

## Ευχαριστίες

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 βοήθεια και καθοδήγησή του κατά την εκπόνησή της.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερές μου ευχαριστίες στον Π. Φορτσάκη, Υποψήφιο Διδάκτορα του ΕΜΠ, για την αμέριστη συμβολή του στην εξέλιξη και περαίωση της διπλωματικής μου εργασίας. Η συνεργασία μας και η σωστή καθοδήγησή του υπήρξαν καθοριστικοί παράγοντες στην επίτευξη αυτού του αποτελέσματος.

Ακόμη, η συμπαράσταση και η βοήθεια, σε αρκετές περιπτώσεις, των φίλων μου υπήρξαν καθοριστικές στην πορεία της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να σταθώ στην πολύτιμη βοήθεια του φίλου και συμφοιτητή μου Χ. Κατή.

Για το τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου για την υποστήριξη, έμπρακτη και ψυχολογική, που μου παρέιχαν καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου.



## Περίληψη

Σημαντικό κομμάτι στη μελέτη της τελικής επένδυσης σήραγγων είναι η ορθολογική εκτίμηση τόσο της κατανομής όσο και της τιμής των φορτίων από το περιβάλλον γεωυλικό. Η εκτίμηση αυτή, όμως, αποτελεί ένα ιδιαίτερα σύνθετο πρόβλημα, τόσο λόγω των αβεβαιοτήτων αναφορικά με τον προσδιορισμό των γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών που επικρατούν, όσο και εξαιτίας της έλλειψης μίας ευρέως αποδεκτής μεθόδου προσέγγισης των φορτίων της τελικής επένδυσης από το περιβάλλον γεωυλικό.

Γενικά, τα στάδια για την κατασκευή μιας σήραγγας είναι τα εξής: αρχικά, γίνεται η εκσκαφή της σήραγγας και παράλληλα, τοποθετούνται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια βράχου κοκ.). Αυτή η διαδικασία προχωράει με σταθερό βήμα προώθησης του μετώπου εκσκαφής, έως ότου ολοκληρωθεί σε όλο το μήκος της σήραγγας. Στη συνέχεια, και αφού πρώτα έχουν ισορροπήσει τα μέτρα άμεσης υποστήριξης με τη βραχώμαζα, κατασκευάζεται η τελική επένδυση, στο εσωτερικό του δακτυλίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η τελική επένδυση αρχικά είναι αφόρτιστη και, ακολούθως, φορτίζεται εξαιτίας της απαξίωσης των μέτρων άμεσης υποστήριξης και των χρονικά εξαρτημένων φαινομένων (π.χ. ερπυσμός).

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τον τρόπο μεταφοράς του φορτίου των εκάστοτε μέτρων άμεσης υποστήριξης στην τελική επένδυση σήραγγας κυκλικής διατομής ( $D=10m$ ) και βάθος διάνοιξης  $H=10D=100m$ , αμελώντας την επίδραση των χρονικά εξαρτημένων φαινομένων.

Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε πλήθος αριθμητικών αναλύσεων με το λογισμικό προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Το μοντέλο, που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις αυτές, δημιουργήθηκε στο σχεδιαστικό περιβάλλον του MSC Patran. Από τις αριθμητικές αναλύσεις προέκυψαν αποτελέσματα για τις, αναπτυσσόμενες γύρω από τη σήραγγα, μετατοπίσεις και πλαστικές παραμορφώσεις, τις κατανομές των πιέσεων επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και επί της τελικής επένδυσης και τις αναπτυσσόμενες, επί των αγκυριών βράχου, αξονικές τάσεις.

Σημαντικό ρόλο στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτών έπαιξαν συγκεκριμένες παράμετροι, όπως ο συντελεστής γεωστατικών ωθήσεων  $K$  και ο δείκτης ποιότητας της βραχώμαζας,  $\sigma_c/p_{o,m}$  (αντοχή της βραχώμαζας ανηγμένη στη μέση γεωστατική τάση). Επιπλέον, εξήχθησαν αποτελέσματα με τη βοήθεια των καμπυλών σύγκλισης-αποτόνωσης (αναλυτικές λύσεις) και πραγματοποιήθηκε ποιοτική, κυρίως, σύγκριση των δύο διαφορετικών επιλύσεων και, ειδικότερα, του τρόπου που μεταφέρονταν, ανά περίπτωση, τα αποτελέσματα από τα μέτρα άμεσης υποστήριξης στην τελική επένδυση.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί πως αρχικά πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις για ολομέτωπη διάνοιξη της σήραγγας. Από την επεξεργασία αυτών των αριθμητικών αναλύσεων, φάνηκε ότι τα αγκύρια βράχου ενεργοποιούνται σε πολύ μικρό βαθμό και το φορτίο της άμεσης υποστήριξης μεταφέρεται σχεδόν αυτούσιο στην τελική επένδυση, στην πλειονότητα των περιπτώσεων. Η μικρή συμβολή των αγκυριών στην ανάληψη της συνολικής φόρτισης μας οδήγησε στην πραγματοποίηση αριθμητικών αναλύσεων, στις οποίες η διάνοιξη της σήραγγας λαμβάνει χώρα σε δύο φάσεις εκσκαφής. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις αυτές αφορούν στη μεγάλη συμβολή των αγκυριών στην ανάληψη της συνολικής φόρτισης και την "ανακούφιση" του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και της τελικής επένδυσης, σε σχέση με την ολομέτωπη εκσκαφή της σήραγγας. Παρά το γεγονός ότι η τελική επένδυση αναλαμβάνει μικρότερα θλιπτικά φορτία στην περίπτωση της εκσκαφής σε δύο φάσεις, η διαστασιολόγηση της είναι δυσμενέστερη, καθώς η κατάργηση της λειτουργίας του κλειστού δακτυλίου οδηγεί στην ανάπτυξη ρωπών στη διατομή της σήραγγας.



## **Abstract**

A significant part of the research on the tunnel final lining is the rational assessment of the distribution and the values of the load from the surrounding geomaterial. However, this assessment is a complex problem, because of the uncertainties regarding the determination of the geological and geotechnical conditions and the lack of a widespread method for the estimation of the load.

In general the first phase in tunnel construction is the excavation and the installation of the temporary support measures (shotcrete, rock bolts etc) in the whole tunnel length. Then, since the system surrounding geomaterial – temporary support has reached equilibrium the final lining is constructed inside the shotcrete ring. The final lining is initially not loaded and subsequently it is being loaded due to the deactivation of the temporary support measures and time - dependent phenomena (e.g. creep).

The present thesis investigates the mechanism that the load of temporary support measures is transferred to the final lining, for the case of tunnels with circular cross section ( $D=10\text{m}$ ) and excavation depth  $H=10D=100\text{m}$ , neglecting the influence of time-dependent phenomena.

For this purpose numerical analyses have been carried out with finite element code ABAQUS. The model used in this analysis was created in the design environment of the MSC Patran finite elements code. The results derived from the numerical analyses concern mainly the displacements and plastic deformations around the tunnels section, the distribution of pressure on the shotcrete shell and the final lining and the development of the anchors axial forces.

The most significant parameters for the problem description are the geostatic stress ration  $K$  and the index of geotechnical conditions  $\sigma_c/p_{o,m}$  (geomaterial strength divided by the mean geostatic stress). In addition, a similar approach was adopted using the convergence-confinement curves (analytical solution) which lead to the same qualitatively distribution of the results.

It is noted that the initial numerical analyses concerned full face excavation. From the elaboration of the numerical analysis, it appeared that the rock anchors were activated at a very low level. The small contribution of bolts in the overall load leads to a new set of numerical analyses, with two phase excavation of tunnel section (Top Heading and bench). The main conclusions illustrated from these analyses are the increase of the contribution of the bolts in the overall tunnel load and the "relief" of shotcrete and final lining, compared with the full face excavation of the tunnel. Although the final lining undertakes less loads in the case of excavation in two phases, the dimensioning may lead to more unfavourable results, since the abolition of the closed ring shape leads to the development of larger moments on tunnel section.



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>- 1 -</b>
<b>2</b>	<b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....</b>	<b>- 3 -</b>
2.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ .....	- 3 -
2.2	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ .....	- 3 -
2.2.1	Σύστημα RMR (Bieniawski) .....	- 3 -
2.2.2	Σύστημα Q (NGI) .....	- 4 -
2.2.3	Σύστημα GSI .....	- 4 -
2.3	ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ .....	- 5 -
2.3.1	Κριτήριο αστοχίας Hoek - Brown .....	- 5 -
2.3.2	Κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb .....	- 6 -
2.3.3	Κριτήριο αστοχίας Drucker - Prager .....	- 7 -
<b>3</b>	<b>ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ .....</b>	<b>- 9 -</b>
3.1	ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ .....	- 10 -
3.2	ΜΕΤΡΑ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ .....	- 11 -
3.2.1	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα .....	- 11 -
3.2.2	Αγκύρια βράχου.....	- 13 -
3.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΚΑΙ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ.....	- 14 -
3.3.1	Μέθοδοι προσδιορισμού συντελεστή αποτόνωσης $\lambda$ κατά μήκος του άξονα της σήραγγας.....	- 15 -
3.3.1.1	Μέθοδος Chern et al (1998) .....	- 15 -
3.3.1.2	Μέθοδος Panet (1995) .....	- 16 -
3.3.2	Καμπύλες σύγκλισης - αποτόνωσης.....	- 18 -
3.3.3	Υπολογισμός απομειωμένου μέτρου ελαστικότητας.....	- 19 -
3.4	ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ .....	- 20 -
3.4.1	Φορτία τελικής επένδυσης.....	- 22 -
3.4.2	Ανάλυση τελικής επένδυσης.....	- 24 -
3.4.2.1	Εμπειρικές μέθοδοι.....	- 24 -
3.4.2.2	Αναλυτικές μέθοδοι.....	- 26 -
3.4.2.3	Αριθμητικές μέθοδοι.....	- 29 -
<b>4</b>	<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....</b>	<b>- 31 -</b>
4.1	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ .....	- 31 -
4.1.1	Γεωμετρία του προβλήματος.....	- 31 -
4.1.1.1	Διαστάσεις μοντέλου .....	- 31 -
4.1.1.2	Διακριτοποίηση μοντέλου .....	- 32 -
4.1.1.3	Συνοριακές συνθήκες μοντέλου .....	- 34 -
4.1.2	Ορισμός υλικών μοντέλου και ιδιοτήτων τους.....	- 34 -

4.1.3	ΒΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	- 36 -
4.1.3.1	Βήμα 1: Γεωστατική κατάσταση.....	- 36 -
4.1.3.2	Βήμα 2: Αποτόνωση βραχόμαζας εντός της διατομής της σήραγγας .....	- 38 -
4.1.3.3	Βήμα 3: Εκσκαφή σήραγγας και τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης .....	- 38 -
4.1.3.4	Βήμα 4: Κατασκευή τελικής επένδυσης σήραγγας .....	- 39 -
4.1.3.5	Βήμα 5: Απενεργοποίηση μέτρων άμεσης υποστήριξης .....	- 39 -
4.2	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....	- 40 -
<b>5</b>	<b>ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>- 41 -</b>
5.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΙΕΣΕΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.....	- 41 -
5.2	ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΓΕΩΣΤΑΤΙΚΩΝ ΩΘΗΣΕΩΝ (K).....	- 42 -
5.2.1	Σύγκριση μέσω διαγραμμάτων-αποτελεσμάτων Abaqus .....	- 43 -
5.2.2	Σύγκριση μέσω διαγραμμάτων πιέσεων-τάσεων.....	- 47 -
5.3	ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ .....	- 48 -
5.4	ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΑΓΚΥΡΙΩΝ .....	- 52 -
5.4.1	Σύγκριση μέσω διαγραμμάτων-αποτελεσμάτων Abaqus .....	- 52 -
5.4.2	Σύγκριση μέσω διαγραμμάτων πιέσεων-τάσεων.....	- 53 -
<b>6</b>	<b>ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>- 55 -</b>
6.1	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ ΜΕΓΕΘΩΝ.....	- 55 -
6.2	ΦΟΡΤΙΟ ΑΓΚΥΡΙΩΝ.....	- 56 -
6.2.1	Διερεύνηση της ισχύος της προσεγγιστικής μεθόδου εκτίμησης της πίεσης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια $p_b$ .....	- 57 -
6.2.2	Διερεύνηση της συμβολής των αγκυρίων στην ανάληψη της φόρτισης .....	- 61 -
6.3	ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ .....	- 65 -
6.3.1	Διερεύνηση του τρόπου μεταφοράς των φορτίων από την άμεση υποστήριξη στην τελική επένδυση.....	- 66 -
6.3.2	Σύγκριση πιέσεων από αριθμητικές αναλύσεις με πιέσεις από καμπύλες σύγκλισης αποτόνωσης.....	- 70 -
6.3.2.1	Περιγραφή διαγράμματος σύγκλισης-αποτόνωσης.....	- 70 -
6.3.2.2	Συσχέτιση των αποτελεσμάτων από τις καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων.....	- 72 -
6.3.3	Διερεύνηση της εξάρτησης του λόγου $p_{fl}/p_{sh,3}$ από το σημείο τοποθέτησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, για την περίπτωση που δεν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη περιμετρικά της σήραγγας.....	- 76 -
6.4	ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ & ΑΓΚΥΡΙΑ - ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ.....	- 78 -
6.4.1	Διερεύνηση του τρόπου μεταφοράς των φορτίων από την άμεση υποστήριξη στην τελική επένδυση.....	- 80 -
6.5	ΦΟΡΤΙΟ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΕ 2 ΦΑΣΕΙΣ .....	- 83 -
6.5.1	Διερεύνηση της κατανομής της φόρτισης στα αγκύρια βράχου και στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα .....	- 86 -
6.5.2	Σύγκριση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων με δύο φάσεις εκσκαφής και των αριθμητικών αναλύσεων με μία φάση εκσκαφής.....	- 89 -



6.5.3	Διερεύνηση του πεδίου εφαρμογής της προσεγγιστικής μεθόδου της πίεσης των αγκυρίων.....	- 92 -
6.6	ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ & ΑΓΚΥΡΙΑ - ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΓΙΑ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΕ 2 ΦΑΣΕΙΣ.....	- 94 -
6.6.1	Διερεύνηση του τρόπου μεταφοράς των φορτίων από την άμεση υποστήριξη στην τελική επένδυση.....	- 95 -
6.6.2	Σύγκριση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων με δύο φάσεις εκσκαφής και των αριθμητικών αναλύσεων με μία φάση εκσκαφής.....	- 99 -
<b>7</b>	<b>ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>- 103 -</b>
	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>- 107 -</b>



## Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 3.1:	Ενδεικτική διαμόρφωση τελικής διατομής δίδυμης σήραγγας.....	- 9 -
Εικόνα 3.2:	Εκσκαφή σήραγγας σε πολλές φάσεις.....	- 10 -
Εικόνα 3.3:	Μέτρα αντιστήριξης του μετώπου εκσκαφής σήραγγας .....	- 11 -
Εικόνα 3.4:	Τοποθέτηση εκτ. σκυροδέματος μετά την προώθηση του μετώπου εκσκαφής.....	- 12 -
Εικόνα 3.5:	Μεταλλικό πλέγμα σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....	- 13 -
Εικόνα 3.6:	Τοποθέτηση αγκυρίων βράχου .....	- 13 -
Εικόνα 3.7:	Τοποθέτηση γεωφάσματος .....	- 20 -
Εικόνα 3.8:	Στεγανωτική μεμβράνη.....	- 21 -
Εικόνα 3.9:	Τελική επένδυση σήραγγας .....	- 21 -
Εικόνα 3.10:	Καλούπι σκυροδέτησης τελικής επένδυσης .....	- 21 -
Εικόνα 4.1:	Γεωμετρία προβλήματος (παράθεση από το πρόγραμμα MSC Patran).....	- 32 -
Εικόνα 4.2:	Διακριτοποίηση επιφανειακών στοιχείων (παράθεση από το πρόγραμμα Abaqus)....	- 32 -
Εικόνα 4.3:	Διακριτοποίηση γραμμικών στοιχείων (παράθεση από το πρόγραμμα Abaqus) .....	- 33 -
Εικόνα 4.4:	Δυνατές διατάξεις αγκυρίων.....	- 33 -
Εικόνα 4.5:	Ιδιότητες υλικού της βραχώμαζας στο εξωτερικό της σήραγγας.....	- 35 -
Εικόνα 4.6:	Ιδιότητες υλικού εκσκαφής α' και β' φάσης.....	- 35 -
Εικόνα 4.7:	Ιδιότητες υλικού εκτοξευόμενου σκυροδέματος .....	- 35 -
Εικόνα 4.8:	Ιδιότητες υλικού τελικής επένδυσης.....	- 36 -
Εικόνα 4.9:	Ιδιότητες υλικού αγκυρίων βράχου .....	- 36 -
Εικόνα 4.10:	Κατανομή οριζόντιων τάσεων στη γεωστατική κατάσταση.....	- 37 -
Εικόνα 4.11:	1ο Βήμα προσομοίωσης .....	- 37 -
Εικόνα 4.12:	3ο Βήμα προσομοίωσης .....	- 38 -
Εικόνα 4.13:	Κατανομή μετατοπίσεων στο 3ο βήμα προσομοίωσης .....	- 38 -
Εικόνα 4.14:	4ο Βήμα προσομοίωσης .....	- 39 -
Εικόνα 4.15:	5ο Βήμα προσομοίωσης .....	- 39 -
Εικόνα 4.16:	Κατανομή πιέσεων επί της τελικής επένδυσης στο 5ο βήμα προσομοίωσης.....	- 39 -
Εικόνα 5.1:	Παρουσίαση διαγράμματος συσχέτισης πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τάσεων στα αγκύρια .....	- 42 -
Εικόνα 5.2:	Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων $K=0.5, 1.0, 1.5$ ( $\sigma_{ci}=10\text{MPa}$ , $GSI=15$ και $m_i=6$ ).....	- 43 -
Εικόνα 5.3:	Κατανομή συνολικών μετατοπίσεων για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων $K=0.5, 1.0, 1.5$ ( $\sigma_{ci}=10\text{MPa}$ , $GSI=15$ και $m_i=6$ ).....	- 44 -
Εικόνα 5.4:	Κατανομή πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων $K=0.5, 1.0, 1.5$ ( $\sigma_{ci}=10\text{MPa}$ , $GSI=15$ και $m_i=6$ )-	- 45 -
Εικόνα 5.5:	Κατανομή τάσεων στα αγκύρια για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων $K=0.5, 1.0, 1.5$ ( $\sigma_{ci}=10\text{MPa}$ , $GSI=15$ και $m_i=6$ ).....	- 46 -
Εικόνα 5.6:	Κατανομές πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τάσεων στα αγκύρια για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων $K=0.5, 1.0, 1.5$ ( $\sigma_{ci}=10\text{MPa}$ , $GSI=15$ και $m_i=6$ ).....	- 48 -

Εικόνα 5.7:	Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις διαφορετικές ποιότητες βραχώμαζας με $\sigma_{cm}/p_o=0.126, 0.493, 0.869$ .....	- 49 -
Εικόνα 5.8:	Κατανομή συνολικών μετατοπίσεων για τρεις διαφορετικές ποιότητες βραχώμαζας με $\sigma_{cm}/p_o=0.126, 0.493, 0.869$ .....	- 50 -
Εικόνα 5.9:	Κατανομή πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τρεις διαφορετικές ποιότητες βραχώμαζας με $\sigma_{cm}/p_o=0.126, 0.493, 0.869$ .....	- 51 -
Εικόνα 5.10:	Κατανομή τάσεων στα αγκύρια για τρεις διαφορετικές ποιότητες βραχώμαζας με $\sigma_{cm}/p_o=0.126, 0.493, 0.869$ .....	- 52 -
Εικόνα 5.11:	Κατανομή πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για δύο διαφορετικές διατάξεις αγκυρίων (αραιή-πυκνή) μήκους 8m ( $\sigma_{ci}=6\text{MPa}$ , $\text{GSI}=10$ και $m_i=6$ ).....	- 53 -
Εικόνα 5.12:	Κατανομή τάσεων στα αγκύρια για δύο διαφορετικές διατάξεις αγκυρίων (αραιή-πυκνή) μήκους 8m ( $\sigma_{ci}=6\text{MPa}$ , $\text{GSI}=10$ και $m_i=6$ ).....	- 53 -
Εικόνα 5.13:	Κατανομές πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τάσεων στα αγκύρια για δύο διαφορετικές διατάξεις αγκυρίων (αραιή-πυκνή) μήκους 8m ( $\sigma_{ci}=6\text{MPa}$ , $\text{GSI}=10$ και $m_i=6$ ).....	- 54 -
Εικόνα 6.1:	3 <sup>ο</sup> και 4 <sup>ο</sup> Βήμα προσομοίωσης των αριθμητικών αναλύσεων, που σαν άμεση υποστήριξη έχουν εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου και σαν τελική επένδυση έχουν μόνο το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (στο 4 <sup>ο</sup> βήμα).....	- 57 -
Εικόνα 6.2:	3 <sup>ο</sup> , 4 <sup>ο</sup> και 5 <sup>ο</sup> Βήμα προσομοίωσης των αριθμητικών αναλύσεων, που σαν άμεση υποστήριξη έχουν εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, το οποίο απενεργοποιείται και στη θέση του τοποθετείται η τελική επένδυση.....	- 65 -
Εικόνα 6.3:	Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με άμεση υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τοποθέτηση τελικής επένδυσης, μετά την απενεργοποίηση της άμεσης υποστήριξης.....	- 70 -
Εικόνα 6.4:	Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με άμεση υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος $h_{sh}=20\text{cm}$ ) και τοποθέτηση τελικής επένδυσης (πάχος τελικής επένδυσης $h_n=60\text{cm}$ ), μετά την απενεργοποίηση της άμεσης υποστήριξης, για δύο διαφορετικές βραχώμαζες .....	- 72 -
Εικόνα 6.5:	3 <sup>ο</sup> , 4 <sup>ο</sup> και 5 <sup>ο</sup> Βήμα προσομοίωσης των αριθμητικών αναλύσεων, που σαν άμεση υποστήριξη έχουν εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου μήκους 8 μέτρων σε αραιή διάταξη ( $s=2\text{m}$ ), τα οποία απενεργοποιούνται και στη θέση τους τοποθετείται η τελική επένδυση.....	- 79 -
Εικόνα 6.6:	Σύγκριση κατανομών πιέσεων εκτοξευόμενου σκυροδέματος και τελικής επένδυσης για τις περιπτώσεις: (α) $h_{sh}=40\text{cm}$ και $h_n=40\text{cm}$ και (β) $h_{sh}=20\text{cm}$ και $h_n=60\text{cm}$ .....	- 80 -
Εικόνα 6.7:	Ιδιότητες υλικού εκσκαφής α' και β' φάσης, κατά την προσομοίωση της διάνοιξης της σήραγγας.....	- 83 -
Εικόνα 6.8:	3 <sup>ο</sup> , 5 <sup>ο</sup> και 6 <sup>ο</sup> Βήμα προσομοίωσης των αριθμητικών αναλύσεων, των οποίων η διάνοιξη πραγματοποιείται σε δύο φάσεις και σαν άμεση υποστήριξη έχουν εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου και σαν τελική επένδυση έχουν μόνο το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (στο 6 <sup>ο</sup> βήμα) .....	- 84 -
Εικόνα 6.9:	Ενδεικτική κατανομή της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πριν και μετά την απενεργοποίηση των αγκυρίων βράχου.....	- 85 -
Εικόνα 6.10:	3 <sup>ο</sup> , 5 <sup>ο</sup> , 6 <sup>ο</sup> και 7 <sup>ο</sup> Βήμα προσομοίωσης των αριθμητικών αναλύσεων, των οποίων η διάνοιξη πραγματοποιείται σε δύο φάσεις και σαν άμεση υποστήριξη έχουν εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου, τα οποία απενεργοποιούνται και στη θέση τους τοποθετείται η τελική επένδυση .....	- 95 -

## Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 2.1:	Γενικό διάγραμμα ταξινόμησης βραχώμαζας κατά το σύστημα GSI .....	- 4 -
Σχήμα 2.2:	Περιβάλλουσα αστοχίας κριτηρίου Hoek-Brown .....	- 5 -
Σχήμα 2.3:	Περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb .....	- 6 -
Σχήμα 3.1:	Συντελεστής $\lambda$ κατά Chern et al (1998) .....	- 16 -
Σχήμα 3.2:	Τυπικές μορφές καμπυλών Panet κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, για διάφορες τιμές του $N_s$ .....	- 17 -
Σχήμα 3.3:	Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα .....	- 18 -
Σχήμα 3.4:	Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από αγκύρια βράχου .....	- 18 -
Σχήμα 3.5:	Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα .....	- 19 -
Σχήμα 3.6:	Εκτίμηση φορτίων στην τελική επένδυση σήραγγας κατά τη μέθοδο Terzaghi .....	- 27 -
Σχήμα 3.7:	Εκτίμηση φορτίων στην τελική επένδυση σήραγγας κατά τη μέθοδο Protodyakonov .....	- 28 -
Σχήμα 6.1:	Συσχέτιση της θεωρητικής προσέγγισης της πίεσης των αγκυρίων $p_b^{th}$ με την πραγματική $p_b^r$ .....	- 58 -
Σχήμα 6.2:	Συσχέτιση της θεωρητικής προσέγγισης της πίεσης των αγκυρίων $p_b^{th}$ με την πραγματική $p_b^r$ του άνω τμήματος της σήραγγας .....	- 58 -
Σχήμα 6.3:	Ποσοστιαία μεταβολή της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος συναρτήσει της γωνίας της διατομής της σήραγγας .....	- 59 -
Σχήμα 6.4:	Ενδεικτική κατανομή της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πριν και μετά την απενεργοποίηση των αγκυρίων βράχου .....	- 60 -
Σχήμα 6.5:	Μεταβολή του λόγου $p_b^r/p_b^{th}$ συναρτήσει της ανηγμένης, στη μέση γεωστατική πίεση, τελικής πίεσης της διατομής .....	- 61 -
Σχήμα 6.6:	Μεταβολή του λόγου $p_b^r/p_b^{th}$ συναρτήσει της ποιότητας της βραχώμαζας, εκφρασμένης μέσω του δείκτη $\sigma_c/p_{o,m}$ .....	- 62 -
Σχήμα 6.7:	Συσχέτιση της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος $p_{sh,3}$ για την περίπτωση του αραιού καννάβου ( $s=2m$ ) με την αντίστοιχη πίεση $p_{sh,3}$ για την περίπτωση του πυκνού καννάβου ( $s=1m$ ) .....	- 62 -
Σχήμα 6.8:	Μεταβολή του λόγου $p_b^r/p_b^{th}$ συναρτήσει του ποσοστού της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια ( $p_b^r/p_{sh,4}$ ) .....	- 63 -
Σχήμα 6.9:	Μεταβολή του ποσοστού της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια ( $p_b^r/p_{sh,4}$ ) σε συνάρτηση με την ποιότητα της βραχώμαζας ( $\sigma_c/p_{o,m}$ ) .....	- 64 -
Σχήμα 6.10:	Μεταβολή του ποσοστού της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια ( $p_b^r/p_{sh,4}$ ) σε συνάρτηση με την ποιότητα της βραχώμαζας ( $\sigma_c/p_{o,m}$ ), για την περίπτωση του πυκνού καννάβου αγκυρίων, για διάφορες τιμές του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων $K$ . -	- 64 -
Σχήμα 6.11:	Κατανομή της, ανηγμένης στη μέση γεωστατική τάση, πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος συναρτήσει των γεωτεχνικών συνθηκών .....	- 66 -
Σχήμα 6.12:	Συσχέτιση της, ανηγμένης στη μέση γεωστατική τάση, πίεσης που αναλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, $p_{sh,3}$ , με την, ανηγμένη στη μέση γεωστατική τάση, πίεση που αναλαμβάνει η τελική επένδυση, $p_{fl}$ .....	- 67 -
Σχήμα 6.13:	Μεταβολή της διαφοράς της πίεσης που αναλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα από την πίεση από την πίεση που αναλαμβάνει η τελική επένδυση, ανηγμένης στην μέση γεωστατική τάση, ανάλογα με την ποιότητα της βραχώμαζας $\sigma_c/p_{o,m}$ .....	- 68 -

- Σχήμα 6.14: Μεταβολή του λόγου της πίεσης της τελικής επένδυσης προς την πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος,  $p_{\Pi}/p_{sh,3}$ , συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας.. - 69 -
- Σχήμα 6.15: Μεταβολή του λόγου της πίεσης της τελικής επένδυσης προς την πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος,  $p_{\Pi}/p_{sh,3}$ , συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας, για διάφορες τιμές του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων  $K$ ..... - 69 -
- Σχήμα 6.16: Σύγκριση των μεταβολών του λόγου  $p_{\Pi}/p_{sh,3}$  από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων και του ίδιου λόγου από τις αναλυτικές λύσεις, συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας  $\sigma_c/p_{o,m}$ , για τις περιπτώσεις (α) με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $h_{sh}=40cm$  και πάχος τελικής επένδυσης  $h_{\Pi}=40cm$ , και (β) με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $h_{sh}=40cm$  και πάχος τελικής επένδυσης  $h_{\Pi}=40cm$ ..... - 74 -
- Σχήμα 6.17: Σύγκριση των μεταβολών του λόγου  $(p_{\Pi}-p_{sh,3})/p_{o,m}$  από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων και του ίδιου λόγου από τις αναλυτικές λύσεις, συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας  $\sigma_c/p_{o,m}$ , για τις περιπτώσεις (α) με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $h_{sh}=40cm$  και πάχος τελικής επένδυσης  $h_{\Pi}=40cm$ , και (β) με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $h_{sh}=40cm$  και πάχος τελικής επένδυσης  $h_{\Pi}=40cm$  .... - 76 -
- Σχήμα 6.18: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυροδέμα, για βραχόμαζα που δεν αναπτύσσει πλαστική ζώνη παραμορφώσεων γύρω από τη σήραγγα και για δύο σημεία τοποθέτησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (A, A')..... - 77 -
- Σχήμα 6.19: Σύσχετιση της, ανηγμένης στη μέση γεωστατική τάση, πίεσης που αναλαμβάνουν τα μέτρα άμεσης υποστήριξης,  $p_t$ , με την, ανηγμένη στη μέση γεωστατική τάση, πίεση που αναλαμβάνει η τελική επένδυση,  $p_{\Pi}$ , για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ) και πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων..... - 81 -
- Σχήμα 6.20: Μεταβολή της διαφοράς της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνει η άμεση υποστήριξη από την πίεση από την πίεση που αναλαμβάνει η τελική επένδυση, ανηγμένης στην μέση γεωστατική τάση, ανάλογα με την ποιότητα της βραχόμαζας  $\sigma_c/p_{o,m}$ , για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ) και πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων ..... - 81 -
- Σχήμα 6.21: Μεταβολή του λόγου της πίεσης της τελικής επένδυσης προς την πίεση των μέτρων άμεσης υποστήριξης,  $p_{\Pi}/p_t$ , συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας, για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ), πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων και χωρίς αγκύρια βράχου ..... - 82 -
- Σχήμα 6.22: Μεταβολή του ποσοστού της συνολικής πίεσης των μέτρων άμεσης υποστήριξης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια ( $p_b^f/p_t$ ) σε συνάρτηση με την ποιότητα της βραχόμαζας ( $\sigma_c/p_{o,m}$ ), για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ) και πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων- 83 -
- Σχήμα 6.23: Μεταβολή της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όταν αυτό λειτουργεί ως τελική επένδυση, συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας, για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ), πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων ..... - 86 -
- Σχήμα 6.24: Μεταβολή της, ανηγμένης στη μέση γεωστατική τάση, πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όταν αυτό λειτουργεί ως τελική επένδυση, συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας, για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ), πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων, για διάφορες τιμές του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων  $K$  ..... - 87 -
- Σχήμα 6.25: Μεταβολή του ποσοστού της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια ( $p_b^f/p_{sh,4}$ ) σε συνάρτηση με την ποιότητα της βραχόμαζας ( $\sigma_c/p_{o,m}$ ), για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ), πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων ..... - 88 -
- Σχήμα 6.26: Σύσχετιση της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $p_{sh,5}$  για την περίπτωση του αραιού καννάβου ( $s=2m$ ) με την αντίστοιχη πίεση  $p_{sh,5}$  για την περίπτωση του πυκνού καννάβου ( $s=1m$ )..... - 88 -
- Σχήμα 6.27: Σύγκριση ποσοστού φόρτισης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια βράχου για διάνοιξη σήραγγας σε μία και δύο φάσεις, για την περίπτωση του πυκνού καννάβου αγκυρίων ( $s=1m$ )..... - 89 -

- Σχήμα 6.28: Μεταβολή του λόγου της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όταν αυτό λειτουργεί σαν άμεση υποστήριξη, για τη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις, προς την ίδια πίεση για τη διάνοιξη της σήραγγας σε μία φάση, συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας..... - 90 -
- Σχήμα 6.29: Μεταβολή του λόγου της πίεσης των αγκυρίων, για τη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις, προς την ίδια πίεση για τη διάνοιξη της σήραγγας σε μία φάση, συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας..... - 91 -
- Σχήμα 6.30: Μεταβολή του λόγου της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όταν αυτό λειτουργεί σαν τελική επένδυση, για τη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις, προς την ίδια πίεση για τη διάνοιξη της σήραγγας σε μία φάση, συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας..... - 91 -
- Σχήμα 6.31: Μεταβολή του λόγου  $p_b^r/p_b^{th}$  συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας, εκφρασμένης μέσω του δείκτη  $\sigma_c/p_{o,m}$ ..... - 93 -
- Σχήμα 6.32: Μεταβολή του λόγου  $p_b^r/p_b^{th}$  συναρτήσει του ποσοστού της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια ( $p_b^r/p_{sh,6}$ )..... - 94 -
- Σχήμα 6.33: Μεταβολή της διαφοράς της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνει η άμεση υποστήριξη από την πίεση από την πίεση που αναλαμβάνει η τελική επένδυση, ανηγμένης στην μέση γεωστατική τάση, ανάλογα με την ποιότητα της βραχόμαζας  $\sigma_c/p_{o,m}$ , για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ) και πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων ..... - 96 -
- Σχήμα 6.34: Μεταβολή της διαφοράς της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνει η άμεση υποστήριξη από την πίεση από την πίεση που αναλαμβάνει η τελική επένδυση, ανηγμένης στην μέση γεωστατική τάση, ανάλογα με την ποιότητα της βραχόμαζας  $\sigma_c/p_{o,m}$ , για την αραιή διάταξη αγκυρίων ( $s=2m$ ), για διάφορους δείκτες γεωστατικών ωθήσεων  $K$ ..... - 97 -
- Σχήμα 6.35: Μεταβολή του λόγου της πίεσης της τελικής επένδυσης προς την πίεση των μέτρων άμεσης υποστήριξης,  $p_n/p_b$ , συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας, για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ), πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων..... - 97 -
- Σχήμα 6.36: Μεταβολή του λόγου της πίεσης της τελικής επένδυσης προς την πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος,  $p_n/p_{sh,5}$ , συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας, για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ), πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων ..... - 98 -
- Σχήμα 6.37: Μεταβολή των λόγων της πίεσης της τελικής επένδυσης προς τη συνολική πίεση των μέτρων άμεσης υποστήριξης, για διάνοιξη σήραγγας σε μία και δύο φάσεις, συναρτήσει των γεωτεχνικών συνθηκών ..... - 99 -
- Σχήμα 6.38: Μεταβολή του λόγου της πίεσης των μέτρων άμεσης υποστήριξης, για τη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις, προς την ίδια πίεση για τη διάνοιξη της σήραγγας σε μία φάση, συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας..... - 100 -
- Σχήμα 6.39: Μεταβολή του λόγου της πίεσης των μέτρων άμεσης υποστήριξης, για τη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις, προς την ίδια πίεση για τη διάνοιξη της σήραγγας σε μία φάση, συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας, για διάφορους δείκτες γεωστατικών ωθήσεων  $K$ , για την περίπτωση της αραιής διάταξης αγκυρίων ..... - 100 -
- Σχήμα 6.40: Μεταβολή του λόγου της πίεσης της τελικής επένδυσης, για τη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις, προς την ίδια πίεση για τη διάνοιξη της σήραγγας σε μία φάση, συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας..... - 101 -





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι σήραγγες αποτελούν ένα έργο γεωτεχνικής και δομοστατικής φύσεως, το οποίο με την πάροδο των χρόνων και την εξέλιξη της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού συναντάται όλο και περισσότερο σε διάφορους τομείς της καθημερινότητας (οδικές σήραγγες, υπόγεια αστικά μέσα μαζικής μεταφοράς, έργα αποστράγγισης κ.α.). Πριν την κατασκευή μιας σήραγγας απαιτείται η εκπόνηση τεχνικογεωλογικής μελέτης-έρευνας, η οποία προσβλέπει στον, όσο το δυνατό, πιο ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων του γεωυλικού σε όλη την έκταση του έργου, καθώς και της συμπεριφοράς αυτού κατά την εκσκαφή.

Η διαδικασία κατασκευής των σηράγγων αποτελείται συνήθως από δύο κύριες κατασκευαστικές φάσεις. Η πρώτη φάση περιλαμβάνει τη διάνομιξη των σηράγγων και την παράλληλη τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης (π.χ. εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια βράχου, μεταλλικά πλαίσια κτλ.). Η δεύτερη φάση περιλαμβάνει την κατασκευή της τελικής επένδυσης της σήραγγας, που αποτελεί και το πιο κρίσιμο στάδιο της κατασκευής των σηράγγων. Προκειμένου, όμως, να ξεκινήσει η κατασκευή της, πρέπει πρώτα να έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή και η τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης σε όλο το μήκος της σήραγγας και να έχει επέλθει ισορροπία μεταξύ βραχόμαζας και μέτρων άμεσης υποστήριξης. Στη συνέχεια, η τελική επένδυση καλείται να αναλάβει φορτία από την περιβάλλουσα βραχόμαζα, τυχόν αυξημένα λόγω ερπυσμού, φορτία από την άμεση υποστήριξη, φορτία από μελλοντικές κατασκευές και φορτία λόγω σεισμικών δράσεων. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως η τελική επένδυση μπορεί να είναι είτε από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, είτε από έγχυτο σκυρόδεμα (οπλισμένο ή άοπλο). Συνηθέστερα, επιλέγεται η χρήση έγχυτου οπλισμένου σκυροδέματος.

Στη συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα δοθεί έμφαση στον υπολογισμό των φορτίων, που μεταφέρονται στην τελική επένδυση από την απενεργοποίηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης. Όσον αφορά στα συγκεκριμένα φορτία, συνήθως στις μελέτες τελικής επένδυσης, γίνεται η παραδοχή ότι μεταφέρονται εξ' ολοκλήρου από την άμεση υποστήριξη στην τελική επένδυση. Θα εκτιμηθεί, δηλαδή, η ισχύς της παραπάνω παραδοχής και το κατά πόσο αυτή ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Με τη χρήση, λοιπόν, μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων θα προσομοιωθεί, μέσω διδιάστατων αναλύσεων, η αλληλεπίδραση του συστήματος βραχόμαζας-άμεσης υποστήριξης-τελικής επένδυσης, για βραχόμαζες με διαφορετικά κάθε φορά χαρακτηριστικά. Στο σύνολο των αριθμητικών αναλύσεων, αγνοούνται τα φαινόμενα του ερπυσμού και της διόγκωσης και διατηρούνται σταθερά τόσο το ύψος των υπερκειμένων γαιών ( $H=100m=10D$ ), όσο και η διάμετρος της σήραγγας ( $D=10m$ ).

Με την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των διδιάστατων αναλύσεων, θα γίνει παραμετρική διερεύνηση του φορτίου των μέτρων άμεσης υποστήριξης, που παραλαμβάνει η τελική επένδυση. Η διερεύνηση αυτή θα πραγματοποιηθεί για ολομέτωπη εκσκαφή της σήραγγας και για εκσκαφή της σε δύο φάσεις.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

#### 2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Κατά τη διάνοιξη σηράγγων, η συμπεριφορά της βραχώμαζας περιγράφεται λαμβάνοντας υπόψη ορισμένες παραμέτρους, οι οποίες επηρεάζουν την τεχνική συμπεριφορά της. Οι παράμετροι αυτές μπορούν να προσδιοριστούν στο ύπαιθρο και στο εργαστήριο και είναι οι εξής:

- η μηχανική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, που εκφράζεται μέσω της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη ( $\sigma_{ci}$ ) και προκύπτει κατά τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια
- ο δείκτης κερματισμού RQD, ο οποίος αποτελεί μία ποσοτική εκτίμηση του κερματισμού της βραχώμαζας, με βάση τους πυρήνες γεωτρήσεων, και δίνεται από τη σχέση:

$$RQD = \frac{\sum(\text{μήκους τεμαχών μήκους} > 10\text{cm})}{\text{Ολικό μήκος πυρήνα}} \times 100\% \quad (2-1)$$

- ο αριθμός των ασυνεχειών της βραχώμαζας καθώς και η κατάσταση στην οποία βρίσκονται αυτές. Η κατάσταση των ασυνεχειών καθορίζεται από την τραχύτητά και το βαθμό εξαλλοίωσης τους
- το υπόγειο νερό. Εν γένει, η παρουσία υπόγειου νερού σε μια βραχώμαζα προκαλεί μείωση της αντοχής της, γεγονός που οφείλεται στη μείωση των ενεργών τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτή ( $\sigma_v' = \sigma_v - u$ ). Επιπλέον, το υπόγειο νερό διαβρώνει την υφιστάμενη βραχώμαζα, επηρεάζοντας δυσμενώς τις μηχανικές της ιδιότητες, ιδιαίτερα στην περίπτωση που αυτή χαρακτηρίζεται από μη υγιείς ασυνέχειες και σημαντική αποσάθρωση.

#### 2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Την περιγραφή της βραχώμαζας διαδέχεται η ταξινόμησή της, διαδικασία που είναι απαραίτητη για την επιλογή και αξιολόγηση της τυπικής διατομής του έργου. Η διαδικασία της ταξινόμησης αντανάκλα τη συμπεριφορά της βραχώμαζας κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας. Τα πιο διαδεδομένα συστήματα ταξινόμησης βραχώμαζας είναι το σύστημα RMR, το σύστημα Q και το σύστημα GSI.

##### 2.2.1 Σύστημα RMR (Bieniawski)

Το σύστημα RMR προτάθηκε και παρουσιάστηκε στην τελική του μορφή από τον Bieniawski (1989). Η ταξινόμηση, κατά το σύστημα RMR, γίνεται με ένα συντελεστή που προκύπτει ως άθροισμα των τιμών έξι παραμέτρων: της αντοχής άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη ( $\sigma_{ci}$ ), του δείκτη κερματισμού της βραχώμαζας RQD, της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών, της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών, της παρουσίας υπόγειου νερού και του προσανατολισμού των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου.

Το βασικό μειονέκτημα του συστήματος ταξινόμησης RMR είναι η μη ικανοποιητική διακρίτοποίηση τιμών για βραχώμαζες πτωχής ποιότητας ( $RMR < 40$ ).

### 2.2.2 Σύστημα Q (NGI)

Το σύστημα ταξινόμησης Q αναπτύχθηκε στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI) από τους Barton et al. (1974). Σκοπός του είναι ο εμπειρικός σχεδιασμός των μέτρων άμεσης υποστήριξης σηράγγων. Ο δείκτης Q δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) \left( \frac{J_r}{J_a} \right) \left( \frac{J_w}{SRF} \right) \quad (2-2)$$

- όπου: ο λόγος (RQD/J<sub>n</sub>) εκφράζει το μέσο μέγεθος των τεμαχίων της βραχώμαζας
- ο λόγος (J<sub>r</sub>/J<sub>a</sub>) εκφράζει την κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών
- ο λόγος (J<sub>w</sub>/SRF) εκφράζει τις τάσεις που επικρατούν στη βραχώμαζα

### 2.2.3 Σύστημα GSI

Το σύστημα GSI αναπτύχθηκε αρχικά από τον Hoek (1994) και παρουσιάστηκε στην τελική του μορφή από τους Marinos & Hoek (2000). Σχεδιάστηκε ώστε να είναι εν γένει συμβατό με το σύστημα RMR. Η ταξινόμηση κατά το σύστημα GSI βασίζεται στη συναξιολόγηση δύο παραμέτρων, της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών και της δομής της βραχώμαζας.

Το κυριότερο πλεονέκτημα του συστήματος GSI είναι το γεγονός ότι παρέχει καλύτερη διακριτοποίηση, έναντι του συστήματος RMR, για βραχώμαζες πτωχής ποιότητας. Επίσης, είναι μία αρκετά "φιλική" μέθοδος για το Μηχανικό, αφού η διαδικασία ταξινόμησης κατά GSI βασίζεται σε έναν απλό εικονογραφημένο πίνακα, ο οποίος παρουσιάζεται στη συνέχεια. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το σύστημα GSI λαμβάνει υπόψη τη φύση του γεωυλικού και τη "γεωλογική λογική" του.

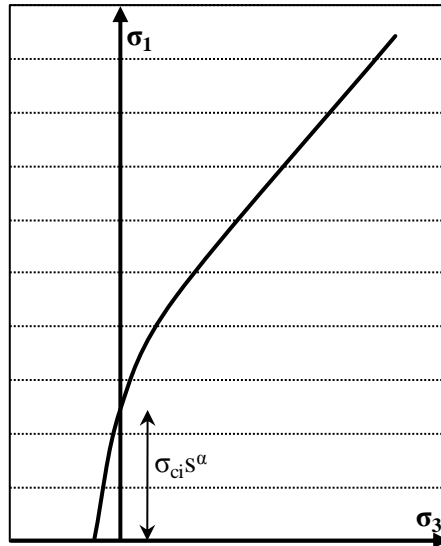
ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) (E. Hoek, P. Marinos, 2000)		ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ			
Βασίζονται στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών της βραχώμαζας εκτιμάτε τη μέση τιμή του GSI από τις κομπιές. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι 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 γεωτονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστόβεις που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι αστόβεις επιφάνειες (όπως διατηρημένα επίπεδα στρώσης) έχουν διαμετρική προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η αντίθετη οριζώντων βραχώμαζων μενώνεται από την παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μετρικής πτώσης 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.		ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΠΤΩΧΗ
		Πολύ pocas, υγιείς, μη αποσπασθαιμένες επιφάνειες	Ποσές, ελαφρά αποσπασθαιμένες, και σφαιροειδείς επιφάνειες	Μερικές αποσπασθαιμένες, και εφελκυσθαιμένες επιφάνειες	Πολύ λίγες, κατά περίπτωση οσπασθαιμένες με συμμαγή επιφάνειοματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα
ΔΟΜΗ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	ΜΕΙΟΜΕΝΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →			
<b>ΑΡΡΗΚΤΗ</b> Αρρακτά βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	90				N/A
<b>ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ/ ΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ</b> Αδιατάρακτη βραχώμαζα με πολύ καλά αλληλοκλειδωμένα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οριζόντιες ασυνέχειες	80				
<b>ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ</b> Μερκώς διαταρασμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οριζόντιες ασυνέχειες	70				
<b>ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ/ΠΤΥΩΜΕΝΗ</b> Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οριζόντιες ασυνέχειες. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας	60				
<b>ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ</b> Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλειδωμένο και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιώδων και αποστραγγυλωμένων τεμαχίων	50				
<b>ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ ΔΙΑΤΗΜΜΕΝΗ</b> Φυλλώδης ή σχιστοειδής και τεκτονικός διατημένη ασθενής βραχώμαζα. Η φυλλώση επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οριζόντιας ασυνεχειών εμπόδιζοντας την δημιουργία γωνιώδων τεμαχίων (ή κλίμακα σε αυτό το κλίμακα δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονιών)	40				
	30				
	20				
	10				
	N/A	N/A			

Σχήμα 2.1: Γενικό διάγραμμα ταξινόμησης βραχώμαζας κατά το σύστημα GSI

## 2.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

### 2.3.1 Κριτήριο αστοχίας Hoek - Brown

Το κριτήριο Hoek-Brown πήρε την τελική του μορφή από τους Hoek et al. (2002). Είναι ένα εμπειρικό κριτήριο αστοχίας που χρησιμοποιείται στη Βραχομηχανική για να προβλέψει την αστοχία της βραχώμαζας. Ως γνωστόν, οι βραχώμαζες, που συναντώνται στη φύση, είναι κατά κύριο λόγο ρηγματωμένες, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το κριτήριο Hoek-Brown προσομοιώνει καλύτερα την αστοχία τους, αφού έχει καμπύλη περιβάλλουσα αστοχίας.



Σχήμα 2.2: Περιβάλλουσα αστοχίας κριτηρίου Hoek-Brown

Οι εξισώσεις του γενικευμένου κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown είναι:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2-3)$$

$$m_b = m_i \exp \left( \frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (2-4)$$

$$s = \exp \left( \frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (2-5)$$

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

όπου:

$\sigma_{ci}$  και  $GSI$  έχουν περιγραφεί προηγουμένως,

$\sigma_1$ : μέγιστη κύρια τάση στην αστοχία,

$\sigma_3$ : ελάχιστη κύρια τάση στην αστοχία,

$m_i$ : σταθερά του υλικού για τον άρρηκτο βράχο,

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

$m_b$ ,  $a$  και  $s$ : σταθερές που εκφράζουν το βαθμό κερματισμού και αποσάθρωσης της βραχώμαζας.

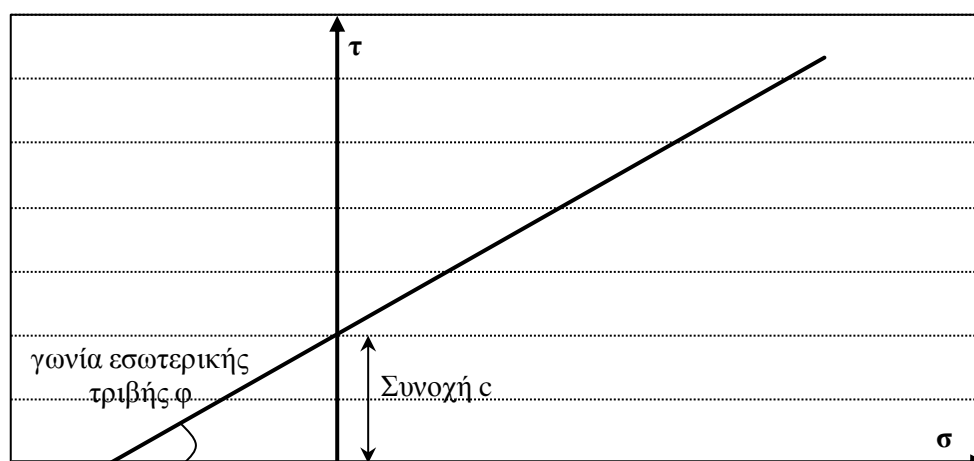
### 2.3.2 Κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb

Η περιβάλλουσα αστοχίας του κριτηρίου Mohr-Coulomb (Coulomb, 1776) είναι μια ευθεία γραμμή, γεγονός που το καθιστά το απλούστερο εκ των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της αστοχίας των γεωυλικών, και το πλέον διαδεδομένο κριτήριο για τη μελέτη γεωτεχνικών προβλημάτων (χρησιμοποιείται στα περισσότερα προγράμματα αναλύσεων γεωτεχνικής μηχανικής). Οι παράμετροι που χρησιμοποιεί είναι η συνοχή ( $c$ ) και η γωνία εσωτερικής τριβής ( $\varphi$ ). Ορίζεται στο επίπεδο ορθών-διατμητικών τάσεων ( $\sigma$ - $\tau$ ) από τη σχέση:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (2-7)$$

και στο επίπεδο των κυρίων τάσεων ( $\sigma_3$ - $\sigma_1$ ) από τη σχέση:

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \tan \varphi = \sigma_3 \tan^2 \left( 45 + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \tan \left( 45 + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2-8)$$



Σχήμα 2.3: Περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb

Δεδομένου λοιπόν ότι τα περισσότερα γεωτεχνικά λογισμικά κάνουν χρήση του κριτηρίου Mohr-Coulomb για τη μελέτη γεωτεχνικών προβλημάτων σε βραχώμαζες, παρουσιάστηκε η ανάγκη μετατροπής των παραμέτρων της βραχώμαζας του κριτηρίου Hoek-Brown σε ισοδύναμα μεγέθη συνοχής και γωνιάς εσωτερικής τριβής. Η μεθοδολογία για το συσχετισμό των δύο κριτηρίων έχει προταθεί από τους Hoek et al. (2002) και είναι η εξής:

Ορίζεται μια ορθή τάση  $\sigma_{3,max}$ , στη συνέχεια το διάστημα  $\sigma=0$  έως  $\sigma_{3,max}$  χωρίζεται σε οχτώ ίσα τμήματα και οι ισοδύναμες παράμετροι  $c$  και  $\varphi$  προκύπτουν με τη μέθοδο γραμμικής παλινδρόμησης για τα σημεία αυτά. Η τάση  $\sigma_{3,max}$  για προβλήματα σφαιρικών υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση:

$$\varphi = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}} \right] \quad (2-9)$$

$$c = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma_{3n}] (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \quad (2-10)$$

$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3,\max}}{\sigma_{ci}} \quad (2-11)$$

$$\frac{\sigma_{3,\max}}{\sigma_{cm}} = 0.47 \left( \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94} \quad (2-12)$$

### 2.3.3 Κριτήριο αστοχίας Drucker - Prager

Το κριτήριο αστοχίας Drucker-Prager προτάθηκε το 1952 και αποτελεί προέκταση του κριτηρίου Von Mises. Χρησιμοποιείται για να περιγράψει υλικά τα οποία συμπεριφέρονται ελαστικά μέχρι την τάση αστοχίας, ενώ για τάσεις μεγαλύτερες από αυτήν τα υλικά παραμορφώνονται πλαστικά. Ως παράμετροι αντοχής για τις αναλύσεις λαμβάνονται η γωνία τριβής  $\beta$  και η συνοχή  $d$ . Για να μπορεί να υπάρξει εποπτεία των αναλύσεων κρίνεται σκόπιμο οι παράμετροι αυτές να συσχετιστούν με ένα διαδεδομένο κριτήριο αστοχίας. Το κριτήριο Drucker-Prager είναι παρόμοιο του κριτηρίου Mohr-Coulomb με τη διαφορά ότι χαρακτηρίζεται από πιο ομαλές επιφάνειες διαρροής.

Στην περίπτωση διδιάστατων αναλύσεων και με την προϋπόθεση ότι ισχύουν οι συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, το κριτήριο Drucker-Prager μπορεί να συσχετιστεί με το κριτήριο Mohr-Coulomb (επομένως και με το κριτήριο Hoek-Brown) μέσω των σχέσεων:

$$\tan \beta = \sqrt{3} \sin \varphi \quad (2-13)$$

$$\frac{d}{c} = \sqrt{3} \cos \varphi \quad (2-14)$$





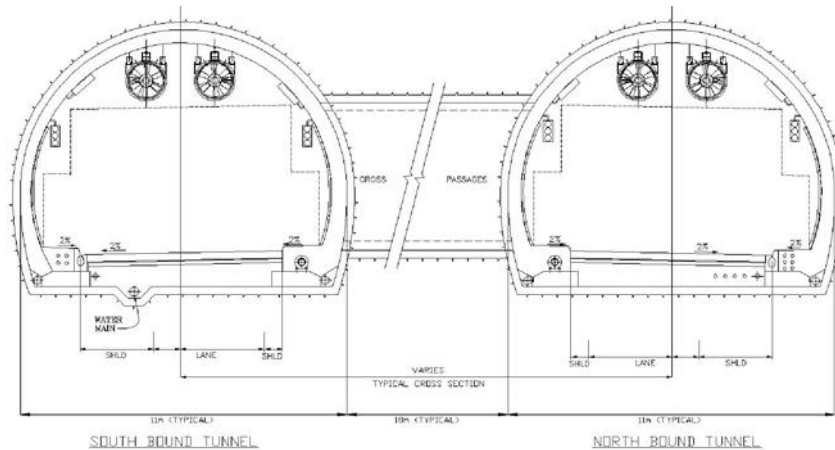
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΙΗΡΑΓΓΩΝ

Η διάνοιξη σιδηρόδρομων πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση περιλαμβάνει την εκσκαφή και την άμεση υποστήριξη των σιδηρόδρομων. Τα δύο αυτά στάδια εναλλάσσονται συνεχώς μεταξύ τους, καθώς η εκσκαφή πραγματοποιείται σε βήματα της τάξεως των 1-2 μέτρων και αφού ολοκληρωθεί η εκσκαφή του βήματος τοποθετούνται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης. Η εναλλαγή αυτή λαμβάνει χώρα έως ότου ολοκληρωθεί η πρώτη φάση σε όλο το μήκος της σιδηράγγας. Η δεύτερη φάση είναι η κατασκευή της τελικής επένδυσης.

Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι υπάρχει το ενδεχόμενο η διατομή της σιδηράγγας να παραμείνει ανυποστήρικτη έως ότου τοποθετηθούν τα μέτρα άμεσης υποστήριξης (συμβαίνει σε βραχώμαζες εξαιρετικής ποιότητας) ή να σχεδιαστεί η άμεση υποστήριξη ώστε να αναλάβει το σύνολο των φορτίων της περιβάλλουσας βραχώμαζας και επομένως να μην κατασκευαστεί η τελική επένδυση.

Ο στόχος της πρώτης φάσης διάνοιξης είναι διπλός και περιλαμβάνει την προσωρινή ευστάθεια της διατομής, με την οποία εξασφαλίζεται η ασφάλεια του προσωπικού και των μηχανημάτων κατά τη διάρκεια των εργασιών, και τον περιορισμό των παραμορφώσεων, που επιτυγχάνεται με την ελεγχόμενη αποτόνωση της βραχώμαζας. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η κατάρρευση της οροφής και η αποσφίνωση βραχώδων τεμαχίων και περιορίζεται και ελέγχεται αποτελεσματικά η σύγκλιση του τοιχώματος της σιδηράγγας.



**Εικόνα 3.1:** Ενδεικτική διαμόρφωση τελικής διατομής δίδυμης σιδηράγγας

Η ελεγχόμενη σύγκλιση του τοιχώματος, με τη σειρά της, αποσκοπεί στην ενεργοποίηση της αντοχής της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Κατ' αυτόν τον τρόπο μειώνονται αισθητά οι πιέσεις της άμεσης υποστήριξης αλλά όχι τόσο ώστε να προκληθεί αποδιοργάνωση της βραχώμαζας, που θα οδηγήσει σε κατάρρευση της διατομής της σιδηράγγας. Γι' αυτό το λόγο προσομοιώνεται η σύγκλιση της βραχώμαζας είτε μέσω του συντελεστή αποτόνωσης  $\lambda$  (καμπύλες Panet), είτε μέσω μιας ισοδύναμης απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας, είτε μέσω της βαθμιαίας ενεργοποίησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

Η κατασκευή της τελικής επένδυσης έπεται της άμεσης υποστήριξης της σιδηράγγας. Ξεκινάει, δηλαδή, αφού έχει ολοκληρωθεί η πρώτη φάση διάνοιξης και οι ρυθμοί εξέλιξης των μετακινήσεων και των εντάσεων έχουν μηδενισθεί. Δηλαδή, η τελική επένδυση κατασκευάζεται εσωτερικά ενός συστήματος που ισορροπεί και καλείται να λειτουργήσει μακροχρόνια εξασφαλίζοντας τις απαιτήσεις επιτελεστικότητας.

### 3.1 ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Η εκσκαφή μιας σήραγγας γίνεται με μηχανικά μέσα και ολοκληρώνεται σε μία ή περισσότερες φάσεις. Με την εκσκαφή της διατομής σε περισσότερες φάσεις μειώνεται η συνολική σύγκλιση του τοιχώματος (σε σχέση με την εκσκαφή σε μία φάση) και επιπλέον βελτιώνεται η ευστάθεια της διατομής. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος διάνοιξης σηράγγων είναι η μέθοδος NATM, η οποία περιγράφεται, ακολούθως, συνοπτικά:

Η μέθοδος NATM (New Austrian Tunneling Method) αποτελείται από ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων. Με τη μέθοδο NATM πραγματοποιείται η διάνοιξη σηράγγων με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής (δηλαδή χωρίς την εφαρμογή πίεσης με μηχανικά μέσα) και υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή/και αγκύρια βράχου. Η κατασκευή της προσωρινής υποστήριξης πραγματοποιείται σε μικρή απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής, πράγμα που επιτυγχάνεται με την προώθηση της κάθε φάσης εκσκαφής σε μικρά βήματα.



Εικόνα 3.2: Εκσκαφή σήραγγας σε πολλές φάσεις

Εναλλακτικές μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων είναι:

- Διάνοιξη με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (TBM)
- Διάνοιξη με μηχανήματα σημειακής κοπής με ανοιχτή ασπίδα (Open Face Shield)
- Διάνοιξη με μηχανήματα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance)
- Διάνοιξη με τη μέθοδο ανοιχτού ορύγματος (Cut and Cover)

Ένα από τα χαρακτηριστικά που διακρίνουν τη μέθοδο NATM και την κάνουν να υπερτερεί έναντι των άλλων μεθόδων που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι η δυνατότητά της να προσαρμόζεται σε μεταβολές της γεωμετρίας της διατομής καθώς επίσης και σε μεταβολές των γεωτεχνικών συνθηκών, κατά μήκος της εκσκαφής. Επιπλέον, περιλαμβάνει μηχανικό εξοπλισμό σχετικά χαμηλού κόστους και επιτρέπει την ευκολότερη στεγάνωση της σήραγγας με συνθετική μεμβράνη, που τοποθετείται μεταξύ της προσωρινής υποστήριξης και της τελικής επένδυσης. Τέλος αξίζει να αναφερθεί πως η μέθοδος NATM παρέχει τη δυνατότητα διάνοιξης μη-κυκλικών διατομών, διαδικασία που μόνο εύκολη δεν μπορεί να χαρακτηριστεί για τις άλλες μεθόδους εκσκαφής.

### 3.2 ΜΕΤΡΑ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

Από λειτουργικής άποψης, η άμεση υποστήριξη έχει τρεις βασικές επιδιώξεις:

- την αποτροπή των μετακινήσεων κοντά στο μέτωπο διάνοιξης
- την προστασία του προσωπικού και των μηχανημάτων, κατά τη διάρκεια των εργασιών διάνοιξης, και
- την ακριβή περιγραφή της θέσης τοποθέτησης της τελικής επένδυσης της σήραγγας.

Ενώ από καθαρά γεωτεχνικής άποψης, σκοπός των μέτρων άμεσης υποστήριξης είναι:

- ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας
- η αποφυγή κατάρρευσης της οροφής, και
- η αποφυγή αποσφηνώσεων βραχωδών τεμαχίων.

Τα κυριότερα μέτρα άμεσης υποστήριξης είναι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, τα αγκύρια βράχου, το μεταλλικό πλέγμα και οι μεταλλικές ίνες οπλισμού (σε συνδυασμό με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα), τα μεταλλικά πλαίσια, το ανάστροφο τόξο (μόνιμο ή προσωρινό), η βελτίωση των συνθηκών έδρασης του κελύφους και η ολισθαίνουσα υποστήριξη. Στα μέτρα άμεσης υποστήριξης λογίζονται και τα μέτρα προστασίας και αντιστήριξης του μετώπου εκσκαφής (Εικόνα 3.3), τα κυριότερα εκ των οποίων είναι τα ελαφρά βλήτρα προπορείας, η ομπρέλα βαριών δοκών προπορείας και τα αγκύρια μετώπου.



**Εικόνα 3.3: Μέτρα αντιστήριξης του μετώπου εκσκαφής σήραγγας**

Ακολούθως, θα αναπτυχθούν εκτενώς τα πλέον διαδεδομένα και σημαντικά εξ'αυτών, δηλαδή τα αγκύρια βράχου και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, οπλισμένο είτε με μεταλλικό πλέγμα είτε με ίνες οπλισμού.

#### 3.2.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρασκευάζεται από τσιμέντο, νερό, αδρανή και παιπάλη πυριτίου, είτε ως ξηρό είτε ως υγρό μίγμα. Σημαντικά χαρακτηριστικά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι το γεγονός ότι βρίσκεται σε απόλυτη επαφή με την περιβάλλουσα βραχώμαζα και ο μικρός χρόνος που χρειάζεται για να πήξει.

Η παιπάλη πυριτίου (λεπτόκοκκη ποζουλάνη) αποτελεί ένα εξαιρετικά ωφέλιμο συστατικό για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αφού προσδίδει σ' αυτό κάποια ιδιαίτερα χρήσιμα, για το μηχανικό,

στοιχεία. Κυριότερο όλων είναι η αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος και η ταυτόχρονη μείωση της διαπερατότητάς του. Ανάλογης σημασίας στοιχεία όμως, ιδιαίτερα στα γεωτεχνικής φύσεως έργα, είναι η μείωση της αναπήδησης κατά την εκτόξευση-τοποθέτησή του και η βελτίωση της πρόσφυσης του σκυροδέματος στη βραχώμαζα.



