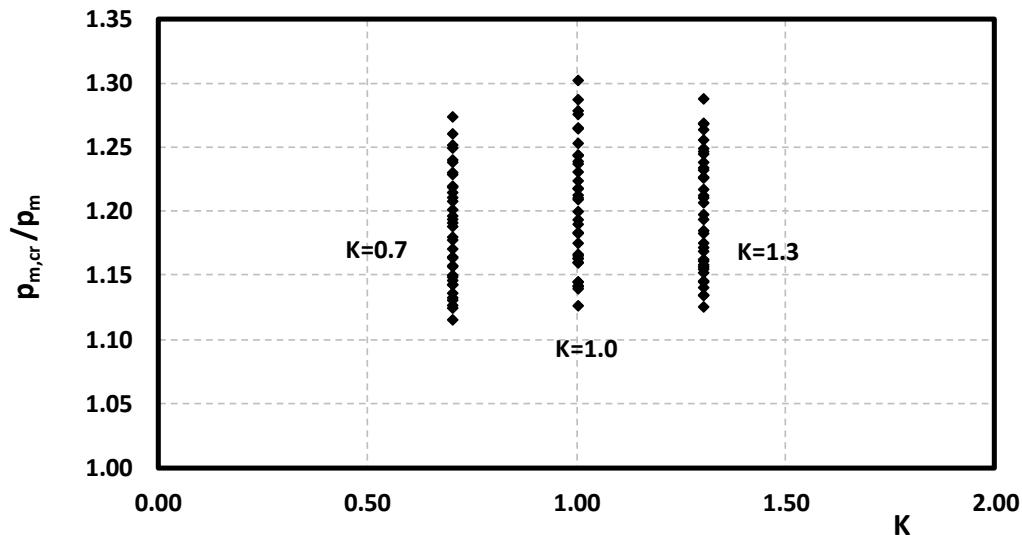
Σχήμα 9.17: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης που ασκείται στην οροφή της σήραγγας μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{roof,cr}$) και της πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_{roof}), ως προς το συντελεστή οριζόντιων τάσεων K .

Από το Σχήμα 9.17, διαπιστώνεται πως ο λόγος των πιέσεων στην οροφή της σήραγγας, μετά και πριν την επιβολή του ερπυσμού μειώνεται ελαφρώς όσο ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων K μεγαλώνει. Για $K=0.7$ ο λόγος κυμαίνεται μεταξύ των τιμών (1.10-1.31), για $K=1.0$ δεν παρατηρείται σημαντική αλλαγή σε σχέση με $K=0.7$, ενώ για $K=1.3$ ο λόγος μειώνεται σε ένα εύρος τιμών από 1.12 έως 1.26.



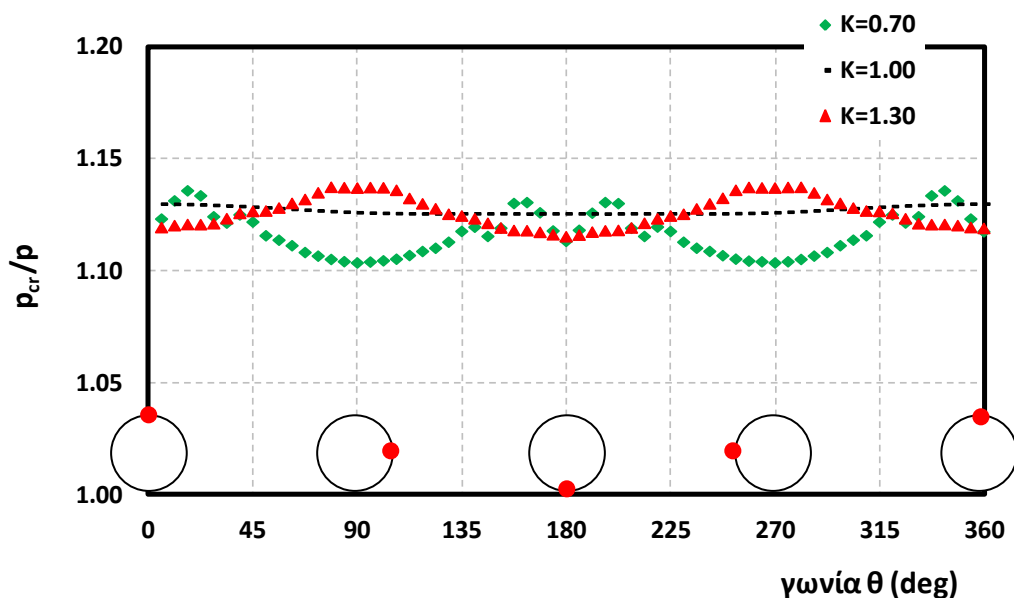
Σχήμα 9.18: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης που ασκείται στην παρειά της σήραγγας μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{side,cr}$) και της πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_{side}), ως προς το συντελεστή οριζόντιων τάσεων K .

Αντίθετα, από το Σχήμα 9.18 διακρίνεται πως στις παρειές της σήραγγας με την αύξηση του K αυξάνουν οι πιέσεις που δέχεται η τελική επένδυση. Συγκεκριμένα, για $K=0.7$ ο λόγος των πιέσεων κυμαίνεται μεταξύ των τιμών (1.10-1.25), για $K=1.0$ μεταξύ των τιμών (1.13-1.30), ενώ για $K=1.3$ ο λόγος κυμαίνεται μεταξύ 1.15 και 1.33.



Σχήμα 9.19: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς το συντελεστή οριζόντιων τάσεων K .

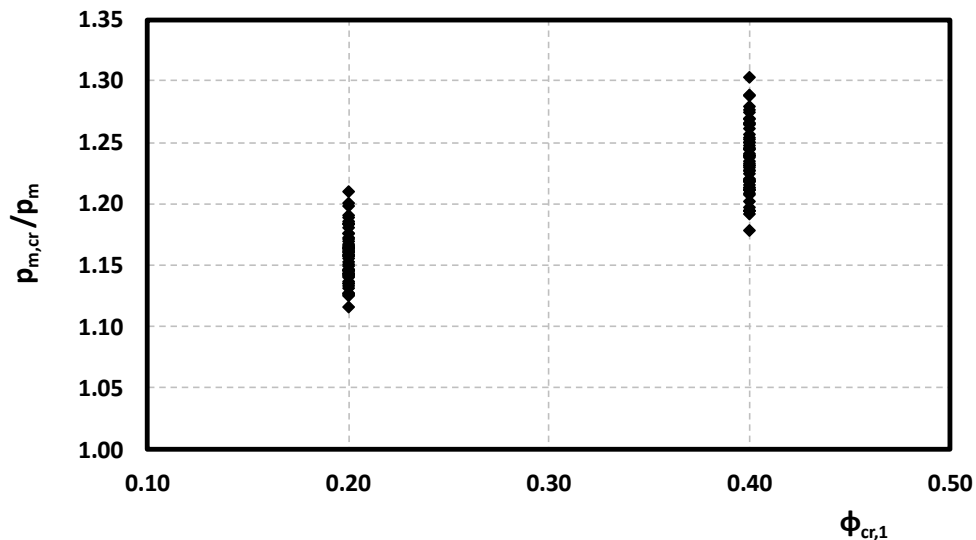
Στο Σχήμα 9.19, διακρίνεται πως για συντελεστή οριζόντιων τάσεων ίσο με τη μονάδα, ο λόγος των μέσων πιέσεων που ασκούνται μετά και πριν τον ερπυσμό είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τον αντίστοιχο λόγο για $K=0.7$ και $K=1.3$. Όπως προαναφέρθηκε για $K=0.7$ ο λόγος των πιέσεων στην οροφή της σήραγγας είναι μεγαλύτερος συγκριτικά με $K=1.0$ και $K=1.3$, ενώ για $K=1.3$ μεγαλύτερες πιέσεις παρουσιάζονται στην παρειά. Τελικά, ως προς τη μέση τιμή παρατηρούνται οι μεγαλύτερες πιέσεις για $K=1.0$.



Σχήμα 9.20: Διάγραμμα του λόγου των πιέσεων της τελικής επένδυσης πριν και μετά την επιβολή του ερπυσμού ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, των αναλύσεων 20_a_329_A, 20_a_549_A και 20_a_759_A με $K=0.7$, 1.0, 1.3 αντίστοιχα.

