



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

Δ.Π.Μ.Σ.: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΣΕΣ ΣΧΟΛΕΣ:
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ
ΔΙΔΥΜΩΝ ΒΑΘΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΩΝ
ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

ΔΑΜΗΛΑΚΗ ΑΛΙΚΗ - ΓΕΩΡΓΙΑ
Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΚΑΒΒΑΔΑΣ ΜΙΧΑΗΛ
ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2018

Ευχαριστίες

Η εν λόγω μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Δ.Π.Μ.Σ.: «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων» στον Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μ. Καββαδά, Αν. Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος προς μελέτη με στόχο την εκπόνηση της διπλωματικής μου μεταπτυχιακής εργασίας και την ευκαιρία που μου έδωσε να εμβαθύνω στο γνωστικό αντικείμενο του σχεδιασμού και της μηχανικής των σηράγγων.

Επιπρόσθετα, οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Φ. Χόρτη, Υποψήφιο Διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, MSc, για την καθοδήγησή του, την πολύτιμη βοήθεια που προσέφερε σε επιστημονικό και οργανωτικό επίπεδο καθώς και τον απεριόριστο προσωπικό χρόνο που διέθεσε για αυτό το σκοπό. Επρόκειτο για μία βιώσιμη συνεργασία, αρμονική που συνετέλεσε καθοριστικά στην πραγματοποίηση της μεταπτυχιακής εργασίας μου.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αμέριστη υποστήριξή τους όλους αυτούς τους μήνες κι ιδιαίτερα στο φίλο μου Αντώνη για την συμπαράστασή του όλους αυτούς τους μήνες.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
1.1. Διατύπωση – ανάλυση προβλήματος	1
1.2. Δομή και οργάνωση μεταπτυχιακής εργασίας	2
2. Θεωρητικό υπόβαθρο	3
2.1. Μηχανική των σηράγγων	3
2.1.1. Αρχές της μεθόδου NATM	3
2.1.1.1. Γενικά	3
2.1.1.2. Φιλοσοφία της μεθόδου	4
2.1.1.3. Μέθοδος σύγκλισης - αποτόνωσης	5
2.1.2. Ευστάθεια σήραγγας	9
2.1.2.1. Κριτήρια αστοχίας βραχόμαζας	9
2.1.2.2. Μέτωπο εκσκαφής	14
2.1.2.3. Μέτρα προσωρινής υποστήριξης	16
2.2. Βιβλιογραφικές έρευνες	19
2.2.1. Chen S.L., Lee S.C., Gui M.W., 2008	19
2.2.2. Μπεκρή Ε., (2012)	23
2.2.3. Chortis F., Kavvadas M.,(2015)	27
2.2.4. Νύχτη Φωτεινή (2016)	33
2.2.5. Ψυχάρη Ειρήνη (2016)	38
2.2.6. Imran Ahmad Kahn, Kumar Venkatesh, R.K. Srivastava (2016)	47
3. Προσομοίωση του προβλήματος	53
3.1. Εισαγωγή	53
3.2. Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Abaqus	56
3.3. Περιγραφή αριθμητικού προσομοιώματος	58
3.3.1. Γεωμετρία μοντέλου	58
3.3.2. Διακριτοποίηση καννάβων	63
3.3.3. Βήματα εκσκαφής	65
3.4. Παράμετροι αριθμητικών αναλύσεων	68
3.4.1. Γεωμετρικές και κατασκευαστικές παράμετροι	68
3.4.2. Γεωτεχνικές παράμετροι	69
3.4.3. Παράμετροι άμεσης υποστήριξης	70
3.4.4. Συνολικές παράμετροι	71
3.5. Παραδοχές αριθμητικών αναλύσεων	72
3.6. Βασικά σύμβολα αριθμητικών αναλύσεων	73

3.7. Έλεγχος αξιοπιστίας προσομοιωμάτων-----	74
4. Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων-----	79
4.1. Εισαγωγή-----	79
4.2. Επίδραση πλάτους πυλώνα -----	80
4.2.1. Φορτία στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (p) -----	80
4.2.2. Αξονικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα (N) -----	89
4.2.3. Κύριες τάσεις του εδάφους (σ_1, σ_3) -----	94
4.3. Επίδραση γεωτεχνικών συνθηκών-----	101
4.3.1. Φορτία στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (p) -----	102
4.3.2. Αξονικές δυνάμεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (N) -----	110
4.3.3. Κύριες τάσεις των στοιχείων της βραχομάζας (σ_1, σ_3) -----	114
4.4. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα-----	120
4.4.1. Φορτία στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (p) -----	120
4.4.2. Αξονικές δυνάμεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (N) -----	125
5. Συμπεράσματα – Προτάσεις-----	131
5.1. Συμπεράσματα -----	131
5.1.1. Επίδραση πλάτους πυλώνα-----	131
5.1.2. Επίδραση γεωτεχνικών συνθηκών -----	133
5.2. Προτάσεις-----	134
6. Βιβλιογραφία -----	A

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Ακριβέστερος τρόπος προσομοίωσης της διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης σήραγγας	6
Σχήμα 2.2: Καμπύλες σύγκλισης – αποτόνωσης βραχόμαζας και απόκρισης μέτρων υποστήριξης	6
Σχήμα 2.3: Τυπικές μορφές των καμπυλών <i>Rapet</i> σε ανυποστήρικτη σήραγγα	7
Σχήμα 2.4: Επίδραση της εφαρμογής των μέτρων άμεσης υποστήριξης στη βραχόμαζα ανάλογα με τη χρονική στιγμή τοποθέτησής τους	7
Σχήμα 2.5: Διανύσματα μετατόπισης μέσα στη βραχόμαζα που περιβάλλει προωθούμενη κυκλική σήραγγα (Hoek, 2000)	8
Σχήμα 2.6: Μορφή της παραμόρφωσης στη βραχόμαζα που περιβάλλει μία υπό διάνοιξη σήραγγα (Hoek, 2000)	8
Σχήμα 2.7: Γραφική απεικόνιση περιβάλλουσας αστοχίας Mohr-Coulomb	10
Σχήμα 2.8: α) Κύκλοι Mohr, β) επίπεδα αστοχίας για την εντατική κατάσταση που αντιστοιχεί στα σημεία A και A', γ) επίπεδα αστοχίας για την εντατική κατάσταση που αντιστοιχεί στα σημεία B και B', δ) καμπύλη αστοχίας του κριτηρίου Mohr στο τασικό επίπεδο	11
Σχήμα 2.9: Συσχέτιση ελάχιστων και μέγιστων κύριων τάσεων κριτηρίου Hoek – Brown και Mohr – Coulomb	13
Σχήμα 2.10: Σχηματικός μηχανισμός δημιουργίας εξώθησης του μετώπου εκσκαφής (Cantieni et al, 2011)	14
Σχήμα 2.11: Έκθλιψη (Extrusion), Σύγκλιση (Convergence), Προσύγκλιση (Preconvergence) (Lunardi, 2000)	14
Σχήμα 2.12: Μέτωπο εκσκαφής (Face of the tunnel), Πυρήνας προώθησης (Advance core), (Lunardi, 2000)	16
Σχήμα 2.13: Εξέλιξη των μετακινήσεων των τριών κλάδων για μεταβαλλόμενο πλάτος πυλώνα (α) για πεταλοειδή διατομή και (β) για κυκλική διατομή (Chen, Lee, Gui, 2008)	20
Σχήμα 2.14: Μέγιστες μετακινήσεις για τον καθένα από τους τέσσερις κλάδους της σήραγγας και κατά τη διάρκεια όλων των στάδιων εκσκαφής (Chen, Lee, Gui, 2008)	21
Σχήμα 2.15: Διάνυσμα τελικών μετατοπίσεων των τεσσάρων παράλληλων κλάδων, (a) πριν και (b) μετά από τη βελτίωση του γεωυλικού (Chen, Lee, Gui, 2008)	21
Σχήμα 2.16: Σύγκριση, περί τη χαρακτηριστική διατομή, των πιέσεων που αναπτύσσονται επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου της δίδυμης σήραγγας ($W=0.5D=5m$), του δεύτερου κλάδου αυτής καθώς και της σήραγγας μονού κλάδου	23
Σχήμα 2.17: Εξέλιξη των αναπτυσσόμενων μέσων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης κατά τη συνολική διάρκεια εκσκαφής για διατομές των δύο κλάδων της δίδυμης σήραγγας που βρίσκονται σε απόσταση 40m από την είσοδο της σήραγγας και για $W=0.5D=5m$ (Μπεκρή, 2012)	24
Σχήμα 2.18: Κατανομή ανηγμένης μέσης πίεσης επί του κελύφους άμεσης υποστήριξης του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $p_{average,(ff/s)}/p_{average,single}$ ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_o για $W=0.5D=5m$ (Μπεκρή, 2012)	24
Σχήμα 2.19: Κατανομή των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, περί τη χαρακτηριστική διατομή, για τα τρία διαφορετικά πλάτη πυλώνα ($W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$), (Μπεκρή, 2012)	25
Σχήμα 2.20: Κατανομή ανηγμένης μέσης πίεσης επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $p_{average,(ff/s)}/p_{average,single}$ ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_o για $W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$, (Μπεκρή, 2012)	25
Σχήμα 2.21: Κατανομή ανηγμένης πίεσης της δεξιάς παρειάς ($\theta=90^\circ$) της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $p_{90,(ff/s)}/p_{90,single}$ ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_o για $W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$, (Μπεκρή, 2012)	26
Σχήμα 2.22: Κατανομή ανηγμένης πίεσης της αριστερής παρειάς ($\theta=270^\circ$) της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $p_{270,(ff/s)}/p_{270,single}$ ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_o για $W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$, (Μπεκρή, 2012)	26
Σχήμα 2.23: Ωρολογιακός προσανατολισμός της γωνίας στην αριστερή και τη δεξιά σήραγγα (Chortis F. & Kanvadas M., 2015)	29
Σχήμα 2.24: Κατανομή των φορτίων στην τυπική διατομή (αριστερά), κατανομή των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σήραγγων στην διαμήκη διεύθυνση (πάνω δεξιά) και χρονιοστορία των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σήραγγων (κάτω δεξιά) για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_o , για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$, για $k_o=0.5$ και για λόγο ύψους υπερκείμενων γαιών $H/D = 10$ (Chortis F. & Kanvadas M., 2015)	29
Σχήμα 2.25: Κατανομή των φορτίων για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o=1.0$ (αριστερά) και για $k_o = 1.5$ (δεξιά) για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_o και για λόγο ύψους υπερκείμενων γαιών $H/D = 10$ (Chortis F. & Kanvadas M., 2015)	30
Σχήμα 2.26: Λόγος φορτίων πρώτης/μονής στην εσωτερική παρειά της <<πρώτης σήραγγας >> ($\theta=90^\circ$) ως συνάρτηση του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διάφορες τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (k_o) και λόγου ύψους υπερκείμενων γαιών (H/D), (Chortis F. & Kanvadas M., 2015)	31

Σχήμα 2.27: Χρονοιστορία των φορτίων (μέγιστη τιμή) για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o), συντελεστή γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$ και λόγο ύψους υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ για την <<πρώτη σήραγγα>>(first tunnel) στα αριστερά και για τη <<δεύτερη σήραγγα>> (second tunnel) στα δεξιά,(Chortis F. & Kanvadas M., 2015) --31

Σχήμα 2.28: Κατανομή της αξονικής δύναμης για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o = 0.5$ (αριστερά) και $k_o = 1.5$ (δεξιά) στην τυπική διατομή για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o , πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ και λόγο ύψους υπερκείμενων γαιών $H/D = 10$,(Chortis F. & Kanvadas M., 2015) -----32

Σχήμα 2.29: Κατανομή της ροπής κάμψης για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o = 0.5$ (αριστερά) και $k_o = 1.5$ (δεξιά) στην τυπική διατομή για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o , πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ και λόγο ύψους υπερκείμενων γαιών $H/D = 10$,(Chortis F. & Kanvadas M., 2015) -----32

Σχήμα 2.30: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first, second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D = 2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη μέση γεωστατική τάση, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων, -----34

Σχήμα 2.31: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first, second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D = 2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη μέση γεωστατική τάση, (Νύχτη Φωτεινή, 2016) -----35

Σχήμα 2.32: Κατανομή του φορτίου στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη μέση γεωστατική τάση, (Νύχτη Φωτεινή, 2016)-----35

Σχήμα 2.33: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί τη διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων, -----36

Σχήμα 2.34: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί τη διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων, -----37

Σχήμα 2.35: Κατανομή της αξονικής δύναμης στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί τη διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων, (Νύχτη Φωτεινή, 2016)-----37

Σχήμα 2.36: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $\rho_{average}/\rho_{o,m}$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$), -----40

Σχήμα 2.37: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου $\rho_{side}(\theta=90 \text{ \& } \theta=270)/\rho_{o,m}$ επί των εσωτερικών παρειών συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$), -----41

Σχήμα 2.38: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου $\rho/\rho_{o,m}$ συναρτήσει της γωνίας θ ($^\circ$) στην τυπική διατομή των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$), (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016) -----42

Σχήμα 2.39: Κατανομή της ανηγμένης μέσης αξονικής δύναμης επί της άμεσης υποστήριξης ($N_{abs,average}/\rho_{o,m}D$) συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$), (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)-----42

Σχήμα 2.40: Κατανομή της ανηγμένης αξονικής δύναμης επί των εσωτερικών παρειών ($N_{abs,side}(\theta=90 \text{ \& } \theta=270)/\rho_{o,m}D$) συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$), (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)-----43

Σχήμα 2.41: Κατανομή της κανονικοποιημένης αξονικής δύναμης ($N_{abs}/\rho_{o,m}D$) συναρτήσει της γωνίας θ στην τυπική διατομή των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$), (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)-----44

Σχήμα 2.42: Λόγος μέσων φορτίων της <<πρώτης>> προς της <<μονής>> σήραγγας ($\rho_{first,avg}/\rho_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$, (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016) -----44

Σχήμα 2.43: Λόγος φορτίων στην οροφή (αριστερά) και στην εσωτερική παρεία (δεξιά) της <<πρώτης>> προς της <<μονής>> σήραγγας ($\rho_{first,roof}/\rho_{single,roof}$ & $\rho_{first,side}/\rho_{single,side}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για

διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_0=0.5$, (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)-----	45
Σχήμα 2.44: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων της <<πρώτης>> προς της <<μονής>> σήραγγας ($N_{first,avg}/N_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_0=0.5$, (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016) -----	46
Σχήμα 2.45: Λόγος φορτίων στην οροφή (αριστερά) και στην εσωτερική παρειά (δεξιά) της <<πρώτης>> προς της <<μονής>> σήραγγας ($N_{first,roof}/N_{single,roof}$ & $N_{first,side}/N_{single,side}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_0=0.5$, (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)-----	46
Σχήμα 2.46: Μεταβολή της ποσοστιαίας διαφοράς στις κύριες τάσεις μεταξύ των σηράγγων που αλληλεπιδρούν και των μονών σηράγγων για διάφορα πλάτη πυλώνα (W/D), -----	50
Σχήμα 2.47: Μεταβολή της ποσοστιαίας διαφοράς των μετατοπίσεων μεταξύ των σηράγγων που αλληλεπιδρούν και των μονών σηράγγων για διάφορα πλάτη πυλώνα (W/D), -----	51
Σχήμα 3.1: Προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (<i>single / first - (left) – tunnel</i>) και της δεξιάς σήραγγας (<i>second – right – tunnel</i>), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού, Ψυχάρη Ειρήνη (2016)-----	73
Σχήμα 4.1: Τυπική διατομή των σηράγγων και προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (<i>single / first - (left) – tunnel</i>) και της δεξιάς σήραγγας (<i>second – (right) – tunnel</i>), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού-----	83
Σχήμα 4.2: Τυπική διατομή των σηράγγων και προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (<i>single / first - (left) – tunnel</i>) και της δεξιάς σήραγγας (<i>second – (right) – tunnel</i>), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού-----	92
Σχήμα 4.3: Τυπική διατομή των σηράγγων και προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (<i>single / first - (left) – tunnel</i>) και της δεξιάς σήραγγας (<i>second – (right) – tunnel</i>), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού-----	96
Σχήμα 4.4: Τυπική διατομή των σηράγγων και προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (<i>single / first - (left) – tunnel</i>) και της δεξιάς σήραγγας (<i>second – (right) – tunnel</i>), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού-----	98
Σχήμα 4.5: Τυπική διατομή των σηράγγων και προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (<i>single / first - (left) – tunnel</i>) και της δεξιάς σήραγγας (<i>second – (right) – tunnel</i>), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού-----	104
Σχήμα 4.6: Τυπική διατομή των σηράγγων και προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (<i>single / first - (left) – tunnel</i>) και της δεξιάς σήραγγας (<i>second – (right) – tunnel</i>), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού-----	112
Σχήμα 4.7: Τυπική διατομή των σηράγγων και προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (<i>single / first - (left) – tunnel</i>) και της δεξιάς σήραγγας (<i>second – (right) – tunnel</i>), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού-----	115
Σχήμα 4.8: Τυπική διατομή των σηράγγων και προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (<i>single / first - (left) – tunnel</i>) και της δεξιάς σήραγγας (<i>second – (right) – tunnel</i>), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού-----	117

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Επίδραση της βελτίωσης του πυλώνα στις μετακινήσεις των δύο κύριων κλάδων κατά τη διάρκεια της εκσκαφής (Chen, Lee, Gui, 2008)-----	22
Πίνακας 2.2: Γεωτεχνικές ιδιότητες του άρρηκτου βράχου (<i>intact rock</i>) και της βραχόμαζας (<i>rockmass</i>) του βασάλτη (καλής ποιότητας, $GSI = 62$) που βρέθηκε στη δυτική ακτή της Ινδιάνικης υποηπείρου, (R.K. Srivastava, 1985) -----	48
Πίνακας 3.1: Οι περιοχές και οι αποστάσεις βάσει των οποίων μορφώθηκε ο κάρναθος στις τρεις διαστάσεις -----	63
Πίνακας 3.2: Οι γεωτεχνικές παράμετροι για τις 20 κατηγορίες βραχόμαζας που εξετάστηκαν στις τρισδιάστατες αναλύσεις των τριών αριθμητικών προσομοιωμάτων-----	70
Πίνακας 3.3: Παράμετροι αριθμητικών αναλύσεων -----	72

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1 :Έντονη σύνθλιψη στη σήραγγα Yasambu – Quibor, με υπερκείμενα 1200m σε περιβάλλον με γραφιτικούς φυλλίτες (Hoek, 2007)	17
Εικόνα 2.2 : Ολίσθηση σφήνας από το μέτωπο (Σήραγγα Περιοχής Πολύμυλου)	18
Εικόνα 2.3 : Κατάπτωση τύπου καμινάδας στη σήραγγα Σ10 της Εγνατίας Οδού	18
Εικόνα 2.4 : Καταρροή βραχώμαζας στη σήραγγα Σ1 στην περιοχή Παραμυθίας	18
Εικόνα 2.5 : Αριθμητικό μοντέλο για πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$ (Chortis F. & Kanvadas M., 2015).....	28
Εικόνα 2.6 : Αριθμητικό μοντέλο δίδυμων σηράγγων πεταλοειδούς διατομής σε βραχώμαζα με βασάλτη για πλάτος πυλώνα $W/D = 0.3$ και $k_0 = 1.5$, (Imran Ahmad Khan, Kumar Venkatesh, R.K. Srivastava, 2016)	48
Εικόνα 2.7 : Μεταβολή της μέγιστης κύριας τάσης (σ_1) και παρουσίαση των πεπερασμένων στοιχείων που έχουν διαρρεύσει γύρω από τις σήραγγες για $W/D = 0.3$ και $k_0 = 1.5$, ελαστοπλαστική ανάλυση, (Imran Ahmad Khan, Kumar Venkatesh, R.K. Srivastava, 2016)	49
Εικόνα 2.8 : Μεταβολή της ολικής μετατόπισης με διανύσματα μετατοπίσεων των σηράγγων που αλληλεπιδρούν για $W/D = 0.3$ και $k_0 = 1.5$ ως αποτέλεσμα της ελαστοπλαστικής ανάλυσης, (Imran Ahmad Khan, Kumar Venkatesh, R.K. Srivastava, 2016)	49
Εικόνα 3.1 : Περιβάλλον εργασίας του Abaqus 6.14	57
Εικόνα 3.2 : Προοπτική όψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$	58
Εικόνα 3.3 : Εγκάρσια όψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W=2D$ (Επίπεδο Z –X). Στο σχήμα φαίνονται η (αριστερή) «μονή/πρώτη» σήραγγα (single/first tunnel), η (δεξιά) «δεύτερη» σήραγγα (second tunnel) και οι διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου. Η διάμετρος κάθε σήραγγας είναι ίση με 8m	59
Εικόνα 3.4 : Μηκοτομική όψη και διαστάσεις του ίδιου προσομοιώματος	59
Εικόνα 3.5 : Απεικόνιση εν διατομή των πεπερασμένων στοιχείων που αφαιρούνται κατά το μήκος εκσκαφής (10D) στις δύο σήραγγες, (Soil Excavation Elements).....	60
Εικόνα 3.6 : Μηκοτομική απεικόνιση των πεπερασμένων στοιχείων που αφαιρούνται κατά το μήκος εκσκαφής (10D) στις δύο σήραγγες, (Soil Excavation Elements)	60
Εικόνα 3.7 : Απεικόνιση εν διατομή των πεπερασμένων στοιχείων που αντιπροσωπεύουν το σύνορο του τοιχώματος των σηράγγων κατά το μήκος εκσκαφής (10D), (Soil Surface Elements).....	61
Εικόνα 3.8 : Μηκοτομική απεικόνιση των πεπερασμένων στοιχείων που αντιπροσωπεύουν το σύνορο του τοιχώματος των σηράγγων κατά το μήκος εκσκαφής (10D), (Soil Surface Elements).....	61
Εικόνα 3.9 : Απεικόνιση εν διατομή των πεπερασμένων στοιχείων που αντιπροσωπεύουν την άμεση υποστήριξη των σηράγγων κατά το μήκος εκσκαφής (10D), (Support Elements)	62
Εικόνα 3.10 : Μηκοτομική απεικόνιση των πεπερασμένων στοιχείων που αντιπροσωπεύουν την άμεση υποστήριξη των σηράγγων κατά το μήκος εκσκαφής (10D) (Support Elements)	62
Εικόνα 3.11 : Εγκάρσια όψη και διαμόρφωση καννάβου πεπερασμένων στοιχείων	64
Εικόνα 3.12 : Διαμήκης όψη και διαμόρφωση καννάβου πεπερασμένων στοιχείων	64
Εικόνα 3.13 : Τομές στο επίπεδο X-Y στα βήματα 40 και 80 αντίστοιχα	66
Εικόνα 3.14 : Τομές στο επίπεδο X-Y στα βήματα 120 και 160 αντίστοιχα	66
Εικόνα 3.15 : Πεπερασμένα στοιχεία εντός των διατομών εκσκαφής (οκτακομβικά εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία εδάφους C3D8), τα οποία αφαιρούνται κατά τα διαδοχικά στάδια προσομοίωσης.....	67
Εικόνα 3.16 : Πεπερασμένα στοιχεία του κελύφους της άμεσης υποστήριξης (τετρακομβικά μίας έδρας πεπερασμένα στοιχεία κελύφους S4), τα οποία ενεργοποιούνται κατά τα διαδοχικά στάδια προσομοίωσης (Support Elements).....	67
Εικόνα 3.17 : Κατανομή της οριζόντιας γεωστατικής τάσης σ_{xx} για το αριθμητικό προσομοίωμα με πλάτος πυλώνα $W=0.5D$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες	76
Εικόνα 3.18 : Κατανομή της οριζόντιας γεωστατικής τάσης σ_{yy} για το αριθμητικό προσομοίωμα με πλάτος πυλώνα $W=0.5D$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες	76
Εικόνα 3.19 : Κατανομή της κατακόρυφης γεωστατικής τάσης σ_{zz} για το αριθμητικό προσομοίωμα με πλάτος πυλώνα $W=0.5D$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες	76
Εικόνα 3.20 : Κατανομή της ολικής μετακίνησης για το αριθμητικό προσομοίωμα με πλάτος πυλώνα $W=0.5D$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες	77
Εικόνα 3.21 : Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων για το αριθμητικό προσομοίωμα με πλάτος πυλώνα $W=0.5D$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες	77
Εικόνα 4.1 : Κατανομή των φορτίων περιμετρικά της υποστήριξης της «μονής» σήραγγας μετά την ολοκλήρωση διάνοιξης (STEP 80) σε μία ενδιάμεση διατομή στη θέση $Y=40m$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0=0.22$) ..	88
Εικόνα 4.2 : Κατανομή των φορτίων περιμετρικά της υποστήριξης της «πρώτης» (αριστερά) και «δεύτερης» (δεξιά) σήραγγας μετά την ολοκλήρωση εκσκαφής των δύο κλάδων (STEP 160) σε μία ενδιάμεση διατομή στη θέση $Y=40m$ για εφαρμογή πλάτους πυλώνα $W=0.5D=4m$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0=0.22$)	89

Εικόνα 4.3: Κατανομή των φορτίων περιμετρικά της υποστήριξης της «πρώτης» (αριστερά) και «δεύτερης» (δεξιά) σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής των δύο κλάδων (STEP 160) σε μία ενδιάμεση διατομή στη θέση $Y=40m$ για εφαρμογή πλάτους πυλώνα $W=2.0D=16m$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) 89

Εικόνα 4.4: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων περιμετρικά της υποστήριξης της «μονής» σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής του αριστερού κλάδου (STEP 80) σε μία ενδιάμεση θέση ($Y=40m$) σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) 93

Εικόνα 4.5: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων περιμετρικά της υποστήριξης της «πρώτης» (αριστερά) και «δεύτερης» (δεξιά) σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής και των δύο κλάδων (STEP 160) σε μία ενδιάμεση θέση ($Y=40m$) για εφαρμογή πλάτους πυλώνα $W=0.5D=4m$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) 93

Εικόνα 4.6: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων περιμετρικά της υποστήριξης της «πρώτης» (αριστερά) και «δεύτερης» (δεξιά) σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής και των δύο κλάδων (STEP 160) σε μία ενδιάμεση θέση ($Y=40m$) για εφαρμογή πλάτους πυλώνα $W=2D=16m$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) 94

Εικόνα 4.7: Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων περιμετρικά της «μονής» σήραγγας σε μία τυπική διατομή στη θέση $Y=40m$ όταν ολοκληρώνεται η εκσκαφή του πρώτου κλάδου (STEP 80) για δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) και όταν εφαρμόζεται το μικρότερο πλάτος πυλώνα ($W=0.5D=4m$)..... 99

Εικόνα 4.8: Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων περιμετρικά της δίδυμης σήραγγας σε μία τυπική διατομή στη θέση $Y=40m$ όταν ολοκληρώνεται η εκσκαφή και των δύο κλάδων (STEP 160) για δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) και όταν εφαρμόζεται το μικρότερο πλάτος πυλώνα ($W=0.5D=4m$)..... 100

Εικόνα 4.9: Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων περιμετρικά της δίδυμης σήραγγας σε μία τυπική διατομή στη θέση $Y=40m$ όταν ολοκληρώνεται η εκσκαφή και των δύο κλάδων (STEP 160) για δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) και όταν εφαρμόζεται το μεγαλύτερο πλάτος πυλώνα ($W=2.0D=16m$)..... 100

Εικόνα 4.10: Κατανομή των φορτίων περιμετρικά της υποστήριξης της «πρώτης» (αριστερά) και «δεύτερης» (δεξιά) σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής και των δύο κλάδων (STEP 160) για εφαρμογή πλάτους πυλώνα $W=0.5D=4m$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) 109

Εικόνα 4.11: Κατανομή των φορτίων περιμετρικά της υποστήριξης της «πρώτης» (αριστερά) και «δεύτερης» (δεξιά) σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής και των δύο κλάδων (STEP 160) για εφαρμογή πλάτους πυλώνα $W=0.5D=4m$ σε ευμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$)..... 110

Εικόνα 4.12: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων περιμετρικά της υποστήριξης της «πρώτης» (αριστερά) και «δεύτερης» (δεξιά) σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής και των δύο κλάδων (STEP 160) για εφαρμογή πλάτους πυλώνα $W=0.5D=4m$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) 113

Εικόνα 4.13: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων περιμετρικά της υποστήριξης της «πρώτης» (αριστερά) και «δεύτερης» (δεξιά) σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής και των δύο κλάδων (STEP 160) για εφαρμογή πλάτους πυλώνα $W=0.5D=4m$ σε ευμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$)..... 114

Εικόνα 4.14: Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων περιμετρικά της δίδυμης σήραγγας σε μία τυπική διατομή στη θέση $Y=40m$ όταν ολοκληρώνεται η εκσκαφή και των δύο κλάδων (STEP 160) για δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) και όταν εφαρμόζεται το μικρότερο πλάτος πυλώνα ($W=0.5D=4m$)..... 119

Εικόνα 4.15: Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων περιμετρικά της δίδυμης σήραγγας σε μία τυπική διατομή στη θέση $Y=40m$ όταν ολοκληρώνεται η εκσκαφή και των δύο κλάδων (STEP 160) για ευμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$) και όταν εφαρμόζεται το μικρότερο πλάτος πυλώνα ($W=0.5D=4m$)..... 119

Κατάλογος Γραφημάτων

- Γράφημα 4.1:** Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $p_{average}/\rho_o$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σφράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)-----80
- Γράφημα 4.2** Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου $p_{side}(\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ)/\rho_o$ επί των εσωτερικών παρειών συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σφράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)-----82
- Γράφημα 4.3:** Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου p/ρ_o , περιμετρικά της τυπικής διατομής των σφράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) -----83
- Γράφημα 4.4:** Χρονοιστορία των κανονικοποιημένων μέσων φορτίων $p_{average}/\rho_o$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σφράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)-----84
- Γράφημα 4.5:** Χρονοιστορία των κανονικοποιημένων μέσων φορτίων $p_{average}/\rho_o$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σφράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)-----85
- Γράφημα 4.6:** Χρονοιστορία των κανονικοποιημένων φορτίων $p_{side}(\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ)/\rho_o$ επί των εσωτερικών παρειών στην άμεση υποστήριξη συναρτήσει του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σφράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)-----87
- Γράφημα 4.7:** Χρονοιστορία των κανονικοποιημένων φορτίων $p_{side}(\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ)/\rho_o$ επί των εσωτερικών παρειών στην άμεση υποστήριξη συναρτήσει του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σφράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)-----87
- Γράφημα 4.8:** Κατανομή της κατ'απόλυτη τιμή μέσης ανηγμένης αξονικής δύναμης επί της άμεσης υποστήριξης ($N_{abs,average}/\rho_o D$) συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σφράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) -----90
- Γράφημα 4.9** Κατανομή της κατ'απόλυτη τιμή ανηγμένης αξονικής δύναμης $N_{abs,side}(\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ)/\rho_o$ επί των εσωτερικών παρειών συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σφράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)-----91
- Γράφημα 4.10:** Κατανομή της κατ'απόλυτη τιμή ανηγμένης αξονικής δύναμης $N_{abs}/\rho_o D$, συναρτήσει της γωνίας θ που εκφράζει τις περιοχές περιμετρικά της τυπικής διατομής των σφράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)-----92
- Γράφημα 4.11:** Κατανομή της ανηγμένης μέσης μέγιστης κύριας τάσης ($\sigma_{1,average}/\rho_o$) των στοιχείων της βραχώμαζας που περιβάλλουν τις διατομές των σφράγγων συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σφράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) -----95
- Γράφημα 4.12:** Κατανομή της κανονικοποιημένης μέγιστης κύριας τάσης σ_1/ρ_o , περιμετρικά της τυπικής διατομής των σφράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)-----96
- Γράφημα 4.13:** Κατανομή της ανηγμένης μέσης ελάχιστης κύριας τάσης ($\sigma_{3,average}/\rho_o$) των στοιχείων της βραχώμαζας που περιβάλλουν τις διατομές των σφράγγων συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σφράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)-----97
- Γράφημα 4.14:** Κατανομή της κανονικοποιημένης ελάχιστης κύριας τάσης σ_3/ρ_o , περιμετρικά της τυπικής διατομής των σφράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)-----98
- Γράφημα 4.15:** Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $p_{average}/\rho_o$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σφράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές

συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ -----102

Γράφημα 4.16 Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου $p_{side}(\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ)/\rho_o$ επί των εσωτερικών παρειών συναρτήσεως του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σπράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ -----103

Γράφημα 4.17: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου p/ρ_o , περιμετρικά της τυπικής διατομής των σπράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ -----104

Γράφημα 4.18: Χρονοιστορία των κανονικοποιημένων μέσων φορτίων $p_{average}/\rho_o$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσεως του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σπράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ -----105

Γράφημα 4.19: Χρονοιστορία των κανονικοποιημένων μέσων φορτίων $p_{average}/\rho_o$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσεως του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σπράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ -----106

Γράφημα 4.20: Χρονοιστορία των κανονικοποιημένων φορτίων $p_{side}(\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ)/\rho_o$ επί των εσωτερικών παρειών στην άμεση υποστήριξη συναρτήσεως του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σπράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ -----108

Γράφημα 4.21: Χρονοιστορία των κανονικοποιημένων φορτίων $p_{side}(\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ)/\rho_o$ επί των εσωτερικών παρειών στην άμεση υποστήριξη συναρτήσεως του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σπράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ -----108

Γράφημα 4.22: Κατανομή της κατ'άπολυτη τιμή μέσης ανηγμένης αξονικής δύναμης επί της άμεσης υποστήριξης ($N_{abs,average}/\rho_o D$) συναρτήσεως του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σπράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ -----110

Γράφημα 4.23 Κατανομή της κατ'άπολυτη τιμή ανηγμένης αξονικής δύναμης $N_{obs,side}(\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ)/\rho_o$ επί των εσωτερικών παρειών συναρτήσεως του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σπράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ -----111

Γράφημα 4.24: Κατανομή της κατ'άπολυτη τιμή ανηγμένης αξονικής δύναμης $N_{obs}/\rho_o D$, συναρτήσεως της γωνίας θ που εκφράζει τις περιοχές περιμετρικά της τυπικής διατομής των σπράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ -----112

Γράφημα 4.25: Κατανομή της ανηγμένης μέσης μέγιστης κύριας τάσης ($\sigma_{1,average}/\rho_o$) των στοιχείων που περιβάλλουν τις διατομές των σπράγγων συναρτήσεως του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σπράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ -----115

Γράφημα 4.26: Κατανομή της κανονικοποιημένης μέγιστης κύριας τάσης σ_1/ρ_o , περιμετρικά της τυπικής διατομής των σπράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για μικρό πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ -----116

Γράφημα 4.27: Κατανομή της ανηγμένης μέσης ελάχιστης κύριας τάσης ($\sigma_{3,average}/\rho_o$) των στοιχείων που περιβάλλουν τις διατομές των σπράγγων συναρτήσεως του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σπράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ -----117

Γράφημα 4.28: Κατανομή της κανονικοποιημένης ελάχιστης κύριας τάσης σ_3/ρ_o , περιμετρικά της τυπικής διατομής των σπράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για μικρό πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ -----118

Γράφημα 4.29: Λόγος μέσων φορτίων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,avg}/p_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ -----121

Γράφημα 4.30: Λόγος φορτίων στην εσωτερική παρειά (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,side} \theta=90^\circ/p_{single,side} \theta=90^\circ$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ -----122

Γράφημα 4.31: Λόγος φορτίων στην περιοχή του πυθμένα της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($\rho_{first,bottom \vartheta=180}/\rho_{single,bottom \vartheta=180}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ -----123

Γράφημα 4.32: Λόγος φορτίων στην εξωτερική παρειά (αριστερά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($\rho_{first,side \vartheta=270}/\rho_{single,side \vartheta=270}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ -----124

Γράφημα 4.33: Λόγος φορτίων στην περιοχή της στέψης της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($\rho_{first,roof \vartheta=360}/\rho_{single,roof \vartheta=360}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ -----124

Γράφημα 4.34: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,avg}/N_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ -----126

Γράφημα 4.35: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην εσωτερική παρειά (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,side \vartheta=90}/N_{single,side \vartheta=90}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ -----127

Γράφημα 4.36: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην περιοχή του πυθμένα της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,bottom \vartheta=180}/N_{single,bottom \vartheta=180}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ -----128

Γράφημα 4.37: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην εξωτερική παρειά (αριστερά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,side \vartheta=270}/N_{single,side \vartheta=270}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ -----128

Γράφημα 4.38: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην περιοχή της στέψης της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,roof \vartheta=360}/N_{single,roof \vartheta=360}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ -----129

Περίληψη

Οι σήραγγες αποτελούν τεχνικά έργα με αυξημένες απαιτήσεις ασφάλειας και λειτουργικότητας. Ειδικότερα στην περίπτωση που εφαρμόζεται διάνοιξη δίδυμης σήραγγας, η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων αποτελεί ένα σύνθετο φαινόμενο το οποίο καλείται να αντιμετωπίσει ο μελετητής μηχανικός κατά το στάδιο του σχεδιασμού του έργου.

Η εν λόγω μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται τη μελέτη της αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων των δίδυμων σηράγγων κατά τη διάνοιξη και κατ' επέκταση τον προσδιορισμό της κατάλληλης εγκάρσιας απόστασης η οποία θα εξασφαλίζει την ασφάλεια και τη λειτουργικότητα της κατασκευής.

Αρχικά παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζεται η μηχανική των σηράγγων και πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική προσέγγιση του προβλήματος της αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων, έτσι ώστε να διαμορφωθεί μία ευρύτερη εικόνα σχετικά με την υφιστάμενη γνώση περί του συνήθους μηχανισμού απόκρισης της δίδυμης σήραγγας.

Η αριθμητική προσέγγιση του προβλήματος που ακολουθεί, περιλαμβάνει την πραγματοποίηση παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων με τρισδιάστατα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι απαλλαγμένα από τις παραδοχές των μεθόδων εκτίμησης της αποτόνωσης των τάσεων και των προσυγκλίσεων. Η προσομοίωση του προβλήματος πραγματοποιείται με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, ενώ η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων ποσοτικοποιείται σε όρους πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, σε όρους αξονικών δυνάμεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης και σε όρους μέγιστων και ελάχιστων κύριων τάσεων των στοιχείων που βρίσκονται στην περίμετρο της εκσκαφής.

Στο πλαίσιο των παραμετρικών αναλύσεων μελετάται ο ρόλος της εγκάρσιας απόστασης των δυο κλάδων (πλάτος πυλώνα), καθώς και των γεωτεχνικών συνθηκών στην απόκριση των δύο κλάδων της δίδυμης σήραγγας.

Εν κατακλείδι, πραγματοποιείται συγκεντρωτικά μια σύνοψη των σημαντικότερων αποτελεσμάτων συμπερασμάτων της εργασίας, και παρουσιάζονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα, καθώς το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Abstract

Tunnels are structures which demand high security and functionality standards. Especially, when it comes for twin tunnel construction, the interaction of the two branches is a composite phenomenon which has to be faced by the engineer at the first steps of the design stage.

The present thesis investigates the interaction between the two branches of a twin tunnel at the excavation phase and the determination of a suitable pillar width which will ensure safety and functionality for the structure.

At first, a theoretical background about tunnel mechanics as well as a literature review about interaction between the two branches are displayed, aiming to form a wide spectrum of the existing knowledge about the usual mechanical behavior of twin tunnelling.

The numerical approach of the issue followed, consists of the execution of numerical parametric analyses with three dimensional finite element simulations so that the results will not conclude any assumptions of the stress and preconvergence estimation methods. The simulation of the problem is carried out with the aid of the finite element code Abaqus, while the interaction of the two branches is quantified in the terms of pressure and hoop force on the immediate support shell and in terms of maximum and minimum main stresses of elements on the excavation perimeter.

Parametric analyses study the impact of pillar width and geotechnical conditions to the mechanical behavior of two branches in a twin tunnel.

Finally, the most important results and conclusions of this thesis are summarized and suggestions for further research are presented, as the twin tunnel interaction phenomenon appears to be of particular interest.

1. Εισαγωγή

1.1. Διατύπωση – ανάλυση προβλήματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο γειτονικών σηράγγων με μεταβλητό πλάτος πυλώνα σε διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η μεμονωμένη συμπεριφορά και μετέπειτα η αλληλεπίδραση δύο κυκλικών σηράγγων οι οποίες έχουν ίδιο μήκος εκσκαφής (80m), ίδιο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους (80m) και διανοίγονται σύμφωνα με την Αυστριακή μέθοδο NATM. Η απόσταση του μήκους εκσκαφής (10D) επιλέγεται ώστε να είναι επαρκής η απόσταση μακριά από το μέτωπο εκσκαφής για να υπάρξει σταθεροποίηση των τάσεων. Όπως ορίζει η εφαρμογή της μεθόδου NATM, η άμεση υποστήριξη κατασκευάζεται σε μικρή απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής με αποτέλεσμα τα βήματα εκσκαφής να είναι μικρού μήκους. Στην υπό εξέταση περίπτωση, το βήμα εκσκαφής είναι 1m και για την αριστερή και για τη δεξιά σήραγγα και θεωρήθηκε η εξής αλληλουχία : Εκσκαφή μέτρο – μέτρο και παράλληλη τοποθέτηση υποστήριξης πρώτα για την αριστερή και στη συνέχεια για τη δεξιά σήραγγα. Προκύπτουν δηλαδή 80 βήματα εκσκαφής για την ολοκλήρωση της αριστερής σήραγγας και αντίστοιχα 80 βήματα εκσκαφής για την ολοκλήρωση της δεξιάς. Ως άμεση υποστήριξη θεωρούμε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 20cm, το οποίο πλεονεκτεί ως μέτρο προσωρινής υποστήριξης επειδή βρίσκεται σε άμεση επαφή με την περιβάλλουσα βραχώμαζα και επιπλέον έχει μικρό χρόνο πήξεως. Οι αναλύσεις γίνονται σε 20 διαφορετικά είδη βραχώμαζας με διαφορετικά γεωτεχνικά ζεύγη γωνίας τριβής - συνοχής (ϕ , c). Τα είδη του πυλώνα που επιλέγονται προς διερεύνηση είναι:

- a) $w/D = 0.50 \Rightarrow w=4.00m$
- b) $w/D = 1.00 \Rightarrow w=8.00m$
- c) $w/D = 2.00 \Rightarrow w=16.00m$

Δεδομένου ότι η εκσκαφή μίας σήραγγας δημιουργεί μία ζώνη διαταραχής στον περιβάλλοντα χώρο, η ανάγκη προσδιορισμού της επιρροής του δεύτερου κλάδου ως προς τον πρώτο στην περίπτωση κατασκευής διδυμής σήραγγας καθώς και του ποσοστού διαταραχής στην ενδιάμεση περιοχή τους που ορίζεται ως το πλάτος πυλώνα, είναι πολύ σημαντική. Ο βαθμός της αλληλεπίδρασης τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το άνοιγμα του πυλώνα, το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα στη διάνοιξη των δύο κλάδων, το είδος της βραχώμαζας στο οποίο εκσκάπτονται και την επιλογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης που θα εφαρμοστούν αμέσως μετά την εκσκαφή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η άμεση υποστήριξη που επιλέγεται είναι η ίδια και για τις δύο σήραγγες, επομένως δεν θα εξεταστεί η επιρροή διαφορετικής δυσκαμψίας από διαφορετικά μέτρα προσωρινής υποστήριξης στην συμπεριφορά της βραχώμαζας. Έτσι λοιπόν, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να συμβάλει στη γνώση σχετικά με το πόσο επηρεάζουν κάποιοι από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στο πρόβλημα αλληλεπίδρασης και για αυτό τον λόγο εκτελούνται παραμετρικές αναλύσεις για τις μεταβαλλόμενες γεωτεχνικές συνθήκες και τα μεταβαλλόμενα πλάτη πυλώνα που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Η διαδικασία εκσκαφής των σηράγγων θεωρείται στην παρούσα εργασία ένα τρισδιάστατο πρόβλημα και γ'αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκαν τρισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις καθώς προσομοιώνουν επαρκώς τις συνθήκες τριαξονικής εντατικής κατάστασης που επικρατούν κοντά στο μέτωπο εκσκαφής και την προοδευτική μετάβαση στις συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης που επικρατούν μακριά από το μέτωπο εκσκαφής. Τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις αφορούν κυρίως τις πιέσεις της βραχώμαζας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, δηλαδή τα

φορτία και τα εντατικά μεγέθη που δρούν στην άμεση υποστήριξη (αξονικές δυνάμεις, ροπές κάμψης, τέμνουσες), καθώς και τις μετακινήσεις του τοιχώματος των σηράγγων και τις τάσεις της βραχόμαζας που τις περιβάλλει.

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα Excel, διαμορφώνονται γραφήματα που παρουσιάζουν τις τάσεις της βραχόμαζας και τα φορτία και οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται γύρω από την υποστήριξη κατά μήκος του μήκους εκσκαφής των σηράγγων και εν διατομή (περιμετρικά του δακτυλίου των σηράγγων). Με αυτό τον τρόπο πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων όταν εκσκάπτεται η αριστερή σήραγγα μόνη της σε σχέση με όταν εκσκάπτονται και οι δύο για όλες τις κατηγορίες βραχόμαζας και για όλα τα υπό εξέταση πλάτη πυλώνα. Επιπλέον, προκύπτουν συμπεράσματα για το ποιές είναι οι περιοχές που παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυσμένεια κατά μήκος του άξονα των σηράγγων και περιμετρικά γύρω από τον δακτύλιο των σηράγγων.

1.2. Δομή και οργάνωση μεταπτυχιακής εργασίας

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για τον έλεγχο και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της βραχόμαζας όταν εκσκάπτεται, το οποίο περιλαμβάνει τη γνώση που έχει αποκτηθεί σχετικά με την επιρροή της διάνοιξης με μέθοδο NATM στην απόκριση της σήραγγας, τα μοντέλα που έχουν επικρατήσει στην βραχομηχανική και περιγράφουν την αστοχία της ρωγματωμένης βραχόμαζας ως το εργαλείο για τις αναλύσεις μας, την απόκριση στη θέση που βρίσκεται το μέτωπο ως η πιο ευάλωτη θέση κατά μήκος της διάνοιξης και την απόκριση του συστήματος βραχόμαζας – προσωρινής υποστήριξης. Όλη αυτή η γνώση είναι απαραίτητη σε αναλύσεις αντίστοιχες με και αποτέλεσαν ορόσημο για τις παραδοχές και μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζονται λεπτομερώς και κάποιες βιβλιογραφικές αναφορές σχετικές με έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν οι οποίες εξετάζουν τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν μεταξύ τους οι δύο κλάδοι μίας σήραγγας. Αυτή η βιβλιογραφική επισκόπηση είναι χρήσιμη για το παρόν πρόβλημα, καθώς αποτελεί μία κατευθυντήρια γραμμή ως προς την υφιστάμενη γνώση που υπάρχει για την αλληλεπίδραση των δύο κλάδων και τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν από το παρόν πρόβλημα συσχετίζονται με τα αντίστοιχα συμπεράσματα που προήλθαν από αυτές τις έρευνες.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων (Abaqus), το μοντέλο προσομοίωσης των σηράγγων με τα γεωμετρικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των σηράγγων και με τις γεωτεχνικές παραμέτρους και τις παραμέτρους άμεσης υποστήριξης που λήφθησαν υπόψη, τα βήματα εκσκαφής που πραγματοποιήθηκαν, οι παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν και τέλος ο τρόπος ελέγχου αξιοπιστίας των προσομοιωμάτων που εφαρμόστηκε.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα από όλες τις αναλύσεις όπως εξήχθησαν από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus σε γραφήματα Excel και σε επεξηγηματικές εικόνες από το πρόγραμμα Abaqus και γίνεται σύγκριση μεταξύ των διαφόρων περιπτώσεων καθώς και σύγκριση με αντίστοιχα αποτελέσματα παλαιότερων ερευνών.

Τέλος, στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται ανακεφαλαίωση όλων όσων αναφέρθηκαν με στόχο την διεξαγωγή συμπερασμάτων και ακολουθεί η αναφορά προτάσεων για περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου αλληλεπίδρασης.

2. Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1. Μηχανική των σηράγγων

Η ανάλυση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης μίας σήραγγας είναι απαραίτητη πρωτίστως για τον έλεγχο της διατομής της σήραγγας σε κάθε φάση εκσκαφής ώστε να εξασφαλιστεί ότι το μέτωπο της εκσκαφής είναι ευσταθές σε κάθε φάση και ότι τα μέτρα άμεσης υποστήριξης μπορούν να αναλάβουν με επαρκή ασφάλεια τα φορτία της βραχόμαζας. Επιπλέον, είναι απαραίτητη για τον έλεγχο των συγκλίσεων του τοιχώματος της σήραγγας, της περιβάλλουσας βραχόμαζας και, εφόσον είναι απαραίτητο, της επιφάνειας του εδάφους ώστε να βεβαιωθεί ότι οι τιμές βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων. Τα όρια αυτά καθορίζονται από τις ανοχές των δομημάτων που επηρεάζονται από την κατασκευή της σήραγγας αλλά και από την απαίτηση να αποφευχθεί η υπερβολική χαλάρωση της βραχόμαζας με ταυτόχρονη όμως ενεργοποίηση της αντοχής της βραχόμαζας σε ικανοποιητικό βαθμό. Τέλος, καθίσταται σημαντική και για τον προσδιορισμό της διαδικασίας εκσκαφής που θα ακολουθηθεί, δηλαδή ο αριθμός, οι διαστάσεις των φάσεων εκσκαφής και το μέγιστο βήμα προχώρησης, καθώς και του συστήματος άμεσης υποστήριξης που θα τοποθετηθεί (είδος και πυκνότητα μέτρων υποστήριξης, πρόγραμμα τοποθέτησης κ.τ.λ.) με σκοπό την μέγιστη δυνατή ασφάλεια με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Δεδομένου ότι προκαλούνται μεταβολές στο εντατικό και παραμορφωσιακό πεδίο στη διατομή της εκσκαφής και στο μέτωπο εκσκαφής κατά τη διάνοιξη των σηράγγων, δημιουργούνται μετακινήσεις και έτσι αυξάνεται ο κίνδυνος αστοχίας ή κατάρρευσης. Για αυτό τον λόγο, στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται στοιχεία της μηχανικής των σηράγγων που παίζουν καθοριστικό ρόλο στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς της βραχόμαζας όταν εκσκάπτεται και δεν έχει υποστηριχθεί ακόμα, καθώς και όταν έχουν τοποθετηθεί τα μέτρα άμεσης υποστήριξης όπου η βραχόμαζα συμπεριφέρεται ως σύνολο με το κέλυφος της προσωρινής υποστήριξης. Συνεπώς, οι παράγοντες που αναλύονται είναι: 1) η εφαρμογή της μεθόδου διάνοιξης NATM και η φιλοσοφία που επικρατεί στη συμβατική διάνοιξη, οι λόγοι χρήσης της και η μέθοδος σύγκλισης - αποτόνωσης που χρησιμοποιείται ως η βασική μέθοδος εύρεσης της πίεσης προσωρινής υποστήριξης, 2) όλοι οι παράγοντες που συνεισφέρουν στην ευστάθεια της σήραγγας όπως οι παράμετροι αντοχής της βραχόμαζας μαζί με το μοντέλο που περιγράφει την αστοχία της, ο μηχανισμός ανάπτυξης μετατοπίσεων και παραμορφώσεων στο μέτωπο εκσκαφής κατά τη διάνοιξη εφόσον πρόκειται για την πιο ευαίσθητη περιοχή και, τέλος, οι λόγοι για τους οποίους επέρχεται αστοχία στα μέτρα προσωρινής υποστήριξης και οι μορφές αστοχίας σε αυτά.

2.1.1. Αρχές της μεθόδου NATM

2.1.1.1. Γενικά

Η "Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων" (NATM) αποτελεί ένα σύνολο τεχνικών που άρχισαν να εφαρμόζονται συστηματικά κατά τη διάνοιξη σηράγγων περί το 1960. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τη διάνοιξη σηράγγων με ελεύθερο μέτωπο εκσκαφής, δηλαδή χωρίς πίεση στο μέτωπο με μηχανικά μέσα π.χ. TBM, και άμεση υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή/και αγκύρια βράχου. Συχνά, η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει επίσης :

- Διάνοιξη της διατομής της σήραγγας σε περισσότερες απο μία φάσεις
- Χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος οπλισμένου με χαλύβδινες ίνες, χαλύβδινο πλέγμα, χαλύβδινες νευρώσεις από ράβδους ή διατομές τύπου I
- Υποστήριξη της σήραγγας μόνο με αγκύρια (χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα)
- Κατασκευή της τελικής επένδυσης της σήραγγας σε μεταγενέστερο χρόνο

Είναι μία μέθοδος που προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβαλλόμενες γεωτεχνικές συνθήκες, σε μεταβολές που απαιτούνται στη γεωμετρία της διατομής, σε περιπτώσεις έντονα διογκούμενων εδαφών, σε διατομές μεγάλου μεγέθους μέσω των πολλαπλών φάσεων. Εφαρμόζεται επίσης και σε μη κυκλικές διατομές και επιτρέπει ευκολότερη στεγάνωση της σήραγγας με συνθετική μεμβράνη. Ο μηχανικός εξοπλισμός που περιλαμβάνει είναι χαμηλού κόστους, γεγονός που την καθιστά ως οικονομική μέθοδο για σήραγγες μικρού μήκους.

2.1.1.2. Φιλοσοφία της μεθόδου

Σύμφωνα με τη μέθοδο, η διάνοιξη της σήραγγας γίνεται σε μία ή περισσότερες φάσεις ανάλογα τη διατομή, με σκοπό τη μείωση της επιφάνειας του μετώπου εκσκαφής σε κάθε φάση. Απαιτούνται μικρά βήματα εκσκαφής ώστε τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης να τοποθετηθούν σε μικρή απόσταση από το μέτωπο. Επειδή η άμεση υποστήριξη καλείται να αναλάβει φορτία ταχέως, επιλέγεται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα το οποίο έχει μικρό χρόνο πήξεως και έρχεται σε άμεση επαφή με την περιβάλλουσα βραχώμαζα. Επιπρόσθετα, μπορούν να τοποθετηθούν και αγκύρια βράχου τα οποία με τη λειτουργία τους οπλίζουν την περιβάλλουσα βραχώμαζα και συντελούν στην καλύτερη ανάπτυξη της λειτουργίας τόξου της βραχώμαζας. Πολλές φορές απαιτείται και ολοκλήρωση του δακτυλίου στο σύνολο της διατομής (κλειστός πυθμένας) με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, όταν πρόκειται για βραχώμαζα με πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά ή για τον περιορισμό των υποχωρήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. Επίσης, σε τέτοιες βραχώμαζες παρουσιάζεται συνήθως αστάθεια στο μέτωπο εκσκαφής, το οποίο ενισχύεται και βελτιώνεται με μεθόδους που αναφέρονται παρακάτω.

Κατά τη διάνοιξη σηράγγων με τη μέθοδο NATM, η διαδικασία εκσκαφής και άμεσης υποστήριξης έχει σκοπό να επιτρέψει την ελεγχόμενη σύγκλιση της βραχώμαζας προς το εσωτερικό της σήραγγας ώστε να αναπτυχθεί φαινόμενο θόλου, δηλαδή θλιπτική ένταση (σ_θ) της βραχώμαζας κατά την περιφέρεια της σήραγγας και με τον τρόπο αυτό να μειωθεί η πίεση στην άμεση υποστήριξη, δεδομένου ότι η πίεση της βραχώμαζας στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένη αλλά εξαρτάται από τον τρόπο εκσκαφής και υποστήριξης. Τυπικά, όσο πιο γρήγορα τοποθετείται η άμεση υποστήριξη και όσο πιο ανένδοτη είναι, τόσο μεγαλύτερα φορτία αναλαμβάνει. Αντίθετα, όσο περισσότερο ενδόσιμη είναι και όσο αργότερα τοποθετείται, τόσο μικρότερα φορτία αναλαμβάνει (υπό την προϋπόθεση ότι η καθυστέρηση δεν θα προκαλέσει υπερβολική χαλάρωση και αποδιοργάνωση της βραχώμαζας).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, δεν υπάρχουν συμβατικά φορτία για την ανάλυση της άμεσης υποστήριξης εφόσον τα φορτία εξαρτώνται από τον τρόπο διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας, πέρα από τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας. Κατά καιρούς υπήρξαν

διάφορες μέθοδοι εκτίμησης των φορτίων (Bieniawski, Terzaghi, Protodyakonov, NGI κ.λ.π.) οι οποίες όμως δίνουν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα βασιζόμενα σε διαφορετικές παραδοχές περί διάνοιξης και υποστήριξης. Πλέον αξιόπιστη ανάλυση διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης είναι εκείνη που προσομοιώνει πλήρως με ακρίβεια όλη την ακολουθία των φάσεων διάνοιξης και υποστήριξης. Πιο συγκεκριμένα, πρέπει να προσομοιώνονται τα εξής :

- 1) Η σύγκλιση της βραχόμαζας πριν την τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης. Αυτή η σύγκλιση αφενός μεν συμβαίνει πριν το μέτωπο εκσκαφής φτάσει στη συγκεκριμένη θέση και αφετέρου δε στο διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της εκσκαφής και της τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης.
- 2) Η βαθμιαία ενεργοποίηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης όπως π.χ. η βαθμιαία αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, η βαθμιαία αύξηση της συνάφειας των αγκυριών πλήρους πάκτωσης με τσιμεντένεμα, ή τυχόν ατελής επαφή των χαλύβδινων πλαισίων με τη βραχόμαζα κ.τ.λ.

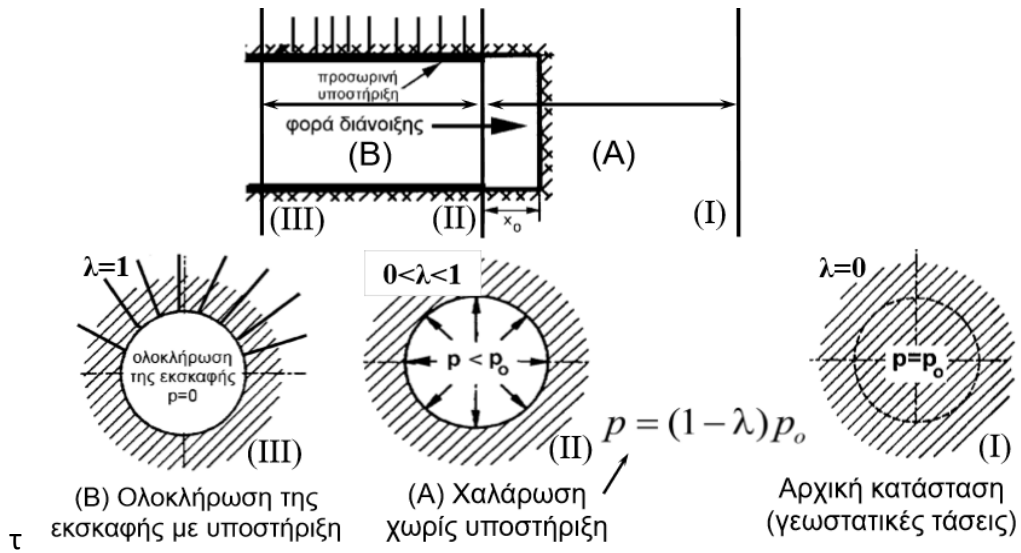
2.1.1.3. Μέθοδος σύγκλισης - αποτόνωσης

Η πιο αποδεκτή και λογική προσέγγιση του προβλήματος της διάνοιξης σήραγγων βάσει των Fairhurst & Carranza – Torres (2002) είναι η μέθοδος σύγκλισης – αποτόνωσης (convergence & confinement method CCM) καθώς η εκτίμηση της σύγκλισης του τοιχώματος σε διάφορες θέσεις ως προς το μέτωπο είναι σημαντική για τους εξής λόγους:

- 1) Με τη σύγκλιση του τοιχώματος ενεργοποιείται (φορτίζεται) η βραχόμαζα και μειώνονται συνήθως τα φορτία που θα αναληφθούν από την προσωρινή υποστήριξη
- 2) Σε περίπτωση υπέρμετρης σύγκλισης, η βραχόμαζα χαλαρώνει και αυξάνουν τα φορτία που θα αναληφθούν από την προσωρινή υποστήριξη
- 3) Η σύγκλιση του τοιχώματος επηρεάζει τις επιφανειακές καθιζήσεις
- 4) Διευκολύνεται ο έλεγχος των παραδοχών μελέτης και προσαρμογής της διάνοιξης και υποστήριξης στις επί τόπου συνθήκες μέσω σύγκρισης προβλέψεων – μετρήσεων

Οι αρχές και οι παραδοχές της μεθόδου είναι οι εξής :

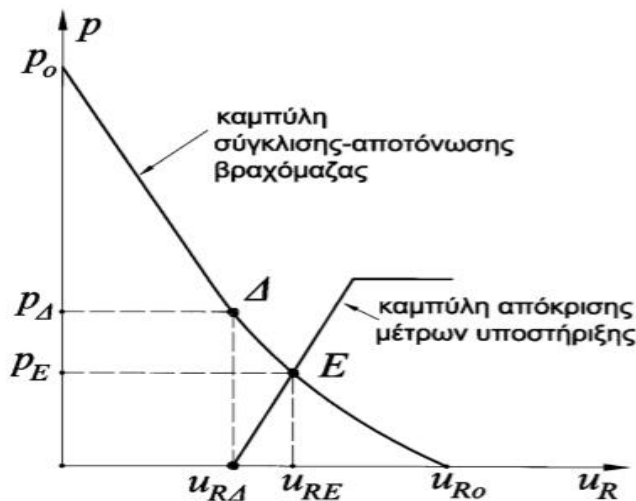
- Σήραγγα κυκλικής διατομής ακτίνας R
- Ισότροπο γεωστατικό εντατικό πεδίο ($k_0=1$)
- Συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης κατά τον άξονα της σήραγγας (άξονας χ)
- Ελαστικό απολύτως πλαστικό γεωυλικό Mohr – Coulomb ($M - C / E - P$) με διαστολική συμπεριφορά μετά την αστοχία
- Ομοιόμορφη υποστήριξη της διατομής της εκσκαφής



Σχήμα 2.1: Ακριβέστερος τρόπος προσομοίωσης της διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης σήραγγας

Η εφαρμογή της μεθόδου σύγκλισης – αποτόνωσης απαιτεί :

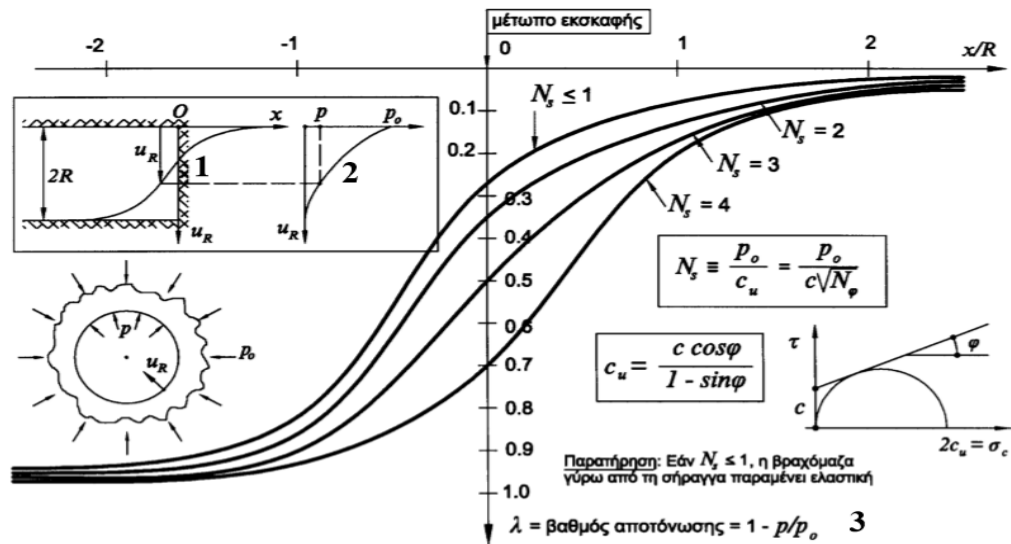
- 1) Τον προσδιορισμό της καμπύλης σύγκλισης – αποτόνωσης της βραχόμαζας με αναλυτική ή αριθμητική μέθοδο (πεπερασμένα στοιχεία)



Σχήμα 2.2: Καμπύλες σύγκλισης – αποτόνωσης βραχόμαζας και απόκρισης μέτρων υποστήριξης

- 2) Τον προσδιορισμό της σύγκλισης του τοιχώματος u_{RD} κατά την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης (μέσω των καμπυλών Panet) που περιλαμβάνει τα εξής στάδια :

- i. Τον προσδιορισμό του λ από το χ , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



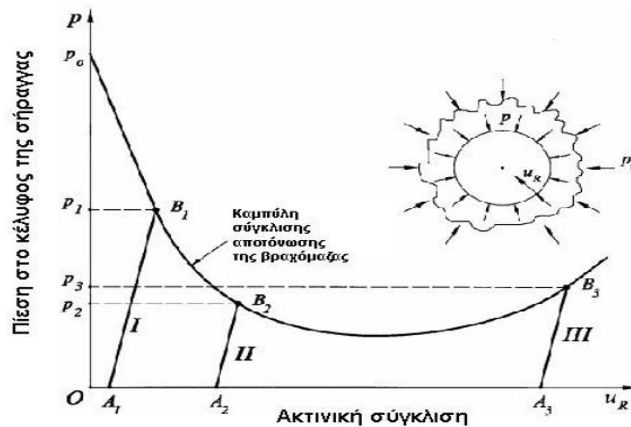
Σχήμα 2.3: Τυπικές μορφές των καμπυλών Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα

ii. Τον προσδιορισμό του P_{Δ} από τον τύπο:

$$\lambda \equiv 1 - \frac{P_{\Delta}}{P_o}$$

iii. Τον προσδιορισμό του $u_{R\Delta}$ από την καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης (Σχήμα 2.2.)

- 3) Τον προσδιορισμό της δυσκαμψίας K_{sn} των μέτρων υποστήριξης ανάλογα τον τύπο υποστήριξης
- 4) Τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας των μέτρων υποστήριξης ($p_{i\max}$)



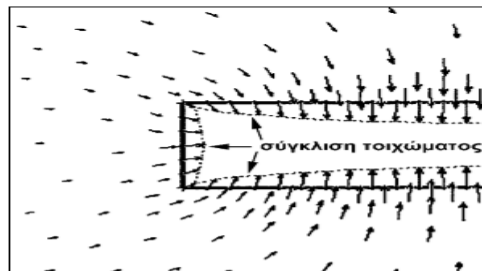
Σχήμα 2.4: Επίδραση της εφαρμογής των μέτρων άμεσης υποστήριξης στη βραχόμαζα ανάλογα με τη χρονική στιγμή τοποθέτησής τους

Στο σχήμα 2.4 παρατηρείται πως όταν τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης τοποθετηθούν στη θέση A_1 , είναι πολύ νωρίς και η πίεση στην άμεση υποστήριξη είναι αρκετά μεγάλη (P_1). Επίσης, στην θέση A_3 είναι πολύ αργά και η πίεση στην άμεση υποστήριξη (P_3) έχει αυξηθεί λόγω αποδιοργάνωσης – χαλάρωσης της βραχόμαζας με συνέπεια τον κίνδυνο κατάρρευσης. Ο κανονικός χρόνος κατασκευής της άμεσης υποστήριξης είναι στην θέση A_2 όπου η πίεση στην άμεση υποστήριξη (P_2) έχει μειωθεί σημαντικά.

Συνοπτικά λοιπόν, η μέθοδος NATM θεωρεί ότι κάθε διατομή αποτελείται από ένα δακτύλιο βραχόμαζας, που είναι το τμήμα εκείνο που επηρεάζεται από την κατασκευή, και από τα μέτρα

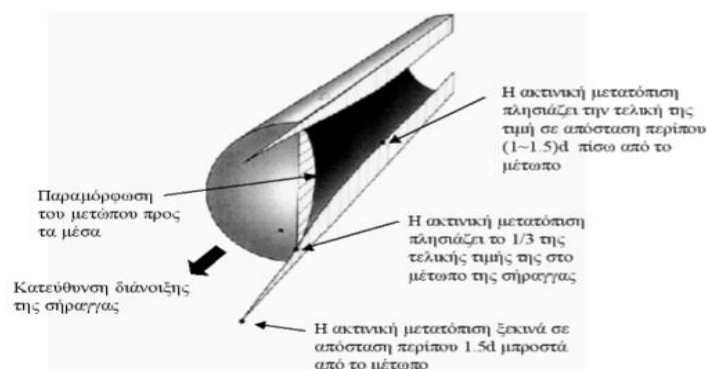
προσωρινής υποστήριξης. Θεωρεί το δακτύλιο της βραχώμαζας όχι μόνο ως στοιχείο φόρτισης αλλά και ως φέρον στοιχείο συγχρόνως. Επιχειρεί, δηλαδή, την ενεργοποίηση ενός ποσοστού της αντοχής της βραχώμαζας (μέσω της ελεγχόμενης σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας) με σκοπό το βέλτιστο σχεδιασμό του έργου όσον αφορά την ασφάλεια και την οικονομία.

Όσον αφορά τις συγκλίσεις του τοιχώματος της σήραγγας, οι μετατοπίσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, δηλαδή πριν αυτό φτάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η παραμόρφωση της βραχώμαζας κατά την προώθηση μίας κυκλικής σήραγγας μέσα σε υδροστατικό τασικό πεδίο ($K=1$), μέσω μίας τρισδιάστατης ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Το σχήμα δείχνει τα διανύσματα μετατόπισης μέσα στη βραχώμαζα (Σχήμα 2.5) καθώς και τη μορφή της παραμόρφωσης της σήραγγας (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.5: Διανύσματα μετατόπισης μέσα στη βραχώμαζα που περιβάλλει προωθούμενη κυκλική σήραγγα (Hoek, 2000)

Σύμφωνα με το σχήμα 2.6 η παραμόρφωση της βραχώμαζας ξεκινά σε απόσταση περίπου $1.5d$ μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, όπου d είναι η διάμετρος της σήραγγας, και αποκτά τη μέγιστη τιμή της σε απόσταση περίπου $(1 \sim 1.5)d$ πίσω από το μέτωπο. Στη θέση του μετώπου το $1/3$ περίπου της συνολικής σύγκλισης έχει ήδη σημειωθεί και το μέτωπο μετατοπίζεται προς τα μέσα. Ο βαθμός επιρροής αυτών των συγκλίσεων στην ευστάθεια της σήραγγας εξαρτάται από το βαθμό αντοχής της βραχώμαζας στο επίπεδο των επί τόπου τάσεων. Εάν η συμπεριφορά του εδάφους παρουσιάζει χαρακτηριστικά έντονης χαλάρωσης (μείωση της αντοχής με παρατεταμένη παραμόρφωση) τότε η διατομή της σήραγγας δεν ισορροπεί, η σύγκλιση της οροφής αυξάνει απεριόριστα και η διατομή καταρρέει.



Σχήμα 2.6: Μορφή της παραμόρφωσης στη βραχώμαζα που περιβάλλει μία υπό διάνοιξη σήραγγα (Hoek, 2000)

Τελευταίο στάδιο κατά τη διάνοιξη σήραγγας με NATM είναι η τοποθέτηση της τελικής επένδυσης, η οποία αποτελεί τη μόνιμη πλέον υποστήριξη. Η τελική επένδυση συνήθως κατασκευάζεται μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης του συνόλου του μήκους της σήραγγας, αλλά οπωσδήποτε αφού η σήραγγα ισορροπήσει με την άμεση υποστήριξη και σχεδιάζεται για να αναλάβει μέρος (ή το σύνολο) των φορτίων της περιβάλλουσας βραχώμαζας.

2.1.2. Ευστάθεια σήραγγας

Όταν αναφερόμαστε στον όρο μηχανισμοί αστοχίας – συμπεριφοράς, εννοούμε όλους τους μηχανισμούς διακινδύνευσης της ευστάθειας της διατομής μίας σήραγγας. Στην περίπτωση που εκσκάπτεται η βραχώμαζα και δεν έχει υποστηριχθεί ακόμα, αφορά την εκτίμηση της εν δυνάμει συμπεριφοράς της βραχώμαζας ώστε να αποδοθούν οι κατάλληλοι παράμετροι σχεδιασμού και να ελεγχθούν πιο ρεαλιστικά στην ανάλυση. Στην περίπτωση που έχουν τοποθετηθεί και τα μέτρα άμεσης υποστήριξης και πλέον η βραχώμαζα συμπεριφέρεται ως σύνολο με το κέλυφος της προσωρινής υποστήριξης, αφορά τη συμπεριφορά του συστήματος του κελύφους προσωρινής υποστήριξης. Για αυτό το σκοπό, ακολουθεί μία αναφορά :

1. στα κριτήρια αστοχίας που έχουν επικρατήσει και περιγράφουν το θεωρητικό μοντέλο μίας ρωγματομένης βραχώμαζας
2. στον μηχανισμό εκδήλωσης έντονων παραμορφώσεων και ανακατανομής τάσεων στο μέτωπο εκσκαφής
3. στις αιτίες αστοχίας του συστήματος βραχώμαζας-υποστήριξης.

2.1.2.1. Κριτήρια αστοχίας βραχώμαζας

Κριτήριο Mohr – Coulomb

Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (1776) χρησιμοποιείται ευρέως σε εδαφικούς και βραχώδεις σχηματισμούς. Από τον νόμο τριβής του Coulomb καθορίζεται ο συνδυασμός ορθής και διατμητικής τάσης για τον οποίο επέρχεται το υλικό σε αστοχία, ενώ από τον κύκλο του Mohr προσδιορίζεται το ζεύγος των κύριων τάσεων οι οποίες θα οδηγήσουν στο συνδυασμό ορθής και διατμητικής τάσης από τον οποίο θα επέλθει η αστοχία, καθώς και η διεύθυνση του επιπέδου κατά το οποίο η βραχώμαζα θα αστοχήσει.