**Εικόνα 3.4: Τοποθέτηση εκτ. σκυροδέματος μετά την προώθηση του μετώπου εκσκαφής**

Αρχικά, κατά την τοποθέτησή του, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι αφόρτιστο. Όσο προχωράει το μέτωπο εκσκαφής, η διατομή τείνει να συγκλίνει, αλλά αντιστέκεται ο δακτύλιος σκυροδέματος, αναλαμβάνοντας τα νέα φορτία. Εκτός από τον έλεγχο-περιορισμό των συγκλίσεων, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προστατεύει τους εργαζόμενους και τα μηχανήματα και αποτρέπει την πτώση τεμαχών βράχου.

Σε συνδυασμό με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε μεταλλικά πλέγματα οπλισμού είτε μεταλλικές ίνες οπλισμού. Αυτά τα μέτρα έχουν σα στόχο την αύξηση της πλαστιμότητας και της εφελκυστικής αντοχής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η επιλογή ανάμεσα σε πλέγμα και ίνες γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου.

Το βασικότερο μειονέκτημα του μεταλλικού πλέγματος είναι το φαινόμενο αναπήδησης του σκυροδέματος, που σαν αποτέλεσμα έχει τη δημιουργία κενών πίσω από το πλέγμα και επομένως την τοπική μείωση της φέρουσας ικανότητας του φορέα της προσωρινής υποστήριξης.

Σε αντίθεση με το μεταλλικό πλέγμα, οι μεταλλικές ίνες οπλισμού μειώνουν την αναπήδηση του σκυροδέματος κατά την εκτόξευση. Πέρα απ' αυτό, παρέχουν καλύτερη κατανομή της εφελκυστικής αντοχής στο σκυρόδεμα, αρκεί να έχει προηγηθεί κατάλληλη ανάμιξη τους, έτσι ώστε να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στον όγκο του σκυροδέματος. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως το ινοπλισμένο σκυρόδεμα δεν υπόκειται σε ηλεκτρολυτική διάβρωση, μιας και οι ίνες δεν είναι συνεχείς, σε αντίθεση πάλι με το μεταλλικό πλέγμα.

Σε γενικές γραμμές, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι μια ταχύτερη και κατασκευαστικά ευκολότερη λύση, συγκριτικά με την όπλιση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με μεταλλικό πλέγμα. Όμως, είναι σαφής η προτίμηση του μηχανικού στο πλέγμα οπλισμού με πυκνό, μάλιστα, κάνναβο, όταν πρόκειται για κατακερματισμένη έως αποδομημένη βραχώμαζα. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται άμεσα η αποκόλληση και η πτώση ασταθών τεμαχών βράχου από το θόλο και τις παρειές εκσκαφής.



**Εικόνα 3.5:** Μεταλλικό πλέγμα σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

### 3.2.2 Αγκύρια βράχου

Υπάρχουν δύο κατηγορίες αγκυρίων βράχου:

- τα προεντεταμένα αγκύρια, που αποτελούνται από χαλύβδινους τένοντες και βασίζονται στην ενεργητική φόρτιση (προένταση)
- τα παθητικά αγκύρια, η φόρτιση των οποίων εξαρτάται από την παραμόρφωση της βραχώμαζας. Τα παθητικά αγκύρια, με τη σειρά τους, διαχωρίζονται σε αγκύρια συνεχούς πρόσφυσης (ηλώσεις βράχου, ηλώσεις χωρίς ενεμάτωση - τύπου Swellex) και σε αγκύρια πρόσφυσης άκρου (τύπου διαστελλόμενης κεφαλής)



**Εικόνα 3.6:** Τοποθέτηση αγκυρίων βράχου

Η χρήση αγκυρίων βράχου οπλίζει την περιβάλλουσα βραχώμαζα και συντελεί στην καλύτερη ανάπτυξη της λειτουργίας τόξου σ' αυτή. Το μήκος των αγκυρίων και ο κάρναβος τοποθέτησής τους καθορίζονται από την απόσταση και την εμμονή των ασυνεχειών και επίσης η απαιτούμενη αντοχή

των αγκυρίων καθορίζεται, με τη σειρά της, από τα διατμητικά χαρακτηριστικά και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Το στέλεχος των αγκυρίων μπορεί να είναι μορφής ράβδου ή εύκαμπτου καλωδίου και το υλικό αυτών είναι, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, ο χάλυβας.

Σε σχηματισμούς ελαφρά έως μέτρια κερματισμένων ψαθυρών βράχων, επιβάλλεται η ανάληψη των φορτίων να είναι άμεση, γιατί η αστοχία μπορεί να προκύψει ανά πάσα στιγμή, χωρίς καμία απολύτως προειδοποίηση. Σε αυτή την περίπτωση, προτιμάται η χρήση αγκυρίων τύπου Swellex. Βασικό πλεονέκτημα αυτών των αγκυρίων είναι η ικανότητά τους να αναλαμβάνουν άμεσα τα φορτία, αφού δεν απαιτείται η πήξη του ενέματος, προκειμένου να επιτευχθεί η πρόσφυση με την περιβάλλουσα βραχόμαζα.

Ο ρόλος των αγκυρίων γίνεται πιο σύνθετος στην περίπτωση που ο κυριότερος μηχανισμός αστοχίας είναι η δημιουργία πλαστικής ζώνης γύρω από τη σήραγγα, λόγω διατμητικής αστοχίας της βραχόμαζας. Σε αυτή την περίπτωση, η αγκύρωση του άκρου του αγκυρίου σε θέση πέραν της ζώνης πλαστικοποίησης της βραχόμαζας μετατρέπεται σε βασική επιδίωξη, προκειμένου τα αγκύρια να είναι σε θέση να συνεισφέρουν στον περιορισμό των συγκλίσεων.

Στη ζώνη διατμητικών αστοχιών, τα αγκύρια βράχου έχουν την ικανότητα να βελτιώνουν τη συμπεριφορά της βραχόμαζας, αρχικά, βελτιώνοντας, με την εισχώρηση του ενέματος στα κενά του γεωυλικού, τις ιδιότητες της βραχόμαζας και, εν συνεχεία, αυξάνοντας τη διατμητική αντοχή της βραχόμαζας και μειώνοντας παράλληλα την παραμορφωσιμότητά της λόγω εγκιβωτισμού (λειτουργία ανάλογη με αυτή του σπειροειδούς οπλισμού στα υποστυλώματα). Αυτό συμβαίνει μέσω της ορθής τάσης που επιβάλλεται στη βραχόμαζα, που βρίσκεται μεταξύ του άκρου και της κορυφής των αγκυρίων.

Η συμμετοχή των αγκυρίων κρίνεται αμφίβολη στην περίπτωση που η βραχόμαζα είναι έντονα κερματισμένη έως αποδιοργανωμένη, αποτελούμενη από ψαθυρά υλικά μεγάλης αντοχής. Η ίδια αμφιβολία υπάρχει και στην περίπτωση που, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, συναντώνται άστρωτοι σχηματισμοί μεγάλης αντοχής, που δεν παρουσιάζουν κάποια κανονικότητα στην κατανομή και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών τους.

### 3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΚΑΙ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Για την προσομοίωση της εκσκαφής της σήραγγας πραγματοποιούνται αριθμητικές αναλύσεις διδιάστατων μοντέλων, στο επίπεδο διατομής της σήραγγας. Οι κύριοι στόχοι των αναλύσεων αυτών είναι:

- να ελέγξουν ότι οι συγκλίσεις των τοιχωμάτων της σήραγγας και της περιβάλλουσας βραχόμαζας είναι εντός των αποδεκτών ορίων
- να προσδιορίσουν τη διαδικασία εκσκαφής και το σύστημα άμεσης υποστήριξης, τα οποία θα συνδυάζουν την απαραίτητη ασφάλεια με το ελάχιστο δυνατό κόστος
- να ελέγξουν την ευστάθεια της διατομής της σήραγγας σε κάθε φάση εκσκαφής και τη δυνατότητα των μέτρων άμεσης υποστήριξης να αναλάβουν με ασφάλεια τα φορτία της βραχόμαζας

Οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι διδιάστατης ανάλυσης είναι η μέθοδος Rabcewicz, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων και η απλοποιημένη ελαστοπλαστική ανάλυση. Και στις τρεις αυτές μεθόδους, για να προσομοιωθεί η αποτόνωση της βραχόμαζας, χρησιμοποιείται μία από τις εξής μεθόδους: απομείωση εσωτερικής πίεσης  $p$ , απομείωση του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας εντός της διατομής της σήραγγας, επιβολή σύγκλισης  $u$  περιμετρικά της σήραγγας.

Προκειμένου να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα των διδιάστατων αυτών αναλύσεων, θα πρέπει να προσομοιωθεί, με ιδιαίτερη ακρίβεια, η πλήρης ακολουθία των φάσεων εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης. Απαιτείται, δηλαδή, η ακριβής προσομοίωση της σύγκλισης που έχει πραγματοποιηθεί στη βραχόμαζα, πριν την τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης και της βαθμιαίας ενεργοποίησης των μέτρων αυτής. Στη διαδικασία αυτή χρειάζονται δύο πρόσθετες παράμετροι: ο συντελεστής υπερφόρτισης  $N_s$ , που ορίζεται από την εξίσωση:

$$N_s = \frac{2p_0}{\sigma_{cm}} \quad (3-1)$$

και ο συντελεστής αποτόνωσης  $\lambda$ , που ορίζεται ως ο βαθμός που έχει αποτονωθεί η περιβάλλουσα βραχώμαζα, όταν τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη. Δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = 1 - \frac{P}{p_0} \quad (3-2)$$

Αξίζει να σημειωθεί πως ενδεχόμενη αύξηση της αρχικής γεωστατικής τάσης ( $p_0$ ) σε σχέση με την αντοχή της βραχώμαζας ( $\sigma_{cm}$ ) οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή υπερφόρτισης ( $N_s$ ), με άμεσο αποτέλεσμα τη διεύρυνση της πλαστικής ζώνης γύρω από τη σήραγγα. Με αυτό τον τρόπο, τελικά, αυξάνουν οι συγκλίσεις της σήραγγας.

### 3.3.1 Μέθοδοι προσδιορισμού συντελεστή αποτόνωσης $\lambda$ κατά μήκος του άξονα της σήραγγας

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή  $\lambda$  κατά μήκος της εκσκαφής χρησιμοποιείται η μέθοδος Chern και η μέθοδος Panet. Η πρώτη μέθοδος έχει ευρύτερο φάσμα εφαρμογής, καθώς ισχύει τόσο πίσω όσο και εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής, σε αντίθεση με τη μέθοδο Panet, που ισχύει μόνο εντός της σήραγγας, δηλαδή για  $x < 0$ . Με τη βοήθεια των δύο αυτών μεθόδων, εκτιμάται η σύγκλιση του τοιχώματος που έχει πραγματοποιηθεί, πριν από την εφαρμογή της προσωρινής υποστήριξης, και συντελεί στην αποτόνωση της βραχώμαζας και τη μείωση των πιέσεων που θα ασκηθούν επί των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

#### 3.3.1.1 Μέθοδος Chern et al (1998)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μέθοδος Chern έχει γενική ισχύ για κάθε τιμή του  $x$ , τόσο εντός της σήραγγας ( $x < 0$ ) όσο και εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής ( $x > 0$ ).

Βάσει των αξονοσυμμετρικών αναλύσεων από τον Chern προκύπτει:

$$\frac{u_R(x)}{u_{R\infty}} = \left[ 1 + \exp\left(0.91 \frac{x}{R}\right) \right]^{-1.7} \quad (3-3)$$

→ Α' περίπτωση: Δεν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη

Ισχύει:

$$\frac{u_R}{u_{R\infty}} = \lambda \Rightarrow \lambda = \left[ 1 + \exp\left(0.91 \frac{x}{R}\right) \right]^{-1.7} \quad (3-4)$$

→ Β' περίπτωση: Αναπτύσσεται πλαστική ζώνη

για  $\varphi \neq 0$ :

$$\frac{u_R}{u_{R\infty}} = \left\{ \frac{2}{(k-1) \left[ (1-\lambda)N_s + \frac{2}{k-1} \right]} \right\}^{\frac{(K+1)}{k-1}} \Rightarrow \lambda = 1 - \frac{2}{(k-1)N_s} \left[ \left( \frac{u_R}{u_{R\infty}} \right)^{-\frac{(k-1)}{K+1}} - 1 \right] \quad (3-5)$$

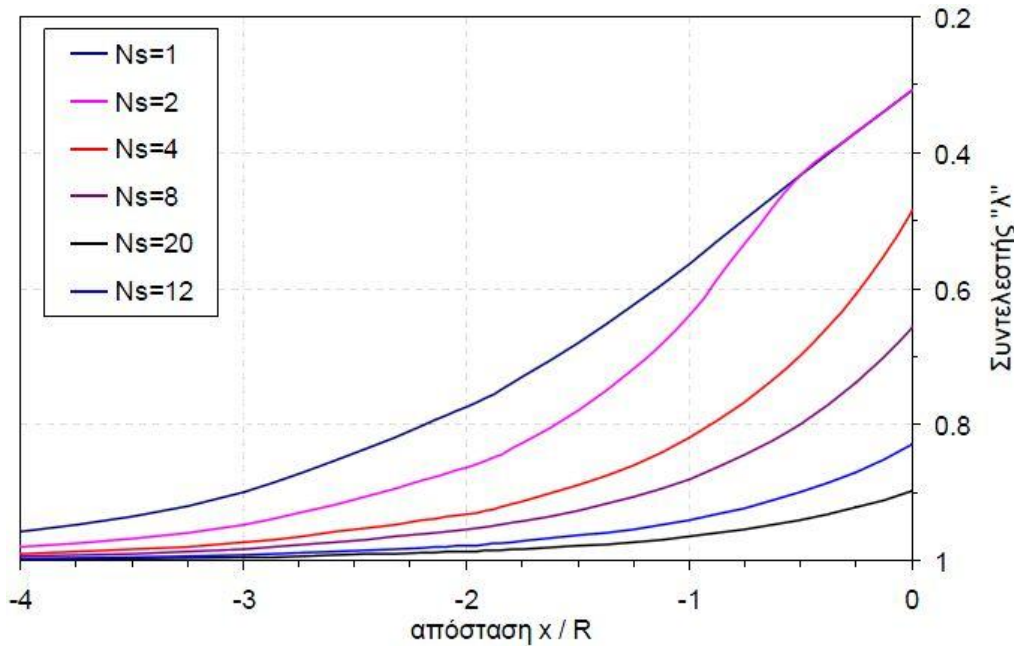
για  $\varphi=0$ :

$$\frac{u_R}{u_{R\infty}} = \exp \left[ -\frac{1}{2}(1-\lambda)N_s(K+1) \right] \Rightarrow \lambda = 1 - \frac{2}{(K+1)N_s} \left[ -\ln \left( \frac{u_R}{u_{R\infty}} \right) \right] \quad (3-6)$$

όπου:

$$k = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad \text{και} \quad K = \frac{1 + \tan \delta}{1 - \tan \delta} \quad (3-7)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις παραπομπές προκύπτει μια σχέση της μορφής  $\lambda=f(x/R, N_s, k, K)$ . Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται ενδεικτικά η γραφική απεικόνιση ( $\lambda, x/R$ ) για δεδομένες τιμές  $k$  και  $K$ .



Σχήμα 3.1: Συντελεστής  $\lambda$  κατά Chern et al (1998)

### 3.3.1.2 Μέθοδος Panet (1995)

Με βάση τα αποτελέσματα αξονοσυμμετρικών αναλύσεων προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

→ Α' περίπτωση: Δεν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη

$$\frac{u_R}{u_{R\infty}} = 1 - 0.75 \left[ \frac{1}{1 - \frac{4}{3} \left( \frac{x}{R} \right)} \right]^2 \quad (3-8)$$

→ Β' περίπτωση: Αναπτύσσεται πλαστική ζώνη

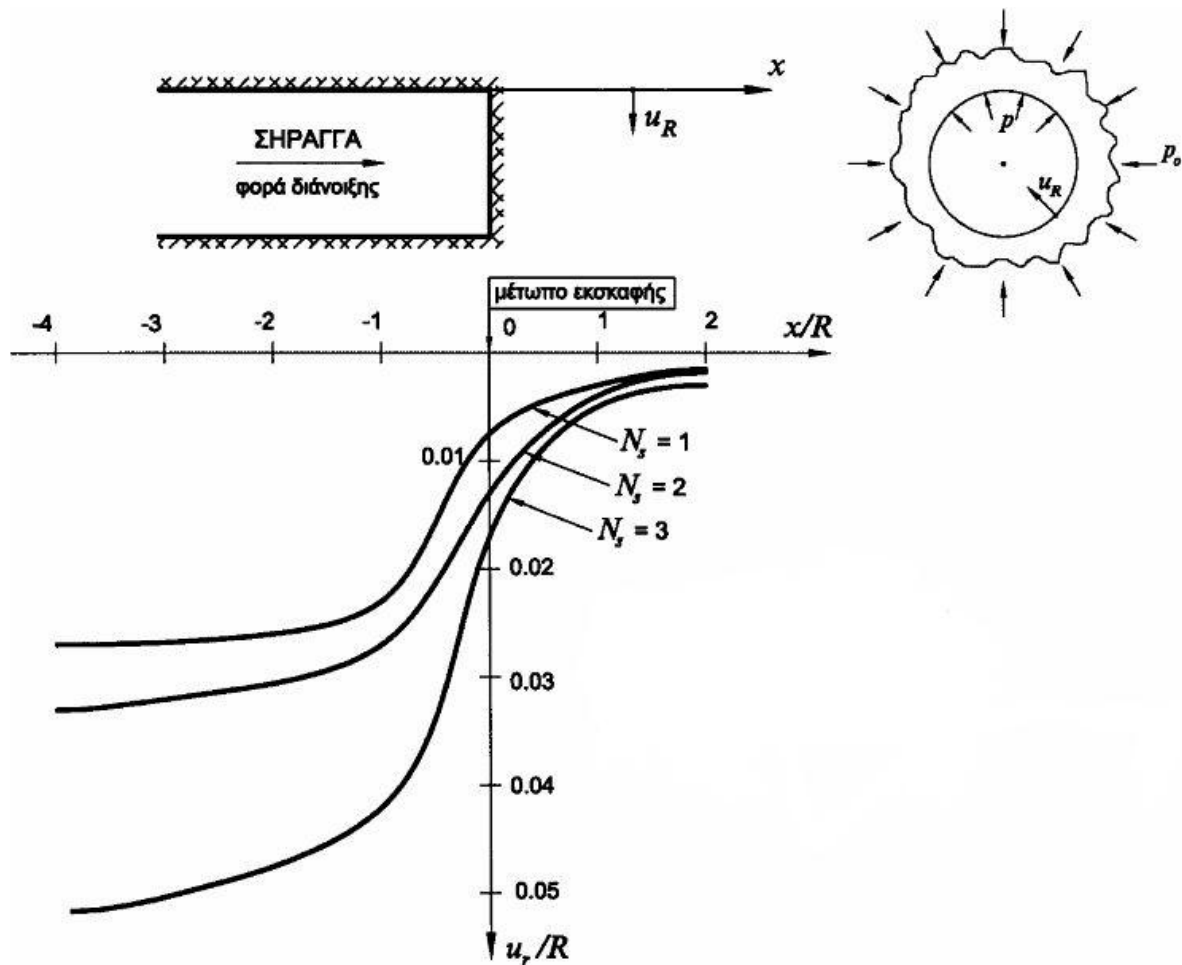


$$\frac{u_R}{u_{R\infty}} = 1 - 0.75 \left[ \frac{1}{1 - \frac{4}{3} \left( \frac{x}{R} \right)^\xi} \right]^2 \quad (3-9)$$

όπου:

$$\frac{u_R}{u_{R\infty,e}} = \frac{1}{\xi} \quad (3-10)$$

και  $u_{R\infty,e}$  είναι η τελική ακτινική σύγκλιση στην περιφέρεια της εκσκαφής, όταν έχει ολοκληρωθεί η αποτόνωση και το μέτωπο έχει απομακρυνθεί επαρκώς στην περίπτωση που το γεωυλικό παραμένει ελαστικό.



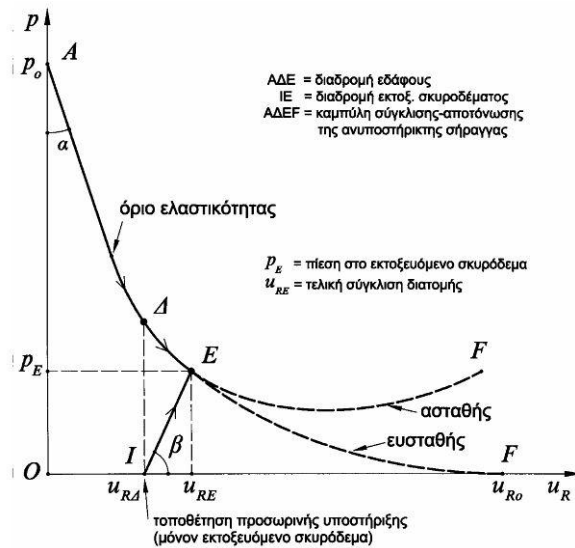
Σχήμα 3.2: Τυπικές μορφές καμπυλών Panet κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, για διάφορες τιμές του  $N_s$

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η καμπύλη εξέλιξης της σύγκλισης για ανυποστήρικτη σήραγγα, η οποία δίνεται σε διάγραμμα  $x-u_R$ , όπου  $x$  είναι η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής και  $u_R$ , η σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας. Από την καμπύλη εξέλιξης φαίνεται ότι ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής σύγκλισης ( $u_{R0}$ ) συμβαίνει αρκετά εμπρός από το μέτωπο διάνοιξης.

### 3.3.2 Καμπύλες σύγκλισης - αποτόνωσης

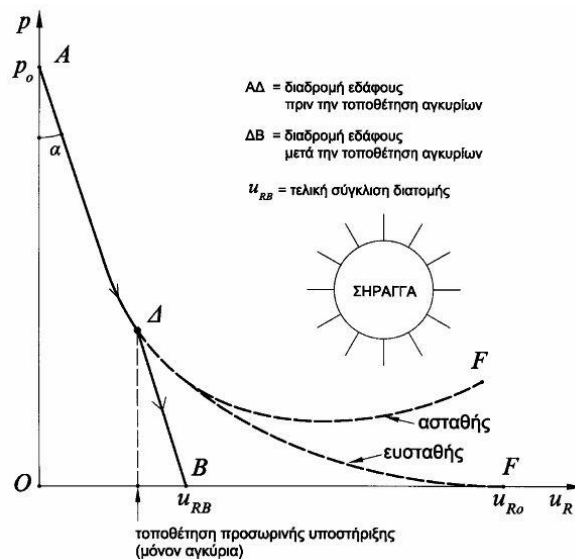
Οι καμπύλες σύγκλισης αποτόνωσης δίνονται σε διαγράμματα  $u_R$ - $p$ , όπου  $p$  είναι η ισοδύναμη εσωτερική πίεση. Η μέγιστη τιμή της πίεσης  $p$  είναι η  $p_0$  που είναι η αρχική γεωστατική τάση

Στο ακόλουθο σχήμα, η καμπύλη ΑΔΕF δείχνει τη συμπεριφορά της βραχόμαζας γύρω από ανυποστήρικτη σήραγγα και την επιρροή της τοποθέτησης εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο σημείο Δ. Κατά την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης, το σκυρόδεμα είναι αφόρτιστο, αφού τοποθετείται σε μια διατομή που ισορροπεί, και επίσης παρατηρούμε ότι έχει ήδη συμβεί σύγκλιση του τοιχώματος ίση με  $u_{RD}$ . Με την περαιτέρω προώθηση του μετώπου εκσκαφής, η διατομή τείνει να συγκλίνει, με αποτέλεσμα το σκυρόδεμα να αναλαμβάνει φορτία. Από το Σχήμα 3.3 φαίνονται επίσης τα ακόλουθα: το έδαφος ακολουθεί τη διαδρομή ΔΕ, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ακολουθεί τη διαδρομή ΙΕ και η κατάσταση ισορροπίας επιτυγχάνεται στο σημείο Ε, όπου η πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ισούται με  $p_E$ .



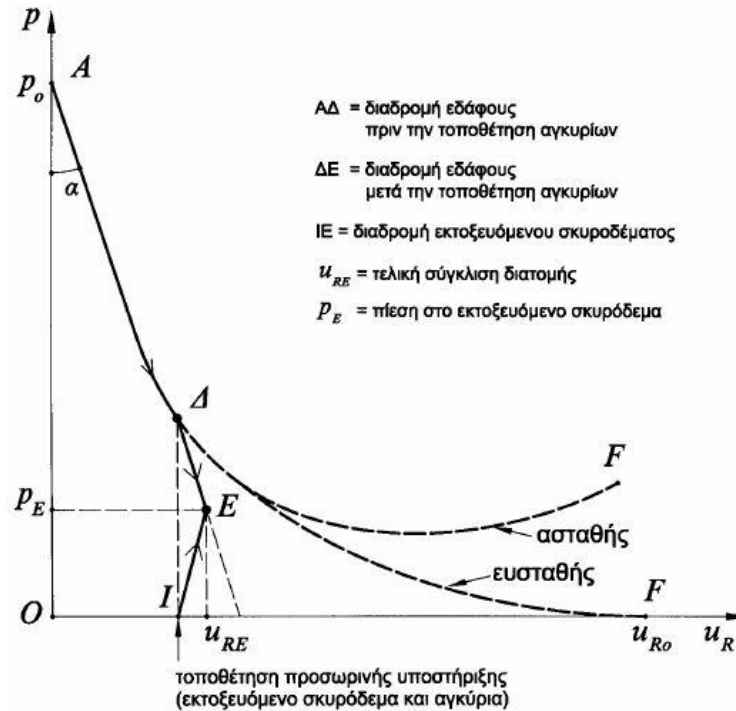
Σχήμα 3.3: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Στην περίπτωση τοποθέτησης αγκυριών βράχου (Σχήμα 3.4), η βραχόμαζα ενισχύεται και γίνεται πιο ανένδοτη, με αποτέλεσμα η τελική σύγκλιση να είναι μικρότερη (και σε αυτή την περίπτωση) από την αντίστοιχη σύγκλιση στην ανυποστήρικτη διατομή.



Σχήμα 3.4: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από αγκύρια βράχου

Τέλος, στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα σύγκλισης-αποτόνωσης στην περίπτωση προσωρινής υποστήριξης με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια.



**Σχήμα 3.5:** Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως, η απόσταση από το μέτωπο στην οποία θα τοποθετηθούν τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης είναι καταλυτικής σημασίας, καθώς καθορίζει πόσο θα έχει μειωθεί η τιμή της εσωτερικής πίεσης. Προσδιορίζεται δηλαδή, κατ' αυτόν τον τρόπο, ο βαθμός αποτόνωσης της βραχόμαζας. Στην περίπτωση που τοποθετηθούν νωρίτερα, θα αναλάβουν μεγαλύτερες πιέσεις, με αποτέλεσμα η λύση να είναι αντισυμβαλλόμενη, ενώ αν τοποθετηθούν αργότερα, υπάρχει κίνδυνος αποδιοργάνωσης της βραχόμαζας.

Το σημαντικότερο στοιχείο, που καταδεικνύει τη χρησιμότητα και την "προσφορά" της άμεσης υποστήριξης, και προκύπτει κι από τις τρεις καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης, είναι η σαφής μείωση των συγκλίσεων που επιτυγχάνεται με την τοποθέτησή της (σε σχέση πάντα με την ανυποστήρικτη διατομή).

### 3.3.3 Υπολογισμός απομειωμένου μέτρου ελαστικότητας

Ο υπολογισμός του απομειωμένου μέτρου ελαστικότητας είναι ένας επιπλέον τρόπος, για να προσομοιωθούν οι συγκλίσεις, που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιβάλλουσα βραχόμαζα, μετά την εκσκαφή της σήραγγας. Για την ακρίβεια, αντιστοιχούμε σε μια υποθετική βραχόμαζα, εντός της διατομής της σήραγγας, ένα (πλασματικό) απομειωμένο μέτρο ελαστικότητας, σε σχέση με το αρχικό. Η τιμή του μεγέθους αυτού πρέπει να αποτυπώνει τις συγκλίσεις εντός της σήραγγας, στην υποθετική βραχόμαζα. Πρέπει, όμως να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, έτσι ώστε οι συγκλίσεις της υποθετικής βραχόμαζας να είναι του ίδιου μεγέθους με αυτές εντός της σήραγγας. Αυτό επιτυγχάνεται με τον ακριβή προσδιορισμό του απομειωμένου μέτρου ελαστικότητας, λαμβάνοντας υπόψη τον συντελεστή αποτόνωσης  $\lambda$ , με τον ακόλουθο τύπο:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{(1-2\nu)(1-\lambda)}{(1-2\nu)+\lambda} \quad (3-11)$$

όπου:

- E: το απομειωμένο μέτρο ελαστικότητας της "οιονεί" βραχώμαζας  
 E<sub>0</sub>: το αρχικό μέτρο ελαστικότητας της περιβάλλουσας βραχώμαζας  
 ν: ο λόγος Poisson της περιβάλλουσας βραχώμαζας  
 λ: ο συντελεστής αποτόνωσης

### 3.4 ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Η τελική επένδυση αποτελεί συγχρόνως έργο τόσο γεωτεχνικής όσο και δομοστατικής φύσεως, καθώς φορτίζεται από το περιβάλλον γεωυλικό με ένταση που εξαρτάται από την αλληλεπίδρασή του με την άμεση υποστήριξη αλλά και με την ίδια την τελική επένδυση (π.χ. δυσκαμψία και χρόνος κατασκευής).

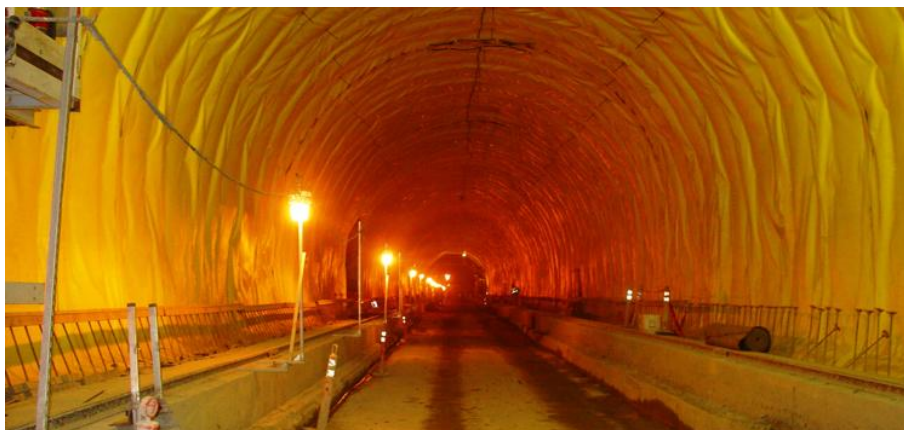
Σκοπός της τελικής επένδυσης είναι η ανάληψη των φορτίσεων που αναμένεται να προκύψουν στην τεχνική διάρκεια ζωής του έργου, η επίτευξη αποδεκτού επιπέδου ασφάλειας και η ικανοποίηση των απαιτήσεων λειτουργικότητας και αισθητικής.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, η κατασκευή της τελικής επένδυσης έπεται της άμεσης υποστήριξης, η οποία, εκτός των άλλων, περιγράφει και τη θέση κατασκευής της τελικής επένδυσης. Εξάλλου, η τελική επένδυση κατασκευάζεται εσωτερικά της προσωρινής υποστήριξης, αφού προηγουμένως έχει επέλθει ισορροπία σ' αυτήν στο σύνολο του μήκους της σήραγγας.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η τελική επένδυση στις σήραγγες κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα, με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της τάξης των 20-30Μpa. Η κατασκευή πραγματοποιείται ανά τμήματα των 12-14m. Αρχικά, τοποθετείται το γεωφάσμα, για την αποστράγγιση των υδάτων και, κατόπιν, στεγανωτική μεμβράνη, που εξασφαλίζει την υδραυλική στεγανότητα της σήραγγας. Εν συνεχεία, τοποθετείται ο οπλισμός και, τέλος, γίνεται η σκυροδέτηση. Κατ' αυτό τον τρόπο, διαμορφώνεται η διατομή λειτουργίας της σήραγγας.



Εικόνα 3.7: Τοποθέτηση γεωφάσματος



**Εικόνα 3.8: Στεγανωτική μεμβράνη**



**Εικόνα 3.9: Τελική επένδυση σήραγγας**



**Εικόνα 3.10: Καλούπι σκυροδέτησης τελικής επένδυσης**

Σ' αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι ο τρόπος και το υλικό κατασκευής της τελικής επένδυσης της σήραγγας καθορίζονται, κατά κύριο λόγο, από τις εξής τέσσερις παραμέτρους: τη μετέπειτα χρήση της σήραγγας (π.χ. οδική, σιδηροδρομική, υδραυλική κτλ.), τη μέθοδο διάνοιξής της, τις γεωτεχνικές συνθήκες κατά μήκος της σήραγγας και, τέλος, τις διαδικασίες ελέγχου ποιότητας και αξιοπιστίας του έργου.

Βέβαια, από πλήθος αναλύσεων έχει προκύψει πως οι προτεινόμενες διατομές τελικής επένδυσης δε συσχετίζονται επαρκώς με τις γεωτεχνικές συνθήκες διάνοιξης της σήραγγας (Φορτσάκης et al., 2006; Φορτσάκης & Καββαδάς, 2010)

### 3.4.1 Φορτία τελικής επένδυσης

Ο καθορισμός των φορτίων που παραλαμβάνει η τελική επένδυση σε μία σήραγγα είναι μια σύνθετη διαδικασία, αφού τα φορτία, που προέρχονται από το περιβάλλον γεωυλικό, δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένα, αλλά αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του συστήματος "γεωυλικό - μέτρα άμεσης υποστήριξης - τελική επένδυση" και εξαρτώνται από το χρόνο. Ακολούθως γίνεται η παρουσίαση των φορτίων που καλείται να αναλάβει η τελική επένδυση και επομένως πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό του έργου.

#### ➤ Άμεσα φορτία από το περιβάλλον γεωυλικό

Άμεσα θεωρούνται τα φορτία που εμφανίζονται μετά την κατασκευή της τελικής επένδυσης και κατανέμονται τόσο στα μέτρα άμεσης υποστήριξης όσο και στην τελική επένδυση. Τα φορτία αυτά κατανέμονται στα επιμέρους στοιχεία ανάλογα με τη δυσκαμψία του καθενός και οφείλονται κυρίως στα χρονικά εξαρτημένα φαινόμενα της διόγκωσης και του ερπυσμού του γεωυλικού.

Ερπυσμός είναι το φαινόμενο της συνεχούς αύξησης των παραμορφώσεων του γεωυλικού, υπό σταθερό εντατικό πεδίο. Η κατασκευή, όμως, της τελικής επένδυσης παρεμποδίζει την εκδήλωση των μακροχρόνιων παραμορφώσεων, με αποτέλεσμα τη συνεχή και αυξανόμενη φόρτίσή της. Έντονη ερπυστική συμπεριφορά παρουσιάζουν κυρίως τα εδαφικά υλικά και οι μαλακοί ή αποσπασμένοι βράχοι. Το μέγεθος των φορτίων, λόγω ερπυσμού, εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του γεωυλικού και το ύψος υπερκειμένων, καθώς και το χρόνο κατασκευής της τελικής επένδυσης (Καββαδάς, 2004).

Το φαινόμενο της διόγκωσης παρουσιάζεται σε ορισμένους αργιλικούς εδαφικούς σχηματισμούς ή σε βραχώμαζες με μεγάλη περιεκτικότητα σε ορισμένα αργιλικά ορυκτά. Η εκσκαφή της σήραγγας προκαλεί μείωση της μέσης τάσης στην πλαστική περιοχή και ανάπτυξη αρνητικής πίεσης πόρων, με αποτέλεσμα την απορρόφηση ποσότητας ύδατος από το γεωυλικό και τη διόγκωσή του. Εφόσον η κατασκευή της τελικής επένδυσης δεν επιτρέπει την εξέλιξη του φαινομένου αυτού, παρατηρείται ανάπτυξη πιέσεων του γεωυλικού σε αυτή.

#### ➤ Έμμεσα φορτία από το περιβάλλον γεωυλικό

Έμμεσα θεωρούνται τα φορτία που αρχικά παραλαμβάνονται από τα μέτρα άμεσης υποστήριξης και εν συνεχεία από την τελική επένδυση, εφόσον τα μέτρα άμεσης υποστήριξης απενεργοποιούνται μακροχρόνια.

Τα φορτία που αναλαμβάνονται, αρχικά, από τα μέτρα άμεσης υποστήριξης, μεταφέρονται σταδιακά στην τελική επένδυση της σήραγγας μέσα στην τεχνική διάρκεια ζωής του έργου. Το ποσοστό των φορτίων, που μεταφέρεται στην τελική επένδυση, εξαρτάται από τις παραδοχές σχεδιασμού, τα χαρακτηριστικά των υλικών και τις γεωτεχνικές συνθήκες.

Γενικά, θεωρείται πλήρης απαξίωση των μέτρων άμεσης υποστήριξης κατά την τεχνική διάρκεια ζωής του έργου και μεταφορά του συνόλου του φορτίου τους στην τελική επένδυση. Η θεώρηση αυτή πραγματοποιείται λόγω των μεγάλων αβεβαιοτήτων σχετικά με τη μακροχρόνια συμπεριφορά των μέτρων άμεσης υποστήριξης. Επιπλέον, το πλαίσιο οδηγιών-κανονισμών τέτοιων έργων επιβάλλει, υπέρ της ασφαλείας, τη θεώρηση πλήρους απαξίωσής τους.

Να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι τα μέτρα άμεσης υποστήριξης φορτίζουν επιπλέον την τελική επένδυση, καθώς σχεδιάζονται για διαφορετικούς συντελεστές ασφαλείας. Τα μεν μέτρα άμεσης

υποστήριξης σχεδιάζονται για συντελεστές ασφαλείας προσωρινού έργου, η δε τελική επένδυση σχεδιάζεται με συντελεστές ασφαλείας μόνιμου έργου. Έτσι, προκειμένου τα μέτρα άμεσης υποστήριξης να ληφθούν σα μόνιμα έργα, πρέπει να σχεδιαστούν με θεώρηση συντελεστή ασφαλείας μόνιμου έργου. Με τον τρόπο αυτό, όμως, μειώνεται η αντοχή των μέτρων άμεσης υποστήριξης στο σχεδιασμό, κι έτσι μεταφέρεται φορτίο στην τελική επένδυση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι θεωρήσεις των μέτρων άμεσης υποστήριξης, που μας απασχόλησαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, δηλαδή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και των αγκυρίων βράχου.

Πιο συγκεκριμένα, η φόρτιση της τελικής επένδυσης από τα αγκύρια, οφείλεται κυρίως στην αποφόρτισή τους, λόγω της παγίωσης της κεφαλής τους, ιδιαίτερα αν η διάνοιξη της σήραγγας γίνεται σε γεωλικά με έντονη ερπυστική συμπεριφορά. Ενώ, ένας δεύτερος παράγοντας σταδιακής αποφόρτισης των αγκυρίων είναι η διάβρωσή τους.

Όσον αφορά στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ο υπολογισμός του γίνεται με θεώρηση συντελεστή ασφαλείας προσωρινού έργου. Σύμφωνα με τον Μπακογιάννη (2004), το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορεί να λαμβάνεται υπόψη ως στοιχείο της τελικής επένδυσης, εφόσον ικανοποιούνται συγκεκριμένες απαιτήσεις, που αφορούν στην ανθεκτικότητα και την ποιότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Επίσης, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρουσιάζει έντονη ερπυστική συμπεριφορά λόγω της ανάληψης μεγάλων φορτίων σε «νεαρή ηλικία» και του τρόπου κατασκευής του, καθώς εμπλουτίζεται με επιταχυντές πήξης. Μάλιστα, ο ερπυσμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από τον ερπυσμό του έγχυτου. Στη διαφορά αυτή των ερπυσμών οφείλεται τμήμα της φόρτισης της τελικής επένδυσης από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Με βάση τους Lee et al. (2005), μόνο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τελική επένδυση. Εν τούτοις, οι Γιούτα-Μήτρα et al. (2010) καταδεικνύουν τη μειωμένη ανθεκτικότητα και την έντονη ερπυστική συμπεριφορά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ως αιτίες της πλήρους απαξίωσής του. Και οι Franzen et al. (2001) τονίζουν τη μεγάλη σημασία της ανθεκτικότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο εν λόγω ζήτημα. Παράλληλα όμως, επισημαίνουν την έλλειψη στοιχείων που υπάρχει στο συγκεκριμένο πεδίο, καθώς τα στοιχεία, που προκύπτουν τόσο από πειραματικά δεδομένα όσο και από τα δεδομένα από πραγματικές κατασκευές, αναφέρονται σε χρονικά διαστήματα μικρότερα από την τεχνική διάρκεια ζωής του έργου (50-100 έτη).

#### ➤ Φορτία από υδατικές πιέσεις

Τα φορτία που θα ασκηθούν στη σήραγγα λόγω των υδατικών πιέσεων εξαρτώνται από τη θέση της σε σχέση με τον υδροφόρο ορίζοντα, από τον τρόπο κατασκευής της και τη λειτουργία της. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, πραγματοποιείται υδατική στεγάνωση της σήραγγας, της οποίας η αποτελεσματικότητα, όμως, είναι αβέβαιη καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου.

#### ➤ Ίδια βάρη

Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται το ίδιο βάρος της διατομής, το βάρος της επίχωσης σε περίπτωση ανάστροφου πυθμένα και το ίδιο βάρος των μηχανολογικών εξοπλισμών.

#### ➤ Φορτία από υπέργειες κατασκευές

Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται φορτία από επιφανειακές ή υπόγειες κατασκευές που υφίστανται ή πρόκειται να πραγματοποιηθούν.

#### ➤ Φορτία καταναγκασμού (επιβαλλόμενες παραμορφώσεις)

Ως φορτία καταναγκασμού θεωρούνται οι θερμοκρασιακές μεταβολές, καθώς και η συστολή ξηράνσεως και ο ερπυσμός του σκυροδέματος της τελικής επένδυσης.

Στο σχεδιασμό τις τελικής επένδυσης λαμβάνονται υπόψη θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ εσωτερικής παρειάς και εξωραχίου της τελικής επένδυσης και θερμοκρασιακές μεταβολές στο σύνολο του έργου. Η συστολή ξήρανσης, και ο ερπυσμός του σκυροδέματος λαμβάνονται υπόψη ως ισοδύναμη θερμοκρασιακή μεταβολή.

➤ Τυχηματικά φορτία

Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται τα φορτία έκρηξης, τα φορτία πρόσκρουσης οχήματος σε περίπτωση οδικής ή σιδηροδρομικής σπήραγγας καθώς και τα φορτία πυρκαγιάς.

➤ Φορτία λόγω σεισμικής δράσης

Η συμπεριφορά των σπηραγγών σε σεισμό εξαρτάται κυρίως από την ακαμψία τους σε σχέση με το περιβάλλον γεωυλικό. Συνήθως, το περιβάλλον γεωυλικό είναι πολύ «άκαμπτο» σε σχέση με την τελική επένδυση της σπήραγγας, με αποτέλεσμα το έργο να παρακολουθεί την κίνηση του γεωυλικού, χωρίς την ανάπτυξη επιπλέον φορτίων (Καββαδάς, 2005). Συνεπώς, η σεισμική φόρτιση των σπηραγγών ανάγεται σε κινηματική επιβολή των σεισμικών παραμορφώσεων του εδάφους (Κόλιας, 2004), οι οποίες όμως παραλαμβάνονται ευχερώς από τους αρμούς της τελικής επένδυσης. Τέλος, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην περίπτωση που ο σεισμός συνοδεύεται με μόνιμες μετακινήσεις των σχηματισμών που διασχίζει η σπήραγγα.

### 3.4.2 Ανάλυση τελικής επένδυσης

Όπως γίνεται σαφές από τα παραπάνω, τα φορτία, που τελικά καλείται να παραλάβει η τελική επένδυση σπήραγγας, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται τα φορτία που καθορίζονται από το μελετητή, τον κύριο του έργου ή τους κανονισμούς. Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται τα φορτία που δέχεται η τελική επένδυση από το γεωυλικό είτε με άμεσο (ερπυσμός και διόγκωση γεωυλικού) είτε με έμμεσο τρόπο (από τα μέτρα άμεσης υποστήριξης). Οι τιμές των φορτίων της δεύτερης κατηγορίας δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένες, αλλά εξαρτώνται από την αλληλεπίδραση του συστήματος: γεωυλικό - άμεση υποστήριξη - τελική επένδυση.

Για τον υπολογισμό των φορτίων της δεύτερης κατηγορίας υπάρχουν τρεις μέθοδοι, οι οποίες αναπτύσσονται στη συνέχεια.

#### 3.4.2.1 Εμπειρικές μέθοδοι

Οι εμπειρικές μέθοδοι δίνουν το φορτίο (κατακόρυφο και οριζόντιο) που ασκείται στην τελική επένδυση, χρησιμοποιώντας εμπειρικούς τύπους. Κύριες παράμετροι των τύπων αυτών είναι οι διαστάσεις της σπήραγγας και η ποιότητα της βραχώμαζας. Για την εκτίμηση των φορτίων αυτών, λαμβάνονται υπόψη παραδοχές, οι οποίες σχετίζονται με το βάθος της σπήραγγας, την ενδοσιμότητα της επένδυσης και την ενεργοποίηση της περιβάλλουσας βραχώμαζας στην ανάληψη φορτίων. Οι κυριότερες εμπειρικές μέθοδοι είναι η μέθοδος του δείκτη RMR, η μέθοδος του δείκτη NGI και η εμπειρική μέθοδος Terzaghi.

➤ Μέθοδος μέσω του δείκτη RMR

Η μέθοδος αυτή προτάθηκε από τον Unal (1983) και δίνει την κατακόρυφη και οριζόντια πίεση στην επένδυση της σπήραγγας μέσω του δείκτη RMR, ο οποίος παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2.2.1. Οι σχέσεις που ακολουθούν προέκυψαν από παρατηρήσεις σπηραγγών εύρους 5-10m, που διανοίχθηκαν με τη μέθοδο NATM, σε βραχώμαζες με RMR>50 και ύψος υπερκειμένων έως 100m. Στις περιπτώσεις αυτές, τα φορτία, που υπολογίζονται, είναι σχετικά μικρά, επειδή, κατά τη διάνοιξη της σπήραγγας, ενεργοποιείται η αντοχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας και δεν παρατηρείται έντονη ερπυστική συμπεριφορά.

Οι σχέσεις υπολογισμού, που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο RMR, είναι οι εξής:



$$p_v = \gamma H_t \quad (3-12)$$

$$p_h = \lambda p_v \quad (3-13)$$

$$H_t = \left( \frac{100 - RMR}{100} \right) B \quad (3-14)$$

όπου:

$p_v$ : κατακόρυφο φορτίο

$p_h$ : οριζόντιο φορτίο

$H_t$ : ισοδύναμο ύψος της περιοχής του γεωυλικού που φορτίζει την τελική επένδυση

$\gamma$ : ειδικό βάρος γεωυλικού

$B$ : εύρος σήραγγας

➤ Μέθοδος μέσω του δείκτη NGI (μέσω του δείκτη Q)

Η μέθοδος αυτή δίνει την οριζόντια και κατακόρυφη πίεση στην επένδυση της σήραγγας, βασισμένη στον εμπειρικό δείκτη ποιότητας της βραχώμαζας Q. Οι σχέσεις της μεθόδου αυτής αναφέρονται σε σήραγγες που έχουν διανοιχθεί με τη μέθοδο NATM και τα μέτρα υποστήριξης προέκυψαν βάσει της εμπειρικής μεθόδου NGI για βραχώμαζες σχετικά καλής ποιότητας ( $Q > 0.05$ ). Για βραχώμαζες με  $Q < 0.05$  προκύπτουν υπερβολικά μεγάλες τιμές πίεσης στην επένδυση της σήραγγας.

Οι σχέσεις υπολογισμού, που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο NGI, είναι οι εξής:

$$p_v = \left( \frac{2}{3J_r} \right) J_n^{\frac{1}{2}} Q^{-\frac{1}{3}} \quad (3-15)$$

$$p_h = \lambda p_v \quad (3-16)$$

$$Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) \left( \frac{J_r}{J_a} \right) \left( \frac{J_w}{SRF} \right) \quad (3-17)$$

όπου:

RQD: δείκτης ποιότητας βραχώμαζας

SRF: συντελεστής τασικού πεδίου

$J_n$ : συντελεστής αριθμού ασυνεχειών

$J_r$ : συντελεστής τραχύτητας ασυνεχειών

$J_a$ : συντελεστής εξαλλοίωσης ασυνεχειών

$J_w$ : συντελεστής παρουσίας νερού

και ο συντελεστής  $\lambda$  υπολογίζεται από τον ακόλουθο πίνακα:

Q	λ
>10	0.58
0.1<Q<10	0.74
>10	1

**Πίνακας 3.1: Τιμές συντελεστή λ με βάση τη μέθοδο NGI**

➤ Μέθοδος Terzaghi

Η μέθοδος αυτή προτάθηκε το 1940 για σήραγγες εύρους έως 5m και προσωρινή υποστήριξη με ξυλοδοκούς ή χαλύβδινα πλαίσια. Στις σήραγγες, που εφαρμόζεται αυτή η μέθοδος, πρέπει να μπορεί να αναπτυχθεί πλήρως το φαινόμενο του θόλου πάνω από τη στέψη της σήραγγας, δηλαδή πάχη υπερκειμένων  $D > 1.5(b+h)$ .

Η κατακόρυφη πίεση γαιών, στην οροφή της σήραγγας, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$p_v = \gamma H_p \quad (3-18)$$

όπου:

$p_v$ : κατακόρυφο φορτίο

$\gamma$ : ειδικό βάρος γεωυλικού

$H_p$ : ισοδύναμο ύψος περιοχής γεωυλικού (δίνεται από τον πίνακα που ακολουθεί)

Ποιότητα βραχόμαζας	Ύψος $H_p$
Συμπαγής βράχος, πρακτικά χωρίς διακλάσεις	0
Συμπαγής βραχόμαζα με μικρό αριθμό τυχαίων διακλάσεων	$0 \div 0.10b$
Συμπαγής βραχόμαζα με τυχαίες κλειστές διακλάσεις	$0 \div 0.25b$
Κερματισμένη βραχόμαζα σε επιμέρους συμπαγή τεμάχια με ανοιχτές ή κλειστές διακλάσεις, χωρίς υλικό πλήρωσης	$0.25 \div 0.35(b+h)$
Βραχόμαζα ως άνω αλλά εντονότερα κερματισμένη	$0.35 \div 1.00(b+h)$
Κατακερματισμένη βραχόμαζα με ικανοποιητική εμπλοκή μεταξύ των τεμαχίων	$1.00 \div 1.50(b+h)$
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	$0.25 \div 0.35(b+h)$
Συνθλίβοντα εδάφη, σήραγγες σε μεγάλα βάθη	$0.25 \div 0.35(b+h)$

**Πίνακας 3.2: Τιμές της παραμέτρου  $H_p$  βάσει της ποιότητας της βραχόμαζας**

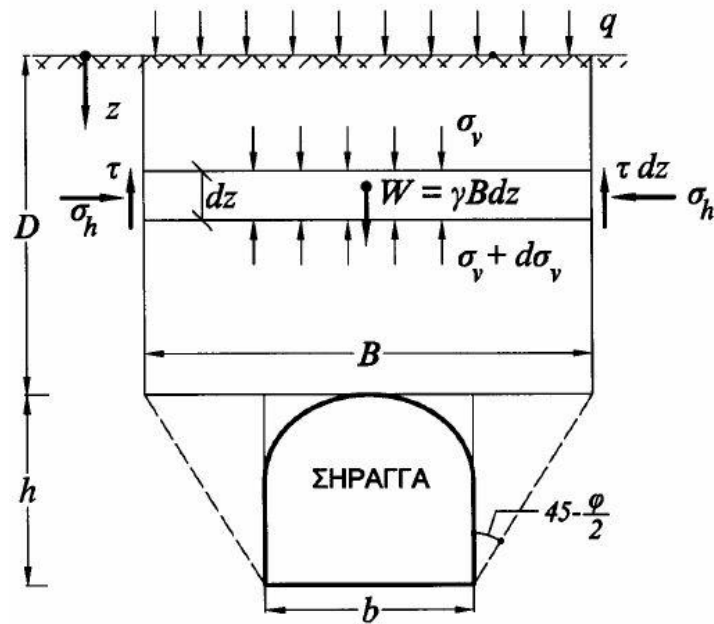
όπου b και h, εύρος και ύψος σήραγγας αντίστοιχα.

3.4.2.2 Αναλυτικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι αυτές εκτιμούν τις διαστάσεις μιας εδαφικής μάζας, πάνω από τη στέψη της σήραγγας, η οποία θεωρείται, πως φορτίζει την τελική επένδυση της σήραγγας. Η τελική φόρτιση προκύπτει μέσω αναλυτικών σχέσεων, οι οποίες προκύπτουν από την επίλυση διαφορικών εξισώσεων. Κύριες παράμετροι των μεθόδων αυτών είναι οι διαστάσεις της σήραγγας και το είδος του γεωυλικού.

Από την κατηγορία αυτή, περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια η μέθοδος Protodyakonov και η αναλυτική μέθοδος Terzaghi.

## ➤ Μέθοδος Terzaghi



Σχήμα 3.6: Εκτίμηση φορτίων στην τελική επένδυση σήραγγας κατά τη μέθοδο Terzaghi

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

Στην περίπτωση αυτή, η επιρροή της χαλάρωσης των υπερκείμενων γαιών φτάνει έως την επιφάνεια του εδάφους και, συνεπώς, δεν αναπτύσσεται πλήρως εδαφικό τόξο, πάνω από τη στέψη της σήραγγας.

Με βάση την ισορροπία του τμήματος πάχους  $dz$ , καταστρώνεται μία διαφορική εξίσωση, της οποίας η επίλυση, με την επιβολή κατάλληλων συνοριακών συνθηκών, δίνει τις παρακάτω σχέσεις υπολογισμού των φορτίων, που ασκούνται στην τελική επένδυση της σήραγγας:

$$p_v = qe^{-\Lambda D} + \frac{1}{\Lambda} \left( \gamma - \frac{2c}{B} \right) (1 - e^{-\Lambda D}) \quad (3-19)$$

$$p_h = (p_v + \gamma d) \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \tan \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (3-20)$$

$$\Lambda = \frac{2K}{B} \tan \phi \quad (3-21)$$

όπου:  $p_v$  είναι το κατακόρυφο φορτίο στη στέψη της σήραγγας,  $p_h$  το οριζόντιο φορτίο στο επίπεδο της σήραγγας, το οποίο έχει προκύψει με θεώρηση ενεργητικής κατάστασης,  $K$  ο συντελεστής γεωστατικών ωθήσεων (η σύσταση του Terzaghi είναι να λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα,  $K=1$ ), και  $B$  και  $D$  φαίνονται στο Σχήμα 3.6.

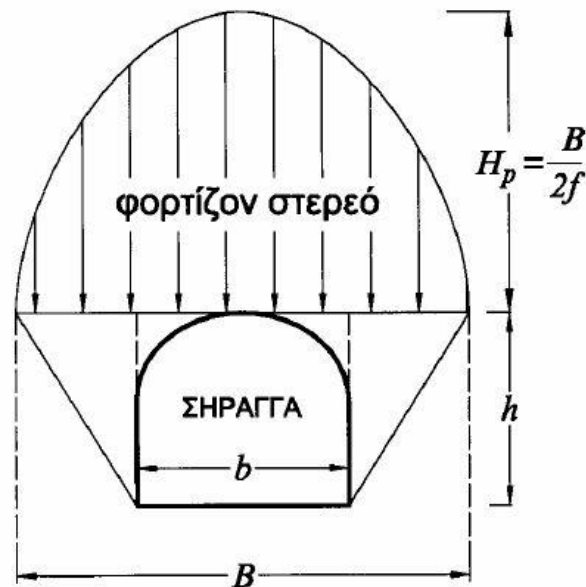
→ Σήραγγες σε μεγάλα βάθη ( $D > 2.5B$ )

Στην περίπτωση αυτή, η σήραγγα δεν επηρεάζει τις ανώτερες εδαφικές στρώσεις. Το εδαφικό τόξο αναπτύσσεται μέχρι ύψος  $H=2.5B$  πάνω από τη στέψη της σήραγγας και οι ανώτερες εδαφικές στρώσεις, απλώς, φορτίζουν με το βάρος τους το υποκείμενο εδαφικό τόξο που σχηματίζεται, ασκώντας μια γεωστατική πίεση  $q=\gamma(D-H)$ . Το κατακόρυφο φορτίο στη στέψη της σήραγγας δίνεται από τη σχέση:

$$p_v = \gamma(D-H)e^{-\lambda H} + \frac{1}{\Lambda} \left( \gamma - \frac{2c}{B} \right) (1 - e^{-\lambda H}) \quad (3-22)$$

ενώ το οριζόντιο φορτίο υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο, όπως στις σήραγγες σε μικρά βάθη.

➤ Μέθοδος Protodyakonov (Ρωσική μέθοδος)



**Σχήμα 3.7:** Εκτίμηση φορτίων στην τελική επένδυση σήραγγας κατά τη μέθοδο Protodyakonov

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε για σήραγγες με μικρά σχετικά βάθη και βραχώμαζες σχετικά καλής ποιότητας,  $RMR > 40$ . Σε άλλες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα σήραγγες σε μεγαλύτερα βάθη, η μέθοδος Protodyakonov δίνει υπερβολικά μικρές τιμές πίεσης στην επένδυση της σήραγγας.

Θεωρείται πως η εδαφική μάζα που φορτίζει τη στέψη της σήραγγας, είναι παραβολική και έχει μέγιστο ύψος, πάνω από τη στέψη της σήραγγας, ίσο με:

$$H_p = \frac{B}{2f} \quad (3-23)$$

$$B = b + 2h \tan \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (3-24)$$

όπου:

b, h: εύρος και ύψος σήραγγας

f: εμπειρικός συντελεστής που λαμβάνει τις εξής τιμές:

→ Για συνεκτικά εδαφικά υλικά:

$$f = \frac{c}{\sigma_c} + \tan \varphi \quad (3-25)$$

όπου  $\sigma_c$ : η αντοχή του εδάφους σε ανεμπόδιστη θλίψη

→ Για βραχώδη υλικά:

$$f = \frac{\sigma_c}{100} \quad (3-26)$$

όπου  $\sigma_c$ : η αντοχή της βραχώμαζας σε μονοαξονική θλίψη ( $\text{kg/cm}^2$ )

Η κατακόρυφη πίεση γαιών στη στέψη της σήραγγας έχει παραβολική κατανομή. Η μέγιστη τιμή της εμφανίζεται στο μέσον της στέψης και είναι ίση με:

$$p_{v,\max} = \gamma H_p \quad (3-27)$$

Οι τιμές εκατέρωθεν του μέσου, σε απόσταση  $x$ , δίνονται από την εξής σχέση:

$$p_v = p_{v,\max} \left[ 1 - \left( \frac{x}{B/2} \right)^2 \right] \quad (3-28)$$

και, τέλος, η μέση τιμή της κατακόρυφης πίεσης γαιών, που ασκείται στη στέψη της σήραγγας είναι:

$$\bar{p}_v = p_{v,\max} \left[ 1 - \frac{1}{3(B/b)^2} \right] \quad (3-29)$$

Όσον αφορά στον υπολογισμό του οριζόντιου φορτίου, αυτός γίνεται με διαδικασία παρόμοια με αυτή που περιγράφηκε παραπάνω στην αναλυτική μέθοδο Terzaghi (θεώρηση ενεργητικής κατάστασης τάσεων).

Για τον τελικό υπολογισμό των φορτίων της τελικής επένδυσης, συνίσταται η τροποποίηση των παραπάνω τιμών με ένα συντελεστή προσαύξησης, ο οποίος στην ουσία λαμβάνει υπόψη του, την επιρροή των ερπυστικών φαινομένων. Οι τιμές του συντελεστή αυτού δίνονται στον πίνακα, που ακολουθεί:

Πίεση	Συντελεστής τροποποίησης
$p_v$	1.50
$p_h$	0.2 ÷ 1.2

**Πίνακας 3.3:** Τιμές συντελεστή τροποποίησης πιέσεων λόγω ερπυσμού

#### 3.4.2.3 Αριθμητικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι αυτές προσομοιώνουν την αλληλεπίδραση μεταξύ περιβάλλουσας βραχώμαζας, προσωρινής υποστήριξης και τελικής επένδυσης σήραγγας καθώς και τις διαδοχικές φάσεις εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας. Επιπλέον προσομοιώνεται με ακρίβεια η γεωμετρία της εκσκαφής, προσδιορίζεται το εντατικό πεδίο και ορίζεται ένα κριτήριο αστοχίας, βάσει του οποίου γίνεται έλεγχος αστοχίας των υλικών και εξετάζεται αν τα υλικά αυτά έχουν εισέλθει στην πλαστική περιοχή.

Στις αριθμητικές μεθόδους συμπεριλαμβάνεται και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία και περιγράφεται λεπτομερώς στο κεφάλαιο που ακολουθεί.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Κατά τη διάνοιξη σήραγγων, τα φορτία από την περιβάλλουσα βραχώμαζα αναλαμβάνονται, αρχικά, από την άμεση υποστήριξη (στην προκειμένη διπλωματική εργασία, αυτή αποτελείται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή/και αγκύρια βράχου). Αφού ολοκληρωθεί η διάνοιξη της σήραγγας, τοποθετηθούν τα μέτρα άμεσης υποστήριξης και επέλθει ισορροπία στη διατομή, ξεκινά η κατασκευή της τελικής επένδυσης της σήραγγας.

Αρχικά, η τελική επένδυση είναι αφόρτιστη, καθώς το σύνολο των φορτίων αναλαμβάνεται από την άμεση υποστήριξη. Με την πάροδο του χρόνου, η τελική επένδυση αρχίζει σταδιακά να αναλαμβάνει φορτία. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση του τρόπου μεταφοράς των φορτίων της άμεσης υποστήριξης στην τελική επένδυση, μετά την απαξίωση των μέτρων της άμεσης υποστήριξης.

Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, απαιτείται η πραγματοποίηση πλήθους αριθμητικών αναλύσεων με τη βοήθεια κατάλληλων λογισμικών προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων. Ο σχεδιασμός και η διακριτοποίηση του μοντέλου προσομοίωσης έγιναν στο σχεδιαστικό περιβάλλον του MSC Patran, ενώ για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

#### 4.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

##### 4.1.1 Γεωμετρία του προβλήματος

Αρχικά, αξίζει να σημειωθεί πως το πρόβλημά προσεγγίζεται ως διδιάστατο, αφού η διάσταση του διαμήκους άξονα της σήραγγας είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες δύο διαστάσεις του προβλήματος. Επομένως, είναι δυνατή η θεώρηση συνθηκών επίπεδης παραμόρφωσης και, κατ' επέκταση, είναι ορθή η απεικόνιση ενός μόνο επιπέδου, του εγκάρσιου στο διαμήκη άξονα της σήραγγας.

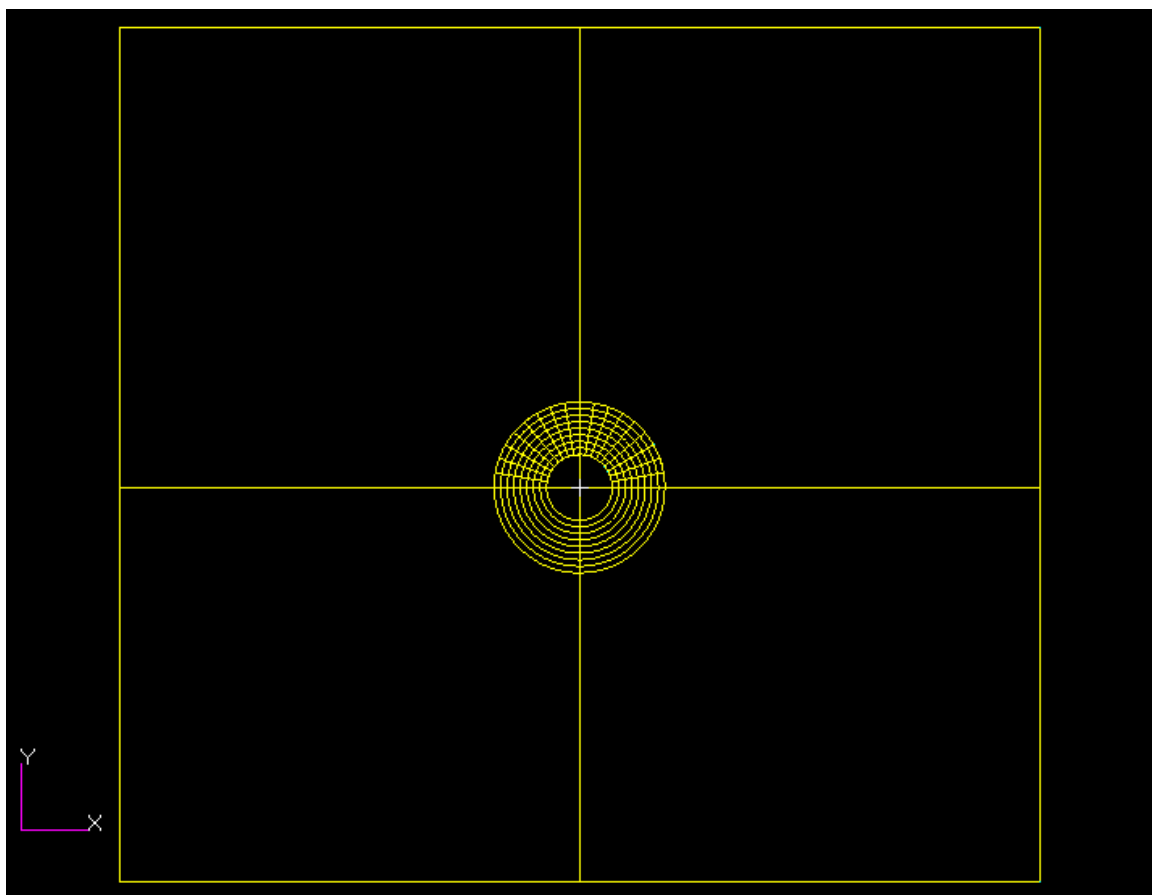
Και σ' αυτή την περίπτωση όμως, προσομοιώνεται επί της ουσίας, έστω και έμμεσα, και η τρίτη διάσταση. Αυτό συμβαίνει με τη χρήση των κατάλληλων μεθόδων, που έχουν αναπτυχθεί και παραπάνω (παράγραφος 3.3.1) και προσομοιώνουν τη σταδιακή αποτόνωση του γεωυλικού, λόγω της προχώρησης του μετώπου εκσκαφής.