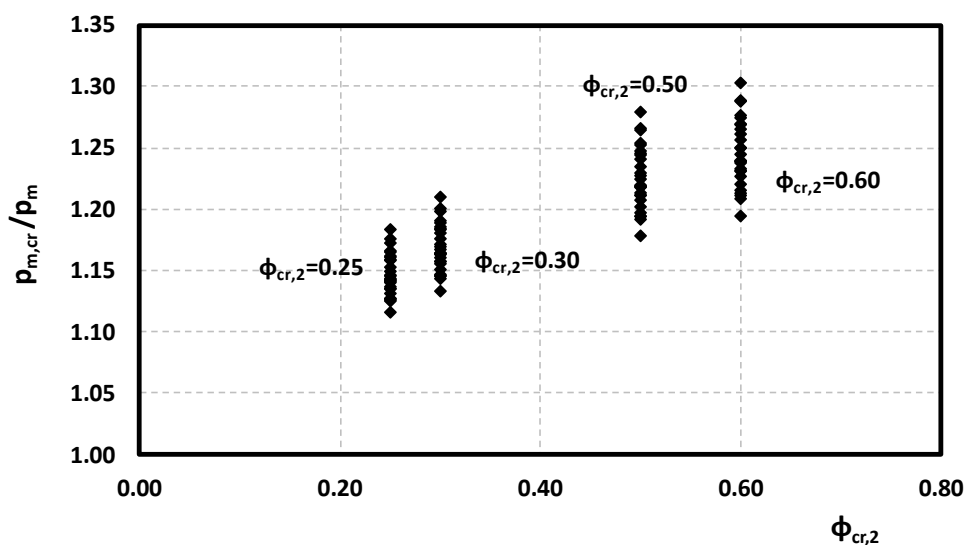
Σύμφωνα με το Σχήμα 9.20 αλλά και τα παραπάνω διαγράμματα, διαπιστώνεται πως όταν ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων είναι μικρότερος της μονάδας ($K=0.7$), η πίεση που δέχεται η τελική επένδυση της σήραγγας είναι μικρότερη στις παρειές σε σχέση με αυτή που

δέχεται κοντά στην οροφή και το δάπεδο. Αντίθετα, για K μεγαλύτερο της μονάδας ($K=1.3$) οι μικρότερες πιέσεις παρουσιάζονται στην οροφή και το δάπεδο, ενώ για $K=1.0$ κατανέμονται ομοιόμορφα, περιμετρικά της σήραγγας με μία τιμή που βρίσκεται ανάμεσα στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές της κάθε περίπτωσης ($K=0.7, 1.3$).



Σχήμα 9.21: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($\rho_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (ρ_m), ως προς τον ερπυστικό συντελεστή $\phi_{cr,1}$.

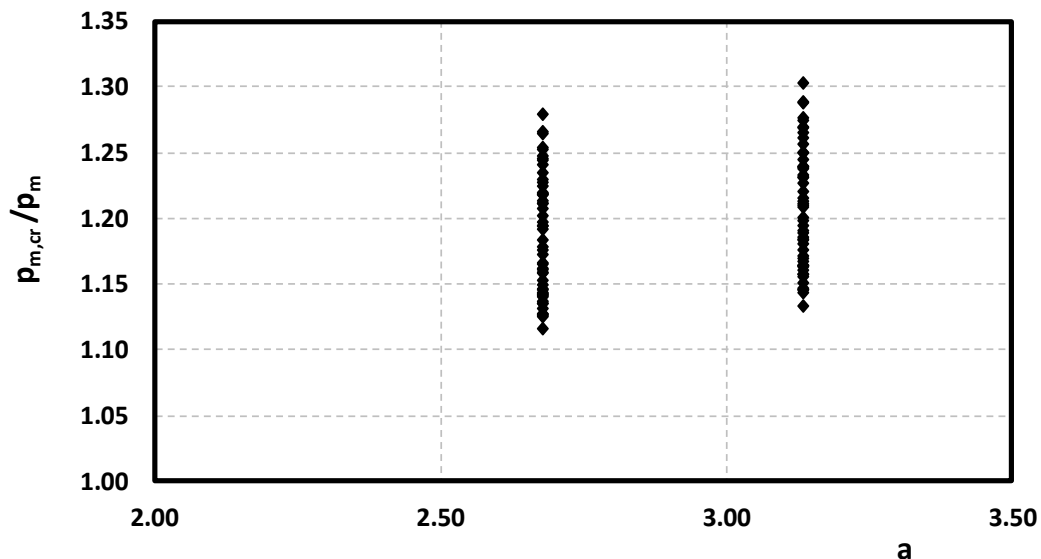
Από το Σχήμα 9.21, είναι εμφανές πως για μεγαλύτερο $\phi_{cr,1}$ αυξάνεται σημαντικά ο λόγος των μέσων πιέσεων ($\rho_{m,cr}/\rho_m$). Συγκεκριμένα, για αύξηση του $\phi_{cr,1}$ από 0.20 σε 0.40 ο λόγος των μέσων πιέσεων που ασκούνται στην τελική επένδυση μετά και πριν τον ερπυσμό, αυξάνεται κατά ένα ποσοστό της τάξεως του 7%. Ωστόσο, η επιρροή του ϕ_{cr} δεν μπορεί να οριστεί μονοσήμαντα εξαιτίας της επίδρασης του συντελεστή a , ο οποίος υπεισέρχεται εντονότερα στο $\phi_{cr,2}$.



Σχήμα 9.22: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($\rho_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (ρ_m), ως προς τον ερπυστικό συντελεστή $\phi_{cr,2}$.

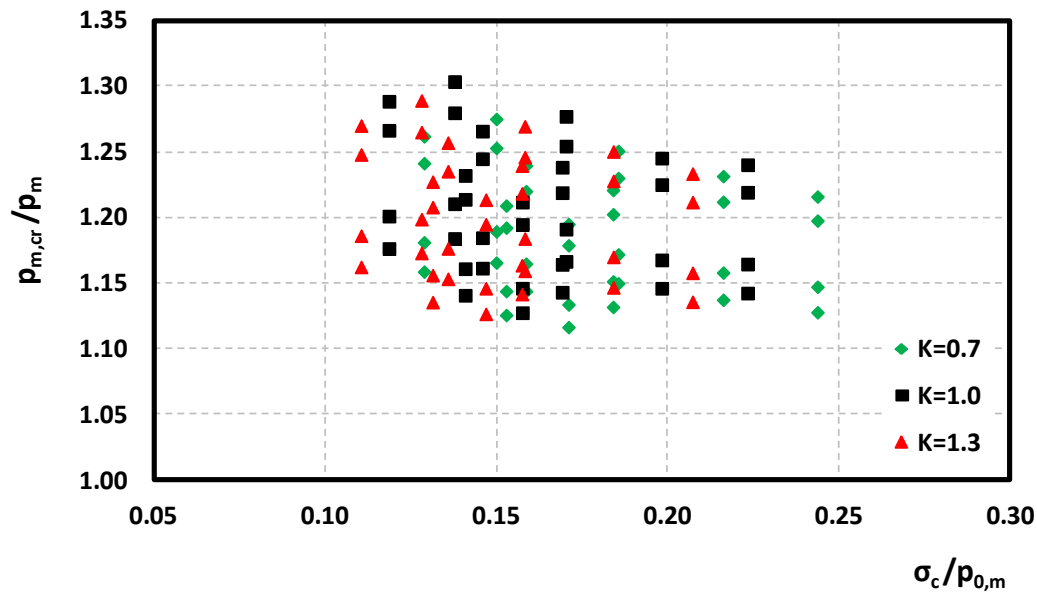
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 9.22), είναι ξεκάθαρο πως όσο ο ερπυστικός συντελεστής $\phi_{cr,2}$ αυξάνεται ο λόγος της μέσης πίεσης που δέχεται η τελική επένδυση μετά, ως προς την πίεση πριν την επιβολή του ερπυσμού, αυξάνεται. Συγκεκριμένα, για αύξηση του $\phi_{cr,2}$ από 0.25 σε 0.60 ο λόγος των πιέσεων κυμαίνεται μεταξύ των τιμών (1.11-1.20) και (1.20-1.30) αντίστοιχα.