Το κριτήριο αυτό είναι εφαρμόσιμο και για κατακερματισμένες βραχώμαζες ή για να εκφράσει την αστοχία σε επίπεδο ασυνέχειας στην Βραχομηχανική. Στην ουσία περιγράφει τον συνδυασμό της μέγιστης διατμητικής τάσης κατά το επίπεδο αστοχίας και της μέγιστης ορθής τάσης κάθετα σε αυτό σε ελαστικό χώρο. Η μαθηματική διατύπωση του κριτηρίου αστοχίας σε όρους ορθής και διατμητικής τάσης είναι η ακόλουθη:

$$\tau = c + \sigma * \tan\phi$$

Όπου,

τ : η διατμητική τάση κατά την αστοχία

σ : η ορθή τάση κατά την αστοχία

c : η συνοχή

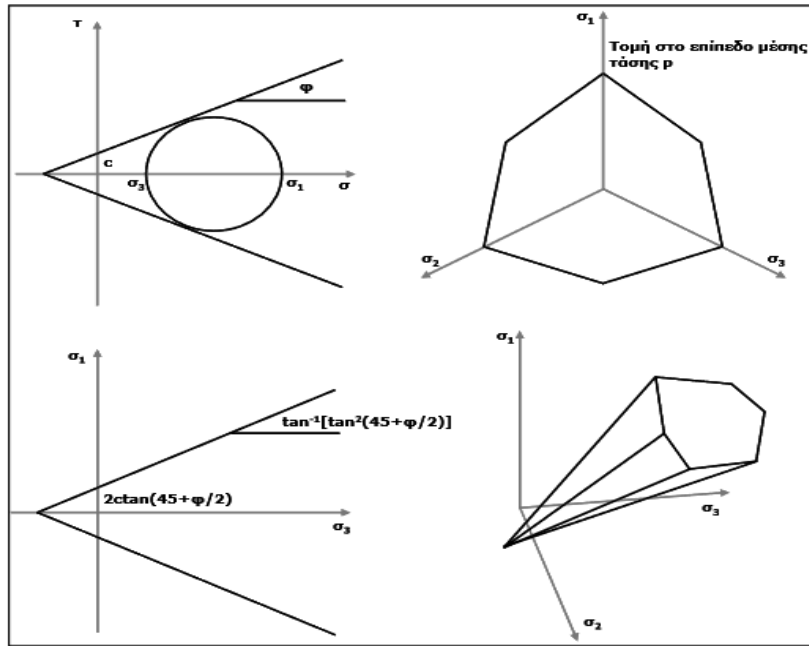
ϕ : η γωνία τριβής

Σε όρους κυριων τάσεων το κριτήριο αυτό μπορεί να εκφραστεί με την εξής μορφή:

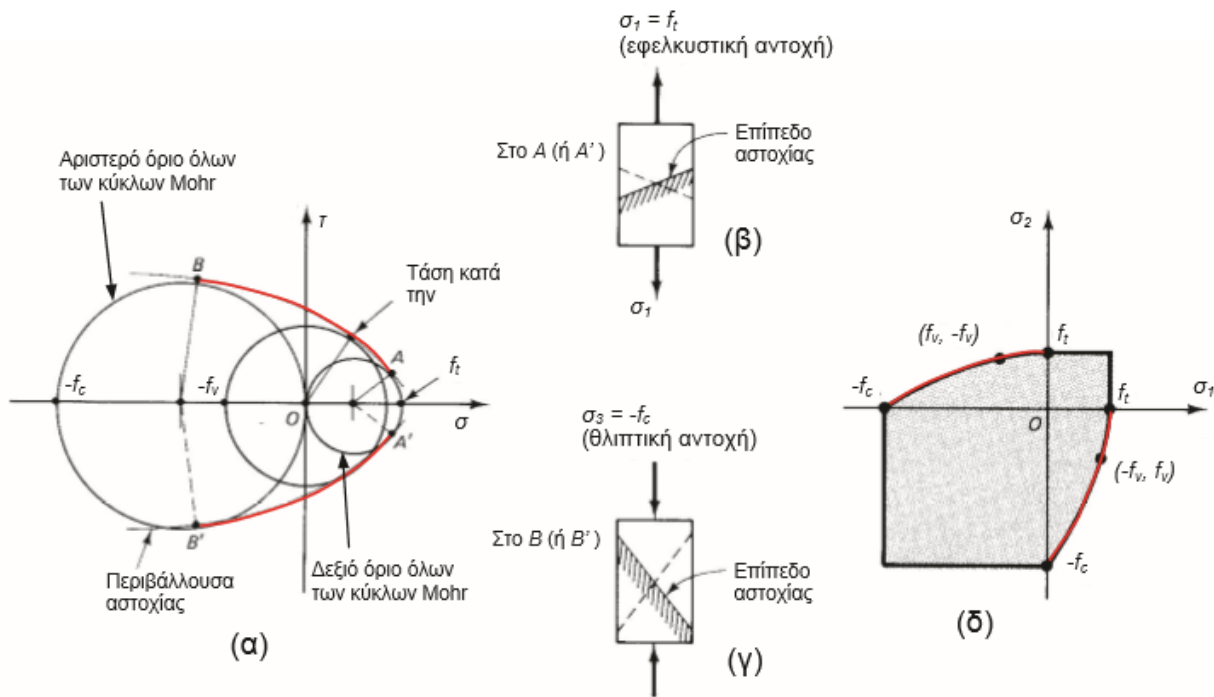
$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

Η αντοχή της βραχώμαζας σε ανεμπόδιση θλίψη ($\sigma_3=0$) μπορεί να εκτιμηθεί από :

$$\sigma_{cm} = 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) = 2c \sqrt{N_\varphi}$$



Σχήμα 2.7: Γραφική απεικόνιση περιβάλλουσας αστοχίας Mohr-Coulomb



Σχήμα 2.8: α) Κύκλοι Mohr, β) επίπεδα αστοχίας για την εντατική κατάσταση που αντιστοιχεί στα σημεία A και A', γ) επίπεδα αστοχίας για την εντατική κατάσταση που αντιστοιχεί στα σημεία B και B', δ) καμπύλη αστοχίας του κριτηρίου Mohr στο τασικό επίπεδο

Κριτήριο Hoek – Brown

Το γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 με σκοπό την παροχή δεδομένων για το σχεδιασμό υπόγειων εκσκαφών. Η συνεισφορά των Hoek & Brown ήταν πολύ σημαντική, καθώς κατάφεραν να συνδέσουν την αδιάστατη εξίσωση με παρατηρήσεις από τη γεωλογία του περιβάλλοντος. Γενικά από νωρίς αναγνωρίστηκε το γεγονός ότι το κριτήριο αστοχίας δεν θα είχε καμία ουσιαστική εφαρμογή εάν δεν χρησιμοποιούνταν παράμετροι προερχόμενοι από απλές γεωλογικές παρατηρήσεις στο πεδίο. Επόμενο στάδιο λοιπόν ήταν η χρησιμοποίηση του δείκτη RMR (Bieniawski) ως τη βασική παράμετρο ένδειξης της γεωλογικής πληροφορίας, καθώς αυτός ο δείκτης από τη δημοσίευσή του το 1974 μέχρι εκείνη την περίοδο είχε γίνει ευρέως γνωστός. Βέβαια, μέχρι το 1995 παρατηρήθηκε ότι αυτός ο δείκτης είναι δύσκολο να εφαρμοστεί σε πολύ πτωχής ποιότητας βραχώμαζες και για αυτό το λόγο ακολούθησε η ανακάλυψη του Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής (GSI) ο οποίος συνεχίζει μέχρι και σήμερα να εξελίσσεται ως την μοναδική ένδειξη της γεωλογικής πληροφορίας για το κριτήριο Hoek – Brown.

Επειδή οι βραχώμαζες που συναντώνται στην φύση είναι κατά κύριο λόγο ρωγματωμένες, προσομοιώνονται συνήθως με το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown το οποίο διαθέτει καμπύλη περιβάλλουσα αστοχίας. Το κριτήριο προτάθηκε αρχικά από τους Hoek & Brown το 1980 και κατέληξε ύστερα από τροποποιήσεις στην τελική του μορφή από τους Hoek et al το 2002. Η γενικευμένη μορφή του κριτηρίου περιγράφεται από την εξίσωση που ακολουθεί :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (\text{Hoek et al., 2002})$$

Όπου,

σ_1 : η μέγιστη κύρια ενεργός τάση στην κατάσταση αστοχίας

σ_3 : η ελάχιστη κύρια ενεργός τάση στην κατάσταση αστοχίας

σ_{ci} : η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του πετρώματος όπως προκύπτει από πειράματα μονοαξονικής θλίψης σε δείγματα άρρηκτου βράχου

m_b : σταθερά που χαρακτηρίζει την ποιότητα της βραχώμαζας και προκύπτει από την σχέση

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

s : σταθερά που χαρακτηρίζει την ποιότητα της βραχώμαζας και προκύπτει από την σχέση

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

α : σταθερά που χαρακτηρίζει την ποιότητα της βραχώμαζας και προκύπτει από την σχέση

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

Συσχέτιση των κριτηρίων Hoek – Brown & Mohr – Coulomb

Όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, προτιμάται η προσομοίωση της βραχώμαζας μέσω του κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown καθώς εκείνο είναι που διαθέτει καμπύλη περιβάλλουσα αστοχίας και προσεγγίζει περισσότερο την καμπύλη περιβάλλουσα που προκύπτει από τους κύκλους Mohr (Σχήμα 2.8.α) για τη ρωγματωμένη βραχώμαζα κατά την αστοχία. Αρκετά προγράμματα όμως μη γραμμικής ανάλυσης της συμπεριφοράς της βραχώμαζας γύρω από υπόγειες εκσκαφές, δεν περιλαμβάνουν το κριτήριο Hoek – Brown αλλά το κριτήριο Mohr – Coulomb. Για αυτό το λόγο κρίθηκε σκόπιμη η συσχέτιση των δύο κριτηρίων.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται υπολογισμός των παραμέτρων αντοχής c και ϕ του κριτηρίου Mohr – Coulomb που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων του κριτηρίου Hoek – Brown. Λόγω του ότι πρόκειται για διαφορετική μορφή περιβάλλουσας αστοχίας (καμπύλη για το κριτήριο Hoek – Brown και ευθύγραμμη για το κριτήριο Mohr – Coulomb), η αντιστοιχία των δύο κριτηρίων αναφέρεται σε συγκεκριμένη περιοχή τάσεων όπου η καμπύλη περιβάλλουσα του κριτηρίου Hoek – Brown προσεγγίζεται με μία ευθεία (Σχήμα 2.9).

Συνεπώς αναπτύσσεται μία μεθοδολογία υπολογισμού των ισοδύναμων παραμέτρων αντοχής (c, ϕ) από τις παραμέτρους του κριτηρίου Hoek – Brown σύμφωνα με την οποία ορίζεται μία ορθή τάση σ_{3max} , ο υπολογισμός της οποίας διαφέρει σε κάθε περίπτωση και για τις σήραγγες υπολογίζεται από την εξής σχέση :

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

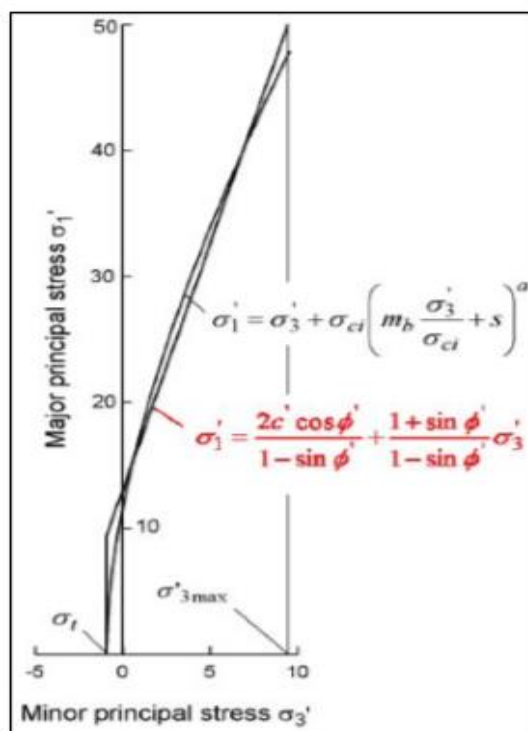
Όπου,

γ : το ειδικό βάρος του εδάφους

H: το ύψος των υπερκείμενων γαιών

σ_{cm} : η αντοχή της βραχώμαζας και δίνεται από την σχέση

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} * ((m_b + 4s - a(m_b - 8s)) \left(\frac{m_b}{4} + s \right)^{a-1} / (2(1 + a)(2 + a) \text{ (Hoek and Brown, 1997)})$$



Σχήμα 2.9: Συσχέτιση ελάχιστων και μέγιστων κύριων τάσεων κριτηρίου Hoek – Brown και Mohr – Coulomb

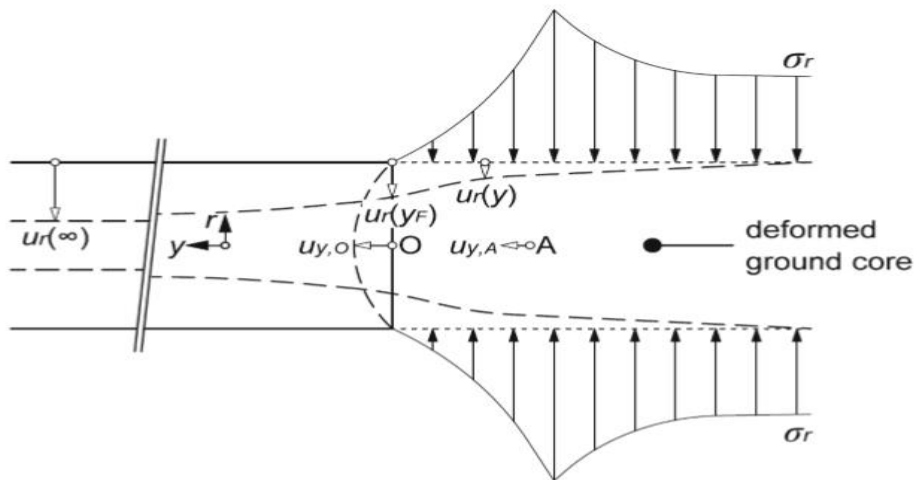
Τελικά, η ισοδύναμη γωνία τριβής (ϕ) και συνοχή (c) υπολογίζονται από τις σχέσεις :

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

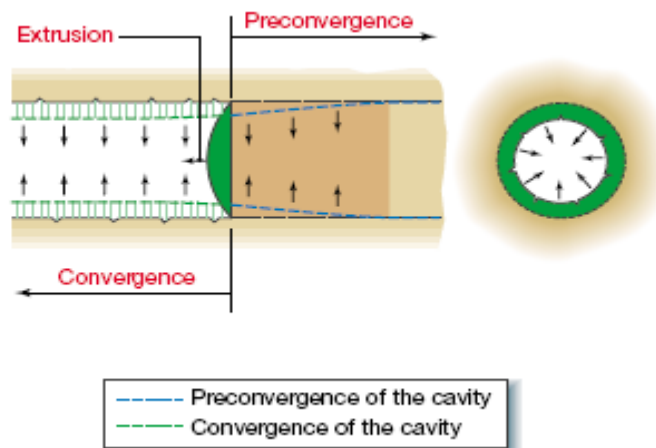
$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{\alpha-1}}{2(\alpha + 1)(\alpha + 2) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{\alpha-1}} \right), \text{ όπου } \sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{ci}}$$

2.1.2.2. Μέτωπο εκσκαφής

Κατά την προώθηση της εκσκαφής, το τμήμα του εδάφους μπροστά από τη σήραγγα αποτονώνεται σταδιακά, περνώντας από την αρχική γεωστατική εντατική κατάσταση (όταν το μέτωπο βρίσκεται πολύ μακριά) σε μία τελική κατάσταση όπου η μία πλευρική τάση κατά τη φορά της εκσκαφής (σ_h) μηδενίζεται. Η σταδιακή αυτή απώλεια της πλευρικής τάσης μειώνει την ακτινική «αντίσταση» του εδάφους μπροστά από το μέτωπο με αποτέλεσμα αυτό να παραμορφώνεται υπό την επίδραση της υφιστάμενης κατακόρυφης τάσης τόσο ακτινικά (προσύγκλιση) όσο και προς το εσωτερικό της σήραγγας (εξώθηση). Ο εν λόγω μηχανισμός που οδηγεί στο φαινόμενο της εξώθησης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και στα επόμενα που ακολουθούν απεικονίζεται σχηματικά το φαινόμενο της σύγκλισης, προσύγκλισης και εξώθησης (έκθλιψης):



Σχήμα 2.10: Σχηματικός μηχανισμός δημιουργίας εξώθησης του μετώπου εκσκαφής (Cantieni et al, 2011)



Σχήμα 2.11: Έκθλιψη (Extrusion), Σύγκλιση (Convergence), Προσύγκλιση (Preconvergence) (Lunardi, 2000)

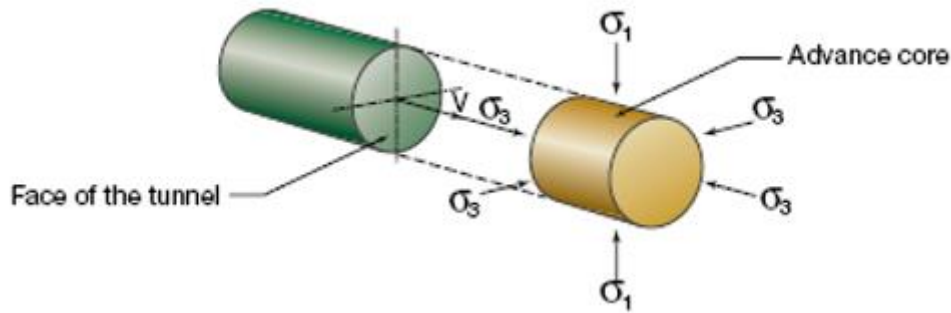
Η αστάθεια στο μέτωπο οφείλεται κυρίως όταν επικρατούν δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες, όταν για παράδειγμα οι βραχώμαζες έχουν πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά ή πολλές ασυνέχειες δυσμενούς προσανατολισμού και με χαμηλή αντοχή. Ουσιαστικά σε αυτή την περίπτωση όπου το έδαφος είναι αρκετά ασθενές, η εκσκαφή προκαλεί μία εντατική κατάσταση μπροστά από το μέτωπο η οποία υπερβαίνει σημαντικά την αντοχή του εδάφους με αποτέλεσμα η περιοχή του μετώπου να πλαστικοποιείται και στα πολύ χαμηλότερης αντοχής εδάφη να παρεμποδίζεται η ανάπτυξη τοξωτής λειτουργίας και το μέτωπο να αστοχεί. Οι τάσεις ακολούθως ανακατανέμονται ακόμα πιο μπροστά και πάνω από το μέτωπο και έτσι δημιουργείται αυτή η περιοχή μπροστά και

πάνω από το μέτωπο στην οποία το έδαφος βρίσκεται υπό πολύ χαμηλές τάσεις λειτουργώντας ουσιαστικά ως νεκρό βάρος με αποτέλεσμα να καταρρέει.

Στις αβαθείς κυρίως σήραγγες όπου η διάνοιξη γίνεται εντός συνήθως χαλαρών σχηματισμών λόγω του μικρού βάθους αλλά και επειδή είναι περιορισμένη η δυνατότητα ανακατανομής των τάσεων πάνω από τη σήραγγα, αναπτύσσονται σημαντικές παραμορφώσεις σε μέγεθος και εύρος ακόμα και όταν η αντοχή του εδάφους δεν είναι πολύ χαμηλότερη από την επί τόπου τάση. Επίσης, δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι μία ενδεχόμενη αστάθεια η κατάρρευση δε θα προκαλέσει πρόβλημα μόνο στο τεχνικό έργο αλλά θα φέρει δυσμενείς συνέπειες και στην κοινωνία μη ανεκτές από το αστικό περιβάλλον. Γι'αυτό το λόγο σε αυτή την περίπτωση ειδικά όπου το βάθος είναι μικρό καθίσταται σημαντικός ο περιορισμός των παραμορφώσεων και ειδικά εκείνων που λαμβάνουν χώρα μπροστά από την εκσκαφή και μέχρι την εγκατάσταση των μέτρων άμεσης υποστήριξης τα οποία ακολούθως εάν είναι δύσκαμπτα μπορούν να παραλάβουν τα φορτία του εδάφους. Εξάλλου η εμπειρία έχει δείξει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό αστοχιών σε σήραγγες και ειδικά σε αβαθείς – αστικές προκύπτει στο μέτωπο εκσκαφής ή πλησίον αυτού. Γι'αυτό το λόγο η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής σηράγγων, σε αβαθείς κυρίως σήραγγες, είναι ένα θέμα που έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές στο παρελθόν και έχουν γίνει πολλές προσπάθειες εκτίμησης της απαιτούμενης πίεσης αντιστήριξης στο μέτωπο ώστε εκείνο να είναι οριακά ευσταθές

Αντίθετα, σε ένα πιο ισχυρό έδαφος με σημαντική συνοχή, η εντατική κατάσταση μπροστά από το μέτωπο δεν υπερβαίνει την αντοχή του εδάφους με αποτέλεσμα το μέτωπο να παραμένει ευσταθές και η κατακόρυφη ορθή τάση να παραμένει σε υψηλές τιμές λόγω μειωμένης αποτόνωσης συγκριτικά με την περίπτωση του ασθενούς εδάφους.

Αξίζει να αναφερθεί ότι σημαντικό «εργαλείο» για τον έλεγχο και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της σήραγγας καθώς και των συνεπειών που επιφέρει η διάνοιξή της είναι ο πυρήνας προώθησης. Ως πυρήνας προώθησης ορίζεται ο όγκος του γεωυλικού που βρίσκεται μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας και έχει κυλινδρικό σχήμα με ύψος και διάμετρο κυλίνδρου να ταυτίζεται πρακτικά με την διάμετρο της σήραγγας. Η χρήση του πυρήνα προώθησης αποτελεί μάλιστα τη σημαντικότερη διαφορά μεταξύ των δύο κυρίαρχων φιλοσοφιών συμβατικής διάνοιξης σηράγγων, της παραδοσιακής NATM (New Austrian Tunnelling Method, Rabcewicz 1944 & 1975) και της ADECO (Analysis of Controlled Deformations in Tunnels). Στην δεύτερη δίνεται έμφαση στην παραμορφωσιακή συμπεριφορά του πυρήνα προώθησης και στην διατήρηση της ευστάθειας του μετώπου ως τα βασικότερα κλειδιά μίας επιτυχημένης διάνοιξης.όταν πρόκειται για δυσμενές γεωτεχνικά περιβάλλον. Αντίθετα στην NATM, δίνεται έμφαση στον κατάλληλο χρόνο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης για να επέλθει ισορροπία ανάμεσα στην ευστάθεια και την λογική απαίτηση σε φέρουσα ικανότητα της υποστήριξης. Αυτός είναι και ο λόγος που η μέθοδος NATM δεν μπορεί να προταθεί εκ των προτέρων για τη διάνοιξη αβαθών σηράγγων καθώς βασικό κριτήριο σχεδιασμού σε αυτή την περίπτωση αποτελεί ο περιορισμός των παραμορφώσεων που θα αναπτυχθούν από τη διάνοιξη.



Σχήμα 2.12: Μέτωπο εκσκαφής (Face of the tunnel), Πυρήνας προώθησης (Advance core), (Lunardi, 2000)

2.1.2.3. Μέτρα προσωρινής υποστήριξης

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, στη φάση της εκσκαφής ο σκοπός της άμεσης υποστήριξης είναι η ευστάθεια του μετώπου και του δακτυλίου της σήραγγας μέχρι την εφαρμογή των μέτρων τελικής επένδυσης. Η αστάθεια του μετώπου οφείλεται σε πολύ χαμηλής αντοχής βραχώμαζες οι οποίες μπορεί και να έχουν ασυνέχειες δυσμενούς προσανατολισμού.

Οι παράγοντες που συνήθως οδηγούν σε αστοχία στη φάση προσωρινής υποστήριξης είναι σύμφωνα με τους Grasso et al (2005) :

Γενικά:

1. Η λανθασμένη εκτίμηση των γεωλογικών παραμέτρων της βραχώμαζας
2. Η ελλιπής (ίσως και λανθασμένη) προσομοίωση της πραγματικότητας από τις εμπειρικές μεθόδους ή από τα κριτήρια αστοχίας και τα προγράμματα υπολογισμού που χρησιμοποιούνται κατά το σχεδιασμό
3. Η λανθασμένη εφαρμογή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης και η μη τήρηση της μελέτης του έργου από τον κατασκευαστή

Ειδικά:

1. Ανεπαρκής τεχνικογεωλογική αξιολόγηση
2. «Ανώμαλο» πεδίο τάσεων
3. Φαινόμενα ερπυσμού
4. Διόγκωση
5. Υψηλή πίεση υπόγειων υδάτων
6. Καθυστέρηση στην τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης
7. Επίδραση του νερού κατά τη διάρκεια διάτρησης

8. Πτωχή σύνδεση μεταξύ φάσεων εκσκαφής (π.χ. ανάστροφου δαπέδου με τα πλαίσια της άνω ημιδιατομής)
9. Ακατάλληλο μήκος και ακατάλληλος τύπος των εφαρμοζόμενων μέτρων ενίσχυσης
10. Ακατάλληλη ευθυγράμμιση των μεταλλικών πλαισίων
11. Μη επιθυμητή υπερεκσκαφή η οποία διαταράσσει περισσότερο την περιβάλλουσα βραχώμαζα
12. Διαταραχή της περιοχής θεμελίωσης του κελύφους προσωρινής υποστήριξης

Οι μορφές αστοχίας είναι οι εξής :

- Μεγάλες συγκλίσεις
- Αστοχίες με μορφή σφήνας
- Κατάπτωση τύπου καμινάδας
- Καταρροή της βραχώμαζας

Παρατίθενται φωτογραφίες με τις αντίστοιχες μορφές αστοχίας :



Εικόνα 2.1 : Έντονη σύνθλιψη στη σήραγγα Yasambu – Quibor, με υπερκείμενα 1200m σε περιβάλλον με γραφιτικούς φυλλίτες (Hoek, 2007)



Εικόνα 2.2: Ολίσθηση σφήνας από το μέτωπο (Σήραγγα Περιοχής Πολύμυλου)



Εικόνα 2.3: Κατάπτωση τύπου καμινάδας στη σήραγγα Σ10 της Εγνατίας Οδού



Εικόνα 2.4: Καταρροή βραχώμαζας στη σήραγγα Σ1 στην περιοχή Παραμυθίας

2.2. Βιβλιογραφικές έρευνες

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιες λεπτομέρειες και αποτελέσματα από τις πιο πρόσφατες έρευνες που πραγματοποιήθηκαν με στόχο την διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επιρροή του πλάτους πυλώνα στην αλληλεπίδραση των δύο κλάδων γειτονικών σηράγγων. Από τη διεθνή βιβλιογραφία επιλέγονται εκείνες οι έρευνες που παρέχουν πιο πρόσφατη ενημέρωση και αντιπροσωπευτικές πληροφορίες σχετικά με την επιρροή του πλάτους πυλώνα και υποδεικνύουν ένα εύρος διάστασης της εγκάρσιας απόστασης γειτονικών σηράγγων ώστε να αποφεύγονται αυξημένες τιμές εντατικών μεγεθών στην υποστήριξη και αυξημένες μετακινήσεις στην βραχόμαζα λόγω αλληλεπίδρασης.

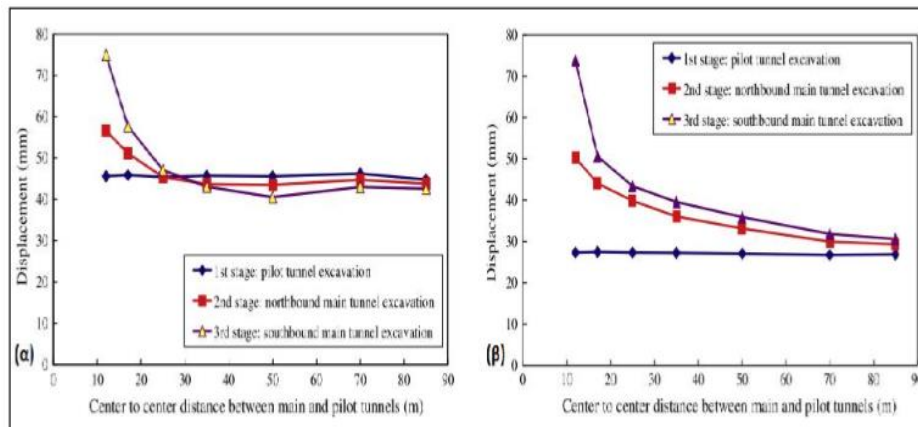
2.2.1. Chen S.L., Lee S.C., Gui M.W., (2008)

Οι Chen S.L., Lee S.C., Gui M.W. (2008) μελέτησαν τη διάνοιξη της οδικής σήραγγας XueShan στην Ταιβάν, πραγματοποιώντας διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με το πρόγραμμα Plaxis ver 7.2. Η σήραγγα XueShan έχει μήκος 12.9 km και η κατασκευή της αποτελείται από 2 κύριες σήραγγες και 1 πιλοτική η οποία χρησίμευσε για τη γεωλογική παρακολούθηση κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Για την κατασκευή της χρησιμοποιήθηκε τόσο μηχανική όρυξη όσο και διάνοιξη με συμβατικά μέσα. Η διατομή που διανοίχθηκε με συμβατικά μέσα είχε πεταλοειδές σχήμα, ενώ αυτή που διανοίχθηκε με μηχανικά μέσα (TBM) είχε κυκλικό σχήμα διαμέτρου 12m για την κύρια σήραγγα και 5m για την πιλοτική.

- Τρεις παράλληλοι κλάδοι

Η απόσταση μεταξύ των δύο κύριων σηράγγων ήταν αρχικά 60m, αλλά μειώθηκε σταδιακά στα 42m λόγω περιορισμών της οδοποιίας. Επομένως, μελετήθηκε το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης 3 κλάδων, προκειμένου να διερευνηθεί η εξέλιξη των παραμορφώσεων στις επενδύσεις των σηράγγων για μεταβαλλόμενα πλάτη πυλώνα. Το ύψος υπερκείμενων λήφθηκε ίσο με 300m. Η βραχόμαζα χαρακτηρίστηκε ως πτωχής ποιότητας και ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων $k_0 = 1$. Επίσης, η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου δε συμπεριλήφθηκε.

Η αλληλουχία των τριών κλάδων κατασκευής περιλάμβανε αρχικά την εκσκαφή της πιλοτικής σήραγγας, στη συνέχεια την εκσκαφή της βόρειας κύριας σήραγγας και τέλος την εκσκαφή της νότιας κύριας σήραγγας. Ακολούθησε διερεύνηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μεταξύ των κλάδων και της εξέλιξης των μετακινήσεων για κάθε σήραγγα σε κάθε στάδιο εκσκαφής. Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 2.13) παρατίθεται η εξέλιξη των μετακινήσεων που αφορούν τους τρεις κλάδους καθώς μεταβάλλεται το πλάτος του πυλώνα για πεταλοειδή και κυκλική διατομή.



Σχήμα 2.13: Εξέλιξη των μετακινήσεων των τριών κλάδων για μεταβαλλόμενο πλάτος πυλώνα (α) για πεταλοειδή διατομή και (β) για κυκλική διατομή (Chen, Lee, Gui, 2008)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι ότι σε γενικές γραμμές η κυκλικής διατομής σήραγγα παράγει μικρότερου μεγέθους μετατοπίσεις συγκριτικά με την πεταλοειδούς διατομής σε όλα τα στάδια της εκσκαφής, όμως το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των γειτονικών σηράγγων είναι περισσότερο εμφανές στην κυκλική διατομή παρά στην πεταλοειδή. Παρατηρείται ότι οι τιμές των μετακινήσεων συγκλίνουν για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο των 30m στην πεταλοειδή διατομή, ενώ αντίθετα στην κυκλική διατομή διαφοροποιούνται για διάφορα είδη πυλώνα και αρχίζουν να συγκλίνουν στα 70m απόσταση. Επομένως για την πεταλοειδή διατομή προέκυψε ότι για καθαρό πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο των 30m το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης δεν επηρεάζει τόσο σε αντίθεση με μικρότερα πλάτη πυλώνα όπου παρουσιάζεται έντονο.

- Τέσσερις παράλληλοι κλάδοι

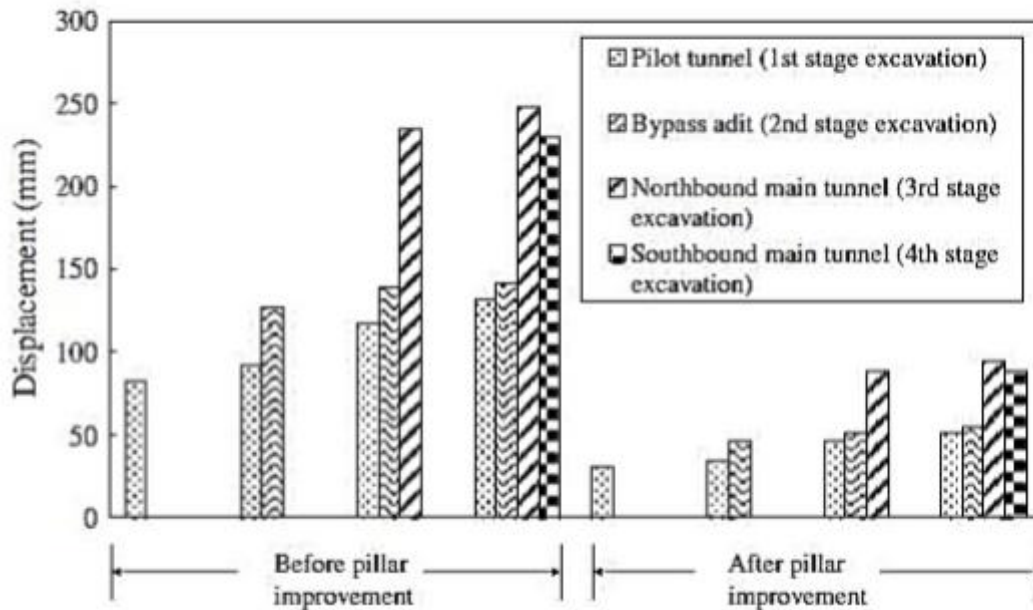
Λόγω αλληπάλληλων καταρρεύσεων στις σήραγγες κατά τη διάρκεια κατασκευής, δημιουργήθηκε ένα σύστημα από τέσσερις παράλληλους κλάδους. Σε ένα σοβαρό περιστατικό το TBM παγιδεύτηκε εντός της πιλοτικής σήραγγας και για τη διάσωσή του κατασκευάστηκε μεταξύ της κύριας και της πιλοτικής, μία νέα βοηθητική σήραγγα. Η βραχόμαζα χαρακτηρίστηκε ως πτωχής ποιότητας, το ύψος υπερκείμενων λήφθηκε ίσο με 300m, ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων $k_0 = 1$ και η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα εντοπιζόταν στα 100m βάθος. Επομένως, μελετήθηκε ένα νέο σύστημα από τέσσερις παράλληλους κλάδους η εκσκαφή των οποίων έγινε με την εξής σειρά:

1. Εκσκαφή της πιλοτικής σήραγγας
2. Παγίδευση του TBM στην πιλοτική σήραγγα και εκσκαφή μίας νέας βοηθητικής σήραγγας
3. Εκσκαφή της αριστερής βόρειας σήραγγας
4. Εκσκαφή της δεξιάς νότιας σήραγγας

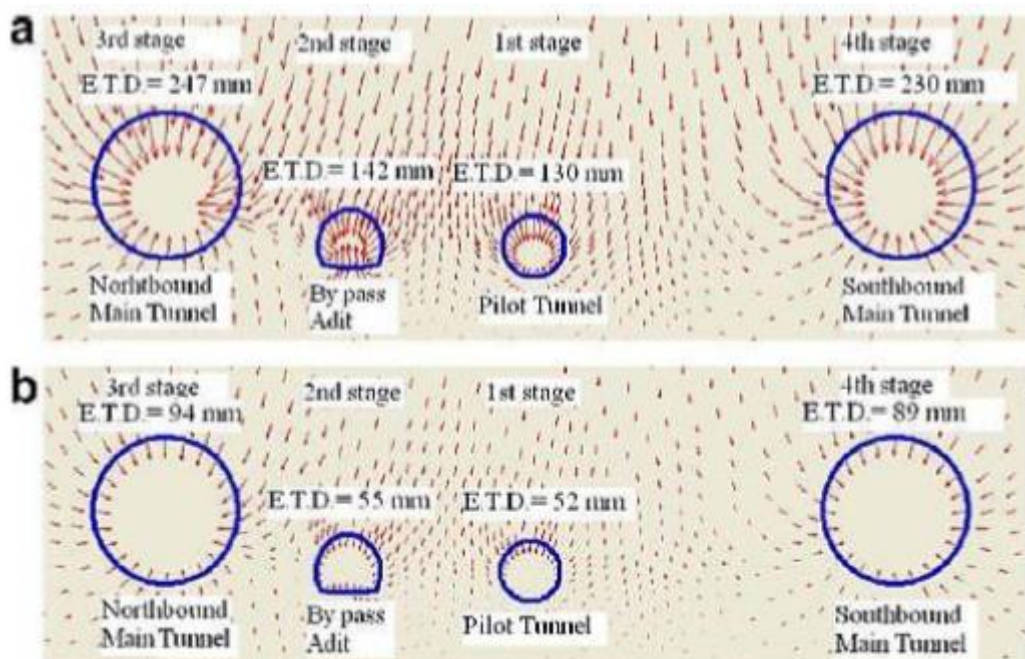
Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, προέκυψαν μη αποδεκτές παραμορφώσεις. Πιο συγκεκριμένα η μέγιστη μετατόπιση της πιλοτικής σήραγγας στην 1^η εκσκαφή ήταν 82mm, ενώ αν η εκσκαφή συνεχιζόταν χωρίς την ενίσχυση της βραχόμαζας, οι μέγιστες

μετακινήσεις των δύο κύριων κλάδων θα ήταν 247mm και 230mm αντίστοιχα. Τελικά, με εργασίες αποστραγγίσεως των υπόγειων υδάτων και ενίσχυση της βραχώμαζας με τσιμεντενέσεις, οι τελικές συγκλίσεις του βόρειου και νότιου κλάδου ήταν 94mm και 89mm αντίστοιχα.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι μέγιστες μετακινήσεις για τον καθένα από τους τέσσερις κλάδους πριν και μετά από τη βελτίωση της βραχώμαζας κατά τη διάρκεια όλων των στάδιων εκσκαφής, καθώς και τα διανύσματα συνολικών μετατοπίσεων πριν και μετά τη βελτίωση του γεωυλικού:



Σχήμα 2.14: Μέγιστες μετακινήσεις για τον καθένα από τους τέσσερις κλάδους της σήραγγας και κατά τη διάρκεια όλων των στάδιων εκσκαφής (Chen, Lee, Gui, 2008)



Σχήμα 2.15: Διάνυσμα τελικών μετατοπίσεων των τεσσάρων παράλληλων κλάδων, (a) πριν και (b) μετά από τη βελτίωση του γεωυλικού (Chen, Lee, Gui, 2008)

- Δύο παράλληλοι κλάδοι και εφαρμογή της μεθόδου Central Pillar Gallery

Δεδομένου ότι στην περίπτωση της σήραγγας XueShan στην περιοχή των στομιών το ύψος των υπερκείμενων ήταν μικρό και η βραχόμαζα ήταν έντονα αποσαθρωμένη και κερματισμένη, εφαρμόστηκε μία μέθοδος που είναι ελάχιστα διαδεδομένη για την αντιμετώπιση προβλημάτων αστάθειας, η central – pillar – gallery tunneling method. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την ολική αντικατάσταση της βραχόμαζας που αποτελεί τον πυλώνα και συγκεκριμένα την εκσκαφή της περιοχής που θα αποτελέσει τον πυλώνα μεταξύ των σηράγγων προτού ξεκινήσει η εκσκαφή των κύριων κλάδων, την επανεπίχωση αυτής της περιοχής με σκυρόδεμα και στο τέλος τη διάνοιξη των δύο κλάδων. Για την περίπτωση που εξέτασαν οι Chen S.L., Lee S.C., Gui M.W., η απόσταση μεταξύ των δύο κύριων κλάδων είναι 16m, ενώ το μέσο πάχος υπερκείμενων είναι 20m.

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν τόσο για την μη εφαρμογή της μεθόδου central – pillar – gallery όσο και για την εφαρμογή της. Παρατηρήθηκε σημαντική μείωση των μέγιστων μετακινήσεων και για τους δύο κλάδους ύστερα από τη βελτίωση του πυλώνα. Οι μετακινήσεις ανά περίπτωση φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί :

Pillar improvement	Excavation stages	Southbound main tunnel	Northbound main tunnel
Yes	Excavate southbound main tunnel	22.97 mm	–
	Excavate northbound main tunnel	25.06 mm	19.50 mm
No	Excavate southbound main tunnel	23.06 mm	–
	Excavate northbound main tunnel	25.50 mm	28.13 mm

Πίνακας 2.1: Επίδραση της βελτίωσης του πυλώνα στις μετακινήσεις των δύο κύριων κλάδων κατά τη διάρκεια της εκσκαφής (Chen, Lee, Gui, 2008)

2.2.2. Μπεκρή Ε., (2012)

Η Μπεκρή Ε. (2012) επιλέγει σήραγγες κυκλικής διατομής διαμέτρου $D=10\text{m}$, ενώ η διάνοιξη πραγματοποιείται με ολομέτωπη εκσκαφή σε ομοιογενή σχηματισμό. Η άμεση υποστήριξη αποτελείται από κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος και η βασική παράμετρος διαφοροποίησης των προσομοιωμάτων είναι η απόσταση W μεταξύ των δύο κλάδων μετρούμενη από παρειά σε παρειά. Η απόσταση αυτή λαμβάνει τιμές $W=0.5D=5\text{m}$, $W=D=10\text{m}$, $W=2D=20\text{m}$, ενώ το ύψος των υπερκείμενων γαιών είναι $H=40\text{m}$. Το βήμα εκσκαφής λαμβάνεται ίσο με 1m και η διάνοιξη πραγματοποιείται και για τους δύο κλάδους από $\gamma=0\text{m}$ έως $\gamma=50\text{m}$. Επιλέγεται διαδοχική εκσκαφή των δύο κλάδων καθώς με αυτή την πρακτική επιδιώκεται να διερευνηθεί η επίδραση της διάνοιξης του δεύτερου κλάδου στον αρχικό. Ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων λαμβάνεται ίσως με $k_0 = 0.7$ και οι γεωτεχνικές παράμετροι της περιβάλλουσας βραχώμαζας ποσοτικοποιούνται αρχικά μέσω του κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown και ακολουθεί στη συνέχεια η συσχέτιση με το κριτήριο Mohr – Coulomb.

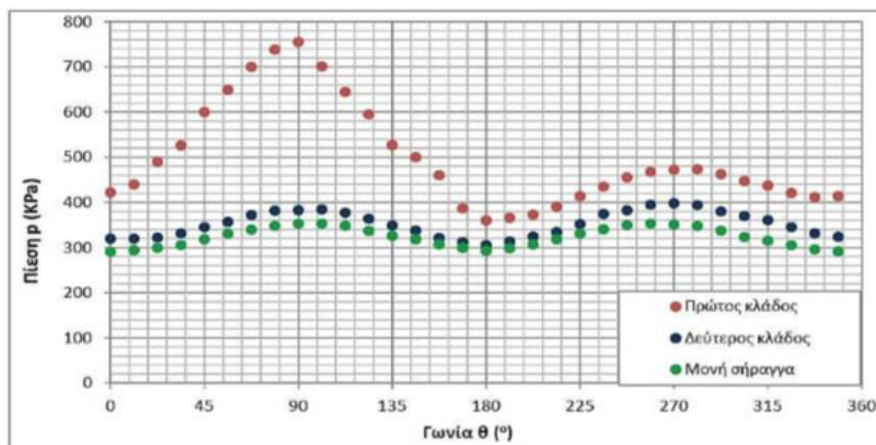
Για την αντοχή του άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη επιλέγεται ένα εύρος τιμών $8 \sim 20\text{MPa}$, η σταθερά m_i λαμβάνει την τιμή 6 και ο Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής GSI κυμαίνεται από 10 έως 40 . Ο συντελεστής διατάραξης της βραχώμαζας D λαμβάνεται ίσως με 0 και ο λόγος Poisson της βραχώμαζας διατηρείται σταθερός $\nu=0.3$. Οι ισοδύναμοι παράμετροι αντοχής που προέκυψαν από το συσχετισμό του κριτηρίου Hoek – Brown με το κριτήριο Mohr – Coulomb είναι :

Συνοχή (c) : $0.039 \sim 0.170\text{MPa}$

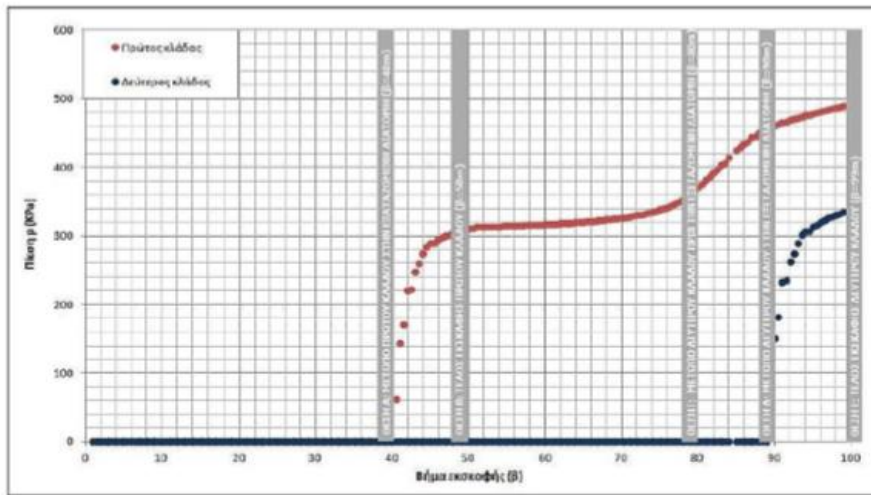
Γωνία τριβής (ϕ) : $23^\circ \sim 42^\circ$

Στις αναλύσεις που πραγματοποιεί η Μπεκρή Ε. (2012) θεωρείται ότι η άμεση υποστήριξη αποτελείται από κέλυφος εκτοξευμένου σκυροδέματος το οποίο παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά, έχει μέτρο ελαστικότητας $E = 20000\text{MPa}$, λόγο Poisson $\nu = 0.2$, πάχος $d_{sh} = 0.20\text{m}$ και ειδικό βάρος $\gamma_{sh} = 0.025\text{MN/m}^3$

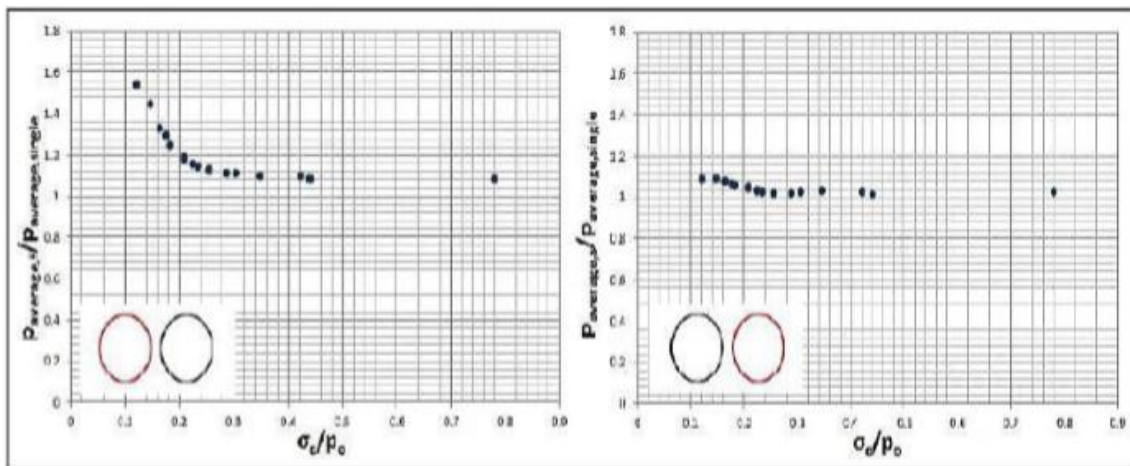
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αναφέρονται στις πιέσεις που δέχεται η άμεση υποστήριξη των σηράγγων και στις μετακινήσεις των εδαφικών στοιχείων συναρτήσει της απόστασης από το μέτωπο εκσκαφής, της γωνίας θ (με θετική φορά την ωρολογιακή) των σηράγγων και του βήματος εκσκαφής. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια από τα αποτελέσματα της εν λόγω έρευνας:



Σχήμα 2.16: Σύγκριση, περί τη χαρακτηριστική διατομή, των πιέσεων που αναπτύσσονται επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου της δίδυμης σήραγγας ($W=0.5D=5\text{m}$), του δεύτερου κλάδου αυτής καθώς και της σήραγγας μονού κλάδου



Σχήμα 2.17: Εξέλιξη των αναπτυσσόμενων μέσων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης κατά τη συνολική διάρκεια εκσκαφής για διατομές των δύο κλάδων της δίδυμης σήραγγας που βρίσκονται σε απόσταση 40m από την είσοδο της σήραγγας και για $W=0.5D=5m$ (Μπεκρή, 2012)



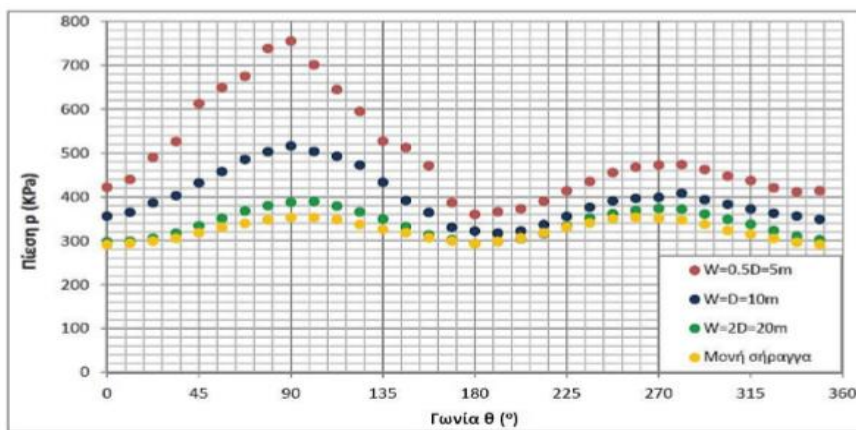
Σχήμα 2.18: Κατανομή ανηγμένης μέσης πίεσης επί του κελύφους άμεσης υποστήριξης του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $P_{average,(f/s)}/P_{average, single}$ ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_0 για $W=0.5D=5m$ (Μπεκρή, 2012)

Σύμφωνα με το σχήμα 2.16, στην περίπτωση διάνοιξης μονής σήραγγας η κατανομή της φόρτισης είναι συμμετρική ενώ στην περίπτωση διάνοιξης δίδυμης σήραγγας παρατηρείται ασυμμετρία στη φόρτιση των δύο κλάδων. Στον αριστερό κλάδο (1^{ος} κλαδος) παρατηρούνται τα δυσμενέστερα αποτελέσματα στην παρειά των 90°, ενώ στον δεξιό κλάδο (2^{ος} κλάδος) παρατηρούνται στην παρειά των 270°. Ουσιαστικά, αυτό υποδηλώνει ότι οι εσωτερικές παρειές των δύο κλάδων καταπονούνται περισσότερο.

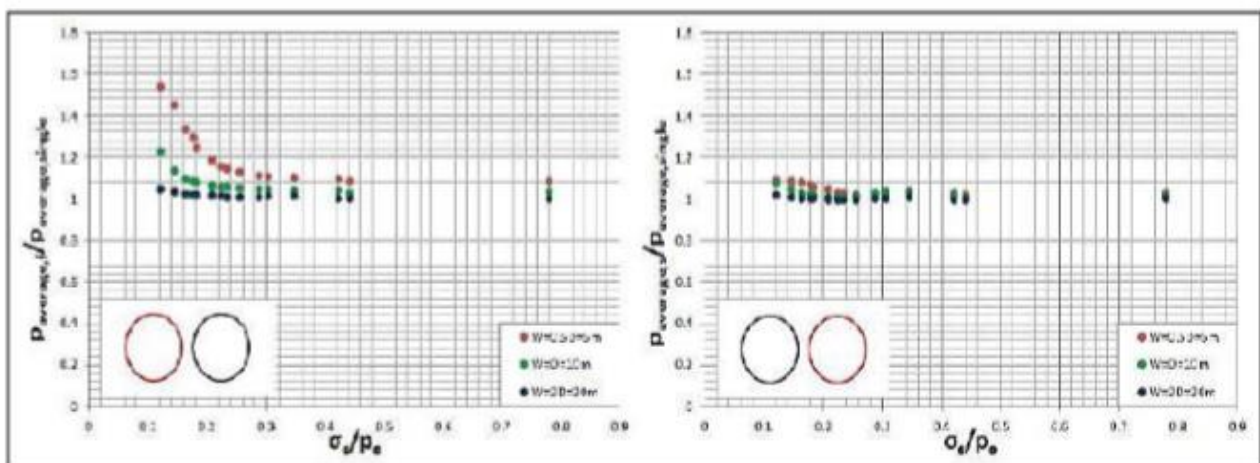
Στο σχήμα 2.17 απεικονίζεται η εξέλιξη των μέσων αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης κατά τη διάρκεια της εκσκαφής των δύο κλάδων για τις διατομές A (που απέχει 40m από την είσοδο της σήραγγας) και B (η οποία ανήκει στον δεύτερο κλάδο και απέχει 40m από το στόμιο). Αυτό που παρατηρείται είναι ότι αρχικά το κέλυφος άμεσης υποστήριξης του 1^{ου} κλάδου αναλαμβάνει αμέσως μετά την τοποθέτησή του (Θέση A) τις αναπτυσσόμενες πιέσεις, οι οποίες αυξάνονται έως το πέρας εκσκαφής του 1^{ου} κλάδου (Θέση B), γεγονός που υποδηλώνει ότι η άμεση υποστήριξη περιορίζει την ανάπτυξη των μετακινήσεων των γύρω κόμβων που προκαλεί η προχώρηση του μετώπου. Στα επόμενα βήματα (50° ~ 70°) όπου έχει ξεκινήσει η εκσκαφή του 2^{ου} κλάδου, το μέτωπο εκσκαφής βρίσκεται αρκετά μακριά από την εξεταζόμενη

διατομή του 1^{ου} κλάδου, άρα δεν υπάρχει ουσιαστική επιρροή σε αυτά τα στάδια και η αναπτυσσόμενη πίεση παραμένει σταθερή. Όσο η δεύτερη εκσκαφή προσεγγίζει την εξεταζόμενη διατομή (βήμα 70° ~ 80°) μέχρι και τη στιγμή που περνάει δίπλα από τη διατομή (βήμα 80° ~ 90°), η επιρροή διάνοιξης της δεύτερης σήραγγας στην πρώτη μεγαλώνει με αποτέλεσμα η αναπτυσσόμενη πίεση να αυξάνεται από εκεί που είχε σταθεροποιηθεί. Επιπλέον, είναι εμφανές ομοίως και ότι το κέλυφος άμεσης υποστήριξης του 2^{ου} κλάδου αναλαμβάνει και εκείνο αμέσως μετά την τοποθέτησή του (Θέση Δ) τις αναπτυσσόμενες πιέσεις.

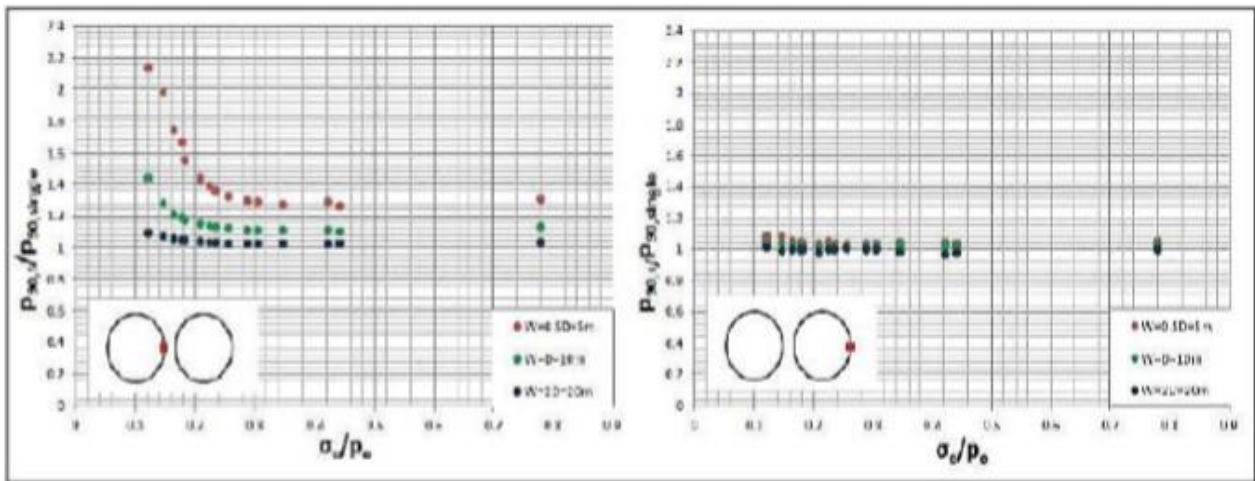
Στο σχήμα 2.18 η Μπεκρή Ε. (2012) συγκρίνει τις κατανομές των μέσων πιέσεων και διαπιστώνει ότι η μορφή της καμπύλης που αντιστοιχεί στον 1^ο κλάδο είναι εκθετική με μειούμενο ρυθμό μείωσης, ενώ η μορφή της καμπύλης που αντιστοιχεί στον 2^ο κλάδο προσεγγίζει την ευθεία γραμμή. Αυτό αποδεικνύει 1) την μεγαλύτερη καταπόνηση λόγω πιέσεων του 1^{ου} κλάδου σε σχέση με τον 2^ο, 2) καθώς η ποιότητα της βραχόμαζας βελτιώνεται η αλληλεπίδραση των δύο κλάδων τείνει να εκλείψει και μπορούν να θεωρηθούν ως ανεξάρτητες κατασκευές και 3) οι βελτιωμένες γεωτεχνικές συνθήκες οδηγούν σε μείωση των αναπτυσσόμενων φορτίσεων καθώς όσο βελτιώνονται ο λόγος των πιέσεων τείνει στη μονάδα.



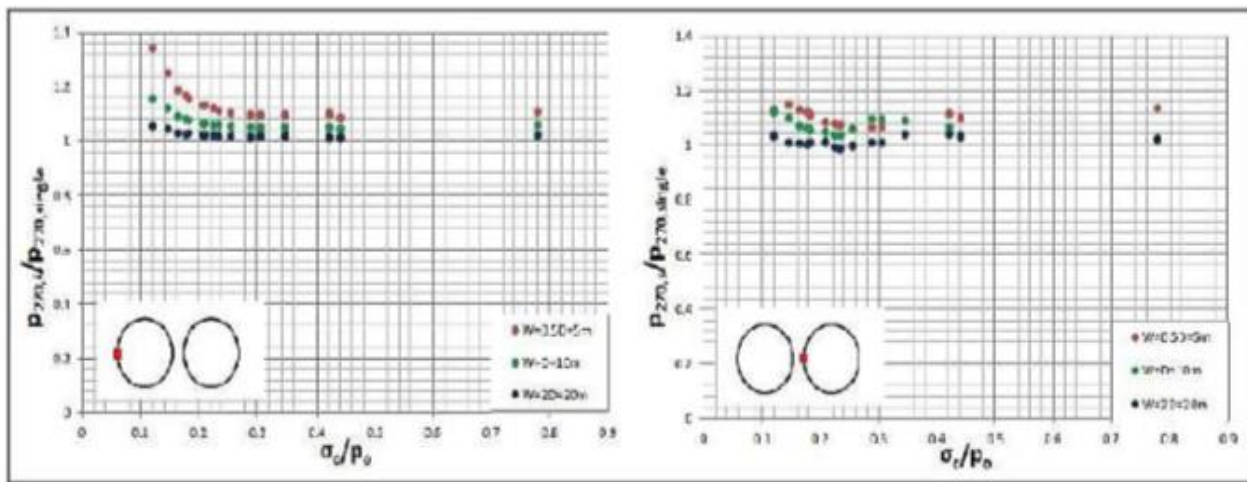
Σχήμα 2.19: Κατανομή των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, περί τη χαρακτηριστική διατομή, για τα τρία διαφορετικά πλάτη πυλώνων ($W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$), (Μπεκρή, 2012)



Σχήμα 2.20: Κατανομή ανηγμένης μέσης πίεσης επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $p_{average,(f/s)}/p_{average,single}$ ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_s/ρ_0 για $W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$, (Μπεκρή, 2012)



Σχήμα 2.21: Κατανομή ανηγμένης πίεσης της δεξιάς παρειάς ($\theta=90^\circ$) της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $p_{90,ff/s}/p_{90, single}$ ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_0 για $W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$, (Μπεκρή, 2012)



Σχήμα 2.22: Κατανομή ανηγμένης πίεσης της αριστερής παρειάς ($\theta=270^\circ$) της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $p_{270,ff/s}/p_{270, single}$ ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_0 για $W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$, (Μπεκρή, 2012)

Στο σχήμα 2.19 παρατηρείται έντονη ασυμμετρία φόρτισης στην περίπτωση που το πλάτος πυλώνα λαμβάνει την ελάχιστη τιμή ($W=0.5D$) από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις και γενικότερα ότι η αύξηση του πλάτους πυλώνα συνεπάγεται μικρότερη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχόμαζας. Συγκεκριμένα όταν το πλάτος πυλώνα είναι πάνω από 2 διαμέτρους οι κατασκευές μπορούν να θεωρηθούν ως ανεξάρτητες.

Στο σχήμα 2.20 διαπιστώνεται ότι η αλληλεπίδραση των δύο κλάδων γίνεται λιγότερο έντονη καθώς αυξάνεται η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων και επίσης όταν βελτιώνονται οι γεωτεχνικές συνθήκες.

Τέλος, στα σχήματα 2.21 και 2.22 επιβεβαιώνεται η εντονότερη καταπόνηση του κελύφους του πρώτου κλάδου σε σχέση με τον δεύτερο, καθώς το εύρος του λόγου των πιέσεων σε αυτό τον κλάδο είναι περισσότερο διευρυμένο. Επίσης, παρατηρείται ότι ο λόγος των πιέσεων στην παρειά των 90° του πρώτου κλάδου λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με τους αντίστοιχους λόγους μέσης πίεσης της παρειάς των 270° . Η παρειά αυτή είναι η εσωτερική για τον 1^ο κλάδο και συνεπώς

καταπονείται περισσότερο. Αντίστοιχα, ανάλογο φαινόμενο σε μικρότερη κλίμακα παρατηρείται για την παρεία των 270° του 2^{ου} κλάδου.

Συνοψίζοντας, η εν λόγω έρευνα καταλήγει στα εξής συμπεράσματα:

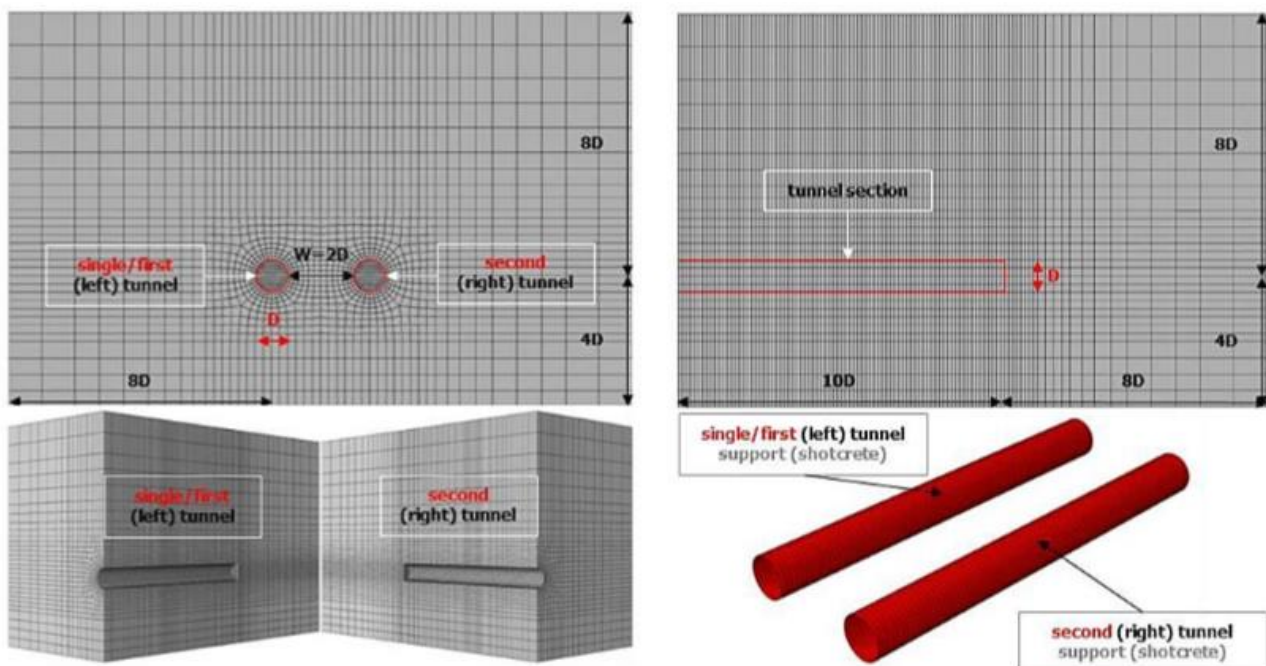
- i. Το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου της εκσκαφής καταπονείται εντονότερα σε σχέση με το κέλυφος του δεύτερου κλάδου
- ii. Εξετάζοντας τη χρονιοιστορία των κόμβων μίας τυχαίας διατομής του πρώτου κλάδου, η δυσμενέστερη κατάσταση σημειώνεται όταν ο δεύτερος κλάδος προσεγγίζει τη διατομή. Από τη στιγμή που ο δεύτερος κλάδος βρίσκεται 10m πριν την εξεταζόμενη διατομή μέχρι τη στιγμή που διέρχεται δίπλα από αυτή, σημειώνεται σημαντική αύξηση των πιέσεων στην άμεση υποστήριξη του πρώτου κλάδου. Καθώς το μέτωπο προσεγγίζει τη διατομή, προκαλείται χαλάρωση της περιβάλλουσας βραχώμαζας και τα εδαφικά στοιχεία τείνουν να εκδηλώσουν μετακινήσεις. Η δύσκαμπτη άμεση υποστήριξη που έχει ήδη τοποθετηθεί στον πρώτο κλάδο, δεν επιτρέπει την ανάπτυξη των μετακινήσεων και τη σύγκλιση της διατομής και η επίδραση της διάνοιξης του δεύτερου κλάδου στον πρώτο εκδηλώνεται με αύξηση των πιέσεων που ασκούνται στο κέλυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
- iii. Βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών συνεπάγεται μείωση του βαθμού αλληλεπίδρασης των δύο κλάδων. Για το εύρος των γεωτεχνικών παραμέτρων που εξετάστηκαν, οι δυσμενέστερες συνθήκες αντιστοιχούν σε λόγο μέσων πιέσεων ίσο με 1.6 (σημαντική αλληλεπίδραση των δύο κλάδων), ενώ όσο οι γεωτεχνικές συνθήκες βελτιώνονται ο λόγος τείνει στη μονάδα (μηδενική αλληλεπίδραση των δύο κλάδων).

Αναφορικά στο μέγεθος των πιέσεων, για μικρή εγκάρσια απόσταση ($W=0.5D=5m$) η αλληλεπίδραση των δύο κλάδων είναι έντονη, καθώς ο λόγος των μέσων πιέσεων για τον πρώτο κλάδο κυμαίνεται από 1.6 για δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες έως 1.1 για βελτιωμένη ποιότητα βραχώμαζας. Αύξηση του πλάτους του πυλώνα ($W=D=10m$) προκαλεί μετατόπιση της καμπύλης των πιέσεων σε χαμηλότερες τιμές, γεγονός που υποδηλώνει τη μείωση του βαθμού αλληλεπίδρασης. Για περαιτέρω αύξηση της εγκάρσιας απόστασης ($W=2D=20m$), οι δύο σήραγγες πρακτικά λαμβάνονται ως δύο ανεξάρτητες κατασκευές καθώς οι τιμές των λόγων των μέσων πιέσεων τείνουν στη μονάδα, ανεξάρτητα από την ποιότητα της βραχώμαζας. Οι αναπτυσσόμενες πιέσεις επί του κελύφους του δεύτερου κλάδου διατηρούνται σταθερές και ανεξάρτητες του πλάτους πυλώνα.

2.2.3. Chortis F., Kavvadas M.,(2015)

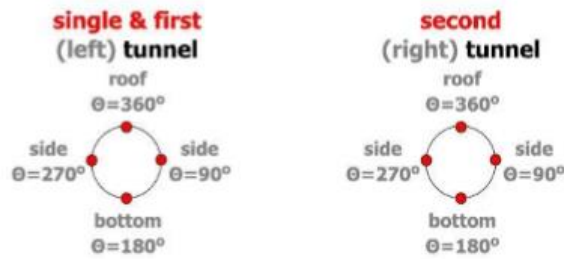
Οι Chortis F. & Kavvadas M. (2015) διερευνούν την αλληλεπίδραση μεταξύ δίδυμων, κυκλικής διατομής, υποστηριγμένων σηράγγων μέσω τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Η ανάλυση επικεντρώνεται στα φορτία της άμεσης υποστήριξης (του εκτοξευόμενου σκυροδέματος) και στα εντατικά μεγέθη (αξονικές δυνάμεις και καμπτικές ροπές) εξετάζοντας ένα μεγάλο εύρος από μεγέθη πλάτους πυλώνα, γεωτεχνικές συνθήκες και τιμές του ύψους υπερκείμενων γαιών. Επιπρόσθετη πτυχή της έρευνάς τους είναι ο προσδιορισμός της πιο κρίσιμης παραμέτρου αλληλεπίδρασης, δηλαδή της παραμέτρου που προκαλεί τη μεγαλύτερη επιρροή στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, και ο προσδιορισμός της κρίσιμης τιμής του πλάτους πυλώνα για την οποία ελαχιστοποιείται το φαινόμενο.

Η διατομή των σηράγγων που επιλέγεται είναι κυκλική διαμέτρου $D=8\text{m}$ και το μήκος εκσκαφής είναι $L=80\text{m}=10D$ για κάθε σήραγγα αντίστοιχα. Οι Chortis F. & Kanvadas M. (2015) δημιουργούν πέντε αριθμητικά μοντέλα με σκοπό να εξετάσουν την επιρροή του πλάτους πυλώνα. Οι τιμές πλάτους πυλώνα που εξετάζονται είναι $W=0.5D=4\text{m}$, $W=D=8\text{m}$, $W=2D=16\text{m}$, $W=3D=24\text{m}$, $W=4D=32\text{m}$ και οι τιμές του ύψους υπερκειμένων είναι $H=10D=80\text{m}$, $H=20D=160\text{m}$. Το μήκος εκσκαφής κάθε σήραγγας, η απόσταση του διαμήκου ορίου μπροστά από κάθε σήραγγα, η απόσταση των άνω-κάτω καθέτων ορίων και η απόσταση των εγκάρσιων ορίων από τον άξονα κάθε σήραγγας έχουν σχεδιαστεί σταθερές σε κάθε αριθμητικό μοντέλο. Η διαδικασία της εκσκαφής είναι κοινή για τις δύο σήραγγες και προσομοιώνει με ακρίβεια την συμβατική εκσκαφή σήραγγας σε ασθενή βραχώμαζα. Πιο συγκεκριμένα, προσομοιώνεται ως ολομέτωπη προχώρηση με βήμα εκσκαφής ίσο με 1m . Η πρωταρχική υποστήριξη (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) εφαρμόζεται (ενεργοποιείται) σε απόσταση από το μέτωπο της σήραγγας ίση με 1m . Πρόκειται για μία τυπική διαδικασία εκσκαφής σύμφωνα με την Αυστριακή Μέθοδο NATM. Η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας πραγματοποιείται αμέσως μετά την διάνοιξη της αριστερής. Για τον προσδιορισμό της επιρροής της διάνοιξης της δεύτερης σήραγγας στην πρώτη, σαν βάση σύγκρισης θεωρήθηκε η αριστερή σήραγγα πριν ξεκινήσει η εκσκαφή της δεξιάς και ονομάζεται << μονή σήραγγα >> (single tunnel). Από τη στιγμή εκκίνησης της εκσκαφής της δεξιάς σήραγγας, η αριστερή σήραγγα ονομάζεται πλέον «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) και αντίστοιχα η δεξιά «δεύτερη σήραγγα» (second tunnel). Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης στο οποίο έγινε διερεύνηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης.

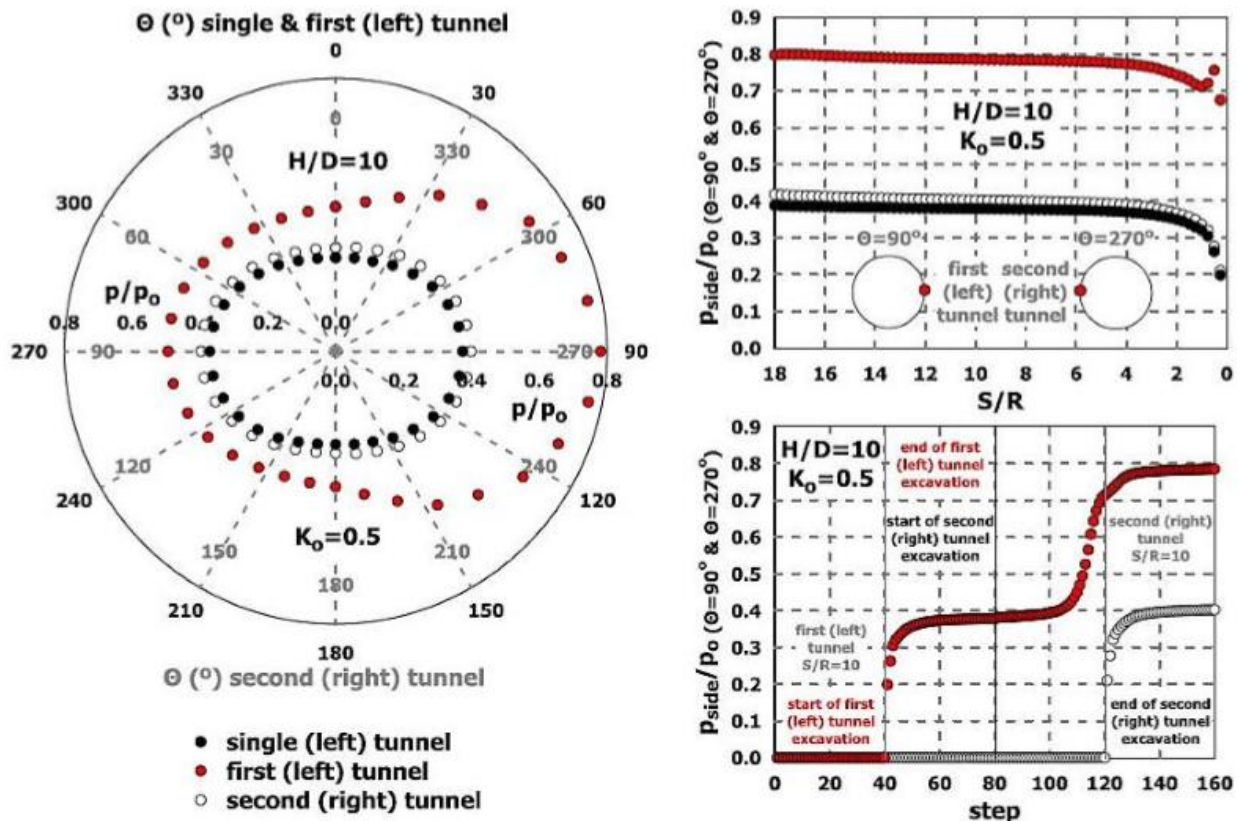


Εικόνα 2.5: Αριθμητικό μοντέλο για πλάτος πυλώνα $W=2D=16\text{m}$ (Chortis F. & Kanvadas M., 2015)

Η βραχώμαζα προσομοιώνεται ως ισότροπο γραμμικώς ελαστικό – απολύτως πλαστικό υλικό το οποίο ακολουθεί το κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb. Η παράμετρος παραμορφωσιμότητας (μέτρο ελαστικότητας E) έχει προσδιοριστεί κατά Hoek & Diederichs (2006). Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προσομοιώνεται ως ισότροπο, γραμμικώς ελαστικό υλικό. Η σύγκριση πραγματοποιείται ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας του αριθμητικού μοντέλου στη μέση του πυλώνα και ο προσανατολισμός της γωνίας στην αριστερή και τη δεξιά σήραγγα έχει οριστεί σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού (Σχήμα 2.23).