##### 4.1.1.1 Διαστάσεις μοντέλου

Ο κάρναβος που χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση του προβλήματος έχει ορθογωνικό σχήμα ύψους 130m και πλάτους 140m και στο κέντρο του φαίνεται η κυκλική σήραγγα διαμέτρου  $D=10m$ . Οι διαστάσεις του μοντέλου επιλέχτηκαν λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η διάνοιξη της σήραγγας διαταράσσει μια περιοχή ακτίνας περίπου  $5D$ , γύρω από το κέντρο της.

Το ύψος των υπερκειμένων γαιών που απεικονίζεται στο μοντέλο είναι  $7D=70m$ . Βέβαια, στις περισσότερες των αναλύσεων υπήρχε η ανάγκη προσομοίωσης μεγαλύτερου ύψους υπερκειμένων γαιών. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, η προσομοίωση του βάθους (H-70)m από την ελεύθερη επιφάνεια εντάσσεται στο μοντέλο, με τη μορφή κατανομημένου φορτίου στην ελεύθερη επιφάνεια.

Για να επιτευχθεί η, όσο το δυνατόν, ομαλότερη αραίωση του καννάβου δοκιμάστηκαν διάφορες διαδικασίες κατασκευής της γεωμετρίας του μοντέλου. Από τις δοκιμές αυτές επιλέχτηκε τελικά η πιο αποτελεσματική μέθοδος, αυτή δηλαδή που έδωσε το πιο ομοιόμορφο άνοιγμα γύρω από την περιοχή της σήραγγας. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, κατασκευάστηκαν ομόκεντροι κύκλοι γύρω από τη σήραγγα ανά 1 μέτρο, με ακτίνες 6-13m, η σημασία των οποίων θα φανεί καλύτερα στην παράγραφο που ακολουθεί.

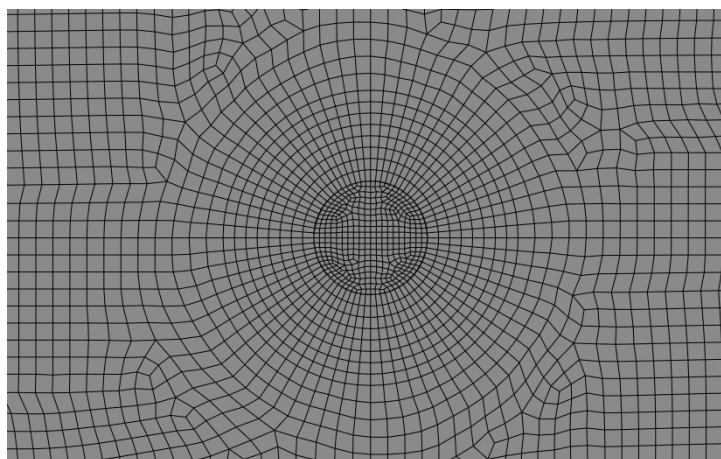


**Εικόνα 4.1:** Γεωμετρία προβλήματος (παράθεση από το πρόγραμμα MSC Patran)

#### 4.1.1.2 Διακριτοποίηση μοντέλου

Η διακριτοποίηση του μοντέλου έγινε με πεπερασμένα στοιχεία, γραμμικά και επιφανειακά. Τα επιφανειακά στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του γεωυλικού, ενώ τα γραμμικά για την προσομοίωση των αγκυρίων, του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και της τελικής επένδυσης

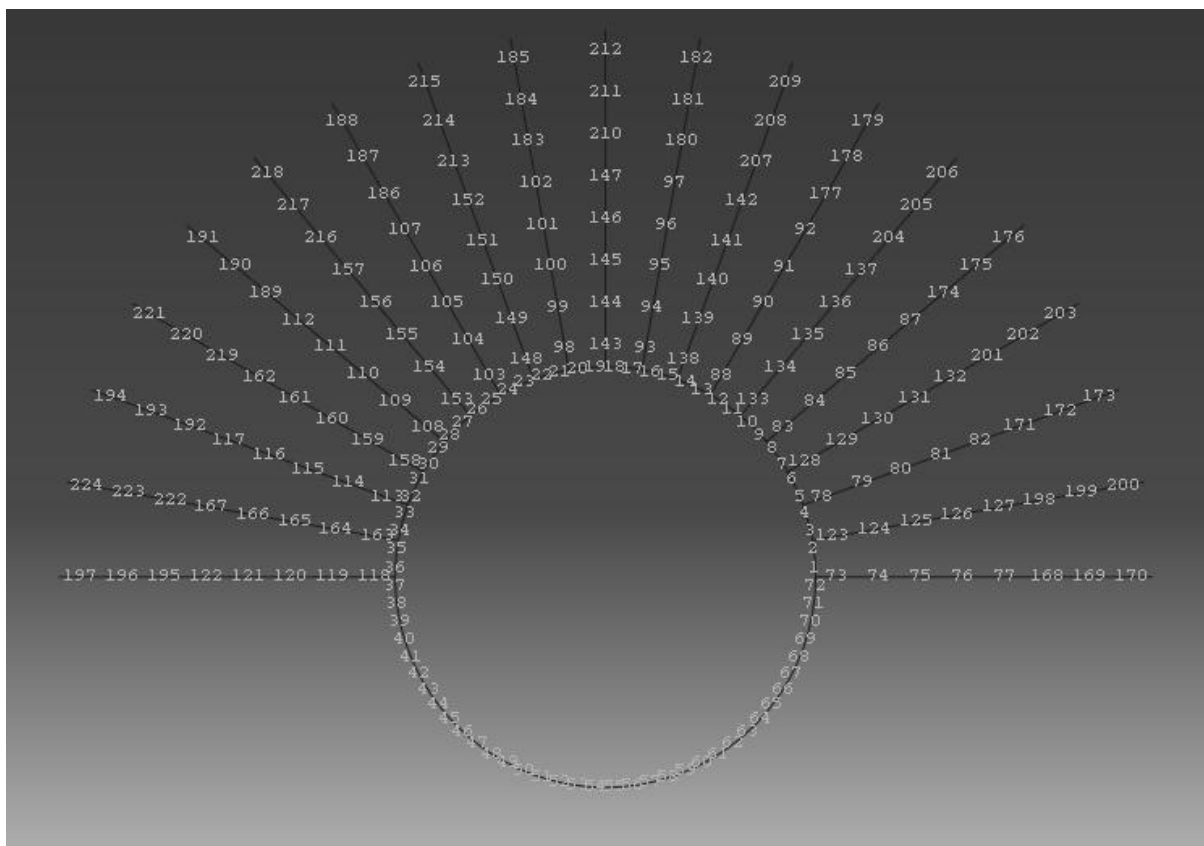
Εντός της σήραγγας, τα τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία έχουν μήκος 0.5m, ενώ εκτός αυτής και εντός της κυκλικής επιφάνειας ακτίνας 13m, το μήκος τους είναι 1m. Τα επιφανειακά στοιχεία του υπόλοιπου μοντέλου είναι μήκους 1.5m. Η διακριτοποίηση των τετρακομβικών στοιχείων φαίνεται ξεκάθαρα στην Εικόνα 4.2.



**Εικόνα 4.2:** Διακριτοποίηση επιφανειακών στοιχείων (παράθεση από το πρόγραμμα Abaqus)

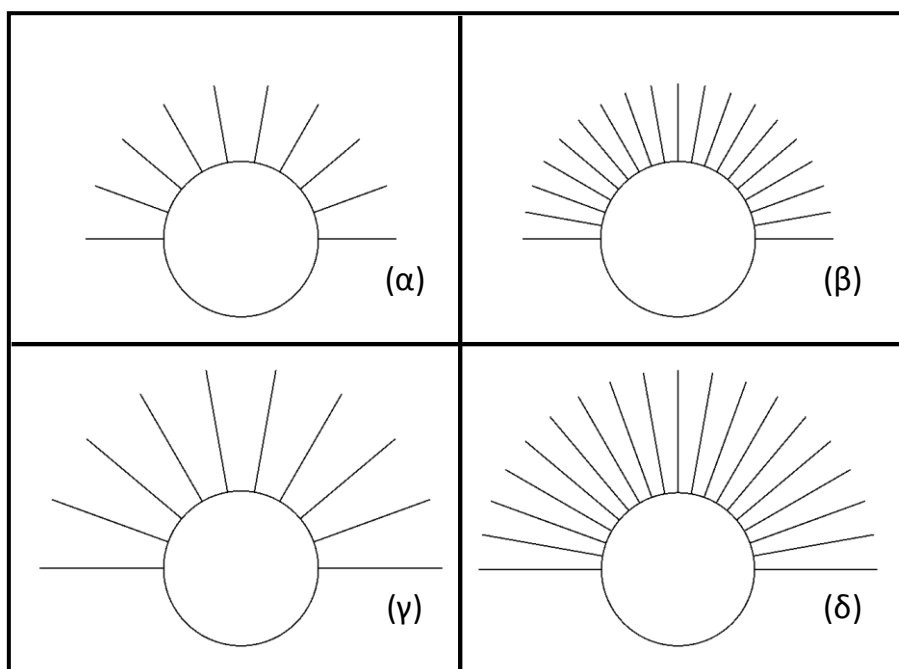


Όσον αφορά στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στην τελική επένδυση, αυτά απεικονίσθηκαν με γραμμικά στοιχεία δοκού, ορθογωνικής διατομής και μήκους 1m, και τοποθετήθηκαν περιμετρικά της σήραγγας.



**Εικόνα 4.3:** Διακριτοποίηση γραμμικών στοιχείων (παράθεση από το πρόγραμμα Abaqus)

Τέλος, τα αγκύρια προσομοιώθηκαν με γραμμικά, δικομβικά στοιχεία δικτυώματος μήκους 1m. Τα γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία των αγκυριών ομαδοποιήθηκαν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση αγκυριών 5 και 8 μέτρων, είτε σε πυκνή είτε σε αραιή διάταξη (Εικόνα 4.4).



**Εικόνα 4.4:** Δυνατές διατάξεις αγκυριών

Χρήσιμη κρίνεται στο σημείο αυτό η παρουσίαση δύο διαφορετικών συμβολισμών, σχετικά με τις πυκνότητες των καννάβων. Ο πρώτος συμβολισμός είναι με τη βοήθεια του λόγου  $s/R$ , όπου  $s$  είναι η εγκάρσια απόσταση του ενός αγκυρίου με το άλλο, στο επίπεδο της διατομής της σήραγγας, και  $R$  είναι η ακτίνα της κυκλικής διατομής της σήραγγας. Έτσι, στην περίπτωση του αραιού καννάβου έχουμε  $s/R=2/5=0.4$  και στην περίπτωση του πυκνού  $s/R=1/5=0.2$ . Ο δεύτερος συμβολισμός γίνεται με τη βοήθεια του δείκτη  $\rho$ , ο οποίος ισούται με τον αριθμό των αγκυρίων προς την επιφάνεια επιρροής τους. Να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι τα αγκύρια τοποθετούνται ανά 1m στη διαμήκη διεύθυνση της σήραγγας. Στην περίπτωση, λοιπόν, του αραιού καννάβου έχει τοποθετηθεί ένα αγκύριο σε επιφάνεια επιρροής  $2m^2$ , επομένως  $\rho=0.5$  αγκύρια/ $m^2$ . Αντίστοιχα, στην περίπτωση του πυκνού καννάβου  $\rho=1.0$  αγκύρια/ $m^2$ .

Στο σημείο αυτό αξίζει να τονισθεί η διπλή χρησιμότητα των βοηθητικών κύκλων με ακτίνες 6-13m. Εκτός της προφανούς χρησιμότητας, που αναφέρθηκε και παραπάνω και αφορά στη σταδιακή αραιώση του καννάβου, οι βοηθητικοί κύκλοι βοήθησαν και στην ακριβή διακριτοποίηση των αγκυρίων σε πεπερασμένα στοιχεία του ενός μέτρου.

Στη συνέχεια, για την πραγματοποίηση των αναλύσεων στο πρόγραμμα Abaqus ήταν επιτακτική η ανάγκη να οριστεί η διεπιφάνεια μεταξύ βραχόμαζας και εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Αυτή η ανάγκη δημιουργήθηκε, διότι τα επιφανειακά στοιχεία της βραχόμαζας και τα γραμμικά στοιχεία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ορίζονταν από τους ίδιους κόμβους. Αυτό το πρόβλημα ξεπεράστηκε με την εξής διαδικασία: ορίστηκαν νέοι κόμβοι για το εκτοξευόμενο σκυροδέμα, οι οποίοι έχουν διαφορετική αρίθμηση αλλά κοινές συντεταγμένες με αυτούς της βραχόμαζας. Έτσι, ενώ τα γραμμικά στοιχεία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος "πατάνε" σε διαφορετικούς κόμβους από αυτά της βραχόμαζας, ουσιαστικά καταλήγουν στα ίδια γεωμετρικά σημεία.

Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθήθηκε και για τη δημιουργία της διεπιφάνειας μεταξύ βραχόμαζας και τελικής επένδυσης.

Η κατασκευή των διεπιφανειών αυτών αποσκοπεί, κατά πρώτον, στην εύκολη εναλλαγή μεταξύ των διαφορετικών γραμμικών στοιχείων (είτε εκτοξευόμενο σκυροδέμα είτε τελική επένδυση), ανάλογα και με το βήμα της προσομοίωσης, στο οποίο βρισκόμαστε. Κατά δεύτερον, είναι δυνατό με τον τρόπο αυτό να παίρνουμε αποτελέσματα στην αντίστοιχη διεπιφάνεια κάθε φορά, δηλαδή είτε εκτοξευόμενο σκυροδέμα είτε τελική επένδυση.

#### 4.1.1.3 Συνοριακές συνθήκες μοντέλου

Στη κάτω όριο (βάση) του μοντέλου τοποθετήθηκαν αρθρώσεις, έτσι ώστε να μην υπάρχει η δυνατότητα ανάπτυξης οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων στους κόμβους αυτούς. Επιπλέον, στις παρειές του μοντέλου τοποθετήθηκαν κυλίσεις, με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπονται οι μετακινήσεις μόνο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, χωρίς όμως να αναπτύσσονται διαμητικές τάσεις στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο, κοντά στις κατακόρυφες παρειές.

### 4.1.2 Ορισμός υλικών μοντέλου και ιδιοτήτων τους

Για την καλύτερη οργάνωση του προβλήματος ορίστηκαν τα εξής υλικά: το υλικό της βραχόμαζας εκτός της σήραγγας, το υλικό της βραχόμαζας εντός της σήραγγας (υλικό εκσκαφής  $a'$  και  $\beta'$  φάσης), το υλικό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, το υλικό των αγκυρίων και το υλικό της τελικής επένδυσης. Για κάθε ένα από τα υλικά αυτά προσδιορίστηκαν και οι αντίστοιχες ιδιότητές του.

Πιο συγκεκριμένα, για το υλικό της βραχόμαζας στο εξωτερικό της σήραγγας ορίστηκαν ελαστοπλαστικές ιδιότητες με κριτήριο αστοχίας Drucker-Prager. Με τον τρόπο που φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, καθορίζονται το μέτρο ελαστικότητας και οι παράμετροι  $\beta$  και  $d$  του κριτηρίου Drucker-Prager της περιβάλλουσας βραχόμαζας.

```

**
** m_outrock
**
**MATERIAL, NAME=M_OUTROCK
**
**DENSITY
2.5
**
**ELASTIC, TYPE=ISO
1060510.6, 0.3
**
**
**DRUCKER PRAGER
50.01, 1, 0
**DRUCKER PRAGER HARDENING, TYPE= SHEAR
85.04
**
**

```

**Εικόνα 4.5:** Ιδιότητες υλικού της βραχώμαζας στο εξωτερικό της σήραγγας

Για τα υλικά εκσκαφής  $\alpha'$  και  $\beta'$  φάσης ορίστηκαν ελαστικές ιδιότητες. Όπως είναι λογικό, οι αρχικές ιδιότητές τους είναι ίδιες με αυτές του υλικού της βραχώμαζας που βρίσκεται εξωτερικά της σήραγγας. Το μέτρο ελαστικότητας αυτού του υλικού απομειώνεται, για την περίπτωση της ολομέτωπης διάνοιξης, σταδιακά στα τρία πρώτα βήματα, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα.

```

**
**
** m_afasi
**
**MATERIAL, NAME=M_AFASI
**
**DENSITY
2.5
**
**ELASTIC, DEPENDENCIES=1
1060510.56, 0.3 ,,0
1060510.56, 0.3 ,,1
361255.26, 0.3 ,,2
20, 0.3 ,,3
20, 0.3 ,,4
20, 0.3 ,,5
**
**USER DEFINED FIELD
**
**DEPVAR
1,
**
**

```

**Εικόνα 4.6:** Ιδιότητες υλικού εκσκαφής  $\alpha'$  και  $\beta'$  φάσης

Για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ορίστηκε, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 4.7, ο δείκτης Poisson ( $\nu=0.2$ ) και το μέτρο ελαστικότητάς ( $E=20\text{GPa}$ ).

```

**
**
** m_shot
**
**MATERIAL, NAME=M_SHOT
**
**DENSITY
2.5,
**
**ELASTIC, TYPE=ISO
20000000, 0.20
**
**

```

**Εικόνα 4.7:** Ιδιότητες υλικού εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Για την τελική επένδυση ορίστηκαν, όπως και για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ο δείκτης Poisson ( $\nu=0.2$ ) και το μέτρο ελαστικότητας ( $E=29\text{GPa}$ ).

```

**
**
** m_fl
**
**MATERIAL, NAME=M_FL
**
**DENSITY
**      2.5,
**
**ELASTIC, TYPE=ISO
**      290000000,      0.2
**
**

```

**Εικόνα 4.8:** Ιδιότητες υλικού τελικής επένδυσης

Για τα αγκύρια ορίστηκαν η αντοχή του χάλυβα (χάλυβας S500), το μέτρο ελαστικότητας ( $E=200\text{GPa}$ ) και ο δείκτης Poisson ( $\nu=0.3$ ).

```

**
**
** m_agk
**
**MATERIAL, NAME=M_AGK
**
**DENSITY
**      7.85,
**
**ELASTIC, TYPE=ISO
**      200000000,      0.30
**
**
**PLASTIC
**      500000
**
**

```

**Εικόνα 4.9:** Ιδιότητες υλικού αγκυρίων βράχου

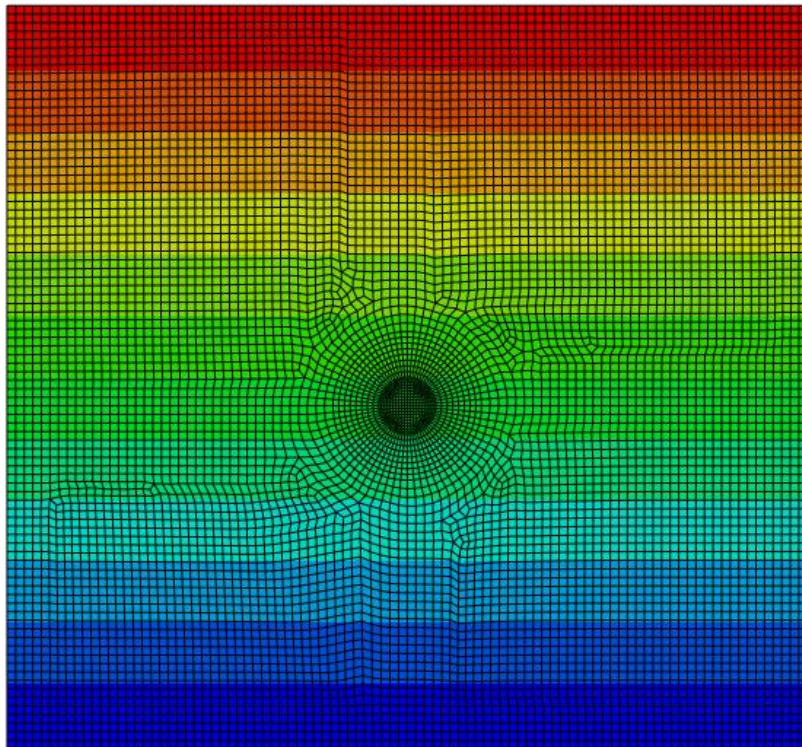
### 4.1.3 ΒΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά τα βήματα προσομοίωσης των αριθμητικών αναλύσεων, για την περίπτωση της ολομέτωπης διάνοιξης της σήραγγας.

#### 4.1.3.1 Βήμα 1: Γεωστατική κατάσταση

Στο βήμα αυτό, δίνονται οι αρχικές γεωστατικές συνθήκες (initial conditions) και ο συντελεστής γεωστατικών ωθήσεων  $K$  της βραχώμαζας. Κατ' αυτό τον τρόπο καθορίζεται η πίεση που ασκείται στην κορυφή του μοντέλου και η οποία προέρχεται από το υπερκείμενο γεωυλικό που τυχόν βρίσκεται άνω των 70 μέτρων. Επίσης, αποτυπώνεται ξεκάθαρα η κατά το βάθος μεταβολή των γεωστατικών τάσεων.

Στην προκειμένη περίπτωση (Εικόνα 4.11), ο συντελεστής γεωστατικών ωθήσεων είναι ίσος με τη μονάδα ( $K=1$ ) και το ύψος των υπερκείμενων γαιών είναι 100 μέτρα. Έτσι προκύπτει η πίεση των 750kPa στην κορυφή του μοντέλου, η οποία προέρχεται επί της ουσίας από τα 30 μέτρα που δεν αποτυπώνονται στο μοντέλο.



**Εικόνα 4.10: Κατανομή οριζόντιων τάσεων στη γεωστατική κατάσταση**

Στη συνέχεια, στο γεωστατικό-πρώτο βήμα δίνεται η βαρύτητα στο γεωυλικό και αφαιρούνται, προς το παρόν τουλάχιστον, τα υλικά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, των αγκυρίων και της τελικής επένδυσης. Αυτό συμβαίνει καθώς αρχικά υφίσταται ως υλικό μόνο το γεωυλικό της βραχώμαζας.

Ο καθορισμός των γεωστατικών συνθηκών στο μοντέλο πραγματοποιείται σε δύο βήματα (initial conditions - step 1), γιατί πρέπει στη γεωστατική κατάσταση οι παραμορφώσεις του γεωυλικού να είναι μηδενικές.

```

** *****
** ***** INITIAL CONDITIONS *****
** *****
**
** INITIAL CONDITIONS,TYPE=STRESS,GEOSTATIC
G_SOIL,-750,70,-4000,-60,1.0
**
** *****
** ***** ORISMOS STEPS *****
** *****
**
** @@@@@@@@@@@@@@ STEP1 @@@@@@@@@@@@@@
**
**
** STEP
** GEOSTATIC
**
** DLOAD
G_SOIL, GRAV, 10, 0, -1, 0
**
**
** pressure
**
** DLOAD
PRESSURE, P1,          750.
PRESSU_1, P2,          750.
**
**
**
** MODEL CHANGE, REMOVE
G_BAR
P_FL
**

```

**Εικόνα 4.11: 1ο Βήμα προσομοίωσης**

#### 4.1.3.2 Βήμα 2: Αποτόνωση βραχόμαζας εντός της διατομής της σήραγγας

Στο βήμα αυτό πραγματοποιείται η αποτόνωση της βραχόμαζας που έχει λάβει χώρα στη διατομή που μελετάται, προτού το μέτωπο εκσκαφής φτάσει σ' αυτή. Η αποτόνωση του γεωλίκου εντός της διατομής της σήραγγας προσομοιώνεται με την απομείωση του μέτρου ελαστικότητας του, όπως αυτή έχει περιγραφεί στην παράγραφο 3.3.3.

#### 4.1.3.3 Βήμα 3: Εκσκαφή σήραγγας και τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης

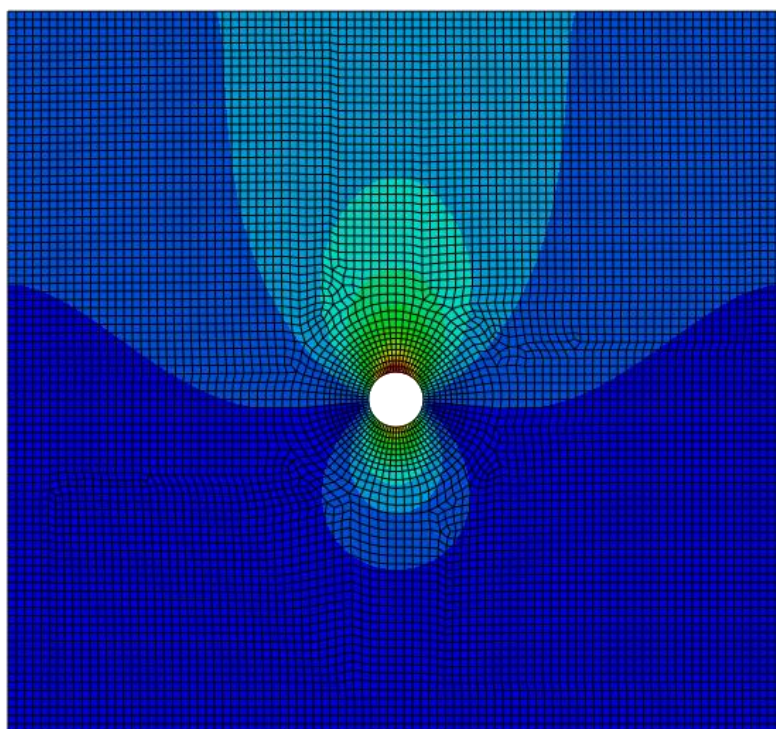
Στο τρίτο κατά σειρά βήμα των αναλύσεων, το μέτρο ελαστικότητας του υλικού στο εσωτερικό της σήραγγας έχει πρακτικά μηδενιστεί (20kPa), ώστε να προσομοιωθεί η εκσκαφή της σήραγγας. Επιπλέον, τοποθετούνται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης και δίνεται σε αυτά βαρύτητα. Στην προκειμένη περίπτωση τοποθετείται μόνο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα χωρίς καμία διάταξη αγκυρίων.

```

** @@@@@@@@@@@@@@ STEP3 @@@@@@@@@@@@@@
**
**
*STEP, UNSYMM=YES, INC=10000000000
**
*STATIC
0.01,1,0.0000000001,0.2
**
**
*MODEL CHANGE, ADD
G_SHOTA
G_SHOTB
**G_AGK5_A
**G_AGK5_P
**G_AGK8_A
**G_AGK8_P
**
**
*DLOAD
G_SHOTA, GRAV, 10, 0, -1, 0
G_SHOTB, GRAV, 10, 0, -1, 0
**G_AGK5_A, GRAV, 10, 0, -1, 0
**G_AGK5_P, GRAV, 10, 0, -1, 0
**G_AGK8_A, GRAV, 10, 0, -1, 0
**G_AGK8_P, GRAV, 10, 0, -1, 0
**

```

Εικόνα 4.12: 3ο Βήμα προσομοίωσης



Εικόνα 4.13: Κατανομή μετατοπίσεων στο 3ο βήμα προσομοίωσης

#### 4.1.3.4 Βήμα 4: Κατασκευή τελικής επένδυσης σήραγγας

Στο βήμα αυτό, όπως φαίνεται και από την ακόλουθη εικόνα, κατασκευάζεται η τελική επένδυση της σήραγγας και δίνεται βαρύτητα στο υλικό της τελικής επένδυσης.

```

** @@@@@@@@@@@@@@@@ STEP4 @@@@@@@@@@@@@@@@
**
**
*STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000
**
*STATIC
0.01,1,0.0000000001,0.2
**
**
*MODEL CHANGE, ADD
P_FL
**
**
**
*DLOAD
P_FL, GRAV, 10, 0, -1, 0
**

```

**Εικόνα 4.14: 4ο Βήμα προσομοίωσης**

#### 4.1.3.5 Βήμα 5: Απενεργοποίηση μέτρων άμεσης υποστήριξης

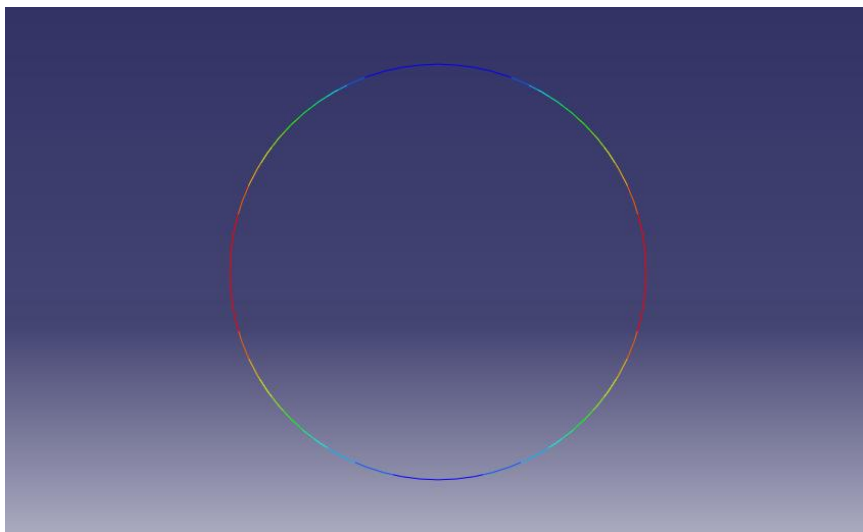
Στο πέμπτο και τελευταίο υπολογιστικό βήμα παύουν να λειτουργούν τα μέτρα άμεσης υποστήριξης και γι'αυτό το λόγο αφαιρούμε το υλικό των μέτρων που έχουμε τοποθετήσει στο 3<sup>ο</sup> βήμα προσομοίωσης.

```

** @@@@@@@@@@@@@@@@ STEP5 @@@@@@@@@@@@@@@@
**
**
*STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000
**
*STATIC
0.01,1,0.0000000001,0.2
**
**
*MODEL CHANGE, REMOVE
G_SHOTA
G_SHOTB
**G_AGK5_A
**G_AGK5_P
**G_AGK8_A
**G_AGK8_P
**

```

**Εικόνα 4.15: 5ο Βήμα προσομοίωσης**



**Εικόνα 4.16: Κατανομή πιέσεων επί της τελικής επένδυσης στο 5ο βήμα προσομοίωσης**

## 4.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Πριν την πραγματοποίηση των αριθμητικών αναλύσεων, προσδιορίζονταν συγκεκριμένες εδαφικές παράμετροι, όπως ο συντελεστής γεωστατικών ωθήσεων  $K$ , ο δείκτης αντοχής  $GSI$ , η αντοχή του άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη  $\sigma_{ci}$ . Επιπλέον καθοριζόταν τόσο το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $h_{sh}$  όσο και αυτό της τελικής επένδυσης  $h_{fl}$ .

Παράμετρος	Τιμές	Μονάδες μέτρησης
<b>H</b>	100	m
<b>K</b>	0.5, 1.0, 1.5	
<b>GSI</b>	10-50	
<b><math>\sigma_{ci}</math></b>	6-20	MPa
<b><math>m_i</math></b>	6, 10	
<b>D</b>	0	
<b><math>\gamma</math></b>	0.025	MN/m <sup>3</sup>
<b><math>\nu</math></b>	0.3	
<b><math>\nu_{sh}</math></b>	0.2	
<b><math>h_{sh}</math></b>	0.2, 0.4	m
<b><math>E_{sh}</math></b>	20000	MPa
<b><math>\nu_{fl}</math></b>	0.2	
<b><math>h_{fl}</math></b>	0.4, 0.6	m
<b><math>E_{fl}</math></b>	29000	MPa
<b>E</b>	244.95-4472.14	MPa
<b><math>E_{conf}</math></b>	3.18-1515.53	MPa
<b><math>\beta</math></b>	24.45-50.51	deg
<b>d</b>	0.097-0.612	MPa

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων  $\beta$  και  $d$  του κριτηρίου Drucker-Prager χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη διαδικασία, μέσω υπολογιστικών φύλλων Excel:

Αρχικά, υπολογίζονται οι σταθερές  $m_b$ ,  $s$  και  $a$  του κριτηρίου Hoek-Brown, με τη βοήθεια των σχέσεων (2-4), (2-5) και (2-6), οι οποίες χρησιμοποιούν τις παραμέτρους  $GSI$ ,  $m_i$  και  $D$ . Εν συνεχεία, μετατρέπονται οι παράμετροι του κριτηρίου Hoek-Brown σε ισοδύναμα μεγέθη συνοχής και γωνιάς εσωτερικής τριβής του κριτηρίου Mohr-Coulomb, με χρήση των σχέσεων (2-9)-(2-12). Τέλος, με χρήση των σχέσεων (2-13) και (2-14) της παραγράφου 2.3.3, υπολογίζουμε τις ισοδύναμες παραμέτρους του κριτηρίου Drucker-Prager.

Σε όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, το βήμα εκσκαφής θεωρήθηκε 1 μέτρο. Επιπλέον αξίζει να αναφερθεί ότι ο υπολογισμός του απομειωμένου μέτρου ( $E_{conf}$ ) έγινε με βάση τις καμπύλες Chern.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Αρχικά κρίθηκε σκόπιμη η ποιοτική επεξεργασία των αποτελεσμάτων ορισμένων ενδεικτικών αριθμητικών αναλύσεων. Έτσι, διατηρώντας κάθε φορά ορισμένες παραμέτρους των αναλύσεων σταθερές, μελετάται η επίδραση της παραμέτρου που μεταβάλλεται στα αποτελέσματα των αναλύσεων. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα που μελετώνται είναι: οι πλαστικές παραμορφώσεις - πλαστικές ζώνες γύρω από τη σήραγγα (PEMAG), οι συνολικές μετατοπίσεις των εδαφικών στοιχείων στο σύνολο του μοντέλου (U), οι πιέσεις επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (CPRESS) και οι τάσεις που αναπτύσσονται στα αγκύρια (S11).

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων, που αναφέρθηκαν παραπάνω, παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο μέσω εικόνων, όπως αυτές προκύπτουν από το πρόγραμμα Abaqus. Όμως, η σύγκριση των δύο τελευταίων αποτελεσμάτων (CPRESS και S11) παρουσιάζεται και με έναν επιπλέον τρόπο, μέσω διαγραμμάτων που κατασκευάστηκαν στο Excel. Στην παράγραφο που ακολουθεί περιγράφεται η λογική και ο τρόπος κατασκευής των διαγραμμάτων αυτών.

#### 5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΙΕΣΕΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

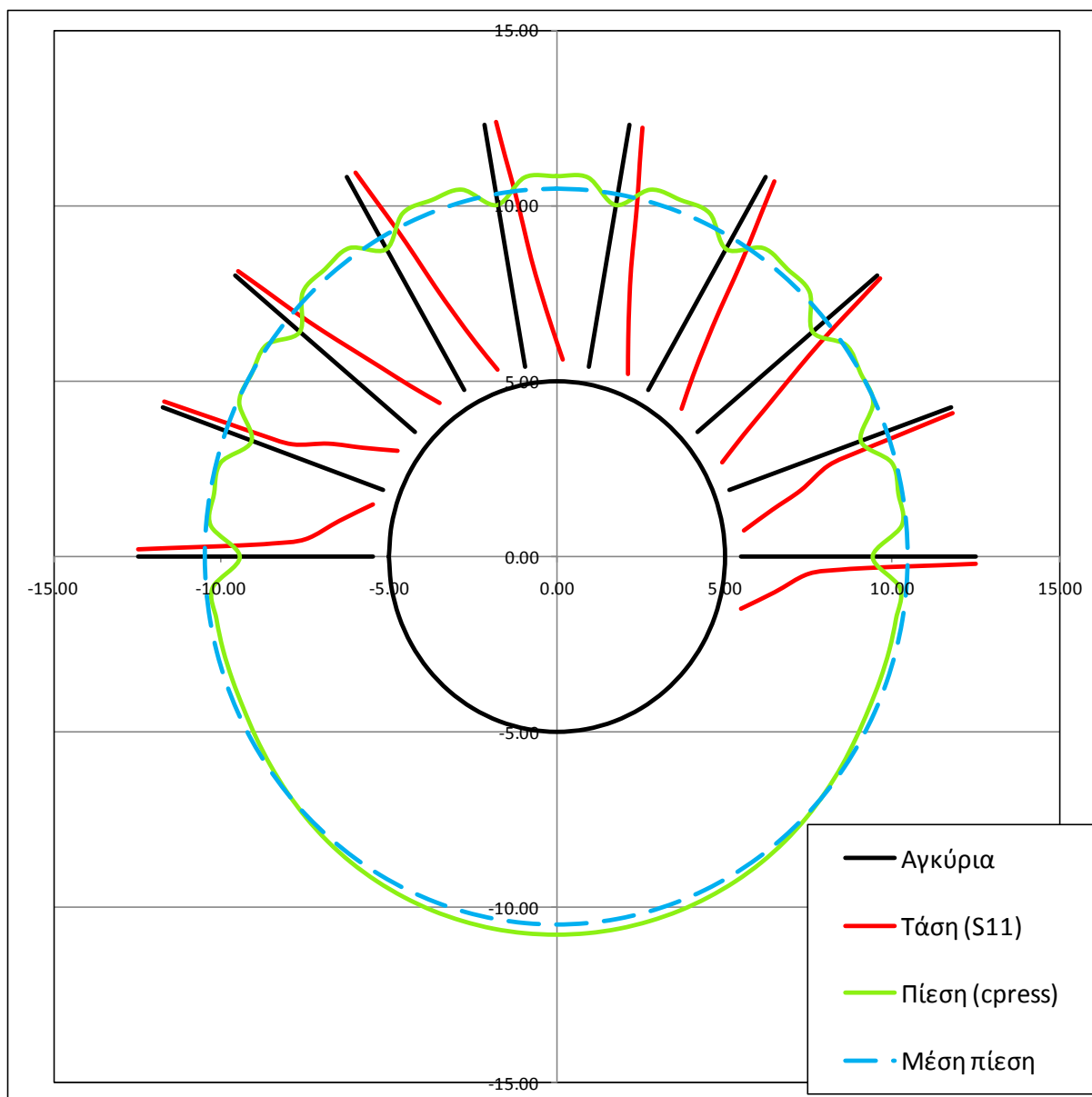
Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα 5.1) διακρίνονται με μαύρο χρώμα τα μέτρα άμεσης υποστήριξης, δηλαδή ο δακτύλιος εκτοξευόμενου σκυροδέματος διαμέτρου  $D=10\text{m}$  και, περιμετρικά του άνω τμήματος του δακτυλίου, τα αγκύρια βράχου μήκους  $8\text{m}$ . Εκ πρώτης όψεως, εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι τα αγκύρια βράχου φαίνεται να μην έρχονται σε επαφή με το δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η απόσταση αυτή οφείλεται εξ' ολοκλήρου στη λογική κατασκευής των συγκεκριμένων διαγραμμάτων

Για την ακρίβεια, τα αγκύρια βράχου, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, έχουν κατασκευαστεί ως γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία χωρίζονται σε στοιχειώδη τμήματα μήκους  $1\text{m}$ . Στο παρακάτω διάγραμμα, τα αγκύρια έχουν αποτυπωθεί ενώνοντας τα μέσα των στοιχειωδών αυτών πεπερασμένων στοιχείων. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, η αρχή του κάθε αγκυρίου, στο συγκεκριμένο διάγραμμα, βρίσκεται σε απόσταση  $0.5\text{m}$  από τη διατομή της σήραγγας και όχι σε άμεση επαφή μ' αυτήν.

Εν συνεχεία, σε κάθε στοιχειώδες τμήμα των αγκυρίων αντιστοιχίζεται ομοιοτρόπως η τάση που αναπτύσσεται σε αυτό και η οποία απεικονίζεται με μία συνεχή κόκκινη γραμμή. Επιπλέον, η πίεση που ασκείται σε κάθε σημείο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αποτυπώνεται στο διάγραμμα με τη συνεχή πράσινη γραμμή. Η πίεση αυτή είναι άμεσα συγκρίσιμη με τη μέση πίεση που ασκείται στο δακτύλιο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, η οποία διακρίνεται με την μπλε διακεκομμένη γραμμή. Η μέση πίεση επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος προκύπτει σαν η μέση τιμή των πιέσεων που αναπτύσσονται σε κάθε σημείο του δακτυλίου.

Σε κάθε περίπτωση, μία μονάδα μέτρησης των αξόνων (μμ.) αντιστοιχεί σε  $1$  μέτρο μήκους. Όμως, τόσο στις τάσεις όσο και στις πιέσεις, υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής της αντίστοιχης κλίμακας. Στην προκειμένη περίπτωση  $1\text{μμ.}$  αντιστοιχεί σε  $100000\text{kPa}$  τάσης αγκυρίων και σε  $200\text{kPa}$  πίεσης.

Με το διάγραμμα αυτό επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη απεικόνιση όλων των εντατικών μεγεθών που μας ενδιαφέρουν. Επιπλέον, αποτελεί μια προσπάθεια συσχέτισης των τάσεων που αναπτύσσονται στα αγκύρια με τις πιέσεις που αναπτύσσονται στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα. Είναι ευδιάκριτη εξάλλου η πτώση πίεσης στις θέσεις που έχουν τοποθετηθεί αγκύρια, πράγμα που σημαίνει ότι τα δύο αυτά μεγέθη είναι αλληλένδετα.



**Εικόνα 5.1:** Παρουσίαση διαγράμματος συσχέτισης πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τάσεων στα αγκύρια

## 5.2 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΓΕΩΣΤΑΤΙΚΩΝ ΩΘΗΣΕΩΝ (K)

Για τη μελέτη της επίδρασης του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων επιλέχθηκαν οι αναλύσεις 13\_a\_20324, 13\_a\_20544, 13\_a\_20754, οι οποίες έχουν αντίστοιχα  $K=0.5, 1, 1.5$ . Οι παράμετροι που δε μεταβάλλονται στις τρεις αυτές αναλύσεις είναι το πάχος του σκυροδέματος ( $h_{sh}=40\text{cm}$ ), οι ιδιότητες της βραχώμαζας ( $\sigma_{ci}=10\text{MPa}$ ,  $GSI=15$  και  $m_i=6$ ) και η διάταξη και το μήκος των αγκυρίων (επιλέχθηκε αραιή διάταξη αγκυρίων μήκους 8m).

## 5.2.1 Σύγκριση μέσω διαγραμμάτων-αποτελεσμάτων Abaqus

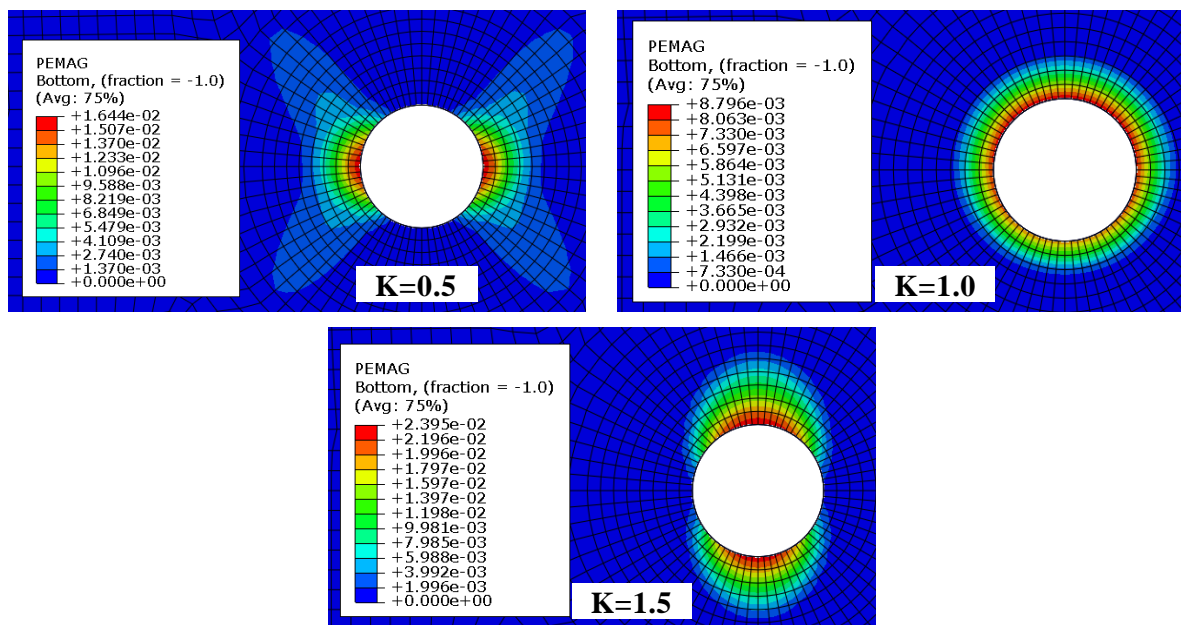
### ➤ Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG)

Όπως είναι γνωστό, στην οροφή της σήραγγας η κατακόρυφη τάση είναι ακτινική και η οριζόντια είναι εφαπτομενική. Αντίστοιχα, στις παρειές της σήραγγας η οριζόντια τάση είναι ακτινική και η κατακόρυφη εφαπτομενική. Επίσης από την Βραχομηχανική γνωρίζουμε πως, κατά τη διάνοιξη σήραγγων, μειώνονται οι ακτινικές ( $\sigma_r$ ) και αυξάνονται οι εφαπτομενικές τάσεις ( $\sigma_\theta$ ).

Στην περίπτωση που  $K=0.5 (<1.0)$ , η οριζόντια τάση είναι μικρότερη αρχικά από την κατακόρυφη ( $\sigma_{ho}=0.5\sigma_{vo}<\sigma_{vo}$ ). Αν αποτυπώσουμε τις τάσεις της οροφής και τις τάσεις των παρειών σε κύκλους Mohr, παρατηρούμε ότι ο κύκλος Mohr της οροφής "κλείνει", όσο "προχωράει" η εκσκαφή, αφού η διαφορά ( $\sigma_{vo}-\sigma_{ho}$ ), που είναι η διάμετρος του κύκλου Mohr, συνεχώς μειώνεται. Αντίστοιχα, ο κύκλος Mohr των παρειών συνεχώς "ανοίγει", μεγαλώνει δηλαδή η διάμετρος του. Επομένως, για  $K=0.5$  αναμένουμε ο κύκλος Mohr των παρειών να φτάσει πρώτος στο σημείο να εφάπτεται στην περιβάλλουσα αστοχίας, να αρχίσουν δηλαδή να αναπτύσσονται πρώτα σ' αυτή την περιοχή πλαστικές παραμορφώσεις. Περιμένουμε επομένως να αναπτυχθούν μεγαλύτερες πλαστικές παραμορφώσεις στις παρειές απ' ότι στο δάπεδο και στην οροφή της σήραγγας.

Απ' την άλλη, στην περίπτωση που  $K=1.5 (>1.0)$ , η οριζόντια τάση είναι μεγαλύτερη αρχικά από την κατακόρυφη ( $\sigma_{ho}=1.5\sigma_{vo}>\sigma_{vo}$ ). Με τη λογική που ακολουθήσαμε και παραπάνω, περιμένουμε ο κύκλος Mohr της οροφής (ή ισοδύναμα ο κύκλος Mohr του δαπέδου) να "φτάσει" πρώτος στην περιβάλλουσα αστοχίας. Αυτό συμβαίνει καθώς σ' αυτή την περιοχή, όσο προχωράει η εκσκαφή, η τιμή της διαφοράς ( $\sigma_{ho}-\sigma_{vo}$ ), που είναι τώρα η διάμετρος του κύκλου Mohr, όλο και αυξάνεται.

Συμπερασματικά, όταν ο συντελεστής γεωστατικών ωθήσεων λαμβάνει τιμή μικρότερη της μονάδας (π.χ.  $K=0.5$ ), αναμένουμε μεγαλύτερες τιμές πλαστικών παραμορφώσεων στην περιοχή των παρειών της σήραγγας και μεγαλύτερη έκταση της πλαστικής περιοχής. Μάλιστα, σε πολύ δυσμενείς συνθήκες για  $K=0.5$ , η πλαστική ζώνη μπορεί να αναπτυχθεί περιμετρικά της σήραγγας, σε σχήμα πεταλούδας. Αντίστοιχα, όταν ο συντελεστής γεωστατικών ωθήσεων λαμβάνει τιμή μεγαλύτερη της μονάδας (π.χ.  $K=1.5$ ), αναμένουμε οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις να κάνουν την εμφάνισή τους στην περιοχή της οροφής και του δαπέδου της σήραγγας.



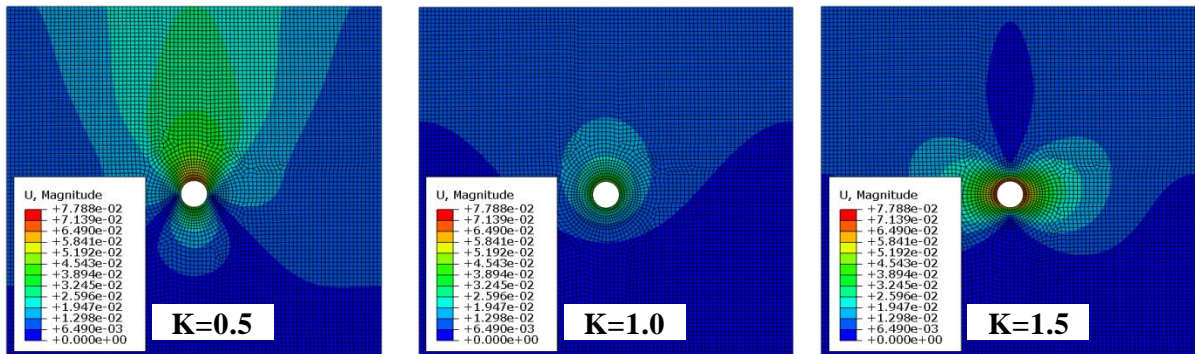
**Εικόνα 5.2:** Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων  $K=0.5, 1.0, 1.5$  ( $\sigma_{ci}=10\text{MPa}$ ,  $GSI=15$  και  $m_f=6$ )

Από την παραπάνω εικόνα παρατηρούμε ότι η αλλαγή του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων  $K$  επηρεάζει τη θέση της πλαστικής ζώνης καθώς και τις μέγιστες τιμές των πλαστικών παραμορφώσεων.

Πιο συγκεκριμένα, για  $K=0.5$  η πλαστική ζώνη αναπτύσσεται στις παρειές της διατομής της σήραγγας, ενώ για  $K=1.5$  στην οροφή και στο δάπεδο της διατομής της σήραγγας. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις δηλαδή, τα αποτελέσματα των αναλύσεων ανταποκρίνονται στη θεωρητική προσέγγιση που κάναμε παραπάνω. Στην τελευταία περίπτωση που ο συντελεστής γεωστατικών ωθήσεων ισούται με τη μονάδα, η πλαστική ζώνη αναπτύσσεται ομοιόμορφα γύρω από την περίμετρο της σήραγγας, με τις μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις να εμφανίζονται στην οροφή της σήραγγας. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις παρατηρούνται για  $K=1.5$  και οι μικρότερες για  $K=1$ .

### ➤ Συνολικές μετατοπίσεις (U)

Προκειμένου να είναι εύκολη η σύγκριση των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων σε κάθε περίπτωση της κάτωθι εικόνας, τα υπομνήματα των τριών σχημάτων έχουν τα ίδια ακρότατα.



**Εικόνα 5.3:** Κατανομή συνολικών μετατοπίσεων για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων  $K=0.5, 1.0, 1.5$  ( $\sigma_a=10\text{MPa}$ ,  $GSI=15$  και  $m_i=6$ )

Από την Εικόνα 5.3 παρατηρούμε ότι η μεταβολή του  $K$  επιφέρει διαφοροποιήσεις τόσο στον τρόπο κατανομής των μετατοπίσεων μέσα στο μοντέλο, όσο και στις θέσεις εμφάνισης των μέγιστων μετατοπίσεων γύρω από τη διατομή της σήραγγας.

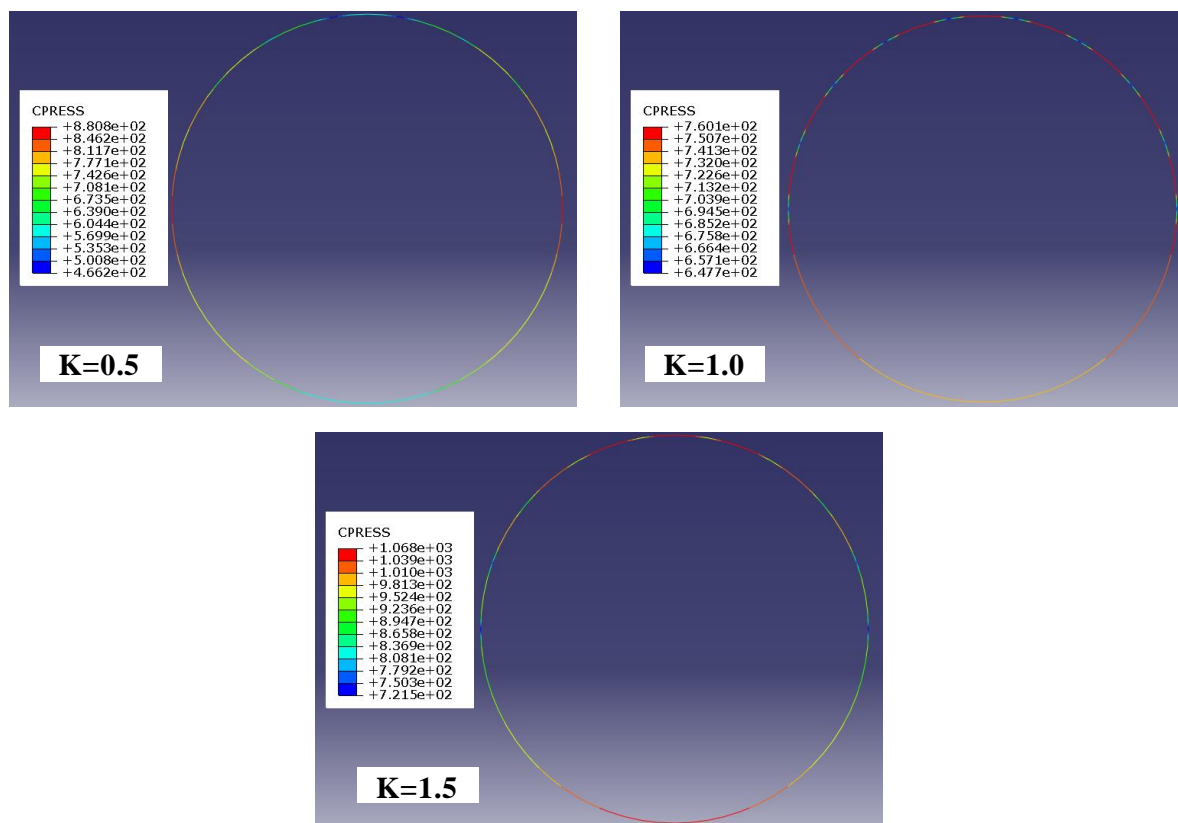
Ειδικότερα, στην περίπτωση που  $K=0.5$  οι μέγιστες μετατοπίσεις συγκεντρώνονται στην οροφή της σήραγγας. Όταν  $K=1.0$  οι μετατοπίσεις κατανέμονται σχετικά ομοιόμορφα γύρω από τη σήραγγα με τη μέγιστη τιμή τους όμως να εμφανίζεται στην οροφή της σήραγγας. Επίσης, στην περίπτωση αυτή είναι εμφανής η μείωση της μέγιστης τιμής των μετατοπίσεων. Τέλος, για την περίπτωση που  $K=1.5$ , οι μέγιστες μετατοπίσεις παρουσιάζονται στις παρειές της σήραγγας και είναι ξεκάθαρο πως οι μέγιστες τιμές των μετατοπίσεων εμφανίζονται σε αυτή την περίπτωση.

Παρατηρώντας τις δύο παραπάνω εικόνες (Εικόνα 5.2 και Εικόνα 5.3), διαπιστώνουμε πως οι μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις εμφανίζονται στις θέσεις όπου παρουσιάζονται οι ελάχιστες πλαστικές παραμορφώσεις και αντίστοιχα οι ελάχιστες εμφανίζονται στις θέσεις όπου παρουσιάζονται οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις.

Μια ακόμη διαπίστωση, που προκύπτει από την ποιοτική αυτή σύγκριση και η οποία χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, είναι το γεγονός ότι οι μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις εντοπίζονται, σε κάθε περίπτωση, στις περιοχές των μέγιστων ακτινικών τάσεων. Ειδικότερα, για  $K<1.0$  (εν προκειμένω  $K=0.5$ ) οι μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις παρατηρούνται στην οροφή και το δάπεδο της σήραγγας, καθώς  $\sigma_r^{\text{οροφής}} = \gamma H > 0.5\gamma H = \sigma_r^{\text{παρειάς}}$ . Αντίστοιχα, για  $K>1.0$  ( $K=1.5$ ) οι μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις εντοπίζονται στις παρειές της σήραγγας, εκεί δηλαδή που ισχύει  $\sigma_r^{\text{οροφής}} = \gamma H < 1.5\gamma H = \sigma_r^{\text{παρειάς}}$ .

### ➤ Πιέσεις στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα (CPRESS)

Στην περίπτωση μεταβολής του δείκτη γεωστατικών ωθήσεων, επηρεάζονται τόσο οι κατανομές των πιέσεων επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος όσο και οι μέγιστες τιμές αυτών, όπως φαίνεται και από το σχήμα που ακολουθεί.



**Εικόνα 5.4:** Κατανομή πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων  $K=0.5, 1.0, 1.5$  ( $\sigma_{ci}=10\text{MPa}$ ,  $GSI=15$  και  $m_i=6$ )

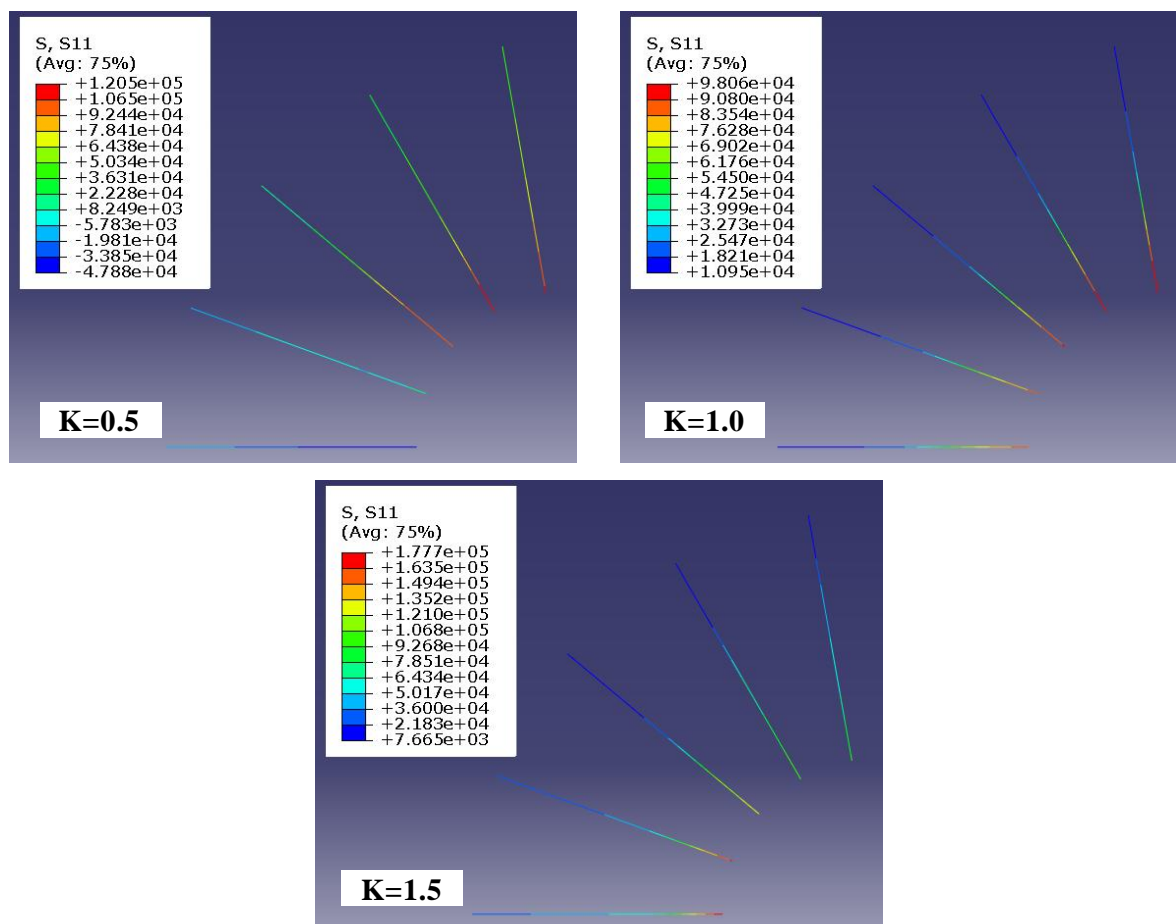
Στην πρώτη περίπτωση, όπου το  $K$  ισούται με 0.5, οι μεγαλύτερες πιέσεις ασκούνται στις παρειές της σήραγγας, στην περιοχή δηλαδή που εμφανίζονται οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις και αντίστοιχα οι ελάχιστες συνολικές μετατοπίσεις. Η αντιστοιχία αυτή πιέσεων-πλαστικών παραμορφώσεων-συνολικών μετατοπίσεων εμφανίζεται και στην περίπτωση που  $K=1.5$ , όπου δηλαδή οι μεγαλύτερες πιέσεις εμφανίζονται στην οροφή και το δάπεδο της σήραγγας. Στην τελευταία περίπτωση ( $K=1.0$ ), οι πιέσεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι ομοιόμορφα κατανομημένες περιμετρικά της σήραγγας, και μάλιστα το εύρος των τιμών τους είναι περιορισμένο σε σχέση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις. Σε κάθε περίπτωση, δηλαδή, οι μέγιστες πιέσεις επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ασκούνται στην περιοχή που αναπτύσσονται οι ελάχιστες συνολικές μετατοπίσεις.

Ένα ακόμη στοιχείο, που αξίζει να συγκρατήσει κανείς από την ποιοτική αυτή σύγκριση, είναι το γεγονός ότι στα σημεία επαφής αγκυρίου-εκτοξευόμενου σκυροδέματος παρατηρείται μια τοπική πτώση της πίεσης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Αυτό συμβαίνει διότι, στις συγκεκριμένες περιοχές, τα αγκύρια αναλαμβάνουν ποσοστό της πίεσης και της φόρτισης γενικότερα.

Τέλος, κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί πως οι μέγιστες τιμές πιέσεων επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος εμφανίζονται στην περίπτωση που το  $K$  ισούται με 1.5.

#### ➤ Τάσεις στα αγκύρια (S11)

Στην προκειμένη περίπτωση παρουσιάζονται τα μισά αγκύρια, καθώς τα αγκύρια στην αραιή διάταξη (αλλά και στην πυκνή) είναι συμμετρικά τοποθετημένα ως προς την κατακόρυφη που περνάει από το μέσο της σήραγγας. Επόμενο είναι λοιπόν, λόγω συμμετρίας, να έχουν και την ίδια φόρτιση.