Για να δείξουμε την επιρροή του ερπυστικού συντελεστή ϕ_{cr} στη φόρτιση της τελικής επένδυσης της σήραγγας επιλέχθηκε η παράμετρος $\phi_{cr,2}$. Όπως έχει προαναφερθεί, για κάθε μία από τις δύο τιμές του $\phi_{cr,1}$ που έχουν επιλεγεί, αντιστοιχίστηκαν δύο τιμές του $\phi_{cr,2}$. Το $\phi_{cr,2}$ εμπεριέχει και την παράμετρο a και το $\phi_{cr,1}$. Η παράμετρος a όμως επηρεάζεται από τις τάσεις, συνεπώς το γεγονός ότι το $\phi_{cr,2}$ αντιπροσωπεύει τέσσερα διαφορετικά επίπεδα δυνητικών ερπυστικών παραμορφώσεων αποτελεί πιο χαρακτηριστική παράμετρος, για μία σαφέστερη εικόνα της επίδρασή του στη φόρτιση της τελικής επένδυσης.



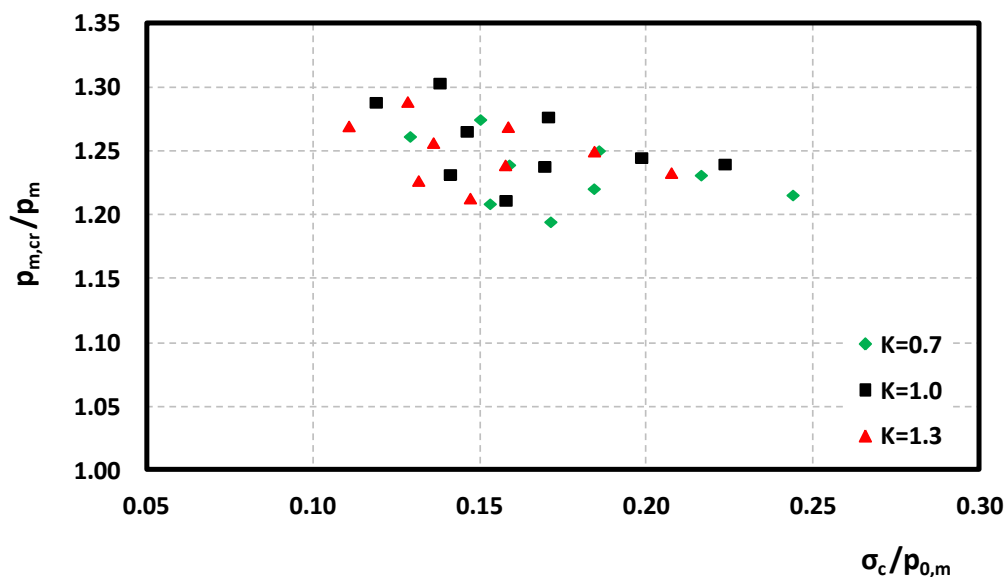
Σχήμα 9.23: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς την παράμετρο επίδρασης της τάσης του προσομοιώματος των Singh & Mitchell (1968), a .

Από το Σχήμα 9.23, δεν παρατηρείται μία σαφής τάση του a σε σχέση με το λόγο των μέσων πιέσεων που ασκούνται στην τελική επένδυση. Για αύξηση του ερπυστικού συντελεστή a διακρίνεται μικρή αύξηση των λόγων των μέσων πιέσεων. Η μεγάλη διασπορά των σημείων οφείλεται στις τιμές όλων των υπολοίπων παραμέτρων που υπεισέρχονται.

9.2.2 Κατανομή των πιέσεων ως προς το λόγο $\sigma_c/\rho_{0,m}$ με επίδραση του συντελεστή K

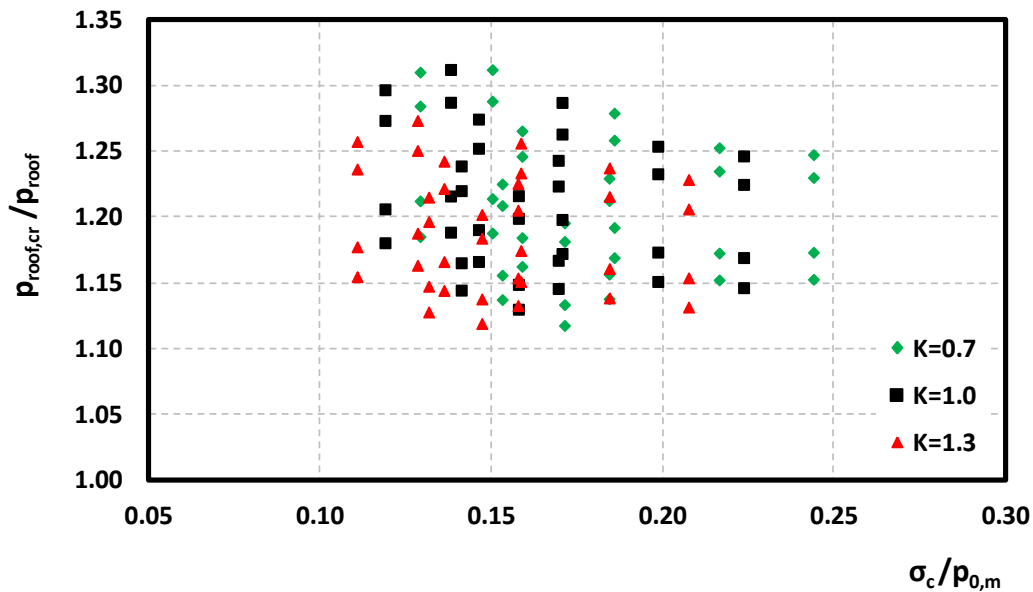
Σχήμα 9.24: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c/\rho_{0,m}$), για τρία διαφορετικά $K=0.7, 1.0, 1.3$.

Στο Σχήμα 9.24 διακρίνεται πως όσο ο λόγος αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη ($\sigma_c/\rho_{0,m}$) αυξάνεται, πραγματοποιείται μείωση του λόγου των μέσων πιέσεων που ασκούνται στην τελική επένδυση λόγω του φαινομένου του ερπυσμού. Ακόμη, για συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K=1.0$ ο λόγος των πιέσεων κυμαίνεται μεταξύ των τιμών (1.12-1.30), ενώ για $K=0.7$ και $K=1.3$ το εύρος είναι λίγο μικρότερο και περίπου ίδιο, μεταξύ των τιμών (1.10-1.25).

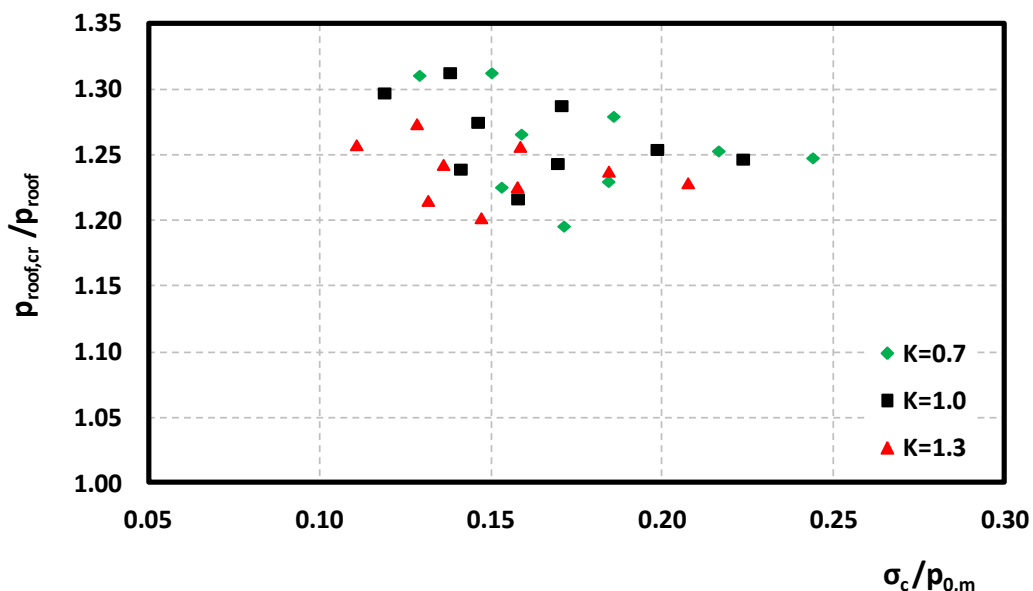


Σχήμα 9.25: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c/\rho_{0,m}$), για τρία διαφορετικά $K=0.7, 1.0, 1.3$, με $\phi_{cr,1}=0.4$ και $\phi_{cr,2}=0.6$.