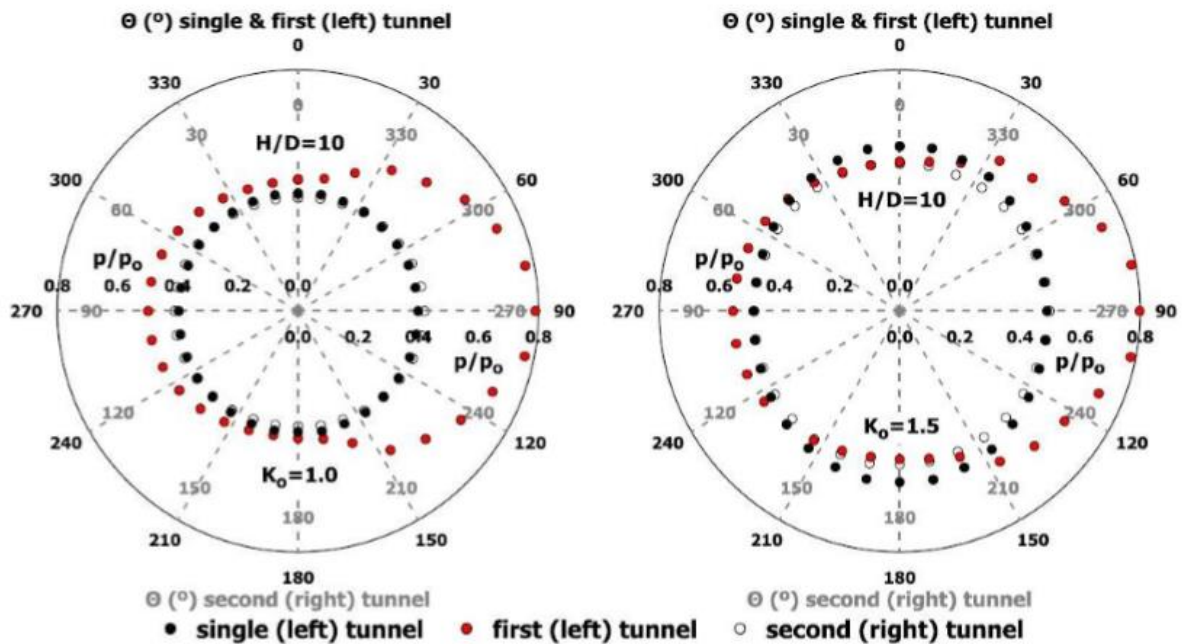
Σχήμα 2.23: Ωρολογιακός προσανατολισμός της γωνίας στην αριστερή και τη δεξιά σήραγγα (Chortis F. & Kavnadas M., 2015)



Σχήμα 2.24: Κατανομή των φορτίων στην τυπική διατομή (αριστερά), κατανομή των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων στην διαμήκη διεύθυνση (πάνω δεξιά) και χρονιοιστορία των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων (κάτω δεξιά) για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/p_0 , για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$, για $k_0=0.5$ και για λόγο ύψους υπερκείμενων γαιών $H/D = 10$ (Chortis F. & Kavnadas M., 2015)

Σύμφωνα με το σχήμα 2.24, παρατηρείται αρχικά (αριστερά) μία σημαντική αύξηση των φορτίων στην «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) τα οποία αναπτύσσονται ασύμμετρα με τις μέγιστες τιμές να εμφανίζονται στην εσωτερική παρεία ($\theta=90^\circ$). Αντίθετα, οι τιμές των φορτίων για τη «δεύτερη σήραγγα» αποκλίνουν να μην από τις αντίστοιχες τιμές για τη «μονή σήραγγα» (single tunnel) αλλά παραμένουν δε σε χαμηλά επίπεδα και αρκετά κοντά με τις τιμές της «μονής σήραγγας» (single tunnel). Αυτή η διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ «πρώτης σήραγγας» (first tunnel) και «δεύτερης σήραγγας» (second tunnel) οφείλεται στο γεγονός ότι η «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) έχει ήδη σκαφτεί και υποστηριχτεί κατά τη διάνοιξη της «δεύτερης σήραγγας» (second tunnel) με αποτέλεσμα η δυνητική ανακατανομή των τάσεων που προκαλείται λόγω της εκσκαφής της «δεύτερης σήραγγας» (second tunnel) να μην αναλαμβάνεται μέσω περαιτέρω σύγκλισης λόγω της τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης στην «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) με συνέπεια την αύξηση των επιβαλλόμενων φορτίων στην «πρώτη σήραγγα» (first tunnel). Όσον αφορά τη «δεύτερη σήραγγα» (second tunnel), εκσκαπτείται ήδη σε μία περιοχή που έχει πλαστικοποιηθεί, στην περίπτωση πτωχών γεωτεχνικών συνθηκών, με ανακατανομημένο πεδίο τάσεων με

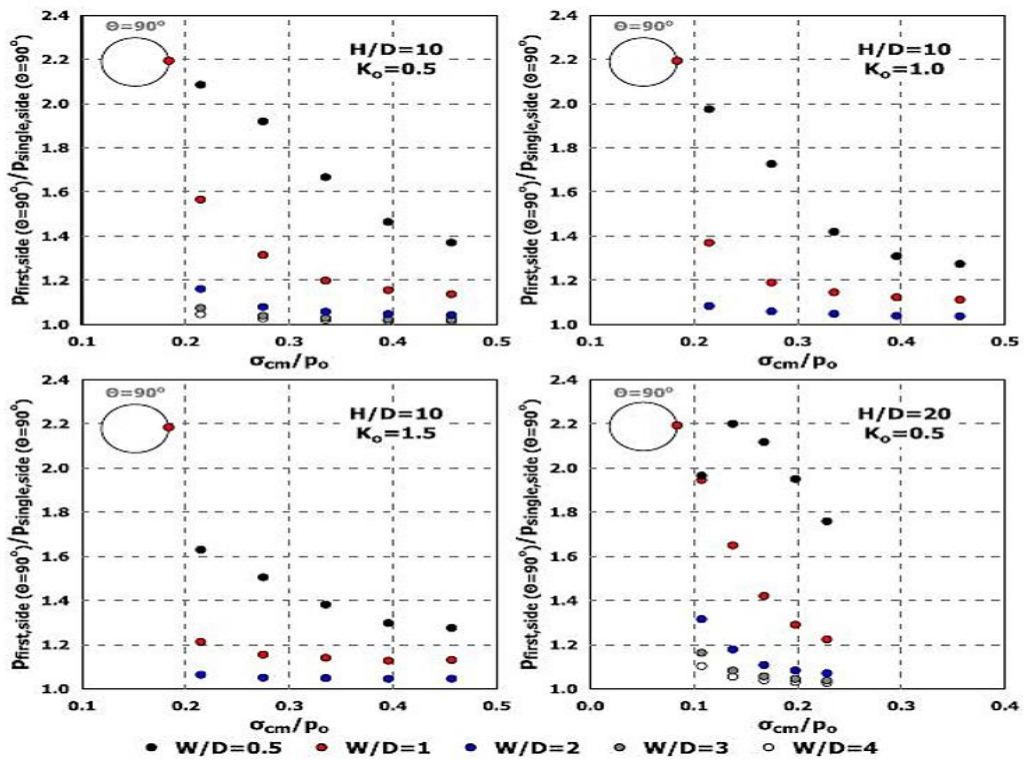
αποτέλεσμα τη χαμηλή αύξηση των φορτίων στην «δεύτερη σήραγγα» (second tunnel). Αυτή η μορφή απόκρισης της κατανομής των φορτίων γίνεται αντιληπτή και από το σχήμα πάνω δεξιά στη διαμήκη διεύθυνση των σηράγγων για τις εσωτερικές παρειές ($\theta=90^\circ$ & $\delta=270^\circ$) στις οποίες εμφανίζονται οι δυσμενέστερες τιμές λόγω της αλληλεπίδρασης, καθώς και από την χρονοιστορία των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων (κάτω δεξιά) στην οποία η επιρροή της «δεύτερης σήραγγας» (second tunnel) στην «πρώτη» (first) είναι εμφανής.



Σχήμα 2.25: Κατανομή των φορτίων για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_0=1.0$ (αριστερά) και για $k_0=1.5$ (δεξιά) για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/p_0 και για λόγο ύψους υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ (Chortis F. & Kanvadas M., 2015)

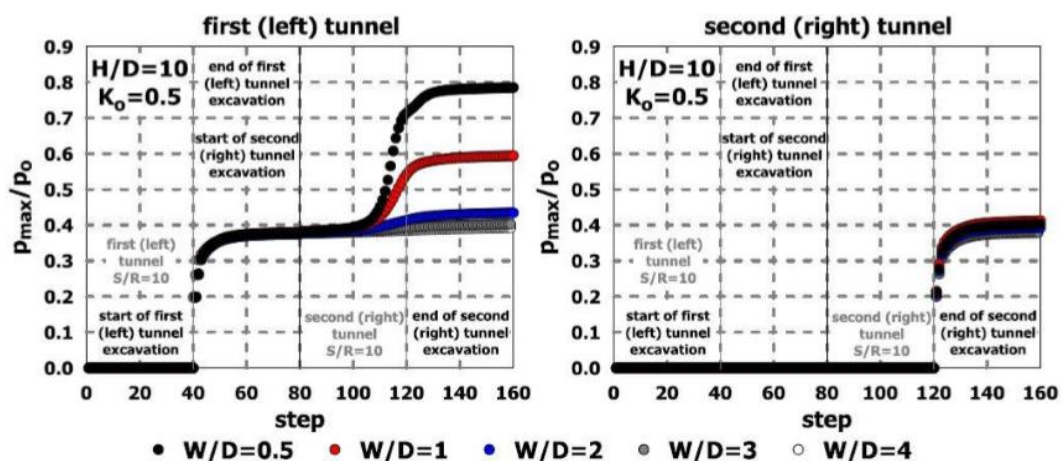
Στο σχήμα 2.25 είναι εμφανές ότι η κατανομή των φορτίων ακολουθεί την ίδια διαδρομή με εκείνη που έχει ήδη παρατηρηθεί με τις δυσμενέστερες τιμές να εντοπίζονται για την «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) στην εσωτερική παρειά $\theta=90^\circ$ ανεξαρτήτως της τιμής του k_0 . Επίσης, φαίνεται πως η εκσκαφή της «δεύτερης σήραγγας» (second tunnel) λειτουργεί ευεργετικά στην «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) στην περίπτωση του $k_0=1.5$, καθώς τα φορτία στην οροφή και στο δάπεδο είναι μειωμένα σε σχέση με τα αντίστοιχα στην περίπτωση εκσκαφής «μονής σήραγγας» (single tunnel). Αντίθετα, όταν $k_0=1.0$ τα φορτία στην «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) αυξάνονται σε όλες τις περιοχές της σήραγγας λόγω διάνοιξης της «δεύτερης» (second tunnel).

Τα αποτελέσματα του φαινομένου της αλληλεπίδρασης παρουσιάζονται δευτερευόντως από τους Chortis F., Kanvadas M. (2015) για όλες τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν μέσω του λόγου των φορτίων πρώτης/μονής στην εσωτερική παρειά της «πρώτης σήραγγας» (first tunnel) ($\theta=90^\circ$), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.26: Λόγος φορτίων πρώτης/μονής στην εσωτερική παρειά της «πρώτης σήραγγας» ($\theta=90^\circ$) ως συνάρτηση του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διάφορες τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (k_o) και λόγου ύψους υπερκείμενων γαιών (H/D), (Chortis F. & Kavnadas M., 2015)

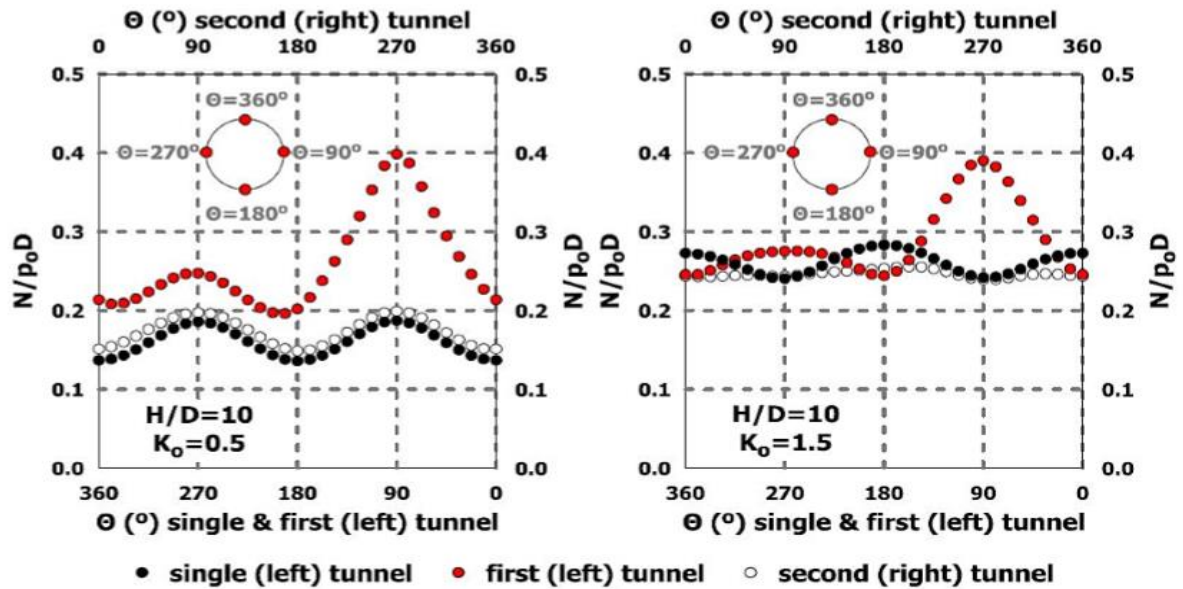
Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης σε όρους ποσοστιαίας αύξησης φορτίων είναι υψηλότερο για $k_o=0.5$ και χαμηλότερο για $k_o=1.5$. Ο βαθμός της αύξησης καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή του πλάτους πυλώνα. Είναι εμφανές από το σχήμα ότι κρίσιμο πλάτος πυλώνα θα μπορούσε να θεωρηθεί το $(W/D)_{crit}=2$, καθώς για τιμές μεγαλύτερες του 2 το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης παραμένει περίπου στο ίδιο επίπεδο. Σχετικά με την επίδραση του λόγου ύψους υπερκείμενων γαιών, παρατηρείται ότι η αύξηση του συγκεκριμένου λόγου οδηγεί σε ενίσχυση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης.



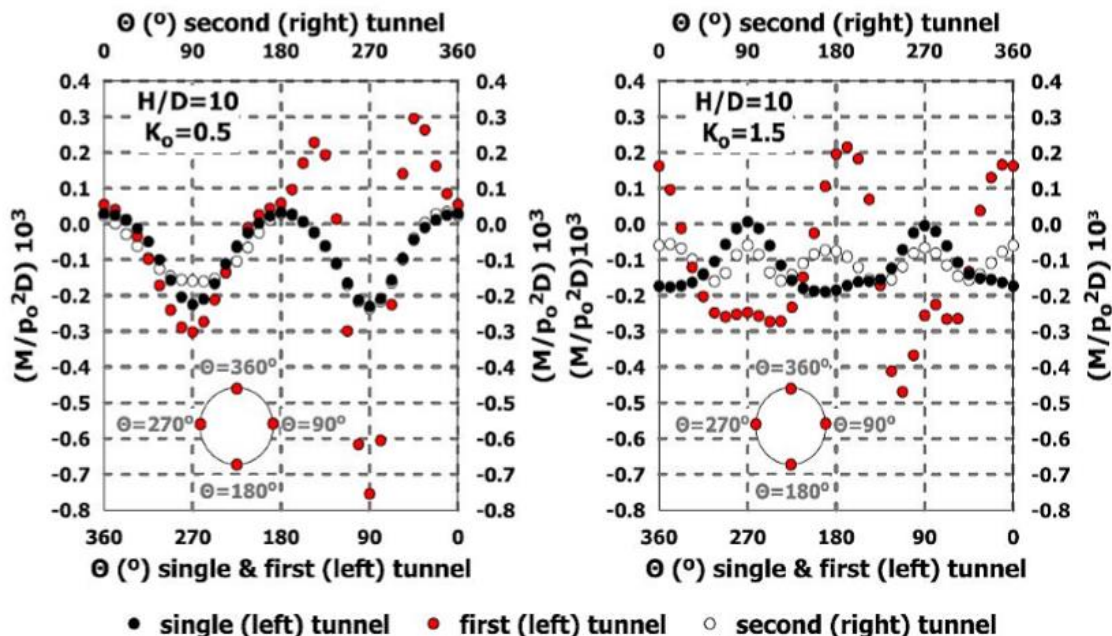
Σχήμα 2.27: Χρονοιστορία των φορτίων (μέγιστη τιμή) για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o), συντελεστή γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$ και λόγο ύψους υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ για την «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) στα αριστερά και για τη «δεύτερη σήραγγα» (second tunnel) στα δεξιά, (Chortis F. & Kavnadas M., 2015)

Στο σχήμα 2.27 απεικονίζεται η χρονοιστορία των φορτίων για την «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) και για τη «δεύτερη σήραγγα» (second tunnel) για τη διατομή με κανονικοποιημένη διαμήκη

απόσταση $S/R=10$ η οποία είναι σταθερή και για τις δύο σήραγγες. Είναι εμφανές ότι η επίδραση του πλάτους πυλώνα σχετίζεται με την αύξηση των φορτίων για την «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) η οποία τελικά σταθεροποιείται για $(W/D)>2$. Αντίθετα, τα φορτία της «δεύτερης σήραγγας» (second tunnel) δεν επηρεάζονται από την τιμή του πλάτους πυλώνα. Επιπροσθέτως, φαίνεται πως το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης ξεκινάει σε μία απόσταση περίπου $2D$ πριν από τη διατομή που εξετάζεται. Αυτή η απόσταση εξαρτάται κυρίως από την τιμή του πλάτους πυλώνα και από το λόγο των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o .



Σχήμα 2.28: Κατανομή της αξονικής δύναμης για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o = 0.5$ (αριστερά) και $k_o = 1.5$ (δεξιά) στην τυπική διατομή για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o , πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ και λόγο ύψους υπερκείμενων γαιών $H/D = 10$, (Chortis F. & Kanvadas M., 2015)



Σχήμα 2.29: Κατανομή της ροπής κάμψης για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o = 0.5$ (αριστερά) και $k_o = 1.5$ (δεξιά) στην τυπική διατομή για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o , πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ και λόγο ύψους υπερκείμενων γαιών $H/D = 10$, (Chortis F. & Kanvadas M., 2015)

Τέλος, στα σχήματα 2.28 και 2.29 παρουσιάζεται η διαφοροποίηση που προκαλεί το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης και στις εσωτερικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην υποστήριξη των

σηράγγων. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 2.28 παρουσιάζεται η επίδραση της εκσκαφής της «δεύτερης σήραγγας» (second tunnel) στην «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) στην αξονική δύναμη και αντίστοιχα στο Σχήμα 2.29 στην ροπή κάμψης. Γίνεται αντιληπτό ότι το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης προκαλεί σημαντική αύξηση και της αξονικής δύναμης και της ροπής κάμψης για την «πρώτη σήραγγα» και η μεγιστοποίηση αυτής της απόκρισης τοποθετείται στην εσωτερική παρειά της σήραγγας ($\theta=90^\circ$). Επίσης, όπως συμβαίνει και με το λόγο φορτίων, η επίδραση του φαινομένου στη «δεύτερη σήραγγα» (second tunnel) είναι εμφανώς χαμηλότερη.

Συμπερασματικά, η έρευνα των Chortis F. & Kanvadas M. (2015) απέδειξε ότι σημαντικά φαινόμενα αλληλεπίδρασης μεταξύ γειτονικών παράλληλων σηράγγων λαμβάνουν χώρα, ιδιαίτερα όταν η μεταξύ τους εγκάρσια απόσταση είναι μικρή. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων έδειξαν συγκεκριμένα ότι η αλληλεπίδραση οδηγεί στη διαφοροποίηση του μεγέθους και κατανομής των φορτίων και των εντατικών μεγεθών της άμεσης υποστήριξης. Όσον αφορά την «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) που διανοίγεται (την αριστερή), αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή και για τις δύο σήραγγες, παρατηρείται σημαντική αύξηση των φορτίων η οποία αναπτύσσεται μη συμμετρικά με τις μέγιστες τιμές να συγκεντρώνονται στην εσωτερική παρειά ($\theta=90^\circ$) ανεξαρτήτως της τιμής του λόγου γεωστατικών τάσεων k_0 . Αντίθετα, όσον αφορά τη «δεύτερη σήραγγα» (second tunnel), παρατηρείται η εξής παρόμοια συμπεριφορά : τα φορτία αποκλίνουν από το μέγεθος των φορτίων που αναπτύσσονται στη «μονή σήραγγα» (single tunnel) σε χαμηλότερο βαθμό όμως συγκριτικά με τα φορτία της «πρώτης σήραγγας» (first tunnel) που αναπτύσσονται όταν έχει διανοιχθεί και η «δεύτερη» (second tunnel). Αντίστοιχα το ίδιο συμβαίνει και με τα εντατικά μεγέθη στην άμεση υποστήριξη. Επιπλέον, προσδιορίστηκε ως κρίσιμη τιμή του πλάτους πυλώνα $W/D=2$, γεγονός που δείχνει ότι για τιμές υψηλότερες αυτού του πλάτους το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι περίπου στο ίδιο επίπεδο. Τέλος, καταλήγουν στο γεγονός ότι ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων k_0 είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει το εύρος της αλληλεπίδρασης λόγω του διαφορετικού μηχανισμού ανακατανομής που αναπτύσσεται. Συγκεκριμένα, παρατηρούν πως το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης σε όρους ποσοστιαίας αύξησης φορτίων είναι υψηλότερο για $k_0=0.5$ και χαμηλότερο για $k_0=1$.

2.2.4. Νύχτη Φωτεινή (2016)

Η μεταπτυχιακή εργασία της Φωτεινής Νύχτη (2016) εκπονήθηκε με σκοπό τη διερεύνηση και την ποσοτικοποίηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης βαθιών σηράγγων. Η εν λόγω εργασία έδωσε έμφαση στην επίδραση τόσο του πλάτους πυλώνα και των γεωτεχνικών συνθηκών όσο και στη σχετική απόσταση μεταξύ των δύο μετώπων εκσκαφής και στη δυσκαμψία των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Πραγματοποιήθηκαν τρισδιάστατες παραμετρικές αναλύσεις με τη βοήθεια του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, ενώ η ποσοτικοποίηση του φαινομένου γίνεται σε όρους φορτίων και εντατικών μεγεθών (αξονικές δυνάμεις και καμπτικές ροπές) επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης.

Οι δύο σήραγγες είναι κυκλικές και έχουν ίδια διάμετρο ίση με $D=8\text{m}$. Το ύψος υπερκείμενων διατηρήθηκε σταθερό σε όλες τις αναλύσεις και είναι ίσο με $H=10D=80\text{m}$. Το πλάτος πυλώνα που διερευνήθηκε έχει τις εξής τιμές :

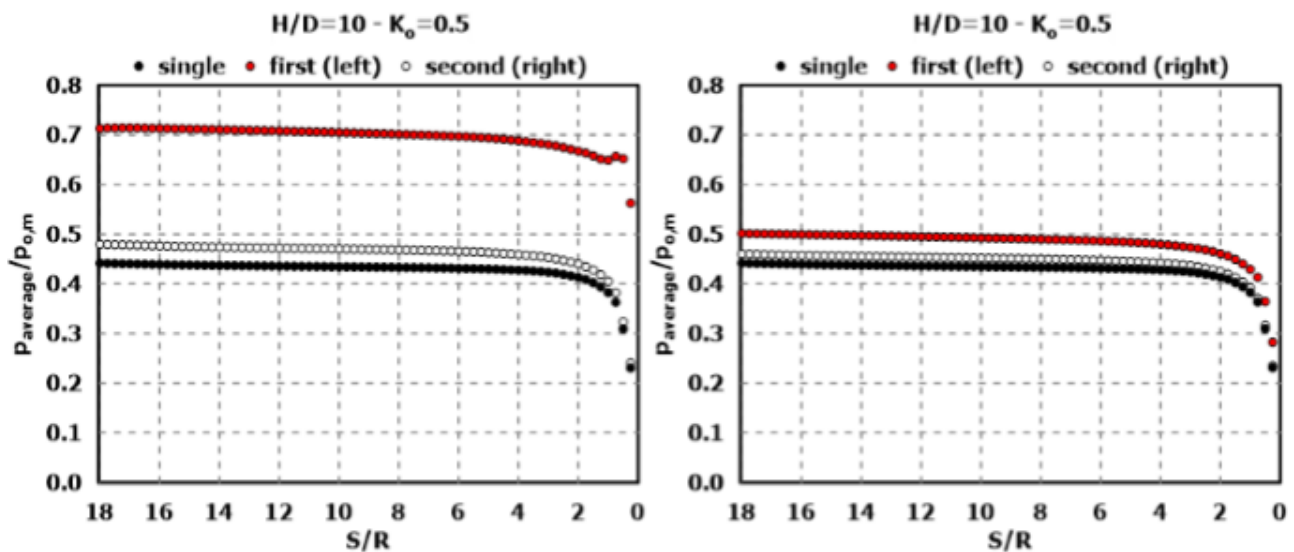
$$W=0.5D=4\text{m}$$

$$W=D=8\text{m}$$

$$W=2D=16\text{m}$$

Πραγματοποιήθηκαν, επιπλέον, αναλύσεις που αφορούν την διερεύνηση της επιρροής της σχετικής απόστασης εκσκαφής των μετώπων (lagging distance) και συγκεκριμένα μία ανάλυση κατά την οποία η δεύτερη – δεξιά σήραγγα ξεκινά να διανοίγεται μετά το πέρας της διάνοιξης και υποστήριξης της πρώτης - αριστερής σήραγγας, μία ακόμη ανάλυση που η δεύτερη – δεξιά σήραγγα ξεκινά όταν το μέτωπο της πρώτης – αριστερής βρίσκεται στο μέσον ($Y=40m$) και μία ανάλυση για την ταυτόχρονη έναρξη διάνοιξης και για τις δύο σήραγγες.

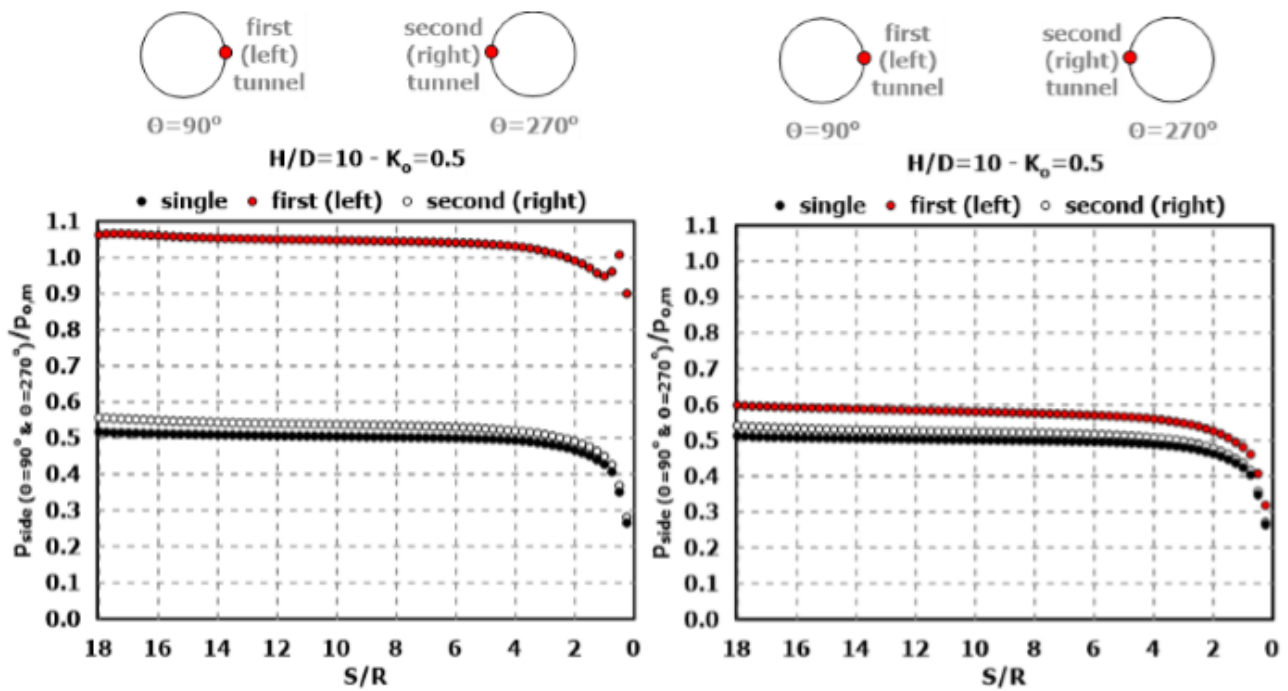
Επειδή επιθυμείται αντιστοίχιση των αποτελεσμάτων της εν λόγω εργασίας με την υπό εξέταση έρευνα, παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα που αναφέρονται στην επίδραση του πλάτους πυλώνα μόνο στην περίπτωση που η διάνοιξη της δεξιάς σήραγγας πραγματοποιείται όταν έχει διανοιχθεί πλήρως η αριστερή για τα διάφορα πλάτη πυλώνα και τις διάφορες γεωτεχνικές συνθήκες.



Σχήμα 2.30: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first*, *second*, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη μέση γεωστατική τάση, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων, (Νύχτη Φωτεινή, 2016)

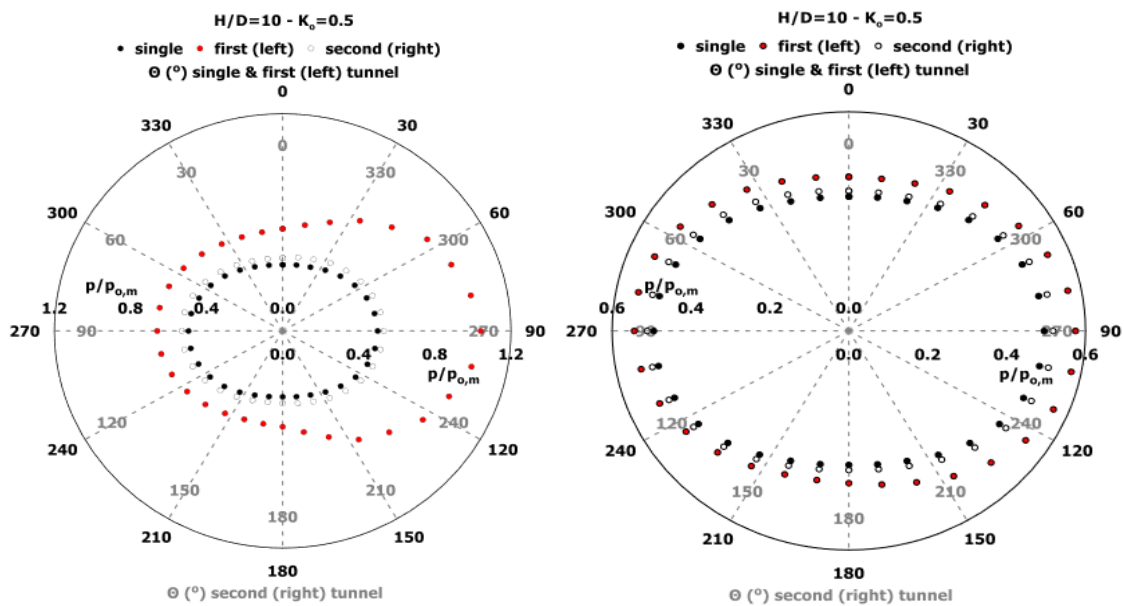
Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται αύξηση του φορτίου στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της "first" σήραγγας σε σχέση με την "single" λόγω της διάνοιξης της "second". Επίσης, όταν το πλάτος πυλώνα είναι 4m τα μεγέθη στην "first" σήραγγα είναι αυξημένα κατά 69% σε σχέση με την *single*. Εν αντιθέσει, όσο το πλάτος πυλώνα αυξάνεται η αλληλεπίδραση εξαλείφεται. Κάτι τέτοιο παρατηρείται στο δεξί διάγραμμα, με πλάτος πυλώνα 16m, που η αντίστοιχη ποσοστιαία αύξηση στο φορτίο είναι μόλις 17%.

Αύξηση των τιμών του φορτίου παρατηρείται και στην "second" σήραγγα, βέβαια πολύ μικρότερη σε σχέση με την "first". Για την περίπτωση του πλάτους πυλώνα 4m η αύξηση στα φορτία είναι 17%, ενώ στην περίπτωση του πλάτους πυλώνα 16m είναι 7%. Είναι φανερό ότι η αύξηση στη "second" υπάρχει μεν, ωστόσο είναι πολύ μικρή συγκρινόμενη με την αντίστοιχη αύξηση στη "first".



Σχήμα 2.31: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first*, *second*, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D = 2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη μέση γεωστατική τάση, (Νύχτη Φωτεινή, 2016)

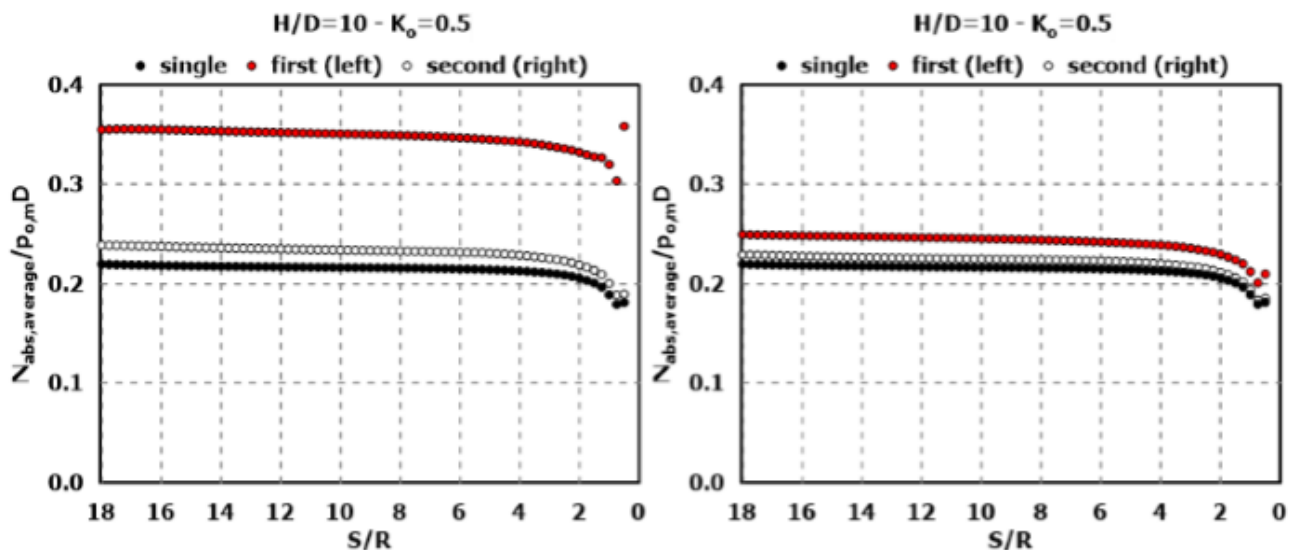
Η αύξηση που έχει επέλθει στο φορτίο της “first” σήραγγας είναι και εδώ εμφανής, με τη διαφορά ότι εδώ τα αποτελέσματα είναι κατά πολύ αυξημένα σε σχέση με τα παραπάνω, κάτι το οποίο είναι απολύτως φυσιολογικό δεδομένου ότι την μεγαλύτερη επιρροή του φαινομένου την υφίστανται οι εσωτερικές παρειές. Πιο συγκεκριμένα, για πλάτος πυλώνα 4m, η αύξηση της “first” σε σχέση με την “single” είναι 112%, ενώ για πλάτος πυλώνα 16m η αντίστοιχη αύξηση είναι 20%. Αναφορικά με την “second”, η αύξηση είναι 12% για πλάτος πυλώνα 4m και αντίστοιχα 6% για πλάτος πυλώνα 16m. Και σε αυτά τα διαγράμματα λοιπόν η επίδραση του πλάτους πυλώνα είναι εμφανής.



Σχήμα 2.32: Κατανομή του φορτίου στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη μέση γεωστατική τάση, (Νύχτη Φωτεινή, 2016)

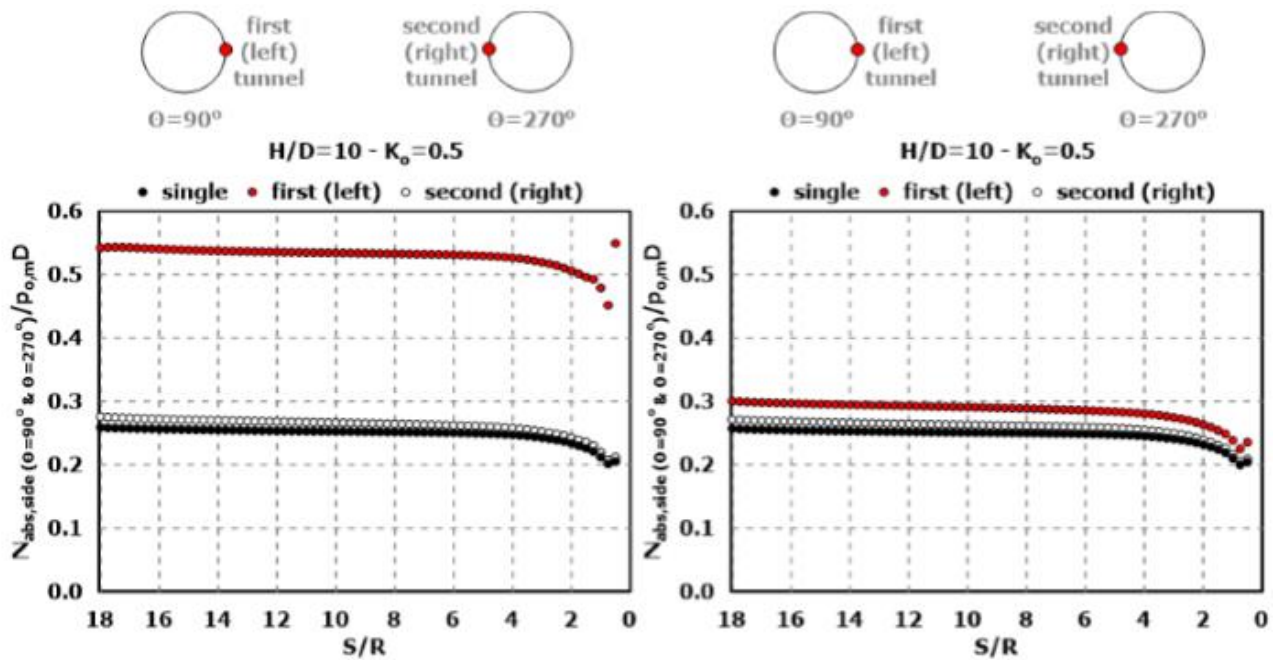
Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται και εδώ σαφές ότι η διάνοιξη της δεξιάς σήραγγας προκαλεί αύξηση στο φορτίο στην ήδη διανοιχθείσα σήραγγα σε όλη της την περιφέρεια και ειδικά στην εσωτερική παρειά. Επίσης, η "single" και η "second" παρουσιάζουν παρόμοια κατανομή των φορτίων γύρω από τη σήραγγα, με την "second" να φέρει μεγαλύτερα μεγέθη σε σχέση με την "single" και να μην επηρεάζεται από την "left". Εκείνο που παρουσιάζεται για πρώτη φορά, είναι το γεγονός ότι οι τιμές των φορτίων είναι μικρότερες στην στέψη και στον πυθμένα σε σχέση με τις παρειές. Αυτό ίσως να οφείλεται στην τιμή του $k_0=0.5$, καθώς οι αρχικές κατακόρυφες τάσεις είναι μεγαλύτερες από τις αρχικές οριζόντιες και έτσι στην περιοχή της στέψης και του πυθμένα που οι κατακόρυφες τάσεις είναι ακτινικές μειώνονται λόγω της εκσκαφής της σήραγγας, ενώ οι οριζόντιες που είναι εφαπτομενικές αυξάνονται αντίστοιχα. Όπως και πριν, έτσι και εδώ παρατηρείται πόσο ριζική είναι η επίδραση του πλάτους πυλώνα. Όταν το πλάτος πυλώνα είναι 4m, το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι έντονο εφόσον υπάρχει πολύ μεγάλη αύξηση των τιμών της "first" σε σχέση με τη "single", αντίθετα όταν είναι 2m κοντεύει να εξαλειφθεί, οι τιμές συγκλίνουν.

Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και για τις τιμές των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, σύμφωνα με τα παρακάτω σχήματα:

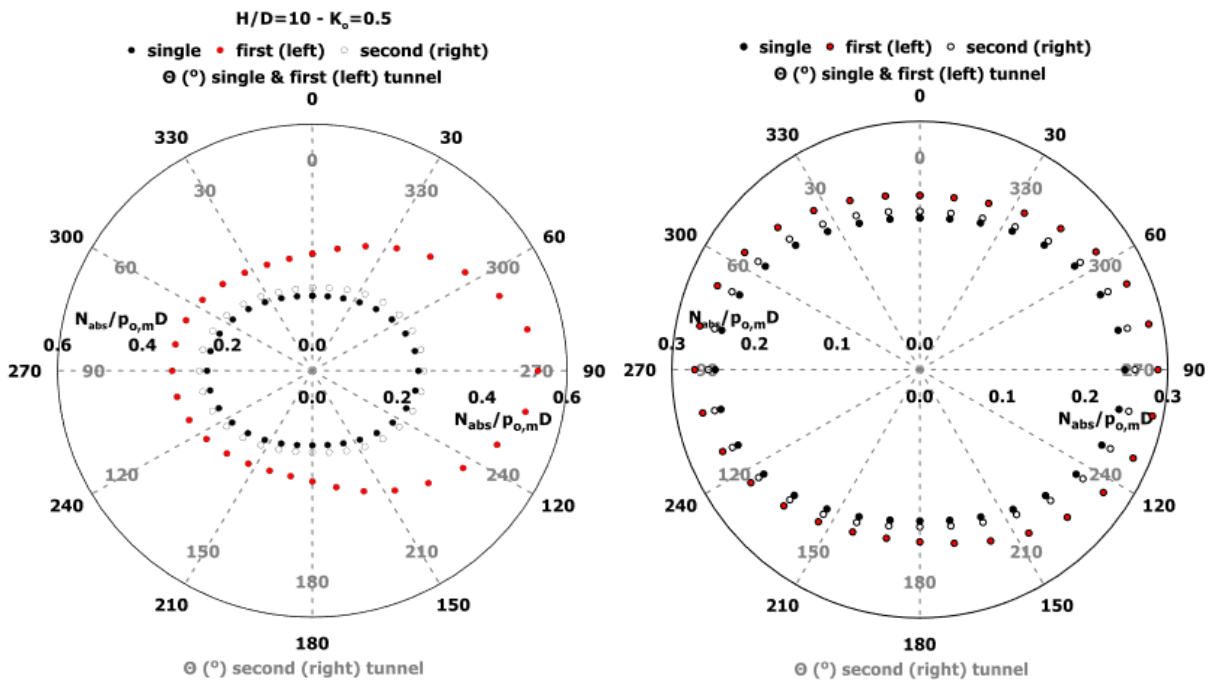


Σχήμα 2.33: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτη πυλώνα αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί τη διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων, (Νύχτη Φωτεινή, 2016)

Όπως συμβαίνει και με τα φορτία, έτσι και με τις αξονικές δυνάμεις στις εσωτερικές παρειές (Σχήμα 2.34) η αύξηση των τιμών λόγω του φαινομένου αλληλεπίδρασης είναι πιο έντονη και πιο συγκεκριμένα, η αύξηση που έχει επέλθει στις δυνάμεις της "first" σε σχέση με την "single" είναι 21% για πλάτος πυλώνα 4m, ενώ η αντίστοιχη αύξηση για πλάτος πυλώνα 16m είναι μόλις 15%. Επίσης, η αύξηση της "second" σε σχέση με την "single" είναι 8% για πλάτος πυλώνα 4m και 4% για πλάτος πυλώνα 16m.



Σχήμα 2.34: Μηκομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτη πυλώνα αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί τη διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων, (Νύχτη Φωτεινή, 2016)



Σχήμα 2.35: Κατανομή της αξονικής δύναμης στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί τη διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων, (Νύχτη Φωτεινή, 2016)

Συγκεντρωτικά, λοιπόν, τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξε η εν λόγω έρευνα είναι τα εξής:

- Η εκσκαφή σήραγγας που γειτνιάζει με προυπάρχουσα προκαλεί πάντα αύξηση του φορτίου και των εντατικών μεγεθών που καλείται να παραλάβει η άμεση υποστήριξη που έχει τοποθετηθεί στην προυπάρχουσα σήραγγα, σε σχέση με εκείνα που θα έπρεπε να

παραλάβει αν είχε διανοιχτεί μόνη, όπως επίσης και σε σχέση με εκείνα που παραλαμβάνει η άμεση υποστήριξη της δεύτερης σήραγγας.

- Όσο αυξάνεται το πλάτος πυλώνα, τόσο μειώνεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης και μάλιστα μπορεί να θεωρηθεί ότι το φαινόμενο περιορίζεται σε χαμηλό και αποδεκτό επίπεδο για τιμές του πλάτους πυλώνα μεγαλύτερες ή ίσες με 2D.
- Όσο βελτιώνονται οι γεωτεχνικές συνθήκες, τόσο μικρότερα μεγέθη αναπτύσσονται στο κέλυφος της άμεσης υποστήριξης και τόσο περισσότερο εξαλείφεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.
- Όταν για την έναρξη της διάνοιξης της δεύτερης σήραγγας μεσολαβεί μεγάλη απόσταση από το πέρας της πρώτης, την μεγαλύτερη επιρροή την δέχεται η πρώτη σήραγγα και κυρίως η εσωτερική παρειά της (η παρειά που γειτνιάζει με τη δεύτερη σήραγγα). Αυτό συμβαίνει γιατί η πρώτη σήραγγα καλείται να παραλάβει το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου που προκαλείται από την εκ νέου χαλάρωση της βραχώμαζας λόγω διάνοιξης της δεύτερης σήραγγας καθώς η δυσκαμψία του συστήματος του περιβάλλοντος γεωυλικού – άμεσης υποστήριξης της 1^{ης} σήραγγας εμποδίζει την ανάληψη της διαταραχής ως επιπρόσθετη σύγκλιση με αποτέλεσμα να δημιουργείται πλεονάζουσα φόρτιση στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
- Κατά την ταυτόχρονη διάνοιξη των δύο σηράγγων, το φαινόμενο ισομοιράζεται στις δύο σήραγγες και έτσι παρατηρείται μείωση του φορτίου και των εντατικών μεγεθών στην πρώτη σήραγγα αλλά αύξησή τους στην δεύτερη. Δηλαδή, η ταυτόχρονη διάνοιξη των δύο σηράγγων θεωρείται ευμενέστερη μέθοδος διάνοιξης, μόνο υπό την προϋπόθεση τα δύο μέτωπα εκσκαφής να μην κλονίζονται και να μην εκδηλώνονται ανεξέλεγκτες μετακινήσεις.
- Η εφαρμογή πιο δύσκαμπτων μέτρων υποστήριξης (μεγαλύτερο πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος) προκαλεί μικρή αύξηση στα φορτία και στις αξονικές δυνάμεις, αλλά σημαντική αύξηση στις καμπτικές ροπές. Επομένως, προτείνεται η τοποθέτησή τους μόνο υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει περιορισμός ως προς το μέγεθος ακτινικών μετατοπίσεων (συγκλίσεων) που εκδηλώνονται.

2.2.5. Ψυχάρη Ειρήνη (2016)

Η διπλωματική εργασία της Ψυχάρη Ειρήνης (2016) πραγματεύεται τη διερεύνηση των φαινομένων της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων εφαρμόζοντας τρισδιάστατες αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Για τη λεπτομερή εξαγωγή αποτελεσμάτων σε ένα ευρύτερο φάσμα διαφοροποιήθηκαν διάφορες παράμετροι όπως το πλάτος πυλώνα, οι γεωτεχνικές συνθήκες, οι συντελεστές οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και οι συντελεστές αποτόνωσης.

Όσον αφορά τη γεωμετρία του μοντέλου, οι δύο σήραγγες είναι κυκλικές με διάμετρο $D=8\text{m}$, το ύψος υπερκειμένων είναι $H=10D=80\text{m}$, το μήκος εκσκαφής των διατομών είναι $L=10D=80\text{m}$, ενώ το συνολικό μήκος του μοντέλου κατά τη διεύθυνση του άξονα των σηράγγων είναι $18D=144\text{m}$.

Εξετάζονται 5 μεγέθη πλάτους πυλώνα:

$$W=0.5D=4\text{m}$$

$$W=1.0D=8\text{m}$$

$$W=2.0D=16\text{m}$$

$$W=3.0D=24\text{m}$$

$$W=4.0D=32\text{m}$$

Εξετάζονται, επίσης, 5 αποστάσεις εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο στη <<δεύτερη>> σήραγγα:

$$S_{\text{tunnel face}} = 0.125D=1\text{m}$$

$$S_{\text{tunnel face}} = 0.25D=2\text{m}$$

$$S_{\text{tunnel face}} = 0.5D=4\text{m}$$

$$S_{\text{tunnel face}} = 0.75D=6\text{m}$$

$$S_{\text{tunnel face}} = 1.00D=8\text{m}$$

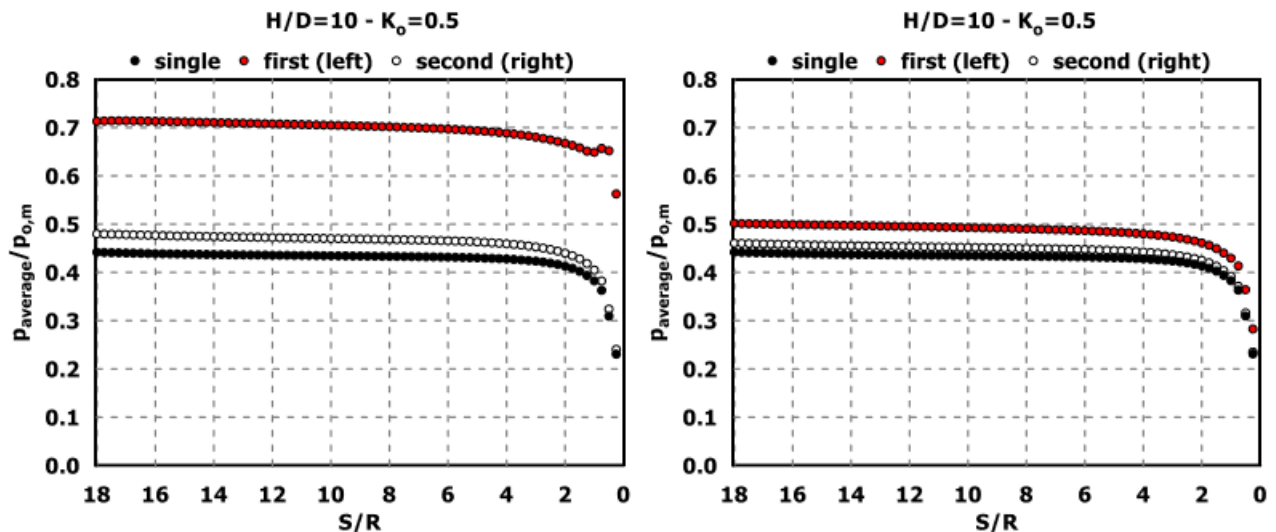
Οι τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων που εξετάζονται είναι :

$$k_o=0.5$$

$$k_o=1.0$$

$$k_o=2.0$$

Για την αντιστοίχιση των αποτελεσμάτων της εργασίας της Ψυχάρη Ειρήνης (2016) με την εν λόγω εργασία, παρατίθενται διαγράμματα για την περίπτωση όπου ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων είναι $k_o=0.5$ και τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης τοποθετούνται σε απόσταση $0.125D=1.0\text{m}$ από το μέτωπο εκσκαφής για τα διάφορα πλάτη πυλώνων και τις διάφορες γεωτεχνικές συνθήκες.



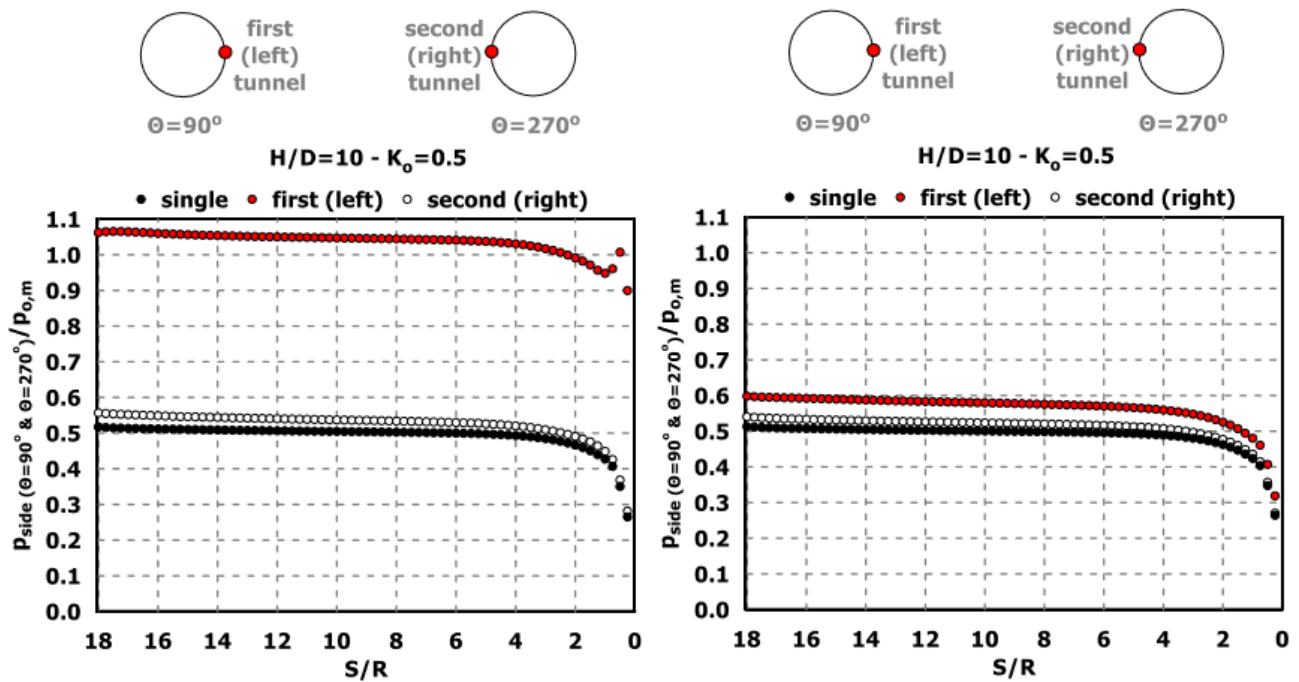
Σχήμα 2.36: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $p_{average}/p_{o,m}$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o=0.21$), (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)

Από το ανωτέρω σχήμα, γίνεται αντιληπτό αρχικά ότι ανεξαρτήτως πλάτους πυλώνα, η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας (first tunnel) καταπονείται περισσότερο σε όρους φορτίων συγκριτικά με αυτή της «μονής» σήραγγας (single tunnel) ή της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel). Ακολούθως, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της «δεύτερης» σήραγγας δέχεται μεγαλύτερα φορτία σε σχέση με την υποστήριξη της «μονής» σήραγγας, αλλά σε πολύ χαμηλότερο βαθμό σε σχέση με την άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας.

Η απόκριση αυτή είναι λογική καθώς η ανακατανομή των τάσεων που πραγματοποιείται κατά την εκσκαφή της δεξιάς δεν προκαλεί περαιτέρω σύγκλιση, καθώς η άκαμπτη υποστήριξη της αριστερής εμποδίζει τη μετακίνηση αυτή παραλαμβάνοντας έτσι περισσότερα φορτία. Στην περίπτωση ιδίως των δυσμενέστερων γεωτεχνικών συνθηκών που αναλύονται στην προκειμένη περίπτωση, η δεξιά σήραγγα εκσκάπτεται ήδη σε ένα ανακατανομημένο πεδίο τάσεων με μία προϋπάρχουσα πλαστική ζώνη.

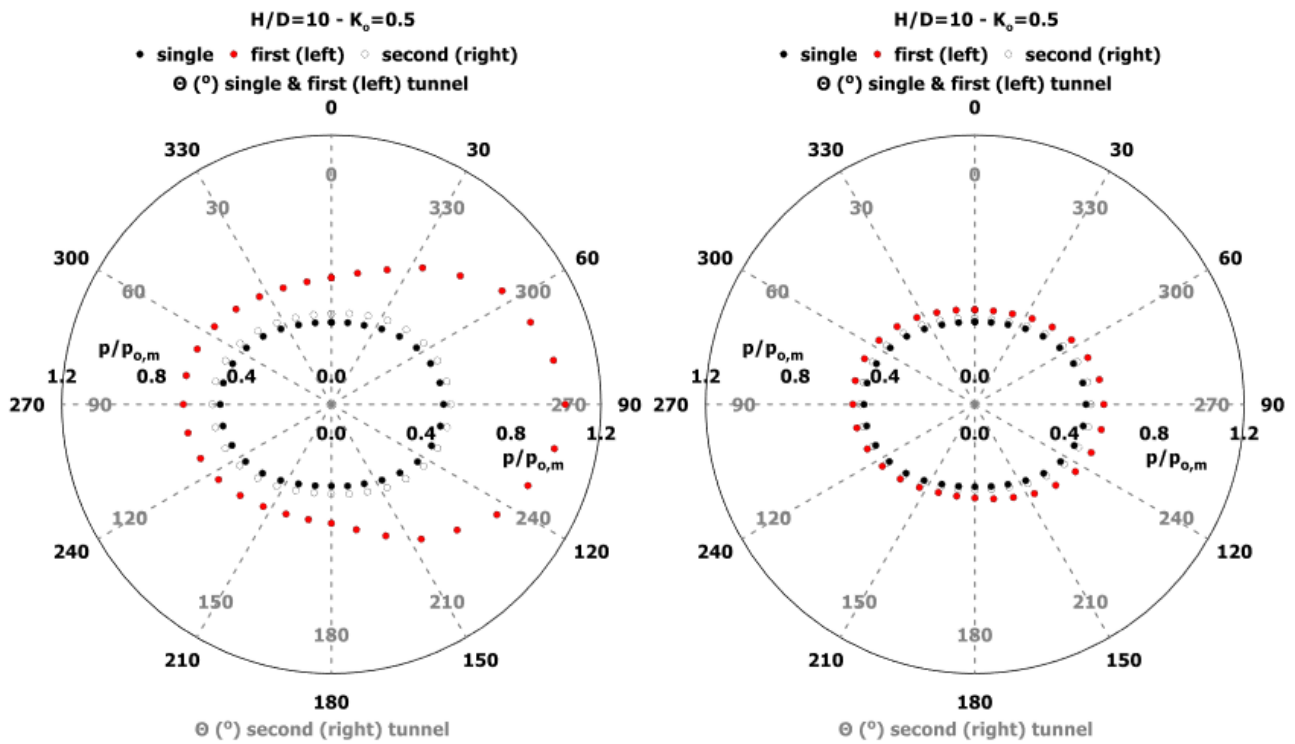
Παρατηρείται, επιπλέον, ότι με την αύξηση του πλάτους πυλώνα το φορτίο στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων μειώνεται σημαντικά, καθώς η ζώνη αλληλεπίδρασης μεταξύ των δίδυμων σηράγγων συρρικνώνεται.

Ανάλογα είναι τα αποτελέσματα που αναφέρονται στο φορτίο που δέχονται οι εσωτερικές παρειές των διατομών, δηλαδή η γωνία $\theta=90^\circ$ για τη «μονή/πρώτη» σήραγγα (single/first tunnel) και η γωνία $\theta=270^\circ$ για τη «δεύτερη» σήραγγα (second tunnel), κατά μήκος του διαμήκου άξονα των δύο κλάδων. Το σχήμα 2.37 προβάλλει ταυτόχρονα τις μέγιστες τιμές των φορτίων, καθώς στα σημεία αυτά εντοπίζεται η μέγιστη διατάραξη του αρχικού εντατικού πεδίου και κατ' επέκταση η μεγιστοποίηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Παρατηρείται ότι για $W/D = 2$ το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δίδυμων σηράγγων περιορίζεται, καθώς εμφανίζεται μείωση των φορτίων στην εσωτερική παρεία της «πρώτης» σήραγγας, σε βαθμό που προσεγγίζει τα φορτία που αναπτύσσονται στην άμεση υποστήριξη της μεμονωμένης σήραγγας.



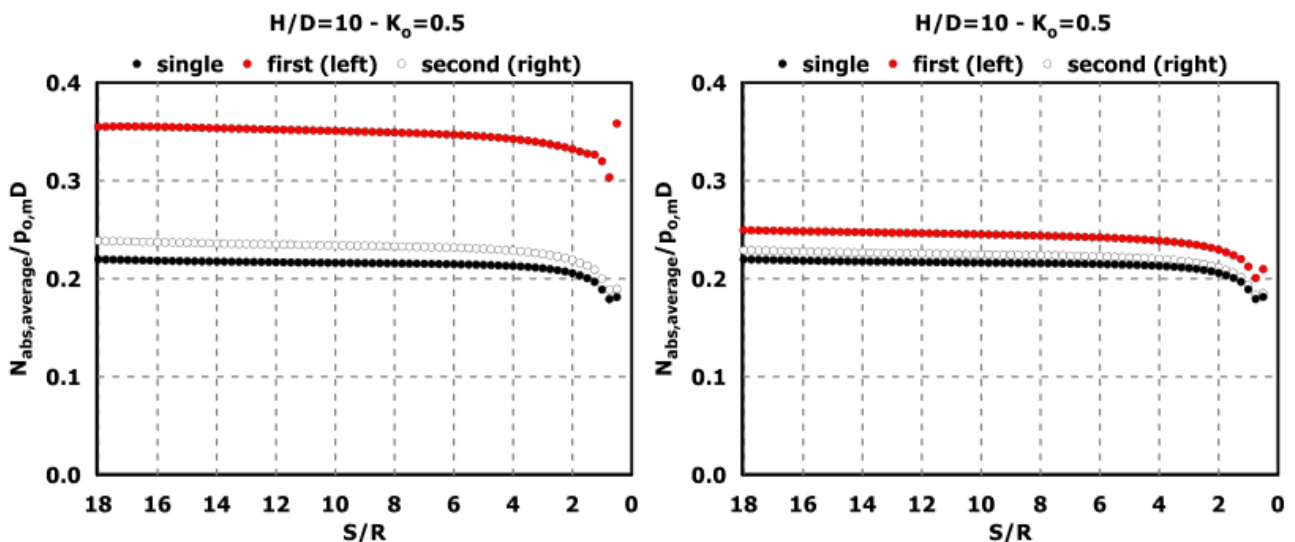
Σχήμα 2.37: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου $p_{side}(\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ)/\rho_{o,m}$ επί των εσωτερικών παρειών συναρτήσσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκους άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$), (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)

Στη συνέχεια, το Σχήμα 2.38 αποτυπώνει την κατανομή του ανηγμένου φορτίου $p/\rho_{o,m}$ συναρτήσσει της γωνίας θ (°) στη χαρακτηριστική διατομή των σηράγγων, για πλάτη πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ και $W = 2D = 16m$. Παρατηρείται αύξηση των φορτίων σε κάθε περιοχή της «πρώτης» σήραγγας (first tunnel) λόγω της διάνοιξης της «δεύτερης» (second tunnel), ενώ χαρακτηριστική είναι η ασύμμετρη ανάπτυξη των φορτίων με τη μείωση του πλάτους του πυλώνα. Όπως αναφέρθηκε και πρωτύτερα, ανεξαρτήτως πλάτους πυλώνα, περισσότερο καταπονούνται οι εσωτερικές παρειές των σηράγγων ενώ αξιοσημείωτη είναι η ελαχιστοποίηση των φορτίων στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» σήραγγας όταν το πλάτος του πυλώνα αυξάνεται. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.38, η εσωτερική παρειά ($\theta = 90^\circ$) της «πρώτης» σήραγγας για πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ έχει αυξημένα φορτία σε ποσοστό 45% συγκριτικά με την αντίστοιχη παρειά ($\theta = 90^\circ$) της «πρώτης» σήραγγας όπου το πλάτος πυλώνα είναι $W/D = 2$. Για πλάτος πυλώνα $W/D > 2$ τα αναπτυσσόμενα φορτία στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας (first tunnel) τείνουν να εξισωθούν με αυτά που προκύπτουν για την εκσκαφή μεμονωμένης σήραγγας (single tunnel), ενώ η αντίστοιχη κατανομή κλίνει προς τη συμμετρία.



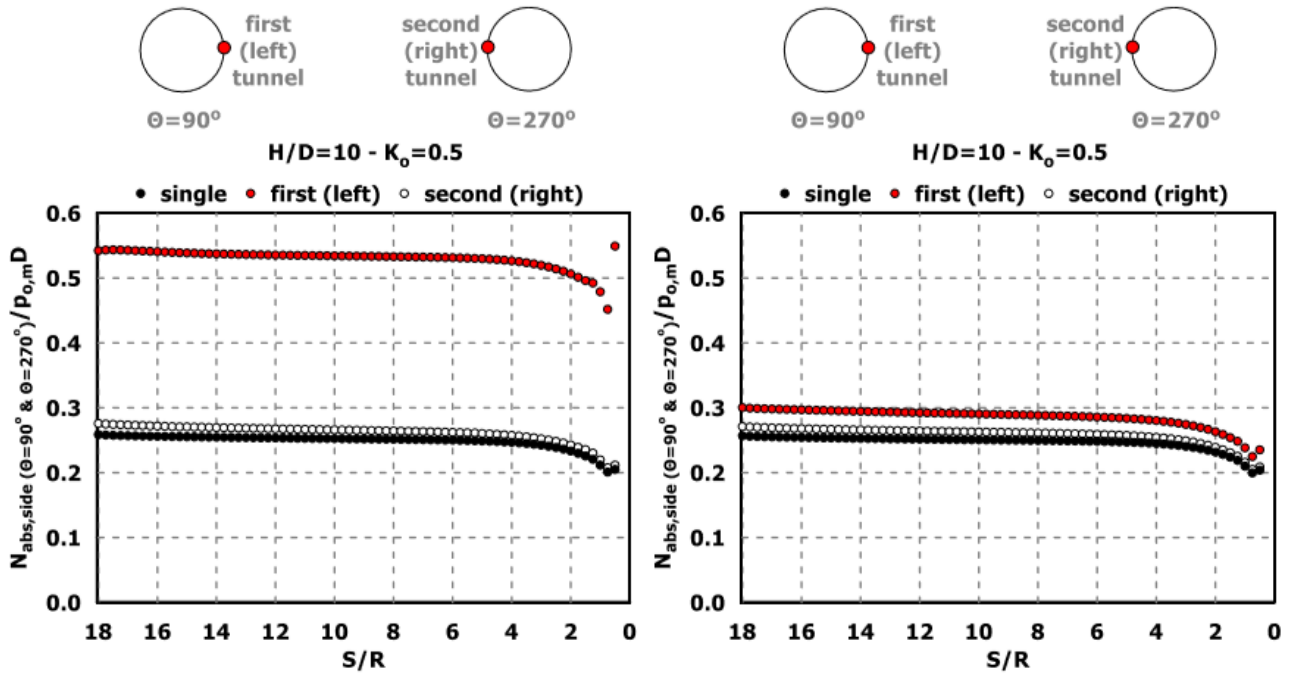
Σχήμα 2.38: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου $p/p_{0,m}$ συναρτήσεως της γωνίας θ ($^\circ$) στην τυπική διατομή των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_0=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0=0.21$), (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)

Αντίστοιχα αποτελέσματα διακρίνουμε και στις τιμές των αξονικών δυνάμεων που δρουν στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων για αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και $W/D=2$. Στο σχήμα 2.39 προβάλλεται η κατ'απόλυτη τιμή μέση αξονική δύναμη ($N_{abs,average}$) ανηγμένη ως προς το γινόμενο της μέσης αρχικής γεωστατικής πίεσης με τη διάμετρο της σήραγγας ($\rho_{0,m}D$). Τα διαγράμματα έχουν σχεδιαστεί συναρτήσεως του λόγου S/R (όπου S η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής).



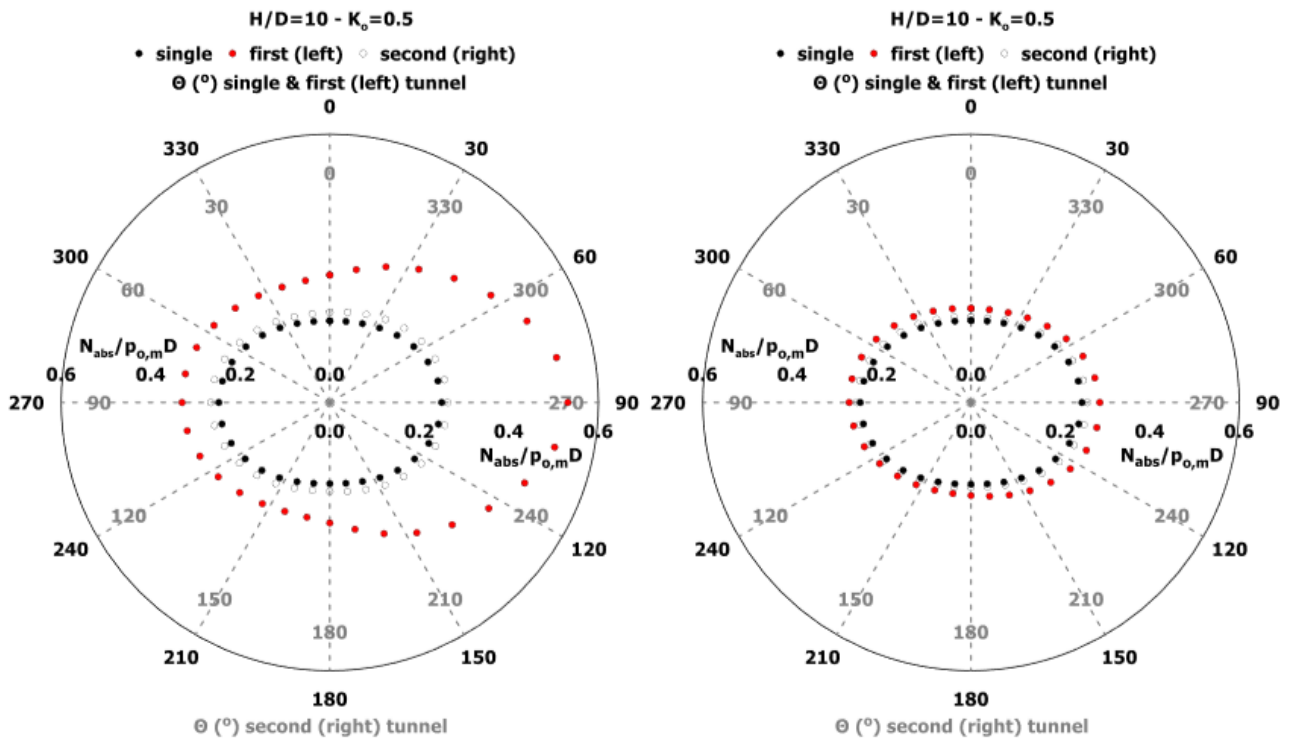
Σχήμα 2.39: Κατανομή της ανηγμένης μέσης αξονικής δύναμης επί της άμεσης υποστήριξης ($N_{abs,average}/\rho_{0,m}D$) συναρτήσεως του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκους άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_0=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0=0.21$), (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)

Για $W/D = 0.5$ παρατηρείται ότι η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας επηρεάζει σημαντικά το υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης της αριστερής με την εμφανή αύξηση των αξονικών δυνάμεων, η οποία σταδιακά ελαττώνεται με τη διεύρυνση του πλάτους του πυλώνα. Παρόλα αυτά, ανεξαρτήτως πλάτους πυλώνα, η «πρώτη» σήραγγα (first tunnel) δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση σε σχέση με τη «μονή» (single tunnel) ή τη «δεύτερη» (second tunnel), ενώ η μεγιστοποίηση της αξονικής δύναμης εμφανίζεται στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» σήραγγας ($\theta = 90^\circ$) (Σχήμα 2.40). Αυτό υποδεικνύει ότι λόγω της εκσκαφής της νέας σήραγγας, παρουσιάζεται μια μεταφορά φορτίου από τη «δεύτερη» στην «πρώτη».



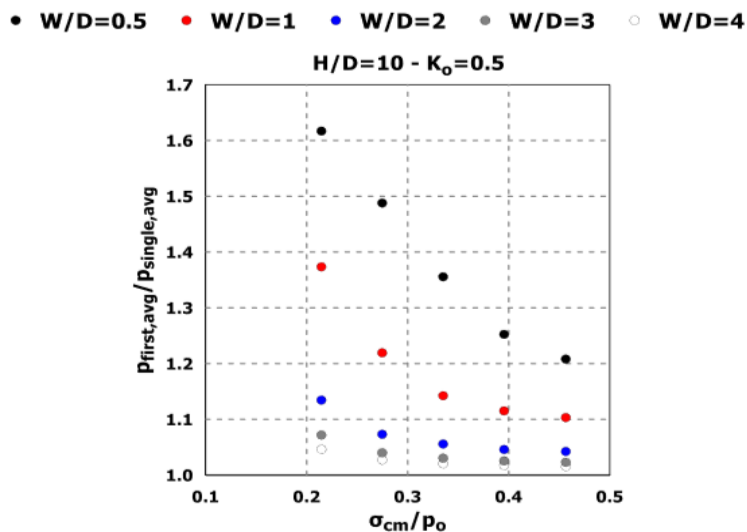
Σχήμα 2.40: Κατανομή της ανηγμένης αξονικής δύναμης επί των εσωτερικών παρειών ($N_{abs,side}(\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ)/\rho_o m D$) συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκους άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$), (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)

Σχετικά με τη δεξιά σήραγγα οι αξονικές δυνάμεις της άμεσης υποστήριξης είναι λίγο μεγαλύτερες από αυτές της «μονής» σήραγγας, αλλά για πλάτος πυλώνα $W/D > 2$ οι επαγόμενες αξονικές δυνάμεις στην άμεση υποστήριξη της νέας σήραγγας είναι πρακτικά ίδιες με αυτές της μεμονωμένης, όχι μόνο σε όρους κατανομής κατά μήκος του ορίου της σήραγγας αλλά και σε όρους μεγέθους. Παράλληλα, μελετώντας το Σχήμα 2.41 που αναφέρεται στην τυπική διατομή των σηράγγων, επιβεβαιώνεται η αύξηση των αξονικών δυνάμεων σε κάθε περιοχή της διατομής της «πρώτης» σήραγγας, ανεξαρτήτως πλάτους πυλώνα, και η απομείωση αυτής με την αύξηση του λόγου W/D . Ακόμη, διακρίνεται η ασύμμετρη ανάπτυξη των αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» σήραγγας για το ελάχιστο πλάτος πυλώνα που διερευνήθηκε με τη μέγιστη τιμή να εμφανίζεται στην εσωτερική παρειά. Η ασυμμετρία εξαλείφεται με τη διεύρυνση της εγκάρσιας απόστασης μεταξύ των διατομών και κατ' επέκταση τον περιορισμό του φαινομένου της αλληλεπίδρασης.



Σχήμα 2.41: Κατανομή της κανονικοποιημένης αξονικής δύναμης ($N_{obs}/\rho_{o,m}D$) συναρτήσει της γωνίας θ στην τυπική διατομή των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$), (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)

Στα επόμενα γραφήματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν. Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης ποσοτικοποιείται μέσω του λόγου του μέσου φορτίου στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας (first tunnel) προς το μέσο φορτίο στην άμεση υποστήριξη της «μονής» σήραγγας (single tunnel) (Σχήμα 2.42). Τα διαγράμματα αναφέρονται στα πλάτη πυλώνα (W/D) και στους λόγους γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o), που εξετάστηκαν με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$ και ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$. Ακόμη, παρατίθενται αντίστοιχα διαγράμματα τα οποία αναφέρονται στην στέψη ($\theta=360^\circ$) και στην εσωτερική παρειά ($\theta=90^\circ$) της αριστερής σήραγγας («πρώτης»/«μονής») (Σχήμα 2.43).