**Εικόνα 5.5:** Κατανομή τάσεων στα ακύρια για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων  $K=0.5, 1.0, 1.5$  ( $\sigma_a=10\text{MPa}$ ,  $GSI=15$  και  $m_i=6$ )

Από την παραπάνω εικόνα προκύπτει ότι για  $K=0.5$  δεν ενεργοποιούνται όλα τα ακύρια. Πιο συγκεκριμένα, τα οριζόντια δεν ενεργοποιούνται καθ' όλο το μήκος τους ενώ τα αμέσως επόμενα ακύρια ενεργοποιούνται σε πολύ μικρό βαθμό, μόνο στο άκρο που έρχεται σε επαφή με τη σήραγγα. Επίσης, στην περίπτωση αυτή, η μέγιστη τάση εμφανίζεται στα ακύρια που βρίσκονται στην οροφή της σήραγγας.

Στις άλλες δύο περιπτώσεις, ενεργοποιούνται όλα τα ακύρια σ' όλο το μήκος τους, με τις μέγιστες τάσεις όμως να εμφανίζονται στην περιοχή επαφής των ακυρίων με τη σήραγγα. Ειδικότερα στην περίπτωση που  $K=1.0$ , η μέγιστη τάση εμφανίζεται στα ακύρια που βρίσκονται στην οροφή της σήραγγας και συγκριτικά με τις δύο άλλες περιπτώσεις, η διακύμανση των τιμών των τάσεων είναι αρκετά μικρή. Στην τελευταία περίπτωση ( $K=1.5$ ) η μέγιστη τάση αναπτύσσεται στα ακύρια της παρειάς και μάλιστα η τιμή της είναι αρκετά μεγαλύτερη συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις.

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, διαπιστώνουμε πως οι μέγιστες, σε κάθε περίπτωση, τάσεις αναπτύσσονται στις περιοχές που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες συνολικές μετατοπίσεις, εκεί δηλαδή που έχουν πραγματοποιηθεί οι μεγαλύτερες συγκλίσεις. Ως γνωστόν, εξάλλου, τα ακύρια αναπτύσσουν τόσο μεγαλύτερες αξονικές τάσεις, όσο μεγαλύτερες είναι οι παραμορφώσεις στις οποίες υπόκεινται.

Συσχετίζοντας την Εικόνα 5.4 με την Εικόνα 5.5, συμπεραίνουμε ότι οι μεγαλύτερες πτώσεις πιέσεων επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος παρατηρούνται στα σημεία που αναπτύσσονται οι μέγιστες τάσεις στα ακύρια. Ειδικότερα, για  $K=0.5$  ενεργοποιούνται περισσότερο τα ακύρια στην οροφή της σήραγγας και στην ίδια θέση παρατηρείται η μεγαλύτερη πτώση πίεσης στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα. Αντίστοιχα στην περιοχή των παρειών, που τα ακύρια δεν ενεργοποιούνται, δεν παρατηρείται η παραμικρή πτώση πίεσης στο δακτύλιο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Στην περίπτωση που  $K=1.5$  η μεγαλύτερη πτώση πίεσης παρατηρείται και πάλι στη θέση που τα ακύρια

αναπτύσσουν τη μικρότερη ένταση, δηλαδή στις παρειές της σήραγγας. Τέλος, για  $K=1.0$  η πτώση της πίεσης σε όλα τα σημεία επαφής αγκυρίου-εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι σχεδόν η ίδια, αφού η διακύμανση των τάσεων που αναπτύσσονται σ' αυτή την περίπτωση στα αγκύρια είναι πολύ μικρή και η κατανομή των πιέσεων επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ομοιόμορφη.

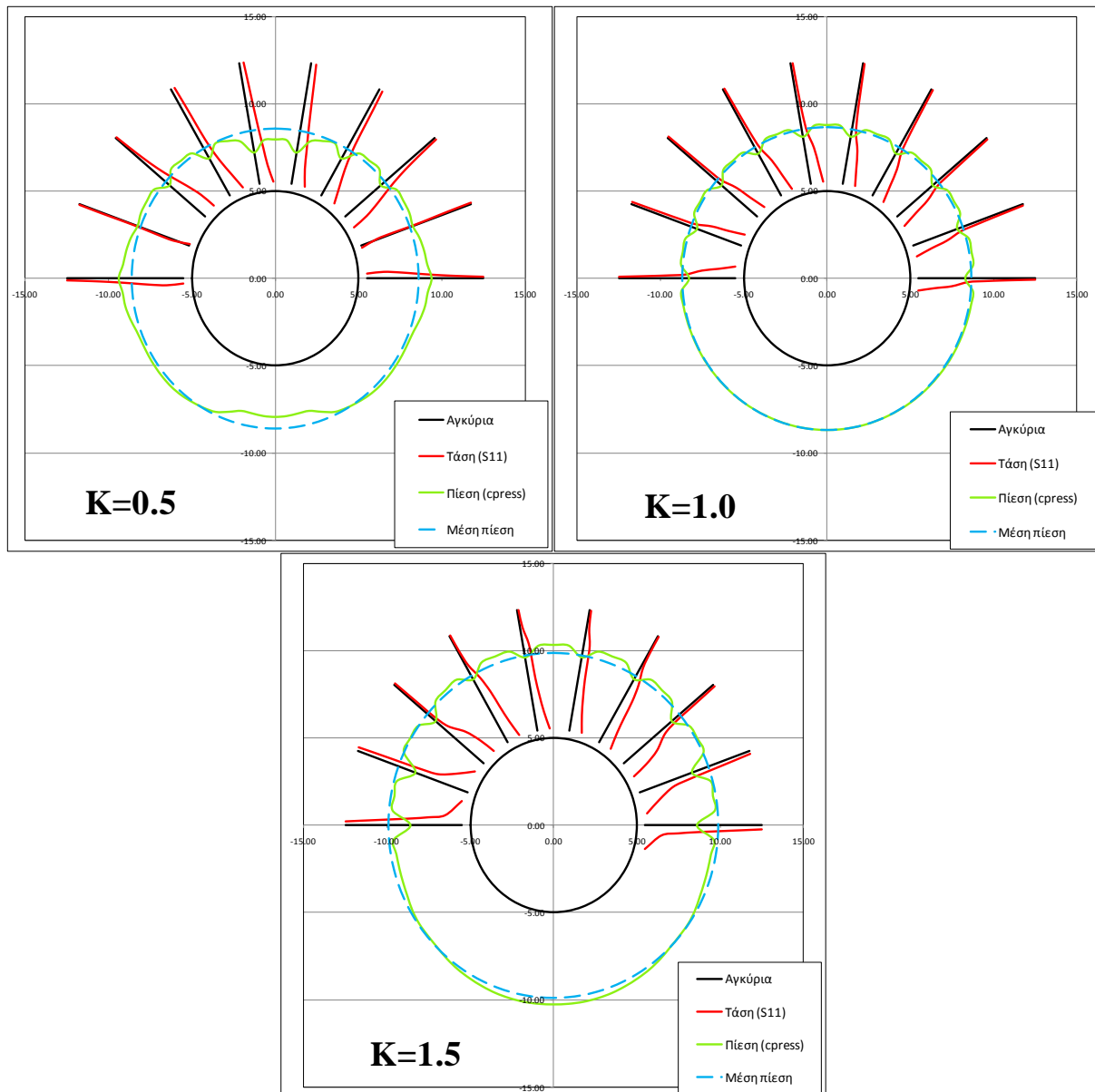
### 5.2.2 Σύγκριση μέσω διαγραμμάτων πιέσεων-τάσεων

Για να είναι πιο εύκολη η σύγκριση των μεγεθών που παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα, χρησιμοποιήθηκε κοινή κλίμακα τάσεων και πιέσεων, αντίστοιχα, και στις τρεις περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, μία μονάδα μήκους αντιστοιχεί σε 130000kPa τάσης αγκυρίων και 200kPa πίεσης επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Από την προκειμένη σύγκριση μπορούμε να πούμε ότι επαληθεύουμε τα συμπεράσματα της σύγκρισης μέσω των διαγραμμάτων από το πρόγραμμα Abaqus, που προηγήθηκε.

Εξετάζοντας, αρχικά, την περίπτωση όπου ο συντελεστής γεωστατικών ωθήσεων είναι μικρότερος της μονάδας ( $K=0.5$ ), παρατηρούμε πως η κατανομή της πίεσης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή στις περιοχές των παρειών της σήραγγας. Αντίθετα, στην περίπτωση που  $K=1.5$ , η μέγιστη τιμή της πίεσης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εμφανίζεται στην οροφή της σήραγγας. Στην τρίτη και τελευταία περίπτωση, όπου  $K=1.0$ , η κατανομή της πίεσης γύρω από τη σήραγγα είναι ομοιόμορφη χωρίς μεγάλες αυξομειώσεις των τιμών της. Αυτό φαίνεται και από το γεγονός ότι σε όλη την περίμετρο της σήραγγας η πίεση είναι πολύ κοντά στη μέση πίεση.

Από την ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 5.6) φαίνεται και η πτώση πίεσης που λαμβάνει χώρα στις θέσεις που τοποθετούνται τα αγκύρια βράχου. Επίσης, παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που  $K=0.5$  τα οριζόντια αγκύρια και τα αμέσως επόμενά τους δεν ενεργοποιούνται καθόλου. Τέλος, είναι ευδιάκριτο πως οι μεγαλύτερες τάσεις στα αγκύρια εμφανίζονται για  $K>1.0$  (εν προκειμένω  $K=1.5$ ), περίπτωση στην οποία τα αγκύρια λειτουργούν πιο κοντά στην τάση διαρροής τους.

Στοιχείο που αξίζει επίσης να κρατήσουμε είναι η γενικότερη αύξηση της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με την αύξηση του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων  $K$ , γεγονός που μας οδηγεί, με ενδείξεις, στο συμπέρασμα ότι η πίεση στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σχετίζεται, σε μεγάλο βαθμό με τη μέση πίεση  $p_{0,mean}$ . Τέλος, σημαντικά συμπεράσματα αποτελούν η εμφάνιση των μέγιστων τάσεων και πιέσεων για  $K=1.5$  και η αντίστοιχη εμφάνιση των ελάχιστων τάσεων και πιέσεων για  $K=1.0$ . Η εμφάνιση των ελάχιστων τάσεων για  $K=1.0$  οφείλεται στις ελάχιστες κάμψεις που αναπτύσσονται στο δακτύλιο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, καθώς η πίεση που ασκείται από την περιβάλλουσα βραχώμαζα είναι σταθερή σε όλη την περίμετρο. Απ' την άλλη, οι ελάχιστες τάσεις στα αγκύρια, πάλι στην περίπτωση που  $K=1.0$ , οφείλονται στις πολύ μικρές παραμορφώσεις που εμφανίζονται γύρω από τη σήραγγα και έχουν σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη μικρών δυνάμεων, και επομένως και τάσεων, στα αγκύρια.



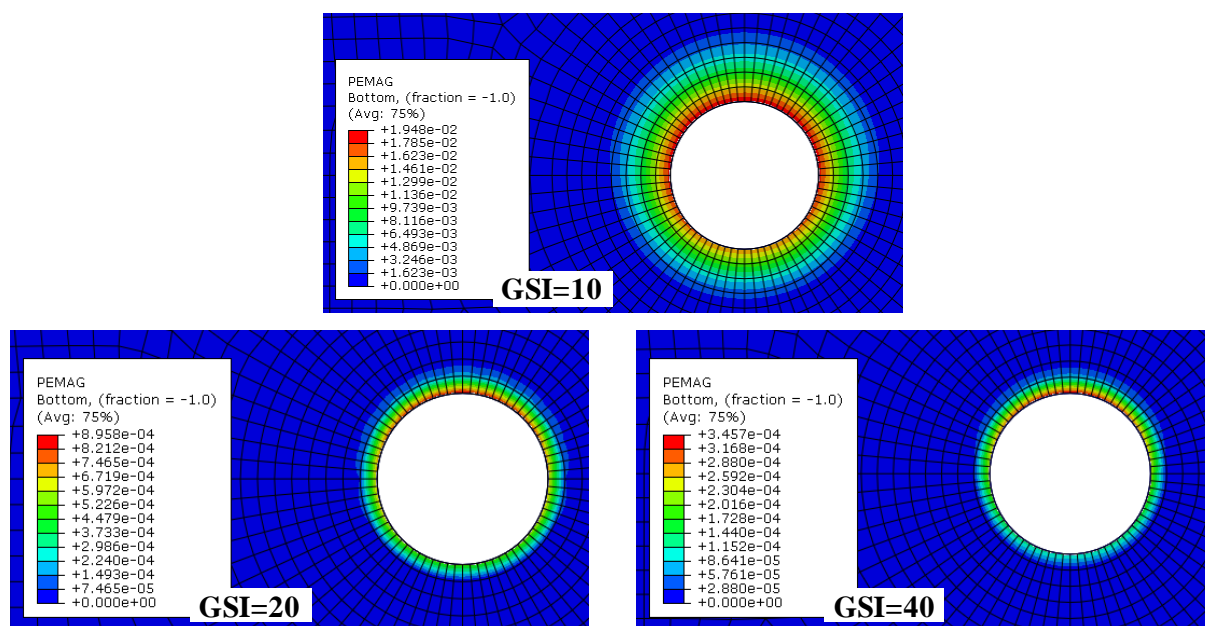
**Εικόνα 5.6:** Κατανομές πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τάσεων στα αγκύρια για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων  $K=0.5, 1.0, 1.5$  ( $\sigma_{ci}=10\text{MPa}$ ,  $GSI=15$  και  $m_i=6$ )

### 5.3 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Για τη μελέτη της επίδρασης της ποιότητας της βραχώμαζας επιλέχθηκαν οι αναλύσεις 13\_a\_20540 ( $\sigma_{ci}=8\text{MPa}$ ,  $GSI=10$ ,  $m_i=6$  και  $\sigma_{cm}/p_o=0.126$ ), 13\_a\_20551 ( $\sigma_{ci}=20\text{MPa}$ ,  $GSI=20$ ,  $m_i=6$  και  $\sigma_{cm}/p_o=0.493$ ), 13\_a\_20567 ( $\sigma_{ci}=20\text{MPa}$ ,  $GSI=40$ ,  $m_i=6$  και  $\sigma_{cm}/p_o=0.869$ ). Οι παράμετροι που δε μεταβάλλονται στις τρεις αυτές αναλύσεις είναι το πάχος του σκυροδέματος ( $h_{sh}=40\text{cm}$ ), ο συντελεστής γεωστατικών ωθήσεων ( $K=1.0$ ) και η διάταξη και το μήκος των αγκυρίων (επιλέχθηκε αραιή διάταξη αγκυρίων μήκους 8m).



➤ Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG)



**Εικόνα 5.7: Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις διαφορετικές ποιότητες βραχώμαζας με  $\sigma_{cm}/p_o=0.126, 0.493, 0.869$**

Αρχικά παρατηρούμε ότι η κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων και στις τρεις περιπτώσεις είναι η αναμενόμενη για  $K=1.0$ , δηλαδή οι πλαστικές παραμορφώσεις κατανέμονται ομοιόμορφα περιμετρικά της σήραγγας με τις μέγιστες τιμές τους να εμφανίζονται στην περιοχή της οροφής της σήραγγας.

Τα μόνα χαρακτηριστικά των κατανομών που μεταβάλλονται ανάλογα με την ποιότητα της βραχώμαζας είναι η έκταση της πλαστικής ζώνης και η μέγιστη τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε ότι όσο μικρότερη είναι η τιμή του δείκτη GSI (όσο δηλαδή χαμηλότερης ποιότητας είναι η βραχώμαζα), τόσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή που εκτείνεται η πλαστική ζώνη και τόσο μεγαλύτερη είναι η μέγιστη τιμή πλαστικής παραμόρφωσης.

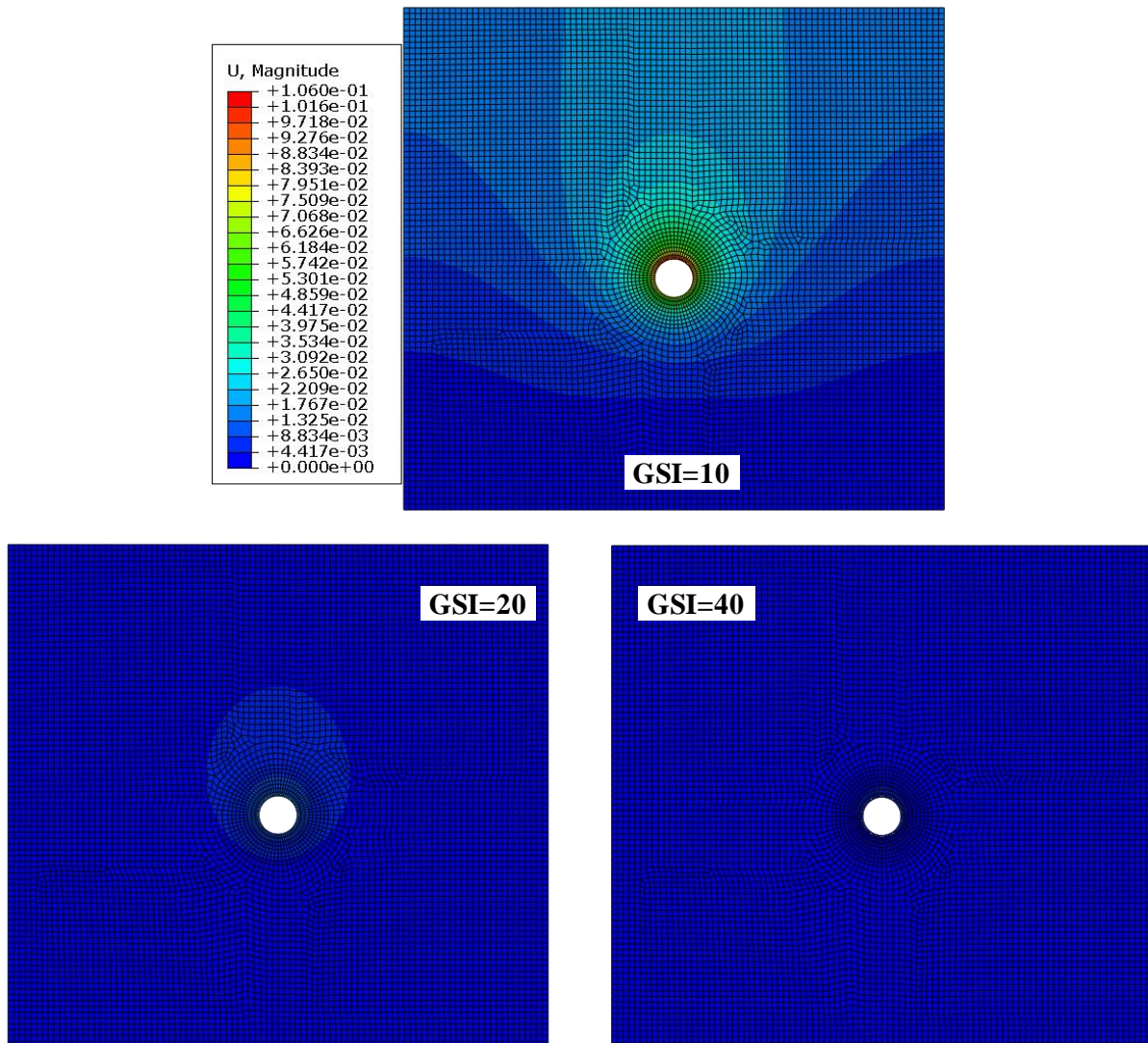
➤ Συνολικές μετατοπίσεις (U)

Για να είναι δυνατή η σύγκριση των μετατοπίσεων, στις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις βραχώμαζας, χρησιμοποιούμε ένα υπόμνημα, ορίζοντας ως μέγιστο και ελάχιστο όριο του υπομνήματος την αντίστοιχη μέγιστη και ελάχιστη τιμή που προκύπτει και από τις τρεις αναλύσεις.

Από την επεξεργασία των αναλύσεων, που επιλέχθηκαν, προκύπτει πως η έκταση της περιοχής του εδαφικού μοντέλου, που επηρεάζεται από τις μετατοπίσεις, παραμένει περίπου σταθερή ανεξαρτήτως της ποιότητας της βραχώμαζας. Επίσης, αμετάβλητοι παραμένουν τόσο ο τρόπος κατανομής των μετατοπίσεων στην έκταση του μοντέλου, όσο και η περιοχή εμφάνισης των μέγιστων τιμών των εκάστοτε μετατοπίσεων.

Ένας παράγοντας, που σχετίζεται με τις μετατοπίσεις και μεταβάλλεται με την ποιότητα της βραχώμαζας, είναι η μέγιστη τιμή αυτών. Αναλυτικότερα, για  $GSI=40$ , η μέγιστη μετατόπιση είναι πάρα πολύ μικρή σε σχέση με τη μέγιστη μετατόπιση, που παρατηρείται για  $GSI=10$ . Υποβαθμίζοντας την ποιότητα της βραχώμαζας, δηλαδή για  $GSI=20$ , αυξάνεται η τιμή της μέγιστης μετατόπισης, χωρίς όμως σε καμία περίπτωση να προσεγγίζει το μέγιστο όριο του υπομνήματος. Στην τελευταία περίπτωση, όπου ο δείκτης GSI ισούται με 10, οι μετατοπίσεις που παρατηρούνται γύρω από τη σήραγγα, και ειδικότερα γύρω από την οροφή αυτής, είναι κατά πολύ μεγαλύτερες των δύο προηγούμενων περιπτώσεων.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως, βελτιώνοντας την ποιότητα της βραχώμαζας, αυξάνεται η τιμή της μέγιστης μετατόπισης, η οποία κάθε φορά παρατηρείται στην περιοχή της οροφής της σήραγγας.

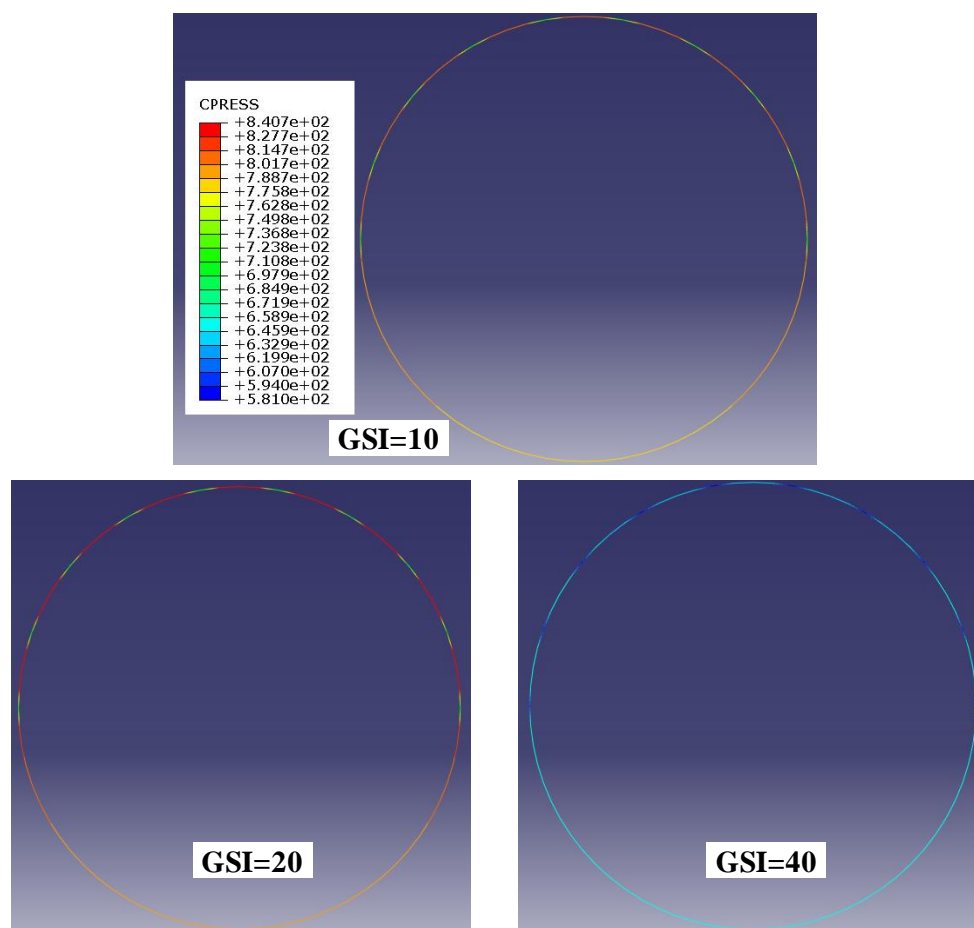


**Εικόνα 5.8:** Κατανομή συνολικών μετατοπίσεων για τρεις διαφορετικές ποιότητες βραχώμαζας με  $\sigma_{cm}/p_0=0.126, 0.493, 0.869$

➤ Πιέσεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (CPRESS)

Όπως είναι λογικό αναμένουμε η κατανομή των πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα να μη μεταβάλλεται με την ποιότητα της βραχώμαζας. Έτσι, προκειμένου να είμαστε σε θέση να συγκρίνουμε τις μέγιστες, για κάθε περίπτωση βραχώμαζας, πιέσεις, δημιουργήσαμε ένα κοινό υπόμνημα θέτοντας ως άνω και κάτω όριο αυτού τη μέγιστη και την ελάχιστη πίεση που προέκυψε και από τις τρεις αυτές ενδεικτικές αναλύσεις.

Από την ακόλουθη εικόνα διαπιστώνουμε ότι οι πιέσεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι ομοιόμορφα κατανομημένες περιμετρικά της σήραγγας, όπως δηλαδή περιμέναμε να συμβαίνει για  $K=1.0$ . Επίσης, αναμέναμε με τη βελτίωση της ποιότητας της βραχώμαζας να ελαττώνονται οι πιέσεις που ασκούνται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πράγμα που όντως παρατηρείται για αύξηση του δείκτη GSI από 10 ή 20 σε 40. Το αξιοπερίεργο όμως είναι το γεγονός ότι οι πιέσεις επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι μεγαλύτερες στη βραχώμαζα με GSI=20 απ' ότι σ' αυτή με GSI=10.



**Εικόνα 5.9: Κατανομή πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τρεις διαφορετικές ποιότητες βραχόμαζας με  $\sigma_{cm}/p_o=0.126, 0.493, 0.869$**

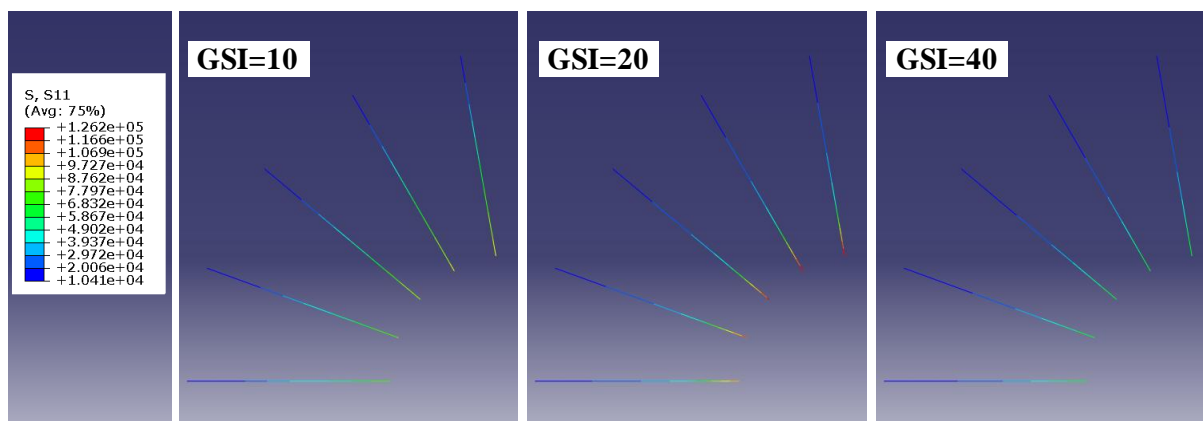
Μία πιθανή εξήγηση αυτού του φαινομένου προέρχεται από τις καμπύλες σύγκλισης αποτόνωσης και έχει ως εξής: Όσο χειρότερη είναι η ποιότητα της βραχόμαζας, τόσο ψηλότερα είναι η καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης, δηλαδή τόσο μεγαλύτερη είναι η γωνία  $\alpha$ , που φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Αν δηλαδή τοποθετηθούν τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης τη στιγμή που η σύγκλιση και στις δύο βραχόμαζες είναι η ίδια, τότε στη βραχόμαζα χαμηλότερης ποιότητας θα αντιστοιχεί μεγαλύτερη πίεση στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Στην περίπτωση όμως βραχόμαζας πολύ δυσμενών γεωτεχνικών συνθηκών ενδέχεται οι συγκλίσεις που θα έχουν πραγματοποιηθεί ως τη στιγμή τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης να είναι πολύ μεγάλες. Επομένως, το σημείο αφετηρίας βρίσκεται πιο δεξιά πάνω στον άξονα των συγκλίσεων  $u_R$ . Γι' αυτό το λόγο, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η πίεση στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα να είναι μικρότερη, τελικά, στην περίπτωση βραχόμαζας πολύ χαμηλής ποιότητας απ' ό,τι στην περίπτωση βραχόμαζας χαμηλής-μέτριας ποιότητας.

Επίσης, στην προκειμένη σύγκριση φαίνεται η πτώση πίεσης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις θέσεις επαφής του δακτυλίου εκτοξευόμενου σκυροδέματος με τα αγκύρια βράχου.

#### ➤ Τάσεις στα αγκύρια (S11)

Η κατανομή των τάσεων κατά μήκος των αγκυρίων είναι όμοια και για τις τρεις περιπτώσεις βραχόμαζας. Προκειμένου λοιπόν να είμαστε σε θέση να συγκρίνουμε τις μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται στα αγκύρια, δημιουργήσαμε ένα κοινό υπόμνημα, το οποίο έχει ως ακρότατα, τη μέγιστη και την ελάχιστη αντίστοιχα τάση των τριών αναλύσεων.



**Εικόνα 5.10: Κατανομή τάσεων στα αγκύρια για τρεις διαφορετικές ποιότητες βραχώμαζας με  $\sigma_{cm}/p_o=0.126, 0.493, 0.869$**

Και στις τρεις αναλύσεις της εικόνας ενεργοποιούνται όλα τα αγκύρια και μάλιστα σε όλο το μήκος τους. Όπως και στην περίπτωση των πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αναμέναμε με τη βελτίωση της ποιότητας της βραχώμαζας να μειώνονταν οι τάσεις στα αγκύρια. Διαπιστώνουμε όμως πως ότι ισχύει για τις πιέσεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, στις περιπτώσεις βραχώμαζας με GSI=10 και 20, ισχύει και για τις τάσεις στα αγκύρια.

## 5.4 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΑΓΚΥΡΙΩΝ

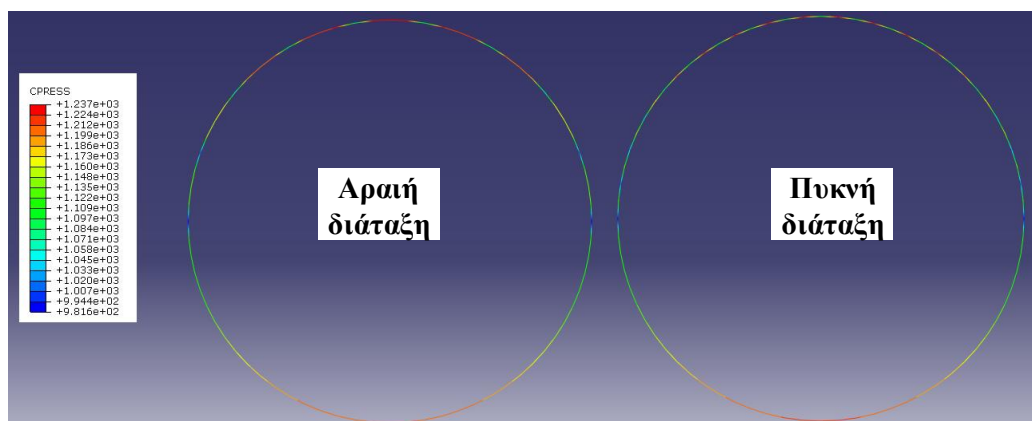
### 5.4.1 Σύγκριση μέσω διαγραμμάτων-αποτελεσμάτων Abaqus

Για τη μελέτη της επίδρασης της πυκνότητας των αγκυριών επιλέχθηκαν οι αναλύσεις 13\_a\_20749 και 14\_a\_20749, οι οποίες έχουν αντίστοιχα αραιή ( $s=2m$ ) και πυκνή ( $s=1m$ ) διάταξη αγκυριών μήκους 8 μέτρων. Οι παράμετροι που δε μεταβάλλονται στις τρεις αυτές αναλύσεις είναι το πάχος του σκυροδέματος ( $h_{shot}=40cm$ ), ο συντελεστής γεωστατικών ωθήσεων ( $K=1.5$ ) και οι ιδιότητες της βραχώμαζας ( $\sigma_{ci}=6MPa$ , GSI=10 και  $m_i=6$ ).

Στην περίπτωση μεταβολής της πυκνότητας των αγκυριών δεν επηρεάζονται οι μετατοπίσεις και οι πλαστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο εδαφικό μας προσομοίωμα. Γι' αυτό το λόγο θα σχολιαστούν μόνο οι μεταβολές που παρατηρούνται στις πιέσεις επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και στις τάσεις των αγκυριών.

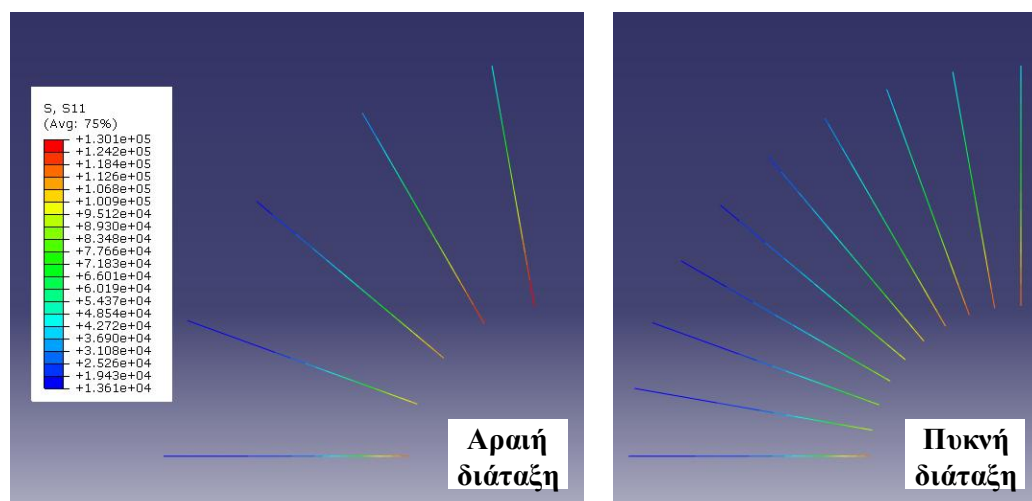
#### ➤ Πιέσεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (CPRESS)

Από την παρακάτω εικόνα προκύπτει πως ο τρόπος κατανομής των πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι ακριβώς ο ίδιος και στις δύο περιπτώσεις. Η μόνη διαφορά μεταξύ των δύο κατανομών εντοπίζεται στην περιοχή της οροφής της σήραγγας, η οποία στην περίπτωση της πυκνής διάταξης ( $s=1m$ ) "ανακουφίζεται" αρκετά σε σχέση με την περίπτωση της αραιής ( $s=2m$ ). Παρατηρούνται δηλαδή μικρότερες πιέσεις επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, στην περιοχή της οροφής της σήραγγας, γεγονός που πιθανώς οφείλεται στην πυκνότερη διάταξη των αγκυριών που συνεπάγεται και μεγαλύτερη δυνατότητα ανάληψης ποσοστού της φόρτισης.



**Εικόνα 5.11: Κατανομή πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα για δύο διαφορετικές διατάξεις αγκυρίων (αραιή-πυκνή) μήκους 8m ( $\sigma_{ci}=6\text{MPa}$ ,  $GSI=10$  και  $m_i=6$ )**

➤ Τάσεις στα αγκύρια (S11)

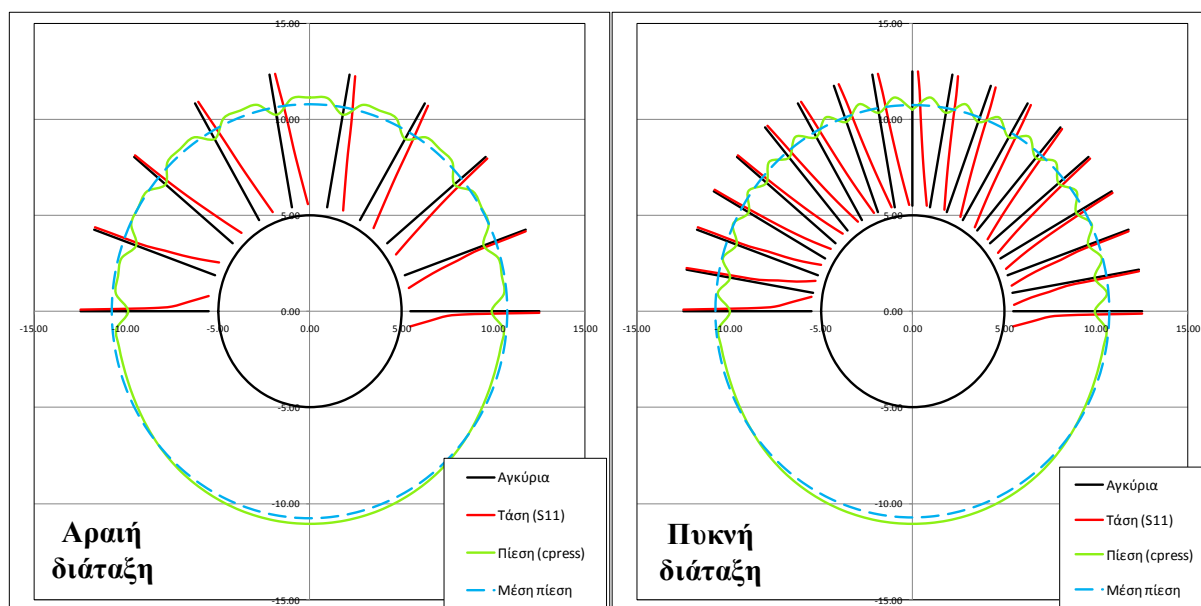


**Εικόνα 5.12: Κατανομή τάσεων στα αγκύρια για δύο διαφορετικές διατάξεις αγκυρίων (αραιή-πυκνή) μήκους 8m ( $\sigma_{ci}=6\text{MPa}$ ,  $GSI=10$  και  $m_i=6$ )**

Όπως προκύπτει από το παραπάνω σχήμα, η κατανομή των τάσεων κατά μήκος των αγκυρίων είναι όμοια και στις δύο περιπτώσεις. Όμως, στην αραιή διάταξη αναπτύσσονται μεγαλύτερες τάσεις στα αγκύρια, σε σύγκριση πάντα με την πυκνή διάταξη. Έτσι, λογικά προκύπτει η μέγιστη τάση στην περίπτωση της αραιής διάταξης αγκυρίων.

#### 5.4.2 Σύγκριση μέσω διαγραμμάτων πιέσεων-τάσεων

Προκειμένου να είναι άμεσα συγκρίσιμα τα μεγέθη των δύο διαγραμμάτων, επιλέχθηκε κοινή κλίμακα τάσεων και πιέσεων αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, μία μονάδα μήκους αντιστοιχεί σε 150000kPa τάσης αγκυρίων και 200kPa πίεσης επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



**Εικόνα 5.13: Κατανομές πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τάσεων στα αγκύρια για δύο διαφορετικές διατάξεις αγκυρίων (αραιή-πυκνή) μήκους 8m ( $\sigma_{ci}=6\text{MPa}$ ,  $\text{GSI}=10$  και  $m_i=6$ )**

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτή τη νέα σύγκριση έρχονται σε συμφωνία με αυτά της παραγράφου 5.4.1. Στην περίπτωση αυτή, όμως, φαίνεται καλύτερα το μέγεθος της τοπικής πτώσης πίεσης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στα σημεία που έχουν τοποθετηθεί αγκύρια.

Αρχικά αναφέρεται πως η μέση πίεση στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι περίπου η ίδια και στις δύο διατάξεις. Η δύναμη, όμως, που αναπτύσσεται στα κοινά αγκύρια είναι ελαφρώς μεγαλύτερη στην περίπτωση της αραιής διάταξης. Αντίθετα, η πίεση που αναλαμβάνει το κάθε αγκύριο είναι πολύ μεγαλύτερη (σχεδόν διπλάσια) στην πυκνή διάταξη. Αυτό οφείλεται, κατά πρώτον, στο γεγονός ότι η ζώνη επιρροής του κάθε αγκυρίου είναι διπλάσια στην περίπτωση της αραιής διάταξης και, κατά δεύτερον, στο ότι η πίεση που αναλαμβάνει το κάθε αγκύριο είναι αντιστρόφως ανάλογη του εμβαδού της ζώνης επιρροής. Επομένως, εύκολα συμπεραίνουμε πως η τοπική πτώση πίεσης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι κατά πολύ μεγαλύτερη στην περίπτωση της πυκνής διάταξης αγκυρίων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Μετά την ποιοτική επεξεργασία - σύγκριση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων στο κεφάλαιο που προηγήθηκε, παρατίθεται η ποσοτική επεξεργασία αυτών. Γίνεται, δηλαδή, στο παρόν κεφάλαιο μία προσπάθεια διερεύνησης και συσχέτισης διαφόρων μεγεθών μεταξύ τους. Όλη αυτή η διαδικασία συμβάλλει καθοριστικά στην εξαγωγή των συμπερασμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση κάποιων συμβολισμών που θα χρησιμοποιηθούν εκτενώς στην πορεία του κεφαλαίου αυτού.

#### 6.1 ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ ΜΕΓΕΘΩΝ

Αρχικά, στο υποκεφάλαιο αυτό, κρίνεται σκόπιμη η παράθεση - επεξήγηση ορισμένων συμβολισμών μεγεθών, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν εκτενώς στο συγκεκριμένο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

- $p_{sh,3}$  συμβολίζεται η πίεση επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όταν αυτό λειτουργεί σαν προσωρινή υποστήριξη. Ο αριθμός 3 επιλέγεται με βάση το γεγονός ότι στο συγκεκριμένο βήμα της προσομοίωσης τοποθετείται η άμεση υποστήριξη και στο τέλος αυτού του βήματος λαμβάνεται η συγκεκριμένη τιμή
- $p_{sh,4}$  συμβολίζεται η πίεση επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όταν αυτό λειτουργεί σαν τελική επένδυση
- $p_{sh,5}$  συμβολίζεται η πίεση επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όταν αυτό λειτουργεί σαν προσωρινή υποστήριξη, στις αριθμητικές αναλύσεις που η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Ο αριθμός 5 επιλέγεται με βάση το γεγονός ότι στο συγκεκριμένο βήμα της προσομοίωσης τοποθετείται η άμεση υποστήριξη και στο τέλος αυτού του βήματος λαμβάνεται η συγκεκριμένη τιμή
- $p_{sh,6}$  συμβολίζεται η πίεση επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όταν αυτό λειτουργεί σαν τελική επένδυση, στις αριθμητικές αναλύσεις που η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιείται σε δύο φάσεις.
- $p_{fl}$  συμβολίζεται η πίεση επί της τελικής επένδυσης
- $p_b^r = p_{sh,4} - p_{sh,3}$  συμβολίζεται η πραγματική πίεση που αναλαμβάνουν τα αγκύρια βράχου και η οποία προκύπτει, όπως φαίνεται και από την προηγηθείσα σχέση, ως η διαφορά της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όταν αυτό λειτουργεί ως άμεση υποστήριξη, από την πίεσή του, όταν αυτό παίζει το ρόλο της τελικής επένδυσης
- $p_b^{th}$  συμβολίζεται η πίεση που αναλαμβάνουν θεωρητικά τα αγκύρια βράχου. Υπολογίζεται ανάγοντας την αξονική δύναμη του αγκυρίου στην επιφάνεια επιρροής του.
- $p_t = p_{sh,3} + p_b^r$  συμβολίζεται η πίεση που αναλαμβάνουν τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης, δηλαδή τα αγκύρια βράχου και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μαζί
- $p_{sh,m}$  ή  $p_{fl,m}$  συμβολίζεται η μέση πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή της τελικής επένδυσης αντίστοιχα
- $p_{sh,min}$  ή  $p_{fl,min}$  συμβολίζεται η ελάχιστη πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή της τελικής επένδυσης αντίστοιχα

- $p_{sh,max}$  ή  $p_{fl,max}$  συμβολίζεται η μέγιστη πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή της τελικής επένδυσης αντίστοιχα
- $p_{sh,roof}$  ή  $p_{fl,roof}$  συμβολίζεται η πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή της τελικής επένδυσης, αντίστοιχα, στην οροφή της σήραγγας
- $p_{sh,side}$  ή  $p_{fl,side}$  συμβολίζεται η πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή της τελικής επένδυσης, αντίστοιχα, στην παρειά της σήραγγας
- $h_{sh}$  ή  $h_{fl}$  συμβολίζεται το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή της τελικής επένδυσης αντίστοιχα
- $K_{sh}$  ή  $K_{fl}$  συμβολίζεται η δυσκαμψία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή της τελικής επένδυσης αντίστοιχα

## 6.2 ΦΟΡΤΙΟ ΑΓΚΥΡΙΩΝ

Στο σύνολο των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν και στις οποίες ως μέτρα άμεσης υποστήριξης λειτουργούσαν, εκτός από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, και αγκύρια βράχου, έγινε μια θεωρητική προσέγγιση αναφορικά με το φορτίο-πίεση που αναλαμβάνουν τα αγκύρια βράχου ( $p_b$ ). Ο τρόπος προσδιορισμού της θεωρητικής  $p_b$  έχει ως εξής: αρχικά, παίρνουμε από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων την τάση που αναπτύσσεται στο κάθε αγκύριο. Πολλαπλασιάζοντας την τάση αυτή με το εμβαδό της διατομής του αγκυρίου προκύπτει η δύναμη που αναπτύσσεται στο κάθε ένα αγκύριο. Έπειτα, διαιρώντας τη δύναμη αυτή με την επιφάνεια επιρροής του κάθε αγκυρίου, προκύπτει η αντίστοιχη πίεση που αναλαμβάνει το κάθε αγκύριο. Από το μέσο όρο των πιέσεων αυτών προκύπτει η θεωρητική μέση πίεση των αγκυρίων ή αλλιώς το ανηγμένο αξονικό φορτίο των αγκυρίων ( $p_b^{th}$ ).

Προκειμένου να φανεί ξεκάθαρα η συμβολή των αγκυρίων στην ανάληψη των φορτίων αλλά και η εγκυρότητα της θεωρητικής προσέγγισης της πίεσης των αγκυρίων, πραγματοποιήθηκε ένα σύνολο 42 αριθμητικών αναλύσεων. Στις αναλύσεις αυτές ως μέτρα άμεσης υποστήριξης χρησιμοποιήθηκαν εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους  $h_{sh}=40\text{cm}$  και αγκύρια βράχου μήκους 8 μέτρων, τοποθετημένα τόσο σε πυκνή ( $s=1\text{m}$ ) όσο και σε αραιή διάταξη ( $s=2\text{m}$ ). Στη συνέχεια απενεργοποιήθηκαν τα αγκύρια βράχου. Κατ' αυτό τον τρόπο, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κλήθηκε να παίξει το ρόλο της τελικής επένδυσης, αναλαμβάνοντας εν τέλει το σύνολο των φορτίων.

Όπως προαναφέρθηκε, προτιμήθηκε πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος ίσο με 40 εκατοστά, από τα 20 εκατοστά. Η επιλογή αυτή οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στη μεγαλύτερη δυσκαμψία που προσφέρει το πάχος των 40 εκατοστών. Έτσι, μετά την απενεργοποίηση των αγκυρίων βράχου, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα θα είναι σε θέση να αναλάβει την επιπλέον φόρτιση, με αρκετά μικρότερες παραμορφώσεις.



```

**
** @@@@@@@@@@@@@@@@ STEP3 @@@@@@@@@@@@@@@@
**
**
**STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000
**
**STATIC
0.01,1,0.0000000001,0.2
**
**
**MODEL CHANGE, ADD
G_SHOTA
G_SHOTB
**G_AGK5_A
**G_AGK5_P
**G_AGK8_A
G_AGK8_P
**
**
**DLOAD
G_SHOTA, GRAV, 10, 0, -1, 0
G_SHOTB, GRAV, 10, 0, -1, 0
**G_AGK5_A, GRAV, 10, 0, -1, 0
**G_AGK5_P, GRAV, 10, 0, -1, 0
**G_AGK8_A, GRAV, 10, 0, -1, 0
G_AGK8_P, GRAV, 10, 0, -1, 0
**
**
**
** @@@@@@@@@@@@@@@@ STEP4 @@@@@@@@@@@@@@@@
**
**
**STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000
**
**STATIC
0.01,1,0.0000000001,0.2
**
**
**MODEL CHANGE, REMOVE
**G_SHOTA
**G_SHOTB
**G_AGK5_A
**G_AGK5_P
**G_AGK8_A
G_AGK8_P
**
**

```

**Εικόνα 6.1:** 3<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> Βήμα προσομοίωσης των αριθμητικών αναλύσεων, που σαν άμεση υποστήριξη έχουν εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου και σαν τελική επένδυση έχουν μόνο το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (στο 4<sup>ο</sup> βήμα)

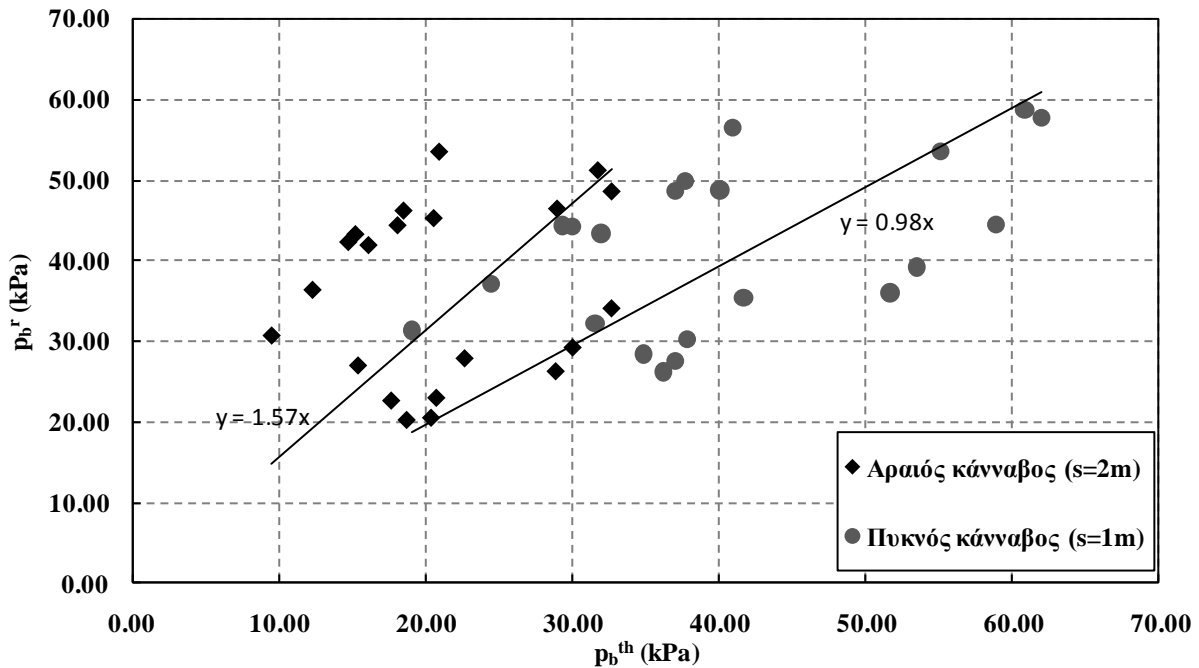
Με την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των παραπάνω αναλύσεων καλούμαστε να διερευνήσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια τη συμβολή των αγκυριών βράχου στην ανάληψη της φόρτισης, καθώς επίσης την εγκυρότητα και το ακριβές πεδίο εφαρμογής της θεωρητικής προσέγγισης που κάναμε.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί πως στο παρόν κεφάλαιο, η επεξεργασία θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τις μέσες πιέσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος ( $p_{sh,m}$ ). Προτιμήθηκε η χρήση της  $p_{sh,m}$ , καθώς η πίεση εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε άλλες θέσεις (όπως π.χ. στην οροφή ή στις παρειές της σήραγγας) δεν απεικονίζει επαρκώς και δεν περιγράφει στο σύνολό του το φαινόμενο που καλούμαστε να σχολιάσουμε.

### 6.2.1 Διερεύνηση της ισχύος της προσεγγιστικής μεθόδου εκτίμησης της πίεσης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια $p_b$

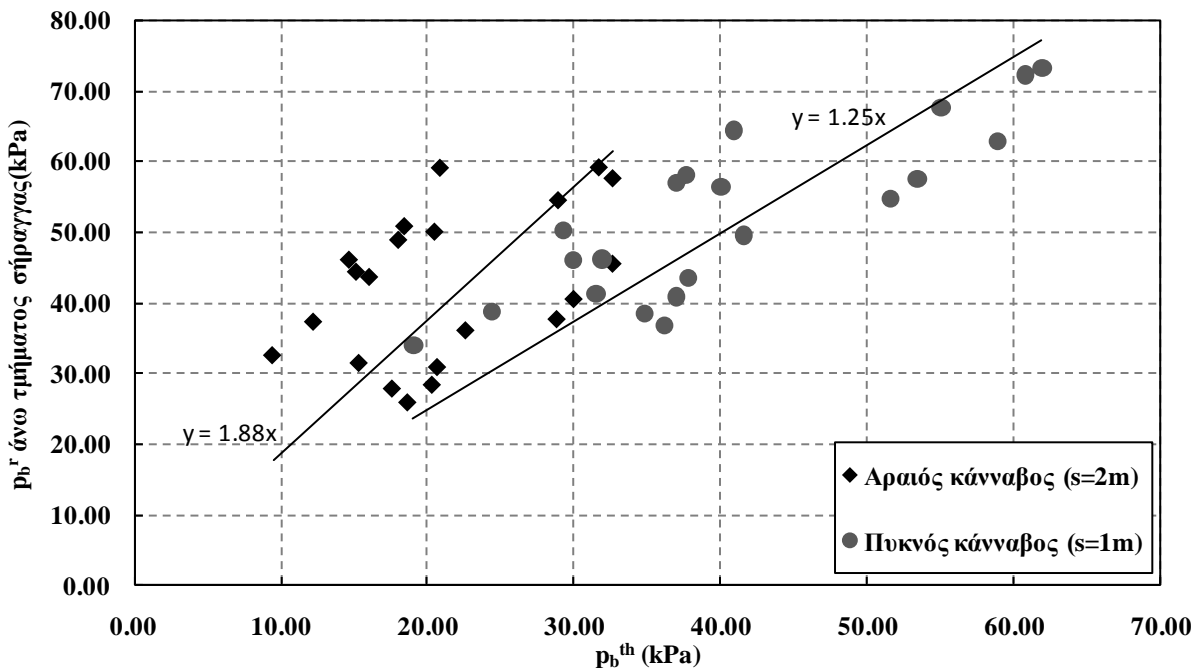
Αρχικά, γίνεται μια προσπάθεια συσχέτισης της θεωρητικής προσέγγισης της  $p_b$  με την πραγματική  $p_b$ . Η πραγματική πίεση των αγκυριών  $p_b^r$  προκύπτει ως η διαφορά της πίεσης που αναλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, όταν έχουν αφαιρεθεί τα αγκύρια και λειτουργεί σαν τελική επένδυση ( $p_{sh,4}$ ), μείον την πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος όταν αυτό λειτουργεί σαν άμεση υποστήριξη μαζί με τα αγκύρια βράχου ( $p_{sh,3}$ ). Απ' την άλλη ο τρόπος προσδιορισμού της θεωρητικής  $p_b$  περιγράφηκε αναλυτικά παραπάνω.

Μία πρώτη γενική παρατήρηση από το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.1) είναι το γεγονός ότι η θεωρητική προσέγγιση, που έγινε αναφορικά με την πίεση που αναλαμβάνουν τα αγκύρια, υποεκτιμά την πραγματική πίεση που αυτά αναλαμβάνουν, δηλαδή  $p_b^{th} < p_b^r$ . Επίσης, παρατηρούμε ότι η γραμμή τάσης του πυκνού καννάβου ( $s=1m$ ) σχεδόν συμπίπτει με την ευθεία  $x=y$  ενώ αυτή του αραιού καννάβου ( $s=1m$ ) απέχει πολύ από την ευθεία αυτή. Παρά το γεγονός αυτό, ακόμα και στην περίπτωση του πυκνού καννάβου ( $s=1m$ ) είναι ελάχιστες οι φορές που η θεωρητική πίεση των αγκυριών  $p_b^{th}$  ταυτίζεται με την πραγματική  $p_b^r$ . Υπάρχει, δηλαδή, μία διασπορά της τάξης των 10-15kPa.



Σχήμα 6.1: Συσχέτιση της θεωρητικής προσέγγισης της πίεσης των αγκυρίων  $p_b^{th}$  με την πραγματική  $p_b^r$

Στο σημείο αυτό ελέγχεται η υπόθεση: η θεωρητική προσέγγισή της  $p_b$  να ανταποκρίνεται περισσότερο στην πραγματικότητα στην περίπτωση που γίνει το ίδιο ακριβώς διάγραμμα, με τη διαφορά, όμως, ότι αυτή τη φορά οι πραγματικές  $p_b$  θα προκύπτουν μόνο από την άνω ημιδιατομή της σήραγγας. Αυτή η θεώρηση προκύπτει από το γεγονός ότι τα αγκύρια βράχου έχουν τοποθετηθεί στο άνω τμήμα της σήραγγας κι έτσι η απενεργοποίησή τους θα επηρεάζει, αν όχι αποκλειστικά, τουλάχιστον κατά κύριο λόγο το πάνω τμήμα αυτής. Αναμένουμε, δηλαδή, η ανακατανομή των πιέσεων, που οφείλεται στην απενεργοποίηση των αγκυρίων, να επηρεάζει ως επί το πλείστον το άνω τμήμα της σήραγγας. Με βάση αυτό το σκεπτικό αποφασίστηκε η κατασκευή του ακόλουθου διαγράμματος.



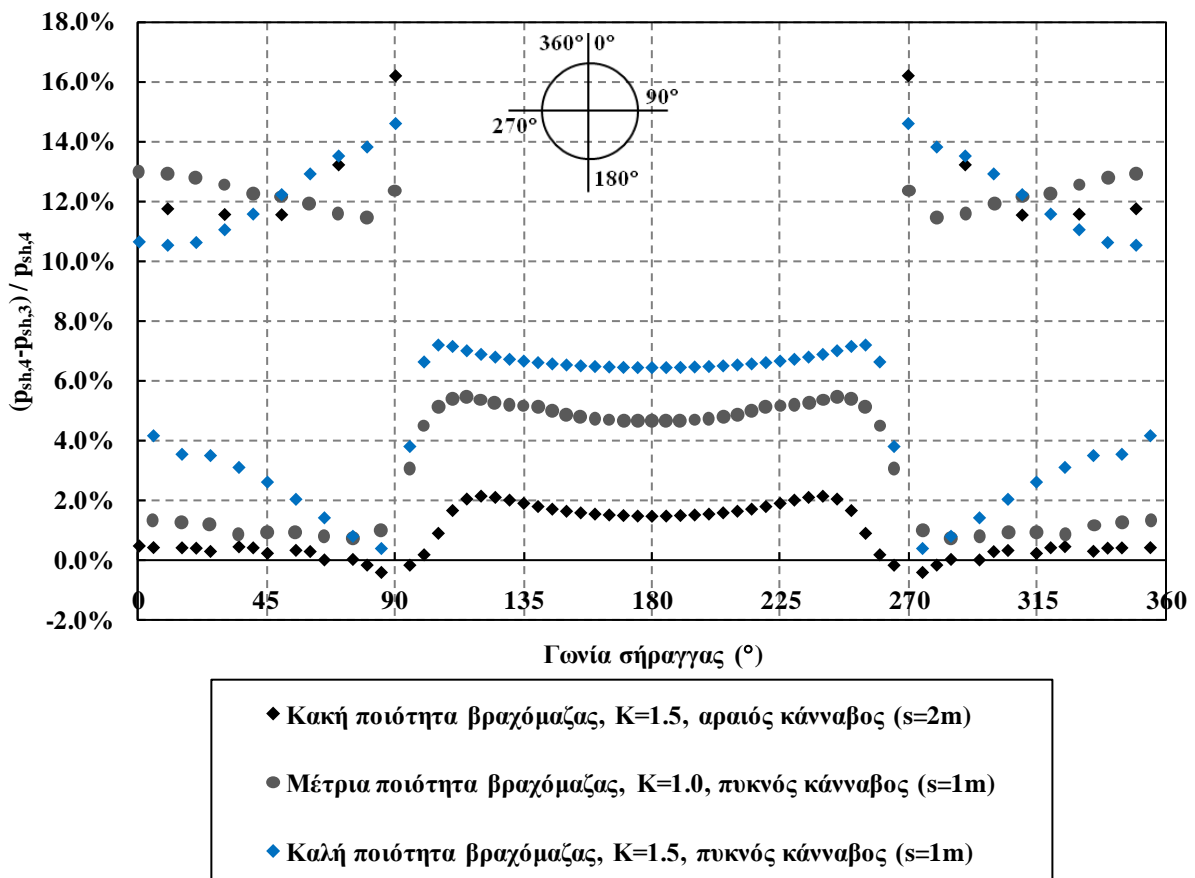
Σχήμα 6.2: Συσχέτιση της θεωρητικής προσέγγισης της πίεσης των αγκυρίων  $p_b^{th}$  με την πραγματική  $p_b^r$  του άνω τμήματος της σήραγγας

Το συμπέρασμα που εξάγεται από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 6.2) είναι ακριβώς το αντίθετο από αυτό που περιμέναμε με βάση το σκεπτικό, που αναπτύχθηκε παραπάνω. Αντί, δηλαδή, οι γραμμές τάσης των δύο κατανομών να έχουν έρθει πιο κοντά στην  $x=y$ , αυτές απομακρύνθηκαν περισσότερο. Αναζητώντας το αίτιο που προκαλεί την "αντίφαση" αυτή καταλήξαμε στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.3), στο οποίο απεικονίζονται οι ανακατανομές των πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, εξαιτίας της απενεργοποίησης των αγκυρίων, σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις βραχόμαζας.

Από την επεξεργασία αυτού του σχήματος προκύπτουν εξαιρετικά ενδιαφέροντα στοιχεία, τα οποία δείχνουν ξεκάθαρα τον λόγο στον οποίο οφείλεται η ανατροπή του σκεπτικού που αναπτύχθηκε παραπάνω. Αρχικά να ξεκαθαρίσουμε ότι το άνω τμήμα της σήραγγας βρίσκεται μεταξύ των γωνιών  $0^\circ-90^\circ$  και  $270^\circ-360^\circ$  ενώ το κάτω μέρος αυτής βρίσκεται μεταξύ  $90^\circ$  και  $270^\circ$ .

Το πρώτο και κύριο συμπέρασμα από το Σχήμα 6.3 είναι η ανακατανομή των πιέσεων σε όλη τη διατομή της σήραγγας και όχι μόνο στο άνω τμήμα αυτής, όπως αρχικά είχαμε υποθέσει. Επίσης, παρατηρούμε ότι, σε όλες τις διαφορετικές περιπτώσεις ποιότητας της βραχόμαζας, η ποσοστιαία αύξηση της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι πολύ μεγαλύτερη στις θέσεις που είχαν τοποθετηθεί τα αγκύρια βράχου. Αυτό, βέβαια, ήταν κάτι λίγο-πολύ αναμενόμενο, καθώς, πριν την απενεργοποίηση των αγκυρίων, οι συγκεκριμένες θέσεις "ανακουφίζονταν" περισσότερο λόγω της συμμετοχής των αγκυρίων στην ανάλυση των φορτίων.

Από το ίδιο διάγραμμα προκύπτει, επίσης, η εξής πολύ ενδιαφέρουσα παρατήρηση: μετά την απενεργοποίηση των αγκυρίων, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα καλείται να αναλάβει την  $p_b$  σα να είναι σημειακή-συγκεντρωμένη φόρτιση. Φαίνεται εξάλλου πως από τις θέσεις των αγκυρίων δε "διαδίδεται", στον ίδιο βαθμό, η πίεση στις γειτονικές θέσεις. Για παράδειγμα, βλέπουμε ότι στην περίπτωση της μέτριας βραχόμαζας, η ποσοστιαία αύξηση της πίεσης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, στις θέσεις των αγκυρίων βράχου κυμαίνεται περίπου στο 12.2%, ενώ στις γειτονικές σε αυτές θέσεις είναι κοντά στο 1%. Όμοια είναι η κατάσταση και στις άλλες περιπτώσεις βραχομαζών.