Για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η επίδραση του συντελεστή οριζόντιων τάσεων K , παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.25 μόνο τα αποτελέσματα των αναλύσεων με $\phi_{cr,1}=0.4$ και $\phi_{cr,2}=0.6$. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα δεν γίνεται πολύ σαφής η επίδραση του K , αλλά όπως αναφέρθηκε και παραπάνω παρατηρείται μία μικρή αύξηση των μέσων πιέσεων για $K=1.0$ σε σχέση με $K=0.7$ και $K=1.3$.

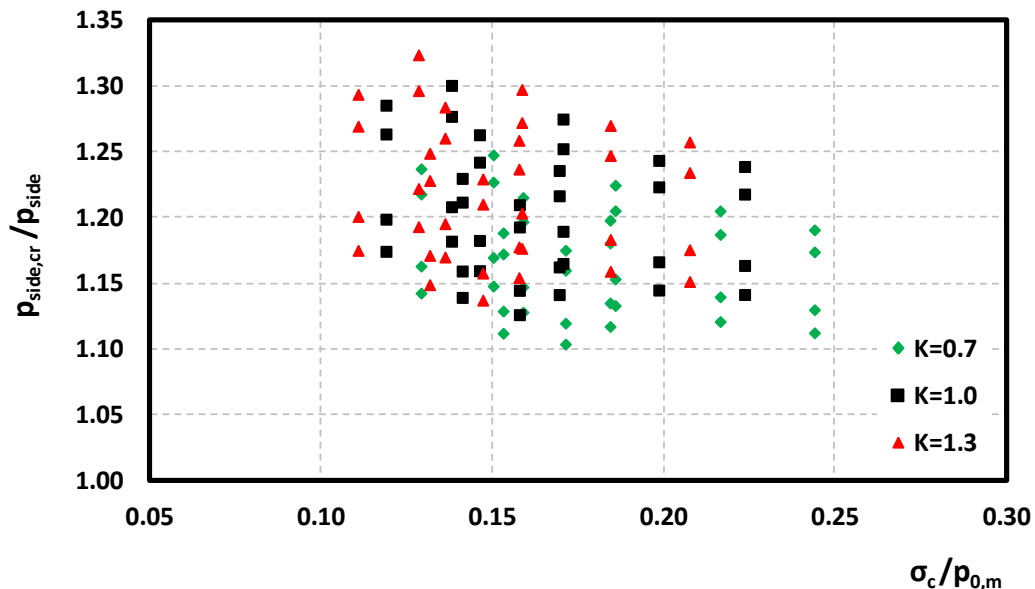


Σχήμα 9.26: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης που ασκείται στην οροφή της τελικής επένδυσης μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{roof,cr}$) και της πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_{roof}), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c / \rho_{0,m}$), για τρία διαφορετικά $K=0.7$, 1.0, 1.3.

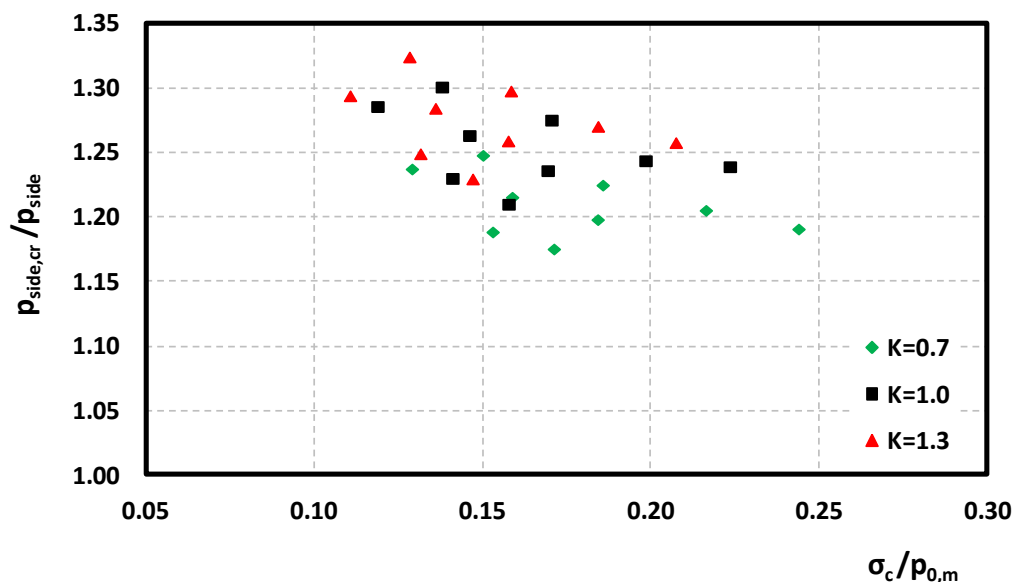


Σχήμα 9.27: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης που ασκείται στην οροφή της τελικής επένδυσης μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{roof,cr}$) και της πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_{roof}), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c / \rho_{0,m}$), για τρία διαφορετικά $K=0.7$, 1.0, 1.3, με $\phi_{cr,1}=0.4$ και $\phi_{cr,2}=0.6$.

Από το Σχήμα 9.26 παρατηρείται, ομοίως με παραπάνω, πως όσο βελτιώνονται οι γεωτεχνικές συνθήκες υπάρχει μία, μικρή μεν, μείωση του λόγου των πιέσεων που δέχεται η τελική επένδυση στην οροφή της σήραγγας. Ωστόσο, όπως γίνεται πιο εύκολα αντιληπτό στο Σχήμα 9.27, για $K=1.3$ ο λόγος των πιέσεων στην οροφή κυμαίνεται μεταξύ ενός εύρους τιμών (1.20-1.26), ενώ για $K=0.7$ και $K=1.0$ παρατηρείται μία μικρή αύξηση του λόγου, ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ των τιμών (1.20-1.31).



Σχήμα 9.28: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης που ασκείται στην παρειά της τελικής επένδυσης μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{side,cr}$) και της πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_{side}), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c/\rho_{0,m}$), για τρία διαφορετικά $K=0.7, 1.0, 1.3$.

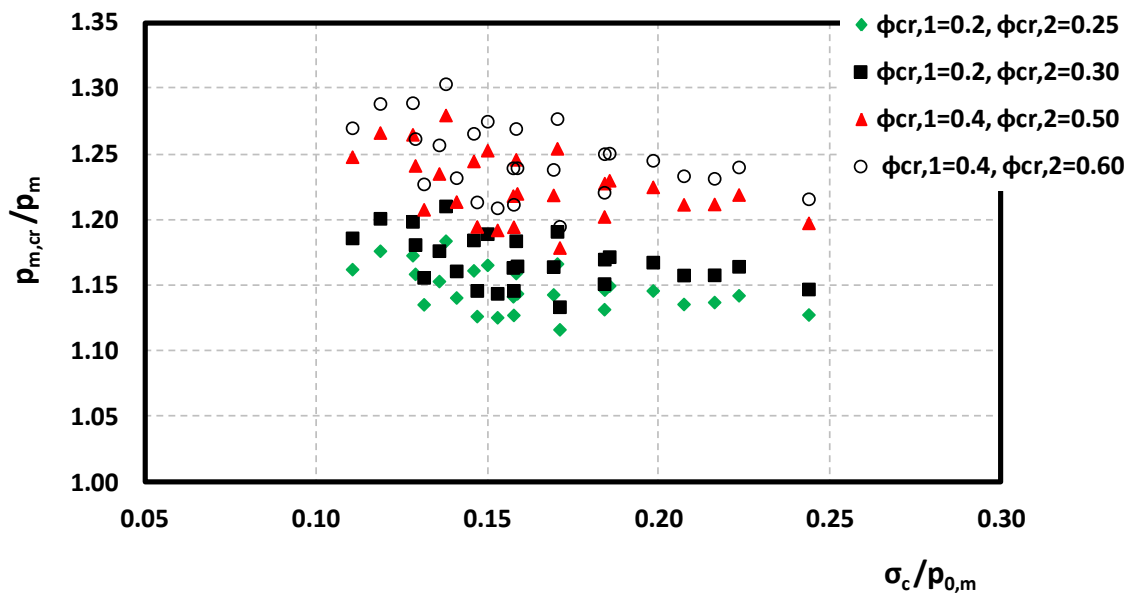


Σχήμα 9.29: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης που ασκείται στην παρειά της τελικής επένδυσης μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{side,cr}$) και της πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_{side}), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c/\rho_{0,m}$), για τρία διαφορετικά $K=0.7, 1.0, 1.3$, με $\phi_{cr,1}=0.4$ και $\phi_{cr,2}=0.6$.

Από το Σχήμα 9.28, παρατηρούμε πως το εύρος των τιμών που κυμαίνεται ο λόγος των πιέσεων που δέχεται η τελική επένδυση στην παρειά της σήραγγας είναι ίδιος σε σχέση με τα παραπάνω διαγράμματα. Ομοίως, είναι ξεκάθαρο πως όσο ο λόγος $\sigma_c/\rho_{0,m}$ μεγαλώνει, η πίεση που αναπτύσσεται λόγω του ερπυσμού μειώνεται. Ως προς την επίδραση του K , από το Σχήμα 9.29, διακρίνεται πως στις παρειές της σήραγγας, για $K=1.3$ εμφανίζονται οι μεγαλύτερες πιέσεις, για $K=1.0$ λίγο μικρότερες, ενώ για $K=1.3$ μικρότερες και από τις δύο περιπτώσεις. Στην παρειά, λοιπόν, της σήραγγας εμφανίζεται αντίθετη συμπεριφορά σε σχέση με την οροφή.

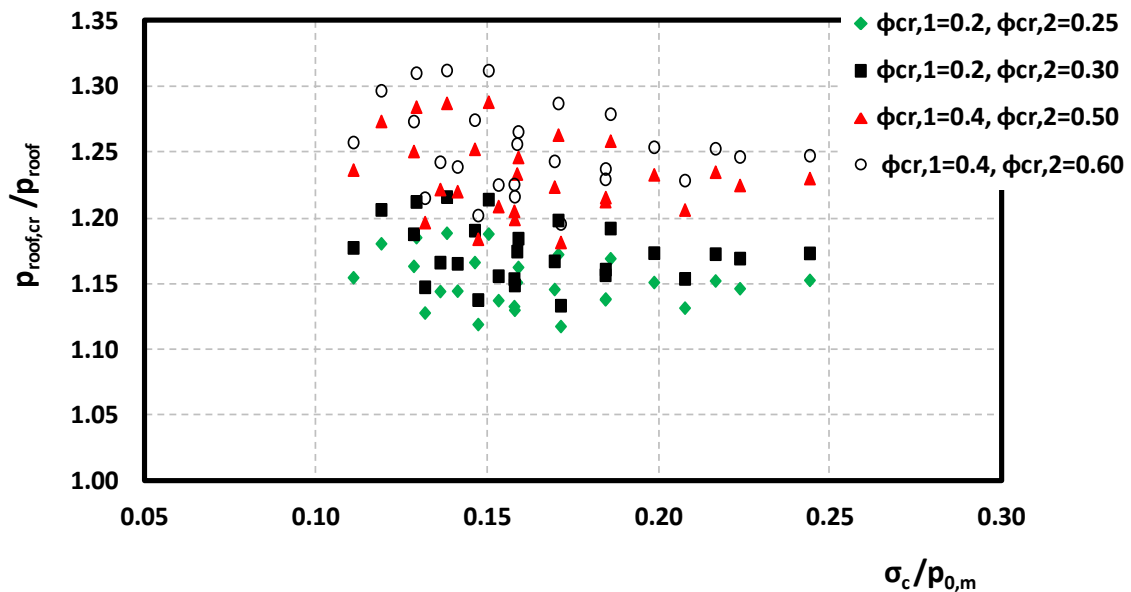
9.2.3 Κατανομή των πιέσεων ως προς το λόγο $\sigma_c/\rho_{0,m}$ με επίδραση του συντελεστή ϕ_{cr}

Παρακάτω, παρατίθενται τα ίδια διαγράμματα, δηλαδή των λόγων της μέσης, της πίεσης στην οροφή και της πίεσης στην παρειά μετά και πριν τον ερπυσμό ως προς το λόγο $\sigma_c/\rho_{0,m}$, δίνοντας τώρα ιδιαίτερη έμφαση στην επίδραση του ερπυστικού συντελεστή ϕ_{cr} .

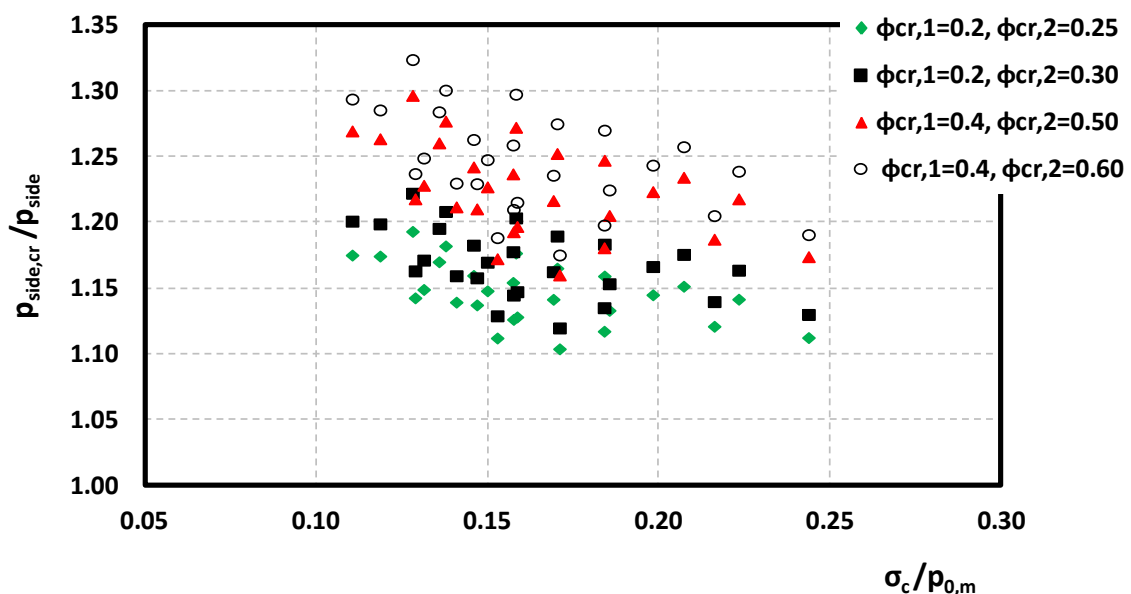


Σχήμα 9.30: Διάγραμμα του λόγου της μέσης πίεσης που ασκείται στην τελική επένδυση μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{m,cr}$) και της μέσης πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_m), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c/\rho_{0,m}$), για τέσσερις συνδυασμούς $\phi_{cr,1}$ και $\phi_{cr,2}$.

Ομοίως με τα παραπάνω διαγράμματα, όσο ο λόγος ($\sigma_c/\rho_{0,m}$) αυξάνεται η πίεση που δέχεται η τελική επένδυση λόγω της επιβολής του ερπυσμού μειώνεται. Παρατηρείται πως η αύξηση του $\phi_{cr,1}$ και $\phi_{cr,2}$ συνεπάγεται και αύξηση του λόγου των μέσων πιέσεων. Συγκεκριμένα, για $\phi_{cr,1}=0.20$ και $\phi_{cr,2}=0.25$ ο λόγος ($p_{m,cr}/p_m$) κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.12 και 1.17, ενώ για $\phi_{cr,1}=0.40$ και $\phi_{cr,2}=0.60$ κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.20 και 1.30.



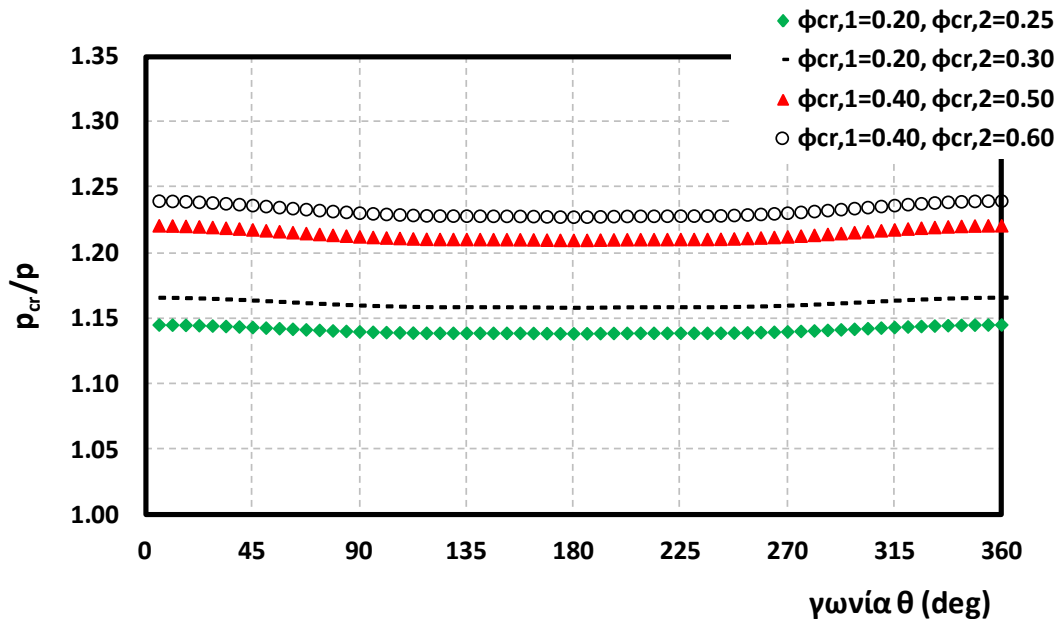
Σχήμα 9.31: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης που ασκείται στην οροφή της τελικής επένδυσης μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{\text{roof,cr}}$) και της πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_{roof}), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c / \rho_{0,m}$), για τέσσερις συνδυασμούς $\phi_{\text{cr},1}$ και $\phi_{\text{cr},2}$.



Σχήμα 9.32: Διάγραμμα του λόγου της πίεσης που ασκείται στην παρειά της τελικής επένδυσης μετά την επιβολή του ερπυσμού ($p_{\text{side,cr}}$) και της πίεσης πριν την επιβολή του ερπυσμού (p_{side}), ως προς το λόγο αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη του γεωυλικού ($\sigma_c / \rho_{0,m}$), για τέσσερις συνδυασμούς $\phi_{\text{cr},1}$ και $\phi_{\text{cr},2}$.

Από το Σχήμα 9.32, όπως και στα δύο προηγούμενα διαγράμματα, διακρίνεται πως όσο το $\phi_{\text{cr},1}$ και $\phi_{\text{cr},2}$ αυξάνεται ο λόγος των πιέσεων αυξάνεται, δηλαδή για μεγαλύτερη τιμή του ϕ_{cr} έχουμε μεγαλύτερες ερπυστικές παραμορφώσεις. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη περίπτωση, στην παρειά δηλαδή της σήραγγας, παρατηρείται μία πιο έντονη πτώση του λόγου των πιέσεων όσο βελτιώνονται οι γεωτεχνικές συνθήκες.

Ένα σημαντικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από τα παραπάνω διαγράμματα σε σύγκριση με αυτά της υποενότητας 9.2.2, είναι πως όπως φαίνεται από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα των αποτελεσμάτων η επίδραση του ερπυστικού συντελεστή ϕ_{cr} στην πίεση που δέχεται η τελική επένδυση της σήραγγας λόγω της επιβολής του ερπυσμού, είναι πολύ έντονη και πολύ πιο σημαντική από την επιρροή των γεωτεχνικών συνθηκών που επικρατούν στην περιβάλλουσα βραχώμαζα.



Σχήμα 9.33: Διάγραμμα του λόγου των πιέσεων της τελικής επένδυσης πριν και μετά την επιβολή του ερπυσμού ως προς τη γωνία που ασκείται στη σήραγγα, των αναλύσεων 20_a_548_A, 20_a_548_B, 20_a_548_C και 20_a_548_D, για τέσσερις συνδυασμούς $\phi_{cr,1}$ και $\phi_{cr,2}$ με σταθερό συντελεστή οριζόντιων τάσεων, $K=1.0$.

Από το Σχήμα 9.33, διακρίνεται πως όσο το $\phi_{cr,1}$ και $\phi_{cr,2}$ μεγαλώνει αυξάνονται οι πιέσεις που καλείται να παραλάβει η τελική επένδυση λόγω του φαινομένου του ερπυσμού. Συγκεκριμένα, για $\phi_{cr,1}=0.20$ και $\phi_{cr,2}=0.25$ και 0.30 ο λόγος (p_{cr}/p) κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.15-1.17, ενώ για $\phi_{cr,1}=0.40$ και $\phi_{cr,2}=0.50$ και 0.60 ο λόγος (p_{cr}/p) παρουσιάζει μία αύξηση της τάξεως του 7%.

10 ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να μελετηθεί η επίδραση του φαινομένου του ερπυσμού στην ανάπτυξη των φορτίων που καλείται να παραλάβει η τελική επένδυση σήραγγας κυκλικής διατομής ($D=10\text{m}$) και βάθους διάνοιξης $H=100\text{m}$ και η συσχέτιση των φορτίων αυτών με τις μηχανικές και ιξωδοελαστικές παραμέτρους του γεωυλικού.

Στο πλαίσιο της διερεύνησης αυτής, πραγματοποιήθηκε πλήθος διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS 6.9.1. Διατηρώντας κάθε φορά κάποιες παραμέτρους των αναλύσεων σταθερές μελετήθηκε η επίδραση των παραμέτρων που μεταβάλλονται, στα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Για την προσομοίωση της ερπυστικής συμπεριφοράς της περιβάλλουσας βραχώμαζας της σήραγγας χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα των Singh & Mitchell (1968), το οποίο διέπεται από την παρακάτω σχέση:

$$\dot{\varepsilon} = Ae^{aD} \left(\frac{t_1}{t} \right)^m$$

Με χρήση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα εργαστηριακά πειράματα ερπυσμού, που πραγματοποίησαν στα πλαίσια των διδακτορικών τους διατριβών οι Aristorenas (1987) και Debernardi (2008), εκφράστηκαν οι παράμετροι A , a , m του προσομοιώματος των Singh & Mitchell (1968) σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$A = \frac{\sigma_c}{E} \frac{(\varphi_{cr,2} - \varphi_{cr,1})(m-1)}{(1-t_d^{1-m}) \left[\left(e^{a(q/q_f)_2} / (q/q_f)_2 \right) - \left(e^{a(q/q_f)_1} / (q/q_f)_1 \right) \right]}$$

$$a = \frac{\ln \left[(\varphi_{cr,2} / \varphi_{cr,1}) (q/q_f)_2 / (q/q_f)_1 \right]}{(q/q_f)_2 - (q/q_f)_1}$$

$$t_d^{1-m} - 2t_{50\%}^{1-m} + 1 = 0$$

Μετά από επεξεργασία των εργαστηριακών αποτελεσμάτων από Debernardi (2008), βρέθηκαν τα εύρη μεταξύ των οποίων κυμαίνονται οι παράμετροι ως προς τις οποίες εκφράστηκαν τα A , a , m .

- ✓ Ο αδιάστατος ερπυστικός συντελεστής φ_{cr} βρέθηκε πως κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.02-0.06.
- ✓ Ο λόγος $t_{50\%}/t_d$ κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.001-0.080.

- ✓ Όσον αφορά την κλίση m , παρατηρήθηκε πως δεν υπάρχει μία σαφής εξάρτηση από το επίπεδο της τάσης που επιβάλλεται, αλλά κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.8-1.2. Στη διεθνή βιβλιογραφία, σύμφωνα με την N.Hunaj-Sarihan (2009), αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών έδειξαν ότι το m κυμαίνεται γενικά, μεταξύ 0.7-0.8 (Tavenas et.al. 1978), 0.5-1.3 (Lacasse and Berre 2005) και 0.9-1.3 (Mansour et.al. 2008).

Αντίστοιχα, μετά από επεξεργασία των εργαστηριακών αποτελεσμάτων από Aristorenas (1987) τα εύρη μεταξύ των οποίων κυμαίνονται οι παράμετροι ως προς τις οποίες εκφράστηκαν τα A , a , m είναι:

- ✓ Ο αδιάστατος ερπυστικός συντελεστής ϕ_{cr} βρέθηκε πως κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.1-1.0. Οι τιμές είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τα αποτελέσματα από Debernardi (2008), γεγονός που οφείλεται εν μέρει, στο ότι ο Aristorenas (1987) εκτέλεσε πειράματα ερπυσμού σε γεωυλικό πολύ καλύτερης ποιότητας.
- ✓ Ο λόγος $t_{50\%}/t_d$ κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.1-0.4.

Τελικά, για την προσομοίωση του ερπυσμού της περιβάλλουσας βραχώμαζας του προβλήματος που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέχθηκαν οι παρακάτω τιμές των ερπυστικών παραμέτρων:

Πίνακας 10.1: Συγκεντρωτικός πίνακας των παραμέτρων του ερπυσμού των αναλύσεων.

Παράμετροι ερπυσμού	Παράμετρος	Τιμές	Μονάδες μέτρησης
	$\phi_{cr,1}$ ($q/q_f=30\%$)	0.2, 0.4	
	$\phi_{cr,2}$ ($q/q_f=70\%$)	0.25, 0.30, 0.50, 0.60	
	t_d	1.200	μήνες
	$t_{50\%}/t_d$	0.1	μήνες
	m	0.8	
	a	2.6761-3.1319	
	A	7.557×10^{-07} - 2.583×10^{-06}	

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ποιοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων.

- ✓ Για συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K < 1.0$ η πλαστική ζώνη αναπτύσσεται κυρίως στις παρειές της σήραγγας, ενώ για $K > 1.0$ στην οροφή και το δάπεδο. Για $K = 1.0$ παρατηρείται ομοιόμορφη κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων περιμετρικά της σήραγγας.
- ✓ Οι μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις της περιβάλλουσας βραχώμαζας εμφανίζονται στις περιοχές όπου παρατηρούνται οι ελάχιστες πλαστικές παραμορφώσεις.
- ✓ Η κατανομή των μέγιστων πλαστικών παραμορφώσεων είναι σχεδόν όμοια με την κατανομή των πιέσεων που ασκούνται στην τελική επένδυση περί τη διατομή.

- ✓ Οι πλαστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται γύρω από τη σήραγγα και οι πιέσεις που ασκούνται στην τελική επένδυση πριν την επιβολή του ερπυσμού, έχουν σχεδόν όμοια κατανομή με τις παραμορφώσεις μετά τον ερπυσμό.
- ✓ Όσο η ποιότητα της περιβάλλουσας βραχώμαζας βελτιώνεται, η μέγιστη τιμή αλλά και η περιοχή που εκτείνεται η πλαστική ζώνη μειώνεται. Ομοίως, μειώνεται η πίεση που καλείται να παραλάβει η τελική επένδυση της σήραγγας.
- ✓ Η μεταβολή του ϕ_{cr} δεν μεταβάλλει τις συνολικές μετατοπίσεις και πλαστικές παραμορφώσεις.

Μετά την ποσοτική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων, παρουσιάζονται παρακάτω τα σημαντικότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν.

- ✓ Η επιβολή του ερπυσμού δεν μεταβάλλει την κατανομή των πιέσεων που καλείται να παραλάβει η τελική επένδυση της σήραγγας, παρά μόνο την μέγιστη τιμή τους. Γενικά, παρατηρείται μία αύξηση των πιέσεων επί της τελικής επένδυσης λόγω του ερπυσμού, της τάξεως του 20-30%.
- ✓ Όπως προαναφέρθηκε, η επιβολή του ερπυσμού δεν μεταβάλλει την κατανομή των πιέσεων, ομοιομορφοποιεί όμως τις πιέσεις σε όρους αποστάσεως από τη μέση τιμή αυτών.
- ✓ Όσο βελτιώνονται οι γεωτεχνικές συνθήκες, δηλαδή ο δείκτης γεωτεχνικών συνθηκών αυξάνεται, ο λόγος των μέσων πιέσεων μετά ($p_{m,cr}$) και πριν (p_m) την επιβολή του ερπυσμού μειώνεται. Συγκεκριμένα, ο λόγος ($p_{m,cr}/p_m$) κυμαίνεται μεταξύ των τιμών (1.10-1.30).
- ✓ Όσο η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ αυξάνεται, παρατηρείται μείωση του λόγου των μέσων πιέσεων ($p_{m,cr}/p_m$).
- ✓ Για συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K=0.7$ ο λόγος των πιέσεων στην οροφή της σήραγγας μετά και πριν τον ερπυσμό ($p_{roof,cr}/p_{roof}$) κυμαίνεται μεταξύ των τιμών (1.10-1.30). Για $K=1.0$ δεν παρατηρείται μεγάλη αλλαγή, ενώ για $K=1.3$ ο λόγος ($p_{roof,cr}/p_{roof}$) έχει ένα εύρος τιμών (1.10-1.25). Συνεπώς, για την οροφή της σήραγγας, όσο το K μεγαλώνει ο λόγος ($p_{roof,cr}/p_{roof}$) μειώνεται, χωρίς όμως η μείωση αυτή να είναι ιδιαίτερα σημαντική.
- ✓ Αντίθετη συμπεριφορά παρατηρείται στις παρειές της σήραγγας. Όσο το K μεγαλώνει ο λόγος ($p_{side,cr}/p_{side}$) αυξάνεται. Συγκεκριμένα, για $K=0.7$ ο λόγος έχει ένα εύρος τιμών (1.10-1.25), για $K=1.0$ (1.15-1.30), ενώ για $K=1.3$ ο λόγος αυξάνεται σε ένα εύρος τιμών (1.15-1.34). Αξίζει να σημειωθεί πως στις παρειές της σήραγγας όσο το ($\sigma_c/\rho_{o,m}$) αυξάνεται παρατηρείται μία πιο έντονη και απότομη μείωση του λόγου των πιέσεων, σε σχέση με τους λόγους των πιέσεων στην οροφή.
- ✓ Η επίδραση του ερπυστικού συντελεστή ϕ_{cr} στην πίεση που δέχεται η τελική επένδυση της σήραγγας λόγω της επιβολής του ερπυσμού, είναι πολύ έντονη και πολύ πιο σημαντική από την επιρροή των γεωτεχνικών συνθηκών που επικρατούν στην περιβάλλουσα βραχώμαζα.

- ✓ Αύξηση του $\phi_{cr,1}$ από 0.20 σε 0.40 αυξάνει το λόγο των μέσων πιέσεων που ασκούνται στην τελική επένδυση μετά και πριν τον ερπυσμό, κατά ένα ποσοστό της τάξεως του 7%.
- ✓ Αύξηση του $\phi_{cr,2}$ από 0.25 σε 0.60 συνεπάγεται αύξηση του λόγου των μέσων πιέσεων ($\rho_{m,cr}/\rho_m$) της τάξεως του 9%.
- ✓ Αύξηση του $\phi_{cr,1}=0.2$ και $\phi_{cr,2}=0.25$ σε $\phi_{cr,1}=0.40$ και $\phi_{cr,2}=0.60$ συνεπάγεται αύξηση του λόγου των πιέσεων στην οροφή της σήραγγας κατά ένα ποσοστό του 10%.
- ✓ Αντίστοιχα, αύξηση του $\phi_{cr,1}=0.2$ και $\phi_{cr,2}=0.25$ σε $\phi_{cr,1}=0.40$ και $\phi_{cr,2}=0.60$ συνεπάγεται αύξηση του λόγου των πιέσεων κατά ένα ποσοστό του 11%.
- ✓ Όλα τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω δεν εμφανίζουν μονοτονική σχέση. Το γεγονός ότι θεωρήθηκε πλήρης απενεργοποίηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης σίγουρα επηρεάζει σε κάποιο βαθμό τα αποτελέσματα της έρευνάς μας.

Συμπερασματικά, παρατηρείται πως το φαινόμενο του ερπυσμού προσαυξάνει τα φορτία που καλείται να παραλάβει η τελική επένδυση της σήραγγας και αρκετές φορές η προσαύξηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική. Συνεπώς, απαιτείται να γίνεται ερπυστική μελέτη και αν κρίνεται απαραίτητο, να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό.

Τελικά, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω συμπεράσματα προκύπτουν προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

- ✓ Εκτενέστερη βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με τις παραμέτρους του ερπυσμού και σύγκριση με τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
- ✓ Πραγματοποίηση επιπλέον αριθμητικών αναλύσεων με διαφορετικές γεωτεχνικές παραμέτρους ώστε να γίνει προσπάθεια κατηγοριοποίησης των ερπυστικών παραμέτρων ανά ποιότητα βραχώμαζας.
- ✓ Πραγματοποίηση επιπλέον αριθμητικών αναλύσεων με αύξηση του ερπυστικού συντελεστή ϕ_{cr} , ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά της βραχώμαζας σε εντονότερο ερπυσμό.
- ✓ Δημιουργία νέου και πιο πλήρους καταστατικού προσομοιώματος.
- ✓ Όσο το δυνατόν πιο ακριβή σχέση συσχέτισης των γεωτεχνικών και ερπυστικών παραμέτρων, για τον υπολογισμό του λόγου των πιέσεων μετά και πριν την επιβολή του ερπυσμού ($\rho_{m,cr}/\rho_m$).
- ✓ Πρόταση πιο απλοποιημένης μεθόδου υπολογισμού των επιπρόσθετων φορτίων της τελικής επένδυσης λόγω του ερπυσμού, με απομείωση του μέτρου ελαστικότητας γύρω από τη διατομή της σήραγγας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

ABAQUS 6.9 Documentation. 2009. SIMULIA, United States of America.

Aristorenas, G. 1987. *Time dependant behaviour of tunnels excavated in shale*. PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology, USA.

Barla, G., Bonini, M. & Debernardi, D. 2010. Time dependent deformations in squeezing tunnels. *International Journal of Geoengineering Case Histories*, **2** (1), pp. 40-65.

Barton, N.R., Lien, R., Lunde, J. 1974. Engineerring classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, **6**, pp. 189-239.

Betten, J. 2005. *Creep mechanics*. 2nd ed. Berlin: Springer.

Bieniawski, Z.T. 1976. Rock mass classification in rock engineering. *In Exploration for rock engineering* (Bieniawski, Z.T. (ed.)). **1**, pp. 97-106. Cape Town: Balkema.

Bieniawski, Z.T. 1989. *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley.

Bishop, A.W. 1966. The strength of soils as engineering materials. *Geotechnique*, **16** (2), pp. 89-130.

Chern, J.C., Shiao, F.Y. & Yu, C.W. 1998. An empirical safety criterion for tunnel construction. *Proceedings of the Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering*. Taipei, pp. 222-227.

Coulomb, C.A. 1776. Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs a l'architecture. *Mem. Acad. Roy. Div. Sav.*, **7**, pp. 343-387.

Debernardi, D. 2008. *Viscoplastic behaviour and desigh of tunnels*. PhD thesis. Politecnico di Torino, Italy.

Drucker, D.C. & Prager, W. 1952. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of Applied Mathematics*, **10**, pp. 157-164.

Hoek, E. 1994. Strength of rocks and rock masses. *ISRM News Journal*, **2**.

Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B. 2002. Hoek-Brown failure criterion. *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunnelling Association of Canada: NARMS-TAC*, Toronto, Canada, **1**, pp. 267-273.

- Kamata, H., Mashimo, H. 2003. Centrifuge model test of tunnel face reinforcement by bolting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **18**, pp. 205-212.
- Lacasse, S. and Berre, T., (2005). Undrained creep susceptibility of clays. *Proc. of the 16th Intl. Conf. Soil Mech and Geotech Eng*, Osaka, Japan, v.2, pp. 531-536.
- Liingaard, M., Augustesen, A. & Lade, P.V. 2004. Characterization of models for time dependent behaviour of soils. *International Journal of Geomechanics*, **4** (3), pp. 157-177.
- Lunardi, P. 2000. The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rock and soils. *Tunnels and Tunneling International*, Special Supplement, May 2000.
- Mansour, M.F., Martin, C.D., and Morgenstern N.R (2008). Characterization of creep movements at the Little Chief Slide, BC. *Proc. 61st Canadian Geotechnical Conference & 9th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference*, September 21-24 2008, Edmonton, Canada, pp. 461-468.
- Marinos, P., Hoek, E. 2000. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *Proceedings of the GeoEng 2000 at the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*. Melbourne, Australia, pp. 1422-1446. Lancaster: Technomic publishers.
- Panet, M. 1995. *Le calcul des tunnels par la methode des courbes convergence-confinement*. Presses de l'Ecole Nationale des Pont de Chaussees, Paris.
- Protodyakonov, M. 1960. *Klassifikacija Gorotworu*. In Frence T. at O.S. Paris, 1974.
- Singh, A. & Mitchell, J.K. 1968. General stress-strain-time functions for soil. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **94** (1), pp. 21-46.
- Tavenas, F., Leroueil, S., La Rochelle, P., and Roy, M., (1987). Creep behaviour of an undisturbed lightly overconsolidated clay. *Can, Geotech, Journal*, v. **15**, n. **3**, pp. 402-423.
- Terzaghi, K. *Theoretical Soil Mechanics*. 1943. New York: Wiley.
- Terzaghi, K. Rock defects and loads on tunnel supports. 1946. In *Rock tunneling with steel supports* (Proctor, R.V. & White, T.L. (eds)). pp. 17-99. Youngstown: Commercial Shearing and Stamping Company.
- Unal, E. 1983. *Design guidelines and roof control standards for coal mine roofs*. PhD thesis. The Pennsylvania State University.
- Yu, C.W. 1998. *Creep characteristics of soft rock and modelling of creep in tunnel*. PhD thesis. University of Bradford, Great Britain.

Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία

Καββαδάς, Μ. 2003. *Στοιχεία Εδαφομηχανικής*. Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Καββαδάς, Μ. 2004. Φόρτιση της μόνιμης επένδυσης σηράγγων από περιβάλλον έδαφος. *Ανάλυση και διαστασιολόγηση μόνιμης επένδυσης σηράγγων*, σελ. 51-78. Αθήνα: Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων & Υπογείων Έργων.

Καββαδάς, Μ. 2005. *Σημειώσεις σχεδιασμού υπογείων έργων*. Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Κόλιας, Β. 2004. Μόνιμη επένδυση σηράγγων: Ανάλυση και διαστασιολόγηση στην πράξη. *Ανάλυση και διαστασιολόγηση μόνιμης επένδυσης σηράγγων (επιμέλεια Τάσιος, Θ.Π.)*, σελ. 79-92. Αθήνα: Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων & Υπόγειων Έργων.

Μαρίνος, Π.Γ. 1993. *Κεφάλαια γεωλογίας μηχανικού*. Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Μαρίνος, Β., Μαρίνος, Π.Γ., Hoek, E. 2004. Γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI. Εφαρμογή, συστάσεις, περιορισμοί και πεδία μεταβολών ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος. *10^ο Διεθνές Συνέδριο*. Θεσ/νίκη, Ελλάδα, Απρίλιος.

Μπακογιάννης, Γ. 2004. Δράσεις, μέθοδοι και μοντέλα ανάλυσης μόνιμης επένδυσης σηράγγων. *Ανάλυση και διαστασιολόγηση μόνιμης επένδυσης σηράγγων*, σελ. 25-50. Αθήνα: Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων & Υπογείων Έργων.

Φορτσάκης, Π.Ι., Καββαδάς, Μ. 2006. Σύγκριση των μεθόδων εκτίμησης φορτίων της τελικής επένδυσης μέσω αριθμητικών αναλύσεων και στοιχείων από την Εγνατία Οδό. *6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*. Βόλος, Ελλάδα, 29 Σεπτεμβρίου – 1 Οκτωβρίου, **2**, σελ. 555-562. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.

Φορτσάκης, Π.Ι., Μαγκανάς, Κ.Α., Καββαδάς, Μ. 2006. Μεθοδολογίες και φορτίσεις σχεδιασμού της τελικής επένδυσης σηράγγων. Παρουσίαση στοιχείων από σήραγγες της Εγνατίας Οδού. *16^ο Συνέδριο Σκυροδέματος*. Αλεξανδρούπολη, Ελλάδα, 25-27 Οκτωβρίου, **Δ**, σελ. 117-128. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.

Χατζηγεωργίου, Α. 2007. *Μελέτη της επίδρασης της ερπυστικής συμπεριφοράς του γεωυλικού στην ένταση της τελικής επένδυσης σηράγγων και των αγκυρίων της προσωρινής υποστήριξης μέσω παραμετρικών αναλύσεων*. Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Γεωτεχνικής, Αθήνα, Ελλάδα.