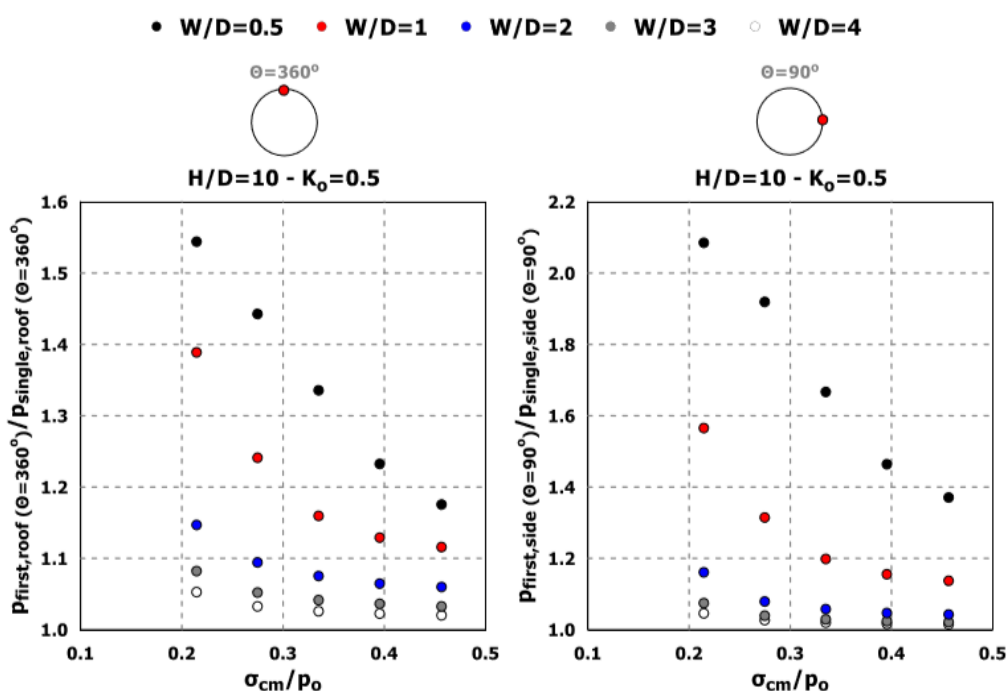


Σχήμα 2.42: Λόγος μέσων φορτίων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,avg}/p_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$, (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)

Παρατηρείται αρχικά ότι ο λόγος των φορτίων παρουσιάζεται μεγαλύτερος της μονάδας, γεγονός που υποδεικνύει ότι για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας φέρει μεγαλύτερο φορτίο σε σχέση με την άμεση υποστήριξη της «μονής», λόγω της διάνοιξης της «δεύτερης» σήραγγας, ανεξάρτητα από το μέγεθος του πλάτους του πυλώνα ή την ποιότητα του γεωυλικού. Για τα πλάτη πυλώνα $W/D = 3$ και $W/D = 4$, όμως, ο λόγος των φορτίων («πρώτης»/«μονής») βρίσκεται πολύ κοντά στη μονάδα, με συνέπεια οι κλάδοι της δίδυμης σήραγγας επί της ουσίας να μην αλληλεπιδρούν. Κατ' επέκταση, η κρίσιμη τιμή πλάτους του πυλώνα μπορεί να προσανατολιστεί στο μέγεθος $(W/D)_{crit} = 2$, υπό την έννοια ότι για εγκάρσια απόσταση μεταξύ των κλάδων μεγαλύτερη από αυτή ($W/D > 2$) το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης σε όρους φορτίων παραμένει προσεγγιστικά στο ίδιο επίπεδο. Το φαινόμενο επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 2.43 το οποίο αναφέρεται στη στέψη ($\Theta = 360^\circ$) και στην εσωτερική παρειά ($\Theta = 90^\circ$).

Η γενικότερη τάση που επικρατεί είναι η μείωση του λόγου των φορτίων πλησιάζοντας την τιμή ίση με μονάδα με τη βελτίωση της ποιότητας του γεωυλικού και τη διεύρυνση του πλάτους του πυλώνα. Με άλλα λόγια, η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας (first tunnel) λόγω της διάνοιξης της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) δέχεται μικρότερη καταπόνηση όσο οι δύο κλάδοι απομακρύνονται μεταξύ τους, ενώ στην εξάλειψη του φαινομένου της αλληλεπίδρασης συμβάλλει επίσης η βελτιστοποίηση των γεωτεχνικών συνθηκών.

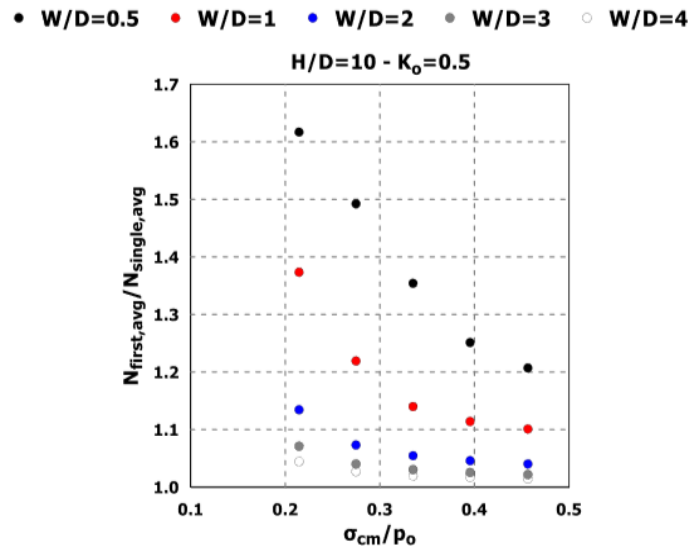
Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν και από τα γραφήματα που αναφέρονται στη στέψη και την εσωτερική παρειά, ενώ αξιοσημείωτη είναι η διαφορά των φορτίων μεταξύ των δύο αυτών διαγραμμάτων, με την εσωτερική παρειά να καταπονείται εμφανώς περισσότερο από την οροφή, λόγω της ενίσχυσης του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο κλάδων (Σχήμα 2.43).



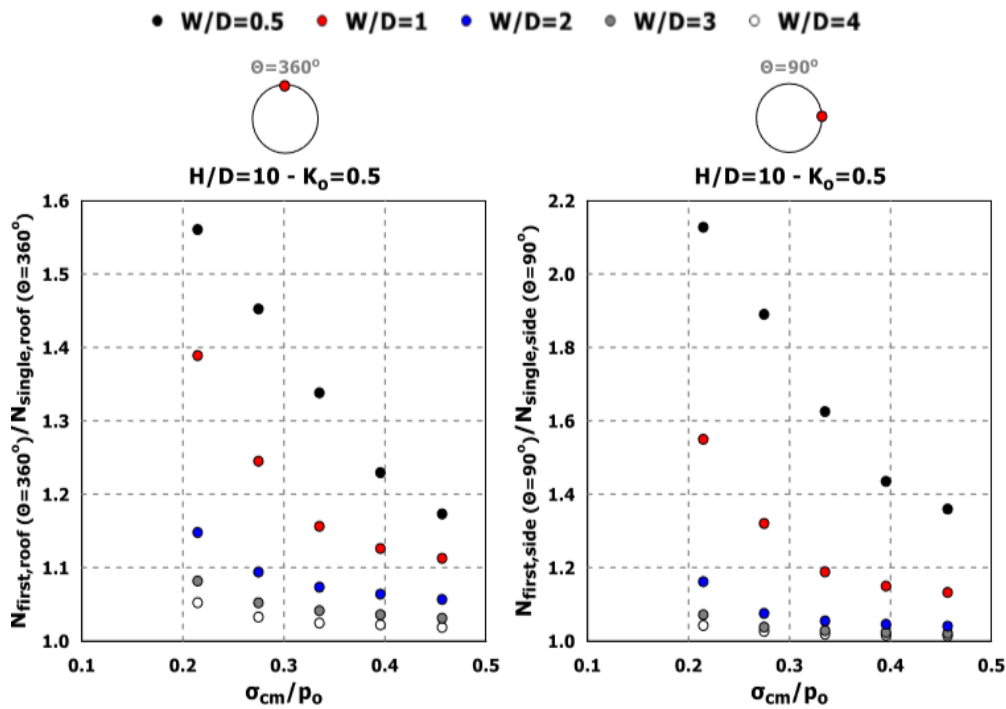
Σχήμα 2.43: Λόγος φορτίων στην οροφή (αριστερά) και στην εσωτερική παρειά (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,roof}/p_{single,roof}$ & $p_{first,side}/p_{single,side}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_0=0.5$, (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)

Τα αποτελέσματα που αναφέρονται στις αξονικές δυνάμεις ακολουθούν αντίστοιχη τάση με αυτή των φορτίων, με το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης να επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις στο μέγεθος και την κατανομή των αξονικών δυνάμεων της άμεσης υποστήριξης (Σχήμα 2.44 & 2.45).

Ο λόγος των αξονικών δυνάμεων («πρώτης»/«μονής») παρουσιάζεται μεγαλύτερος της μονάδας για $W/D \leq 2$, ενώ για $W/D > 2$ η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» και «μονής» σήραγγας εμφανίζουν πρακτικά τα ίδια μεγέθη αξονικών δυνάμεων.



Σχήμα 2.44: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,avg}/N_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_0=0.5$, (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)



Σχήμα 2.45: Λόγος φορτίων στην οροφή (αριστερά) και στην εσωτερική παρειά (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,roof}/N_{single,roof}$ & $N_{first,side}/N_{single,side}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_0=0.5$, (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)

Συνοψίζοντας, αναφορικά στην επίδραση που έχει η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των παρειών των σηράγγων στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, παρατηρούνται τα εξής συμπεράσματα:

- Ανεξαρτήτως του πλάτους του πυλώνα, η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας καταπονείται περισσότερο σε όρους φορτίων συγκριτικά με αυτή της «μονής» ή της

«δεύτερης» σήραγγας, ενώ η «δεύτερη» σήραγγα δέχεται λίγο μεγαλύτερα φορτία σε σχέση με τη μεμονωμένη. Το φαινόμενο ερμηνεύεται ως εξής: η δεξιά σήραγγα εκσκαπτείται ύστερα από την ολοκλήρωση της εκσκαφής και υποστήριξης της αριστερής και η ανακατανομή των τάσεων που πραγματοποιείται κατά την εκσκαφή της δεξιάς δεν προκαλεί περαιτέρω σύγκλιση, καθώς η άκαμπτη υποστήριξη της αριστερής εμποδίζει τη μετακίνηση αυτή, οδηγώντας σε αύξηση των φορτίων. Ως αποτέλεσμα, η εκσκαφή της «δεύτερης» σήραγγας επιφέρει έντονη αύξηση των φορτίων στην υποστήριξη της «πρώτης», ενώ στην περίπτωση δυσμενών γεωτεχνικών συνθηκών με την ύπαρξη εκτενέστερης πλαστικής ζώνης, το φαινόμενο εντείνεται.

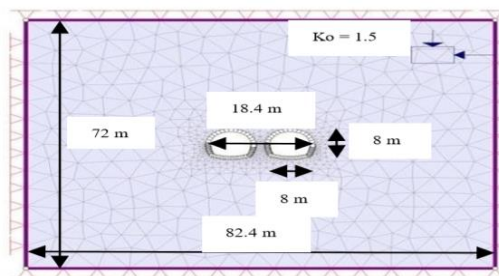
- Αύξηση του πλάτους του πυλώνα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων καθώς η ζώνη αλληλεπίδρασης μεταξύ τους συρρικνώνεται. Συγκεκριμένα, το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης ξεκινά να εξαλείφεται για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο από 2D και ως εκ τούτου οι σήραγγες δύνανται να λαμβάνονται ως ανεξάρτητες, μεταξύ τους, κατασκευές.
- Στην τυπική διατομή των σηράγγων παρατηρείται αύξηση των φορτίων σε κάθε περιοχή της «πρώτης» σήραγγας λόγω της διάνοιξης της «δεύτερης», ενώ χαρακτηριστική είναι η ασύμμετρη ανάπτυξη αυτών που εντείνεται με τη μείωση του πλάτους του πυλώνα. Ανεξαρτήτως του πλάτους του πυλώνα, περισσότερο καταπονούνται οι εσωτερικές παρειές των σηράγγων όπου το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεγιστοποιείται.
- Τα αποτελέσματα των αξονικών δυνάμεων συμφωνούν ως προς την τάση και την ποσοτικοποίηση με αυτά των φορτίων. Ανεξαρτήτως του πλάτους του πυλώνα η «πρώτη» σήραγγα δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση σε σχέση με τη «μονή» ή τη «δεύτερη» και η μεγιστοποίηση εμφανίζεται στην εσωτερική παρειά της «πρώτης». Αυτό υποδεικνύει ότι λόγω της εκσκαφής της νέας σήραγγας, παρουσιάζεται μια μεταφορά φορτίου από τη δεξιά σήραγγα στην αριστερή. Οι αξονικές δυνάμεις της «δεύτερης» σήραγγας είναι λίγο μεγαλύτερες από αυτές της «μονής» αλλά για πλάτος πυλώνα $W/D \geq 2$, είναι πρακτικά ίδιες, όχι μόνο σε όρους κατανομής αλλά και σε όρους μεγέθους.
- Ως προς τις ροπές κάμψης, για $W/D = 0.5$ εμφανίζεται προοδευτική αύξηση στο απόλυτο μέγεθος που επιφέρεται στην άμεση υποστήριξη της υφιστάμενης σήραγγας, ενώ για $W/D = 2$ η επίδραση καθίσταται αμελητέα. Στην περιοχή της εσωτερικής παρειάς η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας προκαλεί σημαντική αύξηση στην επαγόμενη ροπή κάμψης της «πρώτης» σήραγγας. Με την αύξηση του εύρους του πυλώνα και την εξάλειψη του φαινομένου, η κατανομή γίνεται συμμετρική. Η κατανομή και το μέγεθος των καμπτικών ροπών στην άμεση υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας, είναι παρόμοια με αυτά της «μονής».

2.2.6. Imran Ahmad Kahn, Kumar Venkatesh, R.K. Srivastava (2016)

Οι Imran Ahmad Khan, Kumar Venkatesh & R.K. Srivastava (2016) εξέτασαν το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο παράλληλων βαθιών δίδυμων σηράγγων πεταλοειδούς διατομής οι οποίες εκσκαπτούνται ταυτόχρονα. Πιο συγκεκριμένα, διεξήχθη μία παραμετρική ανάλυση που βασίστηκε στο κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown και εξετάσε το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης για τρεις συντελεστές οριζόντιων γεωστατικών τάσεων ($k_0 = 0.5$, $k_0 = 1.0$ και $k_0 = 1.5$) καθώς και για τρεις τιμές πλάτους πυλώνα ($W/D = 0.3$, $W/D = 0.6$ και $W/D = 1.2$). Στην ανάλυση μελετάται η μεταβολή των κύριων τάσεων και των παραμορφώσεων στη ζώνη του πυλώνα και στα σύνορα του

τοιχώματος των σηράγγων και ακολουθεί σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα μίας μονής πεταλοειδούς σήραγγας.

Το μέγιστο ύψος και πλάτος του τμήματος της κάθε σήραγγας είναι 8m και το βάθος των σηράγγων από την επιφάνεια του εδάφους είναι 250m. Το εξωτερικό όριο της διακριτοποίησης των πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο προσομοίωσης παραμένει σταθερό και ορίζεται ως 4 φορές το μέγιστο πλάτος ή ύψος των σηράγγων προκειμένου να προσομοιωθεί η άπειρη έκταση του γεωλογικού μέσου. Ένας πυκνότερος κάρναβος με τρικομβικά τριγωνικά στοιχεία χρησιμοποιήθηκε στο όριο των σηράγγων και στη ζώνη του πυλώνα όπου αναμένεται μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων, ενώ σε πιο απομακρυσμένες περιοχές επιλέχθηκε πιο αραιός κάρναβος ώστε να μην απαιτηθεί άσκοπα πολύς χρόνος για τους υπολογισμούς. Το κυρίως πέτρωμα στη βραχόμαζα είναι ο βασάλτης και ορίστηκε το υλικό στην ανάλυση ως πλαστικό διότι πρόκειται για καλής κατηγορίας βραχόμαζα που απαρτίζεται από κομμάτια βράχου γωνιώδη που αλληλοσυνδέονται. Αυτός είναι και ο λόγος που η ανάλυση βασίστηκε στο κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown αφού το συγκεκριμένο κριτήριο λειτουργεί ορθά για καλής κατηγορίας βραχόμαζες. Στο παρακάτω σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται το αριθμητικό μοντέλο των δίδυμων σηράγγων πεταλοειδούς διατομής σε βραχόμαζα με βασάλτη για πλάτος πυλώνα $W/D = 0.3$ και για $k_0 = 1.5$ και στη συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας με τις ιδιότητες του άρρηκτου βράχου και της βραχόμαζας που λήφθηκαν υπόψη:

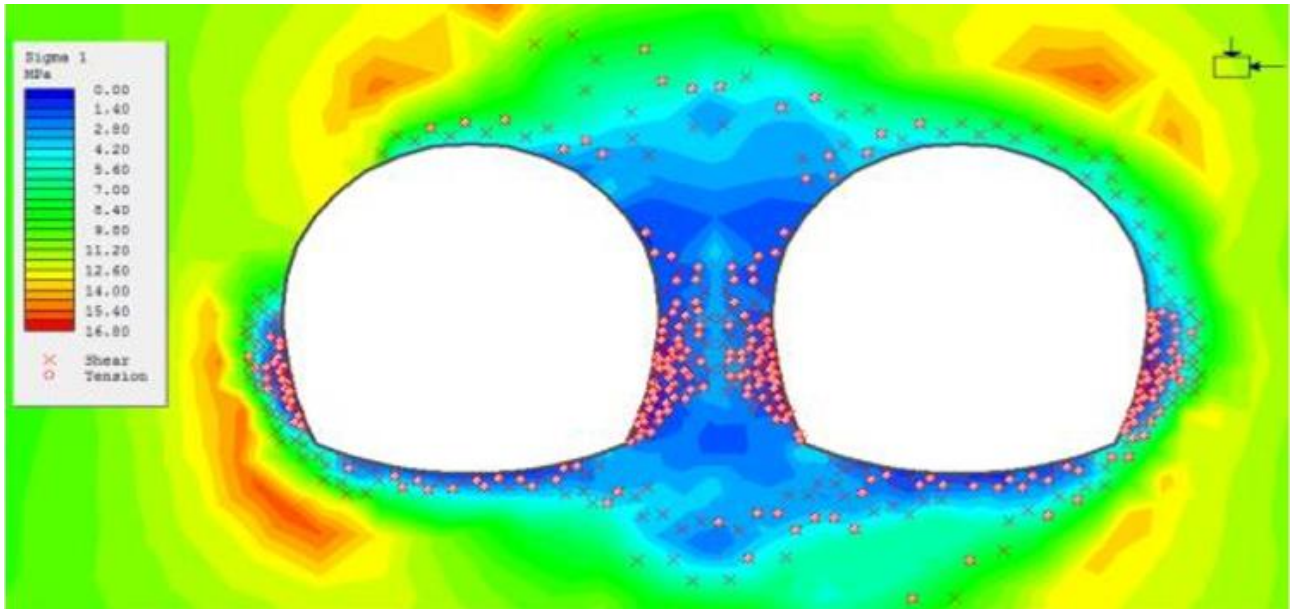


Εικόνα 2.6: Αριθμητικό μοντέλο δίδυμων σηράγγων πεταλοειδούς διατομής σε βραχόμαζα με βασάλτη για πλάτος πυλώνα $W/D = 0.3$ και $k_0 = 1.5$, (Imran Ahmad Khan, Kumar Venkatesh, R.K. Srivastava, 2016)

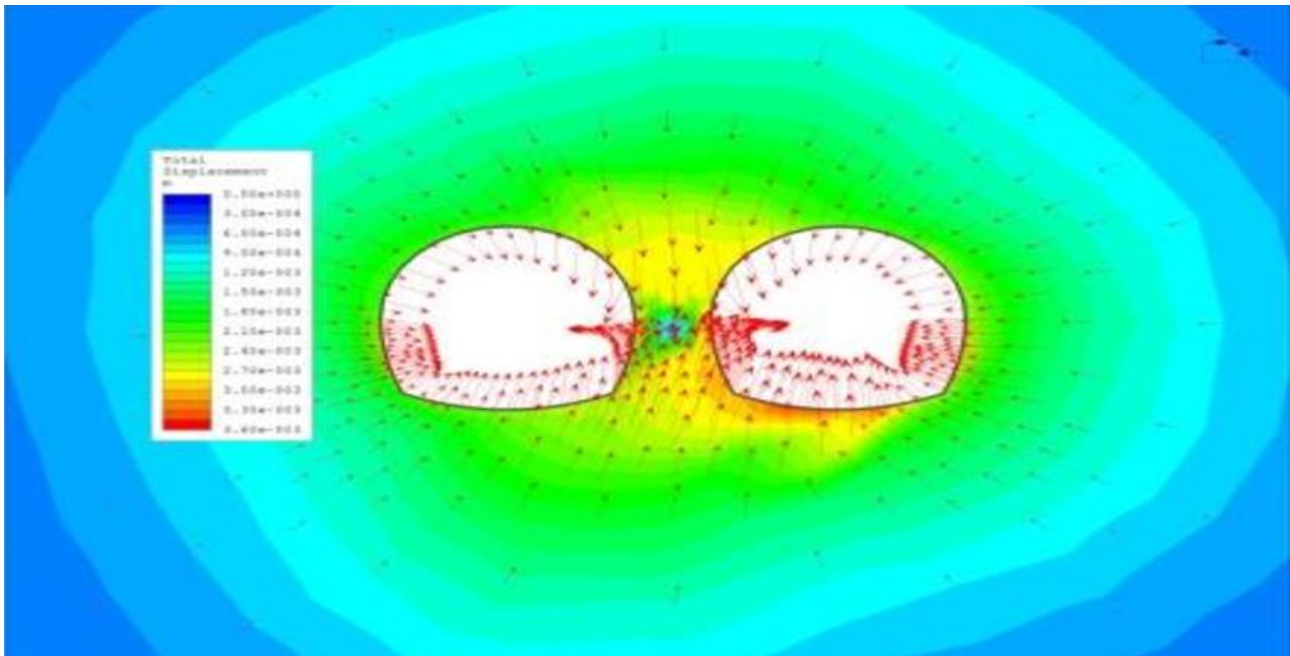
Intact rock properties		
Unconfined Compressive Strength, (UCS)	122.364 MPa	(Hoek and Brown, 1997)
Young's modulus, (E)	35000 MPa	(Srivastava, 1985)
Tensile strength, (σ_t)	0.2879 MPa	(Hoek et al., 2002)
Poisson's ratio, (ν)	0.21	(Srivastava, 1985)
Unit weight, (γ)	0.028 MPa/m	(Srivastava, 1985)
Cohesion, (c)	1.752 MPa	(Hoek et al., 2002)
Friction angle, (ϕ)	48.34°	(Hoek et al., 2002)
Hoek-Brown material constant, (m_i)	17	(Hoek and Brown, 1997)
Disturbance factor, (D)	0.8	(Hoek et al., 2002)
Rock Mass Properties		
m_b	1.7	(Eberhardt, 2012)
s	0.004	(Eberhardt, 2012)
(Geological strength index), GSI	62	(Hoek and Brown, 1997)
E	6734 MPa	(Hoek and Diederichs, 2006)
Residual Values		
m_b	0.2206 (residual)	(Cai et al., 2007)
s	0.0001575 (residual)	(Cai et al., 2007)
c	0.7010 MPa (residual)	(Cai et al., 2007)
ϕ	32.21° (residual)	(Cai et al., 2007)
GSI	27.01 (residual)	(Cai et al., 2007)

Πίνακας 2.2: Γεωτεχνικές ιδιότητες του άρρηκτου βράχου (intact rock) και της βραχόμαζας (rockmass) του βασάλτη (καλής ποιότητας, $GSI = 62$) που βρέθηκε στη δυτική ακτή της Ινδιάνικης υποηπείρου, (R.K. Srivastava, 1985)

Στην εικόνα 2.7 περιγράφεται η μεταβολή της μέγιστης κύριας τάσης (σ_1) και απεικονίζονται τα πεπερασμένα στοιχεία που έχουν διαρρεύσει γύρω από τις δίδυμες σήραγγες που αλληλεπιδρούν για $W/D = 0.3$ και $k_0 = 1.5$, ενώ στην εικόνα 2.8 περιγράφεται η μεταβολή της μετατόπισης με διανύσματα μετατοπίσεων που δείχνουν τη μορφή παραμόρφωσης των σηράγγων αντίστοιχα για την ίδια περίπτωση.

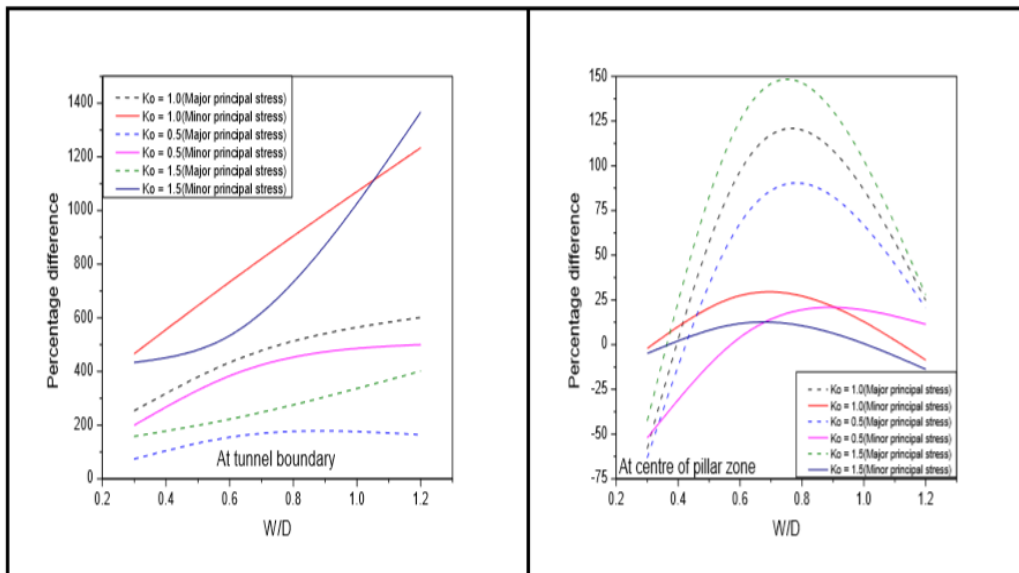


Εικόνα 2.7: Μεταβολή της μέγιστης κύριας τάσης (σ_1) και παρουσίαση των πεπερασμένων στοιχείων που έχουν διαρρεύσει γύρω από τις σήραγγες για $W/D = 0.3$ και $k_0 = 1.5$, ελαστοπλαστική ανάλυση, (Imran Ahmad Khan, Kumar Venkatesh, R.K. Srivastava, 2016)



Εικόνα 2.8: Μεταβολή της ολικής μετατόπισης με διανύσματα μετατοπίσεων των σηράγγων που αλληλεπιδρούν για $W/D = 0.3$ και $k_0 = 1.5$ ως αποτέλεσμα της ελαστοπλαστικής ανάλυσης, (Imran Ahmad Khan, Kumar Venkatesh, R.K. Srivastava, 2016)

Στο σχήμα 2.46 παρουσιάζεται η μεταβολή της ποσοστιαίας διαφοράς για τις κύριες τάσεις μεταξύ των σηράγγων που αλληλεπιδρούν και των μονών σηράγγων για διάφορα πλάτη πυλώνα α) στο σύνορο της σήραγγας (at tunnel boundary) και β) στο κέντρο του πλάτους πυλώνα (at centre of pillar zone) :

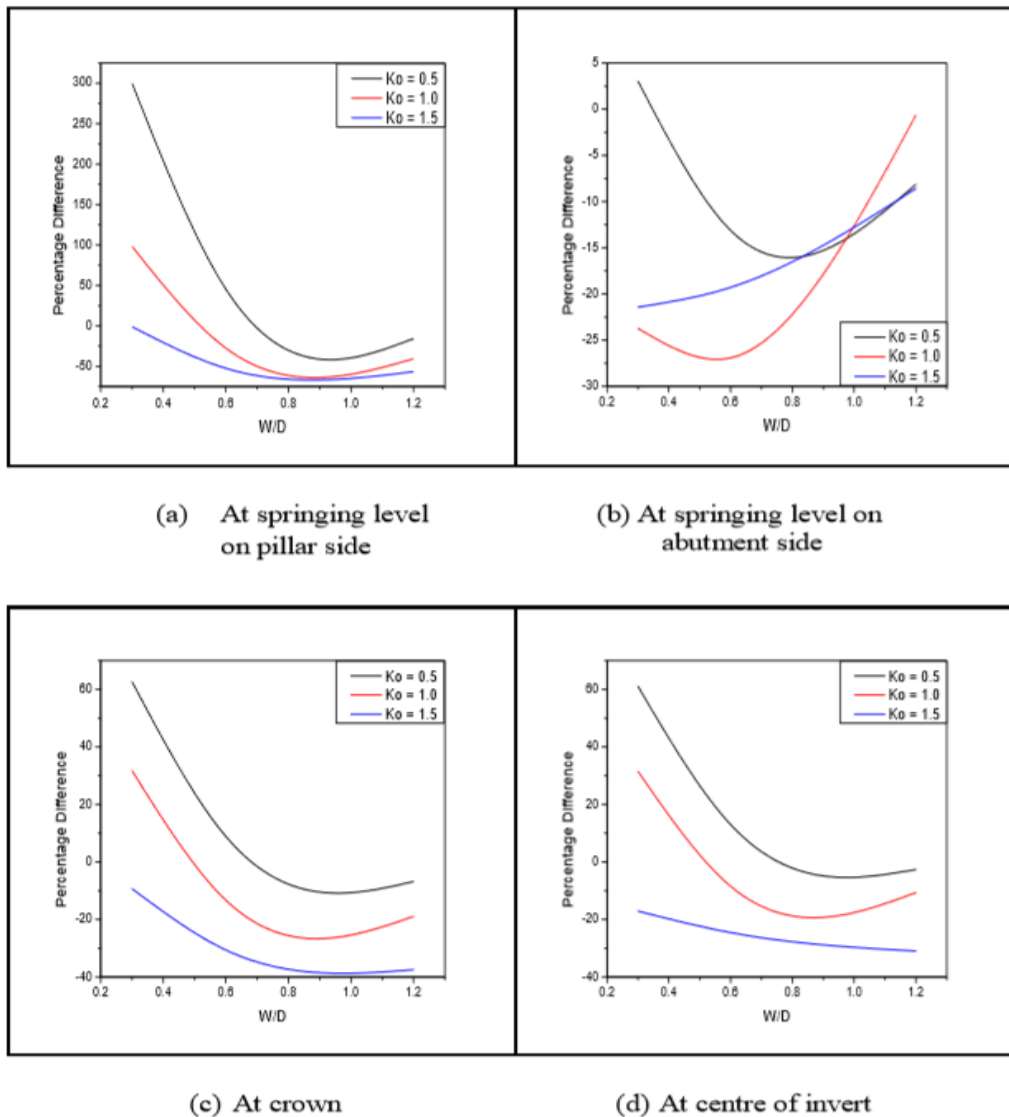


Σχήμα 2.46: Μεταβολή της ποσοστιαίας διαφοράς στις κύριες τάσεις μεταξύ των σηράγγων που αλληλεπιδρούν και των μονών σηράγγων για διάφορα πλάτη πυλώνα (W/D),
(Imran Ahmad Khan, Kumar Venkatesh, R.K. Srivastava, 2016)

Από το παραπάνω σχήμα είναι εμφανές ότι η κλίση των καμπυλών που αντιπροσωπεύει την ποσοστιαία διαφορά των μέγιστων κύριων τάσεων (major principal stresses) είναι μεγαλύτερη για $W/D = 0.3 \sim 0.6$ συγκριτικά με την κλίση των καμπυλών για $W/D=0.6 \sim 1.2$. Επίσης, η ποσοστιαία διαφορά είναι μεγαλύτερη για $k_0=1$ σε σχέση με εκείνη για $k_0=0.5$. Όσον αφορά το κέντρο του πλάτους πυλώνα, η ποσοστιαία διαφορά των κύριων τάσεων είναι αρνητική για $W/D = 0.3$, στη συνέχεια γίνεται θετική φτάνοντας τη μέγιστη θετική τιμή από την οποία αρχίζει και μειώνεται ώσπου φτάνει σχεδόν στο 0 όταν το $W/D=1.2$. Τέλος, η μέγιστη διαφορά των μέγιστων κύριων τάσεων εντοπίζεται για $k_0=1.5$ και η ελάχιστη για $k_0=0.5$.

Ομοίως, ακολουθούν τα σχήματα που δείχνουν τη μεταβολή ποσοστιαίας διαφοράς για τις μετατοπίσεις μεταξύ των σηράγγων που αλληλεπιδρούν και των μονών σηράγγων για διάφορα πλάτη πυλώνα σε 4 διαφορετικές περιοχές :

- Στην παρειά της σήραγγας από την πλευρά του πυλώνα (at springing level on pillar side)
- Στην παρειά της σήραγγας από την εσωτερική πλευρά (at springing level on abutment side)
- Στο ανώτατο τμήμα της σήραγγας (at crown)
- Στο κέντρο του δαπέδου της σήραγγας (at centre of invert)



(a) At springing level on pillar side

(b) At springing level on abutment side

(c) At crown

(d) At centre of invert

Σχήμα 2.47: Μεταβολή της ποσοστιαίας διαφοράς των μετατοπίσεων μεταξύ των σηράγγων που αλληλεπιδρούν και των μονών σηράγγων για διάφορα πλάτη πυλώνα (W/D), (Imran Ahmad Khan, Kumar Venkatesh, R.K. Srivastava, 2016)

Σύμφωνα με το σχήμα 2.47 (a), η ποσοστιαία διαφορά έχει θετική τιμή για όλους τους συντελεστές γεωστατικών τάσεων k_0 η οποία μειώνεται όσο αυξάνεται ο λόγος W/D , στη συνέχεια φτάνει στο 0 και στη συνέχεια παίρνει αρνητική τιμή. Σε περίπτωση περαιτέρω αύξησης του λόγου W/D η ποσοστιαία διαφορά τείνει πάλι στο 0. Η μεγαλύτερη μεταβολή εντοπίζεται για $k_0=0.5$, ενώ η μικρότερη για $k_0=1.5$.

Σύμφωνα με το σχήμα 2.47 (b), η ποσοστιαία διαφορά έχει μία μικρή θετική τιμή για $k_0=0.5$ και για $W/D = 0.3$ η οποία μειώνεται και γίνεται αρνητική όσο αυξάνει ο λόγος W/D όπου τελικά τείνει στη μηδενική τιμή με την περαιτέρω αύξηση του λόγου W/D . Για τις άλλες δύο τιμές k_0 η ποσοστιαία διαφορά είναι αρνητική για $W/D = 0.3$ η οποία τείνει στο 0 με την αύξηση του λόγου W/D . Η μέγιστη μεταβολή εντοπίζεται για $k_0=1.0$ και η ελάχιστη για $k_0=1.5$.

Στα σχήματα 2.47 (c & d) η ποσοστιαία διαφορά είναι θετική για $k_0=0.5$ και $k_0=1.0$ η οποία μειώνεται με την αύξηση του λόγου W/D , στη συνέχεια γίνεται μηδενική και μετά αρνητική. Σε περαιτέρω αύξηση του λόγου W/D η τιμή τείνει πάλι στο 0. Για $k_0=1.5$ η ποσοστιαία διαφορά έχει

αρνητική τιμή για το λόγο $W/D = 0.3$ η οποία τείνει στο 0 προσεγγίζοντας υψηλότερους λόγους W/D .

Συμπερασματικά, από την ελαστοπλαστική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων δύο βαθιών δίδυμων σηράγγων πεταλοειδούς διατομής που αλληλεπιδρούν για τρία εξεταζόμενα πλάτη πυλώνα και 3 συντελεστές γεωστατικών τάσεων σε περιβάλλον με βασάλτη διεξήχθησαν τα εξής :

1. Παρατηρείται ότι για μεγαλύτερο συντελεστή γεωστατικών τάσεων από $k_0 = 1.5$ και για μικρότερο λόγο πλάτους από $W/D = 0.3$,η περιοχή της διαρρηγμένης ζώνης είναι μεγαλύτερη.
2. Παρατηρείται ότι για χαμηλότερους λόγους W/D από 0.3 η διαρρηγμένη ζωνή της βραχόμαζας στην περιοχή του πλάτους πυλώνα προκύπτει από την ανάπτυξη πολύ χαμηλών κύριων τάσεων.
3. Από τη μελέτη σύγκρισης των μέγιστων κύριων τάσεων μεταξύ σηράγγων που αλληλεπιδρούν και μονών σηράγγων, παρατηρείται ότι η ποσοστιαία διαφορά είναι η μεγαλύτερη για τιμές συντελεστών μεγαλύτερες από $k_0=1.5$ και η ελάχιστη για $k_0=0.5$ όταν ο λόγος πλάτους πυλώνα είναι $W/D = 0.3$.
4. Υπάρχει μία συνολική οριζόντια κίνηση των σηράγγων προς την πλευρά αλλαγής κλίσης του τοιχώματος της σήραγγας. Γενικά, η μετατόπιση αυξάνει στο ανώτατο τμήμα των σηράγγων, στο δάπεδο των σηράγγων και στην πλευρά του πυλώνα μεταξύ των σηράγγων, ενώ μειώνεται στην πλευρά αλλαγής κλίσης του τοιχώματος της σήραγγας.
5. Παρατηρείται ότι οι σήραγγες που αλληλεπιδρούν παρουσιάζουν σημαντική αύξηση στις μετατοπίσεις στην πλευρά του πυλώνα συγκριτικά με τις μονές σήραγγες. Η μεγαλύτερη μεταβολή στις μετατοπίσεις εντοπίζεται για μικρότερους συντελεστές γεωστατικών τάσεων από $k_0=1.5$.

3. Προσομοίωση του προβλήματος

3.1. Εισαγωγή

Η εκτίμηση της απόκρισης των σηράγγων και της βραχώμαζας κατά τη διάρκεια αλλά και μετά την ολοκλήρωση εκσκαφής, είναι ένα δύσκολο έργο για τον μηχανικό όπως συμβαίνει και με όλα τα γεωτεχνικά, συγκοινωνιακά και υδραυλικά έργα που διαταράσσουν το φυσικό οικοσύστημα. Η επέμβαση του ανθρώπου στο φυσικό περιβάλλον ενέχει κινδύνους, με κυριότερο την απρόβλεπτη συμπεριφορά του περιβάλλοντος γεωυλικού στο οποίο είναι κατασκευασμένο το τεχνικό έργο και κατα συνέπεια την συμπεριφορά του ίδιου του έργου. Συγκεκριμένα για τις σήραγγες, προκαλούνται μεταβολές στο εντατικό και παραμορφωσιακό πεδίο στη διατομή της εκσκαφής και στο μέτωπο εκσκαφής κατά τη διάνοιξη με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μετακινήσεις και να αυξάνεται ο κίνδυνος αστοχίας ή κατάρρευσης. Ιδιαίτερα η κατασκευή δίδυμων σηράγγων παρουσιάζει προκλήσεις στη μηχανική και γι' αυτό το λόγο είναι αναγκαία η διερεύνηση των μετακινήσεων του γεωυλικού λόγω της εκσκαφής της γειτονικής σήραγγας καθώς και των φαινομένων αλληλεπίδρασης μεταξύ των διατομών κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και της κατασκευής των δίδυμων σηράγγων. Σύμφωνα με βιβλιογραφικές έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν, μερικές των οποίων αναφέρθηκαν στο 2^ο κεφάλαιο, στο στάδιο σχεδιασμού οι βασικές παράμετροι που απαιτείται να λαμβάνονται υπόψη είναι η κατασκευαστική αλληλουχία, η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των διατομών (πλάτος πυλώνα), το σύστημα άμεσης υποστήριξης που θα τοποθετηθεί, οι γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες καθώς και ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0 .

Βασική επιδίωξη της εν λόγω εργασίας είναι η εξαγωγή ποσοτικών αποτελεσμάτων σχετικά με τα φορτία και τα εντατικά μεγέθη (αξονικές δυνάμεις) που ασκούνται στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) καθώς και με τις μετακινήσεις που αναπτύσσονται όταν:

- Πραγματοποιείται διάνοιξη και εκσκαφή μονής σήραγγας
- Πραγματοποιείται διαδοχική, αλλά όχι ταυτόχρονη, διάνοιξη και εκσκαφή δύο σηράγγων

Συγκεκριμένα, διερευνάται:

- ✓ Η απόκριση μονής σήραγγας
- ✓ Η απόκριση της 1^{ης} σήραγγας που διανοίχτηκε, αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή και των δύο σηράγγων
- ✓ Η απόκριση της 2^{ης} σήραγγας που διανοίχτηκε, αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή και των δύο σηράγγων

Για τη διερεύνηση του φαινομένου αλληλεπίδρασης στο εν λόγω πρόβλημα οι δύο διατομές είναι ίδιες (κυκλικές ίδιας διαμέτρου), τα μέτρα άμεσης υποστήριξης είναι ίδια και για τις δύο διατομές (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ίδιου πάχους), η διαδικασία εκσκαφής γίνεται με τον ίδιο τρόπο (εκσκαφή με βήμα προχώρησης 1m και απόσταση εφαρμογής των μέτρων άμεσης υποστήριξης

από το μέτωπο εκσκαφής 1m) και για τους δύο κλάδους, ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_0) είναι ίδιος για όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται και μεταβάλλονται μόνο:

- ✓ Τα πλάτη πυλώνα (W/D)
- ✓ Οι γεωτεχνικές συνθήκες (σ_{cm}/ρ_0)

Στο παρόν πρόβλημα η κατασκευή των σηράγγων επιλέχθηκε να γίνει με τη Νέα Αυστριακή Μέθοδο (NATM) καθώς πρόκειται για μία ευέλικτη μέθοδο που προσαρμόζεται σε πολλών ειδών γεωτεχνικές και γεωλογικές συνθήκες η οποία φέρει και πολλά άλλα πλεονεκτήματα, τα οποία αναφέρθηκαν και στο 2^ο κεφάλαιο. Δεδομένου όμως ότι η μέθοδος NATM είναι μία μέθοδος που βασίζεται σε εμπειρική γνώση από επί τόπου παρατήρηση, η καλύτερη αντιμετώπιση κατά το σχεδιασμό είναι η χρησιμοποίηση αριθμητικών μεθόδων με τέτοιες τεχνικές όπως είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method – FEM).

Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι μία μεθοδολογία επίλυσης της μηχανικής συμπεριφοράς ενός συνεχούς σώματος. Το συνεχές μέσο προσομοιώνεται από ένα πεπερασμένο σύνολο στοιχείων που συνδέονται μεταξύ τους στους κόμβους συνιστώντας έτσι το διακριτοποιημένο φορέα. Από την επίλυση του φορέα προκύπτουν οι παραμορφώσεις και οι τάσεις σε όλα τα στοιχεία καθώς και οι μετατοπίσεις και δυνάμεις σε όλους τους κόμβους. Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει (Καββαδάς, 2006):

1. Την διακριτοποίηση του προβλήματος σε πεπερασμένα στοιχεία
2. Τον προσδιορισμό των μητρώων ακαμψίας των στοιχείων (K_i)
3. Την σύνθεση του γενικού μητρώου ακαμψίας (K) με προσθήκη των επιμέρους μητρώων ακαμψίας των στοιχείων (K_i)
4. Την επιβολή συνοριακών συνθηκών στο γενικό μητρώο ακαμψίας (K)
5. Την αντιστροφή του γενικού μητρώου ακαμψίας και κατ'επέκταση των υπολογισμό των μετατοπίσεων των κόμβων ($U=K^{-1} F$)
6. Τον υπολογισμό των αντιδράσεων στις στηρίξεις ($F=KU$)
7. Τον υπολογισμό της έντασης και παραμορφώσης των στοιχείων

Οι αριθμητικές αναλύσεις λειτουργούν ως ένα είδος δοκιμής μοντέλου στο οποίο είναι δυνατή η διερεύνηση πολλών σχετικών παραμέτρων σχεδιασμού μέσω παραμετρικών αναλύσεων με στόχο την ποσοτικοποίηση της επιρροής κάθε πιθανής παρέμβασης και κατ'επέκταση την επιλογή της ασφαλέστερης και οικονομικότερης λύσης. Πολλές από τις αριθμητικές αναλύσεις που αναφέρονται σε σήραγγες είναι διδιάστατες (2D) με προσεγγίσεις επίπεδης παραμόρφωσης, όμως

είναι ευρέως γνωστό ότι η διαδικασία εκσκαφής σηράγγων επιφέρει ένα τρισδιάστατο πεδίο τάσεων και παραμορφώσεων (συνθήκες τριαξονικής εντατικής κατάστασης) με σημαντικό ποσοστό διαταραχής να λαμβάνει χώρα μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής αναπτύσσοντας προσυγκλίσεις και επιφανειακές μετακινήσεις πριν το μέτωπο φτάσει σε αυτή τη θέση.

Σύμφωνα με τον Καββαδά (2012), τα πλεονεκτήματα των τρισδιάστατων αναλύσεων για το σχεδιασμό των σηράγγων είναι τα εξής :

- Προσομοιώνουν την πραγματική αλληλουχία κατασκευής (άρση της παραδοχής της «επίπεδης παραμόρφωσης»)
- Προσομοιώνουν το πραγματικό γεωτεχνικό προφίλ, καθώς δύναται αυτό να μεταβάλλεται κατά μήκος της διάνοιξης
- Εξετάζουν την ευστάθεια του μετώπου (την απόκριση του μετώπου όταν δεν υπάρχει αντιστήριξη καθώς και την ευεργετική επίδραση των μέτρων αντιστήριξης, προστασίας, ενίσχυσης, βελτίωσης στο μέτωπο)
- Πραγματοποιούν ορθολογιστικό σχεδιασμό του μετώπου της σήραγγας ο οποίος περιλαμβάνει την διαστασιολόγηση των μέτρων αντιστήριξης, προστασίας, ενίσχυσης, βελτίωσης στο μέτωπο, την ευστάθεια στο μέτωπο και στο κέλυφος καθώς και τον προσδιορισμό των καθιζήσεων στην επιφάνεια

Αντίθετα, η διδιάστατη μέθοδος σχεδιασμού λαμβάνει τη σήραγγα σε δύο διαστάσεις και σε κάθε ανάλυση εξετάζεται μία συγκεκριμένη διατομή. Το βασικότερο μειονέκτημα που φέρει είναι ότι τα συμπεράσματα που εξάγονται αφορούν μία μεμονωμένη διατομή εντός της κοιλότητας της σήραγγας, αγνοώντας την επίδραση των τάσεων στις γειτονικές της, και εξαρτώνται από τη μέθοδο εκτίμησης των προσυγκλίσεων με αποτέλεσμα να μην εξάγονται ακριβή και ασφαλή συμπεράσματα για τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται μπροστά και πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Στις τρισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις, όμως, τα αποτελέσματα είναι απαλλαγμένα από τις παραδοχές που υιοθετούν οι μέθοδοι αποτόνωσης, το οποίο αποτελεί και ένα επιπλέον βασικό πλεονέκτημα.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, το υπό εξέταση πρόβλημα επιλέχθηκε να διερευνηθεί μέσω τριδιάστατων (3D) αριθμητικών αναλύσεων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού, λοιπόν, θα παρουσιαστεί :

1. ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Abaqus v.6.14
2. η πλήρης περιγραφή του αριθμητικού προσομοιώματος
3. οι παράμετροι των αριθμητικών αναλύσεων
4. οι βασικές έννοιες και παραδοχές των αριθμητικών αναλύσεων
5. τα βασικά σύμβολα των αριθμητικών αναλύσεων
6. ο έλεγχος αξιοπιστίας των προσομοιωμάτων

3.2. Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Abaqus

Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Abaqus (v.6.14) χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να εκτελεστούν οι τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις. Είναι ένα από τα πιο εξελιγμένα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων με δυνατότητες πραγματοποίησης απαιτητικών αναλύσεων και προσομοίωσης πολύπλοκων γραμμικών και μη προβλημάτων που αφορούν στα προβλήματα της επιστήμης του μηχανικού.

Αρχικός αντικειμενικός σκοπός για την εκκίνηση της διαδικασίας των αναλύσεων, είναι η δημιουργία ενός αρχείου εισαγωγής δεδομένων (input file). Στο αρχείο αυτό εισάγονται υπό μορφή κώδικα τα δεδομένα του μοντέλου (model data), τα οποία περιγράφουν τους κόμβους (nodes), τα πεπερασμένα στοιχεία του γεωυλικού (solid elements – type C3D8) και τα πεπερασμένα στοιχεία του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (shell elements – type S4). Σε κάθε κόμβο των πεπερασμένων στοιχείων γεωυλικού, υπάρχουν τρεις βαθμοί ελευθερίας οι οποίοι περιγράφουν τις μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση X, Y και Z. Στα πεπερασμένα στοιχεία του κελύφους, κάθε κόμβος κατέχει έξι βαθμούς ελευθερίας εκ των οποίων οι τρεις αναφέρονται στη μετακίνηση και οι υπόλοιποι στη στροφή. Εισάγονται ακόμη οι ιδιότητες των υλικών (μέτρο ελαστικότητας & λόγος Poisson) του γεωυλικού και του σκυροδέματος (soil material & support material), το αρχικό (γεωστατικό) εντατικό πεδίο (initial conditions), οι συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) και κάθε άλλο στοιχείο που προσδιορίζει το μοντέλο αυτό καθ' αυτό. Το αρχείο εισαγωγής δεδομένων (input file) περιλαμβάνει, τέλος, στοιχεία που αφορούν στον προσδιορισμό των ζητούμενων (output) του προβλήματος, τα οποία συμβάλλουν ουσιαστικά στην παραγωγή των αποτελεσμάτων των αναλύσεων.

Στο συγκεκριμένο λογισμικό ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να κλιμακώνει την ιστορία του μοντέλου σε μια αλληλουχία βημάτων (steps). Κάθε βήμα είναι μια περίοδος απόκρισης συγκεκριμένου τύπου (μιας στατικής φόρτισης, μιας δυναμικής απόκρισης κ.τ.λ.) Ο προσδιορισμός του βήματος περιλαμβάνει τον τύπο της διαδικασίας (στατική ανάλυση τάσεων, ανάλυση μεταφοράς θερμότητας κ.τ.λ.), τις παραμέτρους ελέγχου για την χρονική ολοκλήρωση, τις φορτίσεις και γενικά τα αποτελέσματα που ζητείται να εξαχθούν. Στην περίπτωση που απαιτείται μεγαλύτερη λεπτομέρεια, η ίδια η ανάλυση μπορεί να επιμεριστεί σε δύο βήματα ή και περισσότερα έτσι ώστε να δίνεται βαρύτητα στις μεταβλητές που ενδιαφέρουν περισσότερο σε κάθε ένα από αυτά.

Από το Abaqus, τα εξαγόμενα αποτελέσματα (output) που παράγονται συνολικά είναι τα εξής:

- ⇒ οι πιέσεις επαφής (τα φορτία) (Contact Pressure (CPRESS))
- ⇒ οι αξονικές δυνάμεις (Section Forces (SF)) που αναπτύσσονται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- ⇒ οι καμπτικές ροπές (Section Moments (SM)) που αναπτύσσονται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
- ⇒ Οι μετακινήσεις των κόμβων του γεωυλικού (Spatial Displacement (U))
- ⇒ Οι τάσεις των πεπερασμένων στοιχείων (Stress Components (S))

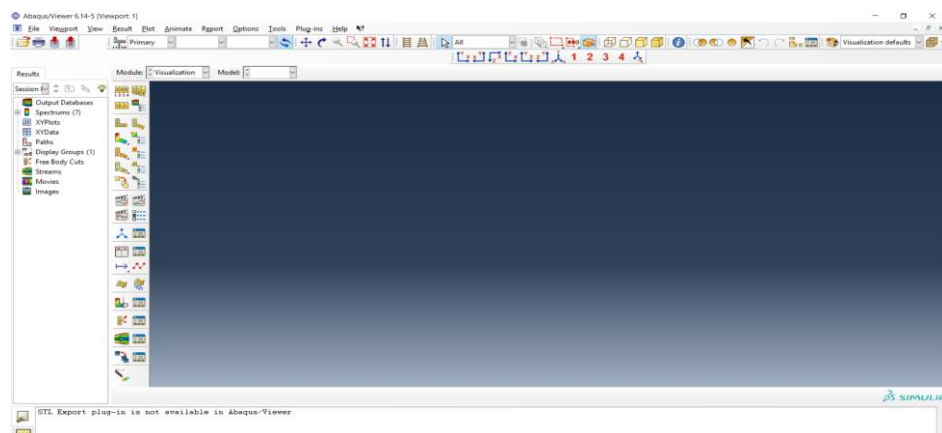
- ⇒ Οι παραμορφώσεις των πεπερασμένων στοιχείων (Strain Components (E))
- ⇒ Οι πλαστικές παραμορφώσεις των πεπερασμένων στοιχείων (Magnitude of Plastic Strain (PEMAG))

Στο υπό εξέταση πρόβλημα εξήχθησαν και αναλύθηκαν για όλες τις εξετάζομενες περιπτώσεις τα εξής αποτελέσματα:

- CPRESS (Contact Pressure)
- SF₁ (Hoop Normal Force)
- S₁ (σ_1 - Max Principal Stress)
- S₃ (σ_3 - Min Principal Stress)

Ενδεικτικά, λήφθησαν επιπλέον από όλες τις αναλύσεις οι καμπτικές ροπές (SM₁) και για ορισμένες μόνο περιπτώσεις τα παρακάτω αποτελέσματα:

- q (Mises)
- p (Pressure)
- SF₄ (Shear Force)
- SF₅ (Shear Force)
- S₁₁ (σ_{xx} - Horizontal Stress)
- S₂₂ (σ_{yy} - Horizontal Stress)
- S₃₃ (σ_{zz} - Vertical Stress)



Εικόνα 3.1: Περιβάλλον εργασίας του Abaqus 6.14

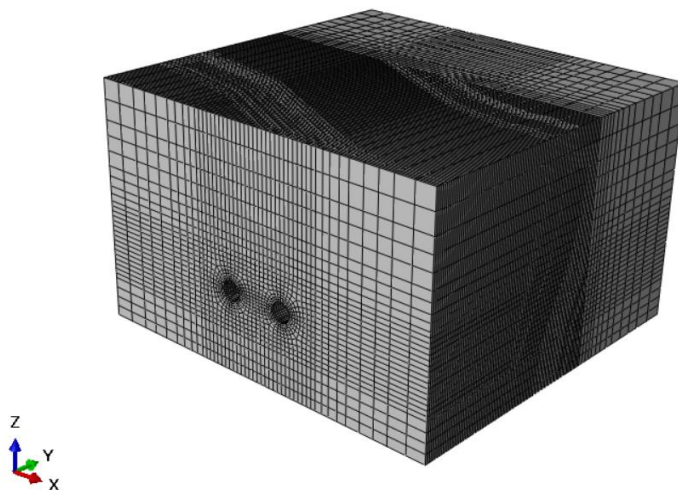
3.3. Περιγραφή αριθμητικού προσομοιώματος

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η διαδικασία μόντωσης των αριθμητικών μοντέλων με στόχο όσο γίνεται την πιο ρεαλιστική απεικόνιση του προβλήματος. Συγκεκριμένα, θα δοθούν λεπτομερώς όλα τα στοιχεία που περιγράφουν τόσο τη γεωμετρία του μοντέλου όσο και τη διακριτοποίηση του καννάβου. Παρουσιάζονται εικόνες από ένα τυπικό προσομοίωμα για πλάτος πυλώνα $W=2D$ για λόγους ευκρίνειας του μοντέλου και τονίζεται πως η διαδικασία προσομοίωσης και για τα υπόλοιπα μοντέλα ήταν ανάλογη με αυτή που περιγράφεται.

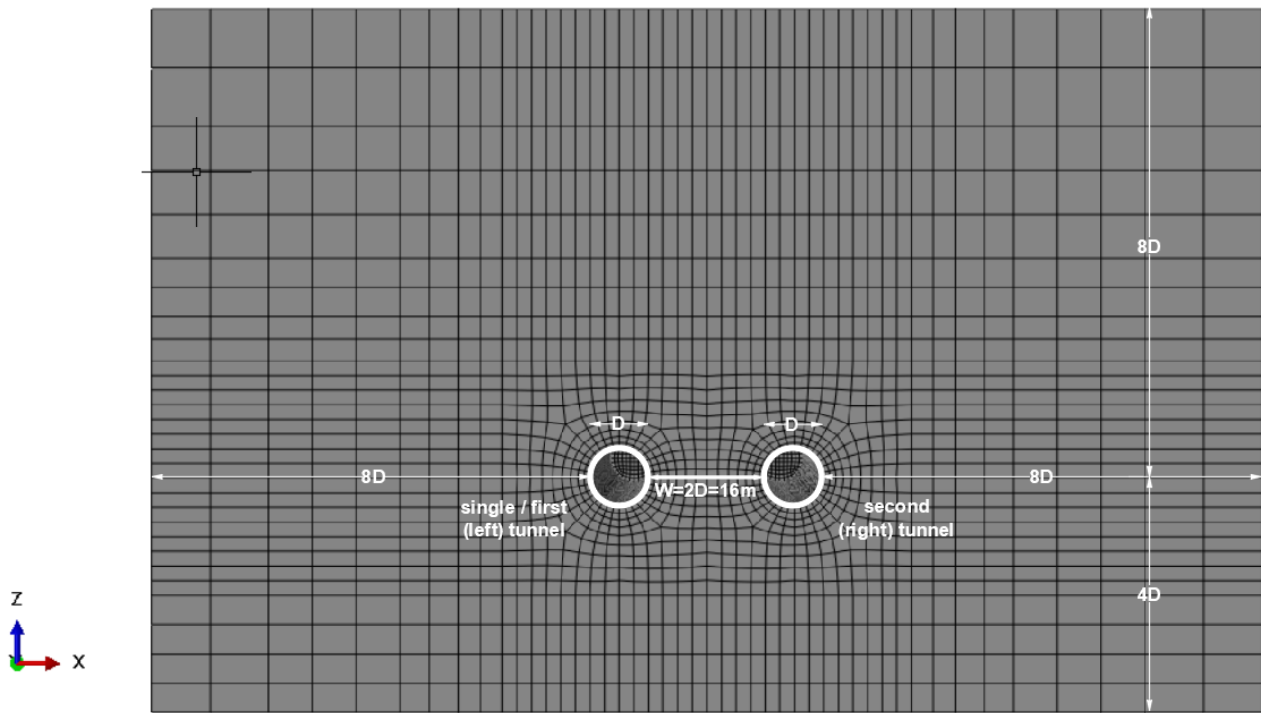
3.3.1. Γεωμετρία μοντέλου

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν τρεις κατηγορίες αναλύσεων. Κάθε κατηγορία εξετάζει μία διαφορετική παράμετρο που αφορά την διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων. Από άποψη γεωμετρίας όλα τα μοντέλα και για τις τρεις κατηγορίες αναλύσεων είναι ίδια πλην του πλάτους πυλώνα το οποίο μεταβάλλεται από $W=0.5D=4m \div W=2D=16m$.

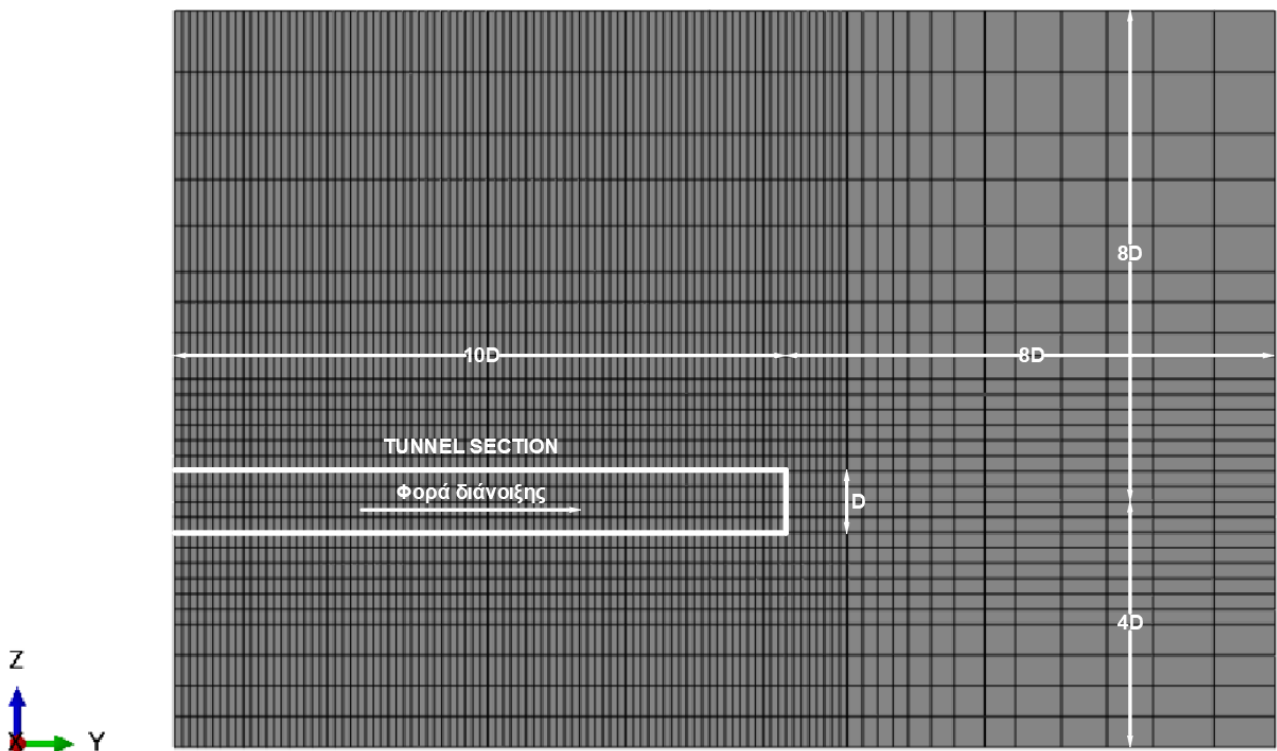
Παρακάτω εμφανίζονται εικόνες που δείχνουν λεπτομερώς το προσομοίωμα για την περίπτωση όπου το πλάτος πυλώνα είναι $W=2D=16m$. Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε μοντέλο δίδυμων βαθιών κυκλικών σηράγγων με διάμετρο $D=8m$, μήκος εκσκαφής $L=10D=80m$, και ύψος υπερκειμένων γαιών $10D=80m$ (λαμβάνεται ως το άθροισμα του ύψους του άνω όριου του μοντέλου ($8D=64m$) μετρούμενο από τον άξονα της σήραγγας και ενός επιπρόσθετου ομοιόμορφα κατανεμημένου κατακόρυφου φορτίου στην άνω επιφάνεια του αριθμητικού μοντέλου ($2D=16m$) που εισήχθει για τη μείωση των υπολογισμών). Η απόσταση από το κατώτερο όριο του προσομοιώματος (πάντα ως βάση αναφοράς λαμβάνεται ο άξονας της σήραγγας) επιλέχθηκε $4D=32m$, ενώ οι αποστάσεις από τα πλευρικά όρια κατά τον άξονα XX' , $8D=64m$. Τέλος, η απόσταση κατά τον διαμήκη άξονα της σήραγγας, δηλαδή κατά τον YY' , στην οποία δεν προσομοιώνεται εκσκαφή επιλέχθηκε να είναι $8D=64m$ από το μέτωπο και ο σκοπός της προσθήκης της είναι ο περιορισμός της επιρροής των αποτελεσμάτων από τις συνοριακές συνθήκες. Γενικότερα, όλες αυτές οι αποστάσεις από τα όρια προέκυψαν έπειτα από αρκετές αναλύσεις ευαισθησίας και είναι τέτοιες ώστε να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα από τις συνοριακές συνθήκες.



Εικόνα 3.2: Προοπτική όψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$

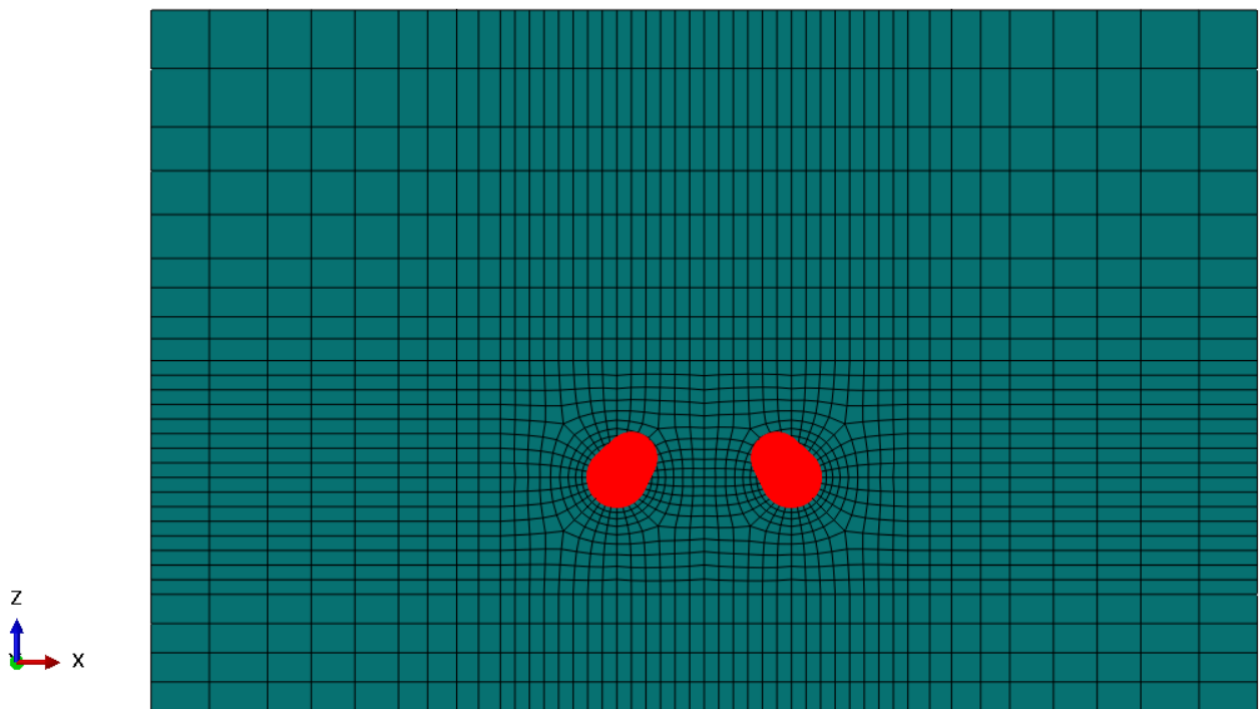


Εικόνα 3.3: Εγκάρσια όψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W=2D$ (Επίπεδο $Z-X$). Στο σχήμα φαίνονται η (αριστερή) «μονή/πρώτη» σήραγγα (single/first tunnel), η (δεξιά) «δεύτερη» σήραγγα (second tunnel) και οι διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου. Η διάμετρος κάθε σήραγγας είναι ίση με 8m

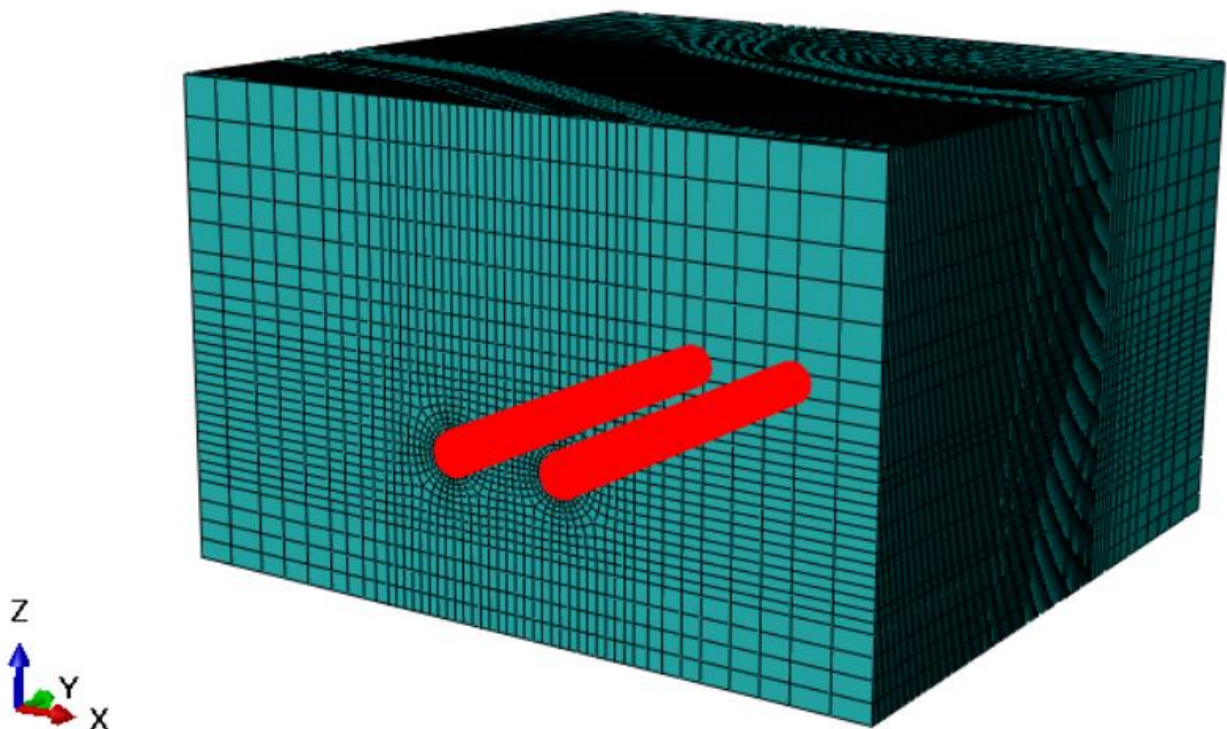


Εικόνα 3.4: Μηκοτομική όψη και διαστάσεις του ίδιου προσομοιώματος

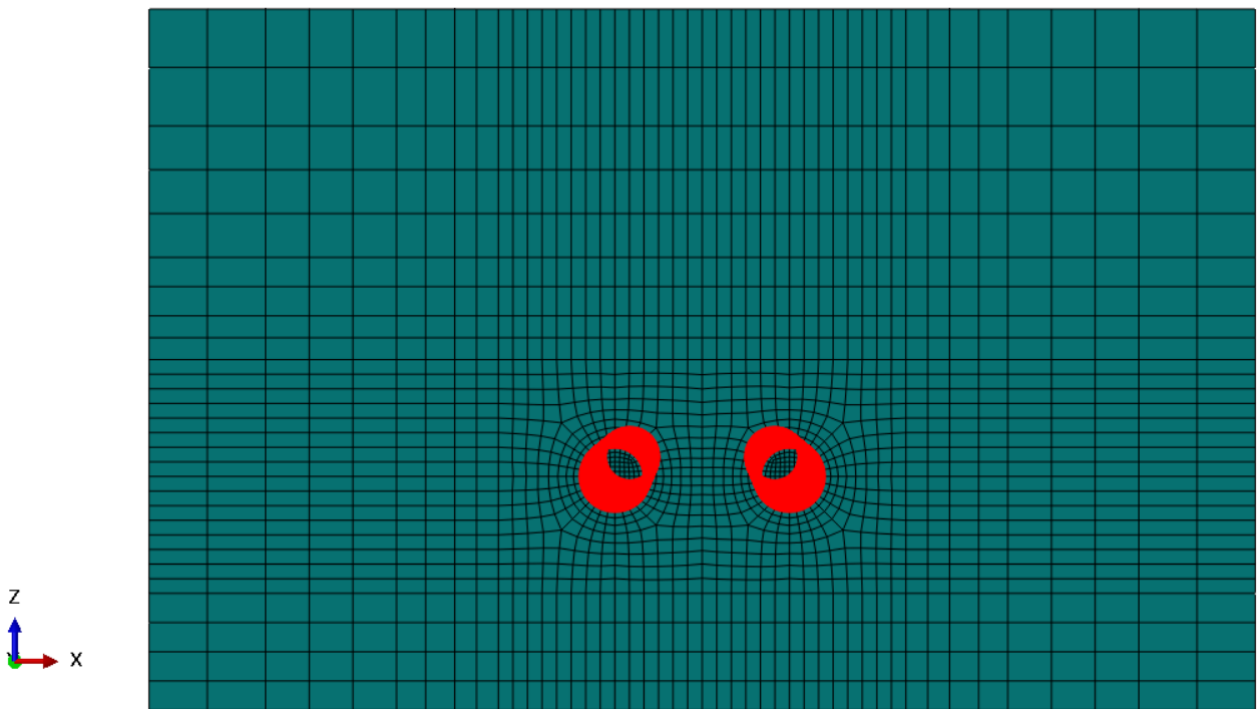
Για την επίλυση του προβλήματος ακολούθησε μία κατηγοριοποίηση των κόμβων και των πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό τον ορισμό διαφόρων sets, κάποια από τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.