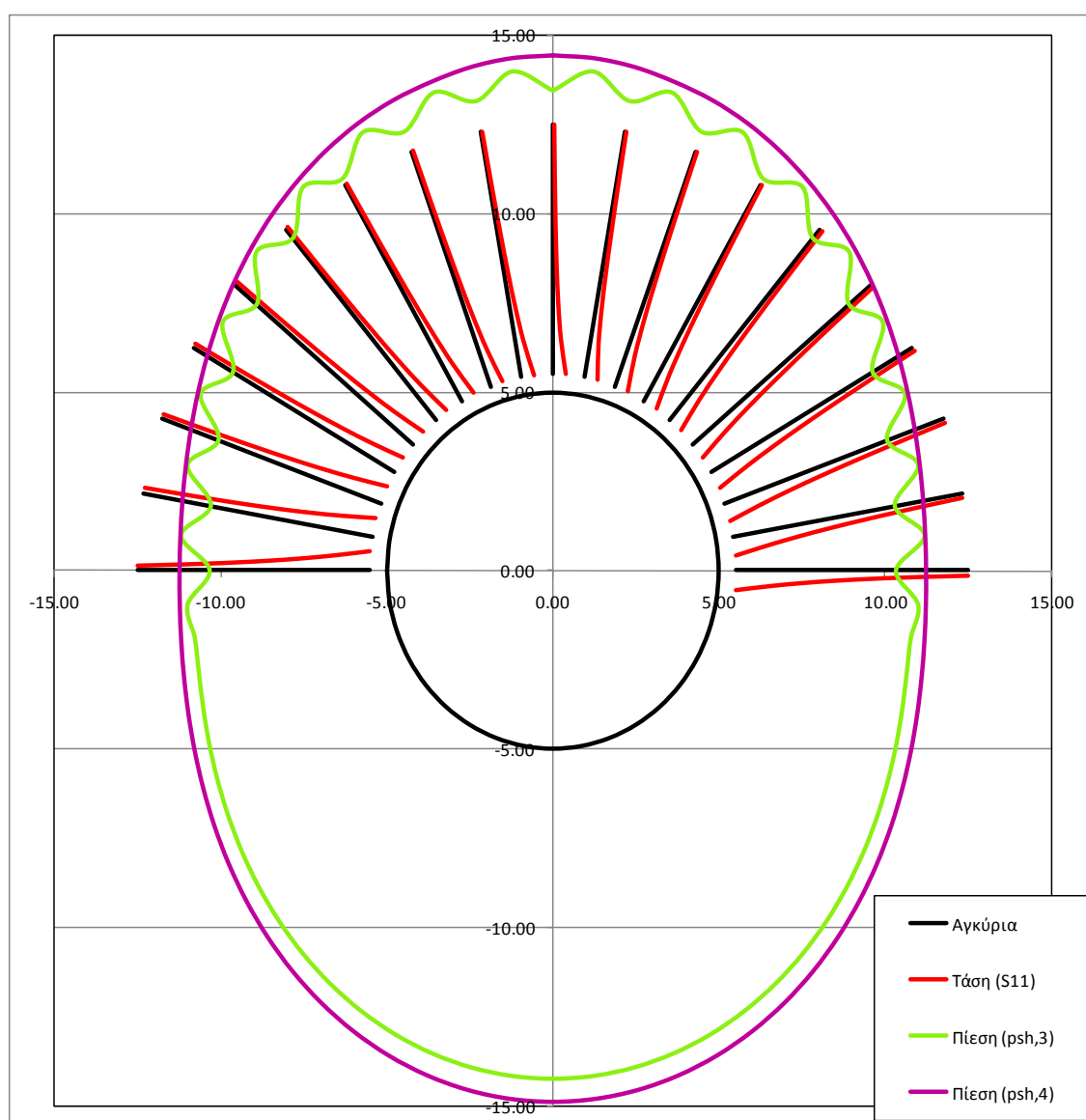


Σχήμα 6.3: Ποσοστιαία μεταβολή της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος συναρτήσει της γωνίας της διατομής της σήραγγας

Ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο, που προκύπτει από την επεξεργασία του παραπάνω σχήματος, είναι η σημαντική αύξηση της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο κάτω μέρος της σήραγγας. Παρατηρούμε, δηλαδή, ότι η ανακατανομή της πίεσης επηρεάζει την πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και στο κάτω μέρος της διατομής της σήραγγας, καθώς η ποσοστιαία μεταβολή στην περιοχή αυτή είναι μεν μικρότερη από τη μεταβολή στις θέσεις των αγκυρίων αλλά είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τη μεταβολή στις γειτονικές των αγκυρίων θέσεις. Για παράδειγμα αναφέρεται η περίπτωση της καλής ποιοτικά βραχόμαζας, που φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, στην οποία η ποσοστιαία μεταβολή της πίεσης στο κάτω μέρος της σήραγγας είναι της τάξεως του 7%. Όμως, η μεταβολή στις θέσεις των αγκυρίων είναι της τάξης του 12.5% και στις μεταξύ των αγκυρίων θέσεις, η ίδια μεταβολή κυμαίνεται μεταξύ 0.3% και 4.2%.

Από όλα τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η απενεργοποίηση των αγκυρίων βράχου επηρεάζει την κατανομή των πιέσεων σε όλη τη διατομή της σήραγγας, και όχι μόνο στο άνω τμήμα της διατομής, όπως είχαμε ισχυριστεί στην αρχή της διερεύνησης αυτής. Επιπλέον συμπεραίνουμε ότι από την απενεργοποίηση των αγκυρίων επηρεάζονται, ως επί το πλείστον, οι θέσεις που έχουν τοποθετηθεί τα αγκύρια βράχου και σε μικρότερο βαθμό, οι γειτονικές θέσεις των αγκυρίων. Σημαντική, τέλος, είναι και η μεταβολή των πιέσεων και στο κάτω τμήμα της διατομής της σήραγγας.

Τα συμπεράσματα που σημειώθηκαν στην παραπάνω παράγραφο φαίνονται πιο παραστατικά στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 6.4).



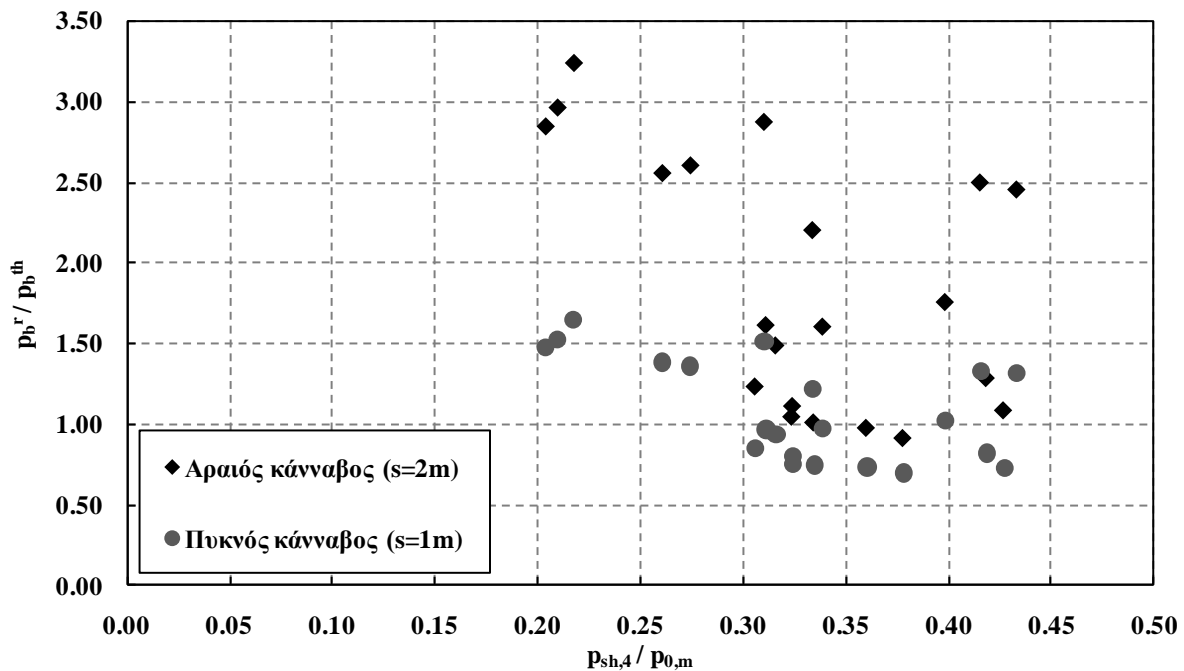
**Σχήμα 6.4:** Ενδεικτική κατανομή της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πριν και μετά την απενεργοποίηση των αγκυρίων βράχου

### 6.2.2 Διερεύνηση της συμβολής των αγκυριών στην ανάληψη της φόρτισης

Από το ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 6.5) παρατηρούμε ότι, και για τις δύο πυκνότητες καννάβων αγκυριών βράχων, όσο αυξάνεται ο λόγος  $p_{sh,4}/p_{0,m}$ , τόσο μειώνεται ο λόγος  $p_b^r/p_b^{th}$ . Η αύξηση του λόγου  $p_{sh,4}/p_{0,m}$  σημαίνει, επί της ουσίας, χειρότερηση της ποιότητας της βραχώμαζας. Αυτό ισχύει καθώς όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, όσο χειρότερη είναι η ποιότητα της βραχώμαζας, τόσο μεγαλύτερη πίεση καλείται να αναλάβει η προσωρινή υποστήριξη ή η τελική επένδυση αντίστοιχα.

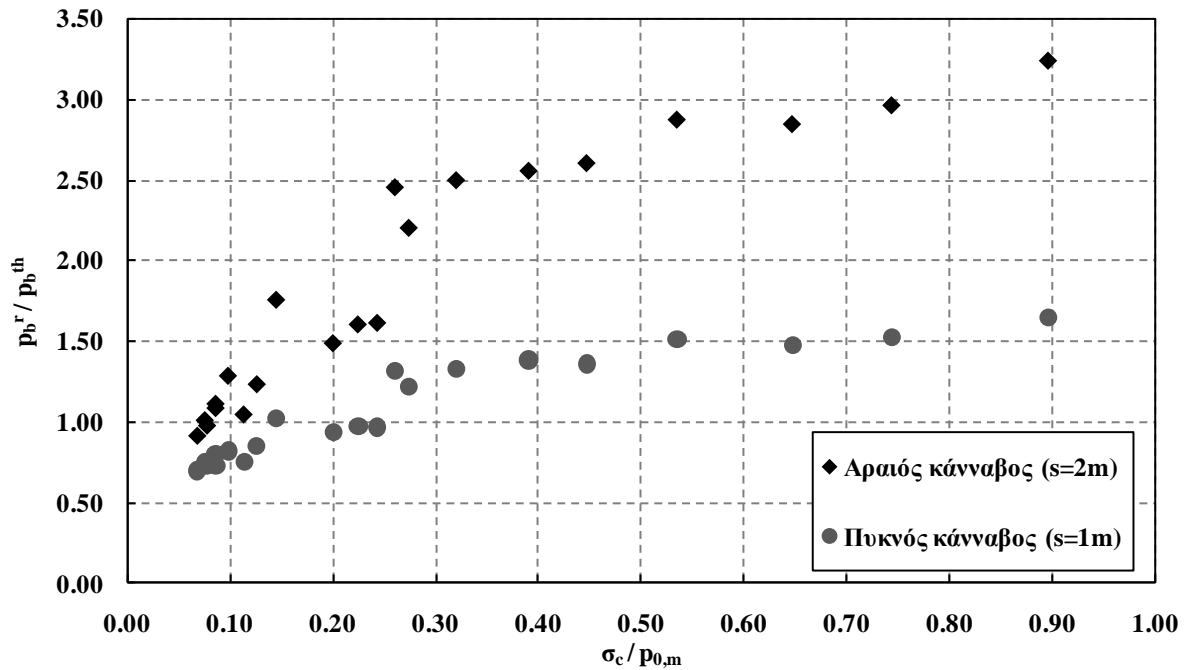
Μία ακόμα παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε, όσον αφορά στο ίδιο διάγραμμα είναι το γεγονός ότι τα εύρη τιμών των λόγων  $p_b^r/p_b^{th}$ , διαφέρουν πολύ ανάλογα με την πυκνότητα του καννάβου των αγκυριών βράχου. Στην περίπτωση του πυκνού καννάβου ( $s=1m$ ), ο λόγος  $p_b^r/p_b^{th}$  κυμαίνεται μεταξύ 0.70 και 1.65, δηλαδή πολύ κοντά στη μονάδα. Αντίθετα, στην περίπτωση του αραιού καννάβου ( $s=2m$ ), παρατηρούμε ότι το εύρος τιμών είναι 0.90-3.25, δηλαδή πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του πυκνού καννάβου ( $s=1m$ ). Μάλιστα, αρκετά είναι τα σημεία της κατανομής αυτής που απέχουν πολύ από τη μονάδα.

Ένα ακόμα στοιχείο που αξίζει να κρατήσουμε είναι οι περιπτώσεις στις οποίες ο λόγος  $p_b^r/p_b^{th}$  είναι πολύ κοντά στη μονάδα. Στην περίπτωση του αραιού καννάβου ( $s=2m$ ), αυτό συμβαίνει για τις περιπτώσεις πολύ κακών γεωτεχνικών συνθηκών, δηλαδή για  $0.07 \leq \sigma_c/p_{0,m} \leq 0.13$ , ενώ στην περίπτωση του πυκνού καννάβου αγκυριών ( $s=1m$ ), αυτό συμβαίνει για  $0.10 \leq \sigma_c/p_{0,m} \leq 0.25$ . Το συγκεκριμένο στοιχείο επιβεβαιώνεται και από το μεθεπόμενο διάγραμμα (Σχήμα 6.6).



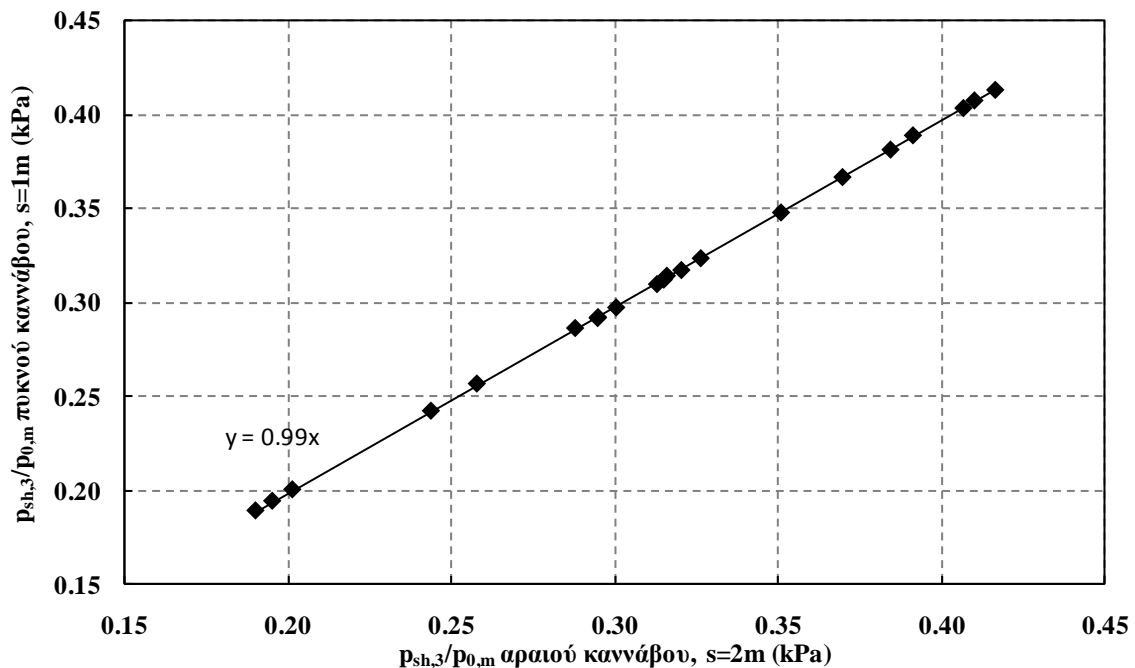
**Σχήμα 6.5:** Μεταβολή του λόγου  $p_b^r/p_b^{th}$  συναρτήσει της ανηγμένης, στη μέση γεωστατική πίεση, τελικής πίεσης της διατομής

Στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 6.6) αποτυπώνεται η μεταβλητότητα του λόγου  $p_b^r/p_b^{th}$ , συναρτήσει της ποιότητας της βραχώμαζας, η οποία εκφράζεται μέσω του δείκτη  $\sigma_c/p_{0,m}$ . Φαίνεται, λοιπόν, ότι, ανεξαρτήτως της πυκνότητας του καννάβου, με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών, δηλαδή με την αύξηση του δείκτη ποιότητας  $\sigma_c/p_{0,m}$ , αυξάνεται ο λόγος  $p_b^r/p_b^{th}$ . Επιπλέον, και σε αυτό το διάγραμμα διακρίνεται η μικρή σχετικά απόκλιση, από τη μονάδα, του λόγου  $p_b^r/p_b^{th}$  στην περίπτωση του πυκνού καννάβου ( $s=1m$ ), σε σύγκριση, βέβαια, με τον αραιό ( $s=2m$ ).



Σχήμα 6.6: Μεταβολή του λόγου  $p_b^r/p_b^{th}$  συναρτήσει της ποιότητας της βραχώμαζας, εκφρασμένης μέσω του δείκτη  $\sigma_c/p_{0,m}$

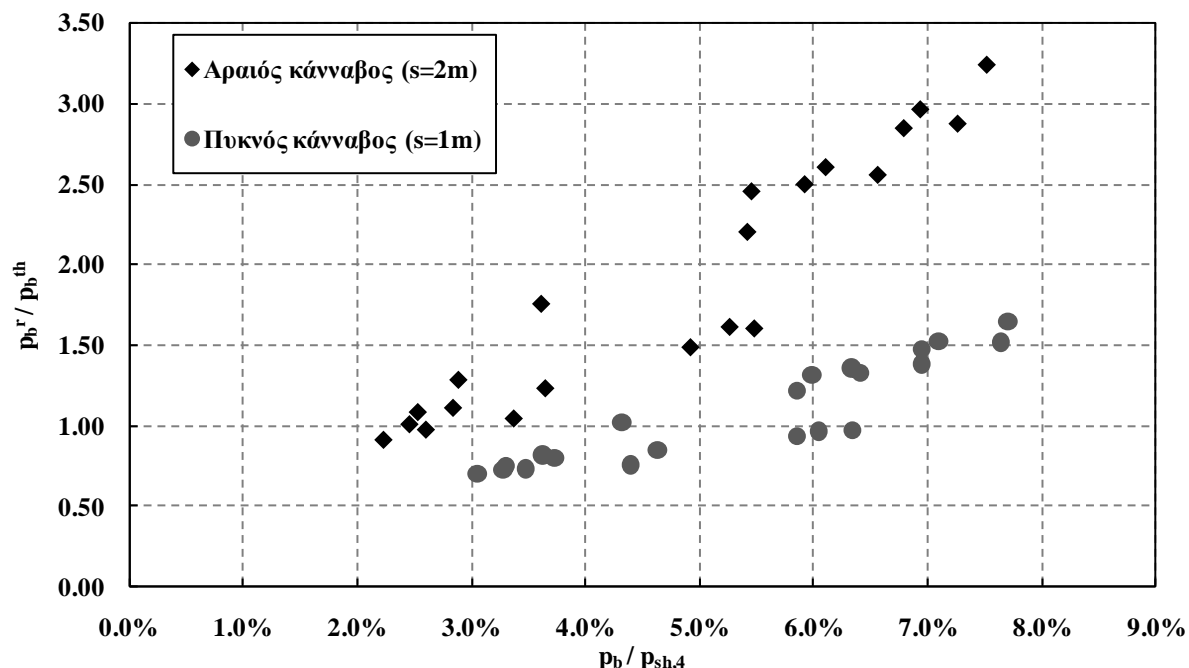
Αξίζει στο σημείο αυτό να διερευνηθεί η σχέση που υπάρχει μεταξύ της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $p_{sh,3}$  στην περίπτωση του αραιού κάρναβου ( $s=2m$ ) και του ίδιου μεγέθους για την περίπτωση του πυκνού κάρναβου ( $s=1m$ ).



Σχήμα 6.7: Συσχέτιση της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $p_{sh,3}$  για την περίπτωση του αραιού κάρναβου ( $s=2m$ ) με την αντίστοιχη πίεση  $p_{sh,3}$  για την περίπτωση του πυκνού κάρναβου ( $s=1m$ )

Από το τελευταίο διάγραμμα προκύπτει ότι η διαφοροποίηση της  $p_{sh,3}$  ανάλογα με την πυκνότητα των αγκυριών είναι αμελητέα. Η γραμμή τάσης της, εν λόγω, κατανομής ταυτίζεται πρακτικά με την  $y=x$  και, μάλιστα, τα σημεία της κατανομής αυτής φαίνεται να έχουν πολύ μικρή απόκλιση από τη γραμμή

τάσης. Επομένως, η πύκνωση του καννάβου μπορούμε να πούμε ότι δεν επιφέρει κάποια σημαντική διαφοροποίηση στην ανάληψη των φορτίων από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.



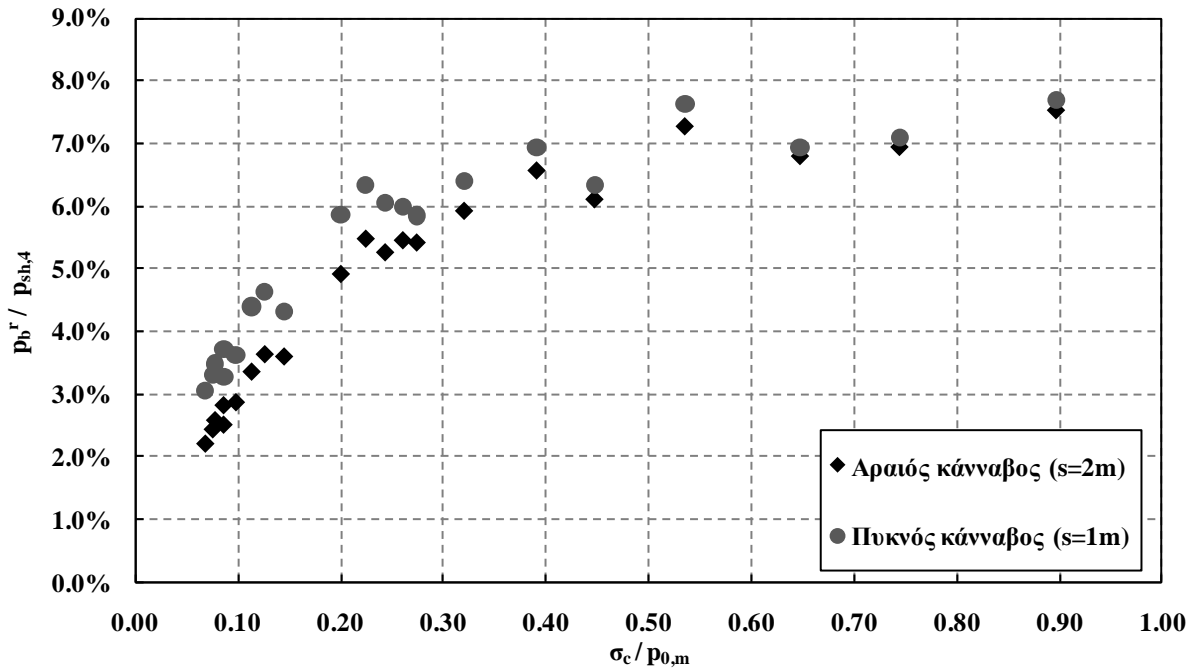
**Σχήμα 6.8:** Μεταβολή του λόγου  $p_b^r/p_b^{th}$  συναρτήσει του ποσοστού της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια ( $p_b^r/p_{sh,4}$ )

Ακολουθώς παρουσιάζεται το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 6.8), στο οποίο απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου  $p_b^r/p_b^{th}$  σε συνάρτηση με το ποσοστό της συνολικής πίεσης, που αναλαμβάνουν τα αγκύρια βράχου, κατά την περίοδο λειτουργίας τους. Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό αυτό, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο λόγος  $p_b^r/p_b^{th}$ . Εύκολα μπορούμε να διακρίνουμε ότι η παρατήρησή μας αυτή ισχύει και για τις δύο πυκνότητες καννάβων.

Συνδυάζοντας δύο από τα παραπάνω σχήματα (Σχήμα 6.6, Σχήμα 6.8), προκύπτει ένα πολύ σημαντικό διάγραμμα (Σχήμα 6.9), το οποίο παρουσιάζεται ακολουθώς και αφορά στη μεταβολή του ποσοστού της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια ( $p_b^r/p_{sh,4}$ ), ανάλογα με την ποιότητα της βραχώμαζας. Η ποιότητα της βραχώμαζας εκφράζεται, όπως και στο Σχήμα 6.6, με τη βοήθεια του δείκτη  $\sigma_c/p_{o,m}$ .

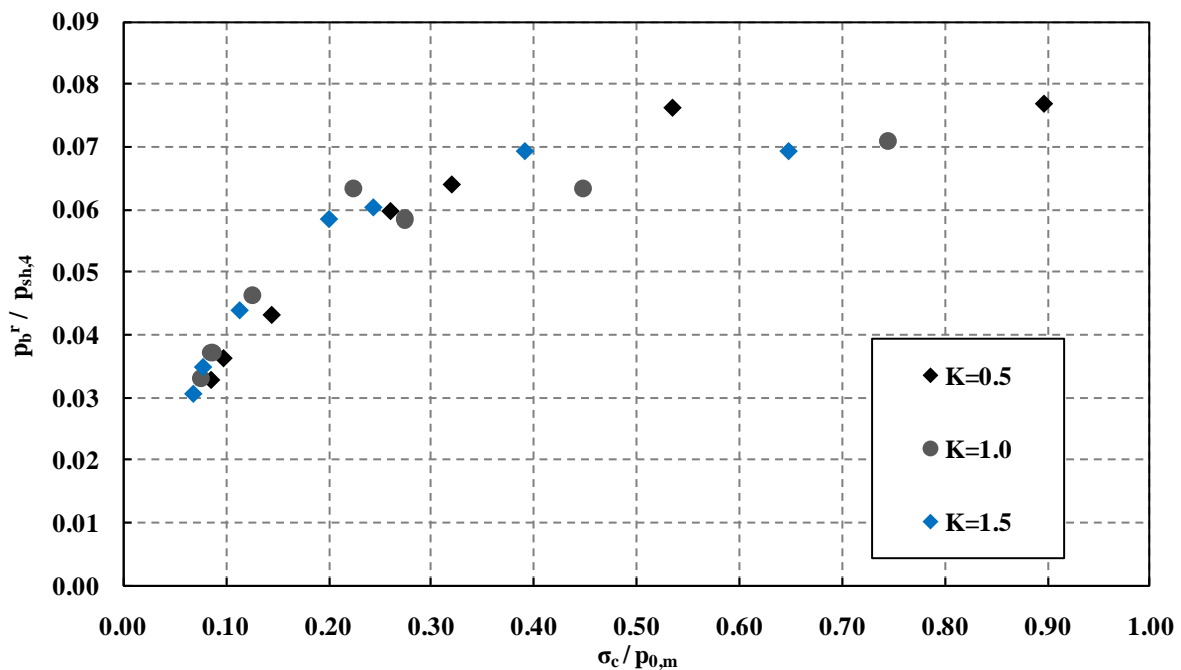
Από το σχήμα αυτό παρατηρούμε, εκ πρώτης όψεως, ότι τα ποσοστά της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια βράχου είναι παρεμφερή για τις δύο πυκνότητες του καννάβου. Ειδικότερα, στην περίπτωση του αραιού καννάβου το ποσοστό αυτό κυμαίνεται μεταξύ 2.2% και 7.5% ενώ στην περίπτωση του πυκνού καννάβου (s=1m) το αντίστοιχο ποσοστό λαμβάνει τιμές στο διάστημα 3.1-7.7%.

Επιπλέον, εξαιρετικά σημαντική είναι η διαπίστωση που προκύπτει από το ακόλουθο διάγραμμα και αφορά στην αύξηση του ποσοστού της συνολικής πίεσης-φόρτισης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια βράχου, με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών της βραχώμαζας, με την αύξηση δηλαδή του δείκτη  $\sigma_c/p_{o,m}$ . Επίσης, παρατηρούμε πως η κατανομή των σημείων αυτών έχει μεγαλύτερη κλίση στην περιοχή των βραχώμαζων χαμηλότερης ποιότητας. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως στις βραχώμαζες καλής ποιότητας, η μεταβολή του δείκτη ποιότητας ( $\sigma_c/p_{o,m}$ ) προς τα πάνω, θα σημαίνει ελάχιστη αύξηση του ποσοστού της φόρτισης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια, δηλαδή του λόγου  $p_b^r/p_{sh,4}$ , σε σχέση με τις βραχώμαζες κακής ποιότητας, όπου η αύξηση αυτή θα είναι μεγαλύτερη.



Σχήμα 6.9: Μεταβολή του ποσοστού της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια ( $p_b^r/p_{sh,4}$ ) σε συνάρτηση με την ποιότητα της βραχόμαζας ( $\sigma_c/\rho_{0,m}$ )

Τέλος, θα διερευνηθεί η εξάρτηση της παραπάνω κατανομής (Σχήμα 6.9) από το συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων  $K$ . Η διερεύνηση θα πραγματοποιηθεί ενδεικτικά, για την περίπτωση του πυκνού καννάβου αγκυρίων ( $s=1m$ ) και θα παρουσιαστεί στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Σχήμα 6.10: Μεταβολή του ποσοστού της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια ( $p_b^r/p_{sh,4}$ ) σε συνάρτηση με την ποιότητα της βραχόμαζας ( $\sigma_c/\rho_{0,m}$ ), για την περίπτωση του πυκνού καννάβου αγκυρίων, για διάφορες τιμές του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων  $K$

Από το τελευταίο σχήμα, φαίνεται ότι οι κατανομές των σημείων, και για τις τρεις περιπτώσεις του δείκτη γεωστατικών ωθήσεων, έχουν την ίδια μορφή. Επομένως, συμπεραίνουμε ότι δεν υπάρχει



κάποια ιδιαίτερη εξάρτηση του φορτίου που αναλαμβάνουν τα αγκύρια από το δείκτη γεωστατικών ωθήσεων. Η μόνη διαφοροποίηση έγκειται στο μέγεθος του ποσοστού αυτού.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι το ποσοστό της συνολικής φόρτισης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια βράχου είναι αρκετά μικρά. Αυτό οφείλεται, κατ' εξοχήν, στο κυκλικό σχήμα της διατομής της σήραγγας, που συνεπάγεται και τη λειτουργία του κλειστού δακτυλίου. Εξαιτίας, λοιπόν, του σχήματος αυτού δεν αναπτύσσονται μεγάλες παραμορφώσεις και κατ' επέκταση είναι σχετικά μικρές και οι εντάσεις που αναπτύσσονται στα αγκύρια βράχου.

### 6.3 ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ

Στο παρόν υποκεφάλαιο πραγματοποιείται η ποσοτική επεξεργασία μιας άλλης κατηγορίας αριθμητικών αναλύσεων. Χαρακτηριστικό των 42 αυτών αναλύσεων είναι η αλληλουχία των μέτρων υποστήριξης στη διατομή της σήραγγας. Αναλυτικότερα, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα διαδραματίζει, αρχικά, το ρόλο της άμεσης υποστήριξης. Στη συνέχεια αυτό απενεργοποιείται και, τότε, τοποθετείται η τελική επένδυση, η οποία καλείται, εν τέλει, να αναλάβει το σύνολο της φόρτισης.

Μάλιστα, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις για 2 διαφορετικές σχετικές δυσκαμψίες  $K_{fl}/K_{sh}$ , μεταξύ τελικής επένδυσης και εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Αυτό επετεύχθη επιλέγοντας στις μισές εκ των αναλύσεων αυτών, πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $h_{sh}=40\text{cm}$  και πάχος τελικής επένδυσης  $h_{fl}=40\text{cm}$ , και στις άλλες μισές,  $h_{sh}=20\text{cm}$  και  $h_{fl}=60\text{cm}$ . Με τον τρόπο αυτό ισχύει στις μεν πρώτες 21 αριθμητικές αναλύσεις  $K_{fl}/K_{sh}=1.45$  και στις υπόλοιπες  $K_{fl}/K_{sh}=39.15$ .

Στόχος της επεξεργασίας των παραπάνω αναλύσεων είναι η διερεύνηση του τρόπου μεταφοράς των φορτίων από την άμεση υποστήριξη (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) στην τελική επένδυση. Θα ελέγξουμε, δηλαδή, τι ποσοστό των φορτίων που αναλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, μεταφέρεται στην τελική επένδυση, με δύο διαφορετικές μεθόδους. Οι μέθοδοι αυτές είναι οι αριθμητικές αναλύσεις, με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, και η χρήση αναλυτικών λύσεων, με τη βοήθεια των καμπυλών σύγκλισης-αποτόνωσης.

```

**
** @@@@@@@@@@@@@@ STEP3 @@@@@@@@@@@@@@
**
**
** *STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000
**
** *STATIC
0.01,1,0.0000000001,0.2
**
**
** *MODEL CHANGE, ADD
G_SHOTA
G_SHOTB
**G_AGK5_A
**G_AGK5_P
**G_AGK8_A
**G_AGK8_P
**
** *DLOAD
G_SHOTA, GRAV,10,0,-1,0
G_SHOTB, GRAV,10,0,-1,0
**G_AGK5_A, GRAV,10,0,-1,0
**G_AGK5_P, GRAV,10,0,-1,0
**G_AGK8_A, GRAV,10,0,-1,0
**G_AGK8_P, GRAV,10,0,-1,0
**
**
** @@@@@@@@@@@@@@ STEP4 @@@@@@@@@@@@@@
**
**
** *STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000
**
** *STATIC
0.01,1,0.0000000001,0.2
**
**
** *MODEL CHANGE, ADD
P_FL
**
**
** *DLOAD
P_FL, GRAV,10,0,-1,0
**
** @@@@@@@@@@@@@@ STEP5 @@@@@@@@@@@@@@
**
**
** *STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000
**
** *STATIC
0.01,1,0.0000000001,0.2
**
**
** *MODEL CHANGE, REMOVE
G_SHOTA
G_SHOTB
**G_AGK5_A
**G_AGK5_P
**G_AGK8_A
**G_AGK8_P
**

```

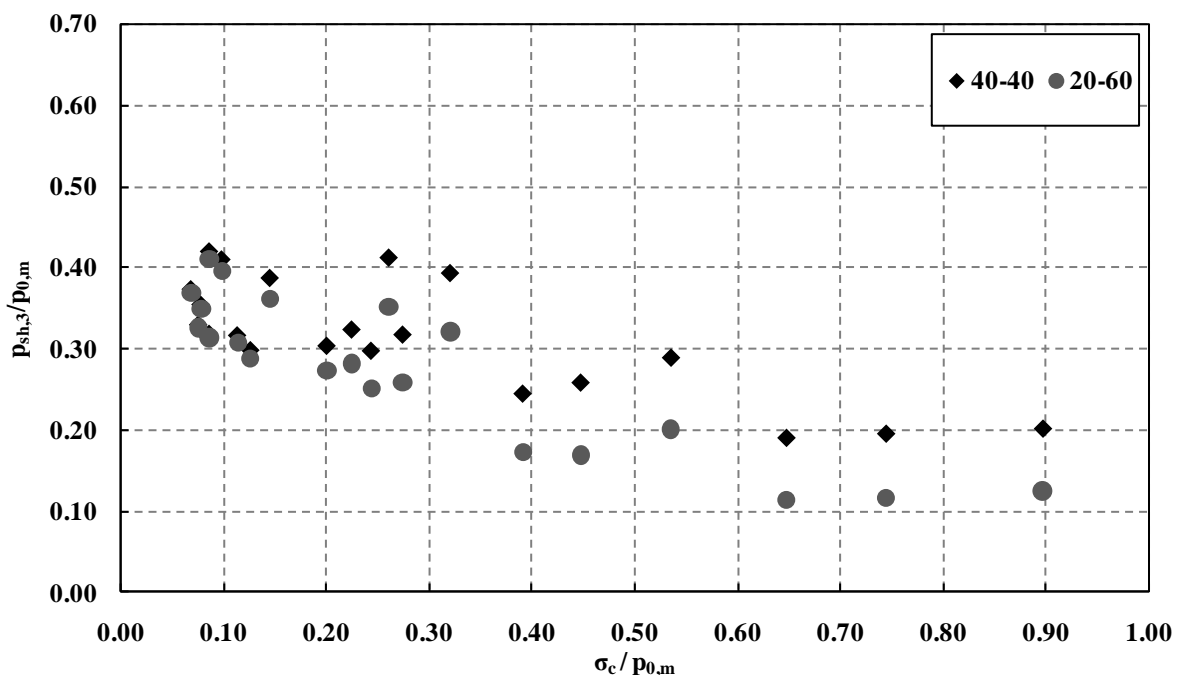
**Εικόνα 6.2:** 3<sup>ο</sup>, 4<sup>ο</sup> και 5<sup>ο</sup> Βήμα προσομοίωσης των αριθμητικών αναλύσεων, που σαν άμεση υποστήριξη έχουν εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, το οποίο απενεργοποιείται και στη θέση του τοποθετείται η τελική επένδυση

Στην Εικόνα 6.2 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα τρία τελευταία βήματα της προσομοίωσης των αριθμητικών αναλύσεων, που περιγράφηκαν παραπάνω. Στο τρίτο βήμα τοποθετείται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (άμεση υποστήριξη). Ακολούθως, στο τέταρτο βήμα τοποθετείται στη

διατομή της σήραγγας η τελική επένδυση, η οποία ενεργοποιείται, επί της ουσίας, στο πέμπτο και τελευταίο βήμα, όταν δηλαδή απενεργοποιείται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

### 6.3.1 Διερεύνηση του τρόπου μεταφοράς των φορτίων από την άμεση υποστήριξη στην τελική επένδυση

Αρχικά, παρουσιάζεται το ακόλουθο διάγραμμα, στο οποίο φαίνεται η πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε συνάρτηση με τις γεωτεχνικές συνθήκες. Όπως αναμενόταν, η πίεση που αναπτύσσεται στο δακτύλιο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μειώνεται με τη βελτίωση της ποιότητας της βραχώμαζας. Η πίεση παίρνει τιμές μεταξύ 10-40% της μέσης γεωστατικής τάσης  $p_{0,m}$ , για την περίπτωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους  $h_{sh}=20cm$ , και τιμές μεταξύ 20-40% της  $p_{0,m}$ , για  $h_{sh}=40cm$ . Το γεγονός ότι οι πιέσεις είναι μεγαλύτερες για τον δακτύλιο πάχους  $h_{sh}=40cm$  οφείλεται στη μεγαλύτερη δυσκαμψία του, έναντι του δακτυλίου πάχους  $h_{sh}=20cm$ . Έτσι, δεν επιτρέπεται η ανάπτυξη μεγάλων μετατοπίσεων και η ένταση από τη βραχώμαζα παραλαμβάνεται από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με τη "μορφή"// πίεσης.



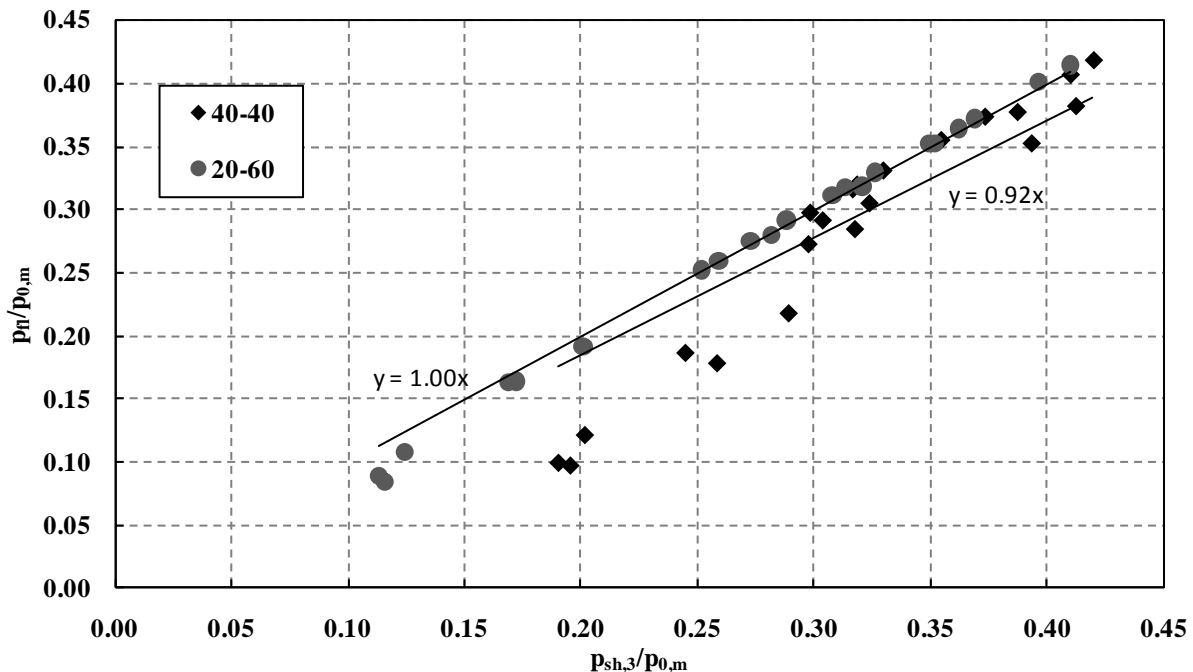
Σχήμα 6.11: Κατανομή της, ανηγμένης στη μέση γεωστατική τάση, πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος συναρτήσει των γεωτεχνικών συνθηκών

Εν συνεχεία, γίνεται μία προσπάθεια συσχέτισης της πίεσης που αναλαμβάνει η άμεση υποστήριξη (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα),  $p_{sh,3}$ , με την πίεση που αναλαμβάνει η τελική επένδυση,  $p_{\Pi}$ . Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκε το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 6.12), στο οποίο απεικονίζεται η μεταβολή των δύο αυτών πιέσεων, ανηγμένων, όμως, στη μέση γεωστατική τάση  $p_{0,m}$ .

Από το διάγραμμα αυτό, παρατηρούμε ότι η γραμμή τάσης της κατανομής με  $h_{sh}=20cm$  και  $h_{\Pi}=60cm$  (ή ισοδύναμα  $K_{\Pi}/K_{sh}=39.15$ ) πρακτικά ταυτίζεται με την  $y=x$ . Μάλιστα, τα σημεία της κατανομής αυτής φαίνεται να βρίσκονται πάνω ακριβώς στη γραμμή τάσης, με εξαίρεση μόνο τα σημεία που αναφέρονται σε πολύ μικρές πιέσεις, δηλαδή σε βραχώμαζες πολύ καλής ποιότητας. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η τελική επένδυση αναλαμβάνει αυτούσια την πίεση που αναλάμβανε, πριν την απενεργοποίησή του, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Το γεγονός αυτό οφείλεται, ως επί το πλείστον, στη μεγάλη δυσκαμψία της τελικής επένδυσης. Λόγω της μεγάλης αυτής δυσκαμψίας, η τελική επένδυση είναι σε θέση να αναλάβει μεγαλύτερα φορτία με την ταυτόχρονη ανάπτυξη μικρών σχετικά παραμορφώσεων. Η μεγάλη δυσκαμψία προσφέρει στην τελική επένδυση τη δυνατότητα να αναλαμβάνει μεγάλα φορτία, χωρίς την ταυτόχρονη ανάπτυξη μεγάλων παραμορφώσεων.

Από το ίδιο σχήμα (Σχήμα 6.12) παρατηρούμε, επίσης, ότι η γραμμή τάσης της κατανομής με  $K_{\Pi}/K_{sh}=1.45$  (ή ισοδύναμα με  $h_{sh}=40cm$  και  $h_{\Pi}=40cm$ ) περιγράφεται από την εξίσωση  $y=0.92x$ . Η

εξίσωση αυτή, να μην έχει κλίση κοντά στη μονάδα, αλλά τα σημεία της κατανομής αυτής έχουν μεγάλη διασπορά σε σχέση με αυτά της άλλης κατανομής. Μάλιστα, φαίνεται ότι γενικότερα η πίεση που αναλαμβάνει η τελική επένδυση είναι σταθερά μικρότερη από αυτήν που αναλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η διαφοροποίηση των δύο κατανομών μπορούμε να πούμε ότι οφείλεται στις διαφορετικές σχετικές δυσκαμψίες.



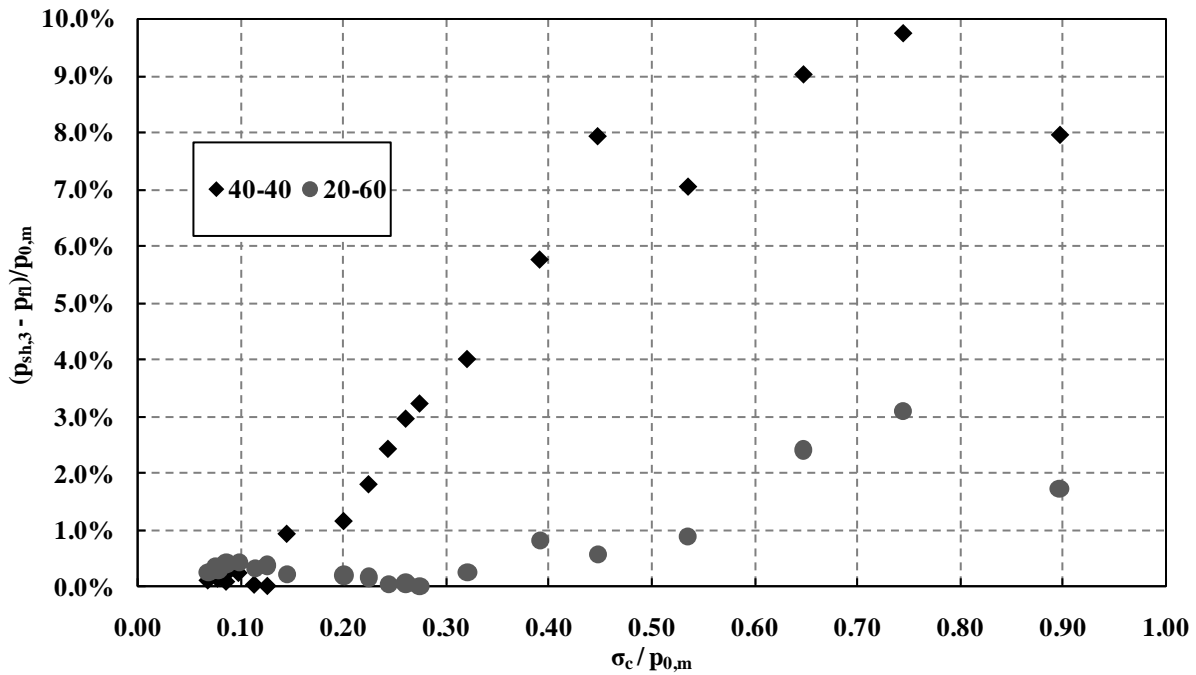
**Σχήμα 6.12:** Συσχέτιση της, ανηγμένης στη μέση γεωστατική τάση, πίεσης που αναλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα,  $p_{sh,3}$ , με την, ανηγμένη στη μέση γεωστατική τάση, πίεση που αναλαμβάνει η τελική επένδυση,  $p_n$

Σε πρώτη φάση, όσον αφορά στις πιέσεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, προκύπτει ότι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους  $h_{sh}=40\text{cm}$  αναλαμβάνει μεγαλύτερες πιέσεις απ' ό,τι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους  $h_{sh}=20\text{cm}$ . Άρα γενικά μπορούμε να πούμε ότι  $p_{sh,3}^{(40)} > p_{sh,3}^{(20)}$ . Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη δυσκαμψία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους  $h_{sh}=40\text{cm}$ , η οποία, ουσιαστικά, επιτρέπει την πραγματοποίηση μικρότερου ποσοστού αποτόνωσης της βραχόμαζας.

Σε δεύτερη φάση, όσον αφορά, δηλαδή, στις πιέσεις της τελικής επένδυσης, δεδομένη είναι η αυξημένη φέρουσα ικανότητα της τελικής επένδυσης πάχους  $h_n=60\text{cm}$  έναντι αυτής με πάχος  $h_n=40\text{cm}$ . Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η τελική επένδυση πάχους  $h_n=60\text{cm}$  έχει τη δυνατότητα να αναλαμβάνει τις ίδιες πιέσεις με την τελική επένδυση πάχους  $h_n=40\text{cm}$  με την ανάπτυξη, όμως, μικρότερων παραμορφώσεων.

Ειδικότερα, η τελική επένδυση πάχους  $h_n=60\text{cm}$  είναι σε θέση να αναλάβει εξ' ολοκλήρου τις πιέσεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους  $h_{sh}=20\text{cm}$ . Αντιθέτως, η τελική επένδυση πάχους  $h_n=40\text{cm}$  δε λειτουργεί το ίδιο αποτελεσματικά με την τελική επένδυση πάχους  $h_n=60\text{cm}$ . Το γεγονός αυτό οφείλεται αφενός στη διαφορά των φορτίων που καλούνται να αναλάβουν οι τελικές επενδύσεις ( $p_{sh,3}^{(40)} > p_{sh,3}^{(20)}$ ) και αφετέρου στη μεγαλύτερη δυσκαμψία, της τελικής επένδυσης πάχους  $h_n=60\text{cm}$ .

Στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 6.13), απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου της διαφοράς των πιέσεων, που αναλαμβάνει η τελική επένδυση και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, προς τη μέση γεωστατική τάση σε συνάρτηση με τις γεωτεχνικές συνθήκες, οι οποίες εκφράζονται και πάλι με τη βοήθεια του λόγου  $\sigma_c/p_{0,m}$ .



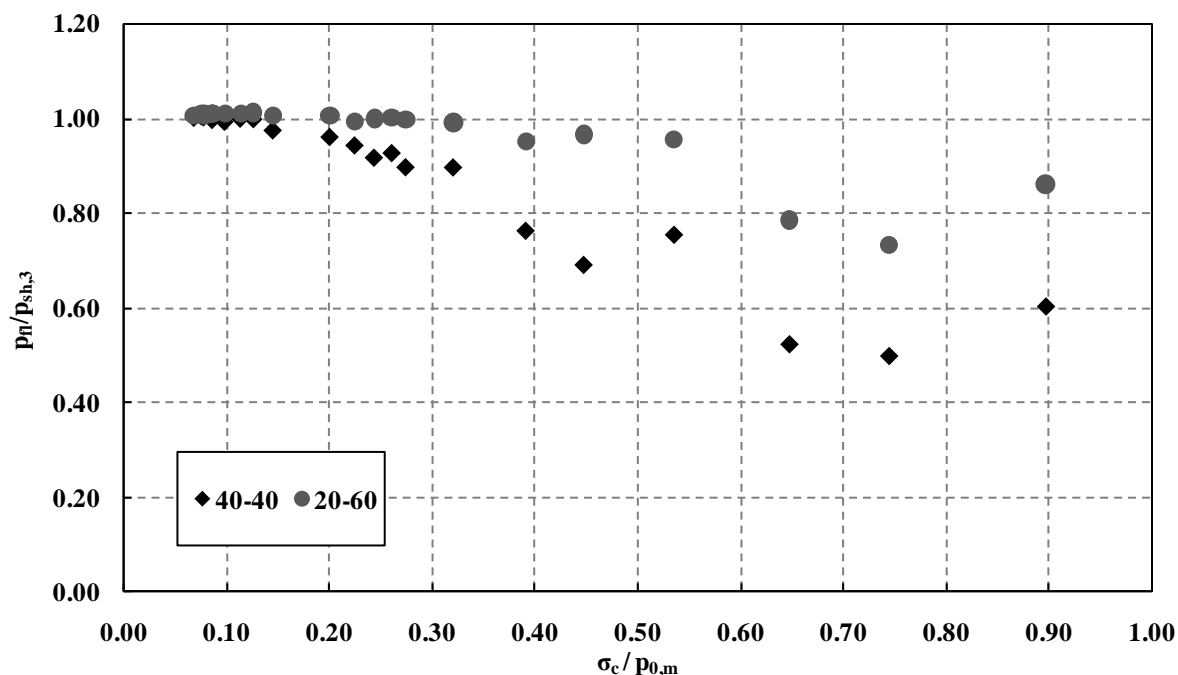
**Σχήμα 6.13: Μεταβολή της διαφοράς της πίεσης που αναλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα από την πίεση από την πίεση που αναλαμβάνει η τελική επένδυση, ανηγμένης στην μέση γεωστατική τάση, ανάλογα με την ποιότητα της βραχόμαζας  $\sigma_c/p_{o,m}$**

Από το διάγραμμα αυτό, φαίνεται ότι όσο καλύτερη είναι η ποιότητα της βραχόμαζας, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο λόγος  $(p_n - p_{sh,3})/p_{o,m}$ . Βέβαια, στην περίπτωση της κατανομής με  $h_{sh}=20\text{cm}$  και  $h_n=60\text{cm}$  (ή ισοδύναμα  $K_n/K_{sh}=39.15$ ), οι τιμές που παίρνει το ποσοστό αυτό είναι πάρα πολύ μικρές (0-3.09%). Μάλιστα, η πλειονότητα των τιμών αυτών παίρνει τιμές μικρότερες του 1%. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς, όπως προέκυψε από το Σχήμα 6.12, οι τιμές των λόγων  $p_{sh,3}/p_{o,m}$  και  $p_n/p_{o,m}$  πρακτικά ταυτίζονται. Η αύξηση του ποσοστού  $(p_n - p_{sh,3})/p_{o,m}$  με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών είναι πιο έντονη στην άλλη κατανομή ( $h_{sh}=40\text{cm}$  και  $h_n=40\text{cm}$ ), στην οποία διαφέρουν αρκετά και οι πιέσεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και της τελικής επένδυσης. Μάλιστα στην κατανομή αυτή, το εύρος του λόγου  $(p_n - p_{sh,3})/p_{o,m}$  κυμαίνεται μεταξύ 0 και 9.77%.

Στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 6.14) παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου της πίεσης που αναλαμβάνει η τελική επένδυση προς την πίεση που αναλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα,  $p_n/p_{sh,3}$ , συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας,  $\sigma_c/p_{o,m}$ . Γενικά παρατηρούμε ότι με την αύξηση του δείκτη  $\sigma_c/p_{o,m}$ , δηλαδή με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών, ο λόγος  $p_n/p_{sh,3}$  μειώνεται. Η παρατήρηση αυτή δικαιολογείται στη συνέχεια με τη βοήθεια της αναλυτικής μεθόδου.

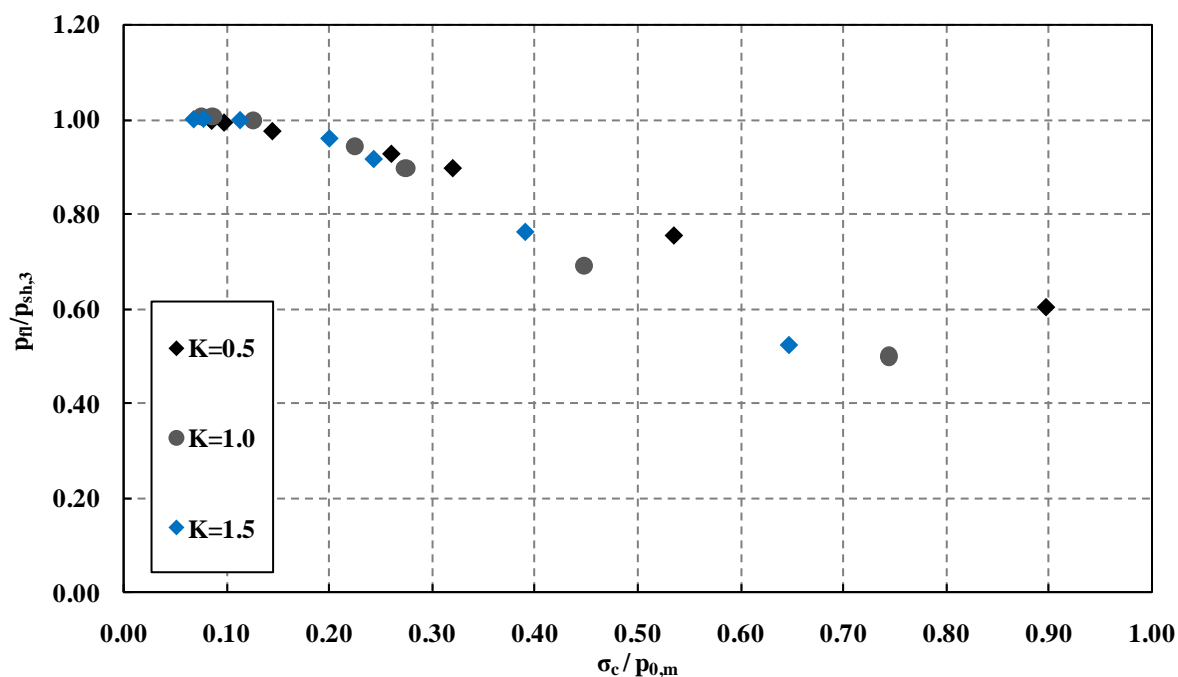
Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται ότι για την κατανομή με  $h_{sh}=20\text{cm}$  και  $h_n=60\text{cm}$  (ή ισοδύναμα με  $K_n/K_{sh}=39.15$ ) ο λόγος  $p_n/p_{sh,3}$ , βρίσκεται πολύ κοντά στη μονάδα και η ελάχιστη τιμή του είναι 0.74. Αντίστοιχα, για την κατανομή με  $K_n/K_{sh}=1.45$  (ή ισοδύναμα με  $h_{sh}=40\text{cm}$  και  $h_n=40\text{cm}$ ) ο ίδιος λόγος απομακρύνεται κατά πολύ από τη μονάδα, μάλιστα η ελάχιστη τιμή του είναι 0.50.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι η μεταβολή του λόγου  $p_n/p_{sh,3}$  είναι πιο έντονη και πιο ευδιάκριτη στην περίπτωση της κατανομής με  $K_n/K_{sh}=1.45$ . Το συμπέρασμα αυτό ήταν αναμενόμενο, αν αναλογιστούμε και τα συμπεράσματα που είχαν προκύψει από το Σχήμα 6.12. Στο διάγραμμα εκείνο, η πίεση της τελικής επένδυσης ήταν σχεδόν ταυτόσημη με την πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, για την κατανομή με  $K_n/K_{sh}=39.15$ . Αντίστοιχα, για την κατανομή με  $K_n/K_{sh}=1.45$  οι πιέσεις αυτές διέφεραν μεταξύ τους, και μάλιστα σε κάποιες περιπτώσεις η διαφορά αυτή ήταν αρκετά μεγάλη.



**Σχήμα 6.14:** Μεταβολή του λόγου της πίεσης της τελικής επένδυσης προς την πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος,  $p_n/p_{sh,3}$ , συναρτήσει της ποιότητας της βραχώμαζας

Τέλος, θα διερευνηθεί η εξάρτηση της παραπάνω κατανομής (Σχήμα 6.14) από το συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων  $K$ . Η διερεύνηση θα πραγματοποιηθεί ενδεικτικά, για την περίπτωση της κατανομής με  $h_{sh}=40\text{cm}$  και  $h_n=40\text{cm}$



**Σχήμα 6.15:** Μεταβολή του λόγου της πίεσης της τελικής επένδυσης προς την πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος,  $p_n/p_{sh,3}$ , συναρτήσει της ποιότητας της βραχώμαζας, για διάφορες τιμές του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων  $K$

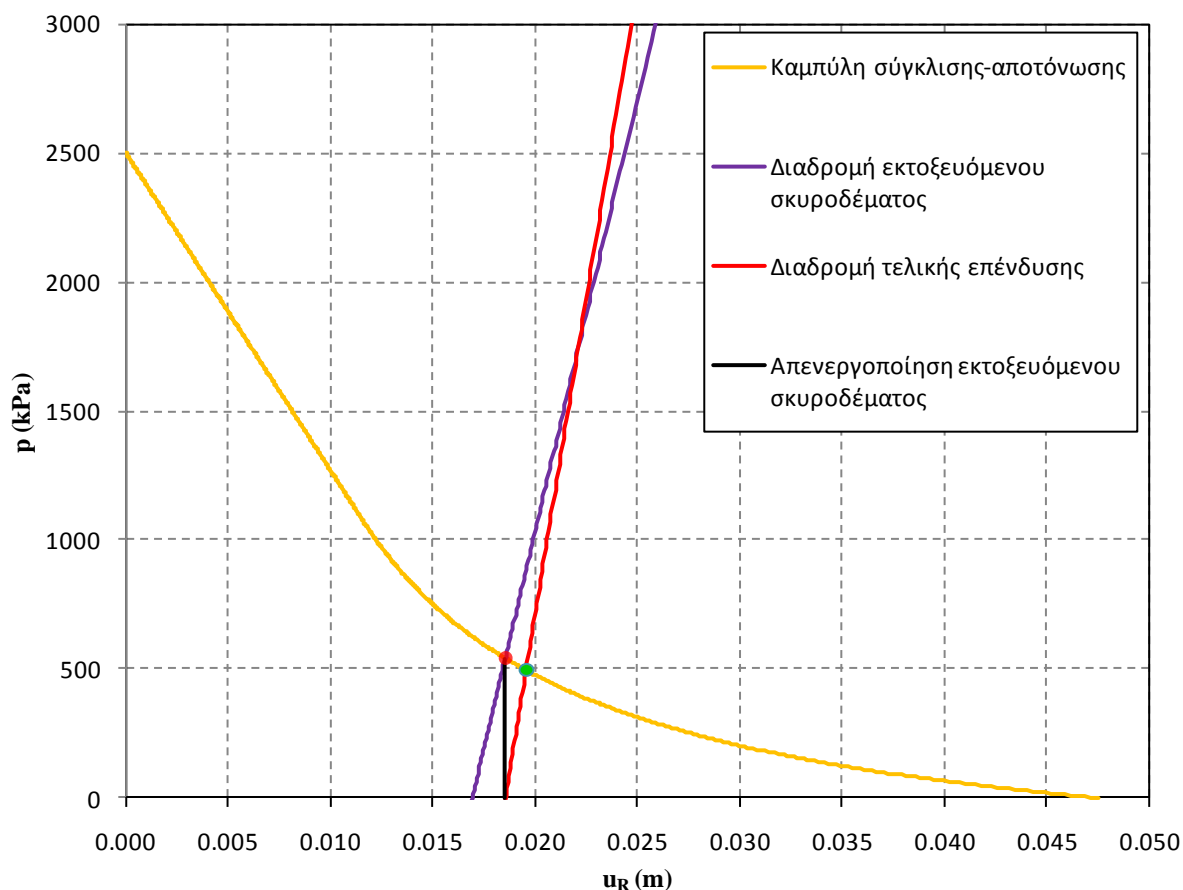
Από το τελευταίο σχήμα, φαίνεται ότι οι κατανομές των σημείων, και για τις τρεις περιπτώσεις του δείκτη γεωστατικών ωθήσεων, έχουν την ίδια μορφή. Επομένως, συμπεραίνουμε ότι δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερη εξάρτηση του λόγου  $p_n/p_{sh,3}$  από το δείκτη γεωστατικών ωθήσεων.

### 6.3.2 Σύγκριση πιέσεων από αριθμητικές αναλύσεις με πιέσεις από καμπύλες σύγκλισης αποτόνωσης

Στο σημείο αυτό γίνεται μία προσπάθεια σύγκρισης των αποτελεσμάτων των πιέσεων από τις αριθμητικές αναλύσεις, που πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, με τα αποτελέσματα από τις καμπύλες σύγκλισης αποτόνωσης.

#### 6.3.2.1 Περιγραφή διαγράμματος σύγκλισης-αποτόνωσης

Αρχικά, γίνεται μία ενδεικτική παρουσίαση (Εικόνα 6.3) των καμπυλών σύγκλισης-αποτόνωσης, όπως αυτές κατασκευάστηκαν στο Excel.



**Εικόνα 6.3:** Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με άμεση υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τοποθέτηση τελικής επένδυσης, μετά την απενεργοποίηση της άμεσης υποστήριξης

Στο παραπάνω διάγραμμα διακρίνεται με το κίτρινο χρώμα η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης της ανυποστήρικτης διατομής της σήραγγας. Κατά την τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης έχει ήδη πραγματοποιηθεί σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας ίση με  $u_{R,shot}$ . Η ευθεία με το μωβ χρώμα αναπαριστά τη διαδρομή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και η κλίση της είναι ανάλογη του μέτρου ελαστικότητάς του. Στο σημείο με το κόκκινο χρώμα επέρχεται η ισορροπία μεταξύ της άμεσης υποστήριξης και της βραχόμαζας.

Στη συνέχεια κατασκευάζεται και τοποθετείται εσωτερικά της προσωρινής υποστήριξης η τελική επένδυση. Έπειτα, απενεργοποιείται ο δακτύλιος εκτοξευόμενου σκυροδέματος και ενεργοποιείται ακολούθως η τελική επένδυση. Η "είσοδος" της τελικής επένδυσης στο διάγραμμα πραγματοποιείται στο σημείο που έχει μηδενική εσωτερική πίεση και σύγκλιση ίση με τη σύγκλιση στην οποία επήλθε η ισορροπία μεταξύ βραχόμαζας και εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Επομένως, η μαύρη ευθεία, που συμβολίζει την απενεργοποίηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, είναι κατακόρυφη.

Ακολούθως, ενεργοποιείται, όπως προαναφέρθηκε, η τελική επένδυση της σήραγγας. Η διαδρομή της τελικής επένδυσης αναπαριστάται στο παραπάνω διάγραμμα με την κόκκινη ευθεία. Παρατηρούμε ότι

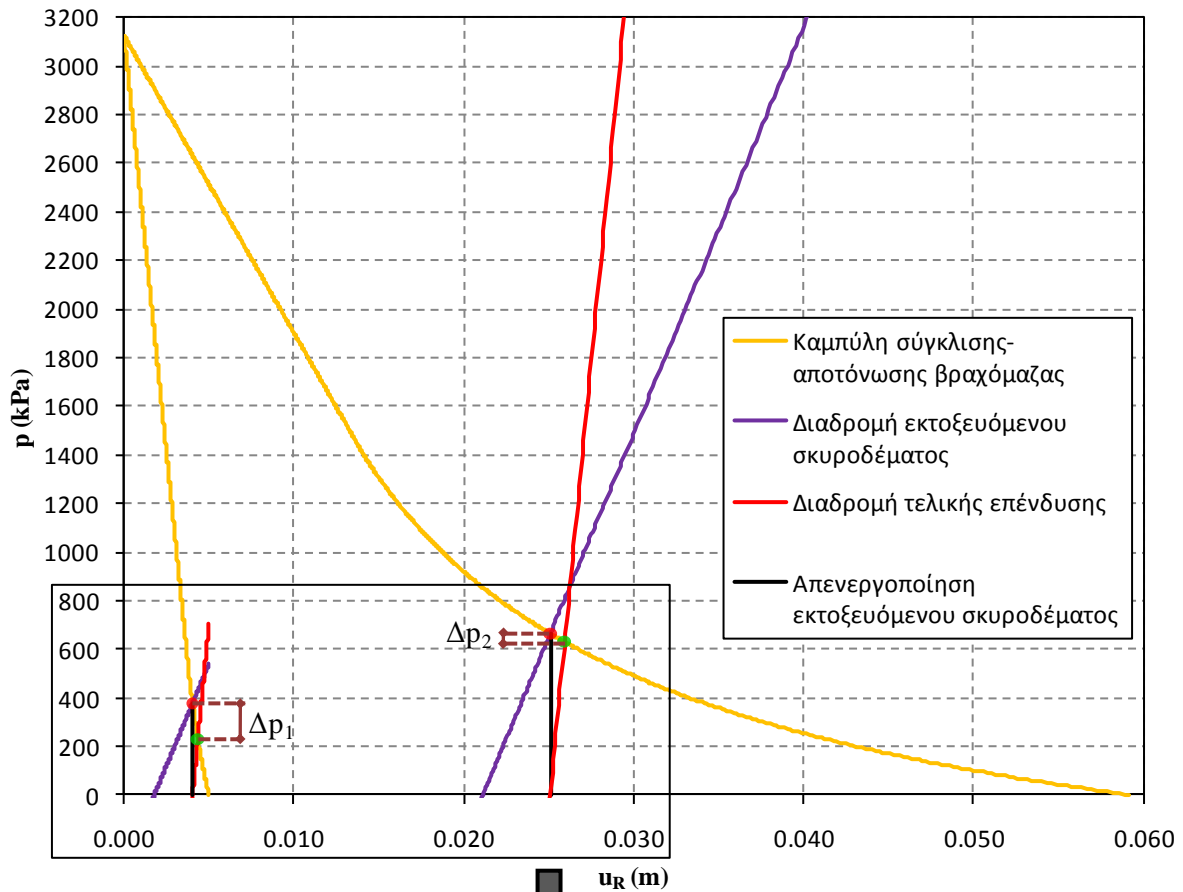
η κλίση της ευθείας αυτής είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας της τελικής επένδυσης. Τέλος, επέρχεται ισορροπία μεταξύ βραχόμαζας και τελικής επένδυσης, στο σημείο με την πράσινη απόχρωση. Στο σημείο αυτό φαίνεται η τελική σύγκλιση της σήραγγας, καθώς και η πίεση, την οποία καλείται τελικά να αναλάβει η τελική επένδυση.

Στο ακόλουθο διάγραμμα (Εικόνα 6.4) γίνεται σύγκριση τόσο των καμπυλών σύγκλισης-αποτόνωσης δύο βραχομαζών, όσο και των πιέσεων της άμεσης υποστήριξης και της τελικής επένδυσης στις δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Η μεν πρώτη βραχόμαζα είναι πολύ καλής ποιότητας ( $\sigma_{ci}=20\text{MPa}$ ,  $GSI=50$ ,  $m_i=10$  και  $\sigma_{cm}/p_{o,mean}=1.116$ ), ενώ η άλλη είναι χαμηλότερης ποιότητας ( $\sigma_{ci}=20\text{MPa}$ ,  $GSI=20$ ,  $m_i=6$  και  $\sigma_{cm}/p_{o,mean}=0.395$ ). Τα χαρακτηριστικά στοιχεία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, δηλαδή το πάχος του  $h_{sh}$  και το μέτρο ελαστικότητάς του  $E_{sh}$ , διατηρήθηκαν σταθερά και στις δύο περιπτώσεις. Το ίδιο συνέβη και με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά στοιχεία της τελικής επένδυσης. Επομένως, αφού τα στοιχεία του εκάστοτε μέτρου υποστήριξης διατηρήθηκαν σταθερά, σταθερές θα παραμένουν και οι δυσκαμψίες του καθενός. Άρα τόσο η κλίση της ευθείας που περιγράφει τη διαδρομή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όσο και η κλίση της ευθείας που περιγράφει τη διαδρομή της τελικής επένδυσης παραμένουν σταθερές και στις δύο περιπτώσεις, που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 6.4).

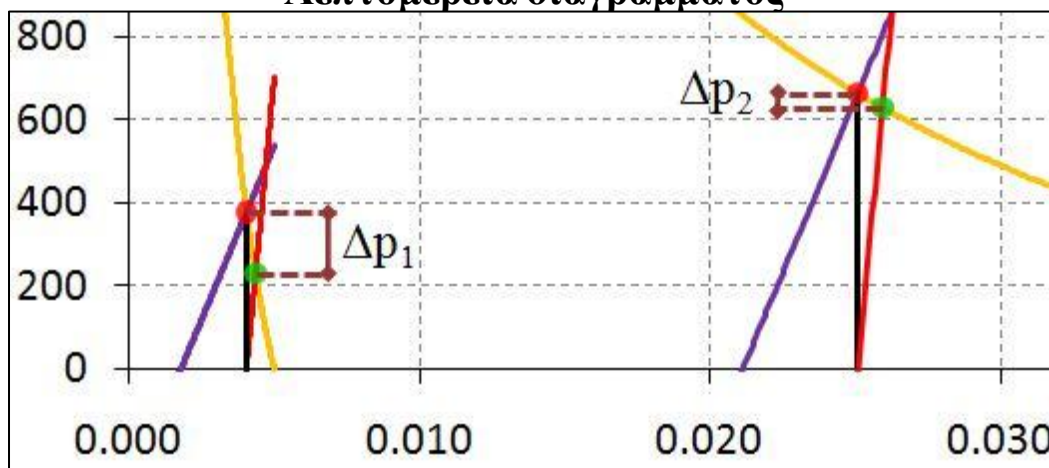
Μια πρώτη παρατήρηση, που αφορά τις καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και μόνο, έχει να κάνει με τη μεγάλη διαφορά των τελικών συγκλίσεων  $u_{R,o}$  ( $u_{R,o1}=5\text{mm}$  στην περίπτωση της πολύ καλής ποιοτικά βραχόμαζας έναντι  $u_{R,o2}=59\text{mm}$  στην άλλη περίπτωση) καθώς και με την, εν γένει, πιο μεγάλη κλίση της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης της ποιοτικά καλής βραχόμαζας.

Πέρα απ' αυτό, η πίεση που έχει να αναλάβει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και η τελική επένδυση, αντίστοιχα, είναι αρκετά μεγαλύτερες στην περίπτωση των κακών γεωτεχνικών συνθηκών. Ειδικότερα, στην περίπτωση των καλών γεωτεχνικών συνθηκών ( $\sigma_{ci}=20\text{MPa}$ ,  $GSI=50$ ,  $m_i=10$  και  $\sigma_{cm}/p_{o,mean}=1.116$ ) η πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι  $p_{sh,3}=377.5\text{kPa}$  και η πίεση της τελικής επένδυσης είναι  $p_{\Pi}=229.9\text{kPa}$ . Απ' την άλλη, στην κακή ποιοτικά βραχόμαζα οι αντίστοιχες τιμές είναι  $p_{sh,3}=664.2\text{kPa}$  και  $p_{\Pi}=630.0\text{kPa}$ .

Μια εξαιρετικά σημαντική και ενδιαφέρουσα παρατήρηση από το ίδιο διάγραμμα (Εικόνα 6.4) αφορά τις διαφορές μεταξύ των πιέσεων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και της τελικής επένδυσης  $\Delta p=p_{sh,3}-p_{\Pi}$ . Στην πρώτη περίπτωση βραχόμαζας, δηλαδή στις καλές γεωτεχνικές συνθήκες, ισχύει  $\Delta p_1=147.6\text{kPa}$  και μάλιστα η διαφορά αυτή,  $\Delta p_1$ , αποτελεί το 39.1% της  $p_{sh,3}$ , δηλαδή της πίεσης που αναλαμβάνει αρχικά το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Στην άλλη περίπτωση έχουμε  $\Delta p_2=34.2\text{kPa}$ , το οποίο, αντίστοιχα, αποτελεί μόλις το 5.2% της  $p_{sh,3}$ , για την περίπτωση της κακής ποιοτικά βραχόμαζας. Το συμπέρασμα που εξάγεται από αυτή την παρατήρηση είναι το εξής: όσο χαμηλότερη είναι η ποιότητα της βραχόμαζας, τόσο μεγαλύτερη είναι η τελική σύγκλιση της βραχόμαζας και, επίσης, τόσο πιο "ήπια" είναι η κλίση της καμπύλης σύγκλισης αποτόνωσης, στο δεξιό τμήμα της, δηλαδή στην περιοχή που μηδενίζεται η εσωτερική πίεση (ή ισοδύναμα που η σύγκλιση γίνεται ίση με την τελική  $u_{R,o}$ ). Επομένως, όσο χειρότερη είναι ποιοτικά μια βραχόμαζα, τόσο πιο μικρή είναι η διαφορά μεταξύ της πίεσης που έχει να αναλάβει η τελική επένδυση και της πίεσης που έχει να αναλάβει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα,  $\Delta p$  και, επιπλέον, τόσο μικρότερο ποσοστό της πίεσης που καλείται να αναλάβει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ( $p_{sh,3}$ ) είναι η διαφορά  $\Delta p$ .



### Λεπτομέρεια διαγράμματος



Εικόνα 6.4: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με άμεση υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $h_{sh}=20\text{cm}$ ) και τοποθέτηση τελικής επένδυσης (πάχος τελικής επένδυσης  $h_B=60\text{cm}$ ), μετά την απενεργοποίηση της άμεσης υποστήριξης, για δύο διαφορετικές βραχόμαζες

#### 6.3.2.2 Συσχέτιση των αποτελεσμάτων από τις καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων

Στο ξεκίνημα της παραγράφου αυτής κρίνεται σκόπιμη η αναφορά κάποιων παραδοχών, που εμπεριέχονται εξ' αρχής είτε στις αριθμητικές αναλύσεις είτε στις καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης, και οι οποίες ενδέχεται να προκαλούν διαφοροποιήσεις στις τιμές των αποτελεσμάτων-πίεσεων που λαμβάνουμε.



Σημαντικό στοιχείο για τις αριθμητικές αναλύσεις αποτελεί η ποιότητα του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων, που κατασκευάστηκε για την προσομοίωση του φαινομένου της εκσκαφής των σπράγγων. Εξάλλου, είναι ιδιαίτερα αυξημένη η "ευαισθησία" των αποτελεσμάτων ως προς τον κάρναβο των πεπερασμένων στοιχείων.

Επίσης, υπάρχει κάποια αβεβαιότητα για τις βραχόμαζες με δείκτη γεωστατικών ωθήσεων διάφορο της μονάδας  $K \neq 1.0$ . Αυτό συμβαίνει λόγω του μεγέθους της μέσης γεωστατικής τάσης,  $p_{o,m}$ , που έχουμε ορίσει με τον τύπο  $p_{o,m} = 0.5 \cdot (1+K) \cdot \gamma \cdot H = 0.5 \cdot (\sigma_v + \sigma_h)$ . Για την τιμή του μεγέθους αυτού είμαστε απολύτως σίγουροι μόνο στην περίπτωση  $K=1$ , αφού τότε το πεδίο των τάσεων είναι ομοιόμορφο. Στις άλλες περιπτώσεις, δηλαδή  $K=0.5$  ή  $K=1.5$ , το μέγεθος αυτό δίνει το μέσο όρο της οριζόντιας και της κατακόρυφης τάσης, κι έτσι δεν μπορούμε να πούμε μετά βεβαιότητας ότι ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Προκειμένου να καταλάβει κανείς καλύτερα το μέγεθος της αβεβαιότητας όσον αφορά στο συγκεκριμένο μέγεθος αρκεί η αναφορά ενός απλού παραδείγματος: έστω ότι  $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ . Σε μία βραχόμαζα με δείκτη γεωστατικών ωθήσεων  $K=0.5$  και σε βάθος  $H=500\text{m}$ , η μέση γεωστατική τάση ισούται με  $p_{o,m} = 0.5 \cdot 1.5 \cdot 25 \cdot 500 = 9375 \text{ kPa}$ . Σε μία άλλη βραχόμαζα με  $K=1.5$  και σε βάθος  $H=300\text{m}$ , η μέση γεωστατική τάση ισούται και πάλι με  $p_{o,m} = 9375 \text{ kPa}$ . Προκύπτει, δηλαδή, ότι για διαφορετικά ύψη υπερκειμένων και για διαφορετικό δείκτη γεωστατικών ωθήσεων, οι τάσεις είναι οι ίδιες, γεγονός που δεν ισχύει.

Επιπλέον, μία σημαντική διαφορά των δύο μεθόδων εξαγωγής αποτελεσμάτων είναι η εξής: απ' τη μία, στις καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης έχει γίνει η παραδοχή ακτινικού πεδίου τάσεων και απ' την άλλη, στις αριθμητικές αναλύσεις έχουν επιβληθεί στο μοντέλο οι βαρυτικές δυνάμεις όλων των στοιχείων του, δηλαδή με φορά προς τα κάτω.

Για τους λόγους αυτούς διατηρούμε τις επιφυλάξεις μας για την ταύτιση των τιμών των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων και των αποτελεσμάτων από τις καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης. Έτσι, προτιμήθηκε να διερευνηθεί η συσχέτιση μεταξύ των λόγων  $p_{\Pi}/p_{sh,3}$  και  $(p_{\Pi} - p_{sh,3})/p_{o,m}$  των δύο διαφορετικών μεθόδων, παρά μεταξύ των πιέσεων, σαν απόλυτα μεγέθη.

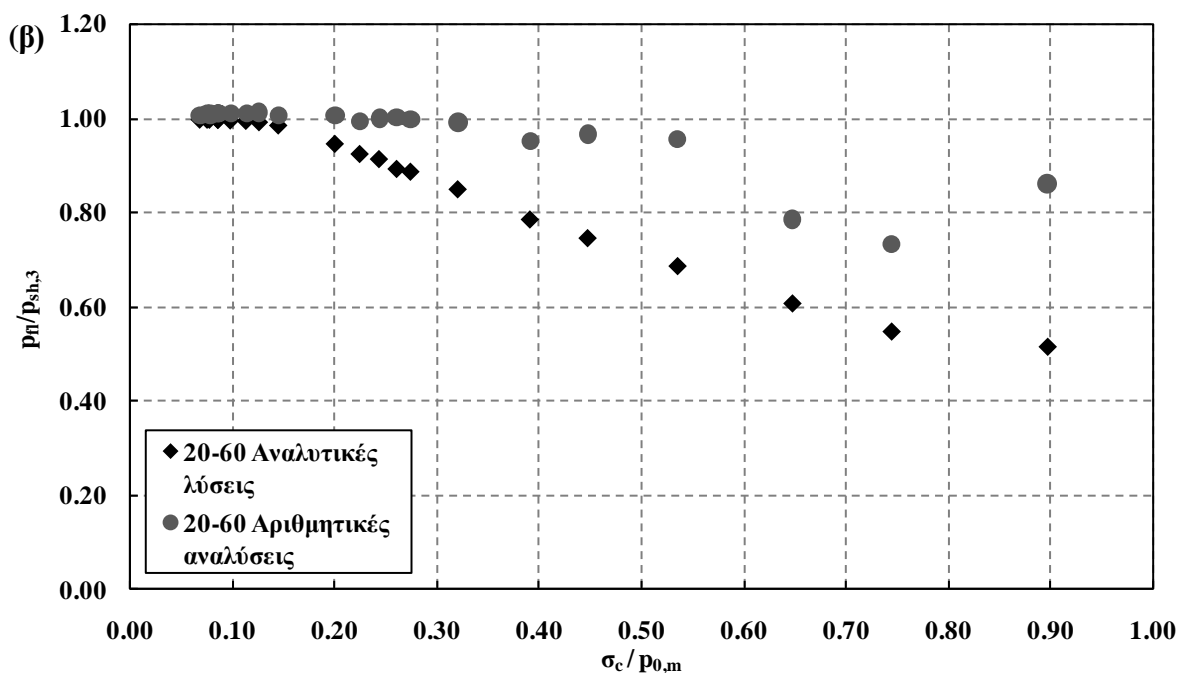
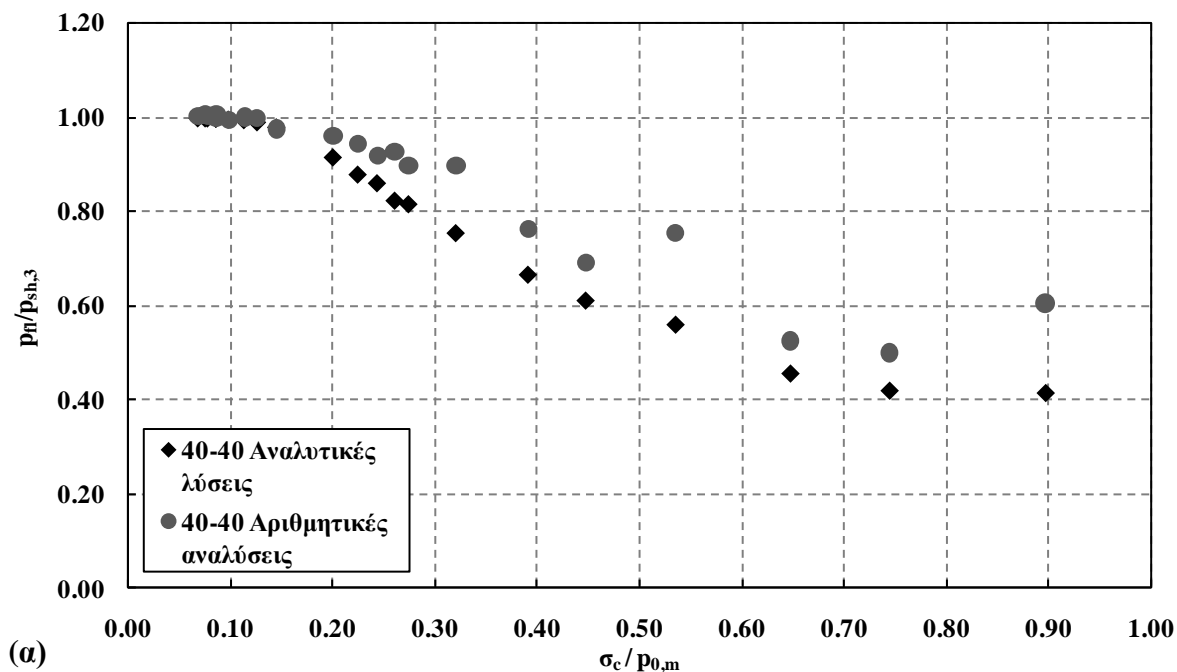
Στα δύο διαγράμματα του παρακάτω σχήματος (Σχήμα 6.16) γίνεται σύγκριση του λόγου  $p_{\Pi}/p_{sh,3}$ , όταν οι πιέσεις προκύπτουν από τις αναλυτικές λύσεις, δηλαδή τις καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης, με τον ίδιο λόγο  $p_{\Pi}/p_{sh,3}$ , με τις πιέσεις, όμως, αυτή τη φορά να προκύπτουν από τις αριθμητικές αναλύσεις. Η σύγκριση γίνεται για τις περιπτώσεις που τα μέτρα υποστήριξης έχουν κοινά χαρακτηριστικά (πάχος και μέτρο ελαστικότητας) και σε συνάρτηση με την ποιότητα της βραχόμαζας, η οποία και εδώ εκφράζεται με τη βοήθεια του δείκτη  $\sigma_c/p_{o,m}$ .

Και στις δύο περιπτώσεις (α) και (β) παρατηρούμε ότι οι κατανομές των λόγων έχουν την ίδια μορφή. Δηλαδή, και ο λόγος  $p_{\Pi}/p_{sh,3}$ , που προκύπτει από τα αποτελέσματα των αναλυτικών λύσεων, παρουσιάζει την τάση να μειώνεται με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών.

Όσον αφορά στο διάγραμμα (α), δηλαδή με  $h_{sh}=40\text{cm}$  και  $h_{\Pi}=40\text{cm}$  (ή ισοδύναμα με  $K_{\Pi}/K_{sh}=1.45$ ), παρατηρούμε ότι οι κατανομές των σημείων έχουν την ίδια μορφή και για τις δύο μεθόδους εξαγωγής αποτελεσμάτων. Αρχικά για βραχόμαζες χαμηλής ποιότητας, οι λόγοι  $p_{\Pi}/p_{sh,3}$  ταυτίζονται πρακτικά με τη μονάδα και, εν συνεχεία με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών, συνεχώς μειώνονται. Στις πιο καλές γεωτεχνικές συνθήκες ( $\sigma_c/p_{o,m} > 0.30$ ), ο λόγος  $p_{\Pi}/p_{sh,3}$  κυμαίνεται μεταξύ 0.40-0.75 για τις αναλυτικές λύσεις, ενώ για τις αριθμητικές αναλύσεις κυμαίνεται μεταξύ 0.5-0.9. Επί της ουσίας δηλαδή, σύμφωνα με τις αναλυτικές λύσεις, το φορτίο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μεταφέρεται σχεδόν αυτούσιο στην τελική επένδυση στις κακές γεωτεχνικές, ενώ στις καλές γεωτεχνικές συνθήκες μεταφέρεται το 40-75% αυτού στην τελική επένδυση.

Όσον αφορά στο άλλο διάγραμμα, την περίπτωση δηλαδή όπου  $h_{sh}=20\text{cm}$  και  $h_{\Pi}=60\text{cm}$ , οι δύο κατανομές έχουν και πάλι όμοια μορφή. Αυτή τη φορά, όμως, τα σημεία των διαφορετικών μεθόδων φαίνεται να έχουν μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους, χωρίς όμως σε καμία περίπτωση να μεταβάλλεται η αντιστοιχία της μορφής των κατανομών.

Η απόσταση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων είναι πιο κοντά στην περίπτωση που  $K_{\Pi}/K_{sh}=1.45$ . Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγαλύτερης δυσκαμψίας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με πάχος  $h_{sh}=40\text{cm}$  απ' ότι αυτού με πάχος  $h_{sh}=20\text{cm}$ . Έτσι, το σκυρόδεμα πάχους  $h_{sh}=40\text{cm}$  επιτρέπει την ανάπτυξη μικρότερων μετατοπίσεων και επομένως το εύρος διακύμανσης του λόγου  $p_{\Pi}/p_{sh,3}$  είναι αρκετά μικρότερο.



**Σχήμα 6.16:** Σύγκριση των μεταβολών του λόγου  $\rho_n / \rho_{sh,3}$  από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων και του ίδιου λόγου από τις αναλυτικές λύσεις, συναρτήσει της ποιότητας της βραχώμαζας  $\sigma_c / \rho_{0,m}$ , για τις περιπτώσεις (α) με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $h_{sh}=40\text{cm}$  και πάχος τελικής επένδυσης  $h_n=40\text{cm}$ , και (β) με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $h_{sh}=40\text{cm}$  και πάχος τελικής επένδυσης  $h_n=40\text{cm}$

Γενικότερα, από τα διαγράμματα (α) και (β) του παραπάνω σχήματος παρατηρούμε ότι οι κατανομές των δύο μεθόδων είναι πολύ κοντά η μία στην άλλη και ο τρόπος μεταβολής του λόγου  $\rho_n / \rho_{sh,3}$  είναι κοινός στις αντίστοιχες περιπτώσεις.

Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα δύο παραπάνω διαγράμματα (Σχήμα 6.15 και Σχήμα 6.16), μπορούμε να πούμε ότι, στις κακές γεωτεχνικές συνθήκες, το φορτίο της άμεσης υποστήριξης μεταφέρεται σχεδόν αυτούσιο στην τελική επένδυση (80-100% από τις αναλυτικές

λύσεις και 90-100% από τις αριθμητικές αναλύσεις). Αντίθετα, στις περιπτώσεις καλών ποιοτικά βραχομαζών, το φορτίο που μεταφέρεται στην τελική επένδυση είναι το 50-100% του φορτίου της άμεσης υποστήριξης, όπως προκύπτει από τις αριθμητικές αναλύσεις. Το αντίστοιχο ποσοστό του φορτίου, όπως αυτό προκύπτει από τις αναλυτικές λύσεις, είναι 40-85%.

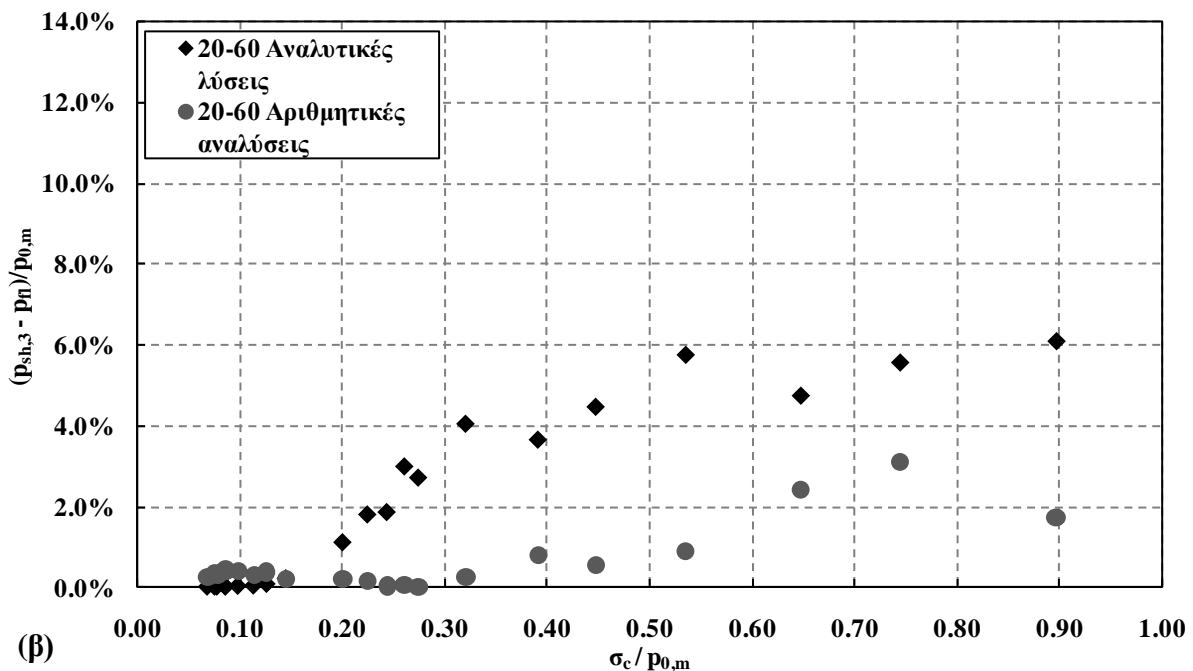
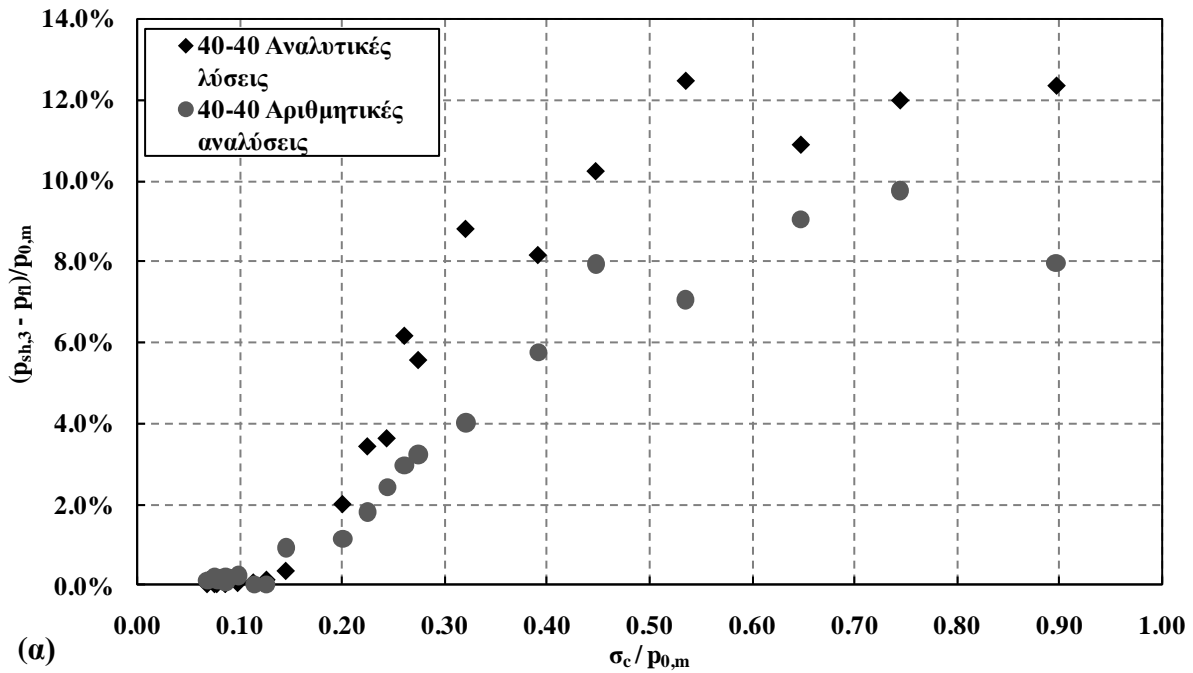
Για την περαιτέρω διερεύνηση της αντιστοιχίας μεταξύ των αποτελεσμάτων από τις αριθμητικές αναλύσεις και των αποτελεσμάτων από τις καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης (αναλυτικές λύσεις), κατασκευάστηκε και το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.17), που φαίνεται στην επόμενη σελίδα.

Στο σχήμα αυτό γίνεται σύγκριση μεταξύ των λόγων  $(p_n - p_{sh,3})/p_{o,m}$  των δύο διαφορετικών μεθόδων εξαγωγής αποτελεσμάτων (αριθμητικές αναλύσεις-καμπύλες σύγκλισης αποτόνωσης), για τις περιπτώσεις που τα μέτρα υποστήριξης της σήραγγας έχουν κοινά πάχη και μέτρα ελαστικότητας. Παρατηρούμε, λοιπόν, όπως και παραπάνω (Σχήμα 6.16), ότι η μορφή των κατανομών είναι κοινή και για τις δύο μεθόδους.

Προκύπτει, δηλαδή, και για τις δύο περιπτώσεις μέτρων υποστήριξης ότι με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών, αυξάνεται ο λόγος  $(p_n - p_{sh,3})/p_{o,m}$ , και επομένως αυξάνεται η διαφορά μεταξύ της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $p_{sh,3}$  και της πίεσης της τελικής επένδυσης  $p_n$ . Βέβαια, υπάρχει και πάλι μια διαφορά μεταξύ των κατανομών των δύο μεθόδων, η μέγιστη τιμή της οποίας φτάνει μέχρι λίγο πάνω από το 5% περίπου, ενώ συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 1.5% και 3%.

Με τη βοήθεια των διαγραμμάτων σύγκλισης αποτόνωσης, και ειδικότερα του συγκριτικού διαγράμματος (Εικόνα 6.4), είμαστε σε θέση να αιτιολογήσουμε-εξηγήσουμε την αύξηση του λόγου  $(p_n - p_{sh,3})/p_{o,m}$  με την αύξηση της ποιότητας της βραχώμαζας. Όπως προέκυψε από το εν λόγω σχήμα, με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών (ή ισοδύναμα με την αύξηση του δείκτη ποιότητας  $\sigma_c/p_{o,m}$ ), αυξάνεται η διαφορά μεταξύ της πίεσης που καλείται να αναλάβει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα,  $p_{sh,3}$ , και της πίεσης που καλείται να αναλάβει η τελική επένδυση,  $p_n$ .

Από όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι και οι αριθμητικές αναλύσεις και οι αναλυτικές λύσεις περιγράφουν με τον ίδιο τρόπο το φαινόμενο της "μεταφοράς" των φορτίων από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (άμεση υποστήριξη) στην τελική επένδυση. Η παρατήρηση αυτή προκύπτει από την ομοιότητα της μορφής των κατανομών των λόγων  $p_n/p_{sh,3}$  και  $(p_n - p_{sh,3})/p_{o,m}$  για τις δύο διαφορετικές μεθόδους προσέγγισης του φαινομένου, συναρτήσει των γεωτεχνικών συνθηκών. Εκτός, όμως, από την ομοιότητα των μορφών των κατανομών, παρατηρούμε ότι και οι τιμές των δύο παραπάνω λόγων, που μελετήσαμε στην παράγραφο αυτή, είναι πολύ κοντά και για τις δύο μεθόδους που χρησιμοποιήσαμε.

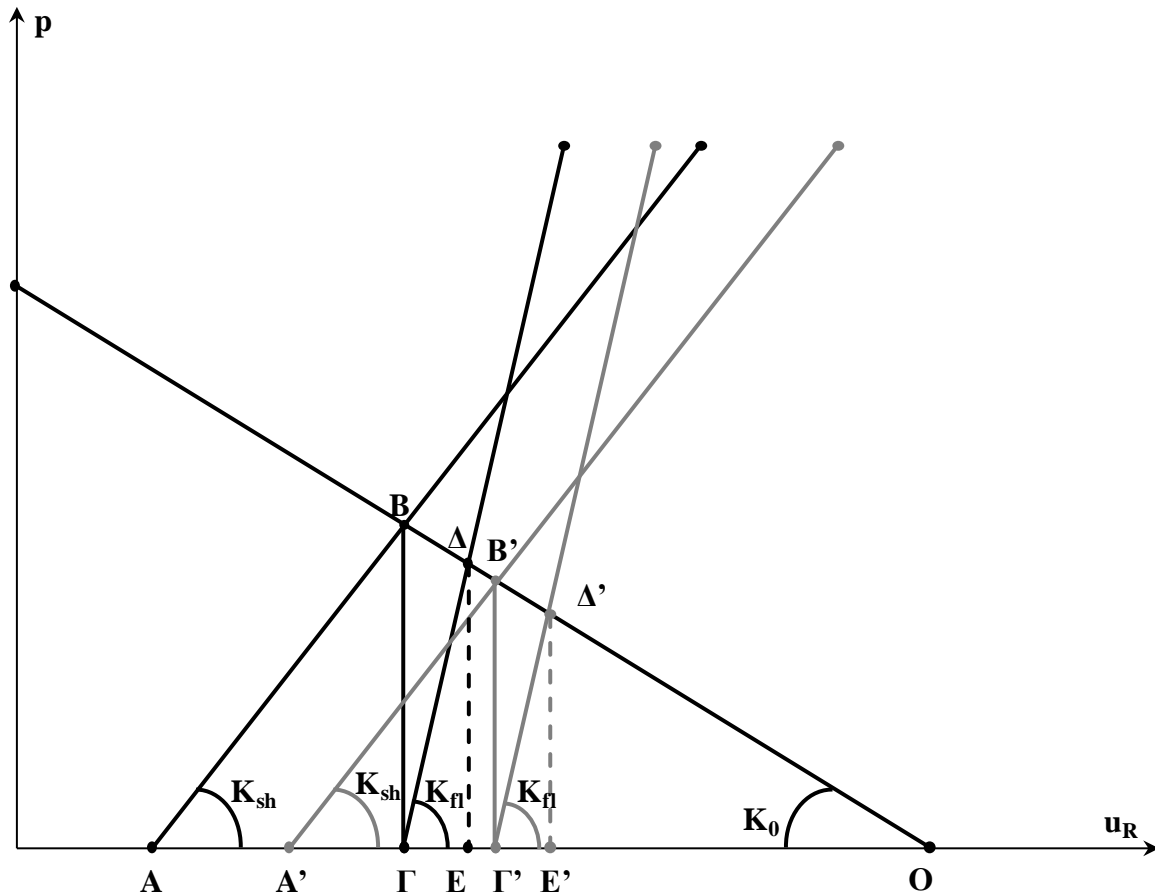


Σχήμα 6.17: Σύγκριση των μεταβολών του λόγου  $(p_{fl} - p_{sh,3}) / p_{0,m}$  από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων και του ίδιου λόγου από τις αναλυτικές λύσεις, συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας  $\sigma_c / p_{0,m}$ , για τις περιπτώσεις (α) με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $h_{sh}=40\text{cm}$  και πάχος τελικής επένδυσης  $h_{fl}=40\text{cm}$ , και (β) με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $h_{sh}=40\text{cm}$  και πάχος τελικής επένδυσης  $h_{fl}=40\text{cm}$

### 6.3.3 Διερεύνηση της εξάρτησης του λόγου $p_{fl} / p_{sh,3}$ από το σημείο τοποθέτησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, για την περίπτωση που δεν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη περιμετρικά της σήραγγας

Στη συγκεκριμένη παράγραφο γίνεται μία προσπάθεια προσδιορισμού της εξάρτησης του λόγου των πιέσεων  $p_{fl} / p_{sh,3}$  ( $p_{fl}$ : πίεση που αναλαμβάνει η τελική επένδυση, και  $p_{sh,3}$ : πίεση που αναλαμβάνει το

εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) από το σημείο τοποθέτησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Οι παραδοχές που έχουμε κάνει στην παρούσα διερεύνηση είναι οι εξής: αρχικά, υποθέσαμε πως δεν αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις περιμετρικά της σήραγγας. Για το λόγο αυτό, η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης της βραχόμαζας είναι ευθεία με κλίση  $K_0$ . Εν συνεχεία, υποθέσαμε πως οι δυσκαμψίες των μέτρων υποστήριξης της σήραγγας παραμένουν σταθερές και για τις δύο περιπτώσεις τοποθέτησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



**Σχήμα 6.18:** Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για βραχόμαζα που δεν αναπτύσσει πλαστική ζώνη παραμορφώσεων γύρω από τη σήραγγα και για δύο σημεία τοποθέτησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (A, A')

Τα σημεία A και A' είναι τα δύο διαφορετικά σημεία τοποθέτησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Τα σημεία B και B' είναι τα σημεία στα οποία επέρχεται ισορροπία μεταξύ της άμεσης υποστήριξης και της βραχόμαζας. Οι διαδρομές BΓ και B'Γ' περιγράφουν την απενεργοποίηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και τα σημεία Γ και Γ' δείχνουν επίσης τα σημεία στα οποία τοποθετείται η τελική επένδυση. Στα σημεία Δ και Δ' επέρχεται ισορροπία μεταξύ βραχόμαζας και τελικής επένδυσης και, τέλος, τα σημεία E και E' είναι οι προβολές των σημείων Δ και Δ' στον άξονα των συγκλίσεων (άξονας χ).

Από τα παραπάνω προκύπτει επιπλέον ότι τα ευθύγραμμα τμήματα BΓ-B'Γ' και ΔE-Δ'E' αναπαριστούν τις πιέσεις που καλούνται να αναλάβουν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και η τελική επένδυση, αντίστοιχα. Επομένως, μπορούμε να πούμε ότι  $BΓ = p_{sh,3}^{(1)}$ ,  $B'Γ' = p_{sh,3}^{(2)}$ ,  $ΔE = p_{fl}^{(1)}$  και  $B'Γ' = p_{fl}^{(2)}$ .

Από ομοιότητα τριγώνων (BΓO), (B'Γ'O) προκύπτει:

$$\frac{(B\Gamma)}{(B'\Gamma')} = \frac{(BO)}{(B'O)} = \frac{(\Gamma O)}{(\Gamma'O)} \quad (6-1)$$

Από ομοιότητα τριγώνων ( $\Delta EO$ ), ( $\Delta'E'O$ ) προκύπτει:

$$\frac{(\Delta E)}{(\Delta'E')} = \frac{(\Delta O)}{(\Delta'O)} = \frac{(EO)}{(E'O)} \quad (6-2)$$

Από ομοιότητα τριγώνων ( $\Gamma\Delta O$ ), ( $\Gamma'\Delta'O$ ) προκύπτει:

$$\frac{(\Gamma\Delta)}{(\Gamma'\Delta')} = \frac{(\Gamma O)}{(\Gamma'O)} = \frac{(\Delta O)}{(\Delta'O)} \quad (6-3)$$

Από τις δύο τελευταίες σχέσεις προκύπτει η σχέση:

$$\frac{(\Delta E)}{(\Delta'E')} = \frac{(\Gamma O)}{(\Gamma'O)} \quad (6-4)$$

Συνδυάζοντας, τώρα, την πρώτη σχέση (6-1) με την τελευταία (6-4), προκύπτει ότι:

$$\frac{(B\Gamma)}{(B'\Gamma')} = \frac{(\Delta E)}{(\Delta'E')} \Rightarrow \frac{(\Delta E)}{(B\Gamma)} = \frac{(\Delta'E')}{(B'\Gamma')} = \sigma\tau\alpha\theta = \frac{P_{fl}}{P_{sh,3}} \quad (6-5)$$

Τελικά, δηλαδή, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο λόγος  $p_n/p_{sh,3}$  παραμένει σταθερός ανεξαρτήτως του σημείου τοποθέτησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

#### 6.4 ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ & ΑΓΚΥΡΙΑ - ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ

Στο υποκεφάλαιο αυτό γίνεται η ποσοτική επεξεργασία των αριθμητικών αναλύσεων που, ως άμεση υποστήριξη, λειτουργούν εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου. Εν συνεχεία τα μέτρα αυτά απενεργοποιούνται και, τότε, τοποθετείται η τελική επένδυση, η οποία καλείται να αναλάβει το σύνολο της φόρτισης.

Πραγματοποιήθηκαν 42 αριθμητικές αναλύσεις αυτής της κατηγορίας, για δύο πυκνότητες αγκυρίων αλλά για ένα μόνο λόγο δυσκαμψιών,  $K_n/K_{sh}=1.45$ . Το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, στις εν λόγω αναλύσεις, είναι  $h_{sh}=40\text{cm}$ , όσο και το πάχος της τελικής επένδυσης,  $h_{sh}=40\text{cm}$ . Τα αγκύρια βράχου που χρησιμοποιήθηκαν έχουν μήκος 8 μέτρα και τοποθετήθηκαν τόσο σε πυκνή ( $s=1\text{m}$ ) όσο και σε αραιή διάταξη ( $s=2\text{m}$ ).

Από την επεξεργασία των αναλύσεων αυτών, θα διερευνηθεί ο τρόπος μεταφοράς των φορτίων από την άμεση υποστήριξη (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου) στην τελική επένδυση. Στην επεξεργασία αυτή χρησιμοποιήσαμε τα αποτελέσματα των πραγματικών πιέσεων των αγκυρίων  $p_b^f$  από τις αναλύσεις της ενότητας 6.2. Αυτό κατέστη δυνατό, καθώς τα τρία πρώτα βήματα των αναλύσεων της παρούσας ενότητας και των αναλύσεων της ενότητας 6.2 είναι πανομοιότυπα. Υπενθυμίζεται ότι στις αναλύσεις της ενότητας 6.2 το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μαζί με τα αγκύρια βράχου λειτουργούσαν σαν άμεση υποστήριξη (3<sup>ο</sup> βήμα αριθμητικών αναλύσεων) και στη συνέχεια απενεργοποιούνταν τα αγκύρια βράχου, και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα λειτουργούσε ως τελική επένδυση. Όπως φαίνεται και από την ακόλουθη εικόνα, τα μέτρα άμεσης υποστήριξης των παραπάνω αναλύσεων και των αναλύσεων που επεξεργαζόμαστε στην παρούσα ενότητα είναι ακριβώς τα ίδια. Για το λόγο αυτό είμαστε σε θέση να χρησιμοποιήσουμε την  $p_b^f$  από τις προηγούμενες αναλύσεις.

Εκμεταλλεζόμενοι λοιπόν την ομοιότητα των μέτρων άμεσης υποστήριξης των δύο σετ αναλύσεων, δημιουργήσαμε τον όρο p. Πρόκειται για τη συνολική πίεση που αναλαμβάνουν τα μέτρα άμεσης υποστήριξης και προκύπτει ως το άθροισμα της πραγματικής πίεσης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια,  $p_b^r$ , και της πίεσης που αναλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα,  $p_{sh,3}$ .

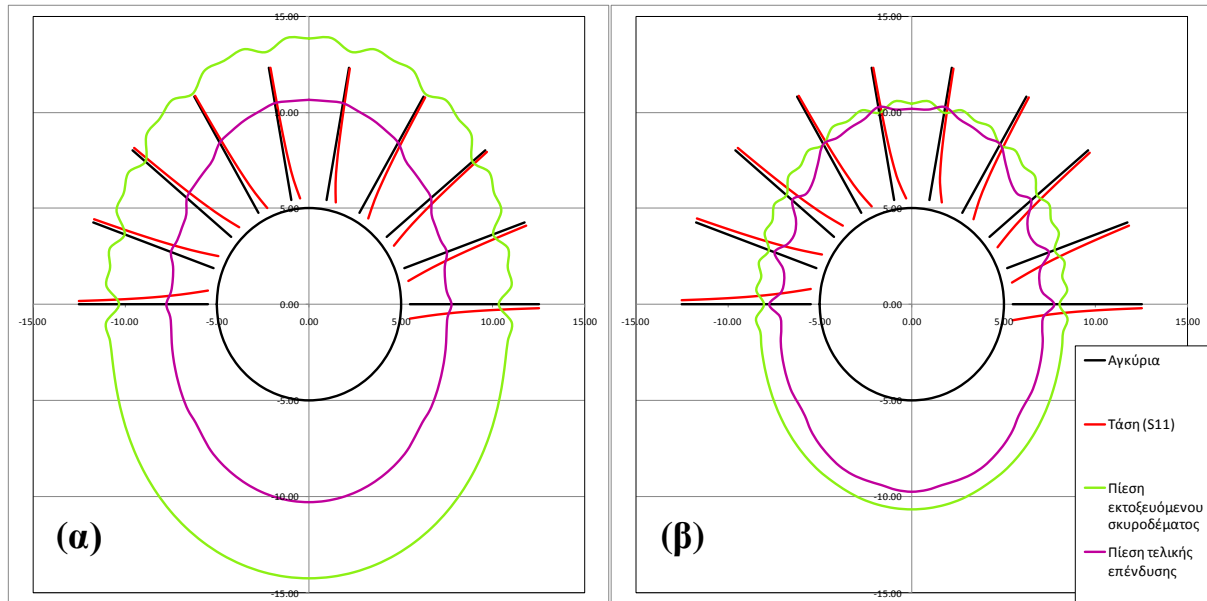
```

** @@@@@@@@@@@@@@@@@@ STEP4 @@@@@@@@@@@@@@@@@@
**
**
**STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000
**
** @@@@@@@@@@@@@@@@@@ STEP3 @@@@@@@@@@@@@@@@@@
**
**
**STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000
**
**STATIC
0.01,1,0.0000000001,0.2
**
**
**MODEL CHANGE, ADD
P_FL
**
**
**
**DLOAD
P_FL, GRAV,10,0,-1,0
**
** @@@@@@@@@@@@@@@@@@ STEP5 @@@@@@@@@@@@@@@@@@
**
**
**STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000
**
**STATIC
0.01,1,0.0000000001,0.2
**
**
**MODEL CHANGE, REMOVE
G_SHOTA
G_SHOTB
**G_AGK5_A
**G_AGK5_P
G_AGK8_A
**G_AGK8_P
**
**
**DLOAD
G_SHOTA, GRAV,10,0,-1,0
G_SHOTB, GRAV,10,0,-1,0
**G_AGK5_A, GRAV,10,0,-1,0
**G_AGK5_P, GRAV,10,0,-1,0
G_AGK8_A, GRAV,10,0,-1,0
**G_AGK8_P, GRAV,10,0,-1,0
**

```

**Εικόνα 6.5:** 3<sup>ο</sup>, 4<sup>ο</sup> και 5<sup>ο</sup> Βήμα προσομοίωσης των αριθμητικών αναλύσεων, που σαν άμεση υποστήριξη έχουν εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου μήκους 8 μέτρων σε αραιή διάταξη ( $s=2m$ ), τα οποία απενεργοποιούνται και στη θέση τους τοποθετείται η τελική επένδυση

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι, στην κατηγορία αυτή, εκτός από τις αναλύσεις με λόγο δυσκαμψιών  $K_{fl}/K_{sh}=1.45$ , των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου, πραγματοποιήθηκαν και οι αντίστοιχες με λόγο  $K_{fl}/K_{sh}=39.15$ . Στη συνέχεια γίνεται εκτενής παρουσίαση και επεξεργασία των αναλύσεων με λόγο  $K_{fl}/K_{sh}=1.45$ . Πριν απ' αυτά, όμως, γίνεται μία σύντομη σύγκριση των κατανομών των πιέσεων για τους δύο λόγους δυσκαμψίας.



**Εικόνα 6.6:** Σύγκριση κατανομών πιέσεων εκτοξευόμενου σκυροδέματος και τελικής επένδυσης για τις περιπτώσεις: (α)  $h_{sh}=40\text{cm}$  και  $h_{\pi}=40\text{cm}$  και (β)  $h_{sh}=20\text{cm}$  και  $h_{\pi}=60\text{cm}$

Αρχικά, όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, η πίεση που αναλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση που αυτό έχει πάχος  $h_{sh}=40\text{cm}$ . Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη δυσκαμψία του δακτυλίου πάχους  $h_{sh}=40\text{cm}$ , σε σχέση με το δακτύλιο πάχους  $h_{sh}=20\text{cm}$ . Στη διαφορά των δυσκαμψιών των δύο περιπτώσεων οφείλεται και η διαφορετική πτώση πίεσης στις θέσεις των αγκυρίων, κατά την άμεση υποστήριξη της διατομής της σήραγγας. Ειδικότερα, στην περίπτωση του δακτυλίου με πάχος  $h_{sh}=40\text{cm}$  αναπτύσσονται μικρότερες παραμορφώσεις, και επομένως το φορτίο που αναλαμβάνουν τα αγκύρια βράχου ανηγμένο στο μέσο φορτίο της άμεσης υποστήριξης είναι μικρότερο στην περίπτωση αυτή.

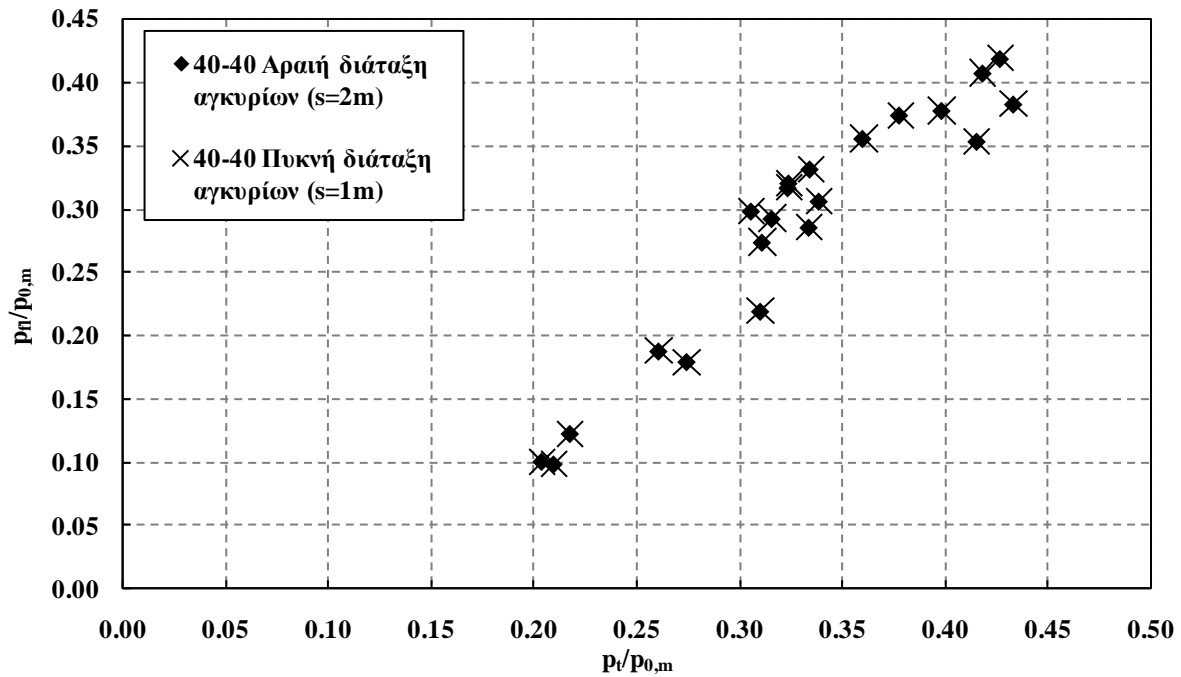
Μετά την απενεργοποίηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης, η τελική επένδυση καλείται να αναλάβει τα φορτία. Η διαφοροποίηση, που αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι η εξής: στις θέσεις που, στη φάση της άμεσης υποστήριξης, είχαν τοποθετηθεί αγκύρια βράχου, παρατηρείται ένα τοπικό "τίναγμα" προς τα πάνω στην κατανομή της πίεσης της τελικής επένδυσης με τη μεγαλύτερη δυσκαμψία, δηλαδή με πάχος  $h_{\pi}=60\text{cm}$ . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μεγαλύτερη δυσκαμψία της επιτρέπει να αναλαμβάνει στο σύνολό τους σχεδόν τα φορτία της άμεσης υποστήριξης, δηλαδή και των αγκυρίων και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

#### 6.4.1 Διερεύνηση του τρόπου μεταφοράς των φορτίων από την άμεση υποστήριξη στην τελική επένδυση

Αρχικά, διερευνάται η σχέση μεταξύ της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνουν τα μέτρα άμεσης υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου),  $p_i$ , και της πίεσης που αναλαμβάνει η τελική επένδυση της σήραγγας,  $p_{\pi}$ . Η διερεύνηση αυτή πραγματοποιείται για δύο διαφορετικές πυκνότητες καννάβων αγκυρίων. Έτσι, κατασκευάστηκε το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 6.19), στο οποίο απεικονίζεται η μεταβολή των δύο αυτών πιέσεων, ανηγμένων, όμως, στη μέση γεωστατική τάση  $p_{0,m}$ , τόσο για την περίπτωση της αραιής ( $s=2\text{m}$ ) όσο και της πυκνής ( $s=1\text{m}$ ) διάταξης αγκυρίων.

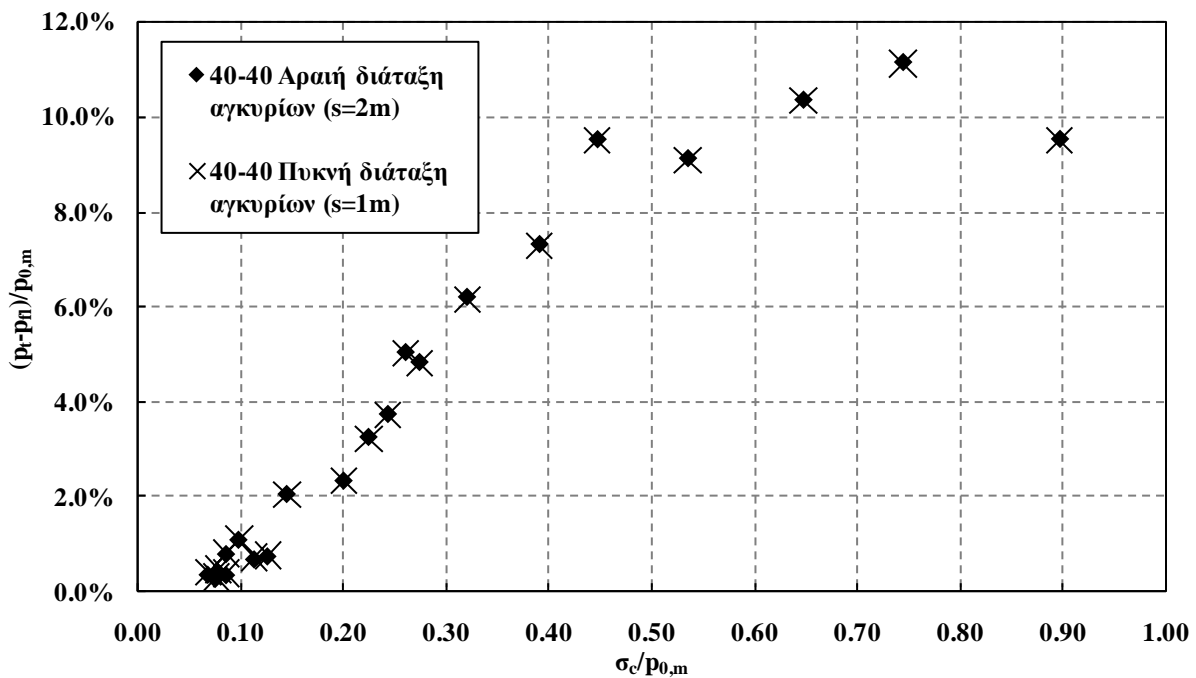
Από το διάγραμμα αυτό, παρατηρούμε ότι τα σημεία των δύο κατανομών πρακτικά ταυτίζονται. Αυτό σημαίνει ότι τα αγκύρια δεν ενεργοποιούνται σε μεγάλο βαθμό και, επομένως, η πυκνότητα του καννάβου των αγκυρίων δεν επηρεάζει ουσιαστικά τις κατανομές των πιέσεων. Επίσης, είναι εμφανές ότι, στο σύνολο των αριθμητικών αναλύσεων, η πίεση που αναλαμβάνει η τελική επένδυση της σήραγγας είναι μικρότερη από τη συνολική πίεση που αναλαμβάνουν τα μέτρα άμεσης υποστήριξης, δηλαδή το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τα αγκύρια βράχου μαζί.





**Σχήμα 6.19:** Συσχέτιση της, ανηγμένης στη μέση γεωστατική τάση, πίεσης που αναλαμβάνουν τα μέτρα άμεσης υποστήριξης,  $p_t$ , με την, ανηγμένη στη μέση γεωστατική τάση, πίεση που αναλαμβάνει η τελική επένδυση,  $p_n$ , για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ) και πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων

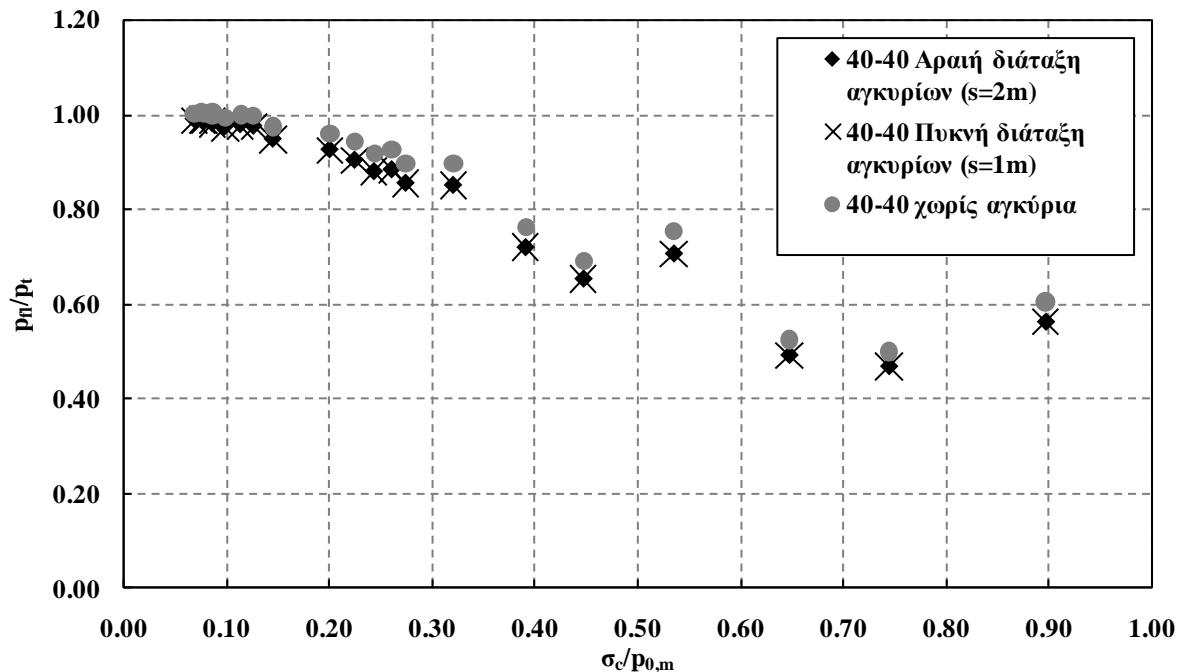
Από το ακόλουθο διάγραμμα παρατηρούμε ότι με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών αυξάνεται ο λόγος της διαφοράς των πιέσεων, που αναλαμβάνει η τελική επένδυση και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, προς τη μέση γεωστατική τάση, λαμβάνοντας τιμές από 0-11%. Φαίνεται, όμως, και πάλι πως δεν υπάρχει η παραμικρή διαφοροποίηση μεταξύ των δύο κατανομών, δηλαδή δε διαφοροποιείται πρακτικά η κατανομή με τη μεταβολή της πυκνότητας του καννάβου των αγκυρίων βράχου.



**Σχήμα 6.20:** Μεταβολή της διαφοράς της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνει η άμεση υποστήριξη από την πίεση από την πίεση που αναλαμβάνει η τελική επένδυση, ανηγμένης στην μέση γεωστατική τάση, ανάλογα με την ποιότητα της βραχώμαζας  $\sigma_c/p_{0,m}$ , για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ) και πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων

Στο επόμενο διάγραμμα, παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου  $p_n/p_t$ , δηλαδή της πίεσης της τελικής επένδυσης προς την πίεση των μέτρων άμεσης υποστήριξης, συναρτήσει της ποιότητας της βραχώμαζας, η οποία συμβολίζεται με τη βοήθεια του δείκτη ποιότητας  $\sigma_c/p_{o,m}$ . Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι η μεταβολή της πυκνότητας του καννάβου αγκυρίων δεν επηρεάζει πρακτικά το λόγο  $p_n/p_t$ . Φαίνεται ότι, στις πολύ χαμηλής ποιότητας βραχώμαζες, ο λόγος  $p_n/p_t$  βρίσκεται πολύ κοντά στη μονάδα και, εν συνεχεία, όσο βελτιώνεται η ποιότητα της βραχώμαζας, τόσο μειώνεται ο λόγος  $p_n/p_t$ .

Στο ίδιο διάγραμμα (Σχήμα 6.21) φαίνεται και η ίδια κατανομή για την περίπτωση που δε χρησιμοποιήθηκαν αγκύρια βράχου, ως άμεση υποστήριξη. Στην περίπτωση αυτή ισχύει  $p_t=p_{sh,3}$ , αφού η άμεση υποστήριξη αποτελείται μόνο από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Μ' αυτόν τον τρόπο φαίνεται η αντιστοιχία της μορφής των κατανομών  $p_n/p_t - \sigma_c/p_{o,m}$ , ανεξαρτήτως των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, αρκεί βέβαια να μη μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά στοιχεία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και της τελικής επένδυσης.



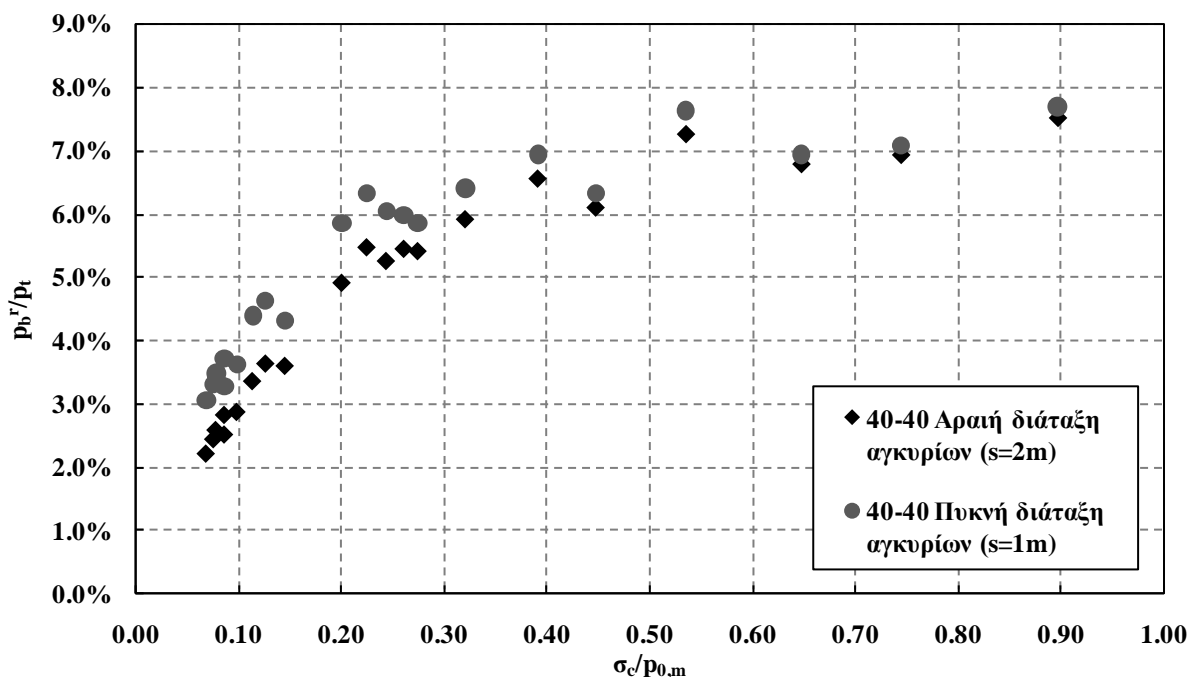
**Σχήμα 6.21: Μεταβολή του λόγου της πίεσης της τελικής επένδυσης προς την πίεση των μέτρων άμεσης υποστήριξης,  $p_n/p_t$ , συναρτήσει της ποιότητας της βραχώμαζας, για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ), πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων και χωρίς αγκύρια βράχου**

Στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 6.22) φαίνεται η συμβολή των αγκυρίων στην ανάληψη της φόρτισης από την άμεση υποστήριξη, για τις περιπτώσεις του αραιού ( $s=2m$ ) και του πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων. Παρατηρούμε ότι το ποσοστό της συνολικής πίεσης των μέτρων άμεσης υποστήριξης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια βράχου αυξάνεται με τη βελτίωση της ποιότητας της βραχώμαζας. Μάλιστα, η αύξηση του δείκτη ποιότητας  $\sigma_c/p_{o,m}$  επιφέρει μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση του λόγου  $p_b^t/p_t$ , στις περιπτώσεις σχετικά κακών γεωτεχνικών συνθηκών. Αυτό φαίνεται και από τη μεγάλη κλίση της κατανομής στην περιοχή των μικρών  $\sigma_c/p_{o,m}$ .

Από το διάγραμμα αυτό επιβεβαιώνονται επιπλέον δύο παρατηρήσεις που είχαμε κάνει παραπάνω. Πρώτον, το γεγονός ότι με τη διαφοροποίηση της πυκνότητας του καννάβου των αγκυρίων, δε διαφοροποιείται σε σημαντικό βαθμό η συμβολή των αγκυρίων στην ανάληψη της φόρτισης. Και δεύτερον, το γεγονός ότι τα αγκύρια βράχου δεν ενεργοποιούνται σε σημαντικό βαθμό, πράγμα που φαίνεται από το πολύ μικρό ποσοστό της  $p_t$  που αναλαμβάνουν. Ειδικότερα, παρατηρούμε ότι το ποσοστό  $p_b^t/p_t$  δεν ξεπερνάει σε καμία περίπτωση το 8%, γεγονός που αποτελεί σαφή ένδειξη της αρκετά μικρής συμβολής των αγκυρίων στην ανάληψη της φόρτισης.

Με το σκεπτικό αυτό θα πραγματοποιηθούν, στη συνέχεια, αριθμητικές αναλύσεις, στις οποίες η διάνοιξη της σήραγγας θα πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Αρχικά, θα εκσκάπτεται η άνω

ημιδιατομή της σήραγγας, στην οποία θα τοποθετείται και η άμεση υποστήριξη. Εν συνεχεία, θα γίνεται η εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής και θα τοποθετείται, αντίστοιχα, η άμεση υποστήριξη. Με τον τρόπο αυτό, αναμένουμε μεγαλύτερη "συμμετοχή" των αγκυρίων στην ανάληψη της φόρτισης, μιας και καταργείται η λειτουργία του κλειστού δακτυλίου.



Σχήμα 6.22: Μεταβολή του ποσοστού της συνολικής πίεσης των μέτρων άμεσης υποστήριξης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια ( $p_b^r/p_t$ ) σε συνάρτηση με την ποιότητα της βραχώμαζας ( $\sigma_c/p_{0,m}$ ), για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ) και πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων

## 6.5 ΦΟΡΤΙΟ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΕ 2 ΦΑΣΕΙΣ

Στο σημείο αυτό κρίθηκε απαραίτητη η πραγματοποίηση αριθμητικών αναλύσεων στις οποίες η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Στις αναλύσεις αυτές πραγματοποιείται, σε πρώτη φάση, η εκσκαφή και τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης στην άνω ημιδιατομή της σήραγγας και εν συνεχεία ακολουθείται η ίδια διαδικασία για την κάτω ημιδιατομή.

```

** m_afasi                               ** m_bfasi
**                                         **
**MATERIAL, NAME=M_AFASI                 **MATERIAL, NAME=M_BFASI
**                                         **
**DENSITY                                 **DENSITY
2.5                                       2.5,
**                                         **
**ELASTIC, DEPENDENCIES=1                **ELASTIC, DEPENDENCIES=1
4472136, 0.3 ,,0                          4472136, 0.3 ,,0
4472136, 0.3 ,,1                          4472136, 0.3 ,,1
1427270.1, 0.3 ,,2                        4472136, 0.3 ,,2
20, 0.3 ,,3                               4472136, 0.3 ,,3
20, 0.3 ,,4                               1427270.1, 0.3 ,,4
20, 0.3 ,,5                               20, 0.3 ,,5
20, 0.3 ,,6                               20, 0.3 ,,6
20, 0.3 ,,7                               20, 0.3 ,,7
**                                         **

```

Εικόνα 6.7: Ιδιότητες υλικού εκσκαφής α' και β' φάσης, κατά την προσομοίωση της διάνοιξης της σήραγγας

Με την πραγματοποίηση των αναλύσεων αυτών αναμένουμε μεγαλύτερη ενεργοποίηση των αγκυρίων βράχου, περιμένουμε, δηλαδή, τα αγκύρια να αναλαμβάνουν μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού

φορτίου. Η άποψη αυτή στηρίζεται, κατά κύριο λόγο, στο γεγονός ότι καταργείται το κυκλικό σχήμα εκσκαφής. Ναι μεν το σχήμα της σήραγγας εξακολουθεί να είναι κυκλικό, όπως και σε όλες τις προηγούμενες αριθμητικές αναλύσεις, αλλά η διάνοιξη αυτής πραγματοποιείται σε δύο φάσεις, εκσκάπτοντας στην ουσία δύο ημικυκλικές διατομές. Με αυτό τον τρόπο, οι εντάσεις που αναπτύσσονται στα αγκύρια αναμένουμε να είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που αναπτύσσονταν στην ολομέτωπη εκσκαφή, καθώς, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, καταργείται η λειτουργία του κλειστού δακτυλίου. Επίσης, αναμένουμε διαφορετικές κατανομές μετατοπίσεων, πλαστικών παραμορφώσεων και πιέσεων στο σύνολο της διατομής της σήραγγας.

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 6.7, η αποτόνωση του γεωυλικού της άνω ημιδιατομής πραγματοποιείται στο δεύτερο βήμα των αριθμητικών αναλύσεων και στο τρίτο βήμα ολοκληρώνεται η εκσκαφή του υλικού της α' φάσης, καθώς το μέτρο ελαστικότητας πρακτικά μηδενίζεται (για υπολογιστικούς λόγους τίθεται ίσο με 20kPa). Επίσης, παρατηρούμε ότι μέχρι το βήμα αυτό (3<sup>ο</sup>) δε μεταβάλλεται το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της κάτω ημιδιατομής. Η αποτόνωση του γεωυλικού της β' φάσης πραγματοποιείται στο τέταρτο βήμα αυτών των αριθμητικών αναλύσεων και στο αμέσως επόμενο βήμα ολοκληρώνεται η εκσκαφή της σήραγγας.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αναμένουμε τα αγκύρια βράχου να αναλαμβάνουν μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής φόρτισης, στην περίπτωση της διάνοιξης της σήραγγας σε δύο φάσεις. Προκειμένου, λοιπόν, να φανεί η συμβολή των αγκυρίων στην ανάληψη της φόρτισης, στην περίπτωση αυτή, πραγματοποιήθηκαν 42 αριθμητικές αναλύσεις, στις οποίες η αλληλουχία των μέτρων υποστήριξης της σήραγγας έχει ως εξής: στο τρίτο βήμα της προσομοίωσης τοποθετούνται τα αγκύρια βράχου μήκους 8 μέτρων και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους  $h_{sh}=40\text{cm}$  στην άνω ημιδιατομή της σήραγγας. Στο πέμπτο βήμα τοποθετείται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους  $h_{sh}=40\text{cm}$  στην κάτω ημιδιατομή της σήραγγας και στο έκτο και τελευταίο βήμα απαξιώνονται τα αγκύρια βράχου και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα καλείται να παίξει το ρόλο της τελικής επένδυσης.

```

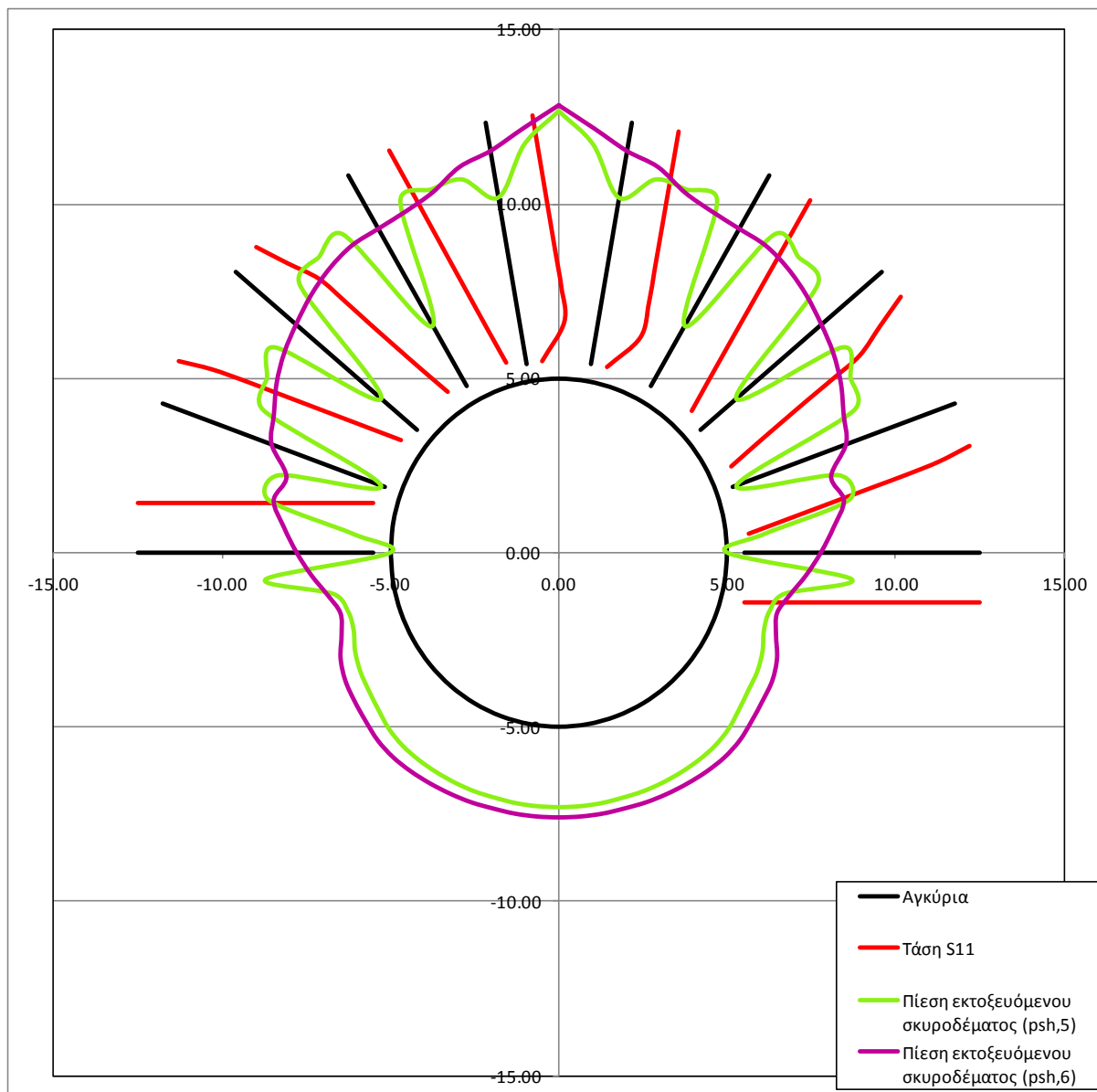
**
** @@@@@@@@@@@@@@@@ STEP3 @@@@@@@@@@@@@@@@ ** @@@@@@@@@@@@@@@@ STEP5 @@@@@@@@@@@@@@@@
**
**
**
**STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000 **STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000
**
**
**STATIC
0.01,1,0.0000000001,0.2 **
**
**
**MODEL CHANGE, ADD
G_SHOTA **G_SHOTA
**G_SHOTB
**G_AGK5_A
**G_AGK5_P
G_AGK8_A
**G_AGK8_P
**

**
** @@@@@@@@@@@@@@@@ STEP6 @@@@@@@@@@@@@@@@
**
**
**
**STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000
**
**
**STATIC
0.01,1,0.0000000001,0.2
**
**
**
**MODEL CHANGE, REMOVE
**G_SHOTA
**G_SHOTB
**G_AGK5_A
**G_AGK5_P
G_AGK8_A
**G_AGK8_P
**

```

**Εικόνα 6.8:** 3<sup>ο</sup>, 5<sup>ο</sup> και 6<sup>ο</sup> Βήμα προσομοίωσης των αριθμητικών αναλύσεων, των οποίων η διάνοιξη πραγματοποιείται σε δύο φάσεις και σαν άμεση υποστήριξη έχουν εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου και σαν τελική επένδυση έχουν μόνο το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (στο 6<sup>ο</sup> βήμα)

Από την επεξεργασία των αριθμητικών αναλύσεων αυτών μας ενδιαφέρει, κυρίως, να εξακριβώσουμε το ποσοστό του συνολικού φορτίου που αναλαμβάνουν τα αγκύρια βράχου. Επίσης, θα γίνει σύγκριση της πραγματικής πίεσης των αγκυρίων με την πίεση της θεωρητικής προσέγγισης, που έγινε και στην παράγραφο 6.2, και, τέλος, θα συγκριθούν τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, όπου η εκσκαφή γινόταν σε μία φάση με τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών, στις οποίες η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιούνταν σε δύο φάσεις.



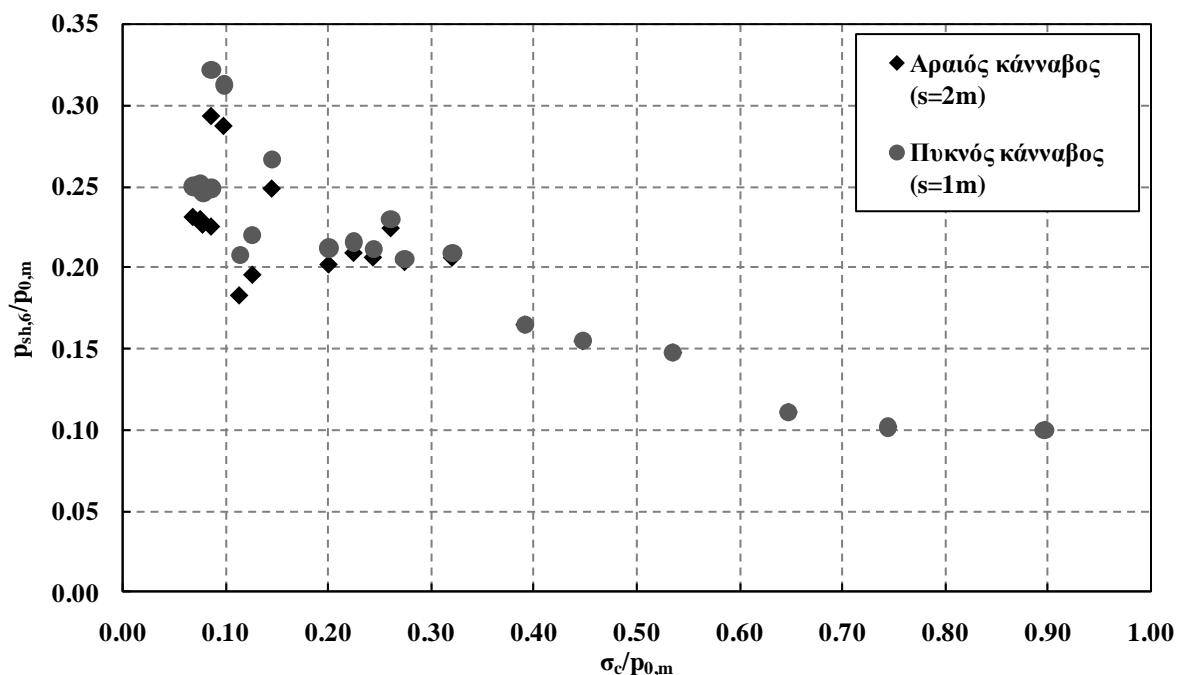
**Εικόνα 6.9: Ενδεικτική κατανομή της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πριν και μετά την απενεργοποίηση των αγκυρίων βράχου**

Απ' την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων αυτών παρατηρήθηκε ότι, στην πλειονότητα τους, η μέγιστη πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος εντοπίζεται στην οροφή της διατομής της σήραγγας ή στην περιοχή γύρω απ' αυτή. Εξετάζοντας αντίστοιχα τις κατανομές των μετατοπίσεων, σημειώθηκε ότι στην ίδια περιοχή της διατομής εντοπίζονται οι μικρότερες μετατοπίσεις της εκάστοτε ανάλυσης. Οι παρατηρήσεις αυτές αιτιολογούν πλήρως την ενεργοποίηση σε μικρότερο βαθμό των αγκυρίων που βρίσκονται στην οροφή της σήραγγας, την ανάπτυξη, δηλαδή, μικρότερων αξονικών τάσεων.

### 6.5.1 Διερεύνηση της κατανομής της φόρτισης στα αγκύρια βράχου και στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Αρχικά, διερευνάται η επιρροή της ποιότητας της βραχώμαζας στην πίεση που καλείται να αναλάβει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, όταν αυτό παίζει το ρόλο της τελικής επένδυσης, δηλαδή μετά την απενεργοποίηση των αγκυρίων βράχου.

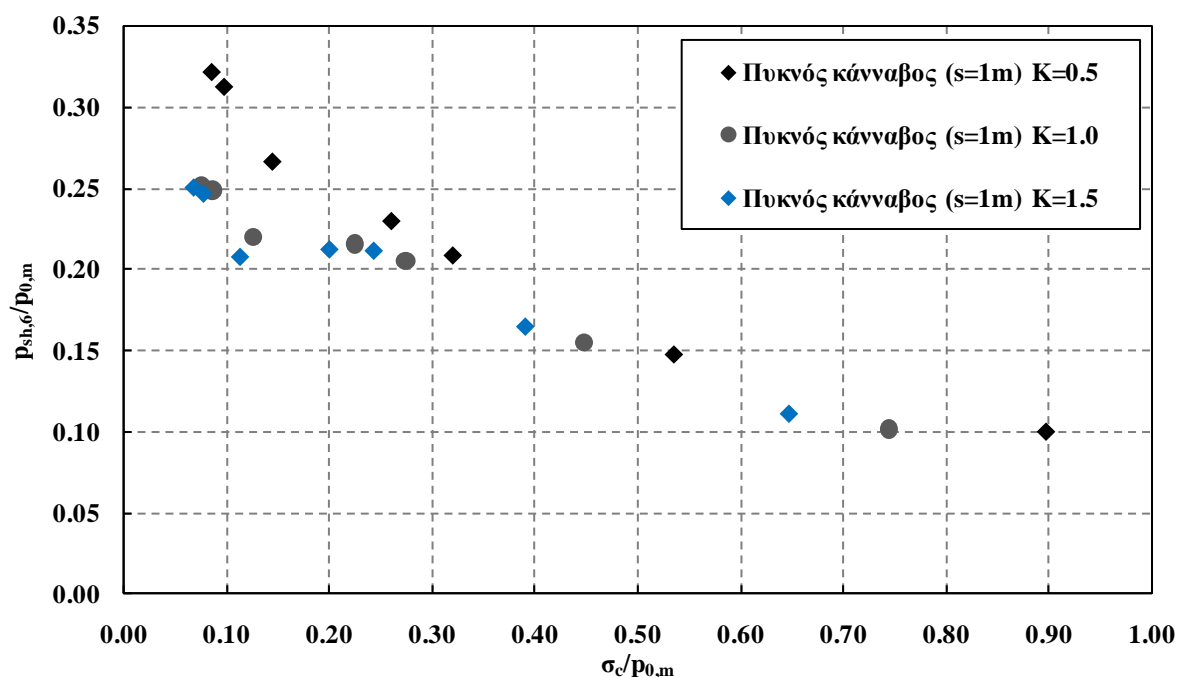
Από το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 6.23) παρατηρούμε ότι το φορτίο, που καλείται να αναλάβει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, όταν λειτουργεί σαν τελική επένδυση, μειώνεται με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών. Η κατανομή αυτή παρουσιάζει την ίδια τάση, με τις αντίστοιχες κατανομές της πίεσης της τελικής επένδυσης και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όταν η εκσκαφή γινόταν σε μία φάση. Και σε εκείνες τις περιπτώσεις, με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών μειωνόταν η πίεση επί της τελικής επένδυσης και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, αντίστοιχα.



**Σχήμα 6.23: Μεταβολή της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όταν αυτό λειτουργεί ως τελική επένδυση, συναρτήσει της ποιότητας της βραχώμαζας, για τις περιπτώσεις αραιού (s=2m), πυκνού (s=1m) κάρναβου αγκυρίων**

Μία επιπλέον παρατήρηση που προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα είναι το γεγονός ότι, στις πολύ καλές γεωτεχνικές συνθήκες, οι τιμές της πίεσης πρακτικά ταυτίζονται, για τις δύο πυκνότητες κάρναβων. Μάλιστα, παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται η ποιότητα της βραχώμαζας, δηλαδή ο δείκτης  $\sigma_c/\rho_{0,m}$ , τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των πιέσεων, για τους δύο διαφορετικούς κάρναβους αγκυρίων.

Ακολουθώς, εξετάζεται η εξάρτηση της παραπάνω κατανομής από το δείκτη γεωστατικών ωθήσεων. Η διερεύνηση της εξάρτησης αυτής πραγματοποιείται ενδεικτικά για τον πυκνό κάρναβο αγκυρίων (s=1m). Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι η πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $\rho_{sh,6}$  έχει την τάση να μειώνεται με τη βελτίωση της ποιότητας της βραχώμαζας, ανεξαρτήτως του δείκτη γεωστατικών ωθήσεων K. Να σημειωθεί, βέβαια, στο σημείο αυτό ότι η επίδραση του δείκτη γεωστατικών ωθήσεων έχει έμμεσα ληφθεί υπόψη, καθώς έχει ενσωματωθεί στο  $\rho_{0,m}$ .



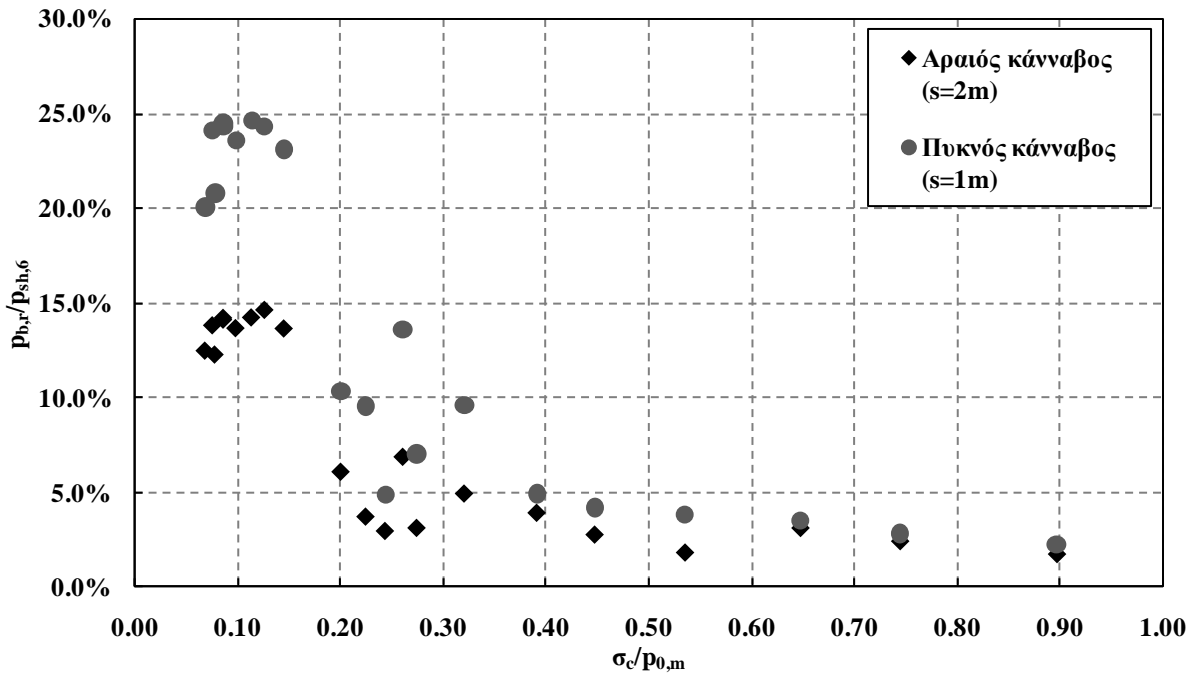
**Σχήμα 6.24:** Μεταβολή της, ανηγμένης στη μέση γεωστατική τάση, πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όταν αυτό λειτουργεί ως τελική επένδυση, συναρτήσει της ποιότητας της βραχώμαζας, για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ), πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων, για διάφορες τιμές του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων  $K$

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 6.25), στο οποίο αποτυπώνεται η μεταβολή του ποσοστού της συνολικής πίεσης, που αναλαμβάνουν τα αγκύρια βράχου, για τις διάφορες γεωτεχνικές συνθήκες. Παρατηρούμε ότι η γενική τάση του διαγράμματος, και για τις δύο πυκνότητες του καννάβου αγκυρίων, είναι η μείωση της συμβολής των αγκυρίων στην ανάληψη της φόρτισης, με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών. Μάλιστα, παρατηρούμε ότι, στην περίπτωση του πυκνού καννάβου ( $s=1m$ ), το ποσοστό αυτό αγγίζει το 25%, και στην περίπτωση του αραιού καννάβου, το 15%.

Από τα ποσοστά αυτά συμπεραίνουμε ότι σε ορισμένες περιπτώσεις τα αγκύρια αναλαμβάνουν ένα αρκετά σημαντικό ποσοστό της συνολικής φόρτισης. Βέβαια, παρατηρούμε και ότι στις πολύ καλές ποιοτικά βραχώμαζες, το ποσοστό αυτό είναι σχετικά μικρό, καθώς λαμβάνει τιμές μικρότερες του 5%.

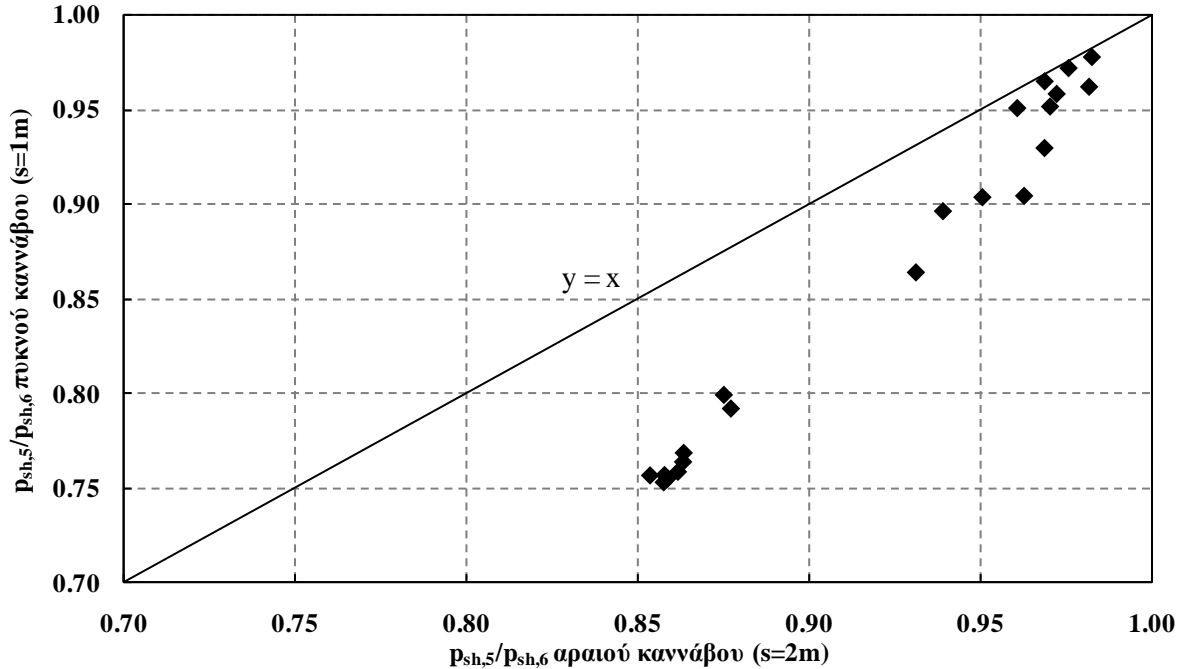
Επίσης, διακρίνουμε ότι τα ποσοστά αυτά διαφέρουν ανάλογα με την πυκνότητα του καννάβου. Ειδικότερα, φαίνεται ότι στις πολύ κακές γεωτεχνικές συνθήκες, εκεί, δηλαδή, όπου τα αγκύρια ενεργοποιούνται περισσότερο, η διαφορά των ποσοστών των δύο καννάβων είναι αρκετά μεγάλη, της τάξεως του 10%. Με τη βελτίωση, όμως των γεωτεχνικών συνθηκών, η διαφορά αυτή ολοένα και μικραίνει, φτάνοντας, εν τέλει, στις πολύ καλές γεωτεχνικές συνθήκες να είναι σχεδόν μηδενική.

Η τελευταία αυτή παρατήρηση ενδέχεται να αποτελεί και την αιτία, που, στο παραπάνω διάγραμμα, στις πολύ καλές γεωτεχνικές συνθήκες, οι τιμές της πίεσης, που αναλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυροδέμα, όταν λειτουργεί σαν τελική επένδυση, πρακτικά ταυτίζονται, για τις δύο πυκνότητες καννάβων.



Σχήμα 6.25: Μεταβολή του ποσοστού της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια ( $p_b^r/p_{sh,4}$ ) σε συνάρτηση με την ποιότητα της βραχόμαζας ( $\sigma_c/p_{0,m}$ ), για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ), πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων

Εν συνεχεία, στο ακόλουθο διάγραμμα συσχετίζονται τα ποσοστά της συνολικής πίεσης, που αναλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα,  $p_{sh,5}/p_{sh,6}$ , όταν λειτουργεί σαν άμεση υποστήριξη, για τις δύο περιπτώσεις καννάβων.



Σχήμα 6.26: Σύσχετιση της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $p_{sh,5}$  για την περίπτωση του αραιού καννάβου ( $s=2m$ ) με την αντίστοιχη πίεση  $p_{sh,5}$  για την περίπτωση του πυκνού καννάβου ( $s=1m$ )

Από το τελευταίο διάγραμμα, φαίνεται ότι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αναλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής φόρτισης στην περίπτωση του αραιού καννάβου. Αυτό συμβαίνει καθώς στην περίπτωση του πυκνού καννάβου, τα αγκύρια βράχου αναλαμβάνουν μεγαλύτερο ποσοστό της



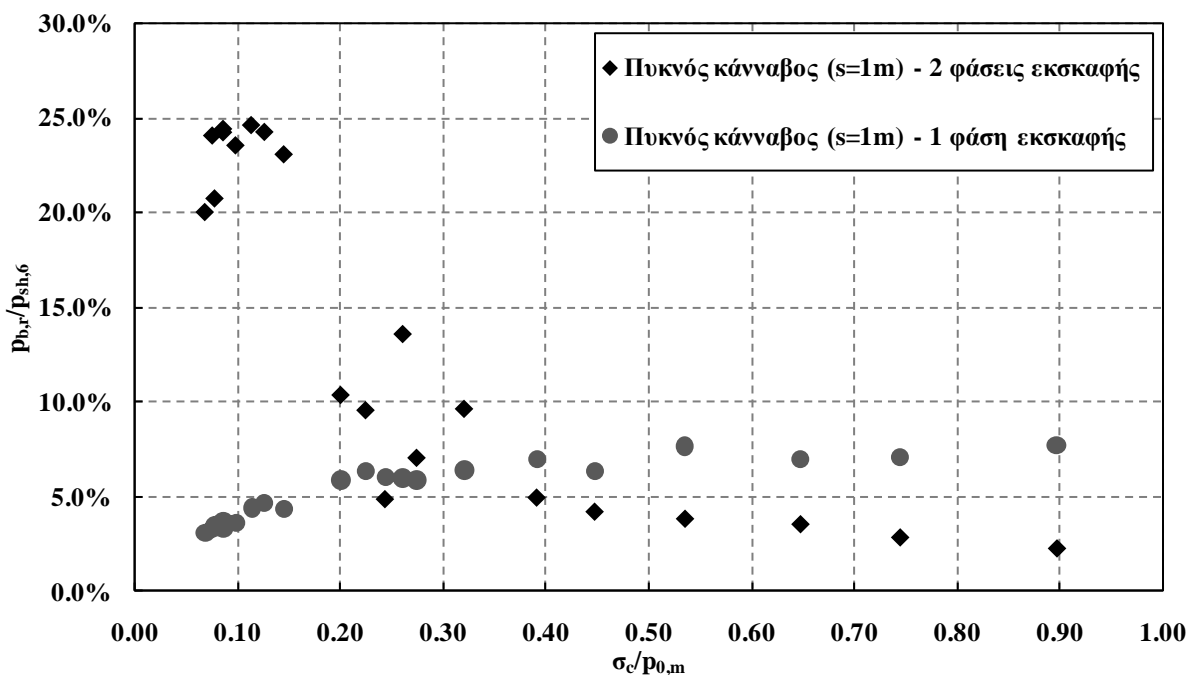
συνολικής φόρτισης. Επομένως, στην αραιή διάταξη το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα καλείται να αναλάβει μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής φόρτισης σε σχέση με την περίπτωση του πυκνού καννάβου αγκυρίων.

Από το Σχήμα 6.26, επιπλέον παρατηρούμε ότι οι λόγοι  $p_{sh,5}/p_{sh,6}$  του αραιού ( $s=2m$ ) και του πυκνού καννάβου ( $s=1m$ ) τείνουν να εξισωθούν, όσο μεγαλώνουν, όσο, δηλαδή, πλησιάζουν στη μονάδα. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι τα σημεία της κατανομής πλησιάζουν την ευθεία  $y=x$ , όσο εγαλώνει η τιμή των λόγων  $p_{sh,5}/p_{sh,6}$ .

Όπως είναι λογικό, ο λόγος  $p_{sh,5}/p_{sh,6}$  μεγαλώνει όταν η συμβολή των αγκυρίων στην ανάληψη της συνολικής φόρτισης μειώνεται. Αυτό συμβαίνει, όπως παρατηρήσαμε και παραπάνω, με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών.

### 6.5.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων με δύο φάσεις εκσκαφής και των αριθμητικών αναλύσεων με μία φάση εκσκαφής

Στην αρχή της παραγράφου αυτής γίνεται μία προσπάθεια σύγκρισης της κατανομής και των τιμών του λόγου  $p_{b,r}/p_{sh,6}$ , για τις περιπτώσεις της διάνοιξης σε δύο φάσεις εκσκαφής και της διάνοιξης σε μία φάση. Η σύγκριση μπορεί να γίνει ενδεικτικά για την περίπτωση του πυκνού καννάβου αγκυρίων, καθώς, και για τις δύο περιπτώσεις πυκνότητας καννάβου, η μορφή της κατανομής του λόγου  $p_{b,r}/p_{sh,6}$  δε μεταβάλλεται (μεταβάλλονται όμως οι τιμές της). Έτσι, παρουσιάζεται το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 6.27).



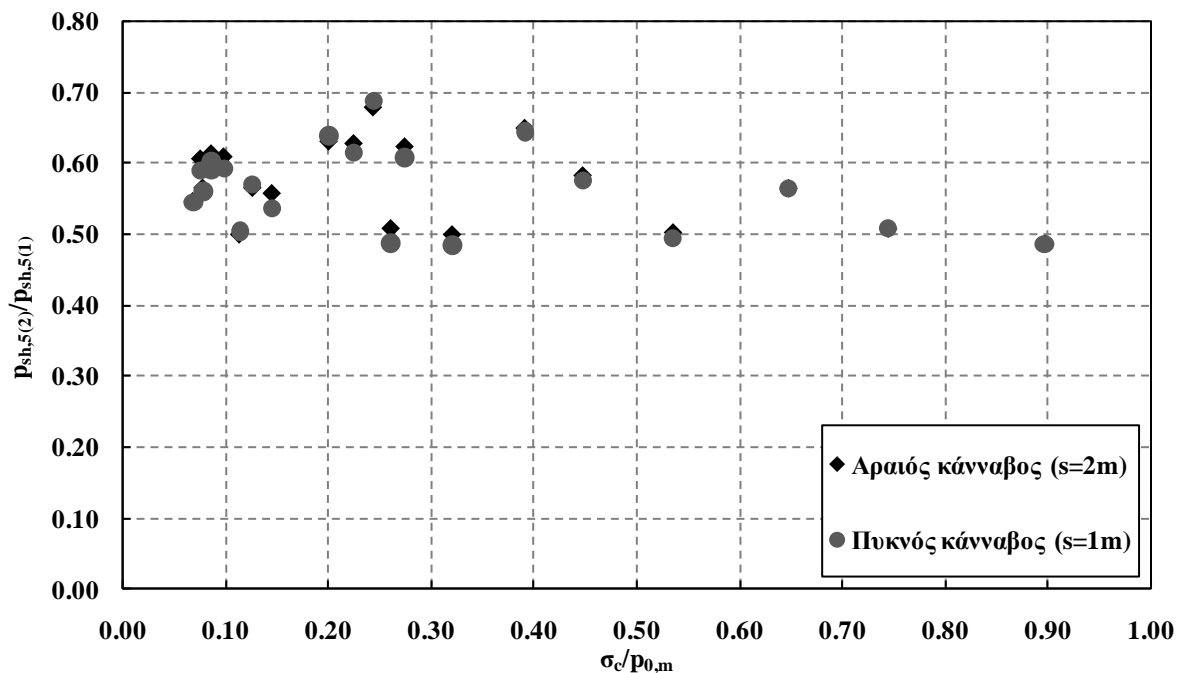
**Σχήμα 6.27:** Σύγκριση ποσοστού φόρτισης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια βράχου για διάνοιξη σήραγγας σε μία και δύο φάσεις, για την περίπτωση του πυκνού καννάβου αγκυρίων ( $s=1m$ )

Διαφορές παρατηρούνται τόσο στη μορφή όσο και στις τιμές των δύο κατανομών. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στην κατάργηση της λειτουργίας του κλειστού δακτυλίου, γεγονός που επιφέρει σημαντικές μεταβολές στις κατανομές πιέσεων και μετατοπίσεων. Αρχικά, όσον αφορά στη μορφή των δύο κατανομών, παρατηρούμε ότι, στη διάνοιξη της σήραγγας σε μία φάση, ο λόγος  $p_{b,r}/p_{sh,6}$  αυξάνεται με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών, ενώ στη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο. Επίσης, οι τιμές του λόγου  $p_{b,r}/p_{sh,6}$  είναι πολύ μεγαλύτερες στην περίπτωση της διάνοιξης σήραγγας σε δύο φάσεις εκσκαφής, για τις κακές γεωτεχνικές συνθήκες. Ειδικότερα, στις πολύ κακές γεωτεχνικές συνθήκες ο λόγος  $p_{b,r}/p_{sh,6}$  κυμαίνεται μεταξύ 20-25%, που είναι ένα πολύ σημαντικό ποσοστό της συνολικής φόρτισης. Στην περίπτωση, όμως, των καλών

γεωτεχνικών συνθηκών ( $\sigma_c/p_{0,m} > 0.35$ ), το ποσοστό της συνολικής φόρτισης είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση της διάνοιξης της σήραγγας σε μία φάση.

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι λόγοι  $p_{b,r(2)}/p_{b,r(1)}$ ,  $p_{sh,5(2)}/p_{sh,5(1)}$  και  $p_{sh,6(2)}/p_{sh,6(1)}$  και παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα συναρτήσεως των γεωτεχνικών συνθηκών. Οι λόγοι αυτοί έχουν στον αριθμητή τους πίεση, όπως αυτή προέκυψε από τη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις και στον παρονομαστή τους, την ίδια πίεση, όπως αυτή προέκυψε για την εκσκαφή της σήραγγας σε μία φάση, εξ' ου και οι δείκτες (1) και (2). Προς αποφυγή παρερμηνειών, να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι η τιμή  $p_{sh,5(1)}$  ταυτίζεται με την τιμή  $p_{sh,3}$  των αριθμητικών αναλύσεων, στις οποίες η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιούνταν σε μία φάση εκσκαφής ( $p_{sh,5(1)} \equiv p_{sh,3}$ ). Αντίστοιχα, ισχύει  $p_{sh,6(1)} \equiv p_{sh,4}$ .

Το πρώτο διάγραμμα απ' αυτά που παρουσιάζεται είναι αυτό του λόγου  $p_{sh,5(2)}/p_{sh,5(1)}$  (Σχήμα 6.28). Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη εξάρτηση του λόγου αυτού από τις γεωτεχνικές συνθήκες. Μάλιστα, ο λόγος  $p_{sh,5(2)}/p_{sh,5(1)}$  κυμαίνεται μεταξύ 0.48-0.70. Είναι, δηλαδή, σε κάθε περίπτωση μικρότερος της μονάδας. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι, στην περίπτωση που σαν άμεση υποστήριξη λειτουργούν τόσο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα όσο και αγκύρια βράχου, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα "ανακουφίζεται" στην περίπτωση της διάνοιξης της σήραγγας σε δύο φάσεις. Μάλιστα, προσεγγίζοντας το φαινόμενο αυτό ποσοτικά, διαπιστώνουμε ότι τα φορτία που καλείται να αναλάβει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι μειωμένα κατά περίπου 43% (κατά μέσο όρο), σε σύγκριση με την ολομέτωπη εκσκαφή. Τέλος, όσον αφορά στο συγκεκριμένο διάγραμμα να αναφέρουμε ότι η διαφορά του λόγου  $p_{sh,5(2)}/p_{sh,5(1)}$  για αραιό ( $s=2m$ ) και πυκνό ( $s=1m$ ) κάρναβο είναι αμελητέα.

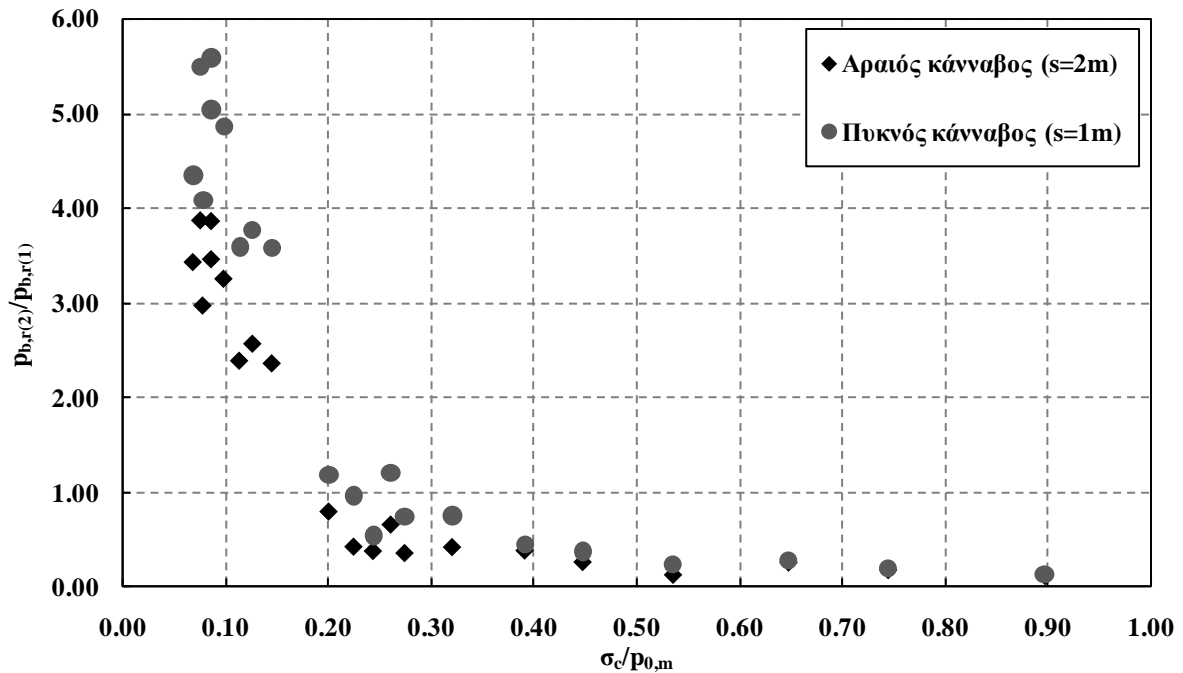


**Σχήμα 6.28:** Μεταβολή του λόγου της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όταν αυτό λειτουργεί σαν άμεση υποστήριξη, για τη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις, προς την ίδια πίεση για τη διάνοιξη της σήραγγας σε μία φάση, συναρτήσεως της ποιότητας της βραχώμαζας

Εν συνεχεία ακολουθεί το αντίστοιχο διάγραμμα του λόγου  $p_{b,r(2)}/p_{b,r(1)}$  (Σχήμα 6.29). Είναι εμφανής η τάση του λόγου αυτού να μειώνεται με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών και για τις δύο περιπτώσεις κάρναβων αγκυρίων. Στις χαμηλής ποιότητας βραχώμαζες παρατηρούμε πως τα αγκύρια ενεργοποιούνται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό, στην περίπτωση της διάνοιξης της σήραγγας σε δύο φάσεις. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του αραιού κάρναβου αγκυρίων, ο λόγος αυτός κυμαίνεται μεταξύ 2.00-4.00 και αντίστοιχα για την πυκνή διάταξη αγκυρίων, μεταξύ περίπου 3.50-5.50.

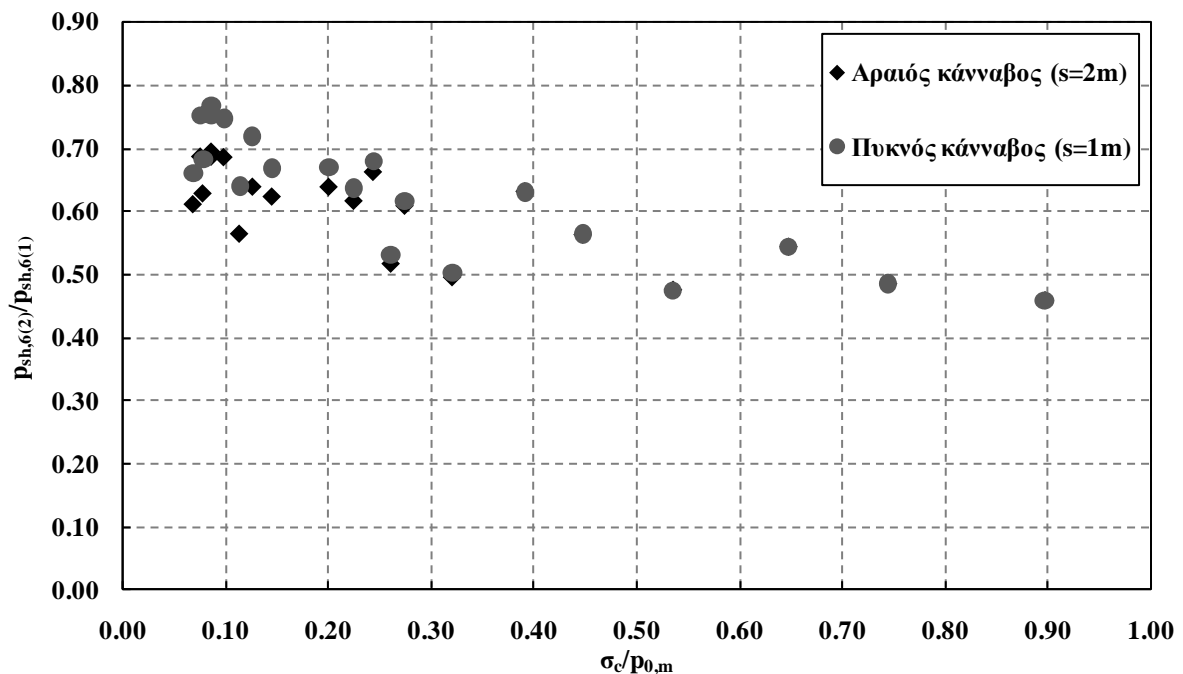
Επίσης, παρατηρούμε ότι με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών ο λόγος αυτός γίνεται μικρότερος της μονάδας. Μάλιστα, όσο καλύτερες είναι οι γεωτεχνικές συνθήκες τόσο ο λόγος  $p_{b,r(2)}/p_{b,r(1)}$  πλησιάζει στο μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι στις καλές ποιοτικά βραχώμαζες, τα αγκύρια

ενεργοποιούνται σε μεγαλύτερο βαθμό στην περίπτωση της διάνοιξης της σήραγγας σε μία φάση. Επομένως, μπορούμε να πούμε ότι τα συμπεράσματα του κάτωθι διαγράμματος έρχονται σε πλήρη συμφωνία με τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το Σχήμα 6.27.



**Σχήμα 6.29:** Μεταβολή του λόγου της πίεσης των αγκυρίων, για τη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις, προς την ίδια πίεση για τη διάνοιξη της σήραγγας σε μία φάση, συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας

Το τελευταίο από τα διαγράμματα που αναφέρθηκαν και παραπάνω είναι αυτό του λόγου  $p_{sh,6(2)}/p_{sh,6(1)}$  συναρτήσει των γεωτεχνικών συνθηκών, το οποίο και φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



**Σχήμα 6.30:** Μεταβολή του λόγου της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όταν αυτό λειτουργεί σαν τελική επένδυση, για τη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις, προς την ίδια πίεση για τη διάνοιξη της σήραγγας σε μία φάση, συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών μειώνεται ο λόγος  $p_{sh,6(2)}/p_{sh,6(1)}$ . Οι τιμές του λόγου αυτού κυμαίνονται μεταξύ 0.45-0.78, πράγμα που σημαίνει ότι, όπως και ο λόγος  $p_{sh,5(2)}/p_{sh,5(1)}$ , είναι πάντοτε μικρότερος της μονάδας. Εύκολα προκύπτει, επομένως, ότι η πίεση που αναλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, όταν λειτουργεί σαν τελική επένδυση, είναι κατά περίπου 39% (κυμαίνεται μεταξύ 22-55%) μικρότερη στην περίπτωση της εκσκαφής σε δύο φάσεις.

Βέβαια, στην περίπτωση του διαγράμματος αυτού (Σχήμα 6.30) παρατηρούμε μία διαφοροποίηση σε σχέση με το αντίστοιχο διάγραμμα του λόγου  $p_{sh,5(2)}/p_{sh,5(1)}$  (Σχήμα 6.28). Πιο συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις κακών γεωτεχνικών συνθηκών ( $\sigma_c/p_{o,m} < 0.30$ ), ο λόγος  $p_{sh,6(2)}/p_{sh,6(1)}$  είναι κατά 5% περίπου μεγαλύτερος στην περίπτωση του πυκνού καννάβου ( $s=1m$ ) απ' ότι στην περίπτωση του αραιού καννάβου αγκυρίων ( $s=2m$ ). Αυτό είναι λογικό, αν αναλογιστούμε το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής φόρτισης που αναλαμβάνει ο πυκνός κάρναβος ( $s=1m$ ) σε σχέση με τον αραιό ( $s=2m$ ), στην περίπτωση των κακών ποιοτικά βραχομαζών.

Αν μάλιστα αναλογιστούμε, στις καλές γεωτεχνικές συνθήκες, την πολύ μικρή ενεργοποίηση των αγκυρίων και το γεγονός ότι ο λόγος  $p_{sh,6(2)}/p_{sh,6(1)}$  παίρνει τις ελάχιστες του τιμές, προκύπτει ότι η συνολική φόρτιση που έχουν να αναλάβουν τα μέτρα υποστήριξης της σήραγγας, όταν αυτή εκσκάπτεται σε δύο φάσεις, είναι αρκετά μικρότερη απ' ότι αν η διάνοιξη γίνει σε μία φάση.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν κάποια εξαιρετικά ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Αρχικά, παρατηρούμε ότι, για τις κακές γεωτεχνικές συνθήκες, η συμβολή των αγκυρίων στην ανάληψη της συνολικής φόρτισης είναι πολύ μεγαλύτερη στην περίπτωση διάνοιξης της σήραγγας σε δύο φάσεις, απ' ότι αν αυτή γίνει σε μία φάση. Όμως, στις καλές γεωτεχνικές συνθήκες, τα αγκύρια ενεργοποιούνται περισσότερο στην περίπτωση της ολομέτωπης εκσκαφής, αλλά ούτως ή άλλως το συνολικό φορτίο είναι αρκετά μικρό, στην περίπτωση των καλών γεωτεχνικών συνθηκών.

Σημαντική, επίσης, παρατήρηση είναι η "ανακούφιση" του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην περίπτωση της διάνοιξης της σήραγγας σε δύο φάσεις, η οποία ποσοτικά κυμαίνεται γύρω στο 40%. Πιο συγκεκριμένα, όταν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα καλείται να αναλάβει, στο ρόλο της τελικής επένδυσης, και τα φορτία που αναλάμβαναν τα αγκύρια, η πίεση είναι σαφώς μικρότερη απ' ότι στην περίπτωση της διάνοιξης της σήραγγας σε μία φάση.

Βέβαια, δεν μπορούμε να παραβλέψουμε την κατάργηση της λειτουργίας του κλειστού δακτυλίου. Μπορεί, δηλαδή, τα φορτία να είναι μικρότερα στην περίπτωση της εκσκαφής σε δύο φάσεις, όμως υπάρχει σοβαρή πιθανότητα, η διαστασιολόγηση να είναι δυσχερέστερη, λόγω της ανάπτυξης ρωπών. Αντίθετα, στην περίπτωση της ολομέτωπης εκσκαφής, το σύνολο της διατομής της σήραγγας βρίσκεται υπό καθαρή θλίψη, και μάλιστα χωρίς την ανάπτυξη ρωπών, καθώς τότε υφίσταται η λειτουργία του κλειστού δακτυλίου.

Σε κάθε περίπτωση, δηλαδή, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα καταπονείται λιγότερο, η συνολική πίεση που έχουν να αναλάβουν τα μέτρα υποστήριξης είναι μικρότερη και τα αγκύρια βράχου ενεργοποιούνται σε σημαντικό βαθμό στις περιπτώσεις που χρειάζεται (κακές γεωτεχνικές συνθήκες) στη διάνοιξη των σήραγγων σε δύο φάσεις.

### 6.5.3 Διερεύνηση του πεδίου εφαρμογής της προσεγγιστικής μεθόδου της πίεσης των αγκυρίων

Στην παράγραφο αυτή θα διερευνηθεί η συσχέτιση του λόγου  $p_b^r/p_b^{th}$  με διάφορους παράγοντες των αριθμητικών αναλύσεων. Οι τιμές  $p_b^r$  και  $p_b^{th}$  προκύπτουν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, που προέκυψαν και στην ολομέτωπη εκσκαφή της σήραγγας. Παρά το γεγονός ότι η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιείται σε δύο φάσεις, πρόκειται ουσιαστικά για το ίδιο φαινόμενο με την ολομέτωπη εκσκαφή.

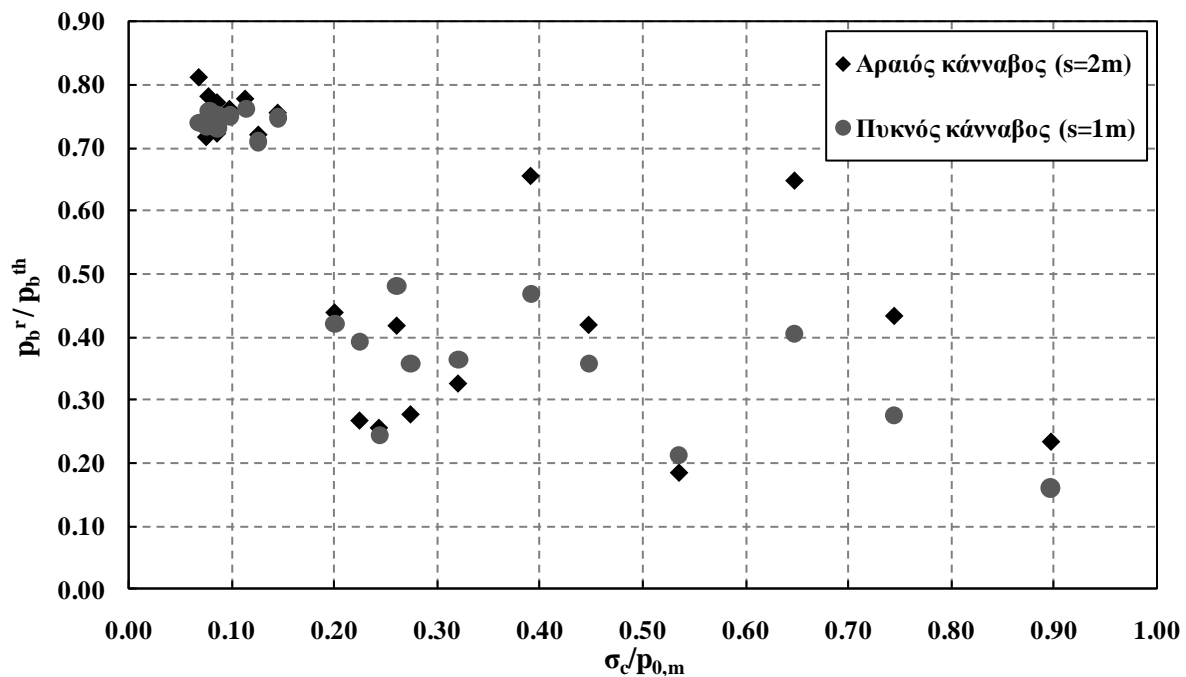
Οι τιμές  $p_b^{th}$  για τις δύο περιπτώσεις διάνοιξης της σήραγγας δεν ταυτίζονται, καθώς, στη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις, αναπτύσσονται στη διατομή αυτής πολύ μεγαλύτερα εντατικά μεγέθη και μετατοπίσεις, ιδιαίτερα στην άνω ημιδιατομή. Επίσης, οι τιμές  $p_b^r$  προκύπτουν με τον ίδιο τρόπο, ως διαφορά, δηλαδή, της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος από τη συνολική πίεση των μέτρων άμεσης υποστήριξης. Επιπλέον, τη στιγμή που καταργούνται τα αγκύρια βράχου έχει επέλθει

ισορροπία στο σύνολο της διατομής της σήραγγας, όπως ακριβώς και στην περίπτωση της ολομέτωπης εκσκαφής.

Αρχικά, παρουσιάζεται το ακόλουθο διάγραμμα, στο οποίο απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου  $p_b^r/p_b^{th}$  συναρτήσει των γεωτεχνικών συνθηκών, και ειδικότερα του δείκτη  $\sigma_c/p_{0,m}$ . Η πρώτη σημαντική παρατήρηση από το διάγραμμα αυτό έχει να κάνει με το γεγονός ότι ο λόγος  $p_b^r/p_b^{th}$  λαμβάνει τιμές μικρότερες της μονάδας. Αυτό σημαίνει ότι, ανεξαρτήτως των γεωτεχνικών συνθηκών, η πραγματική πίεση που αναλαμβάνουν τα αγκύρια είναι μικρότερη από την θεωρητική πίεση. Δηλαδή ισχύει  $p_b^r < p_b^{th}$ . Με απλά λόγια, δηλαδή, μπορούμε να πούμε ότι η θεωρητική προσέγγιση της πίεσης των αγκυρίων είναι υπέρ της ασφαλείας, για τη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις.

Εν συνεχεία, παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει κάποια ακριβής συσχέτιση των δύο παραμέτρων του παρακάτω διαγράμματος, τουλάχιστον όσον αφορά στο δείγμα των αναλύσεων που είχαμε στη διάθεση μας. Μπορούμε, όμως, να πούμε ότι υπάρχει μία γενική τάση μείωσης του λόγου  $p_b^r/p_b^{th}$  με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών.

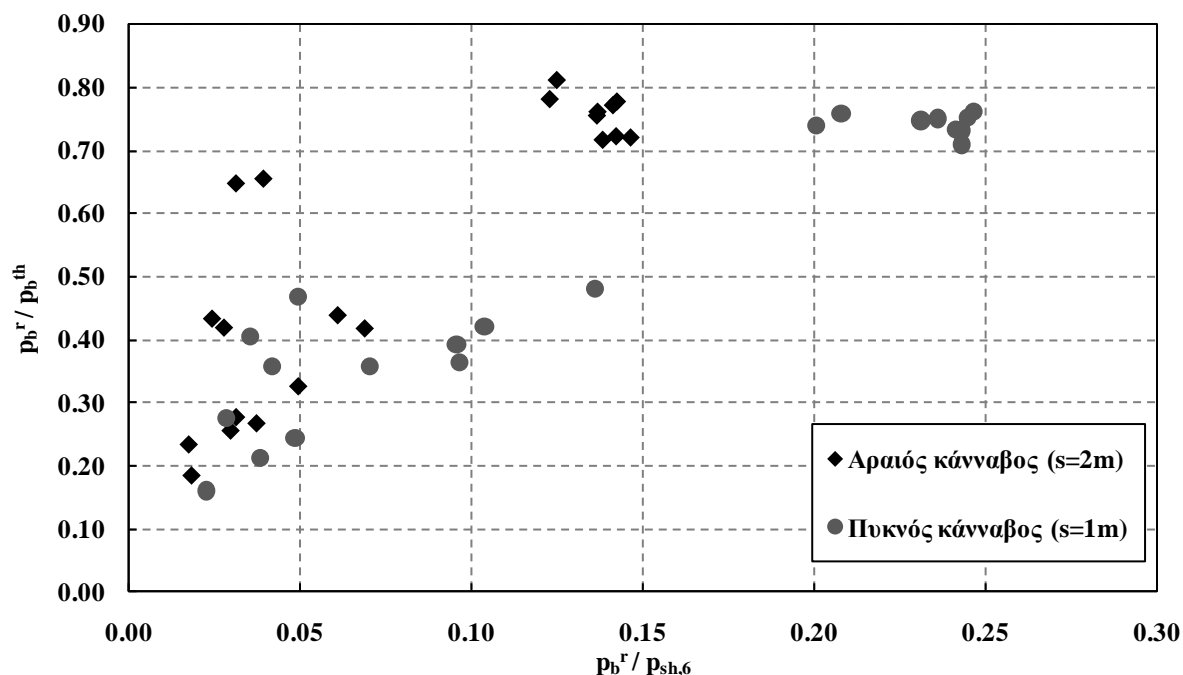
Στην ίδια κατανομή μπορούμε να διακρίνουμε μία συγκέντρωση σημείων στην άνω αριστερά περιοχή του διαγράμματος, χαρακτηριστικά των οποίων είναι: οι πολύ κακές γεωτεχνικές συνθήκες που επικρατούν και οι τιμές του λόγου  $p_b^r/p_b^{th}$  πολύ κοντά στη μονάδα. Την ίδια παρατήρηση είχαμε κάνει και για την ολομέτωπη διάνοιξη της σήραγγας, όπου και για τον πυκνό και για τον αραιό κάρναβο, ο λόγος  $p_b^r/p_b^{th}$  έπαιρνε τιμές πολύ κοντά στη μονάδα, για τις πολύ κακές γεωτεχνικές συνθήκες.



**Σχήμα 6.31: Μεταβολή του λόγου  $p_b^r/p_b^{th}$  συναρτήσει της ποιότητας της βραχώμαζας, εκφρασμένης μέσω του δείκτη  $\sigma_c/p_{0,m}$**

Ακολουθώντας, παρατίθεται το Σχήμα 6.32, στο οποίο απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται ο λόγος  $p_b^r/p_b^{th}$  συναρτήσει του πραγματικού ποσοστού της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια βράχου. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει το συμπέρασμα ότι όσο μεγαλώνει η συμβολή των αγκυρίων στην ανάληψη του συνολικού φορτίου, τόσο αυξάνει και ο λόγος  $p_b^r/p_b^{th}$ , τόσο, δηλαδή, ο λόγος αυτός προσεγγίζει τη μονάδα.

Και στην περίπτωση της ολομέτωπης εκσκαφής είχαμε σημειώσει την παράλληλη αύξηση των δύο αυτών παραμέτρων. Σε εκείνη, όμως, την περίπτωση η συμβολή των αγκυρίων στην ανάληψη της συνολικής φόρτισης δεν έφτανε σε τόσο μεγάλα ποσοστά.



Σχήμα 6.32: Μεταβολή του λόγου  $p_b^r/p_b^{th}$  συναρτήσει του ποσοστού της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια ( $p_b^r/p_{sh,6}$ )

## 6.6 ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ & ΑΓΚΥΡΙΑ - ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΓΙΑ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΕ 2 ΦΑΣΕΙΣ

Σε συνέχεια των αριθμητικών αναλύσεων, που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε το τελευταίο σετ, που αποτελείται από 42 αριθμητικές αναλύσεις. Σ' αυτές, η αλληλουχία των μέτρων υποστήριξης της σήραγγας φαίνεται στην Εικόνα 6.10 και έχει ως εξής: στο τρίτο βήμα της προσομοίωσης τοποθετούνται τα αγκύρια βράχου και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην άνω ημιδιατομή της σήραγγας. Στο πέμπτο βήμα τοποθετείται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην κάτω ημιδιατομή της σήραγγας. Ακολούθως, στο έκτο βήμα κατασκευάζεται η τελική επένδυση, η οποία ενεργοποιείται - αναλαμβάνει φορτία στο έβδομο και τελευταίο βήμα, όπου απαξιώνονται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης.

Στις εν λόγω αναλύσεις, το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι  $h_{sh}=40\text{cm}$ , όσο και το πάχος της τελικής επένδυσης,  $h_{sh}=40\text{cm}$  και ο λόγος των δυσκαμψιών τους είναι  $K_n/K_{sh}=1.45$ . Επίσης, τα αγκύρια βράχου που χρησιμοποιήθηκαν έχουν μήκος 8 μέτρα και τοποθετήθηκαν τόσο σε πυκνή ( $s=1\text{m}$ ) όσο και σε αραιή διάταξη ( $s=2\text{m}$ ).

Από την επεξεργασία των αναλύσεων αυτών, θα διερευνηθεί ο τρόπος μεταφοράς των φορτίων από την άμεση υποστήριξη (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου) στην τελική επένδυση, για την περίπτωση διάνοιξης της σήραγγας σε δύο φάσεις. Στην επεξεργασία αυτή χρησιμοποιήσαμε τα αποτελέσματα των πραγματικών πιέσεων των αγκυριών  $p_b^r$  από τις αναλύσεις της ενότητας 6.5, όπως αντίστοιχα κάναμε και στην ενότητα 6.4 με τα αποτελέσματα των  $p_b^r$  από την ενότητα 6.2.

```

**
** @@@@@@@@@@@@@@@@ STEP3 @@@@@@@@@@@@@@@@
**
**
** STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000
**
** *STATIC
0.01,1,0.0000000001,0.2
**
**
** *MODEL CHANGE, ADD
G_SHOTA
**G_SHOTB
**G_AGK5_A
**G_AGK5_P
**G_AGK8_A
G_AGK8_P
**
**
** @@@@@@@@@@@@@@@@ STEP5 @@@@@@@@@@@@@@@@
**
**
** STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000
**
** *STATIC
0.01,1,0.0000000001,0.2
**
**
** *MODEL CHANGE, ADD
**G_SHOTA
G_SHOTB
**G_AGK5_A
**G_AGK5_P
**G_AGK8_A
**G_AGK8_P
**
**
** @@@@@@@@@@@@@@@@ STEP6 @@@@@@@@@@@@@@@@
**
**
** STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000
**
** *STATIC
0.01,1,0.0000000001,0.2
**
**
** *MODEL CHANGE, ADD
P_FL
**
**
** @@@@@@@@@@@@@@@@ STEP7 @@@@@@@@@@@@@@@@
**
**
** STEP, UNSYMM=YES, INC=100000000000
**
** *STATIC
0.01,1,0.0000000001,0.2
**
**
** *MODEL CHANGE, REMOVE
G_SHOTA
G_SHOTB
**G_AGK5_A
**G_AGK5_P
**G_AGK8_A
G_AGK8_P
**
**

```

**Εικόνα 6.10:** 3°, 5°, 6° και 7° Βήμα προσομοίωσης των αριθμητικών αναλύσεων, των οποίων η διάνοιξη πραγματοποιείται σε δύο φάσεις και σαν άμεση υποστήριξη έχουν εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου, τα οποία απενεργοποιούνται και στη θέση τους τοποθετείται η τελική επένδυση

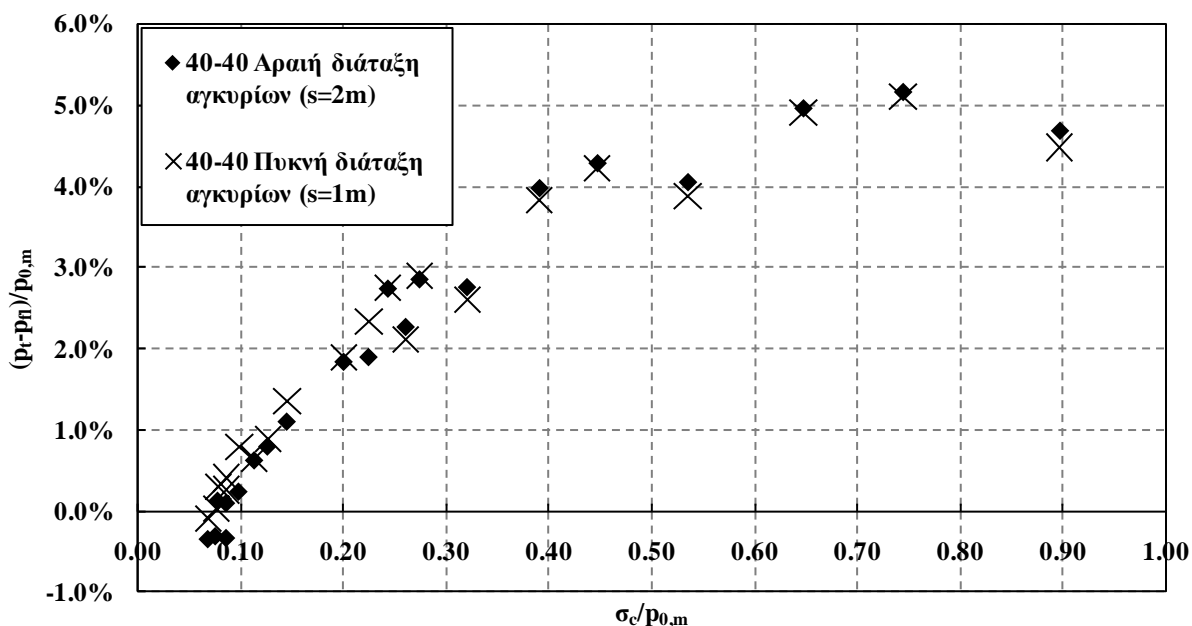
Στη συνέχεια, γίνεται, αρχικά, η επεξεργασία των παραπάνω αριθμητικών αναλύσεων και, ακολούθως, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών με τις αντίστοιχες αναλύσεις, στις οποίες η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιούνταν σε μία φάση.

### 6.6.1 Διερεύνηση του τρόπου μεταφοράς των φορτίων από την άμεση υποστήριξη στην τελική επένδυση

Αρχικά, παρουσιάζεται το διάγραμμα που περιγράφει τη μεταβολή του λόγου της διαφοράς των πιέσεων της τελικής επένδυσης και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, προς τη μέση γεωστατική τάση,  $(p_r - p_n)/p_{0,m}$ , συναρτήσει των γεωτεχνικών συνθηκών, που εκφράζονται μέσω του δείκτη  $\sigma_c/p_{0,m}$ . Από το διάγραμμα αυτό παρατηρούμε ότι ο λόγος  $(p_r - p_n)/p_{0,m}$  αυξάνεται με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών, και μάλιστα οι κατανομές διαφοροποιούνται, έστω και σε μικρό ποσοστό, για τις δύο διαφορετικές πυκνότητες καννάβων αγκυρίων.

Επιπλέον, διακρίνονται οι αρνητικές τιμές του παραπάνω λόγου για τις πολύ κακές γεωτεχνικές συνθήκες. Στις περιπτώσεις αυτές, η πίεση της τελικής επένδυσης είναι μεγαλύτερη από την πίεση που αναπτύσσεται στα μέτρα άμεσης υποστήριξης, γεγονός που οφείλεται στο ότι τα αγκύρια βράχου αναλαμβάνουν πολύ μεγάλο ποσοστό της φόρτισης.

Γενικότερα, όμως, φαίνεται ότι στις χαμηλής ποιότητας βραχώμαζες, ο λόγος  $(p_r - p_n)/p_{0,m}$  είναι κοντά στο μηδέν. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει αφενός τη μικρή διαφορά της συνολικής πίεσης των μέτρων άμεσης υποστήριξης και της πίεσης της τελικής επένδυσης, αφετέρου τη μεγάλη συμβολή των αγκυρίων βράχου στην ανάληψη της φόρτισης.

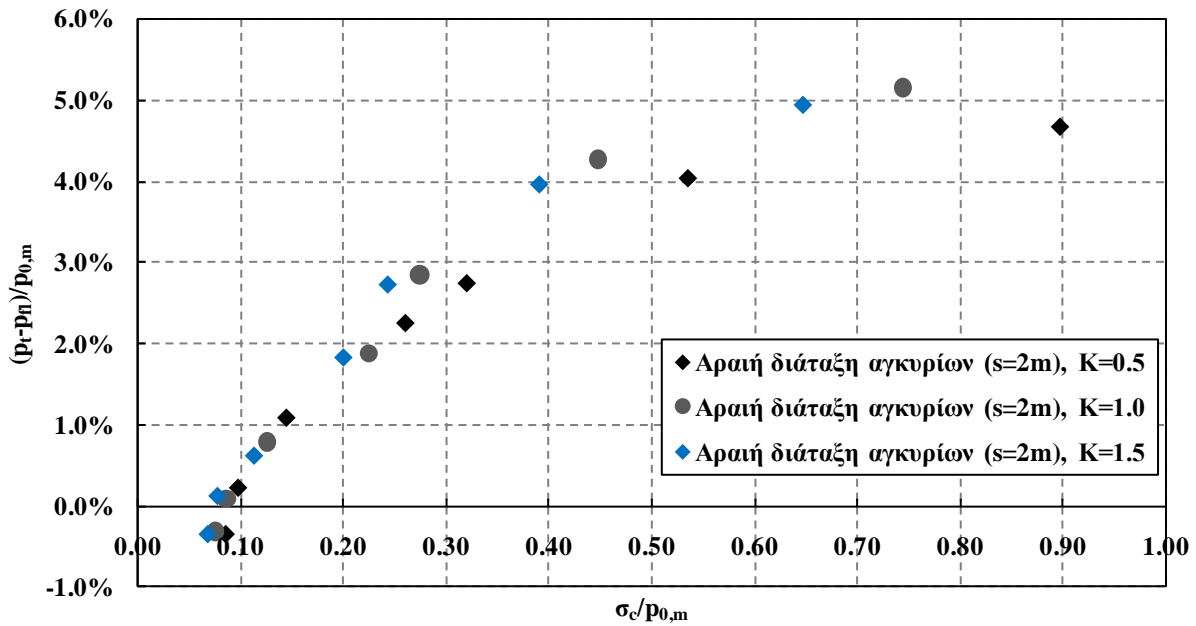


**Σχήμα 6.33:** Μεταβολή της διαφοράς της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνει η άμεση υποστήριξη από την πίεση από την πίεση που αναλαμβάνει η τελική επένδυση, ανηγμένης στην μέση γεωστατική τάση, ανάλογα με την ποιότητα της βραχόμαζας  $\sigma_c/p_{0,m}$ , για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ) και πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων

Στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 6.34) εξετάζεται η εξάρτηση του παραπάνω διαγράμματος από το δείκτη γεωστατικών ωθήσεων  $K$ . Η διερεύνηση αυτή πραγματοποιείται ενδεικτικά για την περίπτωση της αραιής διάταξης αγκυρίων ( $s=2m$ ) και μας οδηγεί στα εξής δύο συμπεράσματα.

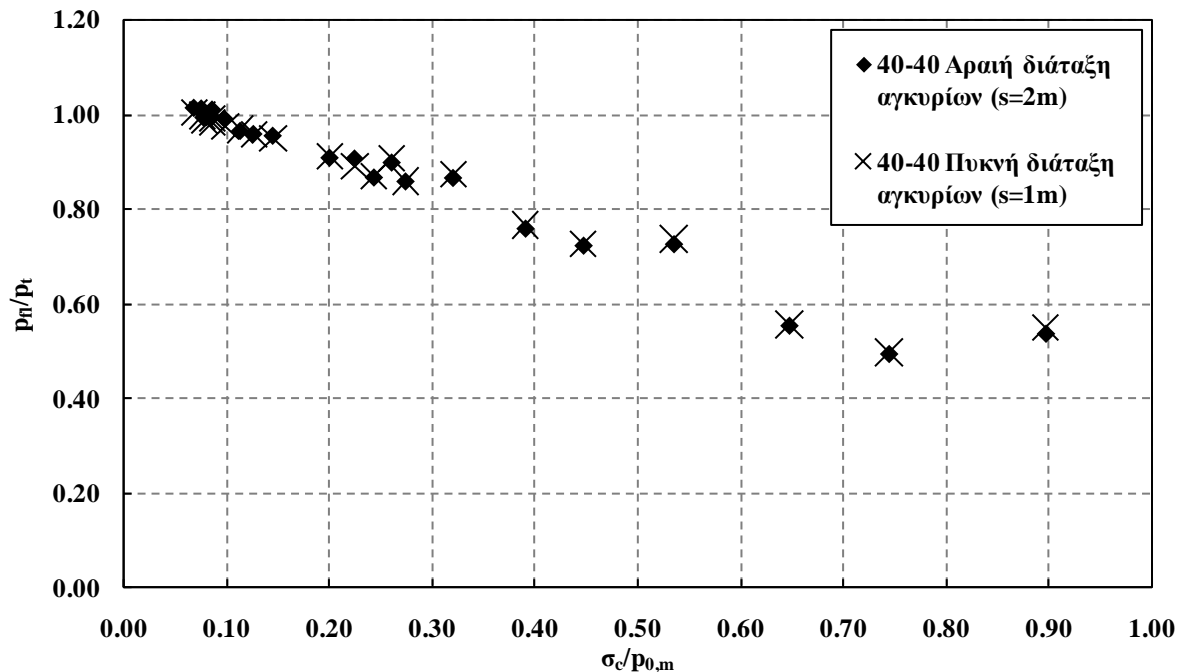
Πρώτον, η μορφή της κατανομής  $(p_t - p_n)/p_{0,m} - \sigma_c/p_{0,m}$  δε μεταβάλλεται για τους διάφορους δείκτες γεωστατικών ωθήσεων. Δηλαδή παρατηρείται ότι ο λόγος  $(p_t - p_n)/p_{0,m}$  αυξάνεται με την αύξηση του δείκτη  $\sigma_c/p_{0,m}$ , για κάθε  $K$ . Δεύτερον, οι τιμές του λόγου  $(p_t - p_n)/p_{0,m}$  αυξάνονται με την αύξηση του δείκτη γεωστατικών ωθήσεων  $K$ . Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η διαφορά μεταξύ της πίεσης της τελικής επένδυσης και της πίεσης της άμεσης υποστήριξης μεγαλώνει με την αύξηση του δείκτη γεωστατικών ωθήσεων.





**Σχήμα 6.34:** Μεταβολή της διαφοράς της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνει η άμεση υποστήριξη από την πίεση από την πίεση που αναλαμβάνει η τελική επένδυση, ανηγμένης στην μέση γεωστατική τάση, ανάλογα με την ποιότητα της βραχόμαζας  $\sigma_c/p_{0,m}$ , για την αραιή διάταξη αγκυρίων ( $s=2m$ ), για διάφορους δείκτες γεωστατικών ωθήσεων  $K$

Ακολουθώντας, παρατίθεται το διάγραμμα της μεταβολής του λόγου  $p_n/p_t$  συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας. Όπως και στο αντίστοιχο διάγραμμα για την περίπτωση της ολομέτωπης εκσκαφής (Σχήμα 6.21), παρατηρούμε ότι η μεταβολή της πυκνότητας του καννάβου δεν επηρεάζει πρακτικά το λόγο  $p_n/p_t$ . Επίσης, φαίνεται ότι, στις πολύ χαμηλής ποιότητας βραχόμαζες, ο λόγος αυτός βρίσκεται πολύ κοντά στη μονάδα και, στη συνέχεια, μειώνεται με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών.

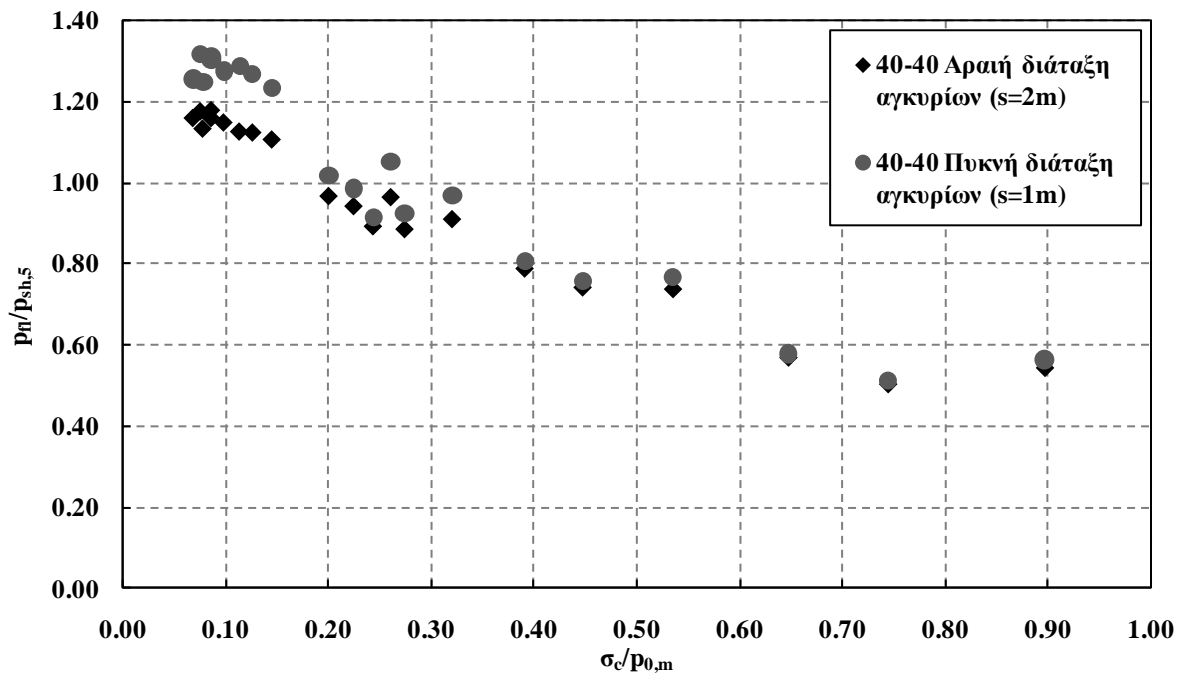


**Σχήμα 6.35:** Μεταβολή του λόγου της πίεσης της τελικής επένδυσης προς την πίεση των μέτρων άμεσης υποστήριξης,  $p_n/p_t$ , συναρτήσει της ποιότητας της βραχόμαζας, για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ), πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.36), στο οποίο αποτυπώνεται ο λόγος  $p_n/p_{sh,5}$  σε σχέση με το δείκτη ποιότητας  $\sigma_c/p_{o,m}$ . Εκ πρώτης όψεως παρατηρούμε ότι ο λόγος  $p_n/p_{sh,5}$  μειώνεται με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών. Τα σημαντικά στοιχεία που προκύπτουν από το διάγραμμα αυτό είναι δύο. Πρώτον, το γεγονός ότι ο λόγος  $p_n/p_{sh,5}$  λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας, για τις πολύ κακές γεωτεχνικές συνθήκες και για τις δύο πυκνότητες καννάβου. Το δεύτερο σημαντικό στοιχείο είναι η διαφοροποίηση των τιμών του λόγου  $p_n/p_{sh,5}$ , ανάλογα με την πυκνότητα του καννάβου αγκυρίων. Μάλιστα παρατηρούμε ότι η διαφορά των λόγων της αραιής και της πυκνής διάταξης ελαττώνεται με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών.

Η εξήγηση των παραπάνω προκύπτει αν θυμηθούμε το Σχήμα 6.25 του προηγούμενου κεφαλαίου, το οποίο αφορά στο ποσοστό της συνολικής πίεσης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια βράχου, για την εκσκαφή της σήραγγας σε δύο φάσεις. Τα συμπεράσματα, που προκύπτουν για την πίεση των αγκυρίων, εκείνου του διαγράμματος, και κατ' επέκταση όλου του προηγούμενου κεφαλαίου ισχύουν και για το κεφάλαιο αυτό, καθώς η αλληλουχία των μέτρων άμεσης υποστήριξης είναι ακριβώς η ίδια, για τις αριθμητικές αναλύσεις των δύο κεφαλαίων.

Έτσι, οι, μεγαλύτερες της μονάδας, τιμές του λόγου  $p_n/p_{sh,5}$  οφείλονται στο γεγονός ότι τα αγκύρια βράχου αναλαμβάνουν πολύ μεγάλο ποσοστό της συνολικής πίεσης  $p_t$ , για τις περιπτώσεις των πολύ κακών ποιοτικά βραχομαζών. Απ' την άλλη, η διαφοροποίηση των τιμών του λόγου  $p_n/p_{sh,5}$ , ανάλογα με την πυκνότητα του καννάβου αγκυρίων, οφείλεται στο γεγονός ότι τα αγκύρια βράχου αναλαμβάνουν σαφώς μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής φόρτισης, στην πυκνή ( $s=1m$ ) απ' ότι στην αραιή ( $s=2m$ ) διάταξη των αγκυρίων βράχου. Τέλος, το "κλείσιμο" της απόστασης των λόγων της αραιής και της πυκνής διάταξης, με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών, οφείλεται στο γεγονός ότι, με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών, μειώνεται το ποσοστό της συνολικής φόρτισης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια, και για τις δύο περιπτώσεις πυκνότητας του καννάβου αγκυρίων, και, επιπλέον, "κλείνει" η διαφορά των δύο αυτών ποσοστών.



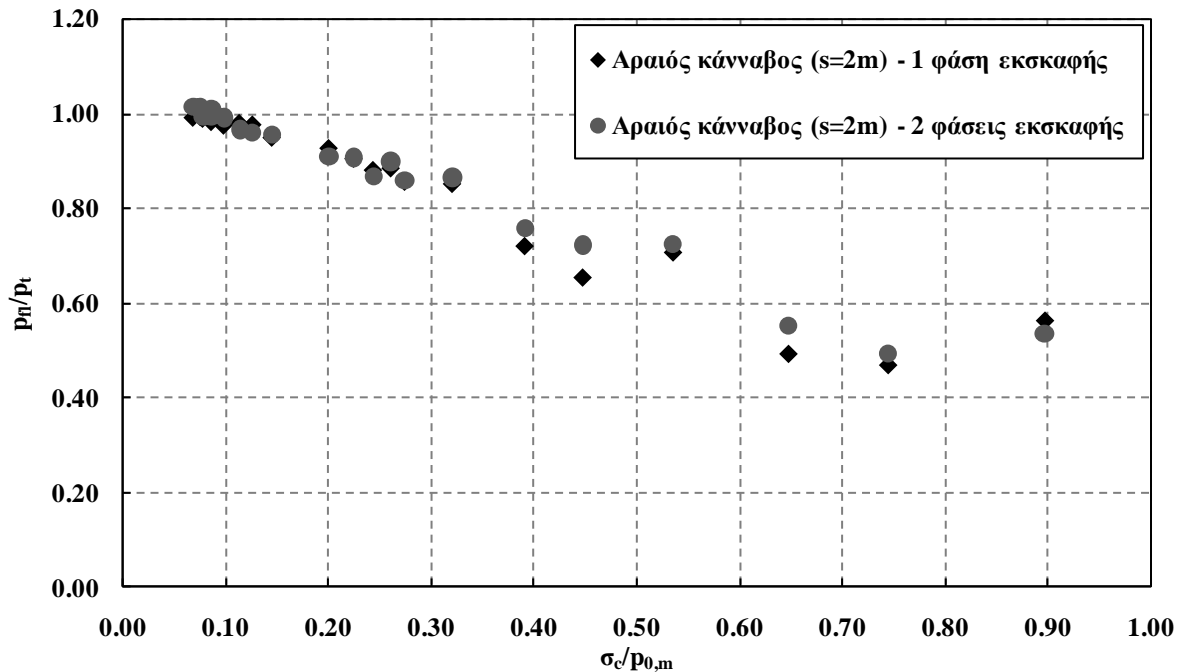
**Σχήμα 6.36:** Μεταβολή του λόγου της πίεσης της τελικής επένδυσης προς την πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος,  $p_n/p_{sh,5}$ , συναρτήσει της ποιότητας της βραχομάζας, για τις περιπτώσεις αραιού ( $s=2m$ ), πυκνού ( $s=1m$ ) καννάβου αγκυρίων

Όσον αφορά στην πίεση των αγκυρίων, ισχύουν τα συμπεράσματα του προηγούμενου κεφαλαίου (6.5), καθώς, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η αλληλουχία των μέτρων άμεσης υποστήριξης είναι ακριβώς η ίδια, για τις αριθμητικές αναλύσεις των δύο κεφαλαίων.

### 6.6.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων με δύο φάσεις εκσκαφής και των αριθμητικών αναλύσεων με μία φάση εκσκαφής

Στην αρχή της παραγράφου αυτής γίνεται μία προσπάθεια συσχέτισης του λόγου της πίεσης της τελικής επένδυσης προς τη συνολική πίεση των μέτρων άμεσης υποστήριξης ( $p_n/p_t$ ), για τις περιπτώσεις της ολομέτωπης εκσκαφής και της εκσκαφής σε δύο φάσεις. Γι' αυτό το λόγο παρουσιάζεται το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 6.37), από το οποίο προκύπτει ότι ο λόγος  $p_n/p_t$  έχει την τάση να μειώνεται με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών, συμπεράσμα στο οποίο είχαμε καταλήξει και παραπάνω (Σχήμα 6.21 και Σχήμα 6.35).

Από το ακόλουθο σχήμα, όμως, προκύπτει επιπλέον ότι ο λόγος  $p_n/p_t$  είναι σχεδόν ταυτόσημος για τις δύο περιπτώσεις διάνοιξης της σήραγγας. Επιπλέον παρατηρούμε ότι τα σημεία της κατανομής για τον πυκνό και τον αραιό κάρναβο είναι πάρα πολύ κοντά.



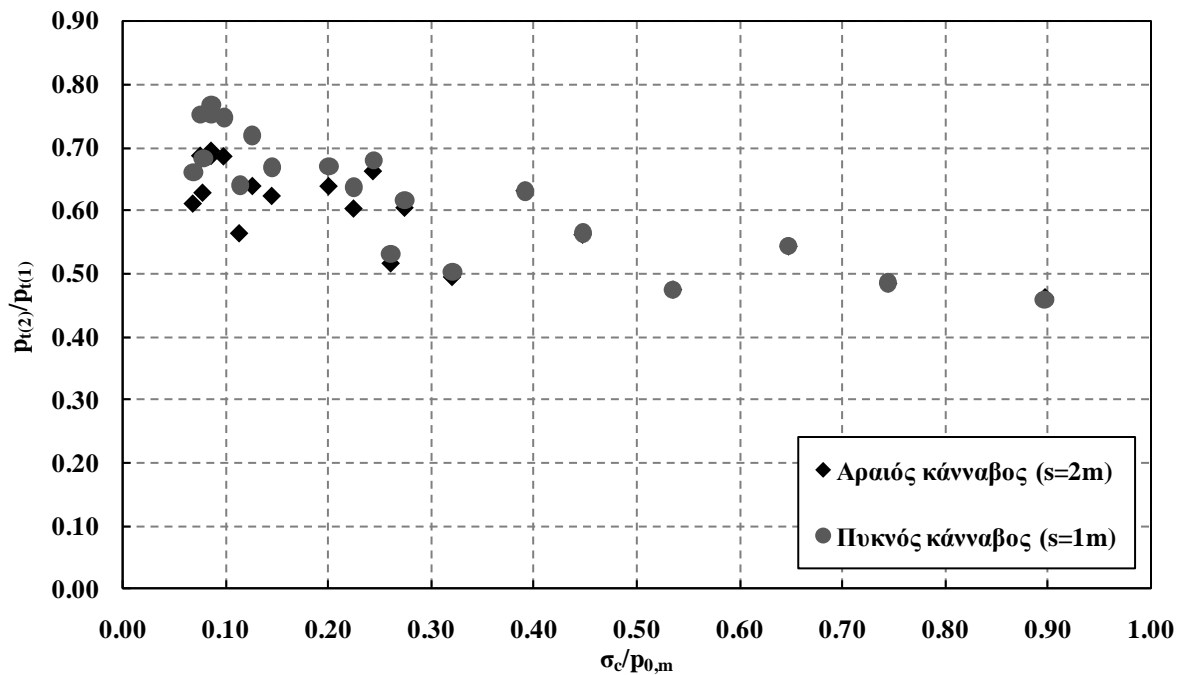
**Σχήμα 6.37:** Μεταβολή των λόγων της πίεσης της τελικής επένδυσης προς τη συνολική πίεση των μέτρων άμεσης υποστήριξης, για διάνοιξη σήραγγας σε μία και δύο φάσεις, συναρτήσει των γεωτεχνικών συνθηκών

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι λόγοι  $p_{b,r(2)}/p_{b,r(1)}$ ,  $p_{sh,5(2)}/p_{sh,5(1)}$ ,  $p_{t(2)}/p_{t(1)}$  και  $p_{n(2)}/p_{n(1)}$  και παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα συναρτήσει των γεωτεχνικών συνθηκών, όπως ακριβώς έγινε και στο υποκεφάλαιο 6.5.2. Υπενθυμίζεται ότι οι λόγοι αυτοί έχουν στον αριθμητή τους κάποια πίεση, όπως αυτή προέκυψε από τη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις και στον παρονομαστή τους, την ίδια πίεση, όπως αυτή προέκυψε από την ολομέτωπη εκσκαφή της σήραγγας, εξ' ου και οι δείκτες (2) και (1) αντίστοιχα.

Στο υποκεφάλαιο αυτό δεν παρουσιάζονται τα διαγράμματα των λόγων  $p_{b,r(2)}/p_{b,r(1)}$  και  $p_{sh,5(2)}/p_{sh,5(1)}$  συναρτήσει των γεωτεχνικών συνθηκών, καθώς θα είναι πανομοιότυπα με τα αντίστοιχα διαγράμματα του υποκεφαλαίου 6.5.2 (Σχήμα 6.29, Σχήμα 6.28). Αυτό συμβαίνει καθώς τα μέτρα άμεσης υποστήριξης, όπως επίσης, και η αλληλουχία τους είναι ακριβώς ίδια στις αναλύσεις των δύο υποκεφαλαίων. Έτσι, παρουσιάζεται ακολούθως το διάγραμμα του λόγου  $p_{t(2)}/p_{t(1)}$  συναρτήσει του δείκτη ποιότητας της βραχώμαζας  $\sigma_c/p_{0,m}$ . Παρατηρούμε ότι με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών, ο λόγος  $p_{t(2)}/p_{t(1)}$  έχει την τάση να μειώνεται. Προσεγγίζοντας την παρατήρηση αυτή λίγο πιο πρακτικά, συμπεραίνουμε ότι τα μέτρα άμεσης υποστήριξης καλούνται να αναλάβουν φορτία μειωμένα κατά 23-54%, στην περίπτωση της εκσκαφής της σήραγγας σε δύο φάσεις. Δηλαδή, κατά την εκσκαφή της σήραγγας σε δύο φάσεις, στα μέτρα άμεσης υποστήριξης αναπτύσσονται πιέσεις κατά περίπου 40% μικρότερες, σε σχέση με την ολομέτωπη εκσκαφή.

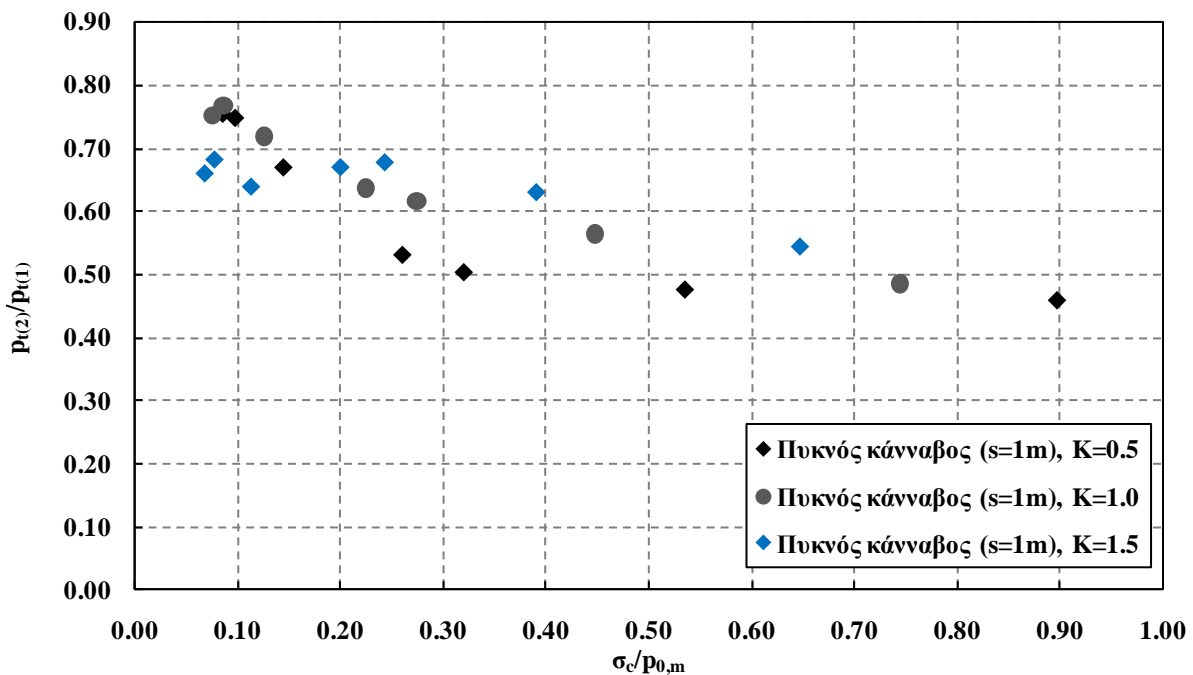
Ειδικότερα, στις κακές γεωτεχνικές συνθήκες ( $\sigma_c/p_{0,m} < 0.30$ ) "ανακουφίζονται" κατά 5% περίπου περισσότερο για τον αραιό κάρναβο αγκυριών ( $s=2m$ ). Αυτό συμβαίνει γιατί, στις συνθήκες αυτές, τα

αγκύρια βράχου της πυκνής διάταξης αναλαμβάνουν πολύ μεγάλο ποσοστό της συνολικής φόρτισης, το οποίο είναι αρκετά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ποσοστό της αραιής διάταξης.



**Σχήμα 6.38:** Μεταβολή του λόγου της πίεσης των μέτρων άμεσης υποστήριξης, για τη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις, προς την ίδια πίεση για τη διάνοιξη της σήραγγας σε μία φάση, συναρτήσει της ποιότητας της βραχώμαζας

Στο ακόλουθο διάγραμμα διερευνάται η εξάρτηση της παραπάνω κατανομής από το συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων  $K$ , ενδεικτικά για την περίπτωση του πυκνού καννάβου αγκυρίων ( $s=1m$ ) και όπως φαίνεται δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερη εξάρτηση της κατανομής αυτής από το δείκτη γεωστατικών ωθήσεων.

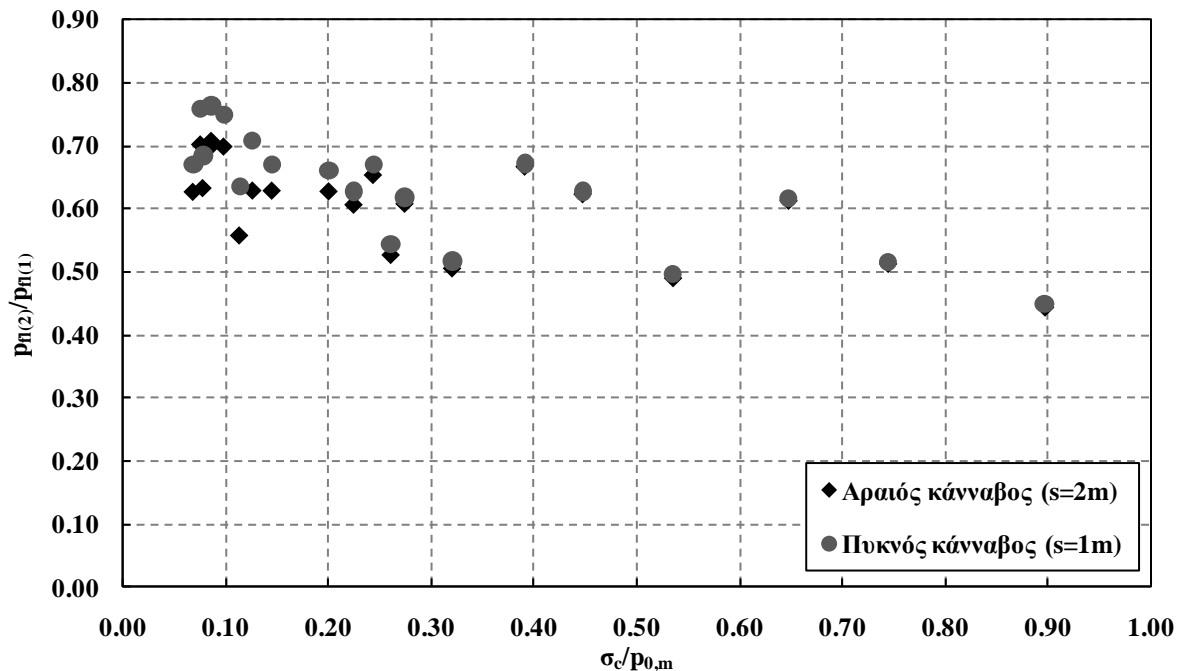


**Σχήμα 6.39:** Μεταβολή του λόγου της πίεσης των μέτρων άμεσης υποστήριξης, για τη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις, προς την ίδια πίεση για τη διάνοιξη της σήραγγας σε μία φάση, συναρτήσει της ποιότητας της βραχώμαζας, για διάφορους δείκτες γεωστατικών ωθήσεων  $K$ , για την περίπτωση της αραιής διάταξης αγκυρίων

Τέλος, παρατίθεται το ακόλουθο διάγραμμα, στο οποίο φαίνεται η μεταβολή του λόγου  $p_{n(2)}/p_{n(1)}$  σε σχέση με τις γεωτεχνικές συνθήκες της βραχώμαζας. Από το διάγραμμα αυτό, βλέπουμε ότι ο λόγος  $p_{n(2)}/p_{n(1)}$  παίρνει τιμές μικρότερες της μονάδας (0.44-0.76) και, μάλιστα, μειώνεται με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών.

Όπως και στα μέτρα άμεσης υποστήριξης, έτσι και στην τελική επένδυση, προκύπτει ότι αυτή "ανακουφίζεται" στην περίπτωση της διάνοιξης της σήραγγας σε δύο φάσεις, κατά 38% περίπου (κυμαίνεται μεταξύ 24-56%). Το τελευταίο είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο, το οποίο ουσιαστικά δείχνει ότι η τελική επένδυση αναλαμβάνει μεγαλύτερα φορτία, όταν η εκσκαφή της σήραγγας γίνεται σε μία φάση, απ' ό,τι αν γινόταν σε δύο φάσεις.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι ο λόγος  $p_{n(2)}/p_{n(1)}$  του πυκνού καννάβου είναι πρακτικά ίδιος με αυτόν του αραιού καννάβου, στις καλές γεωτεχνικές συνθήκες. Όμως, στις, ποιοτικά, κακές βραχώμαζες οι λόγοι αυτοί διαφέρουν ανάλογα με την πυκνότητα των αγκυριών. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή του λόγου  $p_{n(2)}/p_{n(1)}$  είναι κατά 5% μικρότερη για την περίπτωση του αραιού καννάβου αγκυριών, δηλαδή, στην περίπτωση αυτή, η τελική επένδυση αναλαμβάνει μικρότερα φορτία σε σχέση με τον πυκνό κάνναβο. Στο συμπέρασμα αυτό καταλήγουμε με ασφάλεια, καθώς οι τιμές της  $p_{n(1)}$  είναι ταυτόσημες και για τις δύο περιπτώσεις πυκνότητας του καννάβου αγκυριών.



**Σχήμα 6.40: Μεταβολή του λόγου της πίεσης της τελικής επένδυσης, για τη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις, προς την ίδια πίεση για τη διάνοιξη της σήραγγας σε μία φάση, συναρτήσει της ποιότητας της βραχώμαζας**

Από το σύνολο των συγκριτικών διαγραμμάτων που παρουσιάστηκαν στην παρούσα υποπαράγραφο, αλλά και στην υποπαράγραφο 6.5.2, παρατηρούμε ότι στο σύνολο των περιπτώσεων, που έχουμε επεξεργαστεί, η ανακούφιση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και της τελικής επένδυσης κυμαίνεται μεταξύ των ποσοστών 25-50%, για την περίπτωση της εκσκαφής της σήραγγας σε δύο φάσεις, σε σχέση με την ολομέτωπη διάνοιξη.

Όμως, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ναι μεν τα φορτία είναι μικρότερα στην περίπτωση της εκσκαφής σε δύο φάσεις, αλλά η διαστασιολόγηση ενδέχεται να είναι δυσχερέστερη στην περίπτωση αυτή, λόγω των ροπών, που αναπτύσσονται στη διατομή της σήραγγας λόγω της κατάρτησης της λειτουργίας του κλειστού δακτυλίου.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά τη φάση διάνοιξης της σήραγγας, γίνεται, αρχικά, η εκσκαφή της και τοποθετούνται παράλληλα τα μέτρα άμεσης υποστήριξης. Στη συνέχεια, κατασκευάζεται και τοποθετείται η τελική επένδυση, εντός του δακτυλίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, αφού, όμως, πρώτα επέλθει η ισορροπία μεταξύ μέτρων άμεσης υποστήριξης και βραχόμαζας. Επομένως, η τελική επένδυση είναι αφόρτιστη, σε πρώτη φάση. Η φόρτιση της προκύπτει είτε από χρονικά εξαρτημένα φαινόμενα, όπως ο ερπυσμός και η διόγκωση, είτε από την απαξίωση των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αμελήθηκαν τα χρονικά εξαρτημένα φαινόμενα. Όσον αφορά στα μέτρα άμεσης υποστήριξης, δεν υπάρχουν πολλά στοιχεία σχετικά με την ανθεκτικότητα τους και γι' αυτό το λόγο οι αβεβαιότητες αναφορικά με την απαξίωση των μέτρων άμεσης υποστήριξης είναι μεγάλες. Όπως και στην πλειονότητα των γεωτεχνικών μελετών, έτσι και στην εργασία αυτή, θεωρήθηκε πλήρης απαξίωση των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι ο τρόπος μεταφοράς των φορτίων της άμεσης υποστήριξης στην τελική επένδυση, μετά την "απενεργοποίησή" τους. Τα μέτρα άμεσης υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν είναι εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου και ως τελική επένδυση χρησιμοποιήθηκε τόσο εκτοξευόμενο όσο και έγχυτο σκυρόδεμα.

Στο πλαίσιο της διερεύνησης αυτής πραγματοποιήθηκε πλήθος διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων. Σημαντικό στοιχείο των διδιάστατων αναλύσεων αποτελεί η εξάρτηση των τιμών των πιέσεων, και γενικότερα των εντατικών μεγεθών, από τη μέθοδο αποτόνωσης, που επιλέγεται. Αυτό συμβαίνει, διότι η εκάστοτε μέθοδος αποτόνωσης "δεσμεύει", μέσω των σχέσεών της, το ποσοστό της αποτόνωσης που πραγματοποιείται και επομένως και την πίεση που καλούνται να αναλάβουν τα μέτρα υποστήριξης της σήραγγας. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα διπλωματική εργασία, το σύνολο των πιέσεων είναι εκφρασμένο ως προς τη μέση γεωστατική τάση και η διερεύνηση των διάφορων αποτελεσμάτων, που αφορούν στη μεταφορά των φορτίων, έγινε με τη μορφή λόγων και όχι απόλυτων μεγεθών. Εξάλλου, ακριβή απόλυτα μεγέθη προκύπτουν, κατά κύριο λόγο, από τις τρισδιάστατες αναλύσεις, οι οποίες επιτρέπουν την ανάπτυξη της αποτόνωσης όπως ακριβώς αυτή εξελίσσεται στην πραγματικότητα.

Πίεση μέτρων υποστήριξης, $p_{sh}$ και $p_n$	Ποσοστό της μέσης γεωστατικής τάσης $p_{0,m}$
Ελάχιστη τιμή	5%
Μέγιστη τιμή	45%

**Πίνακας 7.1:** Εύρος τιμών των πιέσεων των μέτρων υποστήριξης σε σχέση με τη μέση γεωστατική τάση

Πέραν της ποσοτικής επεξεργασίας, πραγματοποιήθηκε και ποιοτική επεξεργασία ορισμένων κατανομών. Από αυτήν παρατηρήθηκε, αρχικά, ότι οι μέγιστες μετατοπίσεις παρουσιάζονται στην περιοχή των μέγιστων αξονικών τάσεων. Αντίστοιχα, στην περιοχή της διατομής της σήραγγας, όπου οι αξονικές τάσεις είναι μικρότερες, εμφανίζονται οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις και οι μέγιστες πιέσεις επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή της τελικής επένδυσης, αντίστοιχα. Τέλος, τα αγκύρια βράχου ενεργοποιούνται περισσότερο στις περιοχές, όπου εντοπίζονται και οι μέγιστες μετατοπίσεις.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε πως πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις, προσομοιώνοντας τη διάνοιξη της σήραγγας τόσο σε μία όσο και σε δύο φάσεις. Αρχικά, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα όλων των αριθμητικών αναλύσεων, στις οποίες η διάνοιξη πραγματοποιήθηκε με ολομέτωπη εκσκαφή της σήραγγας (μία φάση). Τα πρώτα συμπεράσματα που παρουσιάζονται είναι αυτά, που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις, στις οποίες η άμεση υποστήριξη αποτελείται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου και το ρόλο της τελικής επένδυσης αναλαμβάνει, μετά την απαξίωση των αγκυρίων, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

- ✓ Τα αγκύρια βράχου ενεργοποιούνται σε πολύ μικρό βαθμό, αναλαμβάνοντας πολύ μικρό ποσοστό (2-8%) της συνολικής φόρτισης της άμεσης υποστήριξης. Μάλιστα, μετά την απαξίωση των αγκυρίων βράχου ανακατανέμονται οι πιέσεις στο σύνολο της διατομής της σήραγγας, και όχι μόνο στην άνω ημιδιατομή αυτής, εκεί δηλαδή που ήταν τοποθετημένα τα αγκύρια βράχου.
- ✓ Ο λόγος  $p_b^r/p_b^{th}$  λαμβάνει τιμές κοντά στη μονάδα για τις κακές γεωτεχνικές συνθήκες και, μάλιστα, ο λόγος αυτός αυξάνεται με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών. Ειδικότερα, οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται μεταξύ 0.70-1.65 (μικρή σχετικά διακύμανση) για την περίπτωση του πυκνού καννάβου αγκυρίων ( $s=2m$ ) και μεταξύ 0.90-3.25 (μεγάλη σχετικά διακύμανση) για την περίπτωση του αραιού καννάβου ( $s=1m$ ).

Ακολουθούν τα συμπεράσματα των αριθμητικών αναλύσεων, που σαν άμεση υποστήριξη λειτουργεί μόνο ο δακτύλιος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και σαν τελική επένδυση λειτουργεί έγχυτο σκυρόδεμα. Στην κατηγορία αυτή πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις για δύο λόγους σχετικής δυσκαμψίας  $K_{fl}/K_{sh}=1.45$  και  $K_{fl}/K_{sh}=39.15$ . Επίσης, στη συγκεκριμένη κατηγορία πάρθηκαν αποτελέσματα με τη χρήση αναλυτικών λύσεων (καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης).

- ✓ Το φορτίο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μεταφέρεται σχεδόν αυτούσιο (80-100%) στην τελική επένδυση. Μοναδική εξαίρεση αποτελούν οι αριθμητικές αναλύσεις πολύ ευμενών γεωτεχνικών συνθηκών, με λόγο σχετικών δυσκαμψιών  $K_{fl}/K_{sh}=1.45$ , στις οποίες το ποσοστό του φορτίου που μεταφέρεται στην τελική επένδυση κυμαίνεται μεταξύ 50-90%.
- ✓ Από τα αποτελέσματα των αναλυτικών λύσεων παρατηρήσαμε ότι με την επιδείνωση των γεωτεχνικών συνθηκών αυξάνεται η τελική σύγκλιση της βραχόμαζας ( $u_{R,o}$ ), αυξάνονται οι πιέσεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και της τελικής επένδυσης, μειώνεται η διαφορά μεταξύ της πίεσης που έχει να αναλάβει η τελική επένδυση και της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και, τέλος, μειώνεται το ποσοστό της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που αποτελεί αυτή η διαφορά.
- ✓ Και από τις δύο μεθόδους εξαγωγής αποτελεσμάτων (αριθμητικές αναλύσεις και αναλυτικές λύσεις) προκύπτει ότι, με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών, το ποσοστό του φορτίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που μεταφέρεται στην τελική επένδυση μειώνεται. Επίσης, οι τιμές των ποσοστών αυτών διαφέρουν κατά μέσο όρο 10-15%. Από όλα τα παραπάνω προκύπτει επιπλέον, πως το φορτίο, που χάνεται κατά τη "μεταφορά" από το εκτοξ. σκυρόδεμα στην τελική επένδυση, οφείλεται στις επιπλέον μετατοπίσεις που αναπτύσσονται, προκειμένου να ισορροπήσει η τελική επένδυση με τη βραχόμαζα.
- ✓ Τα παραπάνω συμπεράσματα, που αφορούν στην εκσκαφή της σήραγγας σε μία φάση, ισχύουν και για τις αναλύσεις, στις οποίες η άμεση υποστήριξη αποτελείται από αγκύρια βράχου και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και η τελική επένδυση από έγχυτο σκυρόδεμα. Στην κατηγορία αυτή πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις για ένα μόνο λόγο σχετικής δυσκαμψίας ( $K_{fl}/K_{sh}=1.45$ ). Μάλιστα, ο τρόπος που μεταφέρονται τα συνολικά φορτία της άμεσης υποστήριξης στην τελική επένδυση έχει την ίδια λογική αλλά και πολύ κοντινές τιμές με αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ειδικότερα, για πολύ δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες, το συνολικό φορτίο των μέτρων άμεσης υποστήριξης μεταφέρεται αυτούσιο στην τελική επένδυση. Με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών, το ποσοστό του συνολικού φορτίου που μεταφέρεται στην τελική επένδυση μειώνεται, και μάλιστα, για  $\sigma_c/p_{o,m} < 0.30$ , λαμβάνει τιμές μεταξύ 85-100% του συνολικού φορτίου, ενώ για  $\sigma_c/p_{o,m} > 0.30$ , το ποσοστό αυτό κυμαίνεται μεταξύ 45-85%.

Εν συνεχεία, θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις με δύο φάσεις εκσκαφής. Στις αναλύσεις αυτές καταργείται η λειτουργία του κλειστού δακτυλίου της διατομής της σήραγγας και αναπτύσσονται διαφορετικά εντατικά μεγέθη και μετατοπίσεις, σε σχέση με την ολομέτωπη διάνοιξη. Τα πρώτα συμπεράσματα που παρουσιάζονται είναι αυτά, που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις, στις οποίες η άμεση υποστήριξη αποτελείται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου και το ρόλο της τελικής επένδυσης αναλαμβάνει, μετά την απαξίωση των αγκυρίων, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

- ✓ Η συμβολή των αγκυρίων στην ανάληψη της φόρτισης είναι αρκετά μεγάλη. Μάλιστα, όσο χαμηλότερη είναι η ποιότητα της βραχόμαζας, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της φόρτισης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια βράχου. Ειδικότερα, στις πολύ κακές γεωτεχνικές συνθήκες, το ποσοστό αυτό φθάνει μέχρι και το 25% της συνολικής φόρτισης για την περίπτωση του πυκνού καννάβου ( $s=1m$ ) και μέχρι το 15%, για την περίπτωση του αραιού καννάβου ( $s=2m$ ).



- ✓ Στην περίπτωση διάνοιξης της σήραγγας σε δύο φάσεις, η πίεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι 30-50% μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη πίεση στην ολομέτωπη διάνοιξη. Επίσης, στις κακές γεωτεχνικές συνθήκες ( $\sigma_c/p_{o,m} < 0.30$ ), η πίεση των αγκυρίων είναι μεγαλύτερη κατά 3.5-5.5 φορές για τον πυκνό κάρναβο ( $s=1m$ ) και κατά 2.5-4 φορές για τον αραιό κάρναβο ( $s=2m$ ) σε σχέση με την ολομέτωπη διάνοιξη. Τέλος, όταν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα λειτουργεί ως τελική επένδυση, η πίεση που αναλαμβάνει είναι κατά 25-50% μικρότερη σε σχέση με την εκσκαφή της σήραγγας σε μία φάση.
- ✓ Ο λόγος  $p_b^r/p_b^{th}$  λαμβάνει τιμές κοντά στη μονάδα (0.70-0.85), για τις κακές γεωτεχνικές συνθήκες, γεγονός που συνέβαινε και για την περίπτωση της ολομέτωπης διάνοιξης της σήραγγας. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο λόγος αυτός είναι μικρότερος της μονάδας ( $p_b^r/p_b^{th} < 1.00$ ). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η πραγματική πίεση που αναλαμβάνουν τα αγκύρια είναι μικρότερη από την πίεση, που εμείς έχουμε θεωρήσει ότι αυτά αναλαμβάνουν. Επομένως, η προσέγγισή μας είναι υπέρ της ασφαλείας. Επιπλέον, ο λόγος  $p_b^r/p_b^{th}$  πλησιάζει στη μονάδα, όσο αυξάνει το ποσοστό της φόρτισης που αναλαμβάνουν τα αγκύρια βράχου.

Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις δύο φάσεων εκσκαφής, στις οποίες η άμεση υποστήριξη αποτελείται από αγκύρια βράχου και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και η τελική επένδυση από έγχυτο σκυρόδεμα.

- ✓ Το ποσοστό της φόρτισης που μεταφέρεται από τα μέτρα άμεσης υποστήριξης στην τελική επένδυση μειώνεται με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών. Ειδικότερα, στην τελική επένδυση μεταφέρεται το 50-100% του συνολικού φορτίου των μέτρων άμεσης υποστήριξης και αντίστοιχα το 50-130% του φορτίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Αυτό υφίσταται, καθώς η συμβολή των αγκυρίων στην ανάληψη της συνολικής φόρτισης είναι πολύ μεγάλη στις κακές γεωτεχνικές συνθήκες, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Το ποσοστό της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που μεταφέρεται στην τελική επένδυση είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση του πυκνού κάρναβου αγκυρίων ( $s=1m$ ) κατά 10% για  $\sigma_c/p_{o,m} < 0.20$ , κατά 5% για  $0.20 < \sigma_c/p_{o,m} < 0.40$  και κατά 0% για  $\sigma_c/p_{o,m} > 0.40$ , σε σχέση με τον αραιό κάρναβο ( $s=2m$ ).
- ✓ Η συνολική πίεση που αναλαμβάνουν τα μέτρα άμεσης υποστήριξης (αγκύρια βράχου και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) είναι κατά 25-55% μικρότερη για τον πυκνό κάρναβο ( $s=1m$ ) και κατά 30-55% μικρότερη για τον αραιό ( $s=2m$ ), στη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις. Άρα, περισσότερο (έστω και σε μικρό ποσοστό) "ανακουφίζονται" τα μέτρα άμεσης υποστήριξης, στην περίπτωση της αραιής διάταξης των αγκυρίων, καθώς στην περίπτωση αυτή συμβάλλουν λιγότερο τα αγκύρια βράχου στην ανάληψη της φόρτισης. Επίσης, τα αντίστοιχα ποσοστά, όσον αφορά στην τελική επένδυση, είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

Από τα τελευταία συμπεράσματα, που αφορούν στη διάνοιξη της σήραγγας σε δύο φάσεις, παρατηρούμε μία γενικότερη τάση μείωσης των φορτίων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και της τελικής επένδυσης, στην περίπτωση αυτή. Παρ' όλα αυτά, αναμένεται η διαστασιολόγηση να είναι δυσχερέστερη στην περίπτωση αυτή, καθώς καταργείται η λειτουργία του κλειστού δακτυλίου στη διατομή της σήραγγας, γεγονός που σαν αποτέλεσμα έχει την ανάπτυξη ροπών κάμψης. Ενώ προηγουμένως, στην περίπτωση της ολομέτωπης διάνοιξης, η λειτουργία του κλειστού δακτυλίου δεν άφηνε περιθώρια ανάπτυξης σημαντικών ροπών. Έτσι, το έγχυτο ή και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ήταν σε θέση να "αντιμετωπίσει" αποτελεσματικά τη θλίψη που αναπτυσσόταν στη διατομή της σήραγγας.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί πως τα παραπάνω συμπεράσματα ισχύουν γενικότερα για το σύνολο των περιπτώσεων των βαθιών σηράγγων, εφόσον τα φορτία έχουν εκφραστεί σε λόγους πιέσεων τελικής επένδυσης προς άμεσης υποστήριξης και είναι ανεξάρτητα του γεωστατικού πεδίου. Όμως, όσον αφορά στις ρηχές σήραγγες, δηλαδή αυτές που βρίσκονται σε μικρό σχετικά βάθος, υπάρχει αβεβαιότητα σχετικά με την ισχύ των ανωτέρω συμπερασμάτων, η οποία οφείλεται στην αλληλεπίδραση της σήραγγας με την επιφάνεια του εδάφους.

Ακολούθως, παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Πίνακας 7.2), ο οποίος περιλαμβάνει τα σημαντικότερα ποσοτικά συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στον πίνακα αυτό, αποτυπώνονται τα εύρη διακύμανσης α) του ποσοστού της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που μεταφέρεται στην τελική επένδυση, β) του λόγου της πίεσης των αγκυρίων προς το ανηγμένο αξονικό φορτίο τους ( $p_b^r/p_b^{th}$ ), και γ) του ποσοστού της συνολικής πίεσης των μέτρων άμεσης

υποστήριξης που μεταφέρεται στην τελική επένδυση. Τα εύρη αυτά ταξινομούνται με βάση τις γεωτεχνικές συνθήκες που επικρατούν και το πλήθος των φάσεων διάνοιξης της σήραγγας.

	1 ΦΑΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ		2 ΦΑΣΕΙΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ	
Ποσοστό της πίεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που μεταφέρεται στην τελική επένδυση ( $p_{fl}/p_{sh}$ )	80-100%	40-95%	-	-
Πίεση αγκυρίων προς ανηγμένο αξονικό φορτίο ( $p_b^r/p_b^{th}$ )	0.7-1.3 (s=1m)	1.3-1.8 (s=1m)	0.25-0.85	0.15-0.65
	0.9-2.5 (s=2m)	2.4-3.3 (s=2m)		
Ποσοστό της συνολικής πίεσης των μέτρων άμεσης υποστήριξης που μεταφέρεται στην τελική επένδυση ( $p_{fl}/p_t$ )	85-100%	45-85%	85-100%	50-90%
	$\sigma_c/p_{o,m} < 0.30$	$\sigma_c/p_{o,m} > 0.30$	$\sigma_c/p_{o,m} < 0.30$	$\sigma_c/p_{o,m} > 0.30$

**Πίνακας 7.2: Συγκεντρωτική απεικόνιση των παραμέτρων για τη μεταφορά των φορτίων της άμεσης υποστήριξης στην τελική επένδυση σήραγγων**

## **Βιβλιογραφία**

### **Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία**

- 1) Barton, N.R., Lien, R. & Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, **6** (4), pp. 189-239.
- 2) Chern, J.C., Shiao, F.Y. and Yu, C.W. 1998. An empirical safety criterion for tunnel construction. *Proceedings of the Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering*. Taipei, pp. 222-227.
- 3) Bieniawski, Z.T. 1989. *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley.
- 4) 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.
- 5) Franzen, T., Garshol, K.F. & Tomisawa, N. 2001. Sprayed concrete for final linings: ITA working group report. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **16**, pp. 295-309.
- 6) Hoek, E. 1994. Strength of rocks and rock masses. *ISRM News Journal*, **2** (2).
- 7) Hoek, E., Carranza-Torres, C. & Corkum, B. 2002. Hoek-Brown failure criterion. *Proceedings of 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunnelling Association of Canada: NARMS-TAC*, Toronto, Canada, **1**, pp. 267-273.
- 8) Lee, S.P., Kim, D.H., Ryu, J.H., Yu, J.Y., Lee, S.D., Han, S.H., Choi, M.S. & park, C. 2005. An experimental study on the development of high performance shotcrete for permanent tunnel support. In *Proceedings of the ITA-AITES 2005 World Tunnel Congress, Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future* (Erdem & Solak (eds)). Istanbul, Turkey, 7-12 May, **2**, pp. 455-461. London: Taylor & Francis Group.
- 9) Marinos, P. & Hoek, E, 2000. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *Proceedings of GeoEng2000 at the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*. Melbourne, Australia, pp. 1422-1446. Lancaster: Technomic publishers.
- 10) Panet, M. 1995. *Le calcul des tunnels par la methode des curves convergence-confinement*. Presses de l'Ecole Nationale des Pont de Chaussees, Paris.
- 11) Unal, E. 1983. Design guidelines and roof control standards for coal mine roofs. PhD thesis. The Pennsylvania State University.

## **Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία**

- 1) Γιούτα-Μήτρα, Π. Γκέκας, Σ. & Σοφιανός Α. 2010. Παραμετρικές αναλύσεις φορτίσεων της τελικής επένδυσης σηράγγων. *6<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*. Βόλος, Ελλάδα, 29 Σεπτεμβρίου - 1 Οκτωβρίου, **2**, σελ. 595-602. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.
- 2) Καββαδάς Μ. 2004. Φόρτιση της μόνιμης επένδυσης σηράγγων από περιβάλλον έδαφος. Ανάλυση και διαστασιολόγηση μόνιμης επένδυσης σηράγγων (επιμέλεια Τάσιος, Θ.Π.), σελ. 51-78. Αθήνα: Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων & Υπογείων Έργων.
- 3) Καββαδάς Μ. 2005. Σημειώσεις σχεδιασμού υπογείων έργων. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ
- 4) 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 & Υπογείων Έργων.
- 5) Μπακογιάννης, Γ. 2004. Δράσεις, μέθοδοι και μοντέλα ανάλυσης μόνιμης επένδυσης σηράγγων. Ανάλυση και διαστασιολόγηση μόνιμης επένδυσης σηράγγων (επιμέλεια Τάσιος,Θ.Π.), σελ. 25-50. Αθήνα: Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων & Υπογείων Έργων.
- 6) Φορτσάκης, Π.Ι. & Καββαδάς, Μ.Ι. 2010. Σύγκριση των μεθόδων εκτίμησης φορτίων της τελικής επένδυσης μέσω αριθμητικών αναλύσεων και στοιχείων από την Εγνατία Οδό. *6<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*. Βόλος, Ελλάδα, 29 Σεπτεμβρίου - 1 Οκτωβρίου, **2**, σελ. 571-578. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.
- 7) Φορτσάκης, Π.Ι., Μαγκανάς, Κ.Α., & Καββαδάς, Μ.Ι. 2006. Μεθοδολογίες και φορτίσεις σχεδιασμού της τελικής επένδυσης σηράγγων. Παρουσίαση στοιχείων από σήραγγες της Εγνατίας Οδού. *16ο Συνέδριο Σκυροδέματος*. Αλεξανδρούπολη, Ελλάδα, 25-27 Οκτωβρίου, **Δ**, σελ. 117-128. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.