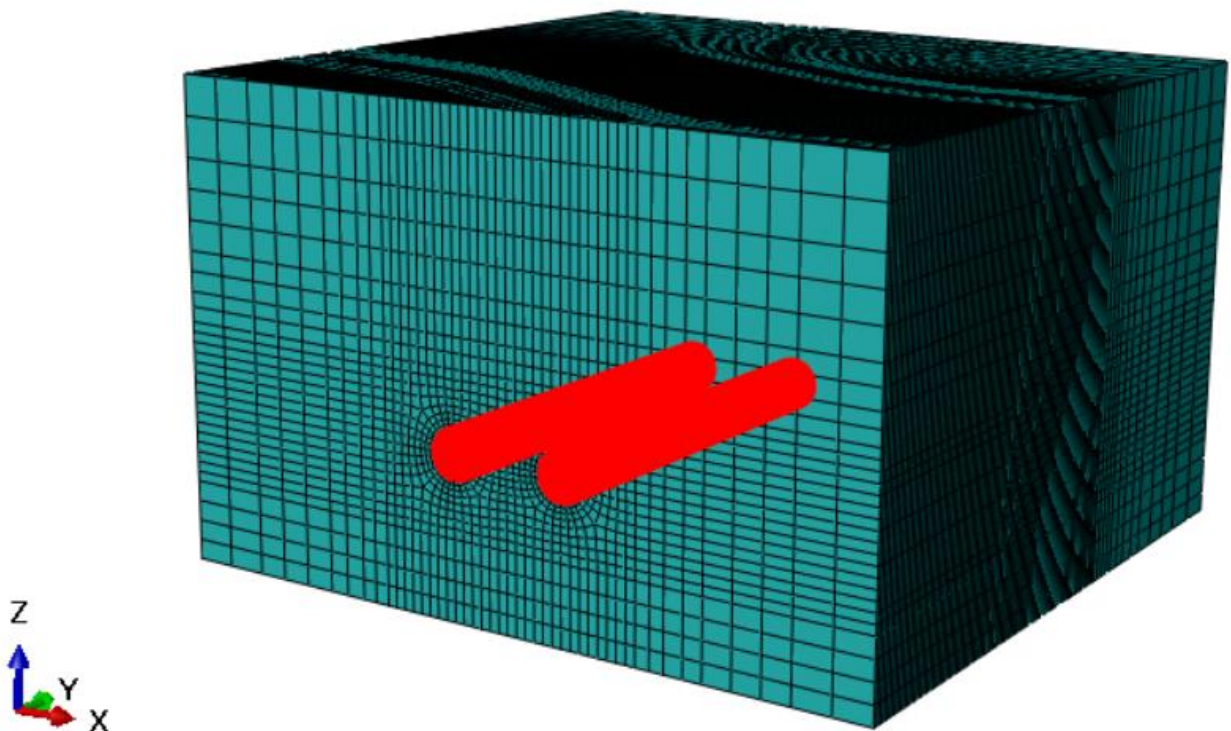
Εικόνα 3.5: Απεικόνιση εν διατομή των πεπερασμένων στοιχείων που αφαιρούνται κατά το μήκος εκσκαφής (10D) στις δύο σήραγγες, (Soil Excavation Elements)



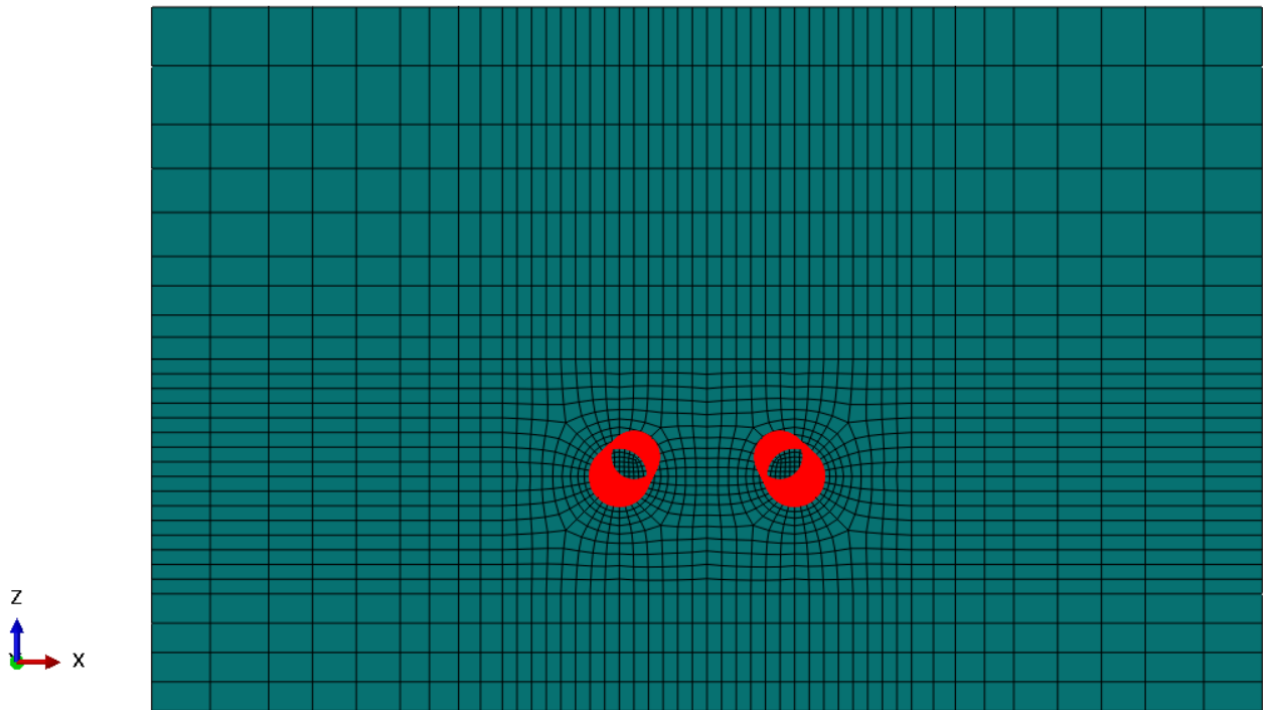
Εικόνα 3.6: Μηκοτομική απεικόνιση των πεπερασμένων στοιχείων που αφαιρούνται κατά το μήκος εκσκαφής (10D) στις δύο σήραγγες, (Soil Excavation Elements)



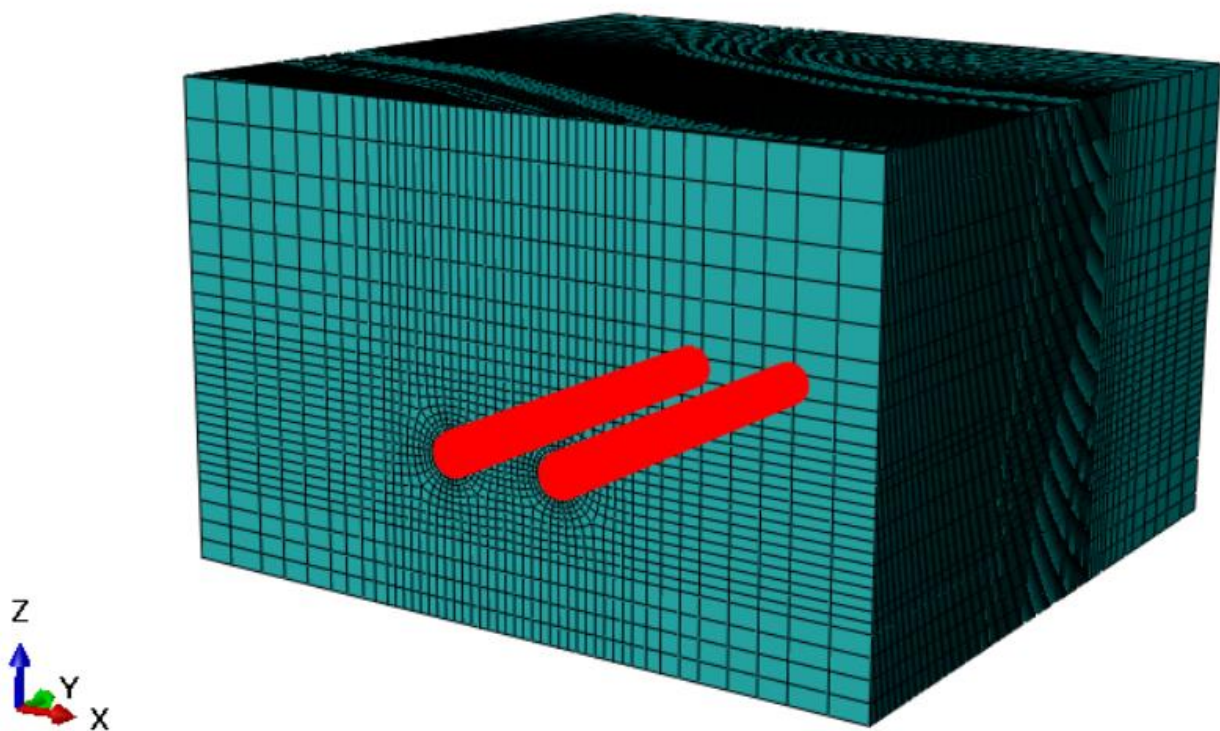
Εικόνα 3.7: Απεικόνιση εν διατομή των πεπερασμένων στοιχείων που αντιπροσωπεύουν το σύνορο του τοιχώματος των σηράγγων κατά το μήκος εκσκαφής (10D), (Soil Surface Elements)



Εικόνα 3.8: Μηκοτομική απεικόνιση των πεπερασμένων στοιχείων που αντιπροσωπεύουν το σύνορο του τοιχώματος των σηράγγων κατά το μήκος εκσκαφής (10D), (Soil Surface Elements)



Εικόνα 3.9: Απεικόνιση εν διατομή των πεπερασμένων στοιχείων που αντιπροσωπεύουν την άμεση υποστήριξη των σηράγγων κατά το μήκος εκσκαφής (10D), (Support Elements)



Εικόνα 3.10: Μηκτομική απεικόνιση των πεπερασμένων στοιχείων που αντιπροσωπεύουν την άμεση υποστήριξη των σηράγγων κατά το μήκος εκσκαφής (10D) (Support Elements)

3.3.2. Διακριτοποίηση καννάβων

Οι κάνναβοι των προσομοιωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν μορφώθηκαν με χρήση τριδιάστατων εξαπλευρικών οκτακομβικών πεπερασμένων στοιχείων (C3D8) για την προσομοίωση του περιβάλλοντος γεωυλικού, ενώ για την προσομοίωση του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν τετραπλευρικά τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία (S4).

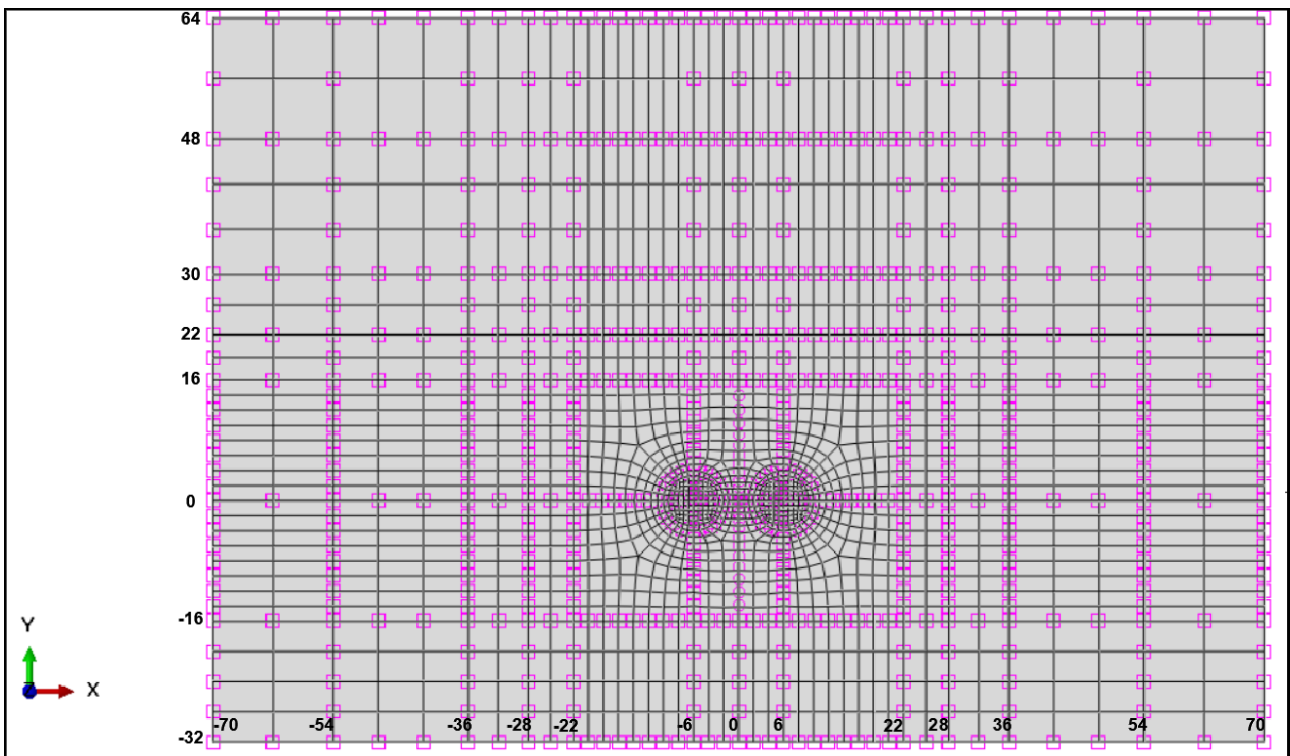
Με τον ίδιο τρόπο που πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας για την επιλογή των διαστάσεων των μοντέλων, πραγματοποιήθηκαν αντίστοιχες και για την διαμόρφωση του καννάβου. Με αυτό τον τρόπο καταλήξαμε στην τελική μορφή του καννάβου, η οποία συνδυάζει αξιοπιστία αποτελεσμάτων χωρίς να απαιτούνται πολλές ώρες αναλύσεων.

Η βασική ιδέα που ακολουθήθηκε ήταν η πύκνωση του καννάβου στις περιοχές ενδιαφέροντος και η σταδιακή αραιώσή του καθώς απομακρυνόμαστε από αυτές. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε πύκνωση μέσα στις σήραγγες, στην περιοχή ανάμεσά τους και σε μια περιοχή γύρω από αυτές. Με αυτόν τον τρόπο επιτεύχθηκε η αύξηση της λεπτομέρειας και της ακρίβειας της προσομοίωσης στις περιοχές εξαγωγής των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων και κατ' επέκταση η αύξηση της ορθότητας και της αξιοπιστίας αυτών. Παρακάτω παρουσιάζονται αρχικά ο πίνακας που δείχνει κατά τις τρεις διευθύνσεις πώς μορφώθηκε ο κάνναβος και στη συνέχεια επεξηγηματικές εικόνες. Για λόγους κατανόησης αξίζει να αναφερθεί ότι ο άξονας $y-y'$ αναφέρεται στον άξονα της σήραγγας, ο άξονας $z-z'$ αναφέρεται στο κατακόρυφο ύψος του προσομοιώματος και ο άξονας $x-x'$ στην οριζόντια απόσταση του προσομοιώματος.

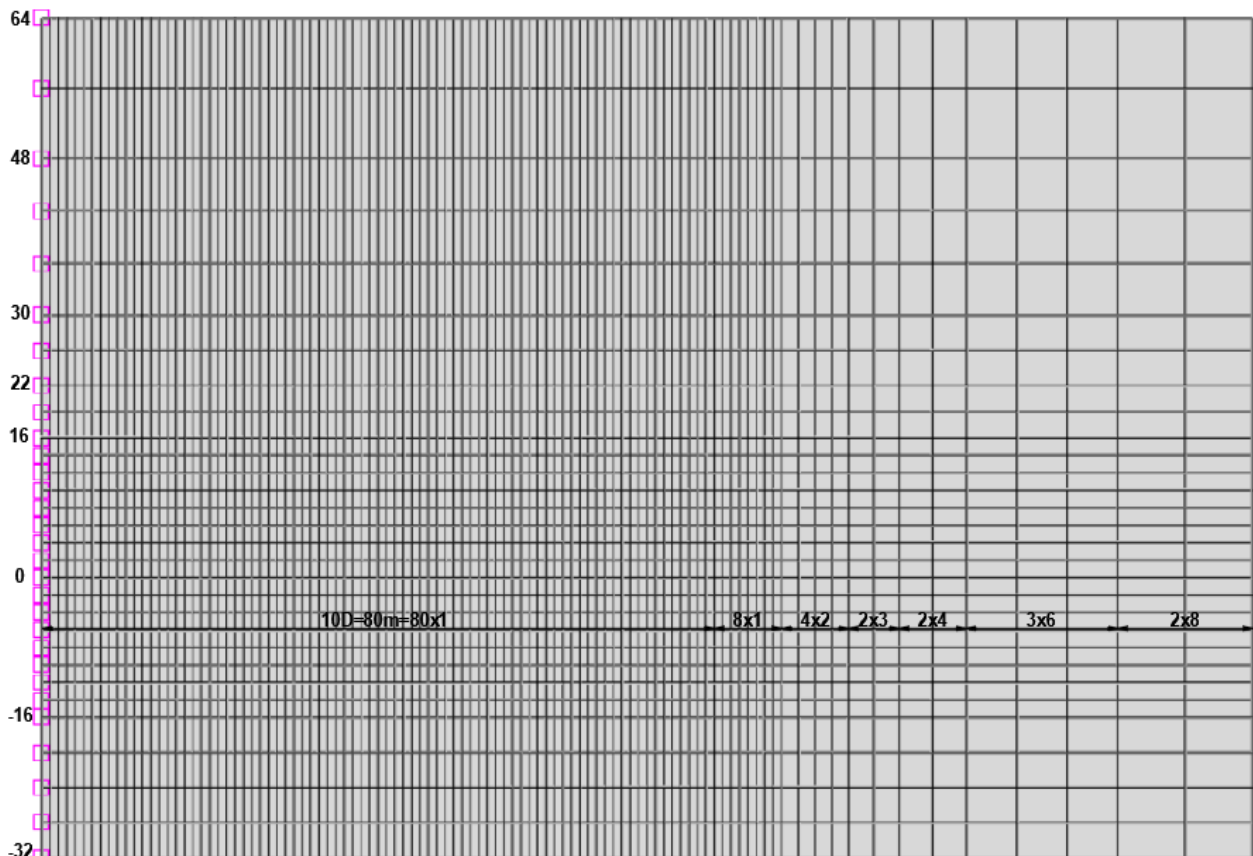
Άξονας $y-y'$	Μήκος πεπερασμένων στοιχείων	Άξονας $z-z'$	Μήκος πεπερασμένων στοιχείων	Άξονας $x-x'$	Μήκος πεπερασμένων στοιχείων
0 - 80m	1m	(-32m)-(16m)	4m	0-6m	2m
80 - 88m	1m	(-16m)-0	2m	6m-22m	2m
88 - 96m	2m	0-16m	2m	22m-28m	3m
96 - 102m	3m	16m-22m	3m	28m-36m	4m
102 - 110m	4m	22m-30m	4m	36m-54m	6m
110 - 128m	6m	30m-48m	6m	54m-70m	8m
128 - 144m	8m	48m-64m	8m	-	-

Πίνακας 3.1: Οι περιοχές και οι αποστάσεις βάσει των οποίων μορφώθηκε ο κάνναβος στις τρεις διαστάσεις

Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται οι περιοχές που διαμορφώθηκαν με σκοπό να δημιουργηθεί ένας δομημένος κάνναβος καθώς και οι περιοχές πύκνωσης γύρω από τις σήραγγες.



Εικόνα 3.11: Εγκάρσια όψη και διαμόρφωση καννάβου πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 3.12: Διαμήκης όψη και διαμόρφωση καννάβου πεπερασμένων στοιχείων

3.3.3. Βήματα εκσκαφής

Τα βήματα των αριθμητικών αναλύσεων που επιλέγονται είναι πολύ σημαντικά στη μελέτη των σηράγγων, καθώς είναι αυτά που καθορίζουν την αλληλουχία και το ρυθμό προχώρησης της εκσκαφής. Παράγοντες όπως η γεωμετρία της εκσκαφής, οι ιδιότητες του περιβάλλοντος γεωυλικού και η μέθοδος εκσκαφής επηρεάζουν την επιλογή του συνολικού αριθμού των βημάτων και των στάδιων κατασκευής. Επομένως, δεν υπάρχει μία και μόνο εφαρμόσιμη λύση για όλες τις περιπτώσεις εκσκαφής, αλλά πολλές ποικίλες λύσεις ανάλογα το γεωτεχνικό πρόβλημα.

Τα στοιχεία που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες και σχετίζονται με τη γεωμετρία του προσομοιώματος και τη διακριτοποίηση των καννάβων εισήχθησαν αρχικά σε ένα αρχείο "input file" του λογισμικού Abaqus και στη συνέχεια ακολούθησε ο καθορισμός των βημάτων εκσκαφής ο οποίος δεν έγινε με τυχαίο τρόπο αλλά αντιθέτως σχετίστηκε άμεσα με το βαθμό αυτουποστήριξης του γεωυλικού και την οικονομία στα μέτρα άμεσης υποστήριξης. Έτσι τα βήματα εκσκαφής καθόρισαν το ρυθμό της εξόρυξης και το βήμα εκσκαφής που επιλέχθηκε για όλες τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας είναι $\beta=1\text{m}$ (είναι μία παραδοχή εύλογη σύμφωνα με τη συνήθη κατασκευαστική πρακτική). Σε όλες τις αναλύσεις θεωρήθηκε ολομέτωπη εκσκαφή κυκλικής διατομής διαμέτρου $D=8\text{m}$ σε ομογενές, ελαστικό – απολύτως πλαστικό γεωυλικό και η διάνοιξη για τους δύο κλάδους πραγματοποιήθηκε με φορά από $\gamma=0$ έως $\gamma=80\text{m}$. Οι αριθμητικές αναλύσεις στην εν λόγω εργασία πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τη διερεύνηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο κλάδων της δίδυμης σήραγγας και συγκεκριμένα τον προσδιορισμό της επίδρασης της μεταβολής του πλάτους πυλώνα και των γεωτεχνικών συνθηκών στο φαινόμενο. Επομένως, το βήμα εκσκαφής $\beta=1\text{m}$ παρέμεινε αναλλοίωτο για όλες τις αναλύσεις με αποτέλεσμα την ύπαρξη συνολικά 161 βημάτων, καθώς η διάνοιξη και η υποστήριξη της δεύτερης σήραγγας πραγματοποιείται αφότου ολοκληρωθεί η διάνοιξη και υποστήριξη της πρώτης σήραγγας. Γενικά επιλέχτηκε αυτή η μέθοδος διάνοιξης σε σχέση με την ταυτόχρονη διάνοιξη των δύο σηράγγων, καθώς επιδιώκεται να διερευνηθεί η επίδραση του δεύτερου κλάδου στον πρώτο.

Συγκεκριμένα, τα βήματα εκσκαφής όπως ορίστηκαν στο λογισμικό του Abaqus για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν περιγράφονται ως εξής :

⇒ Βήμα 0

Υπολογισμός του αρχικού (γεωστατικού) εντατικού πεδίου πριν από την κατασκευή των σηράγγων. Στο βήμα αυτό αφαιρείται το υλικό της υποστήριξης καθώς δεν έχει ξεκινήσει ακόμα η εκσκαφή.

⇒ Βήμα 1

Εκσκαφή του πρώτου μέτρου της πρώτης (αριστερής) σήραγγας.

⇒ Βήμα 2

Εκσκαφή του δεύτερου μέτρου της πρώτης (αριστερής) σήραγγας και ταυτόχρονα υποστήριξη του πρώτου μέτρου που εκσκαφτηκε στο προηγούμενο βήμα. Εφόσον η προχώρηση είναι 1m, η εκσκαφή θα προηγείται πάντα κατά 1 βήμα της ενεργοποίησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

⇒ Βήμα 3 ~ 80

Εκσκαφή του επόμενου μέτρου της πρώτης (αριστερής) σήραγγας, τοποθέτηση και ενεργοποίηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης. Ολοκλήρωση της εκσκαφής της πρώτης (αριστερής) σήραγγας στο βήμα N^ο 80.

⇒ Βήμα 81

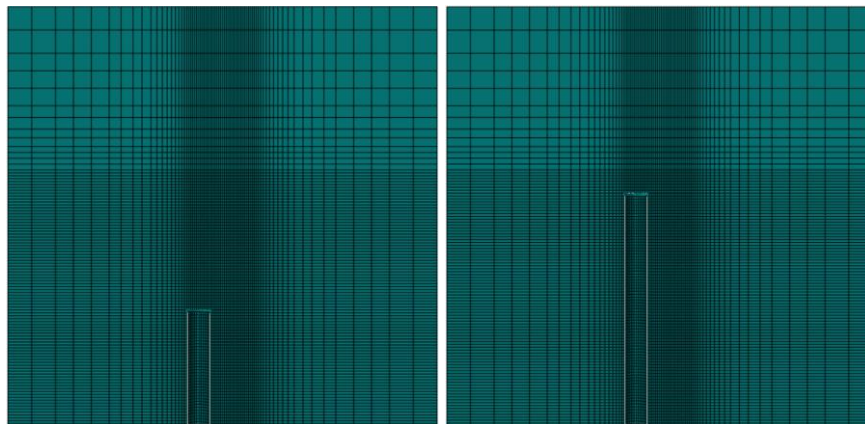
Εκσκαφή του πρώτου μέτρου της δεύτερης (δεξιάς) σήραγγας.

⇒ Βήμα 82

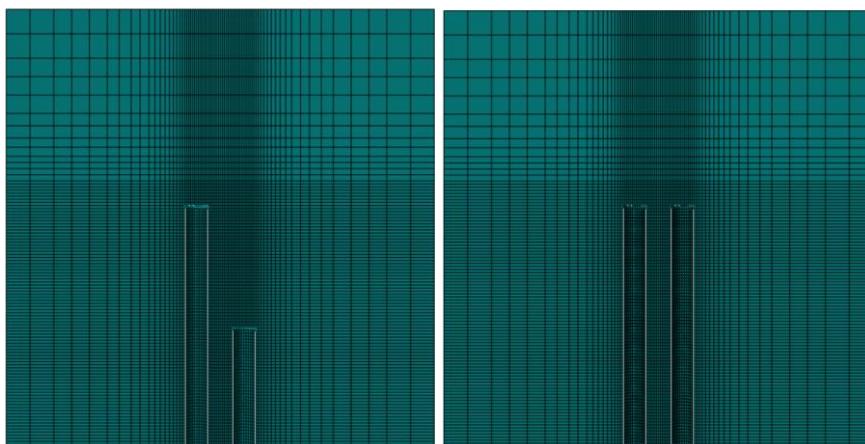
Εκσκαφή του δεύτερου μέτρου της δεύτερης (δεξιάς) σήραγγας και ταυτόχρονα υποστήριξη του πρώτου μέτρου που εκσκάφτηκε στο προηγούμενο βήμα. Εφόσον η προχώρηση είναι 1m, η εκσκαφή θα προηγείται πάντα κατά 1 βήμα της ενεργοποίησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

⇒ Βήμα 83 ~ 160

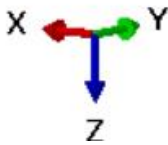
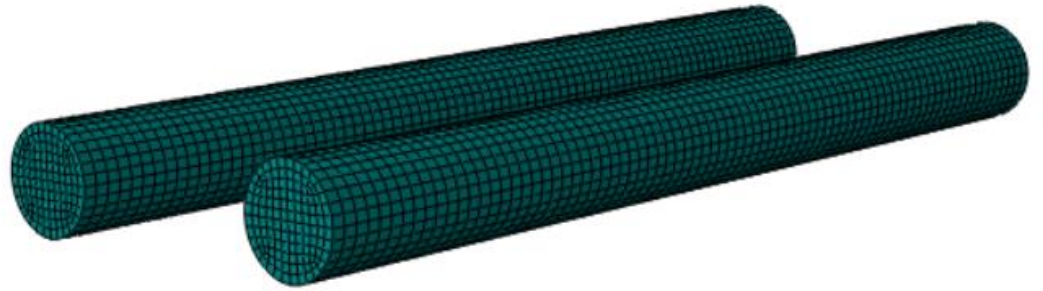
Εκσκαφή του επόμενου μέτρου της δεύτερης (δεξιάς) σήραγγας, τοποθέτηση και ενεργοποίηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης. Ολοκλήρωση της εκσκαφής και της δεύτερης (δεξιάς) σήραγγας στο βήμα N^ο 160.



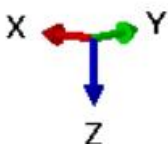
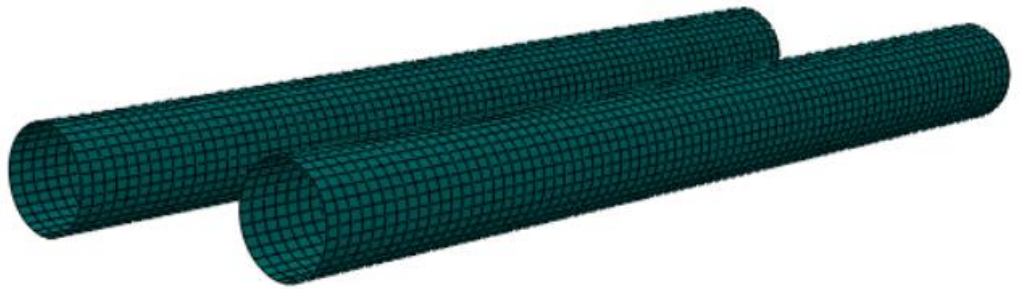
Εικόνα 3.13: Τομές στο επίπεδο X-Y στα βήματα 40 και 80 αντίστοιχα



Εικόνα 3.14: Τομές στο επίπεδο X-Y στα βήματα 120 και 160 αντίστοιχα



Εικόνα 3.15: Πεπερασμένα στοιχεία εντός των διατομών εκσκαφής (οκτακομβικά εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία εδάφους C3D8), τα οποία αφαιρούνται κατά τα διαδοχικά στάδια προσομοίωσης (Excavation Elements)



Εικόνα 3.16: Πεπερασμένα στοιχεία του κελύφους της άμεσης υποστήριξης (τετρακομβικά μίας έδρας πεπερασμένα στοιχεία κελύφους S4), τα οποία ενεργοποιούνται κατά τα διαδοχικά στάδια προσομοίωσης (Support Elements)

3.4. Παράμετροι αριθμητικών αναλύσεων

Προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά των δύο κλάδων μίας δίδυμης σήραγγας κατά τη διάνοιξη σε συνάρτηση με την μεταξύ τους απόσταση, κατασκευάστηκαν τρία αριθμητικά προσομοιώματα διαφορετικής γεωμετρίας. Η εν λόγω διαφοροποίηση στη γεωμετρία σχετίζεται αποκλειστικά και μόνο με την εγκάρσια απόσταση των σηράγγων ή αλλιώς το πλάτος πυλώνα W . Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά αλλά και συγκεντρωτικά με τη βοήθεια πινάκων όλες οι γεωμετρικές και κατασκευαστικές παράμετροι, οι γεωτεχνικές παράμετροι καθώς και οι παράμετροι άμεσης υποστήριξης που λήφθησαν υπόψη κατά το σχεδιασμό των τριών αριθμητικών προσομοιωμάτων στις τρισδιάστατες αναλύσεις.

3.4.1. Γεωμετρικές και κατασκευαστικές παράμετροι

➤ Διάμετρος σήραγγας D

Η διάμετρος των δύο σηράγγων διατηρήθηκε σταθερή σε όλες τις αναλύσεις και είναι $D=8\text{m}$.

➤ Ύψος υπερκείμενων H

Η προσομοίωση του ύψους των υπερκείμενων γαιών λαμβάνεται ως το άθροισμα του ύψους του άνω όριου του μοντέλου ($8D=64\text{m}$) μετρούμενο από τον άξονα της σήραγγας και ενός επιπρόσθετου ομοιόμορφα κατανεμημένου κατακόρυφου φορτίου στην άνω επιφάνεια του αριθμητικού μοντέλου ($2D=16\text{m}$). Δηλαδή, $H=8D+2D=10D=80\text{m}$.

➤ Πλάτος πυλώνα W

Ως πλάτος πυλώνα (W) ορίζεται η οριζόντια απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων μίας δίδυμης σήραγγας και η απόσταση αυτή μετράει από τις εσωτερικές παρειές των δύο σηράγγων. Το πλάτος πυλώνα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες αλληλεπίδρασης των δύο κλάδων μίας δίδυμης σήραγγας και γι'αυτό το λόγο αποτελεί αντικείμενο μελέτης και για την εν λόγω διπλωματική εργασία. Συγκεκριμένα, τα πλάτη πυλώνα που εξετάζονται είναι :

- $W=0.5D$
- $W=D$
- $W=2D$

➤ Μήκος εκσκαφής L

Το μήκος εκσκαφής ορίστηκε ως $L=10D=80\text{m}$ ώστε να έχουμε απομακρυνθεί αρκετά από το μέτωπο εκσκαφής με σκοπό την σταθεροποίηση των τάσεων.

➤ Πλευρικά όρια μοντέλου

Τα πλευρικά όρια του μοντέλου από τον άξονα κάθε σήραγγας είναι $10D=80\text{m}$, όπως επίσης και η απόσταση του διαμήκους ορίου μπροστά από κάθε σήραγγα είναι $8D=64\text{m}$.

3.4.2. Γεωτεχνικές παράμετροι

Οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες στο σχεδιασμό και την κατασκευή των σιηράγγων, καθώς επηρεάζουν τα φορτία και τα εντατικά μεγέθη που υφίσταται η άμεση υποστήριξη. Με σκοπό τη μελέτη των μεγεθών αυτών συναρτήσει και των γεωτεχνικών συνθηκών σε κάθε σειρά αναλύσεων, πέρα από τις μεταβλητές παραμέτρους του πλάτους του πυλώνα, τροποποιούνται και οι γεωτεχνικές παράμετροι του περιβάλλοντος γεωυλικού.

Η βραχόμαζα προσομοιώνεται ως ισότροπο γραμμικώς ελαστικό – απολύτως πλαστικό υλικό, το οποίο ακολουθεί το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb. Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής του γεωυλικού, δηλαδή η συνοχή (c) και η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ), έχουν υπολογιστεί ως ισοδύναμες παράμετροι με παραμέτρους προέλευσης αυτές του άρρηκτου βράχου, μέσω του συνδυασμού του κριτηρίου Mohr – Coulomb και του γενικευμένου κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown. Πιο συγκεκριμένα, οι ισοδύναμες παράμετροι Mohr – Coulomb προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία που προτείνεται από τους Hoek et al. (2002) και το μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας υπολογίζεται με βάση τη σχέση που προτείνουν οι Hoek & Diederichs (2006).

- Η αντοχή του γεωυλικού σε ανεμπόδιση θλίψη (σ_c) με βάση το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb είναι :

$$\sigma_c = 2 \cdot c \cdot \sqrt{N_\phi}$$

όπου

$$N_\phi = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

και το εύρος τιμών της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη για τις υπό εξέταση βραχόμαζες προκύπτει (Πίνακας 3.2): $\sigma_c = (0.21 \text{ MPa} \sim 1.83 \text{ MPa})$.

- Ειδικό βάρος πετρώματος (γ)

Το ειδικό βάρος του πετρώματος (γ) θεωρείται ίσο με 0.025 MN/m^3 σε όλες τις αναλύσεις. Κατά συνέπεια, η πυκνότητα του πετρώματος θα είναι $\rho = \gamma/g = (25 \text{ kN/m}^3)/10 = 2.50 \text{ Mgr/m}^3$.

- Παράμετροι διατμητικής αντοχής : Γωνία τριβής (ϕ) και συνοχή (c)

Στο προσομοίωμα διερευνήθηκαν 20 διαφορετικές βραχόμαζες με 20 διαφορετικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και κατά συνέπεια σε κάθε ανάλυση η παράμετρος ϕ και η παράμετρος c μεταβάλλονταν. Το εύρος τιμών της γωνίας τριβής είναι (Πίνακας 3.2): $\phi = (17.5^\circ \sim 34.5^\circ)$, ενώ το εύρος τιμών της συνοχής είναι (Πίνακας 3.2): $c = (0.062 \text{ MPa} \sim 0.209 \text{ MPa})$.

- Γωνία διαστολικότητας (δ)

Η γωνία διαστολικότητας λήφθηκε σε κάθε ανάλυση ίση με $\delta = \phi/4$.

- Λόγος Poisson ν

Ο λόγος Poisson ν λήσθηκε ίσος με $\nu=0.3$.

➤ Μέτρο Παραμορφωσιμότητας E

Το εύρος τιμών για το Μέτρο Παραμορφωσιμότητας (E) ανάμεσα στις 20 βραχόμαζες που εξετάστηκαν κυμαίνεται ως εξής (Πίνακας 3.2): $E = (0.0534 \text{ GPa} \sim 0.5697 \text{ GPa})$.

➤ Συντελεστής οριζόντιων τάσεων (K_0)

Οι υφιστάμενες γεωστατικές και τεκτονικές τάσεις καθορίζονται από το συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0 και στη συγκεκριμένη περίπτωση διάνοιξης σηράγγων που εξετάζεται είναι $K_0=0.5$. Ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων του γεωυλικού είναι ο λόγος των οριζόντιων τάσεων προς τις κατακόρυφες τάσεις και καθορίζει το γεωστατικό εντατικό πεδίο και επηρεάζει τις διεκτροπικές τάσεις. Για όλες τις αναλύσεις ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων παρέμεινε ο ίδιος και έχει την τιμή $K_0=0.5$. Συνήθως, οι τιμές $K = 0 \sim 0.3$ αναφέρονται σε τεκτονικές τάσεις με εφελκυστικό τεκτονικό πεδίο. Οι τιμές $K = 0.4 \sim 0.7$ αναφέρονται σε αποσαθρωμένες βραχόμαζες. Οι τιμές $K=0.7 \sim 1$ αναφέρονται σε υγιείς βραχόμαζες χωρίς επιρροή τεκτονικών τάσεων. Τέλος, οι τιμές $K>1 \sim 4$ αναφέρονται σε τεκτονικές τάσεις με έντονα θλιπτικό τεκτονικό πεδίο.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι γεωτεχνικές παράμετροι και για τις 20 βραχόμαζες συγκεντρωτικά:

Βραχόμαζα	Πυκνότητα ρ (Mg/m ³)	Μέτρο Παραμορφωσιμότητας E (GPa)	Λόγος Poisson ν	Γωνία τριβής ϕ (°)	Γωνία διαστολικότητας $\delta=\phi/4$	Συνοχή c (MPa)	GSI	Αντοχή σε ανέμπδοιστη θλίψη σ_{cm} (MPa)	$\sigma_{cm}/\rho\sigma$	Συντελεστής οριζόντιων τάσεων K_0
1	2.5	0.0534	0.3	17.5	4.38	0.062	10	0.21	0.11	0.5
2	2.5	0.1068	0.3	21.1	5.28	0.079	10	0.43	0.22	0.5
3	2.5	0.1601	0.3	23.4	5.85	0.091	10	0.64	0.32	0.5
4	2.5	0.2135	0.3	25.1	6.28	0.101	10	0.86	0.43	0.5
5	2.5	0.0638	0.3	19.5	4.88	0.078	15	0.27	0.14	0.5
6	2.5	0.1276	0.3	23.6	5.90	0.100	15	0.55	0.28	0.5
7	2.5	0.1914	0.3	26.1	6.53	0.116	15	0.82	0.41	0.5
8	2.5	0.2551	0.3	28.0	7.00	0.129	15	1.10	0.55	0.5
9	2.5	0.0799	0.3	21.3	5.33	0.093	20	0.34	0.17	0.5
10	2.5	0.1599	0.3	25.7	6.43	0.121	20	0.67	0.34	0.5
11	2.5	0.2398	0.3	28.5	7.13	0.140	20	1.01	0.51	0.5
12	2.5	0.3197	0.3	30.5	7.63	0.156	20	1.34	0.67	0.5
13	2.5	0.1047	0.3	22.9	5.73	0.107	25	0.40	0.20	0.5
14	2.5	0.2095	0.3	27.6	6.90	0.140	25	0.79	0.40	0.5
15	2.5	0.3142	0.3	30.5	7.63	0.164	25	1.19	0.60	0.5
16	2.5	0.419	0.3	32.6	8.15	0.183	25	1.58	0.79	0.5
17	2.5	0.1424	0.3	24.5	6.13	0.121	30	0.46	0.23	0.5
18	2.5	0.2848	0.3	29.4	7.35	0.159	30	0.91	0.46	0.5
19	2.5	0.4273	0.3	32.4	8.10	0.187	30	1.37	0.69	0.5
20	2.5	0.5697	0.3	34.5	8.63	0.209	30	1.83	0.92	0.5

Πίνακας 3.2: Οι γεωτεχνικές παράμετροι για τις 20 κατηγορίες βραχόμαζας που εξετάστηκαν στις τριδιάστατες αναλύσεις των τριών αριθμητικών προσομοιωμάτων

3.4.3. Παράμετροι άμεσης υποστήριξης

Η υποστήριξη που επιλέχθηκε να τοποθετηθεί στην υπό εξέταση έρευνα είναι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, το οποίο ενεργοποιείται (τοποθετείται) σε απόσταση 1m πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Επιλέχθηκαν ίδια μέτρα προσωρινής υποστήριξης και για τις δύο διατομές με τις ίδιες παραμέτρους για όλες τις αναλύσεις. Επομένως, στην εν λόγω έρευνα δεν εξετάστηκε ο βαθμός επιρροής της δυσκαμψίας της προσωρινής υποστήριξης καθώς δεν έγινε προσομοίωση στα

αριθμητικά προσομοιώματα με μεταβλητό πάχος εκτοξευόμενου σκυρόδεματος. Συνοψίζοντας, λοιπόν, οι παράμετροι άμεσης υποστήριξης που λήφθηκαν υπόψη είναι:

➤ Ειδικό βάρος (γ_{sup})

Το ειδικό βάρος του εκτοξευόμενου σκυρόδεματος της άμεσης υποστήριξης θεωρήθηκε ίσο με $\gamma_{sup}=0.025\text{MN/m}^3$ και κατά συνέπεια η πυκνότητά του είναι $\rho=\gamma/g=2.5\text{Mgr/m}^3$.

➤ Μέτρο Παραμορφωσιμότητας (E_{sup})

Το μέτρο παραμορφωσιμότητας του εκτοξευόμενου σκυρόδεματος της άμεσης υποστήριξης θεωρήθηκε $E_{sup}=20\text{GPa}$.

➤ Λόγος Poisson (ν_{sup})

Ο λόγος του Poisson του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης θεωρήθηκε ίσος με $\nu_{sup}=0.2$

➤ Πάχος εκτοξευόμενου σκυρόδεματος (d_{sup}).

Το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης θεωρήθηκε $d_{sup}=0.2\text{m}$.

3.4.4. Συνολικές παράμετροι

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά όλες οι παραπάνω παράμετροι που αναφέρθηκαν παραπάνω για τα αριθμητικά προσομοιώματα που σχεδιάζονται, για τις διάφορες κατηγορίες γεωτεχνικών συνθηκών που εξετάζονται και για τα μέτρα άμεσης υποστήριξης που τοποθετούνται μετά την εκσκαφή των διατομών.

	Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμές	Μονάδες
Γεωμετρικές Κατασκευαστικές Παράμετροι Σήραγγας	Διάμετρος Σήραγγας	D	8	m
	Ύψος Υπερκείμενων	H	80	m
Γεωτεχνικές Παράμετροι Γεωλικού	Ειδικό Βάρος	γ	0.025	MN/m ³
	Συνοχή	c	0.062 - 0.209	MPa
	Γωνία Τριβής	ϕ	17.5 - 34.5	(^ο)
	Γωνία Διαστολικότητας	ψ	$\phi/4$	(^ο)
	Μέτρο Παραμορφωσιμότητας	E	0.0534 - 0.5697	GPa
	Λόγος του Poisson	ν	0.3	-
	Συντελεστής Οριζόντιων Τάσεων	K_0	0.5	-
Παράμετροι Άμεσης Υποστήριξης	Πάχος	d_{sup}	0.2	m
	Ειδικό Βάρος	γ_{sup}	0.025	MN/m ³
	Μέτρο Παραμορφωσιμότητας	E_{sup}	20	GPa
	Λόγος του Poisson	ν_{sup}	0.2	-

Πίνακας 3.3: Παράμετροι αριθμητικών αναλύσεων

3.5. Παραδοχές αριθμητικών αναλύσεων

Για την εύκολη κατανόηση των αποτελεσμάτων που θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο, σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι παραδοχές που υιοθετήθηκαν στην εν λόγω έρευνα. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τον προσδιορισμό του βαθμού επιρροής της εκσκαφής και διάνοιξης του δεύτερου κλάδου ως προς τον πρώτο, υιοθετούνται οι εξής παραδοχές:

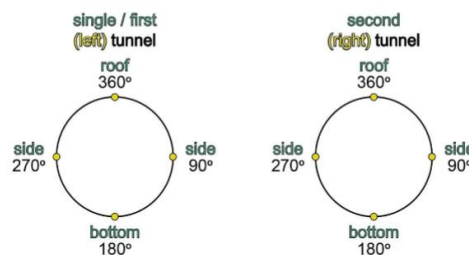
- Η βάση σύγκρισης είναι ο αριστερός κλάδος ο οποίος πριν ξεκινήσει η εκσκαφή και διάνοιξη του δεξιού ονομάζεται «μονή» σήραγγα (single tunnel).
- Από τη στιγμή που ξεκινά η εκσκαφή και διάνοιξη του δεξιού κλάδου, η «μονή» σήραγγα μετονομάζεται σε «πρώτη» σήραγγα (first tunnel).
- Αντίστοιχα, ο δεξιός κλάδος ονομάζεται «δεύτερη» σήραγγα (second tunnel).

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας πραγματοποιείται ύστερα από την πλήρη εκσκαφή της αριστερής σήραγγας. Ως βάση σύγκρισης κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων, λαμβάνεται η «μονή» σήραγγα (single tunnel). Συγκρίνονται δηλαδή τα εξαγόμενα αποτελέσματα της «πρώτης» (first tunnel) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) με τα εξαγόμενα μεγέθη της «μονής» (single tunnel), δίνοντας έτσι έμφαση στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης και στη διαφορετική απόκριση των σιηράγγων στην περίπτωση κατασκευής μονής και δίδυμης σήραγγας.

Ως χαρακτηριστική, «τυπική», διατομή (typical section) λαμβάνεται εκείνη στην οποία έχει υπάρξει σταθεροποίηση της εντατικής και παραμορφωσιακής απόκρισης της περιβάλλουσας βραχώμαζας

και το σύστημα γεωυλικό – κέλυφος υποστήριξης έχει πρακτικά ισορροπήσει λόγω της προχώρησης του μετώπου εκσκαφής. Συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία, ως διατομή με ισορροπία λήφθηκε εκείνη η διατομή στην οποία παρατηρείται συνεχής ποσοστιαία μεταβολή μικρότερη του 0.1%. Δηλαδή, στη θέση αυτή θεωρείται ότι η βραχώμαζα, λόγω της προχώρησης του μετώπου, έχει ισορροπήσει. Μόνο στις καμπτικές ροπές που για ποσοστιαία μεταβολή 0.1% οι διατομές δεν ισορροπούσαν, χρειάστηκε να αυξηθεί λίγο το ποσοστό ώστε να επέλθει σύγκλιση.

Για την μελέτη της κατανομής των μεγεθών στη χαρακτηριστική διατομή ορίζεται η γωνία θ , η οποία έχει θετική φορά την ωρολογιακή. Στις δύο σήραγγες, προφανώς, οι γωνίες αυτές δεν είναι οι ίδιες αλλά είναι ακριβώς συμμετρικές ως προς το κέντρο του πλάτους πυλώνα. Αυτή η ιδιομορφία λήφθηκε υπόψη κατά την μελέτη ούτως ώστε να είναι απολύτως συγκρίσιμα τα εκάστοτε μεγέθη και έτσι για παράδειγμα να μπορούμε να αναφερόμαστε στις εσωτερικές παρειές των δύο σήραγγων και όχι στην εσωτερική παρειά της πρώτης και στην εξωτερική της δεύτερης. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η γωνία θ και για τις δύο σήραγγες:



Σχήμα 3.1: Προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (single / first - (left) - tunnel) και της δεξιάς σήραγγας (second - right - tunnel), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού, Ψυχάρη Ειρήνη (2016)

3.6. Βασικά σύμβολα αριθμητικών αναλύσεων

Τα βασικά σύμβολα που χρησιμοποιούνται και υιοθετούνται στις αριθμητικές αναλύσεις είναι τα εξής :

- ✓ **p (press)**: φορτίο στην άμεση υποστήριξη
- ✓ **N (Normal Force)**: αξονική δύναμη στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα)
- ✓ **M (Bending Moment)**: ροπή κάμψης στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα)
- ✓ σ_{cm} : αντοχή της βραχώμαζας σε μονοαξονική θλίψη
- ✓ p_o : γεωστατική τάση πριν την εκσκαφή στο επίπεδο του άξονα της σήραγγας ($p_o = \gamma H$)
- ✓ σ_{cm}/p_o : λόγος γεωτεχνικών συνθηκών
- ✓ $p_{o,m} = [(1+k_o)/2] * \gamma H$: μέση αρχική γεωστατική τάση
- ✓ $N_s = 2p_o/\sigma_{cm}$: συντελεστής υπερφόρτισης (overload factor)

- ✓ **p/p₀**: κανονικοποιημένο φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα)
- ✓ **N/(p₀*D)**: κανονικοποιημένη αξονική δύναμη στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας
- ✓ **S/R**: κανονικοποιημένη διαμήκης απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής
- ✓ **H/D**: κανονικοποιημένο ύψος υπερκείμενων γαιών
- ✓ **W/D**: κανονικοποιημένο πλάτος πυλώνα
- ✓ **L/D**: κανονικοποιημένο μήκος εκσκαφής της σήραγγας
- ✓ **Single**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει τα μεγέθη της πρώτης - αριστερής σήραγγας, πριν ξεκινήσει η εκσκαφή της δεύτερης- δεξιάς σήραγγας.
- ✓ **First**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει τα μεγέθη της πρώτης – αριστερής σήραγγας, αφότου έχει ξεκινήσει η εκσκαφή της δεύτερης – δεξιάς σήραγγας
- ✓ **Second**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει τα μεγέθη της δεύτερης – δεξιάς σήραγγας
- ✓ **Min**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει την ελάχιστη τιμή και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη
- ✓ **Max**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει την μέγιστη τιμή και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη
- ✓ **Average**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει την μέση τιμή και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη
- ✓ **Roof**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει το μέγεθος στη στέψη της σήραγγας, δηλαδή για $\theta=0^\circ$ ή $\theta=360^\circ$ και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη
- ✓ **Bottom**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει το μέγεθος για $\theta=180^\circ$ και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη
- ✓ **Side**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει τα μεγέθη στις παρειές της σήραγγας, δηλαδή για $\theta=90^\circ$ ή $\theta=270^\circ$ και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη

3.7. Έλεγχος αξιοπιστίας προσομοιωμάτων

Πριν από την εκτέλεση των αριθμητικών αναλύσεων πραγματοποιούνται έλεγχοι αξιοπιστίας των προσομοιωμάτων οι οποίοι παρατίθενται στην ενότητα αυτή. Βασικός άξονας για το σχεδιασμό των προσομοιωμάτων είναι η εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής ακρίβειας στους υπολογισμούς, απαλλαγμένοι όμως όσο γίνεται δυνατόν από τη μεγάλη αύξηση του υπολογιστικού χρόνου, για την δεδομένη υπολογιστική δυνατότητα που υπάρχει στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Σημειώνεται, επίσης, ότι οι έλεγχοι επιλέγεται να πραγματοποιούνται σε δυσμενείς γενικά γεωτεχνικές συνθήκες ώστε στις επόμενες αναλύσεις οι έλεγχοι αξιοπιστίας να οδηγήσουν σε

αντίστοιχα ή και σε ευμενέστερα αποτελέσματα όσον αφορά την επάρκεια των αριθμητικών προσομοιωμάτων.

Αρχικά κατασκευάζονται τρία αριθμητικά προσομοιώματα, το καθένα με διαφορετικό πλάτος πυλώνα ($W=0.5D=4m$, $W=D=8m$, $W=2D=16m$). Πραγματοποιείται στη συνέχεια ένα ζεύγος αναλύσεων όπου κατά την πρώτη ανάλυση εκσκάπτεται μόνο ο αριστερός κλάδος, ενώ κατά τη δεύτερη μόνο ο δεξιός. Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις δυο περιπτώσεις και συνεπώς στη συνέχεια ο έλεγχος της ορθότητας του προσομοιώματος.

Ο έλεγχος της αξιοπιστίας των προσομοιωμάτων πραγματοποιείται στο 1^ο βήμα (ή αλλιώς βήμα 0 – STEP 0 όπως ορίζεται στο Abaqus), όπου είναι το αρχικό (γεωστατικό) εντατικό πεδίο. Συγκεκριμένα, ελέγχεται η ορθότητα της κατανομής των οριζόντιων τάσεων (S11 (σxx), S22 (σyy)), των κατακόρυφων τάσεων (S33 (σzz)), των μετακινήσεων (U) και των πλαστικών παραμορφώσεων (PEMAG).

Αξίζει να αναφερθεί ότι ο υπολογισμός των γεωστατικών τάσεων με βάση την αναλυτική μεθοδολογία γίνεται ως εξής :

$$\sigma_{vo} = 0 \text{ kPa (κατακόρυφη γεωστατική τάση στο ανώτερο όριο του προσομοιώματος)}$$

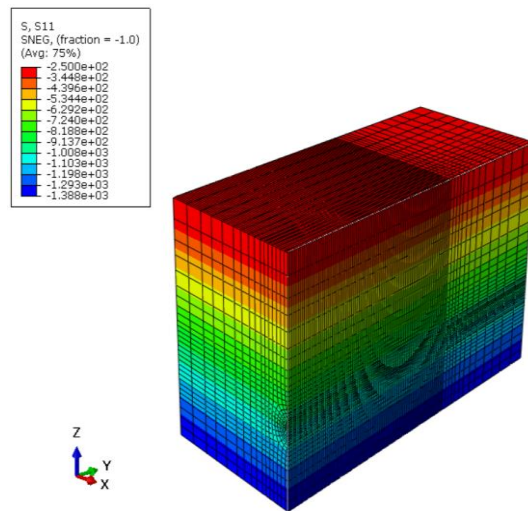
$$\sigma_{vo} = \gamma \cdot (10D + 4D) = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot (80 \text{ m} + 32 \text{ m}) = 2800 \text{ kPa (κατακόρυφη γεωστατική τάση στο κατώτερο όριο του προσομοιώματος)}$$

$$\sigma_{ho} = 0 \text{ kPa (οριζόντια γεωστατική τάση στο ανώτερο όριο του προσομοιώματος)}$$

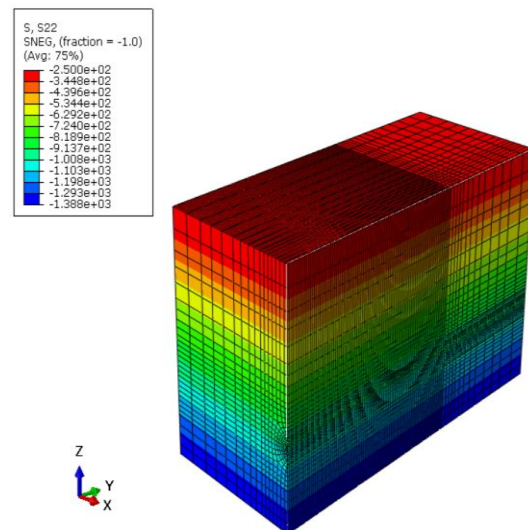
$$\sigma_{ho} = K_o \cdot \gamma \cdot (10D + 4D) = 0.5 \cdot 25 \text{ kN/m}^3 \cdot (80 \text{ m} + 32 \text{ m}) = 1400 \text{ kPa (οριζόντια γεωστατική τάση στο κατώτερο όριο του προσομοιώματος)}$$

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το ζεύγος των αναλύσεων για το αριθμητικό προσομοίωμα με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$, έτσι ώστε να εξετάσουμε την δυσμενέστερη περίπτωση όσον αφορά το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης εκ των τριών που διατίθενται. Αντίστοιχα ήταν τα αποτελέσματα που προέκυψαν και για τα υπόλοιπα αριθμητικά προσομοιώματα, στα οποία το πλάτος πυλώνα είναι μεγαλύτερο.

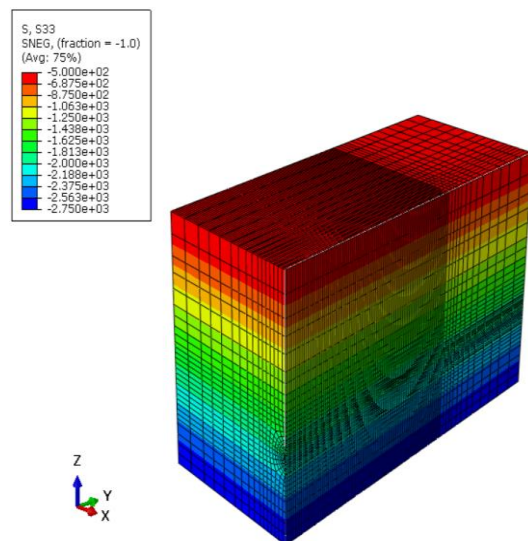
Σύμφωνα με τις εικόνες 3.17, 3.18, 3.19, το εύρος τιμών των γεωστατικών τάσεων που προκύπτουν από το προσομοίωμα είναι αποδεκτό, όπως και οι τιμές των μετακινήσεων (Εικόνα 3.20) και των πλαστικών παραμορφώσεων (Εικόνα 3.21).



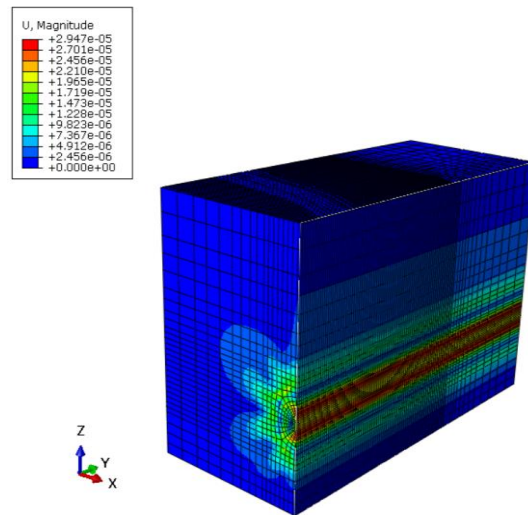
Εικόνα 3.17: Κατανομή της οριζόντιας γεωστατικής τάσης s_{xx} για το αριθμητικό προσομοίωμα με πλάτος πυλώνα $W=0.5D$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες



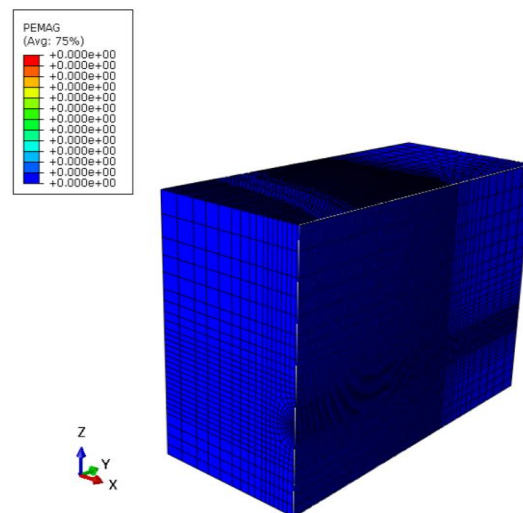
Εικόνα 3.18: Κατανομή της οριζόντιας γεωστατικής τάσης s_{yy} για το αριθμητικό προσομοίωμα με πλάτος πυλώνα $W=0.5D$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες



Εικόνα 3.19: Κατανομή της κατακόρυφης γεωστατικής τάσης s_{zz} για το αριθμητικό προσομοίωμα με πλάτος πυλώνα $W=0.5D$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες



Εικόνα 3.20: Κατανομή της ολικής μετακίνησης για το αριθμητικό προσομοίωμα με πλάτος πυλώνα $W=0.5D$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες



Εικόνα 3.21: Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων για το αριθμητικό προσομοίωμα με πλάτος πυλώνα $W=0.5D$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες

4. Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

4.1. Εισαγωγή

Έχοντας περιγράψει στο προηγούμενο κεφάλαιο τη μεθοδολογία προσομοίωσης του προβλήματος, δηλαδή τα γεωμετρικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των διατομών και κατ'επέκταση των μοντέλων όπως σχεδιάστηκαν στο λογισμικό Abaqus, τα βήματα εκσκαφής που ορίστηκαν και τις παραμέτρους των γεωτεχνικών συνθηκών, σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Σκοπός των αναλύσεων είναι ο προσδιορισμός του μηχανισμού εξέλιξης των φορτίων και των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, όπως επίσης και του μηχανισμού εξέλιξης των τάσεων και παραμορφώσεων των στοιχείων που αποτελούν το περιβάλλον γεωυλικό των σηράγγων στις περιπτώσεις που εκσκάπτεται μονή και διπλή σήραγγα. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται και στις δύο περιπτώσεις διαγράμματα κατανομών των αναπτυσσόμενων φορτίων και αξονικών δυνάμεων επί του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και διαγράμματα κατανομών των τάσεων της βραχομάζας. Για μεγαλύτερη κατανόηση, επιπρόσθετα, επιλέγονται προς παρουσίαση κάποιες αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες από το περιβάλλον του Abaqus που απεικονίζουν ορισμένα από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν.

Η επιλογή παρουσίασης των αποτελεσμάτων βασίζεται στην παρατήρηση ότι η διάνοιξη ενός κλάδου δίπλα σε έναν άλλο αλλοιώνει πολύ τα αποτελέσματα και γενικότερα στο γεγονός της δυσμείνειας που προκαλεί η αλληλεπίδρασή τους. Εκφράζονται, δηλαδή, κανονικοποιημένα και αναπαριστούν τις κατανομές που διαμορφώνονται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στο περιβάλλον γεωυλικό που το απαρτίζει τόσο κατά μήκος του άξονα των σηράγγων όσο και περιμετρικά της διατομής των σηράγγων, εφόσον οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι τρισδιάστατες.

Η σειρά παρουσίασης αυτών των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται βάσει των 2 εξεταζόμενων παραμέτρων οι οποίες μεταβάλλονται στις επιμέρους αναλύσεις και οι οποίες είναι:

⇒ Το πλάτος πυλώνα W/D

⇒ Οι γεωτεχνικές συνθήκες σ_{cm}/ρ_o

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο, έχουν σχεδιαστεί 3 αριθμητικά προσομοιώματα με διαφορετικό πλάτος πυλώνα το καθένα για 20 διαφορετικές κατηγορίες βραχομάζας. Οι παρακάτω ενότητες δομούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί μία οργανωμένη παρουσίαση των αριθμητικών αποτελεσμάτων τα οποία αναφέρονται πρωτίστως στην επιρροή του πλάτους πυλώνα και δευτερευόντως στην επιρροή των γεωτεχνικών συνθηκών όσον αφορά το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των κλάδων της δίδυμης σήραγγας. Επιλέγεται μία αντιπροσωπευτική παρουσίαση γραφημάτων, στα οποία παρατίθενται κανονικοποιημένα αποτελέσματα για το μικρότερο πλάτος πυλώνα ($W/D=0.5$), για το μεγαλύτερο πλάτος πυλώνα ($W/D=2$), για μία πτωχής ποιότητας βραχώμαζα ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) και μία μέτριας ποιότητας βραχώμαζα ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$). Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου παρουσιάζονται

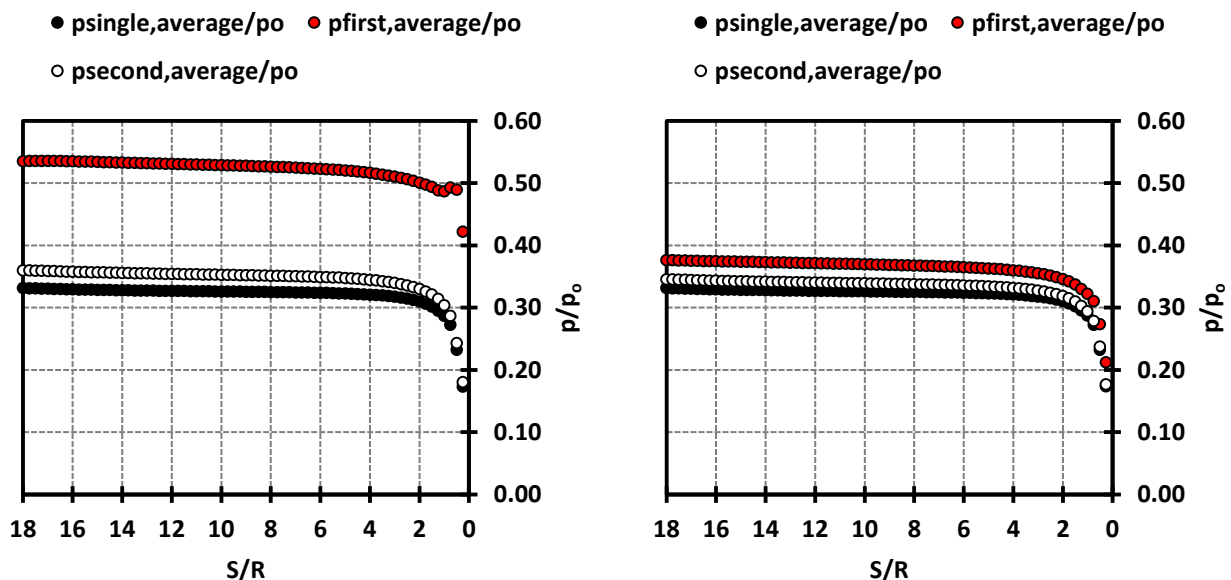
συγκεντρωτικά όλα τα προς επεξεργασία διαγράμματα για όλα τα πλάτη πυλώνα και για όλες τις κατηγορίες βραχομάζας που επιλέχθηκαν προς αναφορά με στόχο τη διεξαγωγή συμπερασμάτων.

4.2. Επίδραση πλάτους πυλώνα

Στην ενότητα αυτή μελετάται η επίδραση της τιμής του πλάτους πυλώνα στην εξέλιξη των μεγεθών των πιέσεων και των αξονικών δυνάμεων που ασκούνται στην άμεση υποστήριξη και στην εξέλιξη των τάσεων της περιβάλλουσας βραχομάζας για το μικρότερο ($W=0.5D=4m$) και το μεγαλύτερο ($W=2D=16m$) πλάτος πυλώνα, όταν οι γεωτεχνικές παράμετροι παραμένουν αμετάβλητες. Η ανάλυση η οποία επιλέγεται προς εξέταση περιλαμβάνει μία πτωχής ποιότητας βραχομάζα η οποία, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2, είναι η βραχομάζα N^ο 2 και διαθέτει τα εξής γεωτεχνικά χαρακτηριστικά: $\phi=21.1^\circ$, $c=0.079MPa=79kPa$, $E=0.1068GPa=106.8MPa$, $\sigma_{cm}/p_o=0.22$. Από όλες τις προς ανάλυση κατηγορίες βραχομάζας, επιλέγεται εκείνη με σκοπό την παρατήρηση της εξέλιξης των φαινομένων σε ένα αρκετά διαταραγμένο και χαώδες περιβάλλον από την οποία είναι ακολούθως εύκολη η πρόβλεψη των αντίστοιχων αποτελεσμάτων σε ένα περιβάλλον με μεγαλύτερη αντοχή ή/και με μικρό αριθμό ασυνεχειών.

4.2.1. Φορτία στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (p)

Τα αποτελέσματα του φορτίου (p) στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων, για αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ και $W=2D=16m$, παρουσιάζονται στα διαγράμματα του Γραφήματος 4.1. όπου περιγράφεται το μέσο φορτίο ($p_{average}$) κανονικοποιημένο ως προς την αρχική γεωστατική πίεση (p_o), συναρτήσει του λόγου S/R (κανονικοποιημένη διαμήκης απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής) κατά μήκος της διεύθυνσης του άξονα των σηράγγων ($R = 4m$, ακτίνα σήραγγας).



Γράφημα 4.1: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $p_{average}/p_o$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o=0.22$)

Παρατηρείται, αρχικά, ότι σε όλες τις περιπτώσεις η σταθεροποίηση του φορτίου p εντοπίζεται όταν η διαμήκης απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής είναι περίπου $S=4R$ (2 διαμέτρους). Πιο

αναλυτικά, σε πολύ κοντινή απόσταση από το μέτωπο η υποστηριζόμενη βραχομάζα υφίσταται μεγαλύτερες συγκλίσεις καθώς η υποστήριξη δεν έχει προλάβει ακόμα να ενεργοποιηθεί πλήρως και να προβάλλει αντίσταση από τη χρονική στιγμή που τοποθετείται (1 μέτρο πριν τη θέση του μετώπου) και κατά συνέπεια δέχεται μικρότερα φορτία. Αντίθετα, όσο μεγαλώνει η απόσταση η υποστήριξη λειτουργεί περισσότερο, δηλαδή αντιστέκεται στις συγκλίσεις, παραλαμβάνοντας έτσι μεγαλύτερα φορτία τα οποία αρχίζουν και σταθεροποιούνται σε απόσταση 2 διαμέτρους από το μέτωπο εκσκαφής.

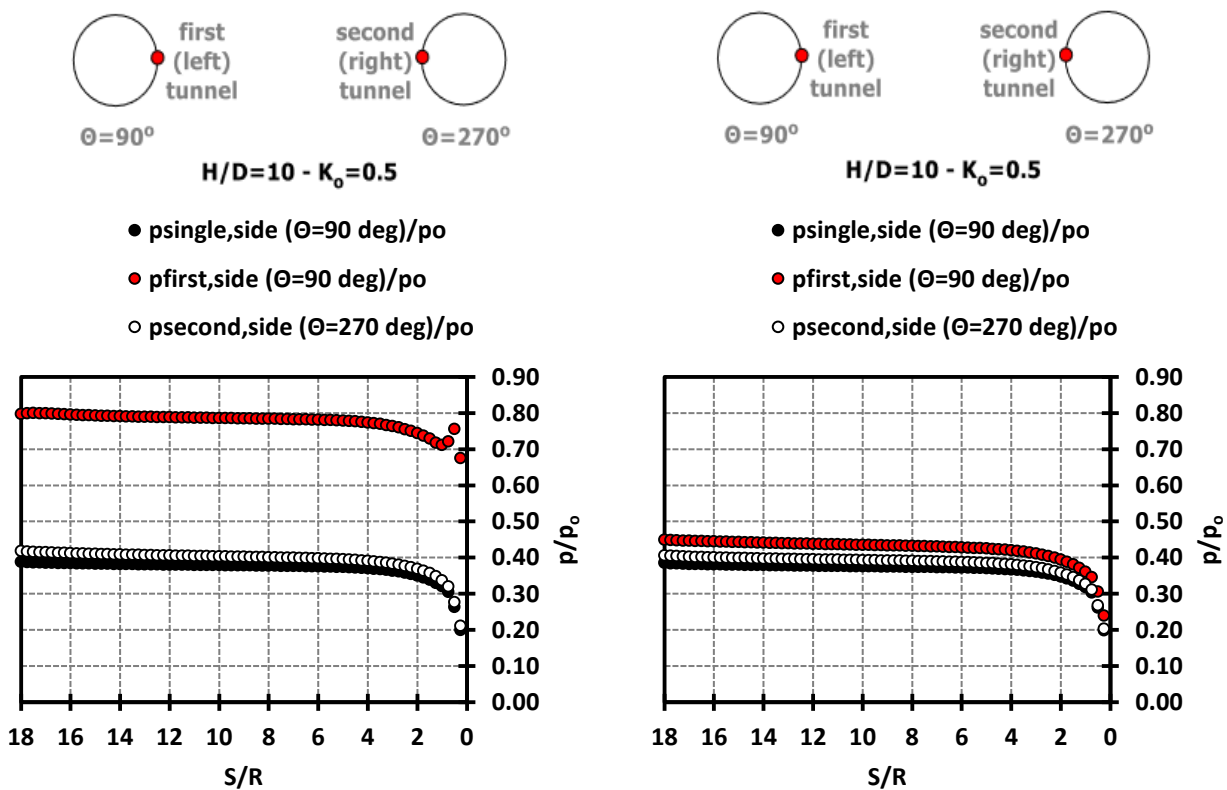
Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι η απόκριση στην περίπτωση της «μονής» και «δεύτερης» σήραγγας είναι παρόμοια ανεξαρτήτως του πλάτους πυλώνα. Οι αντίστοιχες καμπύλες και για τα δύο πλάτη πυλώνα είναι πολύ κοντά μεταξύ τους στα δύο διαγράμματα, ενώ η κατανομή των φορτίων για την «πρώτη» σήραγγα ξεχωρίζει εντυπωσιακά και στις δύο περιπτώσεις. Ουσιαστικά, αυτό είναι ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα που εκφράζει τη δυσμενή επιρροή της διάνοιξης του δεξιού κλάδου στον αριστερό. Ο πρώτος κλάδος αριστερά έχει εξ'ολοκλήρου υποστηριχτεί πριν την εκσκαφή του δεύτερου δεξιά και η συγκεκριμένη υποστήριξη εμποδίζει την εκδήλωση φαινομένων σύγκλισης, τα οποία εμφανίζονται κατά τη διάρκεια διάνοιξης του δεύτερου κλάδου δεξιά λόγω νέας κατανομής του εντατικού πεδίου, με αποτέλεσμα η υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας να αναλαμβάνει αυξημένες πιέσεις. Αντίθετα, ο δεύτερος κλάδος δεξιά αποκρίνεται αντίστοιχα όπως στην περίπτωση της «μονής» σήραγγας με μηδενική επιρροή της «πρώτης» σήραγγας σε αυτόν, καθώς το σύστημα υποστήριξης – περιβάλλοντος γεωυλικού του πρώτου κλάδου έχει ήδη ισορροπήσει και σταθεροποιηθεί. Η μόνη διαφορά είναι ότι οι τιμές των πιέσεων της «δεύτερης» σήραγγας είναι κατά πολύ λίγο αυξημένες από τις αντίστοιχες τιμές της «μονής» σήραγγας, το οποίο προκαλείται από την φτωχής ποιότητας βραχομάζα η οποία επιφέρει ανακατανομημένο πεδίο τάσεων. Στην ουσία, δηλαδή, η «δεύτερη» σήραγγα εκσκάπτεται σε μία προυπάρχουσα πλαστική ζώνη, γεγονός που οδηγεί σε κάποια αμελητέως αυξημένη παραλαβή φορτίων από την υποστήριξή της.

Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζει η επίδραση του πλάτους πυλώνα στις τιμές της μέσης πίεσης που δέχονται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης των σηράγγων. Εντοπίζεται ότι όσο μικρότερο είναι το πλάτος πυλώνα, τόσο αυξημένες παρουσιάζονται οι τιμές του μέσου φορτίου για όλες τις σήραγγες. Αντίθετα, όσο αυξάνει το πλάτος πυλώνα οι εν λόγω τιμές μειώνονται και το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης τείνει να εξαλειφθεί. Αυτό σημαίνει ότι όταν το πλάτος πυλώνα είναι $W=0.5D=4m$ η ζώνη διαταραχής που δημιουργείται από τη διάνοιξη ενός κλάδου δίπλα σε έναν ήδη προυπάρχον είναι αρκετά μεγάλη, κάτι που δεν υφίσταται για πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$. Καταλήγουμε, λοιπόν, στο συμπέρασμα ότι το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι αμελητέο για πλάτος πυλώνα $W>2D=16m$.

Για να γίνουν πιο κατανοητά τα παραπάνω σε όρους ποσοστιαίων μεταβολών, έγιναν κάποιοι υπολογισμοί προσδιορισμού των μεταβολών μέσης πίεσης μεταξύ της υποστήριξης της «μονής», της «πρώτης» και της «δεύτερης» σήραγγας για τις δύο περιπτώσεις του πλάτους πυλώνα. Προκύπτει ότι για την περίπτωση που το πλάτος πυλώνα μεταξύ των δύο κλάδων είναι $W/D=0.5$ η τιμή του μέσου φορτίου που δέχεται η υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας είναι αυξημένη κατά 38% σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που αναλαμβάνει η υποστήριξη της «μονής» σήραγγας, ενώ για πλάτος πυλώνα $W/D=2$ είναι αυξημένη κατά 11%. Όσον αφορά τις τιμές της μέσης πίεσης που δέχεται η υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας σε σχέση με την αντίστοιχη της «μονής», η αύξηση για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ είναι 6% και η αύξηση για πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$ είναι μόλις 3%. Βάζοντας ως μέσο σύγκρισης τη διάσταση του πλάτους πυλώνα, το μέσο φορτίο που αναλαμβάνει η «πρώτη» σήραγγα είναι κατά 30% αυξημένο για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$

συγκριτικά με εκείνο για πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$. Η αντίστοιχη αύξηση για τη «δεύτερη» σήραγγα είναι 3% και για τη «μονή» σήραγγα οι τιμές είναι ίδιες και για τα δύο πλάτη πυλώνα. Συμπεραίνουμε, επομένως, ότι το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο κλάδων γίνεται ορατό από τα φορτία που καλείται να παραλάβει το κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος της «πρώτης» σήραγγας και συγκεκριμένα στην περίπτωση που το πλάτος πυλώνα είναι μικρό ($W=0.5D=4m$).

Ανάλογα είναι τα αποτελέσματα που αναφέρονται στο φορτίο που δέχονται οι εσωτερικές παρειές των διατομών, δηλαδή η γωνία $\theta=90^\circ$ για την «μονή» και «πρώτη» σήραγγα και η γωνία $\theta=270^\circ$ για την «δεύτερη» σήραγγα. Σε αυτές τις θέσεις περιμετρικά των διατομών εμφανίζονται τα μέγιστα φορτία λόγω της μεγάλης διαταραχής που προκαλείται στις συνορεύουσες περιοχές. Συγκεκριμένα, στο Γράφημα 4.2 παρουσιάζεται η κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου επί των εσωτερικών παρειών συναρτήσει του λόγου S/R (κανονικοποιημένη διαμήκης απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής) κατά μήκος της διεύθυνσης του άξονα των σηράγγων.

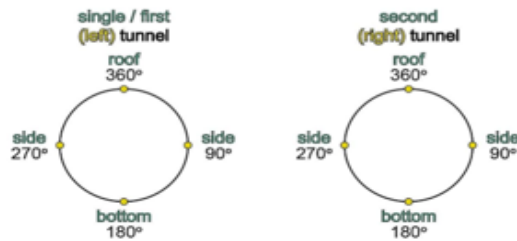


Γράφημα 4.2 Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου $p_{side}(\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ)/p_0$ επί των εσωτερικών παρειών συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0=0.22$)

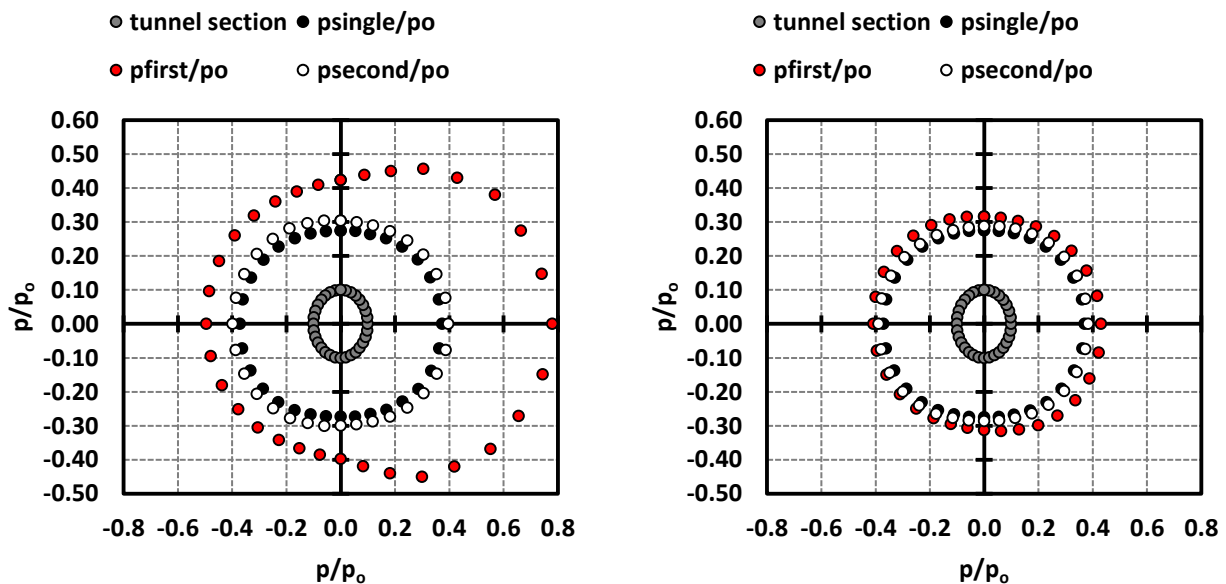
Ομοίως, παρατηρούμε και στο παραπάνω γράφημα τη δυσμενή επιρροή που φέρει η διάνοιξη της «δεύτερης» σήραγγας στην «πρώτη». καθώς οι τιμές των φορτίων που δέχεται η υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας είναι ιδιαίτερα αυξημένες σε σχέση με εκείνες της «μονής» σήραγγας. Η εν λόγω αύξηση είναι της τάξης του 50% για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ και της τάξης του 10% για πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$. Αντίστοιχα όπως και πριν, οι τιμές των φορτίων μεταξύ «μονής» και «δεύτερης» σήραγγας είναι περίπου οι ίδιες και για τις δύο περιπτώσεις του πλάτους πυλώνα. Εμφανής και εδώ είναι η δυσμενής επίδραση της μικρής εγκάρσιας απόστασης ($W=0.5D=4m$) στα αποτελέσματα προκαλώντας αύξηση των φορτίων που θα δεχτεί η υποστήριξη της «πρώτης»

σήραγγας κατά 50% σε σχέση με την αντίστοιχη που θα δεχτεί η υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο ($W=2D=16m$).

Παρακάτω, το Γράφημα 4.3 αποτυπώνει την κατανομή του ανηγμένου φορτίου p/p_0 περιμετρικά της χαρακτηριστικής διατομής των σηράγγων, για πλάτη πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ και $W = 2D = 16m$, όπου το tunnel section υποδηλώνει την χαρακτηριστική διατομή των σηράγγων και είναι η εξής:



Σχήμα 4.1: Τυπική διατομή των σηράγγων και προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (single / first - (left) – tunnel) και της δεξιάς σήραγγας (second – (right) – tunnel), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού



Γράφημα 4.3: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου p/p_0 , περιμετρικά της τυπικής διατομής των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ και για δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0=0.22$)

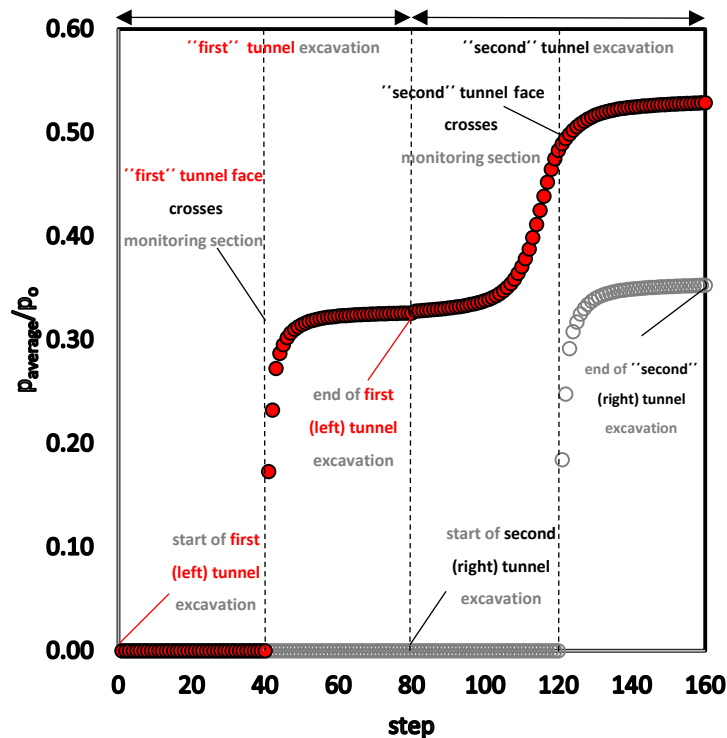
Αρχικά, από το παραπάνω γράφημα αποδεικνύεται το γεγονός ότι οι δυσμενέστερες θέσεις περιμετρικά των σηράγγων είναι οι εσωτερικές παρειές ($\theta=90^\circ$ για την «μονή» και «πρώτη» σήραγγα και $\theta=270^\circ$ για την «δεύτερη» σήραγγα), καθώς εκεί εμφανίζονται τα μεγαλύτερα φορτία που καλείται να παραλάβει η άμεση υποστήριξη. Αυτό γίνεται περισσότερο εμφανές στις τιμές των φορτίων της «πρώτης» σήραγγας, εφόσον οι αντίστοιχες τιμές για τη «μονή» είναι περισσότερο ομοιόμορφα κατανεμημένες περιμετρικά και οι αντίστοιχες για τη «δεύτερη» περίπου ομοιόμορφα κατανεμημένες. Η «δεύτερη» σήραγγα παρουσιάζει παρόμοια απόκριση με εκείνη της «μονής», όπως και στα προηγούμενα διαγράμματα, με τις τιμές τους σχεδόν να συγκλίνουν.

Οι ιδιαίτερα αυξημένες τιμές των φορτίων στην «πρώτη» σήραγγα οφείλονται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της «δεύτερης» σήραγγας εμφανίζονται περαιτέρω συγκλίσεις οι οποίες όμως δεν εκτονώνονται λόγω της παρουσίας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που έχει τοποθετηθεί στην «πρώτη» σήραγγα και τις εμποδίζει, με συνέπεια η υποστήριξη στην «πρώτη»

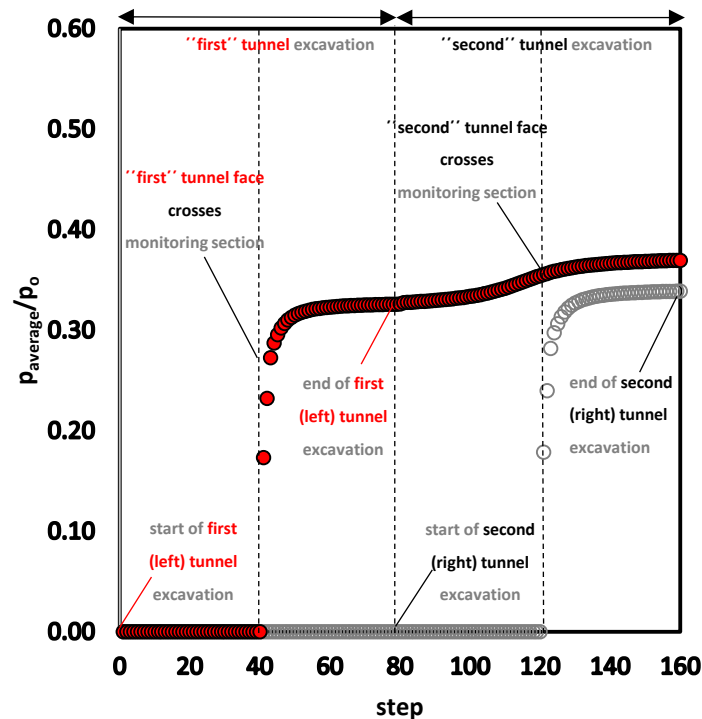
σήραγγα να δέχεται αυξημένες πιέσεις, ειδικότερα στη θέση που συνορεύει με το διπλανό κλάδο και είναι η θέση μεγαλύτερης διαταραχής. Μία επιπρόσθετη αιτία ίσως είναι ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων. Στην προκειμένη περίπτωση είναι $K_0=0.5$ και δηλώνει ότι οι κατακόρυφες αρχικές γεωστατικές τάσεις είναι διπλάσιες από τις οριζόντιες αρχικές γεωστατικές τάσεις. Έτσι, κατά την εκσκαφή οι κατακόρυφες τάσεις που είναι και ακτινικές στη θέση της στέψης και του πυθμένα μειώνονται λόγω αφαίρεσης υλικού, ενώ οι οριζόντιες τάσεις που είναι εφαπτομενικές σε αυτές τις θέσεις αυξάνονται. Το ανάποδο ισχύει στη θέση 90° , εκεί οι κατακόρυφες τάσεις που μειώνονται είναι εφαπτομενικές ενώ οι οριζόντιες τάσεις που αυξάνονται λόγω εκσκαφής είναι ακτινικές. Άρα το εύρος της διαφοράς ακτινικής – εφαπτομενικής τάσης που ορίζει και τη διεκτροπική τάση μειώνεται στην στέψη και στον πυθμένα και αυξάνεται στις παρειές με αποτέλεσμα στις παρειές να αυξάνεται ο κίνδυνος αστοχίας εφόσον παρατηρείται μεγιστοποίηση της ανάπτυξης των πλαστικών παραμορφώσεων στην περιβάλλουσα βραχώμαζα και των πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Σημαντική και εδώ φαίνεται να είναι η επίδραση του πλάτους πυλώνα με σημαντική μείωση των τιμών να παρουσιάζεται στην περίπτωση που το πλάτος πυλώνα μεγαλώνει. Ενώ η αύξηση των πιέσεων για την «πρώτη» σήραγγα φτάνει στην εσωτερική παρειά για μικρό πλάτος πυλώνα ($W=0.5D=4m$) το 40% περίπου, η αντίστοιχη αύξηση για την ίδια σήραγγα στην ίδια θέση αλλά για μεγάλο πλάτος πυλώνα ($W=2D=16m$) φτάνει μόλις το 5%. Στην ουσία δηλαδή, όταν το πλάτος πυλώνα είναι $W>2D=16m$ οι δύο σήραγγες είναι σε θέση να μελετηθούν ξεχωριστά ως δύο ανεξάρτητες σήραγγες, καθώς το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι αμελητέο.

Τα γραφήματα 4.4 & 4.5 απεικονίζουν τη χρονιοιστορία των ανηγμένων μέσων φορτίων ($p_{average}/p_0$) της «πρώτης» και της «δεύτερης» σήραγγας σε επιλεγμένη διατομή με κανονικοποιημένη διαμήκη απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ($S/R=10$), συναρτήσεως του βήματος (step) της ανάλυσης.



Γράφημα 4.4: Χρονιοιστορία των κανονικοποιημένων μέσων φορτίων $p_{average}/p_0$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσεως του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0=0.22$)



Γράφημα 4.5: Χρονοιστορία των κανονικοποιημένων μέσων φορτίων $p_{average}/p_0$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0=0.22$)

Για την επεξήγηση των παραπάνω γραφημάτων, θα δοθεί αρχικά έμφαση στον τρόπο με τον οποίο εξελίσσονται οι πιέσεις που δέχεται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για την «πρώτη» και τη «δεύτερη» σήραγγα από την αρχή μέχρι το πέρας των βημάτων της ανάλυσης και στη συνέχεια θα εστιάσουμε στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Στη διάρκεια των βημάτων $0 \sim 80$ πραγματοποιείται η εκσκαφή και υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας και στη διάρκεια των βημάτων $81 \sim 160$ πραγματοποιείται η εκσκαφή και υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας. Στα γραφήματα, ουσιαστικά, απεικονίζεται η χρονοιστορία της εξέλιξης των πιέσεων για μία συγκεκριμένη διατομή στη θέση $Y=40m$ και για την «πρώτη» σήραγγα (step 40) και για τη «δεύτερη» σήραγγα (step 120). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δηλαδή, που το μήκος εκσκαφής και για τις δύο σήραγγες είναι $L=10D=80m$, η θέση στην οποία επιλέχθηκε να εξεταστεί η χρονική εξέλιξη των κανονικοποιημένων φορτίων που δέχεται το υποστήριξη και για τις δύο σήραγγες είναι το μέσον εκσκαφής.

Και για τα δύο πλάτη πυλώνα, η εξελικτική μορφή των πιέσεων είναι παρόμοια και η μόνη διαφορά έγκειται στις τιμές τους. Πιο συγκεκριμένα, από το βήμα 0 έως 39 το μέτωπο της εκσκαφής δεν έχει φτάσει ακόμα στην εξεταζόμενη θέση ($Y=40m$), στο βήμα 40 πραγματοποιείται η εκσκαφή στην εξεταζόμενη θέση ($Y=40m$), στο βήμα 41 τοποθετείται η υποστήριξη στην εξεταζόμενη θέση ($Y=40m$) και πραγματοποιείται ταυτόχρονα εκσκαφή στην θέση $Y=41m$, μέχρι που ολοκληρώνεται η εκσκαφή της «πρώτης» σήραγγας στο βήμα 80 ($Y=80m$). Στο βήμα 81 ξεκινάει η εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας. Από το βήμα 81 έως το βήμα 119 το μέτωπο της εκσκαφής δεν έχει φτάσει ακόμα στην εξεταζόμενη θέση ($Y=40m$), στο βήμα 120 πραγματοποιείται η εκσκαφή στην εξεταζόμενη θέση ($Y=40m$), στο βήμα 121 τοποθετείται η υποστήριξη στην εξεταζόμενη θέση

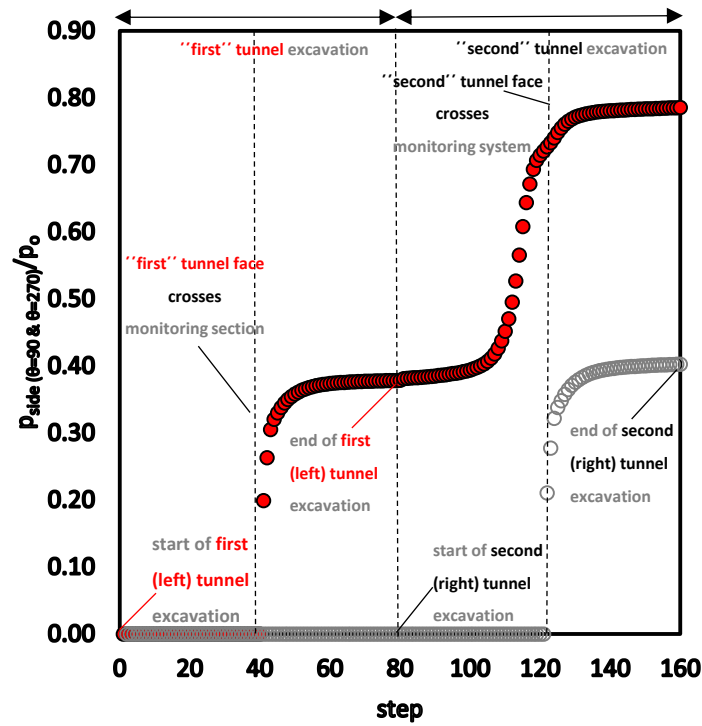
($Y=40\text{m}$) και πραγματοποιείται ταυτόχρονα εκσκαφή στην θέση $Y=121\text{m}$, μέχρι που ολοκληρώνεται η εκσκαφή της «δεύτερης» σήραγγας στο βήμα 120 ($Y=80\text{m}$).

Σύμφωνα με την παραπάνω ερμηνεία των διαγράμματος, οι πιέσεις είναι προφανώς μηδενικές μέχρι το βήμα 40, εφόσον το μέτωπο εκσκαφής της «πρώτης» σήραγγας δεν έχει φτάσει ακόμα στην εξεταζόμενη θέση ($Y=40\text{m}$). Από τη στιγμή που φτάνει και για τα επόμενα περίπου 10 βήματα (βήμα 40 ~ 50) παρατηρείται συνεχής αύξηση των πιέσεων, εφόσον το κέλυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που τοποθετείται στο βήμα 41 δεν έχει ενεργοποιηθεί ακόμα εντελώς ώστε να εμποδίσει τις συγκλίσεις που δημιουργούνται λόγω της διάνοιξης. Οι πιέσεις αυτές στη συνέχεια σταθεροποιούνται όσο προχωράνε τα βήματα της ανάλυσης γιατί η υποστήριξη που έχει τοποθετηθεί στην εξεταζόμενη θέση ($Y=40\text{m}$) στο βήμα 41, έχει ισορροπήσει πλέον με το περιβάλλον γεωυλικό που την περιβάλλει και έτσι δέχεται σταθερή τιμή πίεσης.

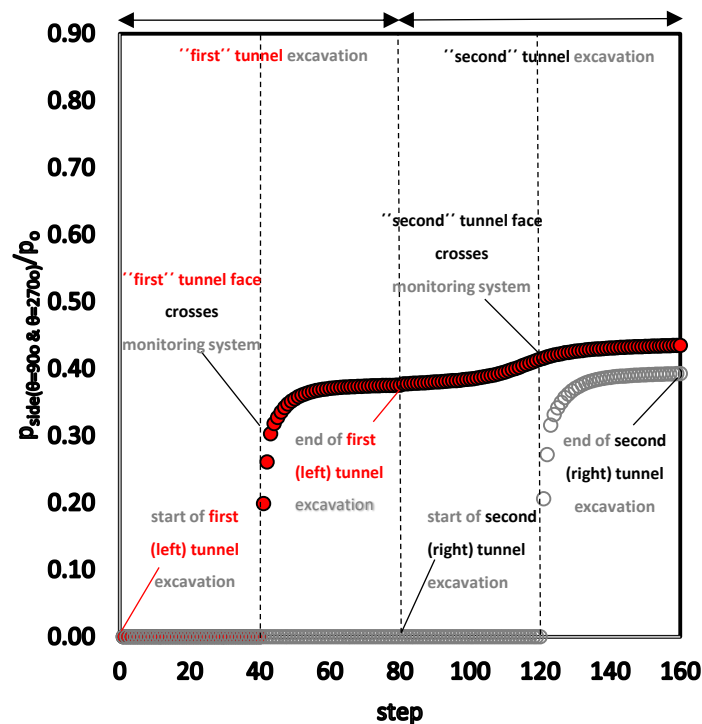
Τη στιγμή που ξεκινάει η διάνοιξη της «δεύτερης» σήραγγας, το μέτωπο εκσκαφής βρίσκεται ακόμα μακριά από την εξεταζόμενη θέση ($Y=40\text{m}$) της «πρώτης» σήραγγας με αποτέλεσμα οι ανωτέρω πιέσεις να παραμένουν ακόμα οι ίδιες έως ότου το μέτωπο να φτάσει περίπου 10m πριν την θέση. Όταν φτάσει σε αυτό το σημείο εντοπίζεται περαιτέρω αύξηση των πιέσεων στην «πρώτη» σήραγγα καθώς επηρεάζεται σημαντικά από τον διπλανό κλάδο που εκσκάπτεται όσο εκείνος προσεγγίζει την θέση που εξετάζουμε ($Y=40\text{m}$ – βήμα 120). Αυτή η επιρροή οφείλεται, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, στο γεγονός ότι η «πρώτη» σήραγγα έχει ήδη υποστηριχθεί όταν ξεκινάει η διάνοιξη της «δεύτερης» σήραγγας και η υποστήριξή της εμποδίζει τις συγκλίσεις που αναπτύσσονται λόγω διάνοιξης του δεύτερου κλάδου με αποτέλεσμα να δέχεται αυξημένα φορτία λόγω αλληλεπίδρασης. Μετά το βήμα 120, η εκσκαφή συνεχίζεται μέχρι την ολοκλήρωση διάνοιξης της «δεύτερης» σήραγγας (βήμα 160) και το μέτωπο ολοένα και απομακρύνεται από την εξεταζόμενη θέση και έτσι οι πιέσεις σταθεροποιούνται πάλι σε μία τιμή. Όσον αφορά την «δεύτερη» σήραγγα, έχει παρόμοια συμπεριφορά με εκείνη της «πρώτης» σήραγγας που παρατηρήθηκε στα βήματα 40 ~ 80, γιατί δε δέχεται καμία επιρροή από την προϋπάρχουσα «πρώτη» σήραγγα που έχει ήδη σκαφτεί, εφόσον όλο το σύστημα έχει επέλθει σε ισορροπία, με αποτέλεσμα να λειτουργεί περίπου σαν «μονή» σήραγγα.

Τα παραπάνω ισχύουν και για τις δύο τιμές του πλάτους πυλώνα, που σημαίνει ότι η διαδικασία της εξέλιξης των φορτίων είναι η ίδια. Σημαντική διαφορά, όμως, εντοπίζεται στις τιμές με τη μεγαλύτερη αύξηση στα φορτία να εκδηλώνεται στην «πρώτη» σήραγγα ειδικά όταν το πλάτος πυλώνα είναι μικρό ($W=0.5D=4\text{m}$). Συγκεκριμένα οι μέγιστες πιέσεις που ασκούνται στην υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας είναι κατά 30% μεγαλύτερες για το μικρότερο πλάτος πυλώνα σε σχέση με τις αντίστοιχες για το μεγαλύτερο πλάτος πυλώνα. Ακολούθως, το άλμα που εντοπίζεται στην «πρώτη» σήραγγα και υποδηλώνει την 30% αύξηση των πιέσεων όταν το μέτωπο προσεγγίζει την εξεταζόμενη θέση (βήμα 100~120), δεν εμφανίζεται για το μεγαλύτερο πλάτος πυλώνα.

Στα παρακάτω γραφήματα, παρουσιάζεται η χρονοιστορία της εξέλιξης των πιέσεων για τις εσωτερικές παρειές των σήραγγων, τις παρειές δηλαδή που συνορεύουν με το πλάτος πυλώνα ($\theta=90^\circ$ για την «πρώτη» σήραγγα και $\theta=270^\circ$ για την «δεύτερη» σήραγγα). Τα αποτελέσματα ερμηνεύονται με τον ίδιο τρόπο που ερμηνεύτηκαν και προηγουμένως και εμφανίζουν παρόμοια κατανομή.



Γράφημα 4.6: Χρονοιστορία των κανονικοποιημένων φορτίων $p_{side}(\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ)/p_o$ επί των εσωτερικών παρειών στην άμεση υποστήριξη συναρτήσεσι του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκουσ άξονα των σπράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o=0.22$)

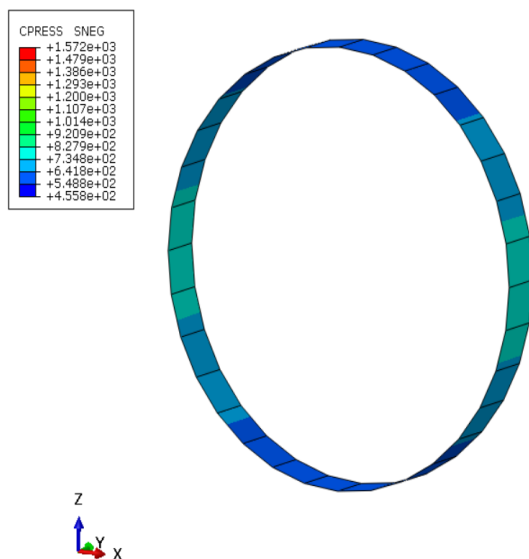


Γράφημα 4.7: Χρονοιστορία των κανονικοποιημένων φορτίων $p_{side}(\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ)/p_o$ επί των εσωτερικών παρειών στην άμεση υποστήριξη συναρτήσεσι του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκουσ άξονα των σπράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o=0.22$)

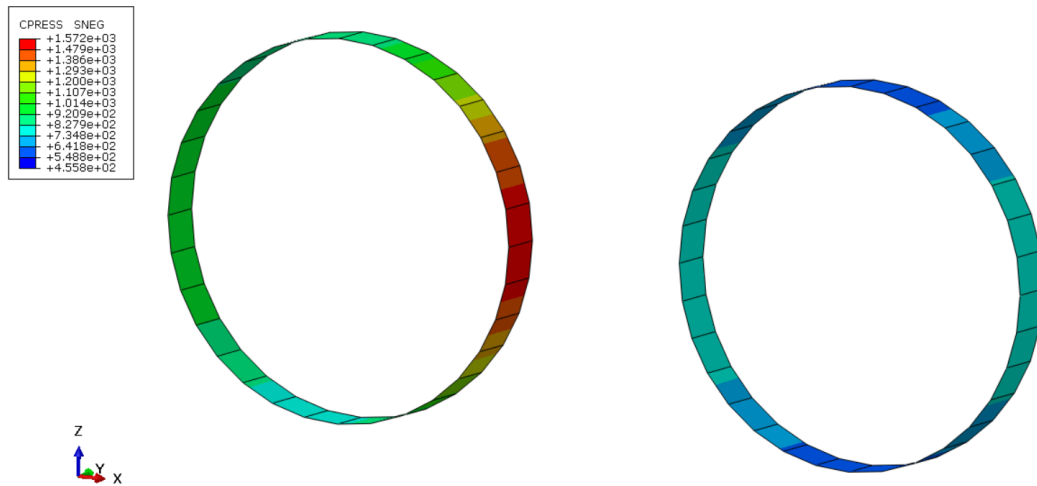
Είναι εμφανές πως στα βήματα 100~120, όπου το μέτωπο εκσκαφής της «δεύτερης» σήραγγας προσεγγίζει την εξεταζόμενη θέση, το άλμα στις τιμές των πιέσεων της «πρώτης» σήραγγας είναι ακόμα εντονότερο για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4\text{m}$, γεγονός που αποδεικνύει ακόμα μία φορά τη δυσμενή επιρροή της διάνοιξης του δεξιού κλάδου στην εσωτερική παρειά του αριστερού και ειδικά για μικρή εγκάρσια απόσταση μεταξύ των κλάδων. Συγκεκριμένα, ενώ οι πιέσεις είχαν σταθεροποιηθεί στην τιμή $p_{\text{side}}/p_o=0.39$, εμφανίζουν έντονη ανοδική πορεία όσο προσεγγίζει το μέτωπο την εξεταζόμενη θέση (βήμα 120), η οποία καταλήγει στην τιμή $p_{\text{side}}/p_o=0.78$. Πρόκειται, επομένως, για αύξηση κατά 50%. Η αντίστοιχη αύξηση για μεγαλύτερο πλάτος πυλώνα ($W=2D=16\text{m}$) είναι πολύ μικρότερη, φτάνει μόλις το 10%, και μας υπενθυμίζει για ακόμη μία φορά ότι το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης σε αυτή την περίπτωση έχει σχεδόν μηδενιστεί

Οι τιμές των πιέσεων για την εσωτερική παρειά της «δεύτερης» σήραγγας ($\theta=270^\circ$) είναι σχεδόν ίδιες για τις δύο περιπτώσεις του πλάτους πυλώνα. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι η «δεύτερη» σήραγγα παραμένει ανεπηρέαστη από την αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο κλάδων. Ωστόσο, και εδώ παρατηρείται ότι οι πιέσεις αρχίζουν να αναπτύσσονται στο βήμα 120 (όπου το μέτωπο έχει φτάσει την εξεταζόμενη θέση) και αυξάνονται μέχρι να σταθεροποιηθούν σε μία τιμή μετά από 10m περίπου όπου το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει ισορροπήσει πλέον με την περιβάλλουσα βραχώμαζα.

Παρακάτω, παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές εικόνες από το πρόγραμμα του Abaqus οι οποίες απεικονίζουν με όρους χρωμάτων τις τιμές των πιέσεων που ασκούνται περιμετρικά της διατομής των υποστηριζόμενων σήραγγων στην περίπτωση εκσκαφής μονής και δίδυμης σήραγγας για τα δύο πλάτη πυλώνα που εξετάζονται.



Εικόνα 4.1: Κατανομή των φορτίων περιμετρικά της υποστήριξης της «μονής» σήραγγας μετά την ολοκλήρωση διάνοιξης (STEP 80) σε μία ενδιάμεση διατομή στη θέση $Y=40\text{m}$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o=0.22$)



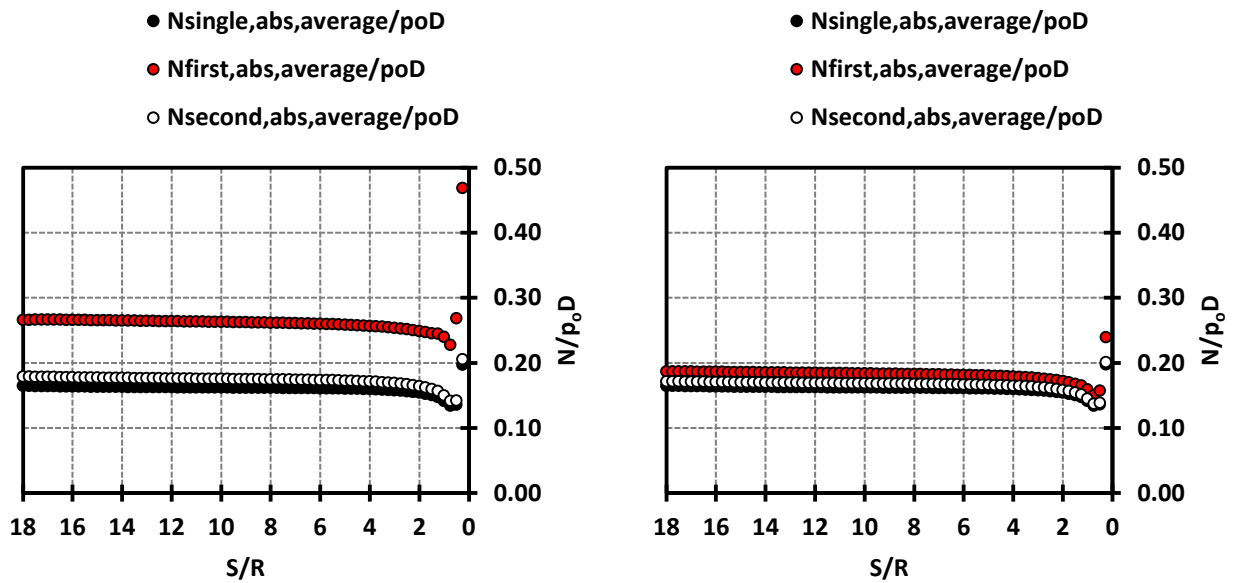
Εικόνα 4.2: Κατανομή των φορτίων περιμετρικά της υποστήριξης της «πρώτης» (αριστερά) και «δεύτερης» (δεξιά) σήραγγας μετά την ολοκλήρωση εκσκαφής των δύο κλάδων (STEP 160) σε μία ενδιάμεση διατομή στη θέση $Y=40m$ για εφαρμογή πλάτους πυλώνα $W=0.5D=4m$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)



Εικόνα 4.3: Κατανομή των φορτίων περιμετρικά της υποστήριξης της «πρώτης» (αριστερά) και «δεύτερης» (δεξιά) σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής των δύο κλάδων (STEP 160) σε μία ενδιάμεση διατομή στη θέση $Y=40m$ για εφαρμογή πλάτους πυλώνα $W=2.0D=16m$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)

4.2.2. Αξονικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα (N)

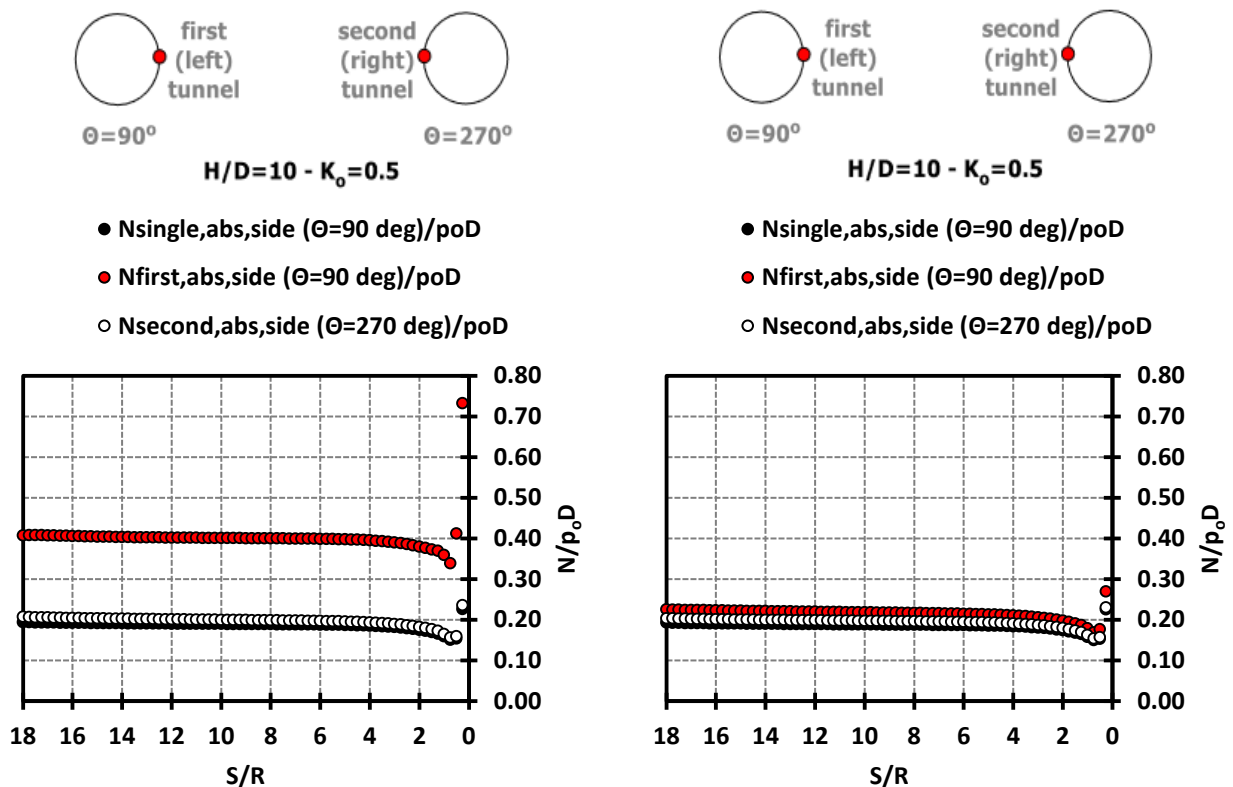
Παρακάτω στο γράφημα 4.8 παρουσιάζονται οι αξονικές δυνάμεις που καλείται να αναλάβει το κέλυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την περίπτωση της μονής και διπλής σήραγγας. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται η κατανομή των κατ'απόλυτη τιμή μέσω ανηγμένων αξονικών δυνάμεων επί της άμεσης υποστήριξης ($N_{abs,average}/\rho_o D$) συναρτήσεως του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκους άξονα των σηράγγων για τις αναλύσεις που αναφέρονται στο μικρότερο και μεγαλύτερο πλάτος πυλώνα που εξετάζονται σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$).



Γράφημα 4.8: Κατανομή της κατ' απόλυτη τιμή μέσης ανηγμένης αξονικής δύναμης επί της άμεσης υποστήριξης ($N_{abs,average}/\rho_o D$) συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)

Παρόμοια φαίνεται να είναι τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα της κατανομής των μέσων ανηγμένων φορτίων επί της άμεσης υποστήριξης. Πιο αναλυτικά, και εδώ η σταθεροποίηση των αξονικών δυνάμεων πραγματοποιείται σε απόσταση $S=2R$ (μίας διαμέτρου). Η υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας δέχεται μεγαλύτερες τιμές μέσων αξονικών δυνάμεων σε σχέση με την υποστήριξη της «μονής» και «δεύτερης» σήραγγας, κι ιδιαίτερα στην περίπτωση του μικρού πλάτους πυλώνα ($W=0.5D=4m$). Συγκεκριμένα, η αύξηση των αξονικών στην «πρώτη» σήραγγα για το μικρό πλάτος πυλώνα είναι της τάξης του 40%, ενώ η αντίστοιχη αύξηση στην δεύτερη περίπτωση είναι της τάξης μόλις του 10%. Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, λοιπόν, εμφανίζεται και μέσω της κατανομής των αξονικών δυνάμεων που παραλαμβάνει η υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας, ενώ η «μονή» και «δεύτερη» σήραγγα έχουν πολύ κοντινές τιμές και στις δύο περιπτώσεις ανεξαρτήτως πλάτους πυλώνα.

Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή των κατ' απόλυτη τιμή ανηγμένων αξονικών δυνάμεων όπως αναπτύσσονται στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων που αλληλεπιδρούν ($\theta=90^\circ$ για «μονή/πρώτη» σήραγγα και $\theta=270^\circ$ για «δεύτερη» σήραγγα) για τα δύο πλάτη πυλώνα που εξετάζονται καθώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στη θέση των εσωτερικών παρειών εμφανίζονται συνήθως οι μέγιστες τιμές των αποτελεσμάτων συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιοχές της περιμέτρου των διατομών.

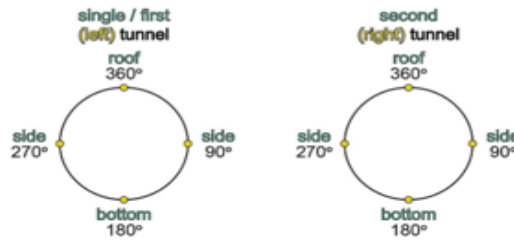


Γράφημα 4.9 Κατανομή της κατ' απόλυτη τιμή ανηγμένης αξονικής δύναμης $N_{abs,side}(\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ)/\rho_o D$ επί των εσωτερικών παρειών συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκους άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)

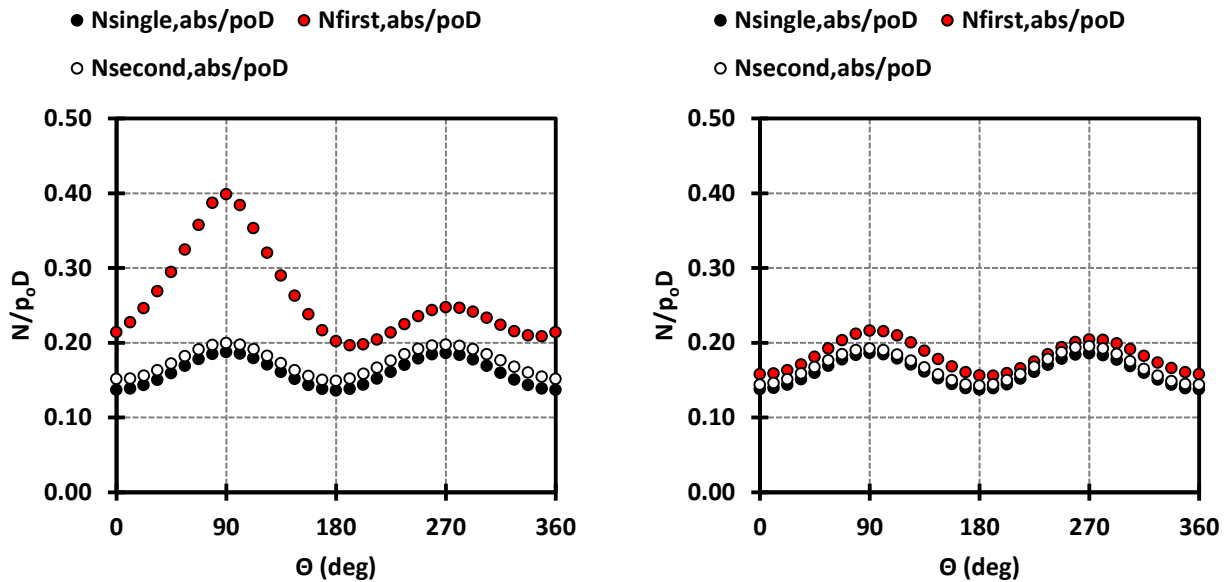
Όπως και πριν, έτσι και εδώ είναι εμφανής η αρνητική επίδραση της διάνοιξης του δεξιού κλάδου στον ήδη προυπάρχον (αριστερό) από την αύξηση των τιμών της αξονικής δύναμης που αναπτύσσεται στην εσωτερική παρειά ($\theta=90^\circ$) της «πρώτης» σήραγγας κατά μήκος του μήκους εκσκαφής ($L=10D=20R=80m$), κι ιδιαίτερα στην περίπτωση που το πλάτος πυλώνα είναι $W=0.5D=4m$. Η επίδραση του μεγέθους του πλάτους πυλώνα συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα μεταξύ τους είναι σημαντική, καθώς όσο μεγαλώνει η εγκάρσια απόσταση οι τιμές της «πρώτης» σήραγγας αρχίζουν και συγκλίνουν με τις αντίστοιχες της «μονής». Η αύξηση λόγω αλληλεπίδρασης για το μικρότερο πλάτος πυλώνα είναι 40%, ενώ η αντίστοιχη αύξηση για το μεγαλύτερο πλάτος πυλώνα είναι μόνο 10%.

Επιπλέον, και εδώ παρατηρείται ότι η απόκριση μεταξύ «μονής» και «δεύτερης» σήραγγας είναι όμοια και στις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις, γεγονός που υποδηλώνει τη σχεδόν μηδενική επιρροή της προυπάρχουσας «πρώτης» σήραγγας στην «δεύτερη». Πολύ μικρή αύξηση στις μεταξύ τους τιμές εμφανίζεται στην «δεύτερη» σήραγγα (της τάξης του 5%) λόγω της διαταραγμένης φύσεως της βραχόμαζας, με αποτέλεσμα η «δεύτερη» σήραγγα να εκσκάπτεται σε ένα ακόμα πιο ανακατενημένο πεδίο τάσεων που προκαλείται από το συνδυασμό προυπάρχουσα σήραγγα – διάνοιξη σε βραχόμαζα με φτωχά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Τέλος, παρατίθεται το διάγραμμα που εκφράζει την κατανομή των ανηγμένων κατ' απόλυτη τιμή αξονικών δυνάμεων συναρτήσει της γωνίας $\theta(^\circ)$ που δείχνει τις θέσεις περιμετρικά της διατομής με σκοπό τον προσδιορισμό των δυσμενέστερων περιοχών περιμετρικά, εκείνων δηλαδή που εμφανίζουν τις μεγαλύτερες τιμές των αξονικών.



Σχήμα 4.2: Τυπική διατομή των σηράγγων και προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (single / first - (left) – tunnel) και της δεξιάς σήραγγας (second – (right) – tunnel), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού

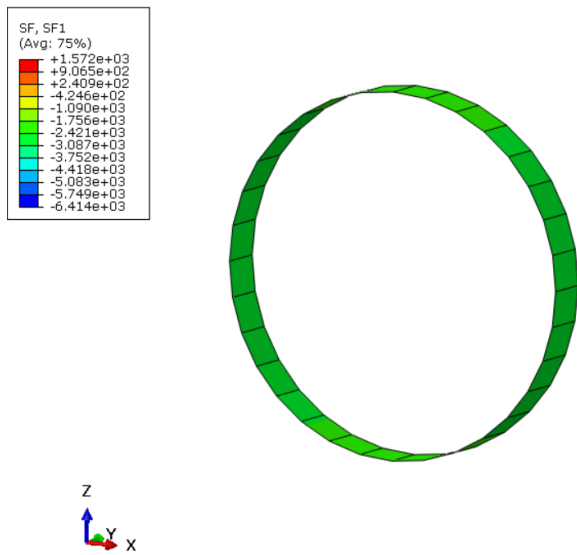


Γράφημα 4.10: Κατανομή της κατ’ απόλυτη τιμή ανηγμένης αξονικής δύναμης N_{abs}/p_oD , συναρτήσει της γωνίας θ που εκφράζει τις περιοχές περιμετρικά της τυπικής διατομής των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o=0.22$)

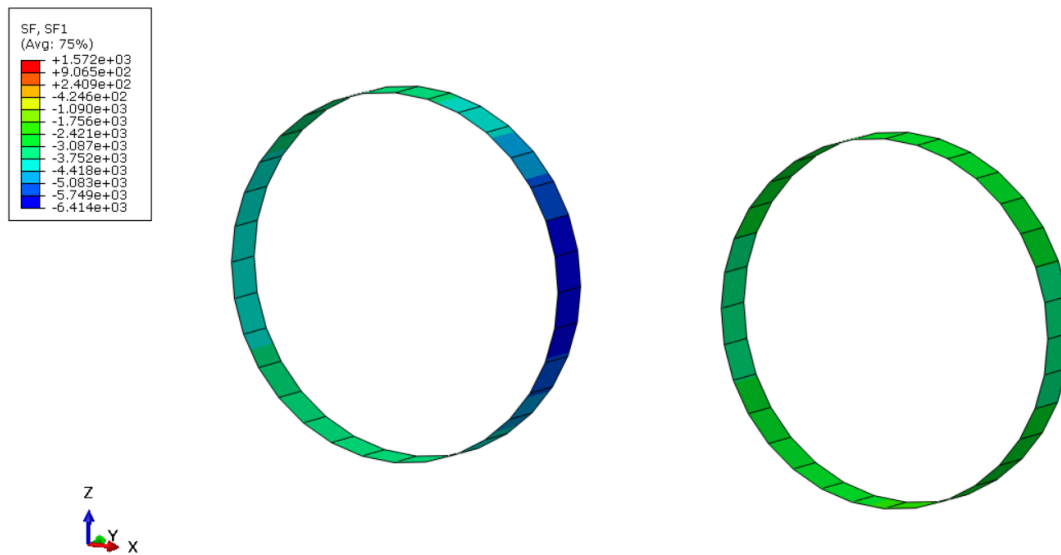
Μελετώντας το γράφημα 4.10 που αναφέρεται στην τυπική διατομή των σηράγγων, επιβεβαιώνεται η αύξηση των αξονικών δυνάμεων σε κάθε περιοχή της διατομής της «πρώτης» σήραγγας, ανεξαρτήτως πλάτους πυλώνα και η απομείωση αυτής με την αύξηση του λόγου W/D . Ακόμη, διακρίνεται η ασύμμετρη ανάπτυξη των αξονικών δυνάμεων περιμετρικά της «πρώτης» σήραγγας για το ελάχιστο πλάτος πυλώνα που διερευνήθηκε με τη μέγιστη τιμή να εμφανίζεται στην εσωτερική παρειά ($\theta=90^\circ$). Η ασυμμετρία εξαλείφεται με τη διεύρυνση της εγκάρσιας απόστασης μεταξύ των διατομών και κατ’ επέκταση τον περιορισμό του φαινομένου της αλληλεπίδρασης.

Σχετικά με τη δεξιά σήραγγα, οι αξονικές δυνάμεις της άμεσης υποστήριξής της είναι λίγο μεγαλύτερες από αυτές της «μονής» σήραγγας, αλλά για πλάτος πυλώνα $W/D>2$ οι επαγόμενες αξονικές δυνάμεις στην άμεση υποστήριξη της νέας σήραγγας είναι πρακτικά ίδιες με αυτές της μεμονωμένης, όχι μόνο σε όρους κατανομής κατά μήκος του ορίου της σήραγγας αλλά και σε όρους μεγέθους. Για τη «μονή» και τη «δεύτερη» σήραγγα και για τα δύο πλάτη πυλώνα οι δυσμενέστερες περιοχές εντοπίζονται και στις δύο παρειές ($\theta=90^\circ$ & $\theta=270^\circ$) και φέρουν στις θέσεις αυτές περίπου τις ίδιες τιμές αξονικών δυνάμεων.

Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώνονται από τις εικόνες του προγράμματος Abaqus που ακολουθούν.



Εικόνα 4.4: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων περιμετρικά της υποστήριξης της «μονής» σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής του αριστερού κλάδου (STEP 80) σε μία ενδιάμεση θέση ($Y=40m$) σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)



Εικόνα 4.5: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων περιμετρικά της υποστήριξης της «πρώτης» (αριστερά) και «δεύτερης» (δεξιά) σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής και των δύο κλάδων (STEP 160) σε μία ενδιάμεση θέση ($Y=40m$) για εφαρμογή πλάτους πυλώνα $W=0.5D=4m$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)

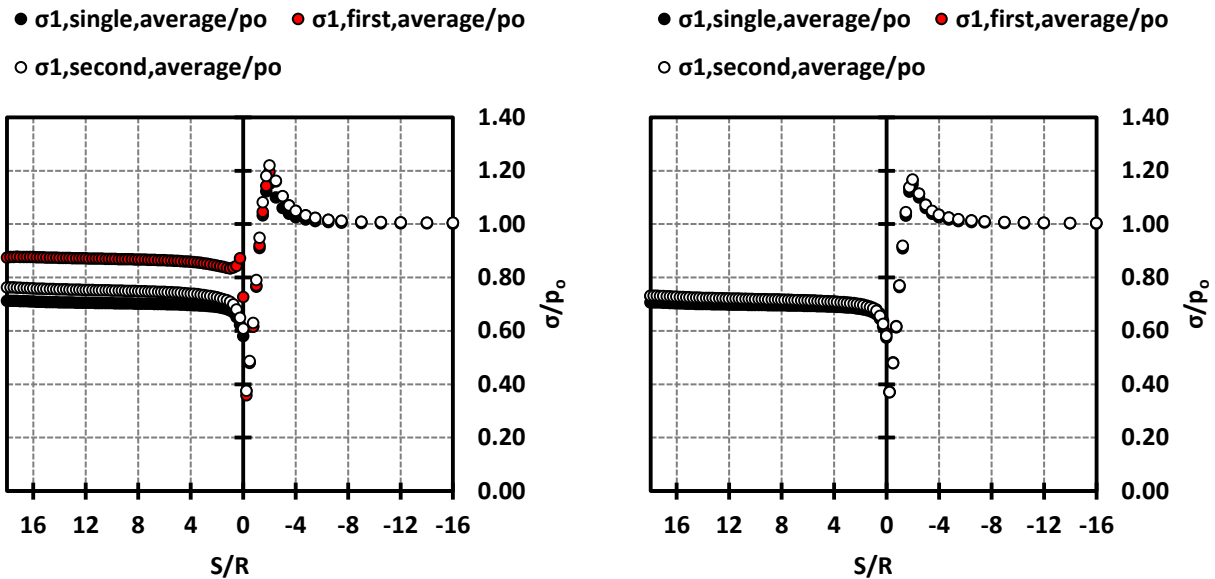


Εικόνα 4.6: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων περιμετρικά της υποστήριξης της «πρώτης» (αριστερά) και «δεύτερης» (δεξιά) σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής και των δύο κλάδων (STEP 160) σε μία ενδιάμεση θέση ($Y=40m$) για εφαρμογή πλάτους πυλώνα $W=2D=16m$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)

4.2.3. Κύριες τάσεις των στοιχείων της βραχομάζας (σ_1, σ_3)

Οι γεωστατικές και τεκτονικές τάσεις που είναι «συσσωρευμένες» στη βραχώμαζα αποτελούν τις «παραμένουσες» τάσεις και «εκτονώνονται» - ανακατανέμονται με τη διάνοιξη ενός υπόγειου έργου με αποτέλεσμα την εκδήλωση παραμορφώσεων στην περιβάλλουσα βραχώμαζα. Μάλιστα, η εκσκαφή μίας σήραγγας σε περιβάλλουσα βραχώμαζα υπό καθεσώς υψηλής «παραμένουσας» τάσης μπορεί να δημιουργήσει είτε εκρήξεις βράχων (βίαιη εκτόνωση ισχυρών τάσεων), είτε κύρτωση (καμπούρωμα) των στρωμάτων, είτε φούσκωμα (bump) της βραχώμαζας που συνοδεύεται με βίαιη δόνηση.

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται για $K_o=0.5$ οι κύριες τάσεις (μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση) του εδάφους όπως προκύπτουν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα του Abaqus για δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) για το μικρότερο και μεγαλύτερο πλάτος πυλώνα, όπως αναπτύσσονται κατά μήκος του άξονα των σηράγγων και συναρτήσει της γωνίας $\theta(^{\circ})$. Παρατηρείται πρωτίστως ότι η σ_1 είναι η μέγιστη κύρια τάση καθώς εμφανίζει μεγαλύτερα κατ' απόλυτη τιμή μεγέθη σε σχέση με την σ_3 και ασκείται κατακόρυφα στα στοιχεία που περιβάλλουν τις διατομές των σηράγγων και κατά συνέπεια η σ_3 είναι η ελάχιστη κύρια τάση και ασκείται οριζόντια. Παρουσιάζονται αρχικά οι κατανομές της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 και στη συνέχεια της ελάχιστης σ_3 .



Γράφημα 4.11: Κατανομή της ανηγμένης μέσης μέγιστης κύριας τάσης ($\sigma_{1,average}/\rho_o$) των στοιχείων της βραχόμαζας που περιβάλλουν τις διατομές των σηράγγων συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)

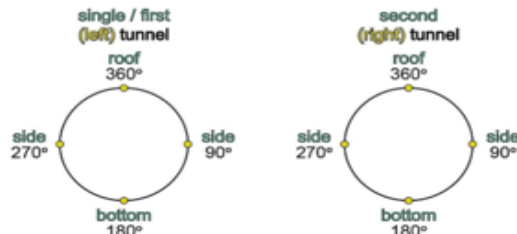
Παρατηρείται αρχικά από το παραπάνω γράφημα η λεγόμενη ανακατανομή των τάσεων που προκαλείται λόγω διάνοιξης μίας υπόγειας σήραγγας η οποία συμβαίνει είτε στην περίπτωση διάνοιξης μονής σήραγγας είτε στην περίπτωση διάνοιξη δίδυμης σήραγγας. Η μεταβολή του εντατικού πεδίου είναι εμφανής στις περιοχές κοντά στο μέτωπο, και ειδικότερα στην περιοχή μπροστά από το μέτωπο ($S/R < 0$). Συγκεκριμένα, ενώ σε απομακρυσμένη περιοχή από το μέτωπο οι τάσεις είναι ίσες με τη γεωστατική τάση πριν την εκσκαφή (ρ_o), σε απόσταση μίας διαμέτρου μετά το μέτωπο ($S/R=-2$) εκδηλώνεται απότομη αύξηση των τάσεων οι οποίες μειώνονται απότομα στο μέτωπο μέχρι που σταθεροποιούνται σε απόσταση περίπου μίας διαμέτρου πίσω από το μέτωπο ($S/R=2$). Η εν λόγω απότομη αύξηση οφείλεται στο γεγονός ότι το υλικό που δεν έχει σκαφτεί ακόμα και είναι τόσο κοντά στο μέτωπο υφίσταται μία απότομη διαταραχή λόγω της εκσκαφής που πραγματοποιείται 1m πριν. Μετά από αυτή την διαταραχή και σε όσο πιο κοντινή απόσταση από το μέτωπο οι τάσεις μειώνονται αρκετά εφόσον πραγματοποιείται αφαίρεση υλικού και αποσυμπιέζεται. Η σταθεροποίηση των τάσεων προέρχεται από την υποστήριξη που τοποθετείται ανά 1m αμέσως μετά την εκσκαφή του κάθε τμήματος ανά βήμα προχώρησης. Η υποστήριξη ανθίσταται αρχικά στις τάσεις του εδάφους μέχρι που το όλο σύστημα έρχεται σε ισορροπία.

Επιπρόσθετα, είναι πολύ εμφανής η επίδραση του πλάτους πυλώνα στα παραπάνω διαγράμματα. Ενώ για μικρό πλάτος πυλώνα (αριστερό διάγραμμα) οι τάσεις που περιβάλλουν την «πρώτη» σήραγγα είναι αυξημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες που περιβάλλουν την «μονή» και «δεύτερη» σήραγγα, στο μεγάλο πλάτος πυλώνα είναι σχεδόν οι ίδιες. Μάλιστα, η εν λόγω αύξηση στην περίπτωση του πλάτους πυλώνα $W=0.5D=4m$ φτάνει το 20%.

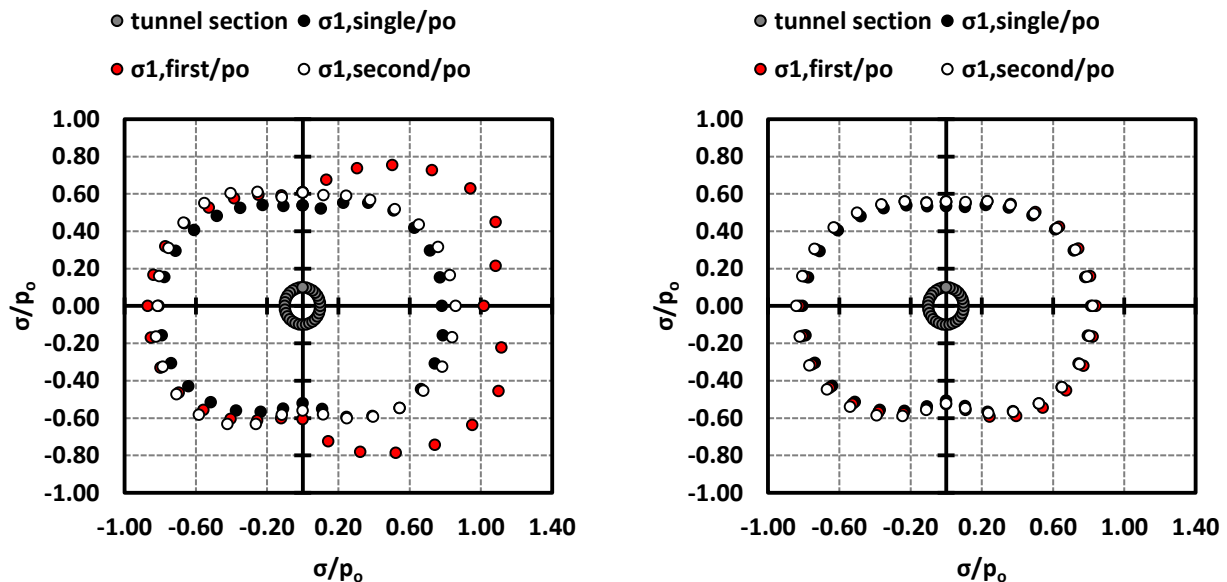
Άρα, λοιπόν, κατά τη διάνοιξη μίας σήραγγας δημιουργείται μία απότομη ανακατανομή στις τάσεις με την επακόλουθη μείωση της αρχικής τιμής τους (ρ_o) λόγω αφαίρεσης υλικού βραχόμαζας και κατά συνέπεια αποσυμπίεσης. Επιπλέον, το πόσο κοντά θα διανοιχθούν δύο κλάδοι μεταξύ τους επηρεάζει δυσμενώς το νέο εντατικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από την «πρώτη» σήραγγα

και αυτός είναι και ο λόγος που προκύπτει παρόμοια μορφή στις κατανομές των αποτελεσμάτων μεταξύ τάσεων και εντατικών μεγεθών που επιδρούν στην υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας.

Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται ο τρόπος κατανομής των κανονικοποιημένων μέγιστων κύριων τάσεων περιμετρικά των διατομών ώστε να υπάρχει μία εικόνα για το ποιές περιοχές περιμετρικά είναι περισσότερο ή λιγότερο ευάλωτες στην αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο σηράγγων.



Σχήμα 4.3: Τυπική διατομή των σηράγγων και προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (single / first - (left) – tunnel) και της δεξιάς σήραγγας (second – (right) – tunnel), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού



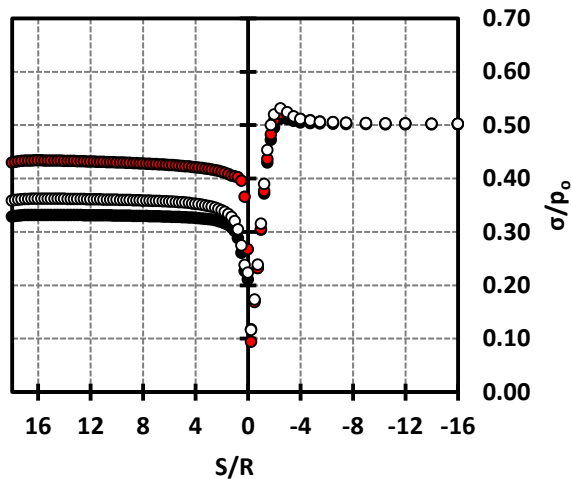
Γράφημα 4.12: Κατανομή της κανονικοποιημένης μέγιστης κύριας τάσης σ_1/ρ_0 , περιμετρικά της τυπικής διατομής των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0=0.22$)

Γίνεται εύκολα αντιληπτό και εδώ το γεγονός ότι η βραχόμαζα αποσυμπιέζεται λόγω αφαίρεσης υλικού, δεδομένου ότι οι τάσεις σε όλες τις περιπτώσεις είναι μικρότερες της ρ_0 . Αυτή η μείωση των τιμών φαίνεται να είναι ομοιόμορφη για τις περιοχές περιμετρικά της «μονής» και «δεύτερης» σήραγγας και για τα δύο πλάτη πυλώνα, ενώ ανομοιόμορφη είναι στην περίπτωση της «πρώτης» σήραγγας για το μικρότερο πλάτος πυλώνα. Αυτό υποδηλώνει αρχικά ότι είτε πραγματοποιηθεί διάνοιξη μονής είτε διπλής σήραγγας, η διαταραχή που θα προκληθεί στο εντατικό πεδίο είναι βέβαια και είναι επόμενο οι τάσεις να παρουσιάσουν απόκλιση από την αρχική γεωστατική κατάσταση. Επίσης, πιο σημαντική είναι η παρατήρηση ότι τα αποτελέσματα είναι δυσμενή για την εσωτερική παρειά της «πρώτης» σήραγγας για μικρό πλάτος πυλώνα, κάτι που έχουμε ξανασυναντήσει σε αντίστοιχα αποτελέσματα φορτίων και αξονικών δυνάμεων που δρουν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Είναι προφανές ότι η πλευρά που συνορεύει με τον δεξιό κλάδο επηρεάζεται από τη διάνοιξή του, καθώς η υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας δεν μπορεί να

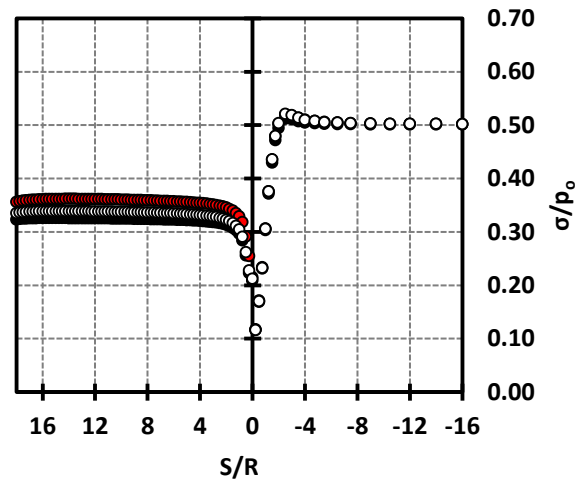
παραλάβει τις συγκλίσεις που αναπτύσσονται λόγω διάνοιξης της «δεύτερης» σήραγγας και είναι επόμενο οι πιέσεις και οι τάσεις σε αυτή την περιοχή να είναι πιο αυξημένες λόγω αντίστασης, συγκριτικά με τη στέψη ή την εξωτερική παρειά. Βέβαια, στην περίπτωση του μεγάλου πλάτους πυλώνα ($W=2D=16m$) οι τιμές των αποτελεσμάτων βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους και δεν τίθεται θέμα αλληλεπίδρασης για να υπάρχει περαιτέρω αύξηση των τιμών στα στοιχεία της βραχόμαζας που περιβάλλουν την «πρώτη» σήραγγα. Επομένως, και υπό την εξέταση της μέγιστης κύριας τάσης καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως το πλάτος πυλώνα $W=2.0D=16m$ είναι επαρκές για να μην λάβουμε υπόψη το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.

Στη συνέχεια περιγράφονται τα ανάλογα αποτελέσματα για την ελάχιστη κύρια τάση σ_3 και εντοπίζονται κυρίως ομοιότητες και κάποιες ωστόσο μικρές διαφορές με τα αντίστοιχα που μελετήθηκαν παραπάνω για την μέγιστη κύρια τάση σ_1 .

● $\sigma_3, \text{single, average}/\rho_0$ ● $\sigma_3, \text{first, average}/\rho_0$
○ $\sigma_3, \text{second, average}/\rho_0$



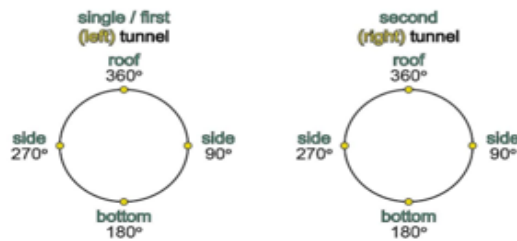
● $\sigma_3, \text{single, average}/\rho_0$ ● $\sigma_3, \text{first, average}/\rho_0$
○ $\sigma_3, \text{second, average}/\rho_0$



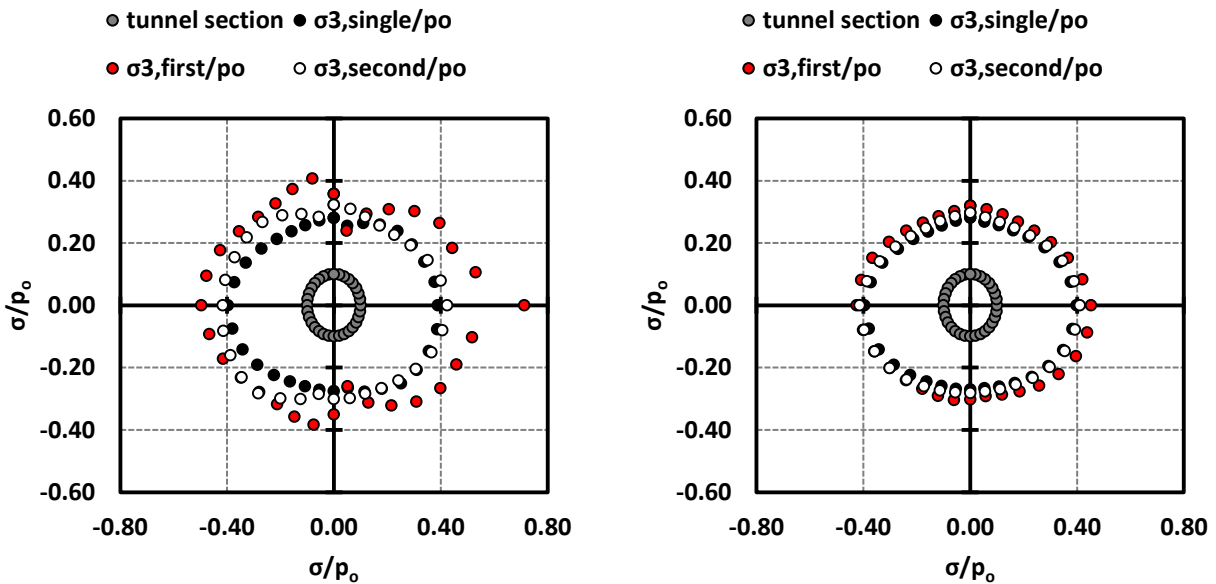
Γράφημα 4.13: Κατανομή της ανηγμένης μέσης ελάχιστης κύριας τάσης ($\sigma_{3, \text{average}}/\rho_0$) των στοιχείων της βραχόμαζας που περιβάλλουν τις διατομές των σηράγγων συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκους άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0=0.22$)

Αρχικά είναι εμφανές ότι οι τάσεις κατανέμονται μηκοτομικά του άξονα των σηράγγων με τον ίδιο τρόπο. Συγκεκριμένα, σε απομακρυσμένες περιοχές που βρίσκονται μετά από το μέτωπο ($S/R < 0$) οι ελάχιστες κύριες τάσεις είναι $\sigma_3=0.5\rho_0$ που ισοδυναμεί στην αρχική γεωστατική κατάσταση για $K_0=0.5$ (δηλαδή οι οριζόντιες τάσεις είναι οι μισές των κατακόρυφων). Σε περιοχές που δεν έχουν σκαφτεί ακόμα και βρίσκονται πολύ κοντά στο μέτωπο, σε απόσταση μίας διαμέτρου ($S/R=-2$), οι αρχικές τάσεις αυξάνονται αλλά σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με την αντίστοιχη αύξηση που παρουσιάζεται στις μέγιστες κύριες τάσεις και στη συνέχεια στη θέση του μετώπου μειώνονται κατακόρυφα λόγω αφαίρεσης υλικού. Τέλος, επέρχεται ισορροπία του όλου συστήματος και οι ελάχιστες κύριες τάσεις σταθεροποιούνται σε απόσταση μίας διαμέτρου από το μέτωπο εκσκαφής ($S/R=2$) λόγω της ενεργοποίησης της υποστήριξης που τοποθετείται 1m πριν το μέτωπο.

Σημαντική διαφοροποίηση λόγω του φαινομένου αλληλεπίδρασης εντοπίζεται και εδώ, με τα στοιχεία της βραχόμαζας που περιβάλλουν την «πρώτη» σήραγγα να αναπτύσσουν υψηλές τάσεις για το μικρότερο πλάτος πυλώνα. Αντίθετα, για $W=2D=16m$, οι τιμές για όλες τις περιπτώσεις σηράγγων που εξετάζονται συγκλίνουν και η αλληλεπίδραση παύει να κυριαρχεί.



Σχήμα 4.4: Τυπική διατομή των σηράγγων και προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (single / first - (left) – tunnel) και της δεξιάς σήραγγας (second – (right) – tunnel), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού

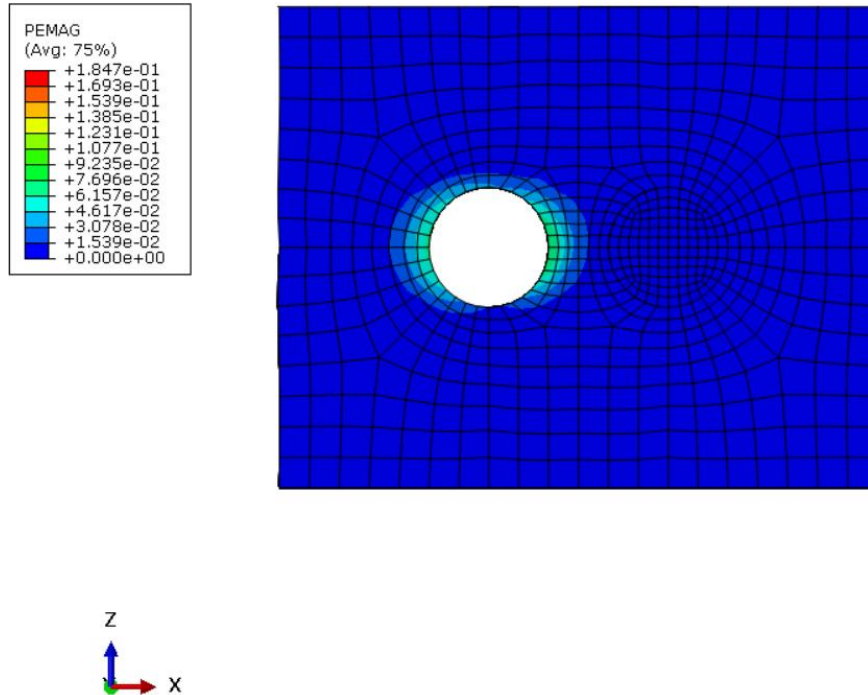


Γράφημα 4.14: Κατανομή της κανονικοποιημένης ελάχιστης κύριας τάσης σ_3/ρ_0 , περιμετρικά της τυπικής διατομής των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0=0.22$)

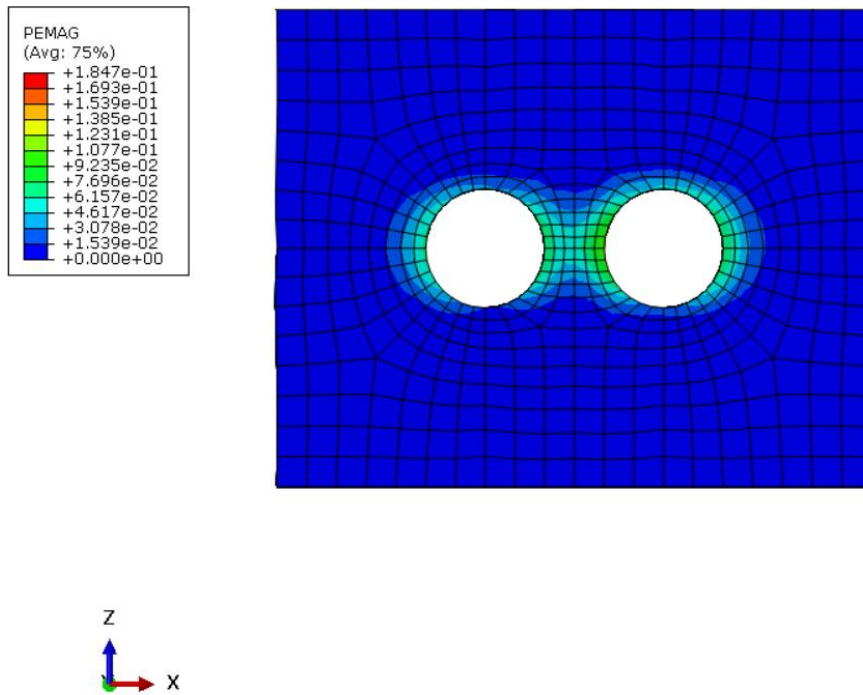
Από το παραπάνω γράφημα αξίζει να αναφερθεί η διαφοροποίηση στη μορφή κατανομής των τάσεων που αναπτύσσονται στα εδαφικά στοιχεία περιμετρικά των διατομών. Ενώ στην περίπτωση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 οι τάσεις του εδάφους για την «πρώτη» σήραγγα είναι αυξημένες μόνο στην παρειά που γειτονεύει με τον δεξιό κλάδο διάνοιξης ($\theta=0\sim 180^\circ$), σε αυτή την περίπτωση οι τάσεις είναι αυξημένες σχεδόν σε όλες τις περιοχές περιμετρικά με τη μεγαλύτερη να εμφανίζεται για $\theta=90^\circ$. Λόγω αλληλεπίδρασης δηλαδή οι ελάχιστες τάσεις διαφοροποιούνται ελάχιστα στο σύνολο από τις αρχικές γεωστατικές συνθήκες, και μάλιστα στην περιοχή $\theta=90^\circ$ υπερβαίνουν την αρχική τιμή $0.50\rho_0$. Αυτό δείχνει έντονη ανακατανομή των ελάχιστων κύριων τάσεων λόγω του φαινομένου της αλληλεπίδρασης που επηρεάζει το σύνολο της περιμέτρου διατομής. Επίσης, οι πιο μειωμένες από όλες τις τιμές εντοπίζονται κοντά στη θέση της στέψης και του πυθμένα, οι οποίες προσεγγίζουν τις αντίστοιχες τιμές για «μονή» και «δεύτερη» σήραγγα. Τέλος, η επιρροή της εγκάρσιας απόστασης στην αλληλεπίδραση των σηράγγων για πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$ είναι αμελήτεια, κάτι το οποίο παρατηρήθηκε και στην περίπτωση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 .

Παρακάτω παρατίθενται κάποιες αντιπροσωπευτικές εικόνες από το πρόγραμμα Abaqus για καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι πλαστικές παραμόρφωσεις όπως αυτές αναπτύσσονται περιμετρικά των διατομών για μία ενδιάμεση θέση κατά μήκος του άξονα των σηράγγων μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής της «μονής» σήραγγας (step 80) καθώς και μετά την ολοκλήρωση εκσκαφής «πρώτης» και «δεύτερης» σήραγγας (step

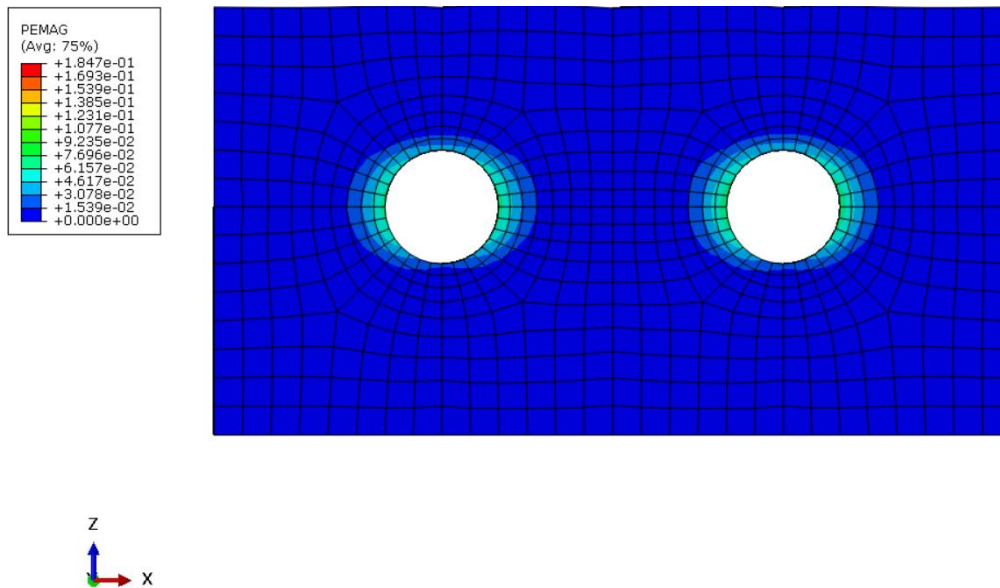
160) για τη βραχόμαζα Νο 2 με δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) στην περίπτωση του μικρού πλάτους πυλώνα και στη συνέχεια ακολουθεί σύγκριση των εικόνων για τα δύο υπό εξέταση πλάτη πυλώνα. Οι πλαστικές παραμορφώσεις αναφέρονται στις παραμορφώσεις της βραχομάζας που πλαστικοποιούνται γύρω από τη διατομή των σήραγγων λόγω της διάνοιξης του υπόγειου έργου στο περιβάλλον της βραχόμαζας. Η πλαστικοποίηση προέρχεται ουσιαστικά μετά από αστοχία των στοιχείων της βραχόμαζας που απαρτίζουν τις σήραγγες και υποδηλώνει την συνεχή αύξηση των παραμορφώσεων για μικρές τιμές τάσεων.



Εικόνα 4.7: Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων περιμετρικά της «μονής» σήραγγας σε μία τυπική διατομή στη θέση $Y=40m$ όταν ολοκληρώνεται η εκσκαφή του πρώτου κλάδου (STEP 80) για δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) και όταν εφαρμόζεται το μικρότερο πλάτος πυλώνα ($W=0.5D=4m$)



Εικόνα 4.8: Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων περιμετρικά της δίδυμης σήραγγας σε μία τυπική διατομή στη θέση $Y=40m$ όταν ολοκληρώνεται η εκσκαφή και των δύο κλάδων (STEP 160) για δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) και όταν εφαρμόζεται το μικρότερο πλάτος πυλώνα ($W=0.5D=4m$)



Εικόνα 4.9: Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων περιμετρικά της δίδυμης σήραγγας σε μία τυπική διατομή στη θέση $Y=40m$ όταν ολοκληρώνεται η εκσκαφή και των δύο κλάδων (STEP 160) για δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) και όταν εφαρμόζεται το μεγαλύτερο πλάτος πυλώνα ($W=2.0D=16m$)

Σύμφωνα με τις εικόνες 4.8 και 4.9 το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης επιδρά αρνητικά και στην ανάπτυξη των πλαστικών παραμορφώσεων. Στην περίπτωση του μικρού πλάτους πυλώνα οι πλαστικές παραμορφώσεις δεν αναπτύσσονται συμμετρικά αλλά επικρατεί δυσμέμεια στις γειτονικές παρειές μεταξύ των σηράγγων ($\theta=90^\circ$ & $\theta=270^\circ$ αντίστοιχα για «πρώτη» και «δεύτερη» σήραγγα). Αντίθετα, όσο μεγαλώνει η εγκάρσια απόσταση τόσο περισσότερο συμμετρικά είναι τα αποτελέσματα με τις τιμές των παραμορφώσεων να συγκλίνουν μεταξύ τους για $\theta=90^\circ$ και για

$\theta=270^\circ$ και στους δύο κλάδους. Ουσιαστικά, δηλαδή, στην δεύτερη περίπτωση με το μεγαλύτερο πλάτος πυλώνα η διάνοιξη της «δεύτερης» σήραγγας επηρεάζει σχεδόν αμελητέα την «πρώτη» σήραγγα και θα μπορούσαν να μελετηθούν οι δύο κλάδοι ως ανεξάρτητες κατασκευές. Επιπρόσθετα, παρατηρείται και για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις το γεγονός ότι οι πιο ευπαθείς περιοχές είναι οι παρειές συγκριτικά με την στέψη και τον πυθμένα. Αυτό σημαίνει ότι τα στοιχεία στις πλευρικές περιοχές είναι περισσότερο ευάλωτα κατά τη διάνοιξη και γι' αυτό εισέρχονται στην πλαστική περιοχή, κάτι που ίσως οφείλεται στην τιμή του $K_0=0.5$ που επιφέρει αυξημένες ακτινικές τάσεις στη θέση που βρίσκονται οι παρειές. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως η «δεύτερη» σήραγγα αποκρίνεται κατά παρόμοιο τρόπο με την «μονή», μόνο που αυτό δεν είναι τόσο ευδιάκριτο στη θέση του πυλώνα όταν εκείνος έχει τιμή $W=0.5D=4m$, καθώς η περιοχή αυτή έχει διαταραχθεί και πλαστικοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό από τη διάνοιξη του δεξιού κλάδου.

4.3. Επίδραση γεωτεχνικών συνθηκών

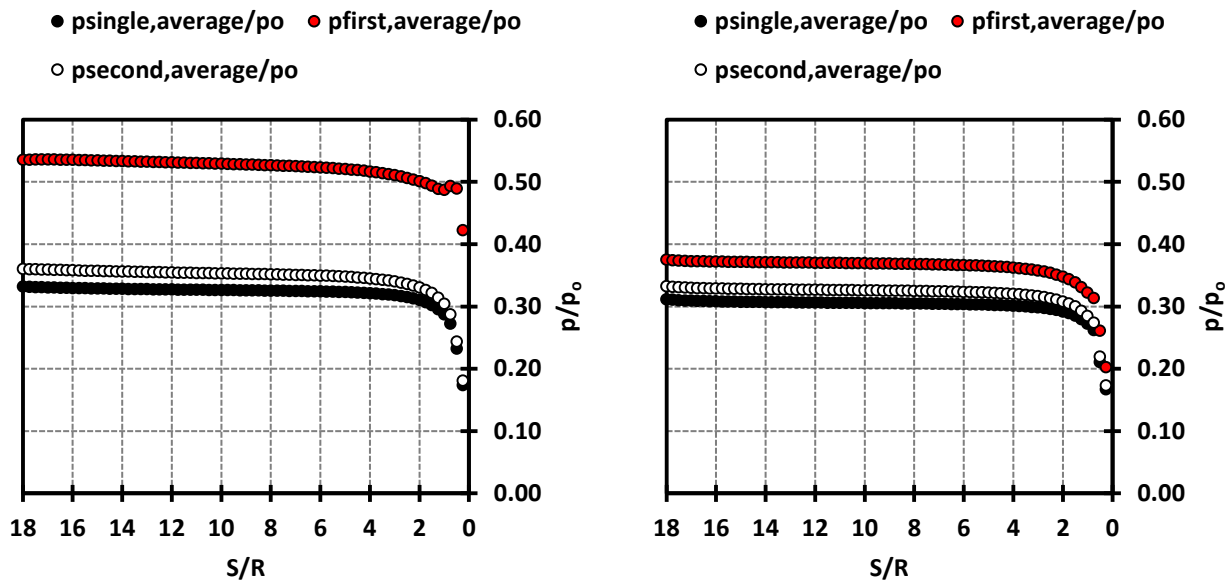
Δεδομένου ότι πραγματοποιήθηκαν τρισδιάστατες αναλύσεις για 20 κατηγορίες βραχώμαζας για κάθε εξεταζόμενο πλάτος πυλώνα, επιλέγεται η διερεύνηση της επιρροής των γεωτεχνικών συνθηκών στην απόκριση των σηράγγων για $W=0.5D=4m$ όπου το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι εντονότερο. Γι' αυτό το λόγο, εξήχθησαν αποτελέσματα για δύο αντιπροσωπευτικές κατηγορίες βραχώμαζας και αναλύονται παρακάτω. Τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά ανά τύπο βραχώμαζας που αναλύθηκε παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2 του 3^{ου} κεφαλαίου που προηγήθηκε και οι κατηγορίες βραχώμαζας που επιλέχθηκαν προς σύγκριση αποτελεσμάτων είναι η N^ο 2 με $GSI=10$ και $\sigma_{cm}/p_o=0.22$ και η N^ο 18 με $GSI=30$ και $\sigma_{cm}/p_o=0.46$. Πρόκειται δηλαδή για μία πολύ πτωχής ποιότητας βραχώμαζα με πιθανή συμπεριφορά παρόμοια με εκείνη που έχει ένα εδαφικό υλικό και για μία μέτριας ποιότητας βραχώμαζα με καλύτερες γεωτεχνικές παραμέτρους. Ως προς τον καθορισμό των όρων από τεχνική άποψη, υπάρχει διάκριση μεταξύ πετρώματος (βράχου) και εδάφους και συγκεκριμένα θεωρείται ότι έδαφος είναι ένα φυσικό συσσωμάτωμα κόκκων που μπορεί να διαχωριστεί με απλή μηχανική δράση (π.χ. ανακίνηση μέσα σε νερό) και βράχος είναι ένα φυσικό συσσωμάτωμα ορυκτών με μορφή κρυστάλλων ή κόκκων που συνδέονται μεταξύ τους με φυσική συγκολλητική ύλη (Terzaghi, 1967).

Για καλύτερη κατανόηση των γεωλογικών χαρακτηριστικών για τις δύο περιπτώσεις που εξετάζονται, βραχώμαζες που κατηγοριοποιούνται σε $GSI=10$ είναι μορφολογικά φυλλώδεις ή σχιστοποιημένες και τεκτονικά διατμημένες και περιέχουν επιφάνειες ολίσθησης αποσαθρωμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης. Απ' την άλλη βραχώμαζες που κατηγοριοποιούνται σε $GSI=30$ είναι είτε πτυχωμένες με εμμονή στρώσης ή σχιστότητας και έχουν επιφάνειες ολίσθησης πολύ αποσαθρωμένες με συμπαγή αποφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα είτε είναι ισχυρά κερματισμένες με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλομένων τεμαχίων με την παρουσία λείων, μέτρια αποσαθρωμένων και εξαλλοιωμένων επιφανειών.

Τα αποτελέσματα που επιλέγονται προς ανάλυση και μελέτη είναι τα αντίστοιχα με εκείνα που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα και αναφέρονται στο μικρότερο πλάτος πυλώνα ($W=0.5D=4m$) με σκοπό τον προσδιορισμό της επίδρασης του φαινομένου αλληλεπίδρασης σε φορτία και αξονικές δυνάμεις που ασκούνται στην άμεση υποστήριξη, όπως επίσης και σε τάσεις της βραχώμαζας που περιβάλλει τις διατομές σε διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς.

4.3.1. Φορτία στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (p)

Αντίστοιχα και εδώ παρουσιάζεται η κατανομή των κανονικοποιημένων μέσων φορτίων συναρτήσει της κανονικοποιημένης διαμήκουσ απόστασης από το μέτωπο (S/R), η κατανομή τους για τις εσωτερικές παρειές των δύο κλάδων που γειτνιάζουν ($\theta=90^\circ$ & $\theta=270^\circ$), η κατανομή τους περιμετρικά των διατομών και τέλος η χρονοιστορία της εξέλιξης τους ανά βήμα προχώρησης και στους δύο κλάδους.



Γράφημα 4.15: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $p_{average}/p_0$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκουσ άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/p_0=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/p_0=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$

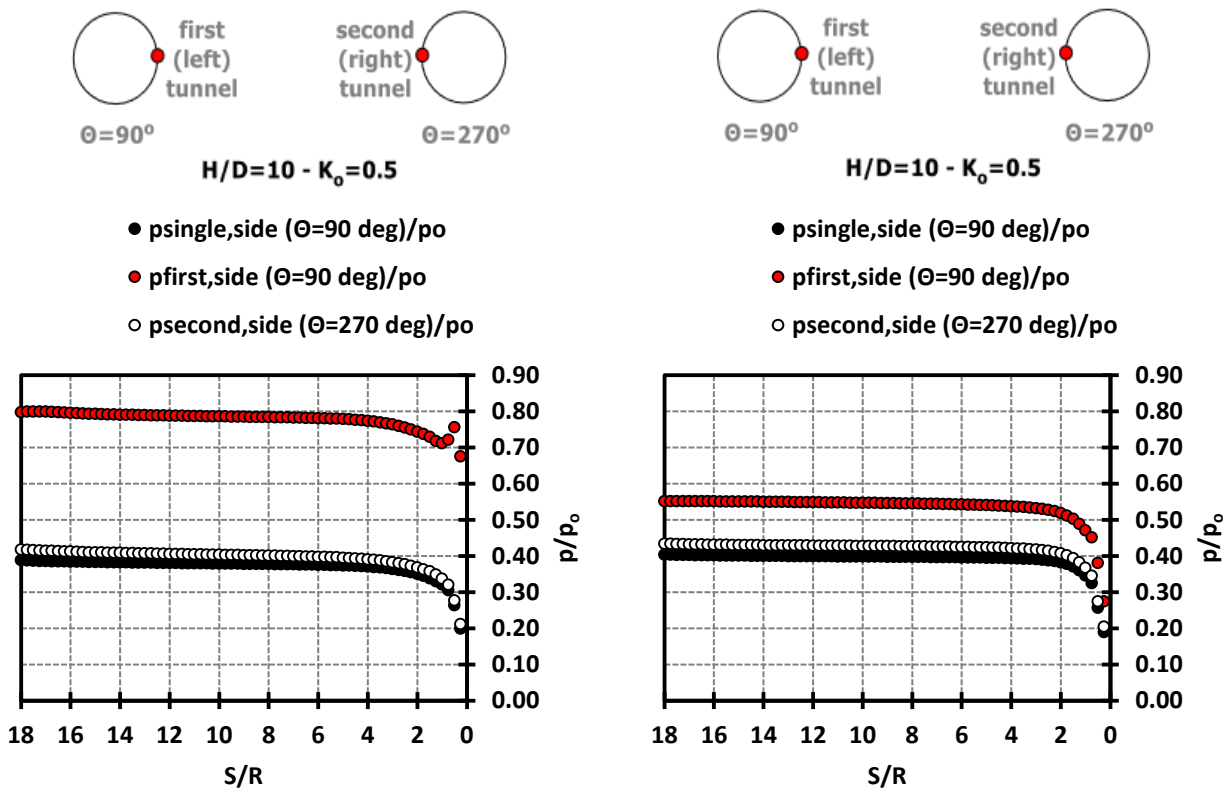
Τα φορτία όπως εξελίσσονται κατά μήκος του άξονα των σηράγγων έχουν την γνωστή απόκριση της σταδιακής αύξησης των τιμών στη θέση του μετώπου εκσκαφής με την σταθεροποίησή τους να εντοπίζεται σε θέση μίας διαμέτρου περίπου πίσω από το μέτωπο ($S/R=2$). Η εν λόγω σταθεροποίηση προκαλείται από την παρουσία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος το οποίο τοποθετείται αμέσως μετά την εκσκαφή ανά βήμα προχώρησης και ενεργοποιείται καλύτερα για την παραλαβή των φορτίων χρονικά λίγο αργότερα μετά την τοποθέτησή του. Η μορφή απόκρισης είναι ίδια για όλες τις περιπτώσεις των σηράγγων που εξετάζονται και στους δύο γεωλογικούς σχηματισμούς.

Επιπρόσθετα, είναι προφανές από την απόκριση της υποστήριξης της «πρώτης» σήραγγας η αρνητική επίδραση που επιφέρει η μικρή εγκάρσια απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων. Και στις δύο περιπτώσεις γεωλογικών συνθηκών, τα φορτία που παραλαμβάνει η υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας είναι εμφανώς μεγαλύτερα από εκείνα που δέχεται η υποστήριξη της «μονής» και «δεύτερης» σήραγγας, δεδομένου ότι η διάνοιξη του δεξιού κλάδου επιφέρει νέα ανακατανομή των τάσεων και δημιουργία συγκλίσεων οι οποίες δεν εκτονώνονται με την ύπαρξη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που προυπάρχει κατά μήκος της «πρώτης» σήραγγας και έτσι οι πιέσεις και τα φορτία για την «πρώτη» σήραγγα εντείνονται. Αντίθετα, η «δεύτερη» σήραγγα

επηρεάζεται αμελητέα από την ύπαρξη της «πρώτης» και γι'αυτό αποκρίνεται όμοια όπως η «μονή».

Το νέο συμπέρασμα που προκύπτει από το παραπάνω γράφημα είναι ο μεγάλος βαθμός επιρροής των γεωτεχνικών συνθηκών στα αποτελέσματα. Κάτι τέτοιο γίνεται αντιληπτό από τις τιμές των φορτίων για τη βραχόμαζα N° 2 και N° 18. Ενώ η αύξηση των φορτίων που δέχεται η υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας για πολύ πτωχή ποιότητας βραχόμαζα είναι της τάξης του 40%, η αντίστοιχη αύξηση για την μέτρια προς πτωχή ποιότητα βραχόμαζα είναι μόλις 20%. Φαίνεται λοιπόν πως ακόμα και για τόσο μικρό πλάτος πυλώνα, τα αποτελέσματα που προκαλεί η αλληλεπίδραση των σηράγγων μειώνονται πολύ λόγω ευνοικών συνθηκών περιβάλλοντος γεωυλικού. Αυτό υποδηλώνει το γεγονός ότι το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης τείνει να εξαλειφθεί για ακόμα καλύτερες γεωλογικές συνθήκες, και κατά συνέπεια η διάνοση διδυμη σήραγγας σε καλής ποιότητας βραχόμαζα με μικρό βαθμό αποσάθρωσης και την ύπαρξη μικρού αριθμού ασυνεχειών δε θα προκαλέσει διαταραχή στην «πρώτη» σήραγγα και ίσως οι δύο κλάδοι να μπορούν να μελετηθούν ως ανεξάρτητες κατασκευές.

Παρακάτω εμφανίζεται το γράφημα με τα διαγράμματα που απεικονίζουν την μηκοτομική κατανομή των αναπτυσσόμενων φορτίων που παραλαμβάνει η κάθε σήραγγα για τη δυσμενέστερη περιοχή περιμετρικά των διατομών, δηλαδή για τις εσωτερικές γειτονικές παρειές.

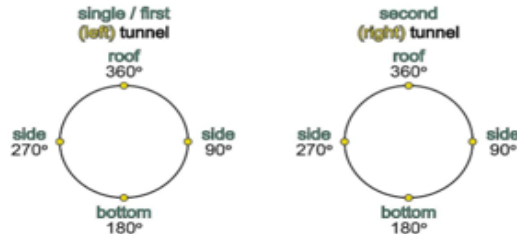


Γράφημα 4.16 Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου $p_{side} (\theta=90 \text{ \& } \theta=270)/p_0$ επί των εσωτερικών παρειών συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκους άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/p_0=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/p_0=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$

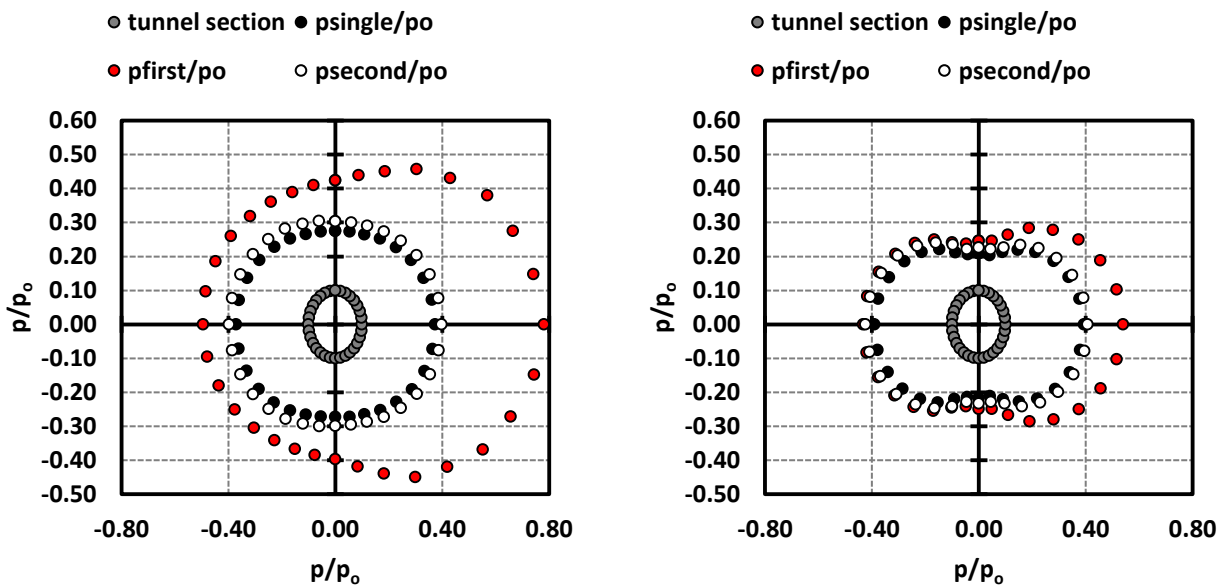
Αρχικά, παρατηρείται ότι η μορφή απόκρισης είναι αντίστοιχη με εκείνη που εξετάστηκε στο γράφημα 4.15 και είναι ευδιάκριτη η δυσμενής επιρροή του δεξιού κλάδου στην «πρώτη» σήραγγα. Συγκεκριμένα, για πολύ δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες (αριστερό διάγραμμα) η αύξηση των πιέσεων που παραλαμβάνει η «πρώτη» σήραγγα φτάνει το 50%, ενώ για καλύτερες

γεωλογικές συνθήκες (δεξιό διάγραμμα) η αντίστοιχη αύξηση φτάνει το 27%. Συμπεραίνουμε λοιπόν 'και εδώ ότι τα αποτελέσματα είναι ευμενέστερα όσο βελτιώνονται οι γεωτεχνικές συνθήκες και ακόμα και για τόσο μικρό πλάτος πυλώνα η επιρροή της διάνοιξης νέου κλάδου σε έναν προυπάρχον είναι σχεδόν αμελητέα.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα που εκφράζουν την κατανομή των φορτίων όπως αναπτύσσονται περιμετρικά των διατομών για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις βραχόμαζας.



Σχήμα 4.5: Τυπική διατομή των σηράγγων και προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (single / first - (left) – tunnel) και της δεξιάς σήραγγας (second – (right) – tunnel), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού



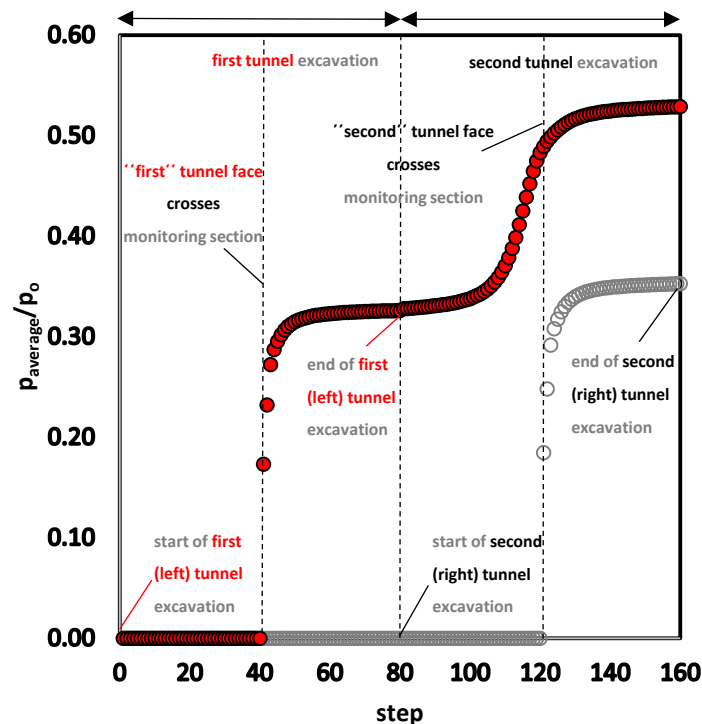
Γράφημα 4.17: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου r/r_0 , περιμετρικά της τυπικής διατομής των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/r_0=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/r_0=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$

Από το παραπάνω γράφημα επιβεβαιώνεται αρχικά το γεγονός ότι η πιο ευάλωτη από την αλληλεπίδραση περιοχή, είναι η πλευρά της «πρώτης» σήραγγας που συνορεύει με τη «δεξιά» ($\theta=0\sim 180^\circ$). Επιπλέον, είναι αντιληπτό και εδώ ότι μόνο η «πρώτη» σήραγγα επηρεάζεται δυσμενώς από τη διάνοιξη του δεξιού κλάδου. Αντίθετα, η «δεξιά» σήραγγα συμπεριφέρεται σαν τη «μονή» με μία μικρή μόνο διαφοροποίηση στις τιμές και τα αποτελέσματα των φορτίων κατανέμονται ομοιόμορφα γύρω από την διατομή.

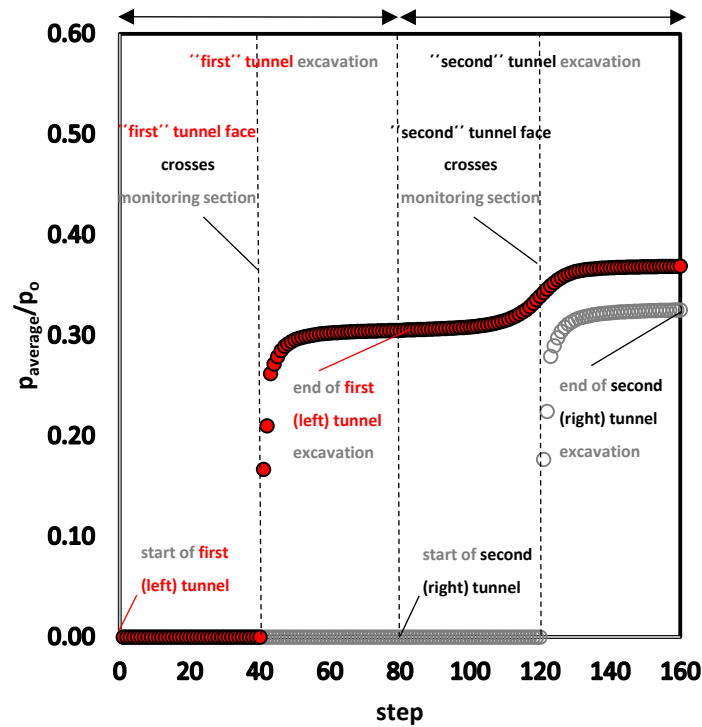
Όσον αφορά την τάξη μεγέθους των πιέσεων που δρούν στην υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας, καθοριστικό ρόλο παίζουν οι γεωτεχνικές παράμετροι της κάθε βραχόμαζας. Για την πιο χαόδη και διατμημένη βραχόμαζα με $\sigma_{cm}/r_0=0.22$ τα αποτελέσματα είναι αυξημένα σε όλη την περίμετρο

όπως επίσης και ανομοιόμορφα και ασύμμετρα και η μεγαλύτερη τιμή φορτίου εντοπίζεται στην παρειά $\theta=90^\circ$. Αντίστοιχα ανομοιόμορφα και ασύμμετρα είναι τα αποτελέσματα και για τη βραχόμαζα με $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$, μόνο που επηρεάζεται από το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μόνο η πλευρική περιοχή της «πρώτης» σήραγγας που γειτνιάζει με την εσωτερική παρειά της «δεξιάς» σήραγγας ($\theta=0\sim 180^\circ$) και η μεγαλύτερη τιμή εντοπίζεται και εδώ για $\theta=90^\circ$. Ευμενέστερη, όμως, είναι η συνολική απόκριση της «πρώτης» σήραγγας για την καλύτερης ποιότητας βραχόμαζα αφού οι τιμές των φορτίων είναι αρκετά πιο μικρές συγκριτικά με την βραχόμαζα που έχει $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα χρονιοστορίας της εξέλιξης των ανηγμένων μέσων πιέσεων που ασκούνται στην υποστήριξη που τοποθετείται ανά βήμα εκσκαφής για μία επιλεγμένη διατομή κατά τη διάρκεια διάνοιξης και των δύο κλάδων σε δύο διαφορετικές βραχομάζες όταν το πλάτος πυλώνα είναι πολύ μικρό ($W=0.5D=4m$). Όπως και στην υποενότητα 4.1, έτσι και εδώ επιλέγεται η διατομή που βρίσκεται στο μέσον του μήκους εκσκαφής, δηλαδή στη θέση $Y=40m$. Υπενθυμίζεται ότι η κάθε σήραγγα εκσκάπτεται και υποστηρίζεται παράλληλα σε 80 βήματα. Έτσι η «μονή» και «πρώτη» σήραγγα αντίστοιχα ολοκληρώνονται στα πρώτα 80 βήματα και η «δεύτερη» σήραγγα στα επόμενα 80 βήματα.



Γράφημα 4.18: Χρονιοστορία των κανονικοποιημένων μέσων φορτίων $p_{average}/p_o$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκους άξονα των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$



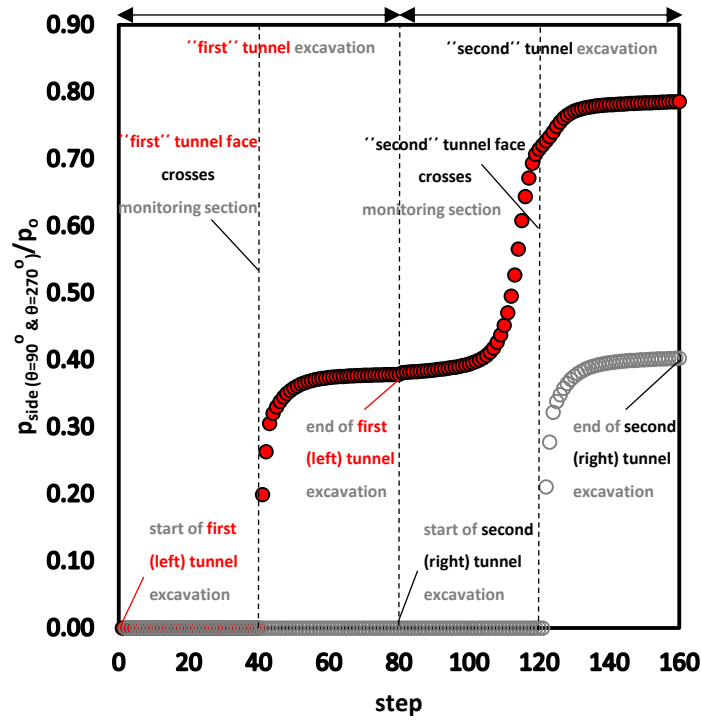
Γράφημα 4.19: Χρονοιστορία των κανονικοποιημένων μέσων φορτίων $p_{average}/p_0$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκους άξονα των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/p_0=0.46$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$

Αρχικά, υπενθυμίζεται η ερμηνεία των παραπάνω διαγράμματα και στη συνέχεια η ανάλυση της επίδρασης των γεωτεχνικών συνθηκών στην εξέλιξη των μέσων κανονικοποιημένων φορτίων που δρούν στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων. Η διατομή που επιλέγεται προς εξέταση της χρονοιστορίας των φορτίων είναι η $Y=40m$ και για τους δύο κλάδους και αντιστοιχεί στο βήμα 40 για την «πρώτη» σήραγγα και βήμα 120 για την «δεύτερη» σήραγγα αντίστοιχα. Από το βήμα 0~40 δεν παρατηρείται κάποια μεταβολή της αρχικής γεωστατικής τάσης (p_0) καθώς το μέτωπο εκσκαφής είναι αρκετά απομακρυσμένο από την επιλεγμένη διατομή ($Y=40m$). Μόλις προσεγγίζει την επιλεγμένη διατομή προκαλείται ανακατανομή στις τάσεις από την αφαίρεση υλικού με αποτέλεσμα την σταδιακή μείωση του p_0 και την ανάπτυξη νέων φορτίων. Λίγο μετά το 40^ο βήμα όπου έχει τοποθετηθεί και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην διανοιγμένη περιοχή, οι τιμές των φορτίων που δημιουργούνται σταθεροποιούνται σε μία τιμή μέχρι το 80^ο βήμα εκσκαφής όπου και ολοκληρώνεται η εκσκαφή της «πρώτης» σήραγγας. Στο βήμα 81 ξεκινά η εκσκαφή της δεύτερης» σήραγγας. Με παρόμοιο τρόπο εξελίσσονται τα φορτία που ασκούνται στην υποστήριξη της «δεύτερης σήραγγας». Από το βήμα 80 έως 120 όπου το μέτωπο εκσκαφής είναι απομακρυσμένο από την εξεταζόμενη διατομή, τα φορτία της «δεύτερης» σήραγγας ισούνται με p_0 . Λίγο πριν ξεκινήσει η εκσκαφή στη θέση $Y=40m$ για την «δεύτερη» σήραγγα (step 120) τα κανονικοποιημένα μέσα φορτία αρχίζουν να αυξάνονται λόγω διαταραχής της ζώνης που προηγείται, μέχρι που συγκλίνουν σε μία τιμή λίγο αργότερα χρονικά του βήματος 120 λόγω της ενεργοποίησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που έχει ήδη τοποθετηθεί. Όσον αφορά την επίδραση του δεξιού κλάδου στην «πρώτη» σήραγγα, μόλις το μέτωπο εκσκαφής της «δεύτερης» σήραγγας προσεγγίσει την διατομή που εξετάζεται για την «πρώτη» σήραγγα (βήμα 120), τα φορτία που έχουν ήδη σταθεροποιηθεί σε μία τιμή λόγω της παρουσίας της άμεσης υποστήριξης αρχίζουν πάλι και

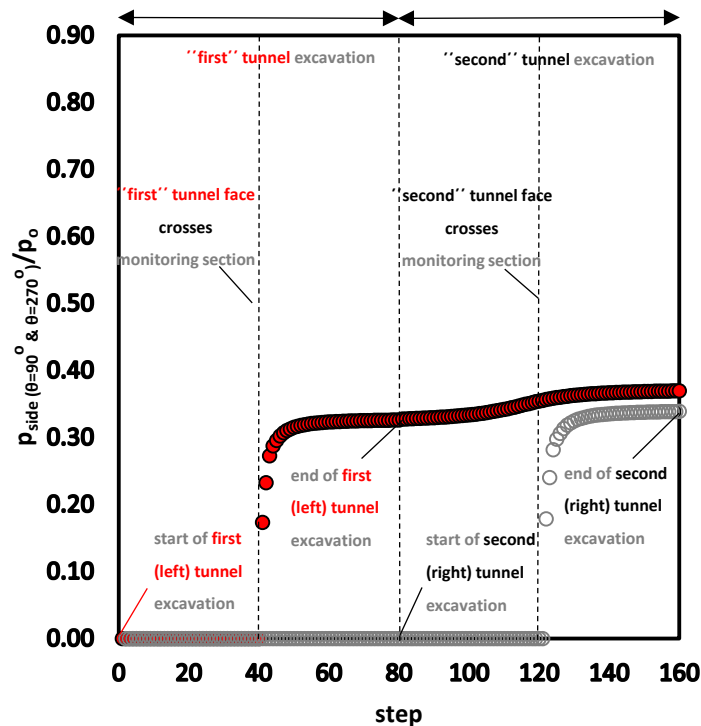
αυξάνονται, κάτι το οποίο απεικονίζεται με το άλμα που παρουσιάζεται στα διαγράμματα της «πρώτης» σήραγγας. Αυτό είναι ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα αλληλεπίδρασης των δύο κλάδων, καθώς εάν η απόσταση του πλάτους πυλώνα ήταν ικανοποιητικά μεγάλη το άλμα θα ήταν πολύ πιο μικρό και η μορφή της εξέλιξης των φορτίων θα ήταν ίδια για «πρώτη» και «δεύτερη» σήραγγα.

Σχετικά με την επιρροή του γεωλογικού σχηματισμού μέσα στον οποίο πραγματοποιείται η διάνοιξη της δίδυμης σήραγγας, πραγματοποιείται σύγκριση των παραπάνω γραφήματων. Το γράφημα 4.18 αναφέρεται στα φορτία που αναπύσσονται όταν οι δύο σήραγγες εκσκάπτονται σε πολύ πτωχής ποιότητας βραχώμαζα με $GSI=10$ και $\sigma_{cm}/p_o=0.22$, ενώ το γράφημα 4.19 αντιστοιχεί σε λίγο καλύτερης ποιότητας βραχώμαζα με $GSI=30$ και $\sigma_{cm}/p_o=0.46$. Οι διαφορές που εντοπίζονται είναι μεγάλες καθώς πολύ διαφορετικές είναι οι γεωτεχνικές παράμετροι των γεωλικών. Στην 1^η περίπτωση πρόκειται για μία χαόδη και διατμημένη βραχώμαζα που παρουσιάζει απόκριση παρόμοια με εκείνης ενός εδαφικού υλικού. Αυτό σημαίνει πως η διάνοιξη ενός οποιούδηποτε τεχνικού έργου σε τέτοιες γεωλογικές συνθήκες είναι επίφοβη καθώς όσο μειωμένη είναι η συνεκτικότητα των κόκκων του εδάφους ή των κρυστάλλων του βράχου τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα υπάρχει να προκύψει ροή / κατάρπωση γεωλικού και να εμφανιστούν μεγάλες συγκλίσεις και παραμορφώσεις. Για αυτό τον λόγο τα φορτία που δέχεται η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας λόγω αλληλεπίδρασης στην 1^η περίπτωση είναι έως και 34% αυξημένα σε σχέση με εκείνα που παρουσιάζονται αντίστοιχα στην 2^η περίπτωση όπου η εν λόγω αύξηση φτάνει το 22%. Μεταξύ των δύο περιπτώσεων τα μέγιστα φορτία που παρουσιάζονται έχουν διαφορά 30%. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, πόσο αρνητική επίδραση φέρουν οι άσχημες γεωλογικές συνθήκες στην κατασκευή μίας δίδυμης σήραγγας με κοντινή απόσταση των δύο κλάδων. Αντίθετα, σε ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες το φαινόμενο αλληλεπίδρασης μειώνεται αισθητά, τα φορτία της «πρώτης» σήραγγας στην περιοχή του άλματος δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη αύξηση και οι δύο κατανομές για «πρώτη» και «δεύτερη» σήραγγα μοιάζουν περισσότερο σχηματικά.

Ανάλογα είναι τα αποτελέσματα για την εξέλιξη των φορτίων που ασκούνται στην άμεση υποστήριξη των σήραγγων για τη δυσμενέστερη περιοχή περιμετρικά της εξεταζόμενης διατομής, δηλαδή για $\theta=90^\circ$ για «πρώτη» και $\theta=270^\circ$ για «δεύτερη» σήραγγα.



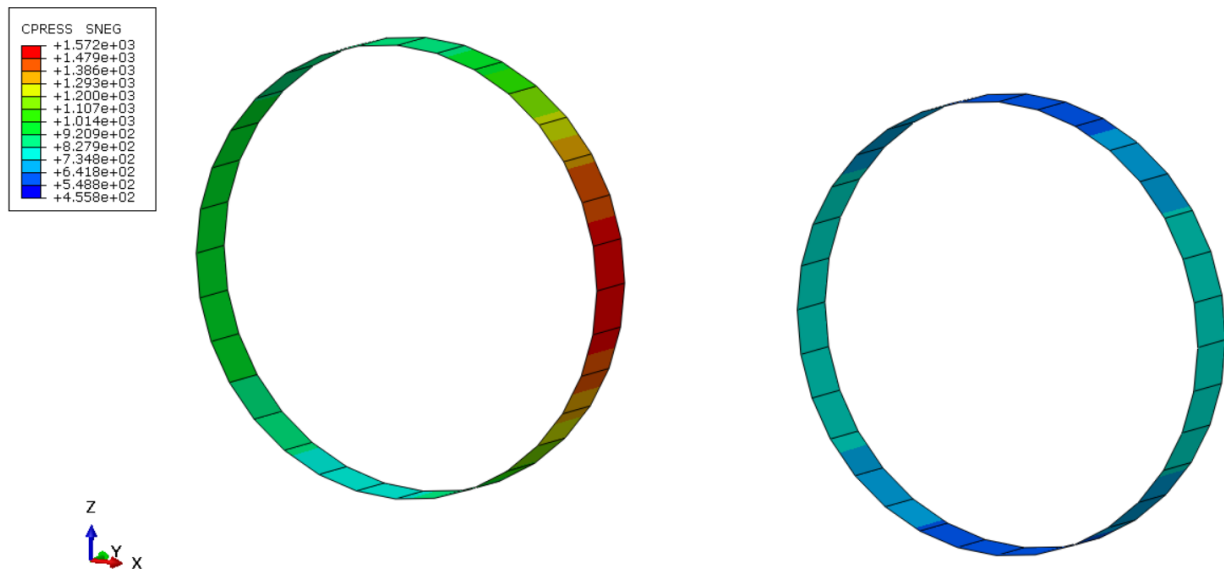
Γράφημα 4.20: Χρονοιστορία των κανονικοποιημένων φορτίων $p_{side} (\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ) / p_o$ επί των εσωτερικών παρειών στην άμεση υποστήριξη συναρτήσεσι του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκουσ άξονα των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/p_o=0.22$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$



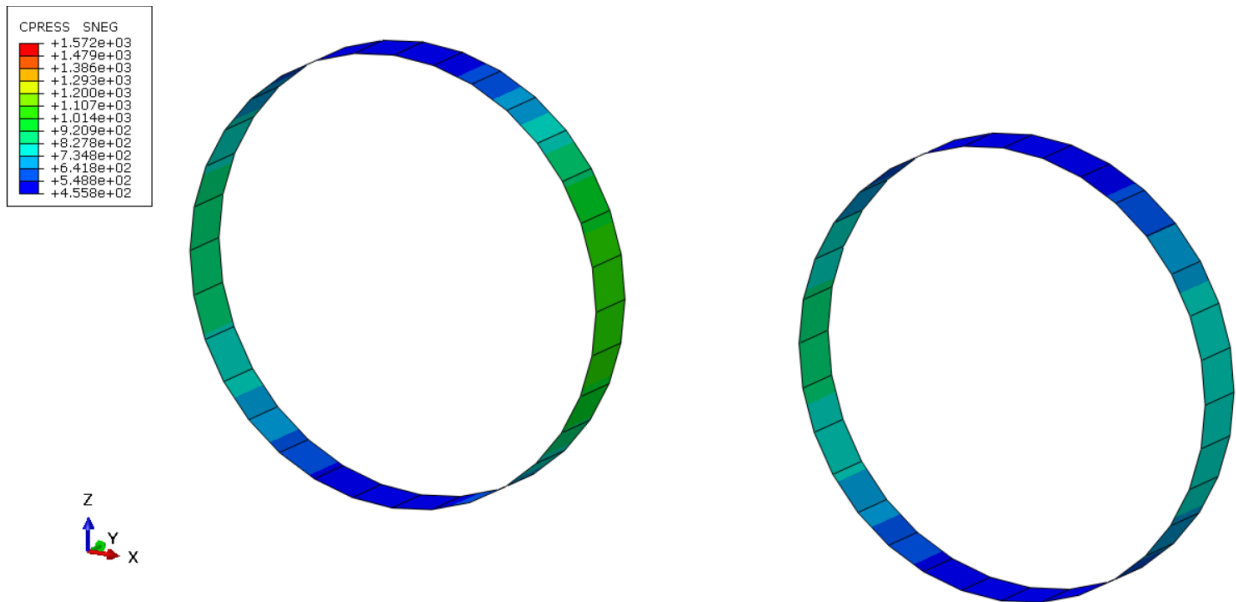
Γράφημα 4.21: Χρονοιστορία των κανονικοποιημένων φορτίων $p_{side} (\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ) / p_o$ επί των εσωτερικών παρειών στην άμεση υποστήριξη συναρτήσεσι του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκουσ άξονα των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/p_o=0.46$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$

Τα παραπάνω γραφήματα ερμηνεύονται με τον ίδιο τρόπο που αναλύθηκε και για τα γραφήματα 4.18 και 4.19, μόνο που εστιάζουν στην ανάπτυξη των φορτίων για τις θέσεις των παρειών που γειτνιάζουν με το πλάτος πυλώνα. Εδώ οι τιμές των φορτίων είναι ιδιαίτερα αυξημένες σε σχέση με το $p_{average}$ που αναφέρθηκε παραπάνω, γεγονός που αποδεικνύει πόσο δυσμενείς είναι αυτές οι περιοχές. Όπως πριν έτσι και εδώ το άλμα που παρουσιάζεται στην «πρώτη» σήραγγα είναι αισθητά μεγάλο για τις άσχημες γεωλογικές συνθήκες, ενώ για τη βραχώμαζα που έχει $GSI=30$ η κατανομή των φορτίων για τις δύο σήραγγες είναι σχεδόν οριζόντιες από τη στιγμή που το μέτωπο εκσκαφής φτάνει στην επιλεγμένη διατομή ($Y=40m$) και οι τιμές για «πρώτη» και «δεύτερη» σήραγγα σχεδόν συγκλίνουν. Επομένως, ακόμα και όταν το πλάτος πυλώνα είναι μικρό όπως εδώ, η γεωλογία στην οποία εκσκάπτονται οι διατομές παίζει καθοριστικό ρόλο στον βαθμό της αλληλεπίδρασης.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι αντίστοιχες εικόνες που περιγράφουν χρωματικά την κατανομή των πιέσεων περιμετρικά της υποστήριξης μίας τυπικής διατομής για τους δύο γεωλογικούς σχηματισμούς που εξετάζονται όταν το πλάτος πυλώνα είναι $W=0.5D=4m$.



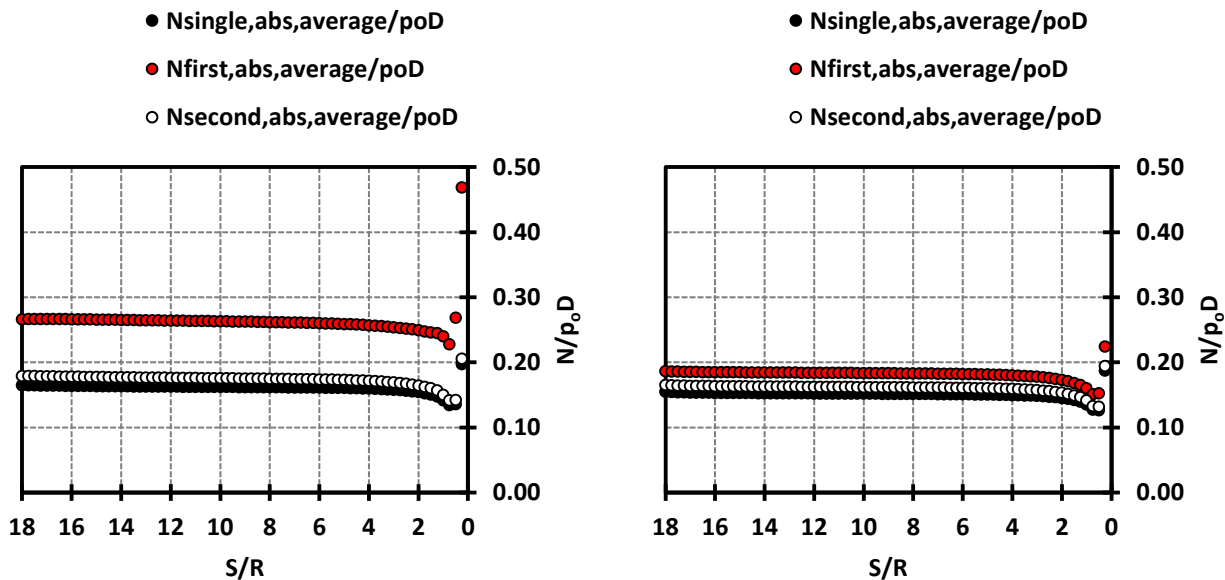
Εικόνα 4.10: Κατανομή των φορτίων περιμετρικά της υποστήριξης της «πρώτης» (αριστερά) και «δεύτερης» (δεξιά) σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής και των δύο κλάδων (STEP 160) για εφαρμογή πλάτους πυλώνα $W=0.5D=4m$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o=0.22$)



Εικόνα 4.11: Κατανομή των φορτίων περιμετρικά της υποστήριξης της «πρώτης» (αριστερά) και «δεύτερης» (δεξιά) σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής και των δύο κλάδων (STEP 160) για εφαρμογή πλάτους πυλώνα $W=0.5D=4m$ σε ευμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$)

4.3.2. Αξονικές δυνάμεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (N)

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται τα διαγράμματα που αναφέρονται στις αξονικές δυνάμεις που δέχεται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα των σηράγγων για το μικρότερο πλάτος πυλώνα ($W=0.5D=4m$) όταν οι εκσκαφές πραγματοποιούνται στη βραχώμαζα N^ο 2 με $GSI=10$ και $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$ και όταν πραγματοποιούνται στη βραχώμαζα N^ο 18 με $GSI=30$ και $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$.

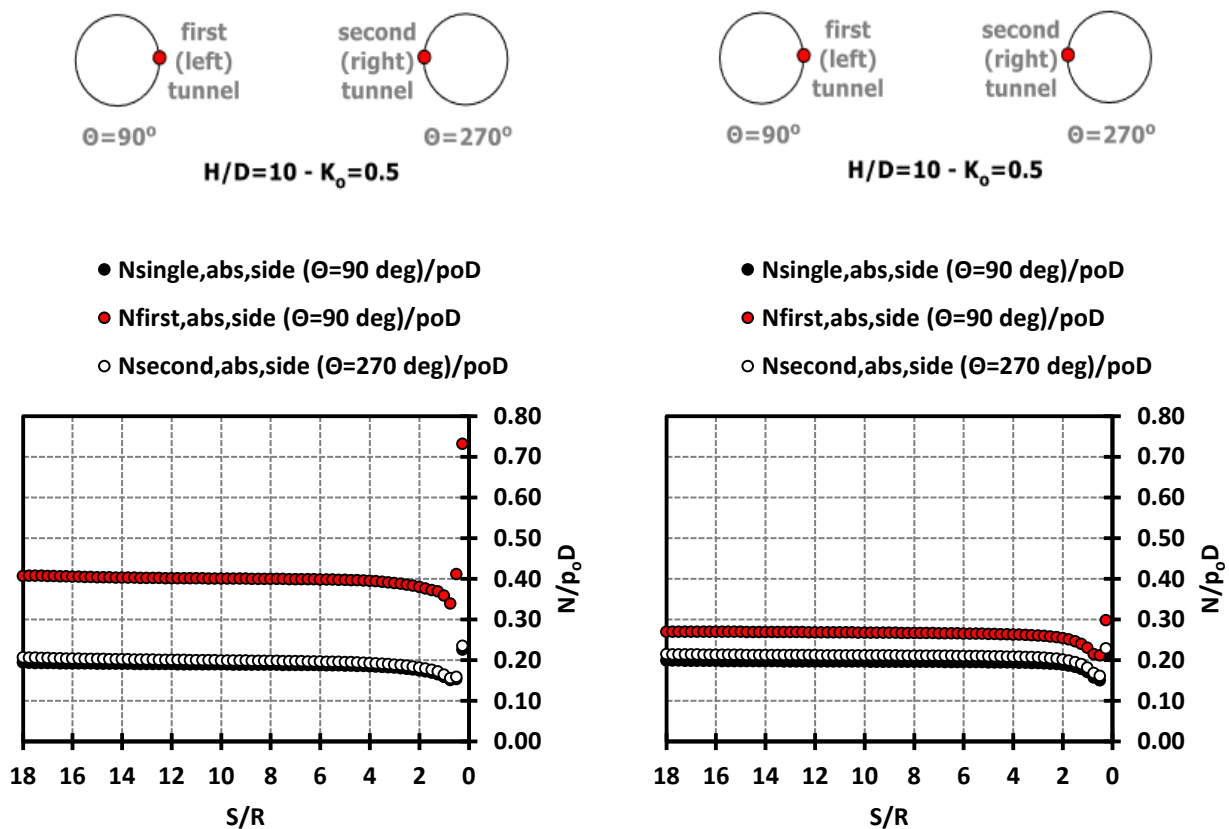


Γράφημα 4.22: Κατανομή της κατ'απόλυτη τιμή μέσης ανηγμένης αξονικής δύναμης επί της άμεσης υποστήριξης ($N_{obs,average}/\rho_oD$) συναρτήσεως του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$

Η κατανομή των αξονικών δυνάμεων είναι αντίστοιχη με εκείνη των φορτίων. Οι δυνάμεις που ασκούνται στο κέλυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι αρχικά 0 πολύ κοντά στο μέτωπο και αρχίζουν να αυξάνονται σταδιακά με την εκσκαφή του υλικού και την τοποθέτηση της υποστήριξης. Σταθεροποιούνται σε απόσταση μίας διαμέτρου ($S/R=2$) λόγω της ενεργοποίησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που αντιστέκεται στις συγκλίσεις της περιβάλλουσας βραχόμαζας. Επιπλέον, η «πρώτη» σήραγγα αποκρίνεται δυσμενώς σε σχέση με τις άλλες δύο λόγω της αλληλεπίδρασης που υφίσταται από τη διάνοιξη της «δεύτερης».

Παρατηρείται ότι οι τιμές τους διαφέρουν λόγω διαφοράς του περιβάλλοντος γεωυλικού. Στην περίπτωση που το $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$ οι τιμές της «πρώτης» σήραγγας αυξάνονται κατά 40%, ενώ στην περίπτωση που το $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$ οι τιμές της «πρώτης» σήραγγας αυξάνονται κατά 20%. Συγκεκριμένα στην 2^η περίπτωση που εξετάζεται, οι τιμές της «πρώτης» σήραγγας συγκλίνουν πολύ με τις τιμές που αντιστοιχούν στην «μονή» και «δεύτερη» σήραγγα, γεγονός ενδεικτικό της εξάλειψης του φαινομένου αλληλεπίδρασης για ευμενείς γεωλογικές συνθήκες.

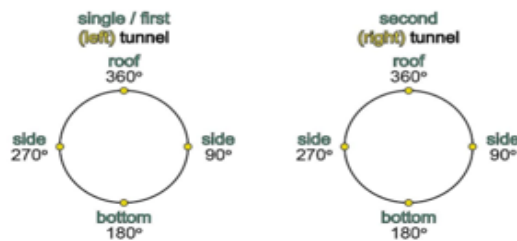
Ανάλογα αποτελέσματα εμφανίζονται και στις εσωτερικές παρειές των κλάδων που συνορεύουν σύμφωνα με το παρακάτω γράφημα.



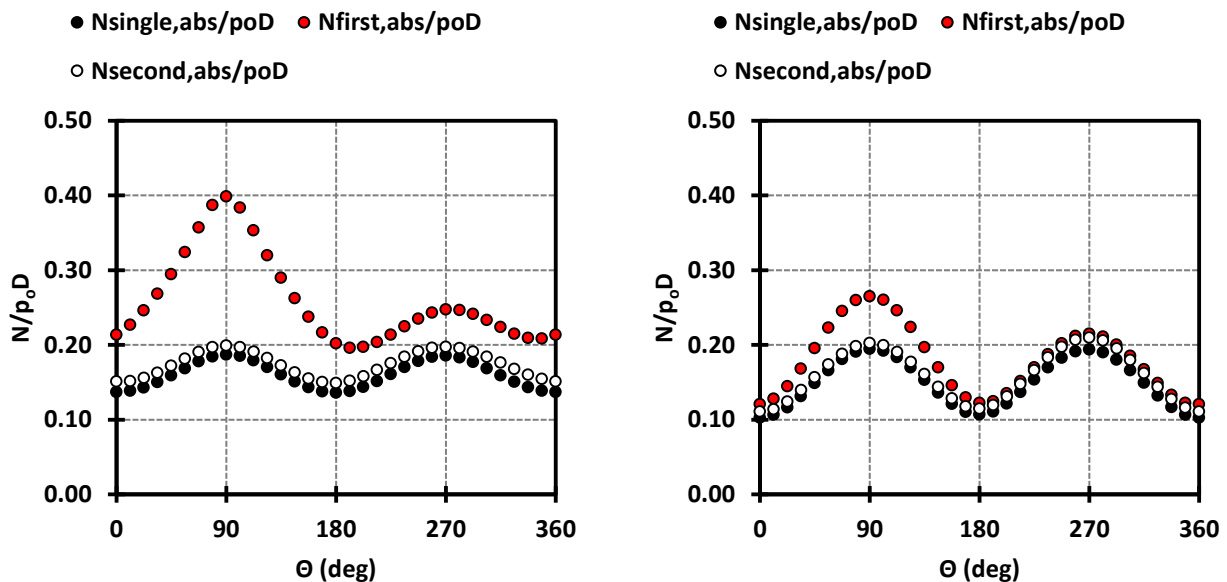
Γράφημα 4.23 Κατανομή της κατ' απόλυτη τιμή ανηγμένης αξονικής δύναμης $N_{abs,side}(\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ)/\rho_o$ επί των εσωτερικών παρειών συναρτήσεσι του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκουσ άξονα των σήραγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$

Τα αποτελέσματα είναι αντίστοιχα με τα παραπάνω με μία διαφοροποίηση στην τάξη μεγέθους των τιμών λόγω πυκνότητας των τάσεων στην περιοχή κοντά στον πυλώνα εξ'αιτίας της αλληλεπίδρασης των δύο σηράγγων. Οι αξονικές δυνάμεις που ασκούνται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην θέση της εσωτερικής παρειάς για την «πρώτη» σήραγγα όταν εκείνη εκσκάπτεται σε βραχώμαζα με $GSI=10$, είναι αυξημένες κατά 50%. Αντίστοιχα για γεωλογικό σχηματισμό με $GSI=30$ είναι αυξημένες κατά 25%. Πρόκειται για σημαντική διαφοροποίηση και αποδεικνύεται ακόμα μία φορά ότι η διάνοιξη δίδυμης σήραγγας ενδείκνυται να πραγματοποιηθεί στη βραχώμαζα με $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$.

Τέλος, για καλύτερη κατανόηση της ανάπτυξης αξονικών δυνάμεων στο σύνολο της περιμέτρου παρουσιάζονται τα διαγράμματα κατανομής τους συναρτήσει της γωνίας $\theta(^{\circ})$ που ορίζει τις θέσεις των περιοχών εν διατομή για τις δύο γεωτεχνικές συνθήκες που εξετάζονται στο μικρότερο πλάτος πυλώνα. Εντοπίζεται με αυτό τον τρόπο και η έντονη διαφοροποίηση που επικρατεί στις εσωτερικές παρειές συγκριτικά με την περιοχή της στέψης, του πυθμένα και της εξωτερικής παρειάς των σηράγγων.



Σχήμα 4.6: Τυπική διατομή των σηράγγων και προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (single / first - (left) – tunnel) και της δεξιάς σήραγγας (second – (right) – tunnel), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού

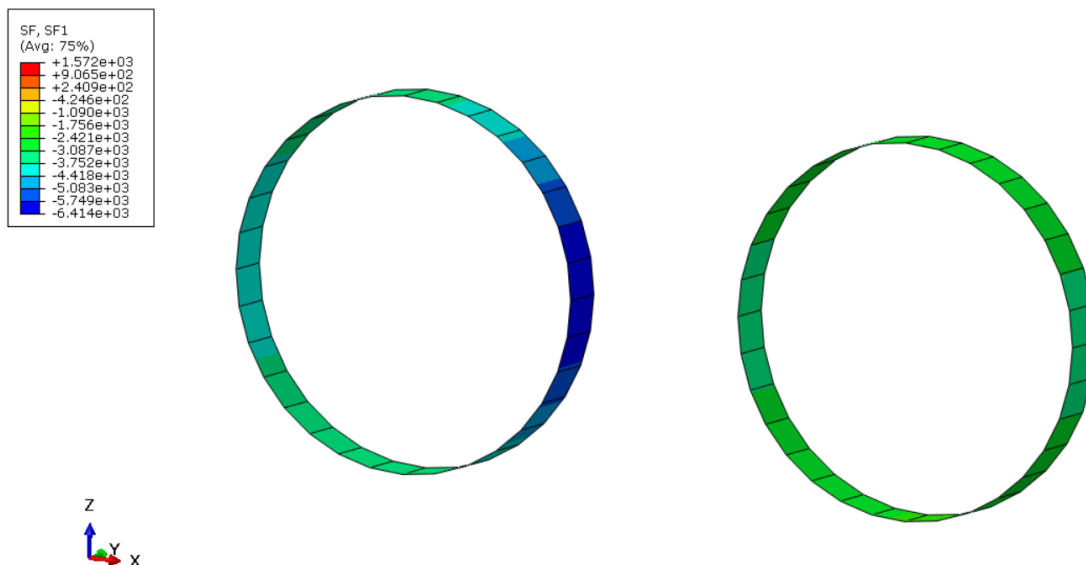


Γράφημα 4.24: Κατανομή της κατ'απόλυτη τιμή ανηγμένης αξονικής δύναμης N_{abs}/ρ_oD , συναρτήσει της γωνίας θ που εκφράζει τις περιοχές περιμετρικά της τυπικής διατομής των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$

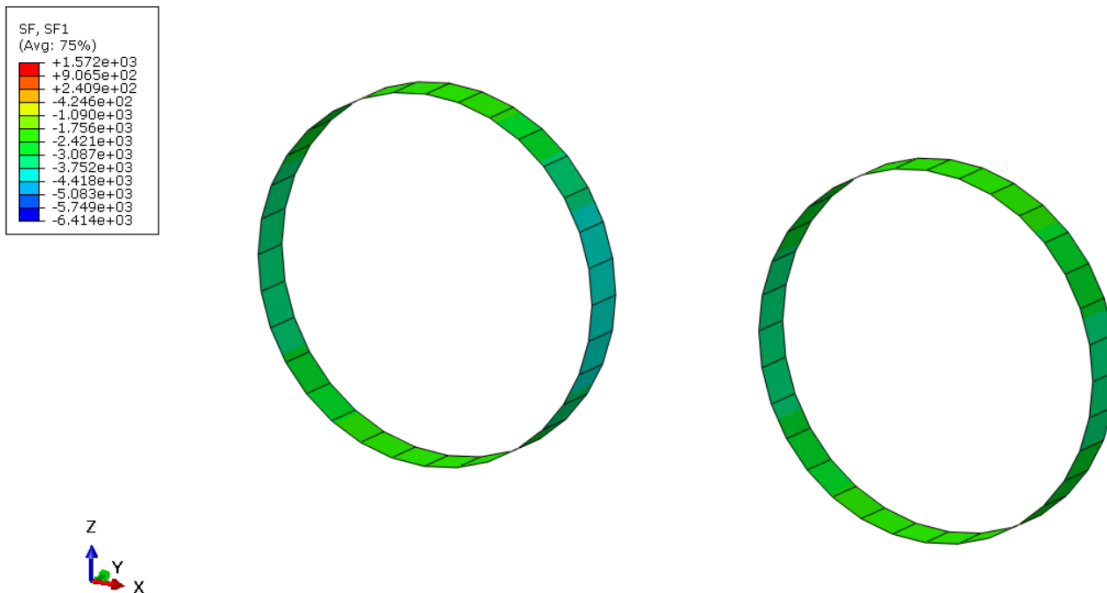
Συγκρίνοντας τις τιμές των αξονικών ανά γωνία θ περιμετρικά των διατομών, είναι διακριτή η αρνητική επίδραση που προκαλεί η εκσκαφή της «δεύτερης» σήραγγας στην «πρώτη» λόγω της εφαρμογής μικρού πλάτους πυλώνα και για τις δύο περιπτώσεις των γεωλογικών σχηματισμών. Ενώ οι καμπύλες της «μονής» και «δεύτερης» σήραγγας συγκλίνουν και παρουσιάζονται συμμετρικές και στις δύο υπό εξέταση περιπτώσεις, η αντίστοιχη καμπύλη της «πρώτης» σήραγγας και στα δύο διαγράμματα είναι ασύμμετρη με τις μέγιστες τιμές να εμφανίζονται στη θέση $\theta=90^\circ$ που αντιπροσωπεύει την πλευρά της σήραγγας που γειτνιάζει με το πλάτος πυλώνα.

Διαφορά εντοπίζεται στην απόκριση της «πρώτης» σήραγγας λόγω της μείωσης του φαινομένου της αλληλεπίδρασης για τη βραχόμαζα με $\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$ και $GSI=30$. Συγκεκριμένα στη θέση που εξετάζεται ($\theta=90^\circ$), η αύξηση των αξονικών της «πρώτης» σήραγγας λόγω αλληλεπίδρασης είναι της τάξης του 50% για την χειρότερης ποιότητας βραχόμαζα, ενώ η αντίστοιχη αύξηση για την καλύτερης ποιότητας βραχόμαζα φτάνει το 25%, όπως έχει παρατηρηθεί δηλαδή και από το γράφημα 4.23. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως η «πρώτη» σήραγγα αποκλίνει από τη «μονή» και τη «δεύτερη» και στις άλλες γωνίες θ στο διάγραμμα αριστερά, ενώ στο διάγραμμα δεξιά οι τιμές τους συγκλίνουν σε όλες τις περιοχές πλην της εσωτερικής παρειάς. Αυτό υποδηλώνει πόσο πιο ευνοικά είναι τα αποτελέσματα που προκύπτουν όταν η εκσκαφή της δίδυμης σήραγγας πραγματοποιείται στο γεωλογικό σχηματισμό με $GSI=30$ και πόσο λιγότερο επηρεάζει η διάνοιξη του δεύτερου κλάδου τον πρώτο αν και η απόσταση μεταξύ τους είναι αρκετά μικρή.

Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζεται χρωματικά η απόκριση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μίας τυπικής διατομής των σηράγγων σε όρους αξονικών δυνάμεων για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις όταν εφαρμόζεται το μικρότερο πλάτος πυλώνα.



Εικόνα 4.12: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων περιμετρικά της υποστήριξης της «πρώτης» (αριστερά) και «δεύτερης» (δεξιά) σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής και των δύο κλάδων (STEP 160) για εφαρμογή πλάτους πυλώνα $W=0.5D=4m$ σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$)



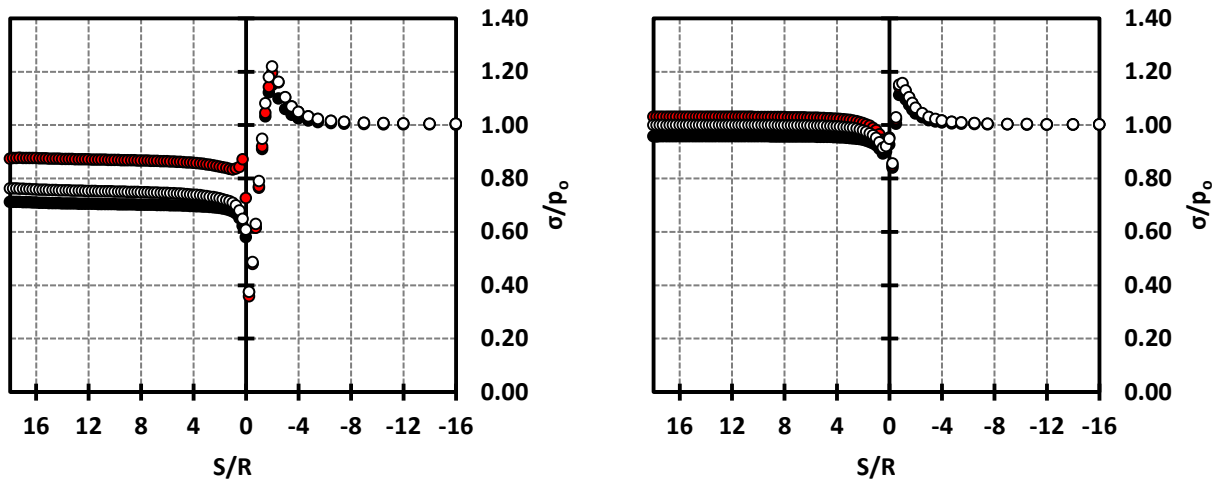
Εικόνα 4.13: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων περιμετρικά της υποστήριξης της «πρώτης» (αριστερά) και «δεύτερης» (δεξιά) σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής και των δύο κλάδων (STEP 160) για εφαρμογή πλάτους πυλώνα $W=0.5D=4m$ σε ευμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$)

4.3.3. Κύριες τάσεις των στοιχείων της βραχομάζας (σ_1, σ_3)

Όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 4.2.3., η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια τάση του εδάφους είναι η σ_1 και η σ_3 αντίστοιχα και πριν την εκσκαφή η σ_1 ισοδυναμεί με την κατακόρυφη γεωστατική τάση και είναι $\sigma_1 = \rho_o \gamma H$, ενώ η σ_3 ισοδυναμεί με την οριζόντια γεωστατική τάση η οποία για $K_o=0.5$ είναι $\sigma_3 = 0.5 \rho_o \gamma H$. Μετά την εκσκαφή μειώνονται οι τιμές των κύριων τάσεων λόγω αφαίρεσης υλικού και η διεύθυνσή τους είναι ακαθόριστη, δε γνωρίζουμε εάν η σ_1 παραμένει κατακόρυφη και η σ_3 οριζόντια. Στα γραφήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή των κύριων τάσεων μηκοτομικά συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης από το μέτωπο (S/R) και περιμετρικά της τυπικής διατομής των σηράγγων με στόχο τον προσδιορισμό της απόκρισης των στοιχείων της βραχομάζας όταν οι δύο κλάδοι διανοίγονται σε πολύ κοντινή απόσταση σε μία πολύ χαώδη βραχομάζα με χαμηλές γεωτεχνικές παραμέτρους και σε μία λίγο καλύτερης ποιότητας βραχομάζα με πιο καλές γεωτεχνικές παραμέτρους. Συγκεκριμένα επιλέγονται προς ανάλυση η βραχομάζα N^ο 2 και N^ο 18 για το ίδιο πλάτος πυλώνα ($W=0.5D=4m$), όπως και στα προηγούμενα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν.

● $\sigma_{1, \text{single, average}} / \rho_0$ ● $\sigma_{1, \text{first, average}} / \rho_0$
○ $\sigma_{1, \text{second, average}} / \rho_0$

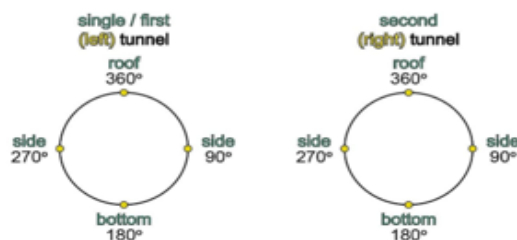
● $\sigma_{1, \text{single, average}} / \rho_0$ ● $\sigma_{1, \text{first, average}} / \rho_0$
○ $\sigma_{1, \text{second, average}} / \rho_0$



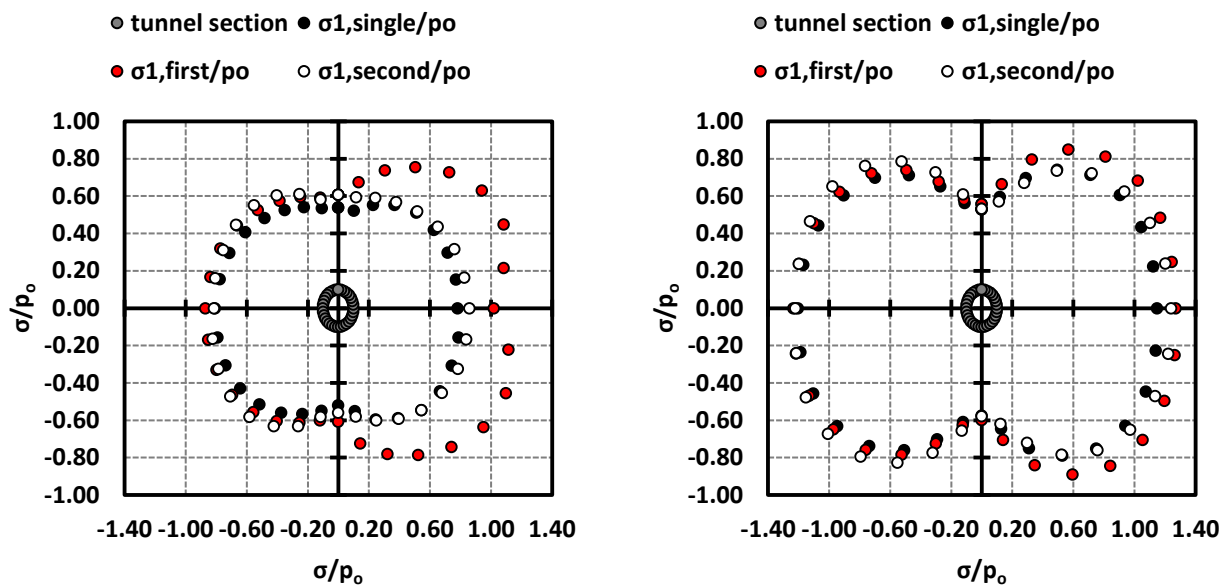
Γράφημα 4.25: Κατανομή της ανηγμένης μέσης μέγιστης κύριας τάσης ($\sigma_{1, \text{average}} / \rho_0$) των στοιχείων που περιβάλλουν τις διατομές των σηράγγων συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκους άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm} / \rho_0 = 0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm} / \rho_0 = 0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4\text{m}$

Όσον αφορά την ερμηνεία των παραπάνω διαγραμμάτων, οι μέγιστες κύριες τάσεις των στοιχείων της βραχώμαζας ισοδυναμούν με ρ_0 σε περιοχή που δεν έχει διανοιχτεί ακόμα και βρίσκεται αρκετά απομακρυσμένα από το μέτωπο ($S/R < 0$). Η περιοχή που βρίσκεται λίγο πιο μετά από το μέτωπο ($S/R = -2$) παρουσιάζει μία μικρή απότομη αύξηση στις τάσεις, πιθανόν λόγω της διαταραχής που υφίσταται η περιοχή που προηγείται και βρίσκεται υπό εκσκαφή. Αμέσως μετά στη θέση του μετώπου οι τάσεις μειώνονται αρκετά λόγω αφαίρεσης υλικού, μέχρι που σταθεροποιούνται σε μία συγκεκριμένη τιμή σε απόσταση $S/R = 2$ (μίας διαμέτρου) από το μέτωπο λόγω της παρουσίας του εκτοξευόμενου σκυρόδεματος που τοποθετείται και σταδιακά ισορροπεί με το γεωυλικό που το περιβάλλει.

Σχετικά με τις τιμές των αποτελεσμάτων, παρατηρείται αρχικά πως και στην περίπτωση των τάσεων τα στοιχεία που περιβάλλουν την «πρώτη» σήραγγα επηρεάζονται αρκετά από την διάνοιξη του δεξιού κλάδου. Αυτό γίνεται αντιληπτό από την καμπύλη κατανομής των τάσεων που αναφέρονται στην «πρώτη» σήραγγα η οποία αποκλίνει αρκετά από τις αντίστοιχες καμπύλες κατανομής της «μονής» και «δεύτερης» σήραγγας, ιδιαίτερα όταν οι γεωτεχνικές συνθήκες είναι τόσο δυσμενείς όσο στην 1^η περίπτωση. Στην 2^η περίπτωση οι καμπύλες σχεδόν συγκλίνουν μεταξύ τους, κάτι που αποδεικνύει την ανθεκτικότητα της βραχώμαζας με $GSI = 30$ στη διάνοιξη δίδυμης σήραγγας εφαρμόζοντας μικρό πλάτος πυλώνα.



Σχήμα 4.7: Τυπική διατομή των σηράγγων και προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (single / first - (left) - tunnel) και της δεξιάς σήραγγας (second - (right) - tunnel), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού



Γράφημα 4.26: Κατανομή της κανονικοποιημένης μέγιστης κύριας τάσης σ_1/ρ_0 , περιμετρικά της τυπικής διατομής των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_0=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/\rho_0=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ και για μικρό πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$

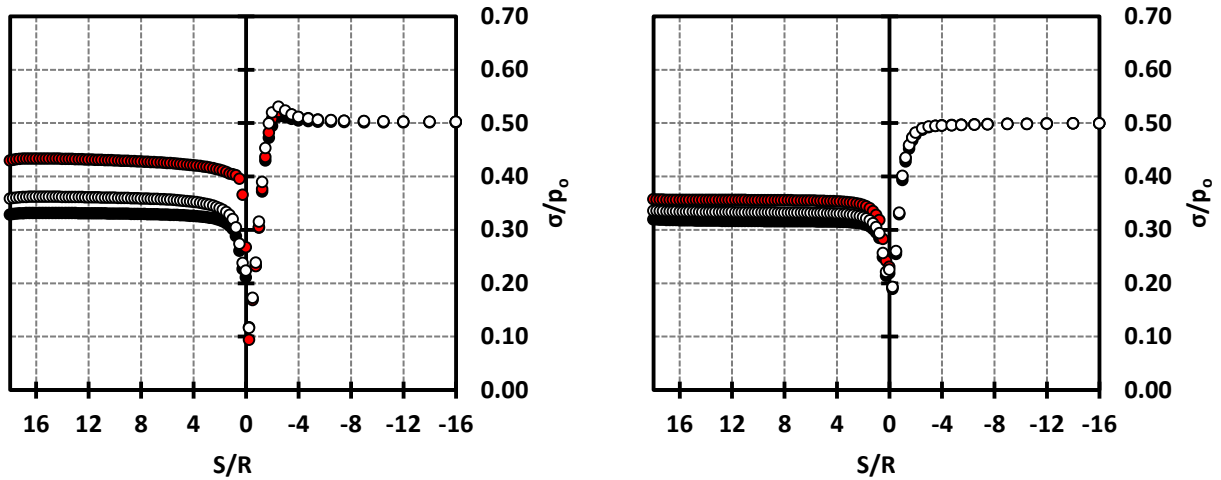
Παρατηρείται στο παραπάνω γράφημα ότι οι μέγιστες κύριες τάσεις σ_1 αυξάνονται κυρίως στην περιοχή που γειτνιάζει η «πρώτη» σήραγγα με τη «δεύτερη», δηλαδή για $\theta=0\sim 180^\circ$. Οι κατανομές της «μονής» και δεύτερης» είναι συμμετρικές και ομοιόμορφες μεταξύ των περιοχών περιμετρικά των διατομών και δεν παρατηρείται κάποια αύξηση στην εσωτερική παρειά, γεγονός που υποδηλώνει και πάλι το βαθμό επίδρασης του φαινομένου αλληλεπίδρασης στην «πρώτη» μόνο σήραγγα.

Διαφοροποίηση μεταξύ των δύο γραφημάτων εμφανίζεται στο βαθμό απόκλισης της «πρώτης» σήραγγας σε σχέση με τις καμπύλες που αναφέρονται στις άλλες δύο. Στην 1^η περίπτωση όπου η βραχόμαζα συμπεριφέρεται ουσιαστικά ως εδαφικό υλικό η αλληλεπίδραση είναι πιο έντονη και γ' αυτό το λόγο οι καμπύλες αποκλίνουν μεταξύ τους. Στην 2^η περίπτωση, όμως, όπου πρόκειται για βραχόμαζα με καλύτερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά η απόκλιση είναι μικρή, σχεδόν αμελητέα. Επομένως, οι γεωλογικές συνθήκες εμφανίζουν μεγάλη επιρροή στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης ανεξαρτήτως πλάτους πυλώνα. Εννοείται, φυσικά, πως για ανθεκτικές βραχόμαζες με υψηλές τιμές γωνίας τριβής και συνοχής και για μεγαλύτερα πλάτη πυλώνα τα αποτελέσματα θα είναι ακόμα πιο μικρά και οι καμπύλες μεταξύ των σηράγγων σχεδόν θα ταυτίζονται.

Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και για τις ελάχιστες κύριες τάσεις (σ_3), μόνο που οι τιμές των τάσεων κατ' απόλυτη τιμή είναι μικρότερες από αυτές που παρατηρήθηκαν στην περίπτωση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 .

● $\sigma_3, \text{single, average} / \rho_0$ ● $\sigma_3, \text{first, average} / \rho_0$
○ $\sigma_3, \text{second, average} / \rho_0$

● $\sigma_3, \text{single, average} / \rho_0$ ● $\sigma_3, \text{first, average} / \rho_0$
○ $\sigma_3, \text{second, average} / \rho_0$

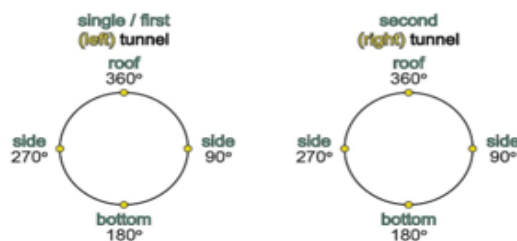


Γράφημα 4.27: Κατανομή της ανηγμένης μέσης ελάχιστης κύριας τάσης ($\sigma_{3, \text{average}} / \rho_0$) των στοιχείων που περιβάλλουν τις διατομές των σηράγγων συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκους άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm} / \rho_0 = 0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm} / \rho_0 = 0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4\text{m}$

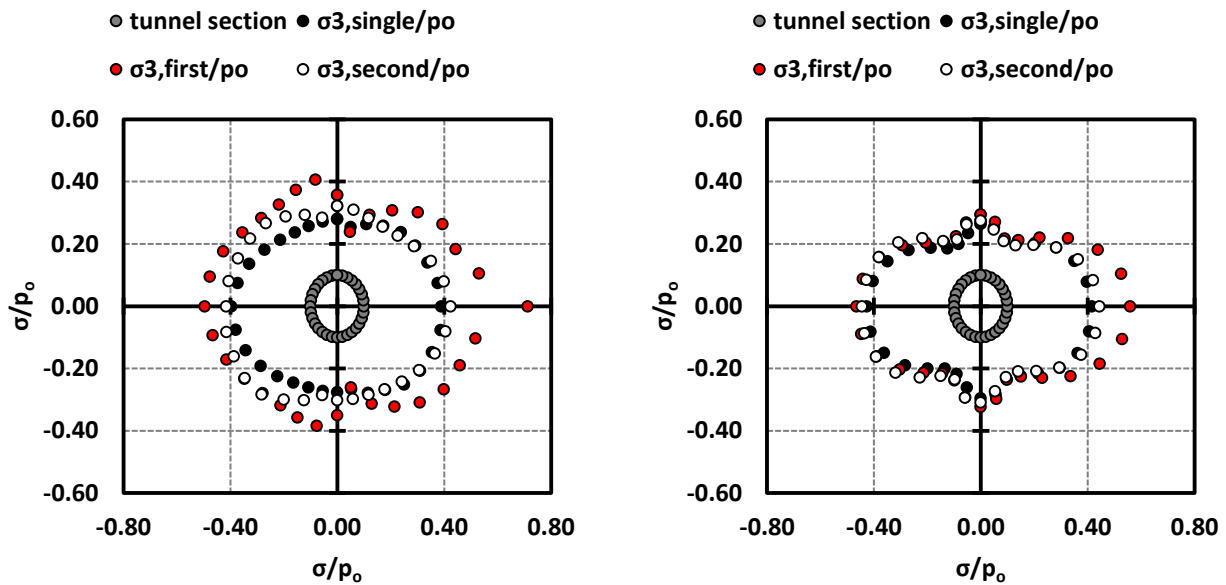
Εμφανίζεται αντίστοιχη απόκριση με εκείνη του γραφήματος 4.25, με τη διαφορά ότι στην περίπτωση της ελάχιστης κύριας τάσης η αρχική κατάσταση αντιστοιχεί στην $\sigma_3 = 0.5\rho_0$. Όπως και πριν οι τάσεις στο κομμάτι που δεν έχει διανοιχθεί και βρίσκεται πολύ κοντά στο μέτωπο αυξάνονται απότομα λόγω διαταραχής, στη συνέχεια μειώνονται στη θέση του μετώπου λόγω αποσυμπίεσης και στο τέλος σε απόσταση περίπου μίας διαμέτρου ($S/R = 2$) σταθεροποιούνται σε μία τιμή.

Επιπλέον, τα στοιχεία που περιβάλλουν την «πρώτη» σήραγγα επηρεάζονται πολύ κατά τη διάρκεια εκκαφής της δεξιάς σήραγγας, εξού και η απόκλιση που εντοπίζεται μεταξύ «πρώτης» και «μονής/δεύτερης» σήραγγας. Βέβαια, η εν λόγω απόκλιση είναι μεγαλύτερη στη βραχόμαζα Ν^ο 2 απ’ότι στη βραχόμαζα Ν^ο 18, που σημαίνει πως όσο βελτιώνονται οι γεωτεχνικές συνθήκες τόσο οι διπλάνες σήραγγες μπορούν να μελετηθούν ως ανεξάρτητες κατασκευές.

Επιπρόσθετα, παρατίθενται τα διαγράμματα κατανομής των ελάχιστων τάσεων που αναπτύσσονται περιμετρικά των διατομών στα στοιχεία που περιβάλλουν τις σήραγγες για το μικρότερο πλάτος πυλώνα ($W = 0.5D = 4\text{m}$) στις δύο περιπτώσεις γεωλογικών σχηματισμών.



Σχήμα 4.8: Τυπική διατομή των σηράγγων και προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (single / first - (left) – tunnel) και της δεξιάς σήραγγας (second – (right) – tunnel), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού



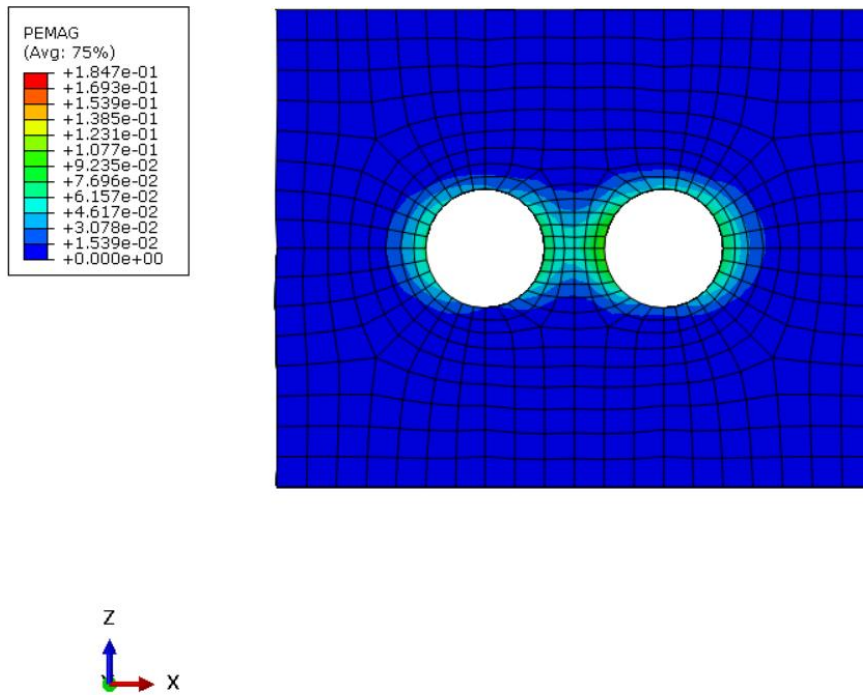
Γράφημα 4.28: Κατανομή της κανονικοποιημένης ελάχιστης κύριας τάσης σ_3/ρ_0 , περιμετρικά της τυπικής διατομής των σήραγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με γεωτεχνικές συνθήκες $\sigma_{cm}/\rho_0=0.22$ (αριστερά) και $\sigma_{cm}/\rho_0=0.46$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ και για μικρό πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$

Μεγάλη ανομοιομορφία και ασυμμετρία παρατηρείται στις κατανομές των ελάχιστων κύριων τάσεων που αναπτύσσονται περιμετρικά των διατομών, σε αντίθεση με τις μέγιστες κύριες τάσεις όπου υπήρχε παντού συμμετρία πλην της περιοχής της «πρώτης» σήραγγας που γειτνιάζει με το πλάτος πυλώνα.

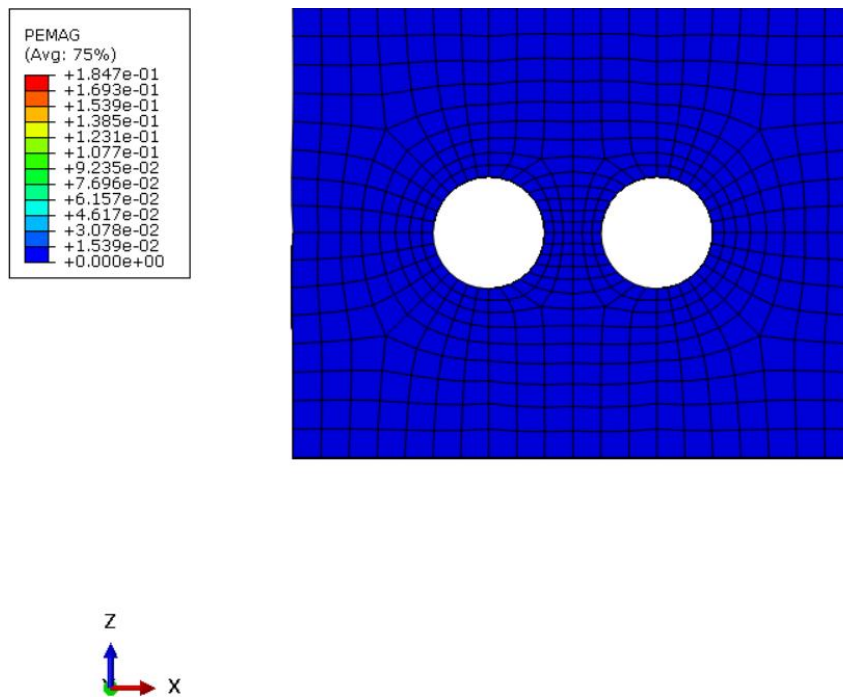
Επιπρόσθετα, μείωση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης εντοπίζεται και εδώ στο διάγραμμα που αντιστοιχεί στην βραχόμαζα με $\sigma_{cm}/\rho_0=0.46$, κάτι το οποίο φαίνεται από την μεγαλύτερη σύγκλιση που παρουσιάζουν οι κατανομές περιμετρικά μεταξύ τους.

Γενικά, λοιπόν, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η γεωλογία της περιοχής στην οποία γίνεται η διάνοιξη ενός τεχνικού έργου παίζει ουσιαστικό ρόλο και στην απόκριση του γεωυλικού που το περιβάλλει και στην απόκριση της κατασκευής. Μάλιστα, στην περίπτωση δίδυμης σήραγγας διακρίνουμε ότι ακόμα και στην περίπτωση που το πλάτος πυλώνα που μεσολαβεί μεταξύ των δύο κλάδων είναι πολύ μικρό, η αλληλεπίδραση είναι σημαντικά μειωμένη λόγω καλής γεωτεχνικής συμπεριφοράς. Άρα τίθεται δίλημμα κατασκευής δίδυμης σήραγγας με τα συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που εξετάζονται μόνο κυρίως σε πολύ άσχημες γεωτεχνικές συνθήκες.

Παρακάτω παρατίθενται εικόνες από το πρόγραμμα Abaqus για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων. Οι εικόνες αναφέρονται πάλι σε όρους πλαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται περιμετρικά της μονής και δίδυμης σήραγγας για το μικρότερο πλάτος πυλώνα ($W=0.5D=4m$) και για τους δύο γεωλογικούς σχηματισμούς που εξετάζονται σε αυτή την ενότητα.



Εικόνα 4.14: Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων περιμετρικά της δίδυμης σήραγγας σε μία τυπική διατομή στη θέση $Y=40m$ όταν ολοκληρώνεται η εκσκαφή και των δύο κλάδων (STEP 160) για δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$) και όταν εφαρμόζεται το μικρότερο πλάτος πυλώνα ($W=0.5D=4m$)



Εικόνα 4.15: Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων περιμετρικά της δίδυμης σήραγγας σε μία τυπική διατομή στη θέση $Y=40m$ όταν ολοκληρώνεται η εκσκαφή και των δύο κλάδων (STEP 160) για ευμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.46$) και όταν εφαρμόζεται το μικρότερο πλάτος πυλώνα ($W=0.5D=4m$)

Συμπεραίνουμε ότι η αλληλεπίδραση των σήραγγων είναι πολύ εντονή στην περίπτωση διάνοιξης της δίδυμης σήραγγας στη βραχόμαζα με $\sigma_{cm}/\rho_o=0.22$ εφόσον τα στοιχεία που πλαστικοποιούνται ειδικά στη θέση των εσωτερικών παρειών είναι εμφανώς περισσότερα λόγω χαμηλής αντοχής του

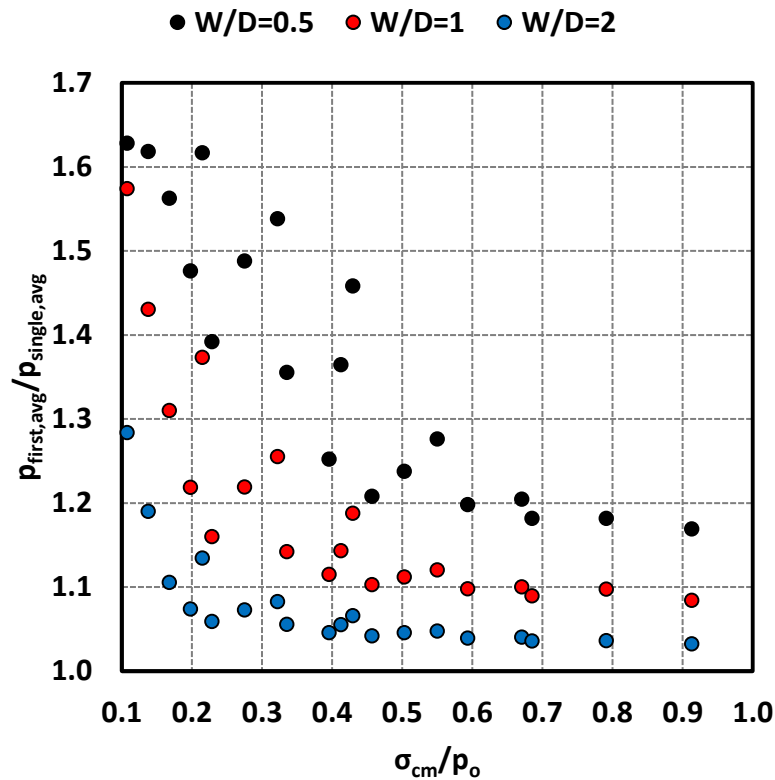
γεωυλικού περιβάλλοντος. Αντίθετα, για βελτιωμένη γεωλογία περιβάλλοντος τα πλαστικοποιημένα στοιχεία είναι λιγότερα και παρά την εφαρμογή ενός τόσο μικρού πλάτους πυλώνα οι δύο κλάδοι μπορούν να μελετηθούν ως δύο ανεξάρτητες κατασκευές.

4.4. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή συνοψίζονται όλα τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από όλες τις αναλύσεις που εκτελέστηκαν στο λογισμικό πρόγραμμα του Abaqus. Συγκεκριμένα, παρατίθενται σε διαγράμματα και πίνακες οι τιμές των φορτίων (p) και οι τιμές των αξονικών δυνάμεων (N) που δρουν στο κέλυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για τις 20 διαφορετικές γεωτεχνικές συνθήκες και για τα τρία διαφορετικά πλάτη πυλώνα που εξετάζονται όταν ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων είναι $K_0=0.5$ και το ύψος υπερκείμενων $H=10D=80m$. Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, παρουσιάζεται ο λόγος των παραπάνω τιμών με τον αριθμητή να αναφέρεται στην απόκριση της «πρώτης» σήραγγας και τον παρονομαστή στην απόκριση της «μονής». Αυτό σημαίνει πως όσο μεγαλύτερος της μονάδας είναι ο κάθε λόγος, τόσο πιο αρνητικά αποτελέσματα επιφέρει η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο κλάδων.

4.4.1. Φορτία στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (p)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά γραφήματα που περιέχουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα που παρατέθηκαν στις υποενότητες 4.2.1 και 4.3.1 για σύγκριση και προβολή των τιμών που αφορούν το σύνολο των περιπτώσεων που εξετάζονται. Αναλυτικά, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές της μέσης πίεσης ($p_{average}$), της πίεσης που ασκείται στην εσωτερική παρειά που συνορεύει με το πλάτος πυλώνα ($p_{\theta=90^\circ}$ για «πρώτη» και «μονή» σήραγγα) αλλά επιπρόσθετα και οι τιμές της πίεσης που ασκούνται περιμετρικά της υποστήριξης στις υπόλοιπες περιοχές εν διατομή για τον προσδιορισμό της ευρύτερης απόκρισης των σηράγγων ανά περίπτωση.



Γράφημα 4.29: Λόγος μέσων φορτίων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,avg}/p_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$

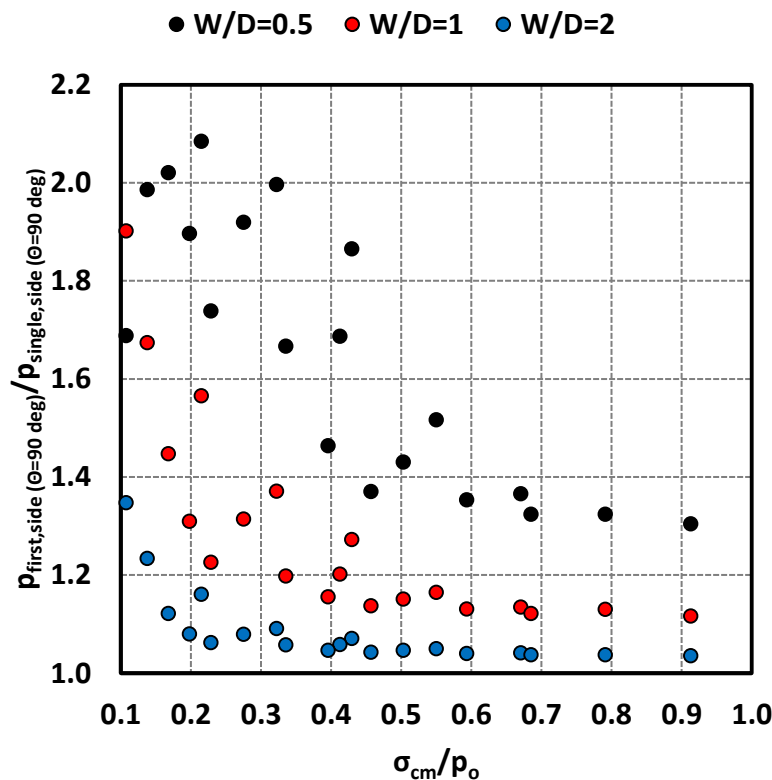
Από το παραπάνω γράφημα παρατηρείται αρχικά ότι για όλα τα πλάτη πυλώνα και όλες τις γεωτεχνικές συνθήκες που μελετώνται, οι τιμές του λόγου μέσης πίεσης «πρώτης» προς «μονής» σήραγγας είναι μεγαλύτερες της μονάδας που σημαίνει πως η «πρώτη» σήραγγα παρουσιάζει δυσμένεια σε σχέση με την «μονή». Η δυσμένεια αυτή οφείλεται στην αλληλεπίδραση που παρουσιάζεται μεταξύ των δύο κλάδων και συγκεκριμένα στο γεγονός της διάνοιξης της «δεύτερης» σήραγγας αφού ολοκληρωθεί η διάνοιξη της «μονής» η οποία από το βήμα 81 κι έπειτα μετατρέπεται απευθείας σε «πρώτη» λόγω εκσκαφής του διπλανού κλάδου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διάνοιξη του δεξιού κλάδου προκαλεί μεγαλύτερη ανακατανομή των τάσεων στο εντατικό πεδίο που έχει σταθεροποιηθεί μετά την εκσκαφή και υποστήριξη της «μονής» σήραγγας με αποτέλεσμα να δημιουργούνται νέες συγκλίσεις στις οποίες ανθίσταται η υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας και λόγω αυτής της αντίστασης τα φορτία που επενεργούν σε αυτήν αυξάνονται.

Όσον αφορά την επίδραση του πλάτους πυλώνα, είναι εμφανές πως για το μικρότερο πλάτος πυλώνα ($W/D=0.5$) οι λόγοι αυξάνουν πολύ με την μέγιστη τιμή της «πρώτης» σήραγγας να προσεγγίζει σχεδόν τη διπλάσια τιμή μέσης πίεσης που ασκείται στην υποστήριξη της «μονής» σήραγγας. Λιγότερο αυξημένοι είναι οι λόγοι που αναφέρονται στο πλάτος πυλώνα ($W/D=1.00$), ενώ πολύ μικρή αύξηση παρουσιάζεται στους λόγους που αντιστοιχούν στο πλάτος πυλώνα ($W/D=2.00$). Αυτό επιβεβαιώνει ότι η τιμή $W=2D$ είναι σχεδόν η οριακή τιμή όπου για τιμές μεγαλύτερες εκείνης οι τιμές της μέσης πίεσης που ενεργούν στην υποστήριξη «πρώτης» και «μονής» σήραγγας είναι σχεδόν οι ίδιες. Αντίθετα, όταν το πλάτος πυλώνα είναι $W=0.5D=4m$ οι τιμές αυξάνουν πάρα πολύ, η αλληλεπίδραση μεταξύ των σηράγγων είναι έντονη και σε αυτή την περίπτωση πρέπει να ληφθεί υπόψη η γεωλογία της περιοχής στην οποία θα πραγματοποιηθεί η διάνοιξη της δίδυμης σήραγγας.

Σύμφωνα, λοιπόν, με τη γεωλογία της περιοχής, οι τιμές του σ_{cm}/ρ_o μεταβάλλονται μεταξύ των κατηγοριών βραχώμαζας που αναλύονται και περιλαμβάνουν όλες τις περιπτώσεις από πολύ πτωχής ποιότητας βραχώμαζα έως μέτριας προς πτωχής. Από το γράφημα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως εάν γίνει με γραμμική παρεμβολή ένωση των κουκίδων ανά πλάτος πυλώνα οι κατανομές που διαμορφώνονται θυμίζουν σχεδόν την εκθετική κατανομή, που σημαίνει πως οι λόγοι μεταβάλλονται σημαντικά λόγω της τιμής του σ_{cm}/ρ_o . Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι για πολύ άσχημες γεωτεχνικές συνθήκες με $\sigma_{cm}/\rho_o < 0.3$ περίπου, οι τιμές της μέσης πίεσης που ασκούνται στην υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας αυξάνονται δυσανάλογα σε σχέση με τις τιμές που αντιστοιχούν σε τιμές $\sigma_{cm}/\rho_o > 0.3$. Λαμβάνοντας υπόψη μαζί τις γεωτεχνικές συνθήκες και τα πλάτη πυλώνα, φαίνεται πως στην περίπτωση εφαρμογής του μικρότερου πλάτους πυλώνα ($W=0.5D=4m$) η αλληλεπίδραση επιφέρει πολύ δυσμενή αποτελέσματα για τις βραχώμαζες που έχουν $\sigma_{cm}/\rho_o < 0.6$. Στην περίπτωση εφαρμογής του ενδιάμεσου πλάτους πυλώνα η αλληλεπίδραση είναι έντονη για $\sigma_{cm}/\rho_o < 0.5$ και στην περίπτωση εφαρμογής του μεγαλύτερου πλάτους πυλώνα ($W=2D=16m$) η αλληλεπίδραση εμφανίζεται ελάχιστα και μόνο για τις τιμές $\sigma_{cm}/\rho_o < 0.2$.

Επομένως, οι γεωτεχνικές συνθήκες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην διάνοιξη δίδυμης σήραγγας εφόσον ακόμα και στην εφαρμογή του μικρότερου πλάτους πυλώνα το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι σχεδόν αμελητέο για πολύ καλές γεωλογικές συνθήκες. Άρα πέρα από το γεγονός της προσεκτικής επιλογής του πλάτους πυλώνα που θα εφαρμοστεί μεταξύ των δύο κλάδων, ακόμα περισσότερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην γεωλογία της περιοχής στην οποία θα πραγματοποιηθεί η διάνοιξη της δίδυμης σήραγγας.

Παρακάτω παρατίθενται τα αντίστοιχα συγκεντρωτικά γραφήματα για την πίεση που ασκείται στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων σε όλες τις θέσεις περιμετρικά των σηράγγων.

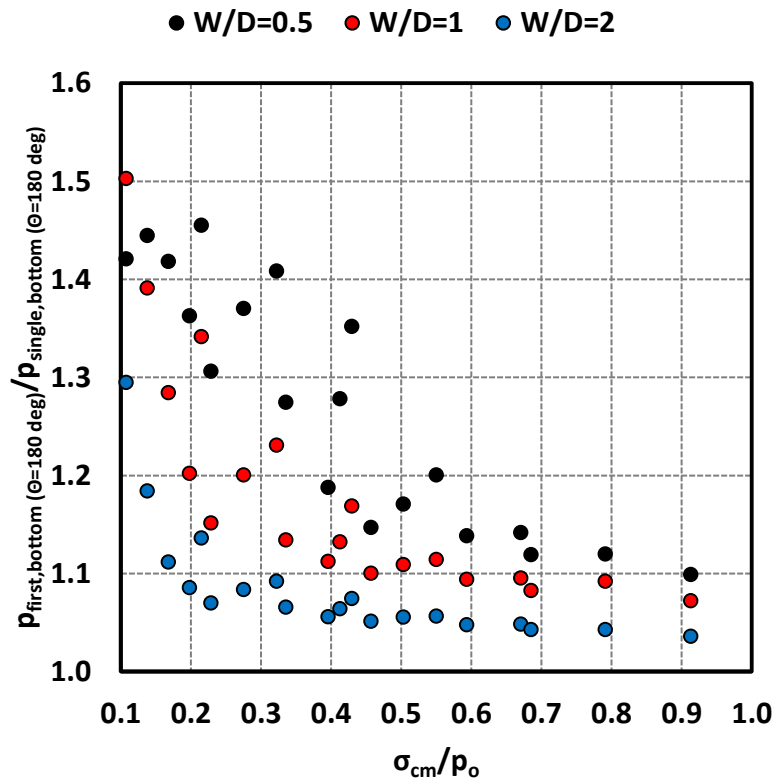


Γράφημα 4.30: Λόγος φορτίων στην εσωτερική παρειά (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,side} \theta=90/p_{single,side} \theta=90$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$

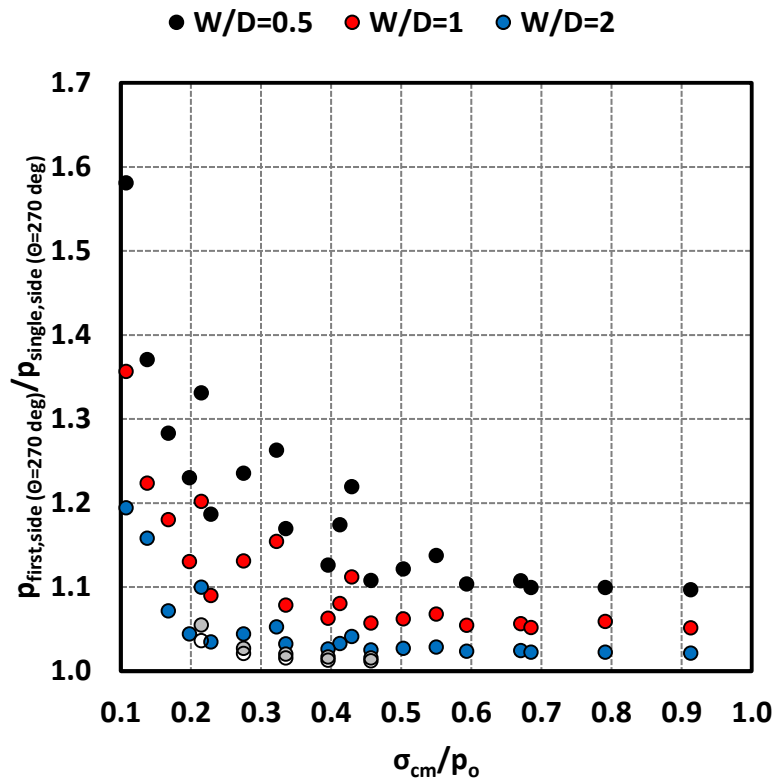
Παρατηρείται και εδώ ότι οι λόγοι των τιμών αυξάνονται όσο μικραίνει το πλάτος πυλώνα. Μάλιστα, οι τιμές της πίεσης που ασκούνται στην υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας για το μικρότερο πλάτος πυλώνα υπερβαίνουν το διπλάσιο των τιμών που ασκούνται στην υποστήριξη της «μονής» σήραγγας, γεγονός που αποδεικνύει την έντονη ανακατανομή των τάσεων στην ενδιάμεση περιοχή των σήραγγων όταν το πλάτος πυλώνα είναι τόσο μικρό.

Εφαρμόζοντας γραμμική παρεμβολή στις τιμές προκύπτει αντίστοιχα και εδώ κατανομή παρόμοια με την εκθετική κατανομή ανά πλάτος πυλώνα. Φαίνεται και εδώ πόσο σημαντικός είναι ο ρόλος των γεωτεχνικών συνθηκών, οι οποίες όσο βελτιώνονται πέφτει δυσανάλογα η τιμή των λόγων και κατά συνέπεια η «πρώτη» σήραγγα υφίσταται μικρότερη αλληλεπίδραση από την διάνοιξη της «δεύτερης» ακόμα και όταν η απόσταση στην οποία εκσκάπτονται οι δύο σήραγγες είναι μόνο 4m.

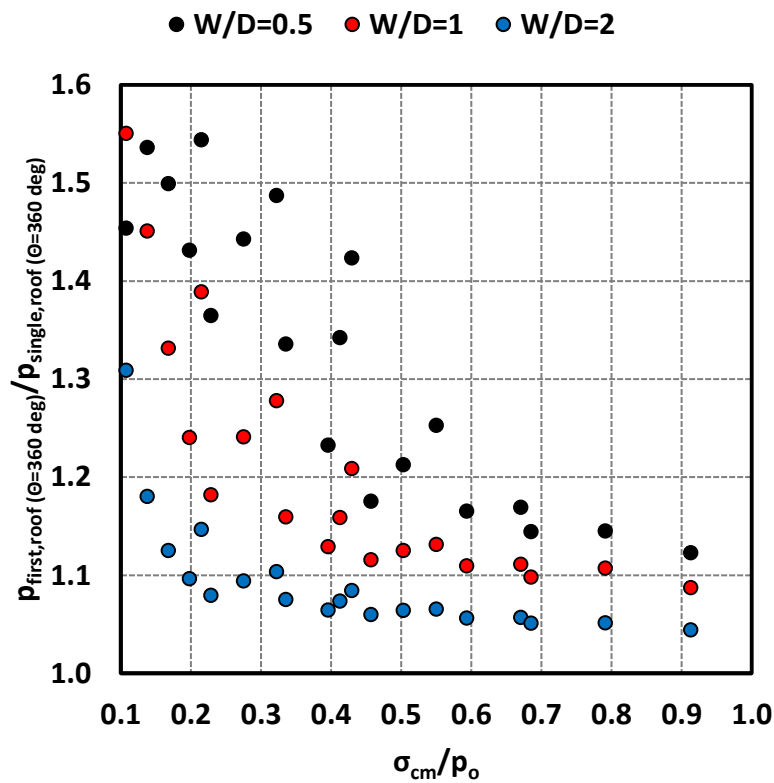
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αντίστοιχα γραφήματα για την περιοχή της στέψης ($\theta=360^\circ$), την περιοχή του πυθμένα ($\theta=180^\circ$) και την περιοχή της εξωτερικής παρειάς ($\theta=270^\circ$) όπου οι τιμές των λόγων εμφανίζονται μειωμένες συγκριτικά με εκείνες που παρουσιάστηκαν στο Γράφημα 4.30 καθώς αυτές οι περιοχές δέχονται μικρότερη επιρροή από τη διάνοιξη του δεξιού κλάδου σε σχέση με την περιοχή της εσωτερικής παρειάς που βρίσκεται γειτονικά με τη «δεύτερη».



Γράφημα 4.31: Λόγος φορτίων στην περιοχή του πυθμένα της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($\rho_{first,bottom} \theta=180/\rho_{single,bottom} \theta=180$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$



Γράφημα 4.32: Λόγος φορτίων στην εξωτερική παρειά (αριστερά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($\rho_{first,side \theta=270} / \rho_{single,side \theta=270}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm} / ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$



Γράφημα 4.33: Λόγος φορτίων στην περιοχή της στέψης της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($\rho_{first,roof \theta=360} / \rho_{single,roof \theta=360}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm} / ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$

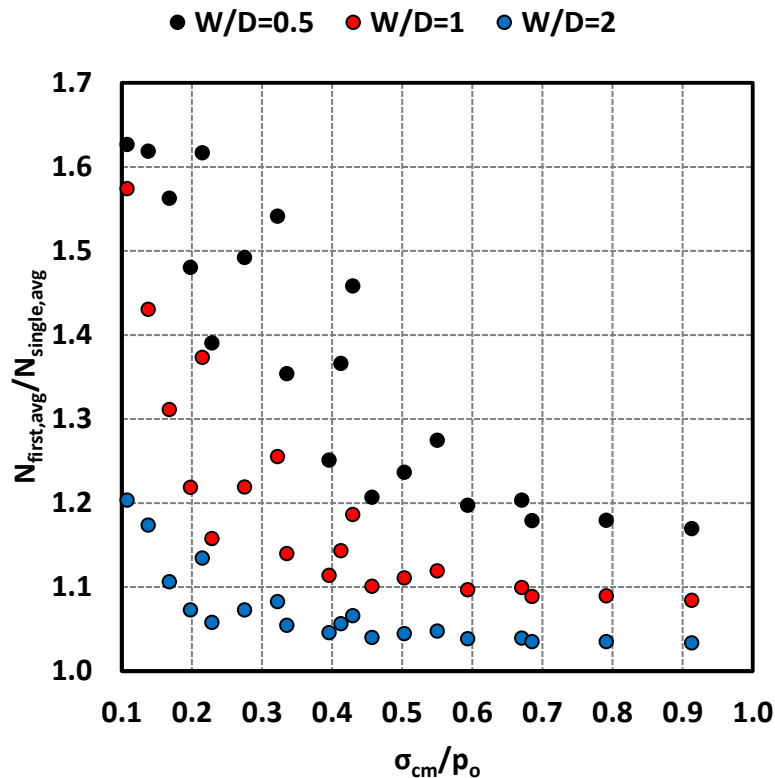
Από τα παραπάνω γραφήματα διαπιστώνεται εξ αρχής ότι πράγματι οι μεγαλύτερες τιμές της πίεσης που δρουν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της «πρώτης» σήραγγας εντοπίζονται στην πλευρά που συνορεύει η «πρώτη» σήραγγα με την «δεύτερη», δηλαδή στην περιοχή της εσωτερικής παρειάς ($\theta=90^\circ$). Οι αμέσως επόμενες περιοχές που εμφανίζουν υψηλές τιμές λόγω πίεσης είναι η στέψη και ο πυθμένας της «πρώτης» σήραγγας και στο τέλος με αρκετά μειωμένες τιμές εντοπίζονται οι πιέσεις που ασκούνται στην εξωτερική παρειά της σήραγγας. Δηλαδή, όπως είναι φυσικό, οι περιοχές που είναι πλησιέστερες στο πλάτος πυλώνα καταπονούνται περισσότερο λόγω αλληλεπίδρασης και η περιοχή που βρίσκεται αντιδιαμετρικά του πλάτους πυλώνα πλήττεται λιγότερο.

Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι ανάλογα μορφοποιούνται οι κατανομές για όλα τα πλάτη πυλώνα και όλες τις γεωτεχνικές συνθήκες. Οι δυσμενέστερες περιπτώσεις περιγράφονται όταν το πλάτος πυλώνα είναι $W/D=0.5$ και για χαμηλό σ_{cm}/ρ_o . Όσο μεγαλώνει το πλάτος πυλώνα, τόσο περισσότερο μειώνονται οι τιμές των λόγων και κατά συνέπεια η αλληλεπίδραση εξαλείφεται. Επιπρόσθετα, όσο βελτιώνονται οι γεωλογικές παράμετροι, τόσο ευνοικότερη προκύπτει η απόκριση της δίδυμης σήραγγας, ακόμα και όταν η εγκάρσια απόσταση των δύο κλάδων είναι πολύ μικρή, χωρίς να παρουσιαστούν ιδιαίτερα προβλήματα συγκλίσεων και πλαστικών παραμορφώσεων.

4.4.2. Αξονικές δυνάμεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (N)

Σε αυτή την υποενότητα παρατίθενται τα συγκεντρωτικά γραφήματα που αναφέρονται στις αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην άμεση υποστήριξη των σήραγγων για όλα τα γεωτεχνικά ζεύγη τιμών και για όλα τα πλάτη πυλώνα που εξετάζονται. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι μέσες αξονικές δυνάμεις που δρουν μηκοτομικά στην υποστήριξη, όπως επίσης και οι αξονικές δυνάμεις που δρουν περιμετρικά σε όλες τις περιοχές της άμεσης υποστήριξης όταν η διάνοιξη της δίδυμης σήραγγας μελετάται σε 20 διαφορετικές κατηγορίες βραχώμαζας και όταν εφαρμόζονται τρεις διαφορετικές εγκάρσιες αποστάσεις μεταξύ των δύο κλάδων. Παρουσιάζονται και εδώ οι τιμές των γραφήματων με την έννοια των λόγων της «πρώτης» σήραγγας ως προς την «μονή» για τον προσδιορισμό της αύξησης των τιμών της «πρώτης» σήραγγας λόγω του φαινομένου της αλληλεπίδρασης που ενεργοποιείται από τη στιγμή που ξεκινά η διάνοιξη του δεύτερου κλάδου.

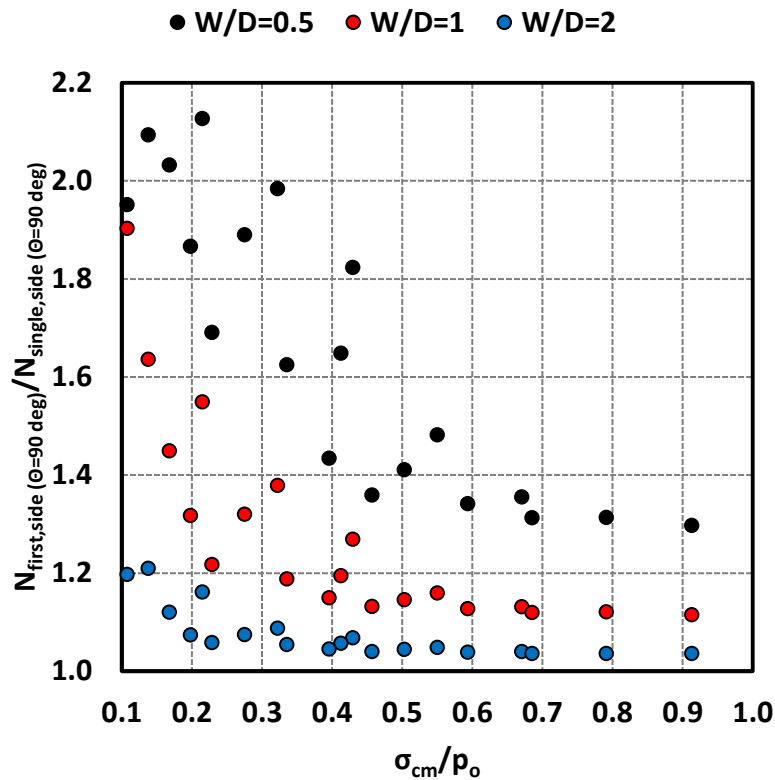
Παρόμοια προκύπτουν τα αποτελέσματα των αξονικών με εκείνα των φορτίων, καθώς η επίδραση της «δεξιάς» σήραγγας, όταν ιδιαίτερα η απόσταση μεταξύ των κλάδων είναι πολύ μικρή, δεν προκαλεί μόνο αυξημένα φορτία αλλά και αυξημένες αξονικές δυνάμεις μηκοτομικά αλλά και περιμετρικά των διατομών της υποστήριξης της «πρώτης» σήραγγας. Όπως και στην προηγούμενη υποενότητα, εξετάζονται και τώρα κατά πόσο μεγαλύτεροι της μονάδος είναι οι λόγοι που παρουσιάζονται ανά περίπτωση για τον προσδιορισμό της τάξης μεγέθους της αύξησης λόγω αλληλεπίδρασης.



Γράφημα 4.34: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,avg}/N_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$

Σύμφωνα με το παραπάνω γράφημα, οι μεγαλύτεροι λόγοι εντοπίζονται για το μικρότερο πλάτος πυλώνα ($W=0.5D=4m$) και για ένα εύρος γεωτεχνικών συνθηκών $0.1 < \sigma_{cm}/\rho_o < 0.6$. Οι λόγοι μειώνονται για $W=1.0D=8m$ και οι μεγαλύτερες τιμές σε αυτή την περίπτωση εμφανίζονται για $0.1 < \sigma_{cm}/\rho_o < 0.4$. Στην περίπτωση του μικρότερου πλάτους πυλώνα οι τιμές μειώνονται αισθητά και πολύ μικρή δυσμένεια εντοπίζεται για τιμές $0.1 < \sigma_{cm}/\rho_o < 0.25$. Είναι αντιληπτό, επομένως, και από εδώ πόσο αρνητικά αποτελέσματα φέρει η διάνοιξη του δεξιού κλάδου στον αριστερό όταν η απόσταση μεταξύ τους είναι αρκετά μικρή και πόσο εκείνα βελτιώνονται με την αύξηση του πλάτους πυλώνα.

Αναφορικά με την επίδραση του γεωλογικού σχηματισμού στον οποίο προβλέπεται να γίνει η διάνοιξη των δίδυμων κλάδων, φαίνεται από το διάγραμμα ότι αν ενωθούν τα σημεία νοητά με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής θα σχηματιστούν κατανομές παρόμοιες με εκείνες της εκθετικής κατανομής για κάθε πλάτος πυλώνα που σημαίνει ότι για μικρούς λόγους σ_{cm}/ρ_o οι τιμές αυξάνονται δυσανάλογα. Ουσιαστικά όταν είναι αυξημένη η αντοχή σε μονοαξονική θλιψή οι ιδιότητες της βραχώμαζας βελτιώνονται με αποτέλεσμα η βραχώμαζα να αποκρίνεται πολύ καλύτερα υπό τη διάνοιξη του υπόγειου τεχνικού έργου και το μέγεθος του πλάτους πυλώνα παύει να επηρεάζει τόσο τα αποτελέσματα. Στο επόμενο γράφημα εμφανίζονται οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην δυσμενέστερη περιοχή περιμετρικά των διατομών, δηλαδή στην εσωτερική παρεία $\theta=90^\circ$. Αυτή η περιοχή εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές για όλα τα αποτελέσματα που εξήχθησαν εφόσον συνορεύει με την δεύτερη σήραγγα, η διάνοιξη της οποίας προκαλεί μεταβολές στο υπάρχον εντατικό πεδίο που έχει ήδη ισορροπήσει μετά τη διάνοιξη και υποστήριξη της αριστερής σήραγγας.

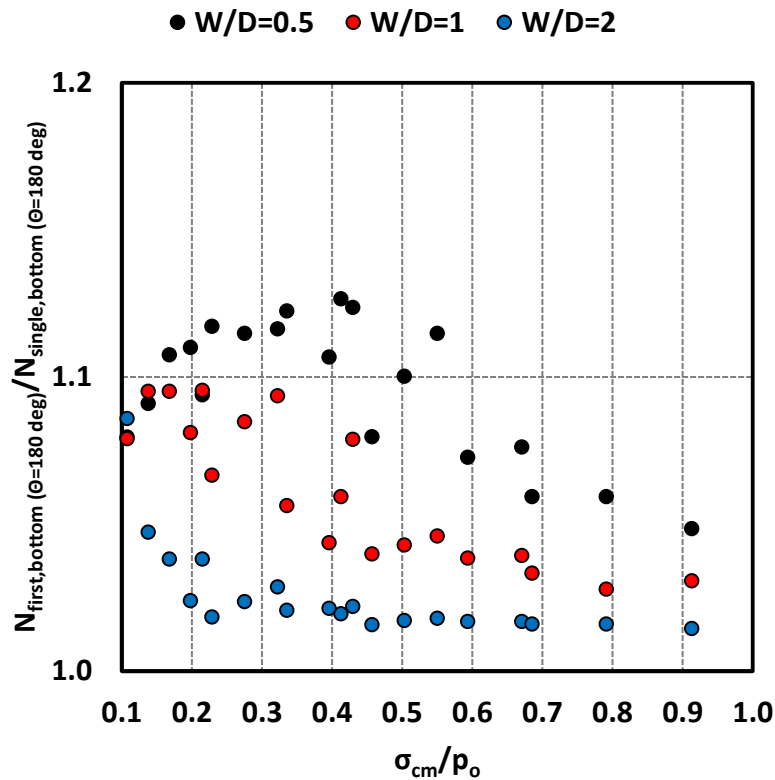


Γράφημα 4.35: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην εσωτερική παρειά (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,side \theta=90}/N_{single,side \theta=90}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$

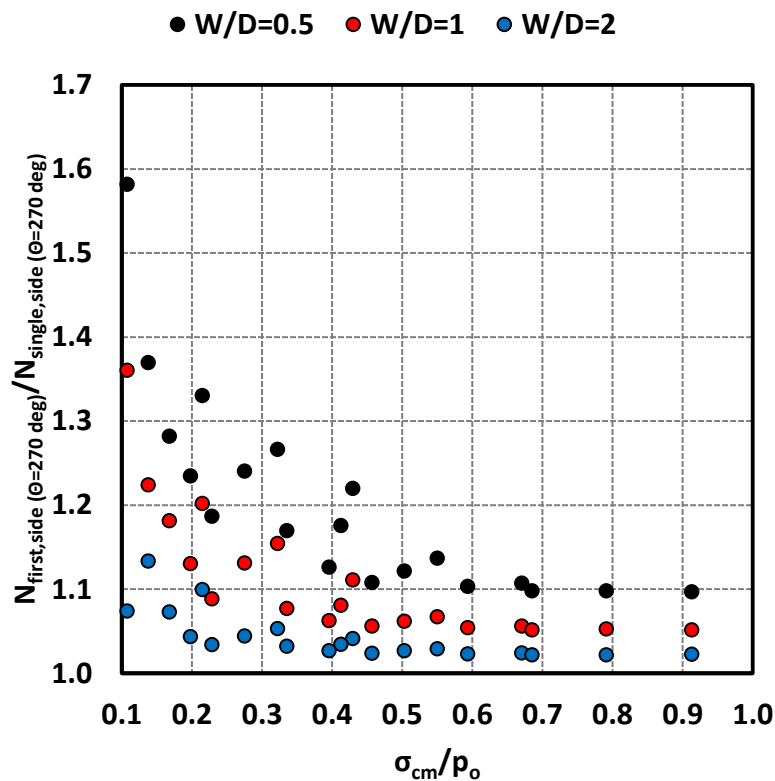
Στη συγκεκριμένη περιοχή που μελετάται, οι τιμές των αξονικών δυνάμεων που ασκούνται στην υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας είναι σχεδόν διπλάσιες από τις αντίστοιχες που ασκούνται στην υποστήριξη της «μονής» για το μικρότερο πλάτος πυλώνα και για πολύ δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες. Αυτό είναι ένα στοιχείο που δείχνει πόσο ευάλωτη είναι αυτή η παρειά της «πρώτης» σήραγγας στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.

Επιπλέον, παρατηρείται όπως και στις άλλες περιπτώσεις, ότι η αύξηση του πλάτους πυλώνα προκαλεί σχεδόν εξάλειψη του φαινομένου και οι γεωλογικές συνθήκες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην συνολική απόκριση της σήραγγας. Συγκεκριμένα, με την αύξηση του λόγου σ_{cm}/p_o μειώνονται αισθητά οι λόγοι και η απόκριση της «πρώτης» σήραγγας συγκλίνει με εκείνη της «μονής».

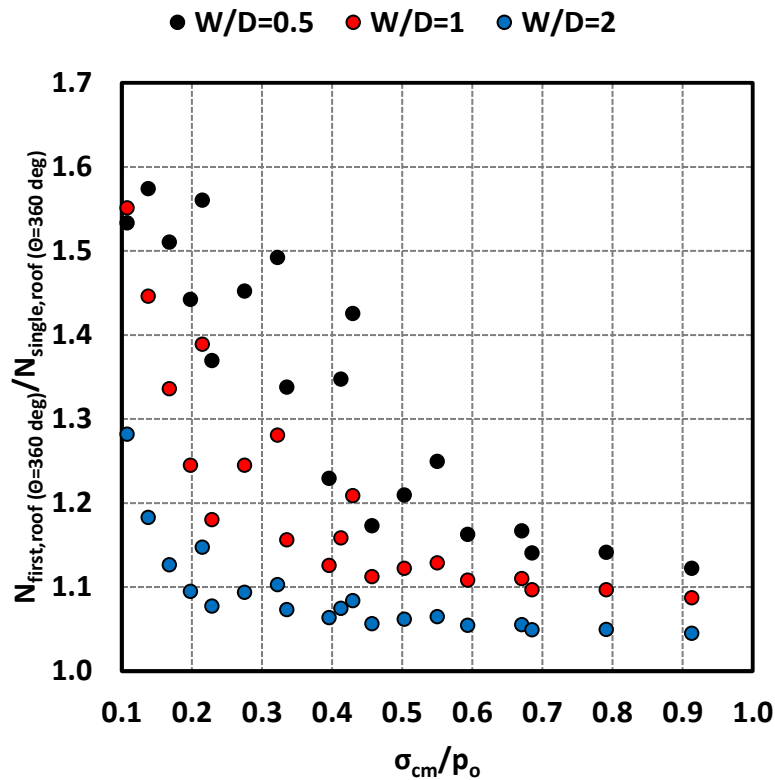
Τέλος, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα γραφήματα για τις υπόλοιπες περιοχές περιμετρικά της «πρώτης» σήραγγας.



Γράφημα 4.36: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην περιοχή του πυθμένα της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,bottom \vartheta=180} / N_{single,bottom \vartheta=180}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm} / ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$



Γράφημα 4.37: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην εξωτερική παρειά (αριστερά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,side \vartheta=270} / N_{single,side \vartheta=270}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm} / ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$



Γράφημα 4.38: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην περιοχή της στέψης της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first, roof \theta=360} / N_{single, roof \theta=360}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm} / ρ_o) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$

Παρόμοια απόκριση εντοπίζεται και στις περιοχές περιμετρικά της «πρώτης» σήραγγας, μόνο που στη συγκεκριμένη περίπτωση οι μικρότεροι λόγοι δεν εμφανίζονται μόνο στη θέση της εξωτερικής παρειάς ($\theta=270^\circ$) αλλά και στη θέση του πυθμένα ($\theta=180^\circ$). Οι μεγαλύτερες τιμές εντοπίζονται στη θέση της εσωτερικής παρειάς ($\theta=90^\circ$), όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αλλά και στην περιοχή της στέψης ($\theta=360^\circ$).

Η μορφή κατανομής σε όλες τις περιπτώσεις θυμίζει την εκθετική κατανομή, γεγονός που υποδηλώνει την δυσανάλογη αύξηση των αξονικών που ασκούνται στο κέλυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της «πρώτης» σήραγγας όταν οι γεωτεχνικές συνθήκες είναι πολύ άσχημες για μέτρια πλάτη πυλώνα ή όταν οι γεωτεχνικές συνθήκες είναι μέτριες έως πολύ άσχημες για το μικρότερο πλάτος πυλώνα.

Συμπερασματικά, τα φορτία και οι αξονικές δυνάμεις που ασκούνται στην υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας εμφανίζουν μεγάλη αύξηση από τη στιγμή που ξεκινάει η εκσκαφή της «δεύτερης» σήραγγας τα οποία εξαρτώνται σημαντικά από το μέγεθος της εγκάρσιας απόστασης μεταξύ των κλάδων και από τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής στην οποία μελετάται να πραγματοποιηθεί η διάνοιξη της δίδυμης σήραγγας. Πρέπει, ουσιαστικά, αυτοί οι δύο παράγοντες να συνεκτιμώνται εξίσου στην μελέτη του υπόψη τεχνικού έργου και να μελετώνται σχολαστικά πριν την οποιαδήποτε ενέργεια προς αποφυγή αστοχιών ή και καταρρεύσεων.

5. Συμπεράσματα – Προτάσεις

Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας είναι η διερεύνηση του μηχανισμού της αλληλεπίδρασης μεταξύ των κλάδων δίδυμων σηράγγων. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση της ανάπτυξης των φορτίων και των εντατικών μεγεθών (αξονικές δυνάμεις) που ασκούνται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα το οποίο τοποθετείται χρονικά αμέσως μετά την εκσκαφή του εκάστοτε τμήματος ανά βήμα εκσκαφής (1m) και ανθίσταται στις συγκλίσεις που υφίσταται η περιβάλλουσα βραχόμαζα κατά τη διάνοιξη. Επιπλέον, διερευνήθηκε και η κατανομή των τάσεων στα στοιχεία του γεωυλικού που ανήκουν στην περιβάλλουσα βραχόμαζα γύρω από την άμεση υποστήριξη, τόσο παράλληλα της διεύθυνσης του άξονα των σηράγγων όσο και περιμετρικά μίας τυπικής διατομής σε μία ενδιάμεση θέση του μήκους εκσκαφής, καθώς και η σχηματική απεικόνιση των στοιχείων γύρω από μία χαρακτηριστική διατομή των σηράγγων που επιλέχθηκε τα οποία εισέρχονται στην πλαστική περιοχή μετά από αστοχία. Η εν λόγω διερεύνηση πραγματοποιήθηκε μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των παραπάνω αποτελεσμάτων, καθώς επίσης προτάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Τα συμπεράσματα αναφέρονται στην επίδραση του μεγέθους του πλάτους πυλώνα και των γεωλογικών συνθηκών στην απόκριση του κάθε διαμήκους κλάδου που διανοίγεται, είτε σε περίπτωση εκσκαφής μονής σήραγγας είτε σε περίπτωση εκσκαφής διπλής σήραγγας.

5.1. Συμπεράσματα

5.1.1. Επίδραση πλάτους πυλώνα

Όσον αφορά το ρόλο που παίζει το μέγεθος της εγκάρσιας απόστασης μεταξύ των δύο κλάδων στην περίπτωση διάνοιξης δίδυμων σηράγγων τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

1. Η διατομή που καταπονείται περισσότερο στο σύνολό της είναι η «πρώτη» σήραγγα. Συγκεκριμένα, κατά τη διάνοιξη του πρώτου κλάδου («μονή» σήραγγα) η περιβάλλουσα βραχόμαζα εμφανίζει συγκλίσεις ως μηχανισμό αντίδρασης μετά την εκσκαφή, οι οποίες αν εκτονωθούν πλήρως θα προκαλέσουν πρόβλημα στο τεχνικό έργο και γι'αυτό το λόγο επιλέγεται άμεσα η τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όπως ορίζει και η μέθοδος συμβατικής διάνοιξης NATM, το οποίο θα παραλάβει μέρος των συγκλίσεων και θα προκύψουν ελέγχόμενες παραμορφώσεις. Κάποια στιγμή το σύστημα της άμεσης υποστήριξης με το περιβάλλον γεωυλικό θα ισορροπήσει με αποτέλεσμα να σταθεροποιηθούν τα φορτία που ασκούνται από τη βραχόμαζα στην υποστήριξη. Όταν ολοκληρωθεί η διάνοιξη του πρώτου κλάδου και ξεκινήσει η διάνοιξη του δεύτερου κλάδου η «μονή» σήραγγα μετατρέπεται σε «πρώτη» σήραγγα και, ιδιαίτερα σε κοντινή σχετικά απόσταση, θα προκληθεί νέα ανακατανομή των τάσεων στην γύρω περιοχή με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν περαιτέρω συγκλίσεις οι οποίες όμως είναι δύσκολο να εκτονωθούν λόγω της ακαμψίας που προσφέρει η άμεση υποστήριξη που έχει ήδη τοποθετηθεί στον προυπάρχον πρώτο κλάδο. Αυτό θα φέρει σαν αποτέλεσμα να αυξηθούν οι πιέσεις και τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται από την περιβάλλουσα βραχόμαζα στο κελυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και με αυτό τον τρόπο η «πρώτη» σήραγγα θα υποστεί ακόμα μεγαλύτερη καταπόνηση κατά τη διάρκεια διάνοιξης της «δεύτερης» σήραγγας με αποτέλεσμα να διαφοροποιηθεί από την απόκριση της «μονής» σήραγγας.

2. Η διατομή που καταπονείται λιγότερο ανεξαρτήτως πλάτους πυλώνα είναι η «δεύτερη» σήραγγα. Ουσιαστικά, τη στιγμή που ξεκινάει η διάνοιξη του δεύτερου κλάδου, οι τάσεις στη γύρω περιοχή έχουν σταθεροποιηθεί σε μία τιμή εξ' αιτίας της συνεισφοράς στην παραλαβή των πιέσεων και στην αντίσταση των συγκλίσεων της άμεσης υποστήριξης που έχει τοποθετηθεί στον πρώτο κλάδο. Έτσι η «δεύτερη» σήραγγα δεν επιβαρύνεται από την παρουσία του πρώτου κλάδου που έχει διανοιχθεί και αποκρίνεται σαν να πρόκειται για «μονή» σήραγγα με μία μικρή μόνο διαφοροποίηση στις τιμές των αποτελεσμάτων ανάλογα τον γεωλογικό σχηματισμό που επικρατεί.
3. Το μέγεθος του πλάτους πυλώνα αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην μελέτη διάνοιξης δίδυμης σήραγγας, καθώς όσο μικρότερη είναι η τιμή του τόσο δυσμενής είναι η απόκριση της «πρώτης» σήραγγας. Συγκεκριμένα, τα φορτία και τα εντατικά μεγέθη που εξετάστηκαν (αξονικές δυνάμεις) επί του κελύφους εκτοξευόμενου σκυρόδεματος εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές τους στην περίπτωση του μικρότερου πλάτους πυλώνα που διερευνήθηκε ($W=0.5D=4m$) και αντίστοιχα τις ελάχιστες στην περίπτωση του μεγαλύτερου πλάτους πυλώνα που διερευνήθηκε ($W=2D=16m$). Ομοίως, το ίδιο διαπιστώνεται και για τις τάσεις και τις πλαστικές παραμορφώσεις των στοιχείων που ανήκουν στην βραχώμαζα που περιβάλλει τις διατομές. Όλα τα αποτελέσματα αναφέρονται τόσο μηκοτομικά παράλληλα στη διεύθυνση εκσκαφής όσο και περιμετρικά των διατομών. Επομένως, για πλάτος πυλώνα $W>2.0D$ δεν τίθεται θέμα διερεύνησης του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, καθώς οι κατανομές των αποτελεσμάτων για την «πρώτη» σήραγγα προσεγγίζουν τις αντίστοιχες κατανομές για την «μονή» σήραγγα και οι δύο κλάδοι της δίδυμης σήραγγας μπορούν να ληφθούν υπόψη ως ανεξάρτητες κατασκευές.
4. Οι περιοχές περιμετρικά των σηράγγων που είναι περισσότερο ευάλωτες στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι οι εσωτερικές παρειές των διατομών που γειτνιάζουν με το πλάτος πυλώνα ($\theta=90^\circ$ για «μονή/πρώτη» σήραγγα και $\theta=270^\circ$ για «δεύτερη» σήραγγα), καθώς πρόκειται για την κοινή περιοχή των κλάδων στην οποία επικρατεί μεγάλη ανακατανομή των τάσεων από τη διάνοιξή τους. Όσο μικρότερη σε διαστάσεις είναι αυτή η περιοχή, το οποίο εξαρτάται από το μέγεθος του πλάτους πυλώνα, τόσο αυξημένα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (φορτία, αξονικές δυνάμεις, τάσεις, πλαστικές παραμορφώσεις) στις θέσεις αυτές με μεγάλη απόκλιση στις τιμές από τις υπόλοιπες περιοχές περιμετρικά των διατομών.
5. Εξετάζοντας την απόκριση μίας τυπικής διατομής του πρώτου κλάδου σε συγκεκριμένη θέση του μήκους εκσκαφής διαπιστώνεται πως όσο το μέτωπο εκσκαφής κατά τη διάνοιξη της «δεύτερης» σήραγγας προσεγγίζει τη συγκεκριμένη διατομή, τόσο εκτοξεύονται οι τιμές των φορτίων για την «πρώτη» σήραγγα στη θέση αυτή. Αυτό το άλμα εκφράζει αντιπροσωπευτικά τη δυσμενή επίδραση της διάνοιξης του δεξιού κλάδου στον αριστερό και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εγκάρσια απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος του πυλώνα, τόσο μειώνεται το άλμα αυτό μέχρι που παύει να θυμίζει άλμα στην περίπτωση που το πλάτος πυλώνα είναι $W=2D=16m$. Αποδεικνύεται, δηλαδή, και από αυτό το στοιχείο ότι $W_{crit}=2D=16m$, όπου για τιμές μεγαλύτερες εκείνου το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης τείνει να εξαλειφθεί.
6. Εξετάζοντας μηκοτομικά παράλληλα στον άξονα εκσκαφής τις μέγιστες και ελάχιστες κύριες τάσεις που αναπτύσσονται στα στοιχεία της βραχώμαζας που περιβάλλουν τις διατομές των σηράγγων, διαπίστωνεται μία απότομη αύξηση των τιμών από την αρχική γεωστατική κατάσταση σε περιοχές που βρίσκονται πολύ κοντά στο μέτωπο εκσκαφής αλλά στα οποία

δεν έχει πραγματοποιηθεί ακόμα εκσκαφή. Πολύ σύντομα αργότερα παρατηρείται η μείωση των τάσεων από την αρχική γεωστατική κατάσταση ($\sigma_1 = p_0$, $\sigma_3 = 0.5p_0$) λόγω αποσυμπίεσης από την αφαίρεση του υλικού. Η εν λόγω αύξηση που προηγείται βασίζεται στην έντονη ανακατανομή των τάσεων λόγω της διαταραχής που προκαλείται από το τμήμα που βρίσκεται δίπλα του κατά τη διάρκεια εκσκαφής του. Ο βαθμός διαταραχής οφείλεται στο μέγεθος του πλάτους πυλώνα. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος πυλώνα, τόσο μικρότερη είναι η διαταραχή και τόσο μικρότερη αύξηση από την αρχική γεωστατική κατάσταση δέχονται οι κύριες τάσεις των στοιχείων. Άρα ο βαθμός αλληλεπίδρασης μεταξύ των κλάδων είναι εμφανής και από αυτό το στοιχείο.

5.1.2. Επίδραση γεωτεχνικών συνθηκών

Όσον αφορά το ρόλο που παίζει η γεωλογία της περιοχής στην οποία πραγματοποιείται η διάνοιξη της δίδυμης σήραγγας προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Σύμφωνα με τον μηχανισμό απόκρισης των διατομών στην περίπτωση διάνοιξης δίδυμων σηράγγων που αναφέρθηκε προηγουμένως, η «πρώτη» σήραγγα δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση από την διάνοιξη του δεύτερου κλάδου. Η εν λόγω απόκριση φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά και από τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή διάνοιξης. Συγκεκριμένα, διαπιστώνεται πως για μία ισχυρά διατμημένη, χαώδης βραχομάζα η εν λόγω καταπόνηση είναι ακόμα μεγαλύτερη και οι κατανομές των αποτελεσμάτων για την «πρώτη» σήραγγα αυξάνονται επαρκώς συγκριτικά με τις αντίστοιχες κατανομές των αποτελεσμάτων για τη «μονή» και «δεύτερη» σήραγγα. Αντίθετα, για μία μέτριας προς πτωχής ποιότητας βραχομάζα, οι κατανομές των σηράγγων μεταξύ τους συγκλίνουν σχεδόν ακόμα και για το μικρότερο πλάτος πυλώνα. Επομένως, επιβάλλεται να λαμβάνεται εξίσου υπόψη η γεωλογία της περιοχής στην οποία προβλέπεται να γίνει διάνοιξη δίδυμων σηράγγων, καθώς ακόμα και μικρά πλάτη πυλώνα δύναται να εφαρμοστούν σε πιο υψηλής αντοχής βραχομάζες χωρίς την παρουσία ιδιαίτερων προβλημάτων.
2. Η διατομή που καταπονείται λιγότερο είναι η «δεύτερη» σήραγγα, γιατί θεωρητικά τη στιγμή της διάνοιξης το σύστημα εκτοξευόμενο σκυρόδεμα – βραχομάζα της «πρώτης» σήραγγας έχει αρχίσει να ισορροπεί με την ενεργοποίηση της άμεσης υποστήριξης και η διαταραχή λόγω της διάνοιξης που προυπάρχει στην επιφάνεια της βραχομάζας είναι σχεδόν μηδενική. Άρα, η «δεύτερη» σήραγγα αποκρίνεται όπως η «μονή» σήραγγα, μόνο που διαφοροποιούνται κατ'ελάχιστο οι τιμές των αποτελεσμάτων μεταξύ τους λόγω ποιότητας της βραχομάζας. Συγκεκριμένα, ο συνδυασμός διάνοιξης προυπάρχοντος κλάδου σε πολύ χαώδη βραχομάζα επιφέρει μία προυπάρχουσα πλαστική ζώνη στην περιοχή που ξεκινά η διάνοιξη της «δεύτερης» σήραγγας, με αποτέλεσμα η απόκριση «δεύτερης» και «μονής» σήραγγας να είναι ναί μεν παρόμοια αλλά να διαφέρει λίγο ως προς τις τιμές τους.
3. Αναφορικά με τα αποτελέσματα που διερευνήθηκαν, δηλαδή τα φορτία και οι αξονικές δυνάμεις που ενεργούν στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων και οι τάσεις και πλαστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στα στοιχεία της βραχομάζας γύρω από τις διατομές των σηράγγων, προκύπτουν μεταβολές ανάλογα το γεωλογικό προσομοίωμα. Συμπεραίνεται ότι οι τιμές των ανωτέρω αποτελεσμάτων μεγαλώνουν δυσανάλογα με τη μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη της βραχομάζας. Πιο αναλυτικά, παρατηρείται ότι οι κατανομές για παράδειγμα των φορτίων και των αξονικών δυνάμεων που ασκούνται

στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας συναρτησει όλων των κανονικοποιημένων αντοχών σε μονοαξονική θλίψη που διερευνήθηκαν ανά πλάτος πυλώνα θυμίζουν κατά ένα τρόπο τις εκθετικές κατανομές, που σημαίνει ότι για πολύ χαμηλές αντοχές τα εν λόγω αποτελέσματα αυξάνονται δυσανάλογα, ενώ από μία συγκεκριμένη αντοχή βραχομάζας και έπειτα συγκλίνουν. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στο αισιόδοξο σενάριο της προτροπής εκσκαφής δίδυμων σηράγγων ακόμα και σε μέτριας προς πτωχής ποιότητας βραχομάζα, ακόμα και για πολύ μικρό πλάτος πυλώνα. Άρα για ακόμα καλύτερες γεωλογικές συνθήκες τα αποτελέσματα ευνοούνται ακόμα περισσότερο και το μέγεθος του πλάτους πυλώνα δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου, παρά μόνο σε βραχομάζες που αποκρίνονται σχεδόν ως εδαφικά υλικά.

4. Η μέγιστη αύξηση των αποτελεσμάτων λόγω δυσμενών γεωλογικών συνθηκών εμφανίζεται πάλι στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων που γειτνιάζουν με το πλάτος πυλώνα ($\theta=90^\circ$ για «μονή/πρώτη» σήραγγα και $\theta=270^\circ$ για «δεύτερη» σήραγγα). Ο συνδυασμός του φαινομένου της αλληλεπίδρασης σε περιοχές με δυσμενή γεωτεχνική συμπεριφορά, οδηγεί την κοινή περιοχή που παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο κλάδων να πλαστικοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιοχές περιμετρικά των διατομών.
5. Ενδεικτικό στοιχείο επιβάρυνσης της «πρώτης» σήραγγας από τη διάνοιξη της «δεύτερης» σήραγγας σε άσχημο γεωτεχνικό περιβάλλον αποτελεί η απόκριση μίας ενδιάμεσης τυπικής διατομής της «πρώτης» σήραγγας όταν το μέτωπο εκσκαφής της «δεύτερης» σήραγγας προσεγγίζει την εξεταζόμενη διατομή. Παρακολουθώντας τη χρονιοιστορία της εξέλιξης των φορτίων στη θέση αυτή, διαπιστώνεται άλμα των τιμών τη χρονική στιγμή που το μέτωπο προσεγγίσει για κατηγορία βραχομάζας με πολύ μειωμένες γεωτεχνικές παραμέτρους, ενώ η μορφή της καμπύλης χρονιοιστορίας εξομαλύνεται και τείνει να γίνει οριζόντια για βραχομάζες με καλύτερη γεωτεχνική συμπεριφορά.
6. Τέλος, από την απεικόνιση των μέγιστων και ελάχιστων κύριων τάσεων των στοιχείων που απαρτίζουν την περιβάλλουσα βραχομάζα παράλληλα στο μήκος εκσκαφής σε δυσμενείς και ευμενείς γεωτεχνικές συνθήκες, παρατηρείται και εδώ η αύξηση των τιμών σε περιοχή που δεν έχει διανοιχθεί ακόμη και βρίσκεται σε απόσταση μίας διαμέτρου από το μέτωπο εκσκαφής, πριν τη μείωσή τους στη θέση του μετώπου λόγω αφαίρεσης γεωυλικού. Η λεγόμενη αύξηση είναι λίγο μεγαλύτερη για δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες και πέφτει όσο ευνοούνται καθώς η διαταραχή που προκαλείται από την εκσκαφή της διατομής που προηγείται μειώνεται για καλύτερης ποιότητας βραχομάζα.

5.2. Προτάσεις

Στο πλαίσιο περαιτέρω διερεύνησης του φαινομένου της αλληλεπίδρασης κατά τη διάνοιξη δίδυμων σηράγγων προτείνονται τα εξής:

- εκτέλεση αριθμητικών αναλύσεων με χρήση σύνθετων καταστατικών προσομοιωμάτων που είναι πιο κατάλληλα για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχομάζας και χαρακτηριστικά όπως η μη-γραμμική ελαστικότητα και η πλαστική χαλάρωση ή σκλήρυνση
- εκτέλεση αριθμητικών αναλύσεων για μη-κυκλικές (πεταλοειδείς) διατομές σηράγγων και για τμηματική διάνοιξη με πολλαπλές φάσει

6. Βιβλιογραφία

- ABAQUS 6.14 Documentation, 2013, SIMULIA, United States of America
- Chen S.L., Lee S.C., Gui M.W., 2008, Effects of rock pillar width on the excavation behavior of parallel tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24, 148-154, DOI: 10.1016/j.tust.2008.05.006
- Chortis F., Kavvadas M., 2015, Numerical Investigation of the Interaction between Twin Tunnels. *World Tunnel Congress WTC*, Duvrovnik, Croatia
- Graziani A., Boldini D., Ribacchi r., 2005, Practical Estimate of Deformations and Stress Relief Factors for Deep Tunnels Supported by Shotcrete. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38, 345 – 372, DOI: 10.1007/s00603-005-0059-2
- Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B., 2002, Hoek-Brown failure criterion. *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunnelling Association of Canada*. NARMS-TAC, Toronto, Canada, 1, 267-273
- Hoek E., Diederichs M.S., 2006, Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43, 203-215, DOI: 10.1016/j.ijrmms.2005.06.005
- Imran Ahmad Kahn, Kumar Venkatesh, Srivastava R.K., 2016, Elasto – plastic finite element analysis of twin interacting deep horse shoe tunnels, *Indian Geotechnical Conference*, Chennai
- Εξαδάκτυλος Γ., Σταυροπούλου Μ., 2006, Κατασκευή και Μηχανική των Σηράγγων και των Υπόγειων Έργων, Χανιά
- Καββαδάς Μ., 2005, Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπόγειων Έργων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Καββαδάς Μ., 2012, Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Κορδελούλη Μ., Μιχαλοπούλου Α., Σακελλαρίου Μ., 2005, Καθιζήσεις και Συγκλίσεις προκαλούμενες από την Διάνοιξη Αβαθών Σηράγγων. Αναλυτικές και υπολογιστικές μέθοδοι εκτίμησης, 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος
- Νύχτη Φ., 2016, Υπολογιστική Διερεύνηση της Αλληλεπίδρασης μεταξύ Βαθιών Δίδυμων Σηράγγων, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Παπαδόπουλος Β. 2004, Στοιχεία του μαθήματος: Βραχομηχανική-Σήραγγες, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- Παπαδόπουλος Β. 2010, Στοιχεία του μαθήματος: Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

- Προυντζόπουλος Γ., Καββαδάς Μ., 2010, Ευστάθεια και Παραμορφώσεις μπροστά από το Μέτωπο Εκσκαφής Σηράγγων. Σύγκριση Αριθμητικών Αναλύσεων με Αναλύτικη Μέθοδο, 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος
- Σαμπατακάκης Ν., Σημειώσεις Υπόγεια Τεχνικά Έργα – Επιτόπου Τάσεις, Τμήμα Γεωλογίας Πανεπιστήμιο Πάτρων, Πάτρα
- Σαμπατακάκης Ν., 2002, Τεχνική Γεωλογία, Αθήνα
- Τριανταφύλλου Α., 2010, Μηχανική των Υλικών, Πάτρα
- Μαρίνος Π. 1993, Κεφάλαια Γεωλογίας Μηχανικού, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- Μαρίνος Π. 1998, Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας Μηχανικού, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- Μαρίνος Π. et al. 2006, Ερευνητικό πρόγραμμα: Έρευνα επί της συμπεριφοράς γεωυλικών κατά την κατασκευή των σηράγγων της Εγνατίας Οδού και επί των παραγόντων διαμόρφωσης του τελικού κόστους κατασκευής, ΕΜΠ, Τομέας γεωτεχνικής, Αθήνα.
- Μπεκρή Ε., 2012, Διερεύνηση της Αλληλεπίδρασης των Δίδυμων Σηράγγων μέσω Τριδιάστατων Αριθμητικών Αναλύσεων, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Μπελόκας Γ., Καββαδάς Μ., 2010, Εφαρμογή ενός Νέου Ελαστοπλαστικού Προσομοιώματος στον Κώδικα Πεπερασμένων Στοιχείων ABAQUS, 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος
- Φορτσάκης Π., 2012, Διερεύνηση της Στατικής Αλληλεπίδρασης του Περιβάλλοντος Εδάφους/Βράχου και της Τελικής Επένδυσης Σηράγγων, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Ψυχάρη Ε., 2016, Υπολογιστική Διερεύνηση της Αλληλεπίδρασης μεταξύ Δίδυμων Βαθιών Σηράγγων με Έμφαση στο Συντελεστή Οριζόντιων Γεωστατικών Τάσεων και στο Συντελεστή Αποτόνωσης, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα