



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Δ.Π.Μ.Σ. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Αριθμητική διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων βαθιών σηράγγων μέσω τριδιάστατων αναλύσεων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΗΛΙΑΣ

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός

Επιβλέπων:
Καββαδάς Μιχαήλ
Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2018



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF GEOTECHNICAL ENGINEERING
POSTGRADUATE PROGRAM: "DESIGN AND CONSTRUCTION OF
UNDERGROUND WORKS"**

**Numerical investigation of the interaction between
adjacent tunnels via 3D analyses**

POSTGRADUATE THESIS

NIKOLAKOPOULOS ILIAS

Civil Engineer

**Supervisor:
Michael J. Kavvadas
Associate Professor NTUA**

Athens, February 2018

Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Δ.Π.Μ.Σ. «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και συγκεκριμένα στον Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως τον κ. Μ. Καββαδά, Αν. Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το θέμα της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να εμβαθύνω στο γνωστικό αντικείμενο του σχεδιασμού των σηράγγων. Η βοήθεια, η καθοδήγησή του καθώς και οι πολύτιμες συμβουλές και παρατηρήσεις του συνέβαλλαν ουσιαστικά στην εκπόνηση της εργασίας αυτής. Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω θερμότατα τον κ. Φ. Χόρτη, Υποψήφιο Διδάκτορα του Ε.Μ.Π., MSc, για την πολύτιμη βοήθεια του σε επιστημονικό αλλά και σε οργανωτικό επίπεδο, για την αμέριστη συμπαράστασή που μου προσέφερε του καθώς και για τον απεριόριστο προσωπικό χρόνο που μου διέθεσε. Η συνεργασία μας υπήρξε αρμονική και η συμβολή του ήταν καθοριστική σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο	3
2.1. Μηχανική των σηράγγων	3
2.1.1. Μέθοδος NATM	3
2.2. Συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας	5
2.3. Κριτήρια αστοχίας της βραχώμαζας	7
2.3.1. Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown	7
2.3.2. Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb	8
2.3.3. Συσχέτιση κριτηρίων Hoek-Brown και Mohr-Coulomb	9
3. Βιβλιογραφικές Αναφορές	13
3.1. Terzaghi H., 1942, Ward W.H. & Thomas H.S.H., 1965	13
3.2. Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C., 1996	13
3.3. Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W., 2004	15
3.4. Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P., 2007	17
3.5. Do N. A., Dias D, Oreste P., Djeran-Maigre I., 2014	18
3.6. Chortis F., Kavnadas M., 2015	21
3.7. Μπεκρή Ε., 2012	25
3.8. Ψυχάρη Ειρήνη, 2016	26
3.9. Σύνοψη	34
4. Αριθμητικές Αναλύσεις	35
4.1. Εισαγωγή	35
4.2. Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Abaqus	36
4.3. Περιγραφή αριθμητικού προσομοιώματος	37
4.3.1. Γεωμετρία μοντέλου	38
4.3.2. Διακριτοποίηση καννάβων	40
4.4. Αλληλουχία εκσκαφής - Βήματα αριθμητικών αναλύσεων	42
4.5. Παράμετροι αριθμητικών αναλύσεων	43
4.5.1. Γεωμετρικές παράμετροι	43
4.5.2. Γεωτεχνικές Παράμετροι	44
4.5.3. Παράμετροι Άμεσης Υποστήριξης	46
4.6. Βασικές Έννοιες - Παραδοχές των Αριθμητικών Αναλύσεων	47
5. Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων	49
5.1. Εισαγωγή	49
5.2. Επίδραση πλάτους πυλώνα (W/D)	49
5.2.1. Φορτία (p)	49
5.2.2. Αξονικές δυνάμεις (N)	57

5.2.3.	Κύριες τάσεις (σ_1, σ_3)-----	60
5.3.	Επίδραση γεωτεχνικών χαρακτηριστικών-----	65
5.3.1.	Φορτία (p)-----	65
5.3.2.	Αξονικές δυνάμεις (N)-----	72
5.3.3.	Κύριες τάσεις (σ_1, σ_3)-----	75
5.4.	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα-----	80
5.4.1.	Φορτία (P)-----	80
5.4.2.	Αξονικές δυνάμεις (N)-----	84
6.	Συμπεράσματα & Προτάσεις-----	89
6.1.	Συμπεράσματα-----	89
6.2.	Προτάσεις-----	90

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Ταξινόμηση της βραχώμαζας κατά το σύστημα GSI. -----	6
Σχήμα 2.2: Γραφική απεικόνιση περιβάλλουσας αστοχίας Mohr-Coulomb. -----	9
Σχήμα 2.3: Συσχέτιση ελάχιστων και μέγιστων κυρίων τάσεων κριτηρίου Hoek-Brown και Mohr- -----	10
Σχήμα 3.1: Τριδιάστατη άποψη της διακριτοποίησης των δίδυμων σηράγγων (a). -----	16
Σχήμα 3.2: Τυπική διατομή – πλάγια όψη από τη θετική διεύθυνση x (b). Κάτοψη (c).-----	16
Σχήμα 3.3: Γεωμετρικό μοντέλο (αριστερά): (a) Τριδιάστατη γεωμετρία. (b) Διδιάστατη γεωμετρία. -----	18
Σχήμα 3.4: Εξεταζόμενες σήραγγες (το σχήμα δεν είναι υπό κλίμακα). -----	19
Σχήμα 3.5: Σύγκριση των εντατικών μεγεθών για τις δύο περιπτώσεις σχετικής απόστασης μετώπων.-----	19
Σχήμα 3.6: Αξονικές δυνάμεις στη διατομή των σηράγγων, αριστερά η αριστερή σήραγγα και δεξιά η αντίστοιχη.-----	20
Σχήμα 3.7: Καμπτικές ροπές στη διατομή των σηράγγων, αριστερά η αριστερή σήραγγα και δεξιά η αντίστοιχη -----	20
Σχήμα 3.8: Αριθμητικό μοντέλο για πλάτος πυλώνα $W = 2D$ (Chortis F. & Kanvadas M., 2015) -----	22
Σχήμα 3.9: Κατανομή των φορτίων: (αριστερά) στην τυπική διατομή, (πάνω δεξιά) στη διαμήκη διεύθυνση, στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων & χρονοϊστορία των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων (κάτω δεξιά), για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0), για πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ (Chortis F. & Kanvadas M., 2015) -----	23
Σχήμα 3.10: Εκτίμηση του πλάτους του πυλώνα (W/D) για το οποίο η αλληλεπίδραση μεταξύ των -----	24
Σχήμα 3.11: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $\rho_{average}/\rho_0, m$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσε 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) -----	27
Σχήμα 3.12:Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου $\rho_{side} (\theta=90 \text{ \& } \theta=270)/\rho_0, m$ επί των εσωτερικών παρειών συναρτήσε 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) -----	28
Σχήμα 3.13:Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου $\rho/\rho_0, m$ συναρτήσε της γωνίας θ (o) 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) -----	29
Σχήμα 3.14:Κατανομή της ανηγμένης μέσης αξονικής δύναμης επί της άμεσης υποστήριξης ($N_{abs,average}/\rho_0, mD$) συναρτήσε 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) -----	29
Σχήμα 3.15: Κατανομή της ανηγμένης αξονικής δύναμης επί των εσωτερικών παρειών ($N_{abs,side} (\theta=90 \text{ \& } \theta=270)/\rho_0, mD$) συναρτήσε 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 ($\sigma_{cm}/\rho_0=0.21$), -----	30
Σχήμα 3.16: Κατανομή της κανονικοποιημένης αξονικής δύναμης ($N_{abs}/\rho_0, mD$) συναρτήσε 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 $k_0=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0=0.21$), -----	31
Σχήμα 3.17: Λόγος μέσων φορτίων της «πρώτης» προς τη «μονή» σήραγγας ($\rho_{first,avg}/\rho_{single,avg}$) 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)-----	32
Σχήμα 3.18:Λόγος φορτίων στην οροφή (αριστερά) και στην εσωτερική παρειά (δεξιά) της «πρώτης» προς τη «μονή» σήραγγας ($\rho_{first,roof}/\rho_{single,roof}$ & $\rho_{first,side}/\rho_{single,side}$) 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) -----	33
Σχήμα 4.1: Γραφική απεικόνιση της γωνίας θ και στις δύο σήραγγες. -----	48
Σχήμα 5.1: Απεικόνιση της γωνίας θ και στις δύο σήραγγες-----	51

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικός πίνακας γεωμετρικών, γεωτεχνικών και παραμέτρων άμεσης υποστήριξης.

Πίνακας 5.1: Γεωμετρικές και γεωτεχνικές παράμετροι αντιπροσωπευτικών αναλύσεων με τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$ και πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ & 2 .

Πίνακας 5.2: Γεωτεχνικές παράμετροι αντιπροσωπευτικών αναλύσεων για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$ και πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$.

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 4.1: Προοπτική όψη προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 2D = 16m$. -----39

Εικόνα 4.2: Εγκάρσια όψη και διαστάσεις του προσομοιώματος για πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$. -----39

Εικόνα 4.3: Μηκοτομική όψη και διαστάσεις του ίδιου προσομοιώματος. -----40

Εικόνα 4.4: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (οκτακομβικά εξαπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία εδάφους C3D8) της εκσκαφής της σήραγγας. -----40

Εικόνα 4.5: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους S4) της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας. -----41

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 5.1: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων. -----	50
Γράφημα 5.2: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη γεωστατική τάση.-----	52
Γράφημα 5.3: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου ρ/ρ_0 συναρτήσει της γωνίας Θ ($^\circ$) για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (πάνω) & $W = 2D = 16m$ (κάτω) -----	53
Γράφημα 5.4: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη γεωστατική τάση, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.-----	55
Γράφημα 5.5: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη γεωστατική τάση. -----	56
Γράφημα 5.6: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων. -----	57
Γράφημα 5.7: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.-----	58
Γράφημα 5.8: Κατανομή κανονικοποιημένης αξονικής δύναμης $N/\rho_0 D$ συναρτήσει της γωνίας Θ ($^\circ$) για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (πάνω) & $W = 2D = 16m$ (κάτω) -----	59
Γράφημα 5.9: Μηκοτομική απεικόνιση της σ_1 στη βραχόμαζα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των τάσεων. -----	61
Γράφημα 5.10: Μηκοτομική απεικόνιση της σ_3 στη βραχόμαζα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των τάσεων. -----	61
Γράφημα 5.11: Προβολή της σ_1 στην τυπική διατομή για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την αρχική γεωστατική τάση.-----	63
Γράφημα 5.12: Προβολή της σ_3 στην τυπική διατομή για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση-----	64
Γράφημα 5.13: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.-----	66
Γράφημα 5.14: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη γεωστατική τάση.-----	67
Γράφημα 5.15: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου ρ/ρ_0 συναρτήσει της γωνίας Θ ($^\circ$) για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. 68	68

Γράφημα 5.16: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη γεωστατική τάση, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων. -----	70
Γράφημα 5.17: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη γεωστατική τάση. -----	71
Γράφημα 5.18: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων-----	72
Γράφημα 5.19: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων -----	73
Γράφημα 5.20: Κατανομή κανονικοποιημένης αξονικής δύναμης $N/\rho_0 D$ συναρτήσει της γωνίας Θ ($^\circ$) για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. -----	74
Γράφημα 5.21: Μηκοτομική απεικόνιση της σ_1 στη βραχόμαζα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των τάσεων.-----	75
Γράφημα 5.22: Μηκοτομική απεικόνιση της σ_3 στη βραχόμαζα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των τάσεων.-----	76
Γράφημα 5.23: Προβολή της σ_1 στην τυπική διατομή για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την αρχική γεωστατική τάση. -----	78
Γράφημα 5.24: Προβολή της σ_3 στην τυπική διατομή για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση -----	79
Γράφημα 5.25: Λόγος μέσων φορτίων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,avg}/p_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$.-----	80
Γράφημα 5.26: Λόγος φορτίων στην εσωτερική παρειά 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_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$.-----	81
Γράφημα 5.27: Λόγος φορτίων στην οροφή της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,side(\theta = 360^\circ)}/p_{single,side(\theta = 360^\circ)}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$.-----	82
Γράφημα 5.28: Λόγος φορτίων στην οροφή της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,side(\theta = 180^\circ)}/p_{single,side(\theta = 180^\circ)}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$.-----	83
Γράφημα 5.29: Λόγος φορτίων στην οροφή της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,side(\theta = 270^\circ)}/p_{single,side(\theta = 270^\circ)}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$.-----	84

Γράφημα 5.30: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{\text{first,avg}}/N_{\text{single,avg}}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{\text{cm}}/\rho_o$) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 1$. ----- 85

Γράφημα 5.31: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην οροφή της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{\text{first,side}(\theta = 360^\circ)}/N_{\text{single,side}(\theta = 360^\circ)}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{\text{cm}}/\rho_o$) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 1$. ----- 86

Γράφημα 5.32: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{\text{first,side}(\theta = 90^\circ)}/N_{\text{single,side}(\theta = 90^\circ)}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{\text{cm}}/\rho_o$) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 1$. ----- 86

Γράφημα 5.32: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{\text{first,side}(\theta = 180^\circ)}/N_{\text{single,side}(\theta = 180^\circ)}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{\text{cm}}/\rho_o$) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων ----- 87

Γράφημα 5.32: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{\text{first,side}(\theta = 270^\circ)}/N_{\text{single,side}(\theta = 270^\circ)}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{\text{cm}}/\rho_o$) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων ----- 88

Περίληψη

Η κατασκευή υπογείων έργων και ειδικότερα σηράγγων έχει λάβει τα τελευταία χρόνια μεγάλη έκταση τόσο παγκοσμίως όσο και εγχώρια. Λόγω της τεχνολογικής ανάπτυξης στα μέσα κατασκευής, μελετώνται και υλοποιούνται επιτυχώς υπόγεια έργα, που πριν μερικές δεκαετίες ήταν σχεδόν αδιανόητη ή οικονομικώς ασύμφορη η πραγματοποίησή τους. Η αύξηση του πληθυσμού, η έλλειψη χώρου αλλά και οι σύγχρονες συνθήκες ζωής και εμπορίου επιβάλλουν την κατασκευή σηράγγων. Οι σήραγγες (οδικές και σιδηροδρομικές) αποτελούνται πλέον από δυο κλάδους, έναν για κάθε κατεύθυνση. Στην επιλογή αυτή συντελούν τόσο κατασκευαστικοί λόγοι όσο και λόγοι ασφαλείας. Επομένως, κρίνεται αναγκαίο η πρόβλεψη και η έρευνα της αλληλεπίδρασης που παρουσιάζουν μεταξύ τους οι δίδυμων σήραγγες κατά τη διάρκεια κατασκευής του.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό να διερευνηθεί σε βάθος και να ποσοτικοποιηθεί το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης βαθιών σηράγγων. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται δύο από τις βασικότερες παραμέτρους που επηρεάζουν τον μηχανισμό αυτό αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων, δηλαδή το πλάτος του πυλώνα και οι γεωτεχνικές συνθήκες. Για το σκοπό της έρευνας συγκεντρώθηκαν βιβλιογραφικά δεδομένα που αναφέρονται στο συγκεκριμένο ζήτημα, ενώ πραγματοποιήθηκαν τρισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Η ποσοτικοποίηση του φαινομένου γίνεται σε όρους φορτίου, εντατικών μεγεθών της άμεσης υποστήριξης και τάσεων στη βραχώμαζα.

Τα αποτελέσματα των εν λόγω αναλύσεων υποδεικνύουν ότι ο μηχανισμός της αλληλεπίδρασης δίδυμων βαθιών σηράγγων, που προκαλεί αύξηση των φορτίων και των εντατικών μεγεθών, περιορίζεται με την αύξηση του πλάτους του πυλώνα και τη βελτίωση της ποιότητας της βραχώμαζας.

Abstract

The construction of underground works and tunnels in particular has increased both globally and domestically in recent years. Due to technological development in the field of construction, underground works, which a few decades ago were almost unthinkable or economically unprofitable to achieve, are being designed and successfully executed. Population growth, lack of space, modern living and commercial conditions require the construction of tunnels. Tunnels (road and rail) are now composed of two branches, one for each direction, due to functionality and safety reasons. Therefore, it is necessary to predict and investigate the interaction between these two branches. It is a complicated phenomenon that the engineer faces early from the design stage.

The current postgraduate thesis investigates the interaction between deep twin circular supported tunnels. More specifically, two of the most important factors affecting this interaction mechanism of adjacent tunnels are the pillar width and the geotechnical conditions, which are examined. For the purpose of the investigation, bibliographic data were gathered and three-dimensional analyses were conducted, using the finite element code Abaqus. The quantification of the interaction is done in terms of pressure and hoop force on the immediate support shell and in terms of main stresses of elements on the excavation perimeter.

The results of the current thesis indicate that the interaction between twin deep tunnels is eliminated by increasing the pillar width and improving the quality of the rock mass.

1. Εισαγωγή

Η κατασκευή υπογείων έργων και ειδικότερα σηράγγων έχει λάβει τα τελευταία χρόνια μεγάλη έκταση τόσο παγκοσμίως όσο και εγχώρια. Λόγω της τεχνολογικής ανάπτυξης στα μέσα κατασκευής, μελετώνται και υλοποιούνται επιτυχώς υπόγεια έργα, που πριν μερικές δεκαετίες ήταν σχεδόν αδιανόητη ή οικονομικώς ασύμφορη η πραγματοποίησή τους. Η αύξηση του πληθυσμού, η έλλειψη χώρου αλλά και οι σύγχρονες συνθήκες ζωής και εμπορίου επιβάλλουν την κατασκευή σηράγγων. Ειδικότερα, σήραγγες κατασκευάζονται σε :

1. Οδικά και σιδηροδρομικά συγκοινωνιακά δίκτυα:
 - για διάβαση ορεινών όγκων (σιδηροδρομική σήραγγα Καλλιδρόμου, σήραγγες Κακιάς Σκάλας)
 - για παράκαμψη δυσμενών γεωλογικών συνθηκών, όπως κατολισθήσεων ή ρηξιγενών ζωνών (π.χ. οδική σήραγγα Ανηλίου)
 - για περιβαλλοντικούς λόγους (π.χ. οδική σήραγγα παράκαμψης του αρχαιολογικού χώρου Δωδώνης)
2. Αστικά συστήματα μαζικής μεταφοράς (Μετρό)
3. Υδραυλικά έργα
 - υδραγωγεία (σήραγγες Μόρνου, Ευήνου, εκτροπής Αχελώου)
 - έργα ταμίευσης (σήραγγες εκτροπής και υπερχείλισης φραγμάτων)
 - αποχετεύσεις και αποστραγγίσεις (σήραγγα Κάρλας στη Θεσσαλία, σήραγγα Καρδίτσας στον Βοιωτικό Κηφισό)
4. Έργα αποστράγγισης για τη βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας πρανών (π.χ. σήραγγες Μαλακάσας, Παναγοπούλας)

Τα τελευταία χρόνια, οι σήραγγες (οδικές και σιδηροδρομικές) αποτελούνται από δυο κλάδους, έναν για κάθε κατεύθυνση. Στην επιλογή αυτή συντελούν τόσο κατασκευαστικοί λόγοι όσο και λόγοι ασφαλείας. Αναλυτικότερα, η κατασκευή δυο διατομών μικρότερων διαστάσεων είναι ευκολότερη σε σχέση με μια διατομή μεγαλύτερης διαμέτρου, όταν ο διατιθέμενος μηχανισμός εκσκαφής και οι ιδιότητες της βραχώμαζας το επιτρέπουν. Ως προς την ασφάλεια επιλέγεται η κατασκευή σηράγγων διπλού κλάδου (δίδυμες σήραγγες) καθώς η πρόκληση ατυχήματος στον ένα κλάδο καθιστά δυνατή τη διαφυγή στο δεύτερο μέσω της συνδετήριας σήραγγας.

Κατά τη διάρκεια κατασκευής δίδυμων σηράγγων, η εκσκαφή κάθε σήραγγας-κλάδου δημιουργεί μία ζώνη διαταραχής στον περιβάλλοντα χώρο. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η εκτίμηση του μεγέθους αυτής της διαταραχής που προκαλείται στον πρώτο κλάδο κατά τη διάρκεια κατασκευής του δεύτερου αλλά και η εκτίμηση της συμπεριφοράς του δεύτερου αυτού κλάδου συγκριτικά με την διάνοιξη ενός μονού κλάδου.

Ο μηχανισμός αυτός αλληλεπίδρασης δίδυμων σηράγγων αποτελεί το αντικείμενο μελέτης της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας. Οι βασικότερες παράμετροι που καθορίζουν το βαθμό αλληλεπίδρασης δίδυμων σηράγγων είναι το πλάτος του πυλώνα, ο συντελεστής των

οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και οι γεωτεχνικές συνθήκες. Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ανάλυση των παραμέτρων αυτών αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων. Για την περισσότερο λεπτομερή εξαγωγή αποτελεσμάτων σε ένα ευρύτερο φάσμα εξετάζονται τρία διαφορετικά μεγέθη πλάτους πυλώνα (εγκάρσια απόσταση μεταξύ των παρειών των γειτονικών παράλληλων σηράγγων) και ένα μεγάλο εύρος γεωτεχνικών συνθηκών. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών επιτρέπουν τη μελέτη της συμπεριφοράς των δυο κλάδων, καθώς και της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται διερεύνηση των εντατικών μεγεθών (αξονικών δυνάμεων) και των φορτίων της άμεσης υποστήριξης (εκτοξευόμενου σκυροδέματος) αλλά και των τάσεων που αναπτύσσονται στη βραχώμαζα.

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία δομείται, πλέον της εισαγωγής, από πέντε κεφάλαια. Στην αρχή της εργασίας αυτής (Κεφάλαιο 2), γίνεται μια σύντομη αναφορά στο γεωλογικό και γεωτεχνικό θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασίστηκε η παρούσα διπλωματική εργασία. Στο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής επισκόπησης (Κεφάλαιο 3) παρουσιάζονται συνοπτικά και ενδεικτικά σχετικές έρευνες με αντικείμενο μελέτης το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης δίδυμων σηράγγων. Στο 4ο κεφάλαιο περιλαμβάνεται η περιγραφή της διαδικασίας των αναλύσεων και της μόρφωσης των αριθμητικών προσομοιωμάτων. Το 5ο κεφάλαιο περιλαμβάνει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα από τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της έρευνας. Ταυτόχρονα εμπεριέχει παρατηρήσεις και σχολιασμό αυτών των αποτελεσμάτων. Το τελευταίο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 6) κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σε συνδυασμό με προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης δίδυμων σηράγγων.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας γίνεται παράθεση και επεξήγηση όλων των βασικών θεωρητικών εννοιών που χρησιμοποιήθηκαν. Ειδικότερα, παρουσιάζονται η μέθοδος NATM, οι μέθοδοι ταξινόμησης της βραχόμαζας καθώς και τα κριτήρια αστοχίας που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις.

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.

2.1.1. Μέθοδος NATM

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 από 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.

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 βραχώμαζας 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 αγκυρίων πλήρους πάκτωσης με τσιμεντένεμα, ή τυχόν ατελής επαφή των χαλύβδινων πλαισίων με τη βραχώμαζα κ.τ.λ.

2.2. Συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας

Η τεχνική διάνοιξης των σηράγγων κρίνει απαραίτητη την ταξινόμηση της βραχώμαζας τόσο κατά το σχεδιασμό όσο και κατά την κατασκευή του έργου. Για να πραγματοποιηθεί σωστά η μελέτη και η κατασκευή απαιτείται να ποσοτικοποιηθούν οι ιδιότητες της βραχώμαζας που θα συναντηθούν κατά το μήκος διάνοιξης κάθε σήραγγας. Αυτό πραγματοποιείται με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις γεωτεχνικές έρευνες που πραγματοποιούνται. Κατά τη φάση της κατασκευής, η ταξινόμηση της επιτόπου βραχώμαζας σε κατηγορίες είναι απαραίτητη στην απόφαση περί της εφαρμοστέας τυπικής διατομής της μελέτης του έργου. Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας είναι:

1. Το σύστημα RMR (Bieniawski)
2. Το σύστημα Q (NGI)
3. Το σύστημα GSI

Στη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται ως σύστημα ταξινόμησης της βραχώμαζας το GSI, το οποίο παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω.







Το σύστημα GSI (Geological Strength Index) αρχικώς προτάθηκε από τον Hoek (1995), και με βελτιώσεις από τους Hoek, Marinos & Benissi το 1998 και το 2000, δίνει ιδιαίτερη έμφαση σε σχετικώς πτωχής ποιότητας βραχώμαζες με $RMR < 40$ αλλά με λειτουργία αλληλεμπλοκής μεταξύ των βραχωδών τεμαχών. Τέτοιου τύπου βραχώμαζες δομούν ένα σημαντικό ποσοστό του Ελληνικού χώρου και συνεπώς έχουν μεγάλη σημασία στο σχεδιασμό υπογείων έργων.

Το σύστημα GSI σχεδιάσθηκε ώστε εν γένει να είναι συμβατό με το σύστημα RMR για βραχώμαζες με $RMR > 40$, δηλαδή οι τιμές του δείκτη GSI είναι περίπου ίσες με τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη RMR. Για βραχώμαζες με $RMR < 40$, το σύστημα GSI πλεονεκτεί επειδή παρέχει καλύτερη διακριτοποίηση, χωρίς απότομες μεταβολές της τιμής του δείκτη, ενώ ταυτοχρόνως παραμένει συμβατό με το σύστημα RMR.

Το σύστημα GSI βασίζεται στη συναξιολόγηση δυο παραμέτρων:

- a) Της δομής της βραχώμαζας, που χαρακτηρίζει το βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχωδών τεμαχών.
- b) Της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής αντοχής τους.

Η συναξιολόγηση των παραμέτρων και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη GSI φαίνονται στο Σχήμα 2.1. Το σύστημα GSI εφαρμόζεται σε βραχώμαζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών, δηλαδή σε βραχώμαζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού (τυπικά λιγότερο από 20% του συνολικού όγκου της βραχώμαζας).

<p>ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) (E. Hoek, Π. Μαρίνος, 2000)</p> <p>Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών της βραχώδους εκτίμηστε τη μέση τιμή του GSI από τις καμπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI = 35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γειτονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθεις που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως διατημημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώδους. Η ανταχή οριζώντων βραχομοζών μειώνεται από την παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μέτρησης, πτωχής και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχειών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργιών τάσεων στους υπολογισμούς.</p>	<p>ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ</p> <p>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, υγρές, μη αποσφραγισμένες επιφάνειες</p> <p>ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσφραγισμένες και αεραγωγάς επιφάνειες</p> <p>ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσφραγισμένες και εραλλοιωμένες επιφάνειες</p> <p>ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με σημαντική επηλυκώματα ή υλικό πλήρωσης με γυνιώδη βράουλαστα</p> <p>ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσφραγισμένες με μαλακό οργανικό υλικό πλήρωσης ή επηλυκώσης</p>				
<p>ΔΟΜΗ</p>	<p>ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →</p>				
<p> ΑΡΡΗΚΤΗ Λίγα βραχώδη τεμάχια ή άσπρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση</p>	90			N/A	N/A
<p> ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ/ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ Αδιατάρακτη βραχώδης με πολύ καλά αλληλοκλειδωμένο που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογόνειες ασυνεχειών</p>	80	70			
<p> ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ Μερικώς διαταραγμένη βραχώδης με πολύπλευρα γυνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογόνειες ασυνεχειών</p>		60	50		
<p> ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ/ΠΤΥΧΩΜΕΝΗ Πτυχωμένη με γυνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οικογόνειες ασυνεχειών. Εμμενή στρώσης ή σχιστότητας</p>			40	30	
<p> ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ Ισχυρά κερματισμένη βραχώδης με πτωχά αλληλοκλειδωμένα και με ταυτόχρονη παρουσία γυνιώδων και αποστραγγυλεμένων τεμαχίων</p>				20	
<p> ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ ΔΙΑΤΗΜΜΕΝΗ Φυλλώδης ή σχιστοκοιμημένη και τεκτονικός διατημημένη ασθενής βραχώδης. Η φύλλωση επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γυνιώδων τεμαχίων (η κλίμακα σε αυτό το εικονίδιο δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονιδίων).</p>	N/A	N/A			10

Σχήμα 2.1: Ταξινόμηση της βραχώδους κατά το σύστημα GSI.

2.3. Κριτήρια αστοχίας της βραχώμαζας

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα κριτήρια αστοχίας Hoek-Brown και Mohr-Coulomb, τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια. Αρκετά προγράμματα μή-γραμμικής ανάλυσης της συμπεριφοράς της βραχώμαζας γύρω από υπόγειες εκσκαφές δεν περιλαμβάνουν το κριτήριο Hoek-Brown αλλά το κριτήριο Mohr-Coulomb. Στις περιπτώσεις αυτές είναι χρήσιμη η συσχέτιση μεταξύ των δυο κριτηρίων, δηλαδή ο υπολογισμός των παραμέτρων αντοχής (c , φ) του κριτηρίου Mohr-Coulomb που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων του κριτηρίου Hoek-Brown.

2.3.1. Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown

Οι βραχώμαζες που συναντώνται στη φύση είναι κατά κύριο λόγο ρωγματοωμένες. Για το λόγο αυτό, προσομοιώνονται συνήθως μέσω του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown, το οποίο διαθέτει περιβάλλουσα καμπύλη αστοχίας. Το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown αρχικά προτάθηκε από τους Hoek & Brown (1980) και κατέληξε ύστερα από τροποποιήσεις στην τελική του μορφή από τους Hoek et al. (2002). Η γενικευμένη μορφή του κριτηρίου Hoek-Brown 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. Προσδιορίζεται από τα πειράματα μονοαξονικής θλίψης σε δείγματα άρρηκτου βράχου.

m_b : Σταθερά που χαρακτηρίζει την ποιότητα της βραχώμαζας. Υπολογίζεται από τη σχέση:

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

Στη σχέση αυτή, ο συντελεστής m_i εξαρτάται από το είδος του πετρώματος ενώ η παράμετρος D δηλώνει το βαθμό διαταραχής της βραχώμαζας λόγω χαλάρωσης ή χρήσης εκρηκτικών και κυμαίνεται από 0 έως 1. Η παράμετρος GSI αντιστοιχεί στην τιμή βαθμονόμησης της βραχώμαζας στο σύστημα GSI και εκτιμάται από τα αντίστοιχα διαγράμματα GSI ανάλογα με το γεωλογικό σχηματισμό.

s : Σταθερά που χαρακτηρίζει την ποιότητα της βραχώμαζας. Υπολογίζεται από τη σχέση:

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

a : Σταθερά που χαρακτηρίζει την ποιότητα της βραχώμαζας. Υπολογίζεται από τη σχέση:

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

Με βάση το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown μπορεί να εκτιμηθεί η αντοχή τα ης βραχώμαζας σε μονοαξονική θλίψη ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$), σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} S^a$$

Λόγω της έντονης καμπυλότητας του κριτηρίου Hoek-Brown σε πολύ μικρές τάσεις, οι τιμές που προκύπτουν από την ανωτέρω σχέση είναι γενικώς μικρότερες από τις μέσες αντοχές της βραχώμαζας σε μονοαξονική θλίψη. Για το λόγο αυτό η συνολική αντοχή της βραχώμαζας υπολογίζεται από την ακόλουθη εμπειρική σχέση:

$$\sigma_{cm} = 0.019 \sigma_{ci} \exp\left(\frac{GSI}{20}\right) \quad (Hoek, 1999)$$

2.3.2. Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (1776) χρησιμοποιείται ευρέως στην Εδαφομηχανική και είναι εφαρμόσιμο σε εδαφικούς ή βραχώδεις σχηματισμούς. Με βάση τον νόμο τριβής του Coulomb καθορίζεται ο συνδυασμός της ορθής και της διατμητικής τάσης, ο οποίος θα έχει ως αποτέλεσμα την αστοχία του υλικού, ενώ με τον κύκλο του Mohr προσδιορίζεται το ζεύγος των κυρίων τάσεων, οι οποίες θα οδηγήσουν στο συνδυασμό της ορθής και της διατμητικής τάσης που θα καταλήξουν στην αστοχία της βραχώμαζας, καθώς και στην διεύθυνση του επιπέδου κατά το οποίο η βραχώμαζα θα αστοχήσει.

Το κριτήριο αυτό είναι εφαρμόσιμο και στη Βραχομηχανική, για κερματισμένες βραχώμαζες ή για να εκφράσει την αστοχία σε επίπεδο ασυνέχειας. Ουσιαστικά 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:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi$$

Όπου:

τ : Η διατμητική τάση κατά την αστοχία.

σ : Η ορθή τάση κατά την αστοχία.

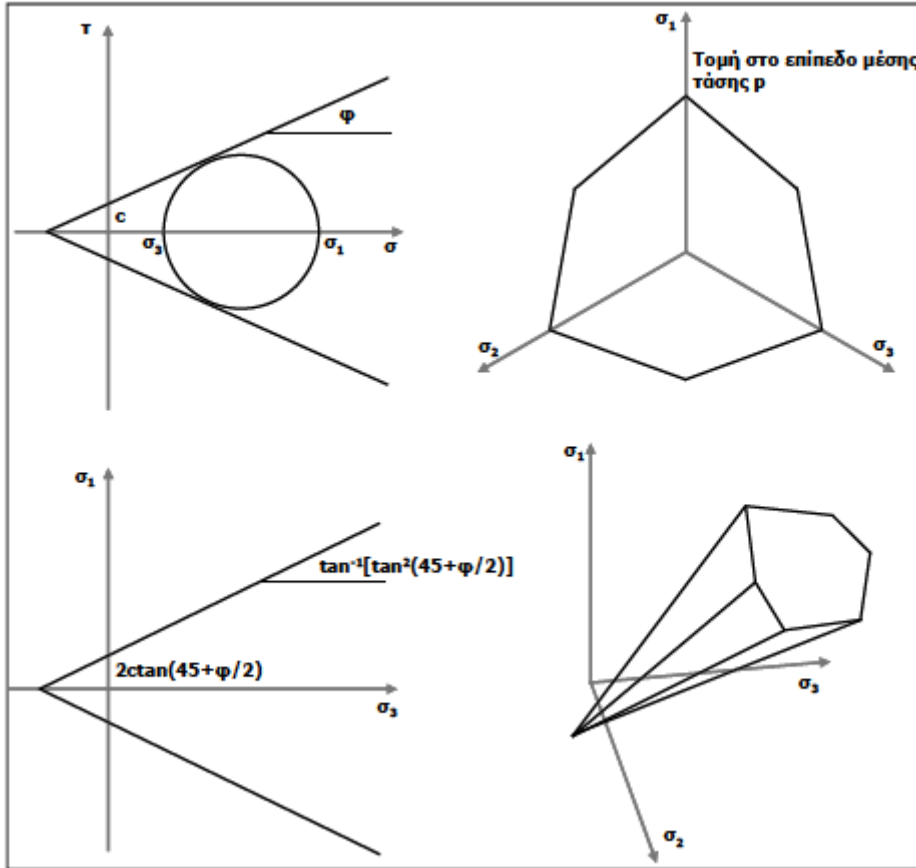
Η συμπεριφορά του υλικού εξαρτάται από την γωνία τριβής φ , η οποία μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά, καθώς και από την συνοχή c , στην περίπτωση που το υλικό είναι συνεκτικό. Για μη συνεκτικό υλικό λαμβάνεται $c=0$.

Το κριτήριο αυτό μπορεί να εκφραστεί και σε όρους τάσεων με την εξής μορφή:

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

Με βάση το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb μπορεί να εκτιμηθεί η αντοχή της βραχώμαζας σε ανεμπόδιστη θλίψη ($\sigma_3=0$):

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



Σχήμα 2.2: Γραφική απεικόνιση περιβάλλουσας αστοχίας Mohr-Coulomb.

2.3.3. Συσχέτιση κριτηρίων Hoek-Brown και Mohr-Coulomb

Γενικά προτιμάται η προσομοίωση της βραχώμαζας μέσω του κριτηρίου Hoek-Brown λόγω του ότι αυτό διαθέτει καμπύλη περιβάλλουσα αστοχίας η οποία είναι πλησιέστερη στην καμπύλη περιβάλλουσα των κύκλων Mohr που συνήθως διαθέτει η 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. Στις περιπτώσεις αυτές είναι χρήσιμη η συσχέτιση των δυο 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. Είναι προφανές ότι λόγω της διαφορετικής μορφής της περιβάλλουσας αστοχίας (καμπύλη περιβάλλουσα για το Hoek-Brown και ευθύγραμμη για το Mohr-Coulomb), η αντιστοιχία μεταξύ των δυο κριτηρίων αναφέρεται σε συγκεκριμένη περιοχή τάσεων όπου η καμπύλη περιβάλλουσα του κριτηρίου Hoek-Brown προσεγγίζεται με μια ευθεία (Σχήμα 2.3). Συνεπώς αναπτύσσεται μια μεθοδολογία υπολογισμού των ισοδύναμων παραμέτρων (c, φ) από

τις παραμέτρους του κριτηρίου Hoek-Brown. Σύμφωνα με αυτή, ορίζεται μια ορθή τάση σ_{3max} , ο υπολογισμός της οποίας διαφέρει σε κάθε περίπτωση. Για τις σήραγγες προκύπτει ότι η σχέση που δίνει αυτή την ορθή τάση είναι η εξής:

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

Όπου:

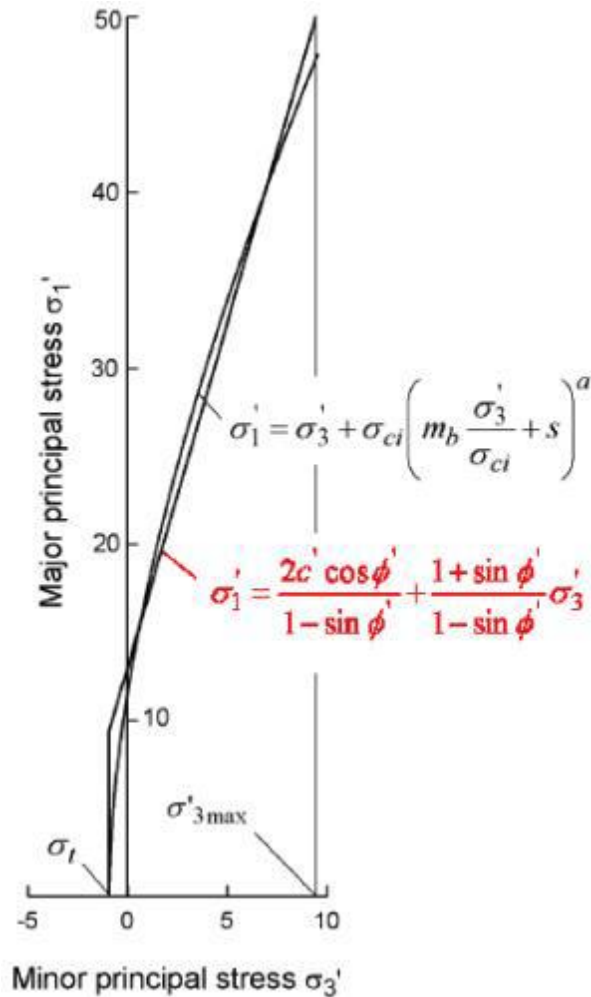
σ_{cm} : Η αντοχή της βραχώμαζας.

γ : Το ειδικό βάρος του εδάφους.

H: Το ύψος των υπερκείμενων γαιών.

Η αντοχή της βραχώμαζας σ_{cm} δίνεται από τη 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 2.3: Συσχέτιση ελάχιστων και μέγιστων κυρίων τάσεων κριτηρίου Hoek-Brown και Mohr-Coulomb.

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

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

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

3. Βιβλιογραφικές Αναφορές

Η απαιτούμενη απόσταση μεταξύ των παράλληλων κλάδων δύο δίδυμων σηράγγων (πλάτος πυλώνα – pillar width) και η βέλτιστη σχετική απόσταση των μετώπων εκσκαφής (lagging distance) αποτελούν σημαντικούς παράγοντες τόσο κατά το σχεδιασμό όσο και κατά την κατασκευή δίδυμων σηράγγων. Ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης δίδυμων σηράγγων κατά την διάνοιξη τους αποτελεί αντικείμενο μελέτης τα τελευταία χρόνια.

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται έρευνες με αντικείμενο μελέτης τον βαθμό αλληλεπίδρασης δίδυμων βαθιών σηράγγων, που έχουν γίνει είτε πειραματικά είτε με τρισδιάστατες αναλύσεις. Υιοθετείται ενιαίος συμβολισμός των μεγεθών προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα που προκύπτουν σε κάθε περίπτωση. Ως W λαμβάνεται η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των σηράγγων (πλάτος πυλώνα), ως L η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των σηράγγων, ως D η διάμετρος της σήραγγας και ως H το ύψος των υπερκείμενων γαιών (βάθος σήραγγας).

3.1. Terzaghi H., 1942, Ward W.H. & Thomas H.S.H., 1965

Παρουσιάζονται μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε υπάρχουσες δίδυμες σήραγγες πραγματικών διαστάσεων για δυο διαφορετικά εδαφικά υλικά, για την άργιλο του Σικάγου και για την άργιλο του Λονδίνου.

Στην πρώτη περίπτωση η απόσταση W μεταξύ των δυο κλάδων είναι ίση με $0.425D$ ($W=0.425D$), ενώ στη δεύτερη περίπτωση η αντίστοιχη απόσταση είναι ίση με $0.6D$ ($W=0.6D$). Σχετικά με την αλληλουχία των εκσκαφών, και για τα δυο έργα, αρχικά ολοκληρώνεται η διάνοιξη της πρώτης σήραγγας και στη συνέχεια ακολουθεί ή εκσκαφή της δεύτερης.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων διαπιστώνεται ότι η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων και για τα δυο περιστατικά είναι σημαντική. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούνται σημαντικές ακτινικές μετατοπίσεις στην επένδυση της πρώτης σήραγγας εξαιτίας της διάνοιξης της γειτονικής, της τάξεως του 0.1% και 0.12% της ακτίνας των σηράγγων του Σικάγου και του Λονδίνου αντίστοιχα.

3.2. Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C., 1996

Η έρευνα των Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C. (1996) αφορά το σχεδιασμό δίδυμων σηράγγων σε μαλακούς σχηματισμούς. Σύμφωνα με την έρευνα ο μηχανισμός των παραμορφώσεων των σηράγγων είναι εξαιρετικά πολύπλοκος. Το επί τόπου εντατικό πεδίο, η ποιότητα της βραχώμαζας, η αλληλουχία της εκσκαφής, ο χρόνος τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης και η γεωμετρία των σηράγγων αποτελούν σημαντικούς παράγοντες για την παραμόρφωση των σηράγγων. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, οι επικρατέστερες θεωρήσεις σχετικά με τις παραμέτρους αυτές είναι οι ακόλουθες:

Πλάτος πυλώνα

Σχετικά με το πλάτος του πυλώνα, αναφέρουν ότι οι δυο κλάδοι της σήραγγας λαμβάνονται ως ανεξάρτητες κατασκευές αν αυτό είναι μεγαλύτερο των δυο διαμέτρων. Σύμφωνα με τη θεώρησή τους, η μέση τάση S_p που ασκείται στον πυλώνα μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$S_p = \gamma H \left(1 + \frac{B}{W}\right)$$

Όπου γ είναι το ειδικό βάρος της βραχώμαζας, H το ύψος των υπερκειμένων γαιών, B η διάμετρος της σήραγγας και W το πλάτος του πυλώνα.

Αντίστοιχα, η μονοαξονική αντοχή του πυλώνα σ_p μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

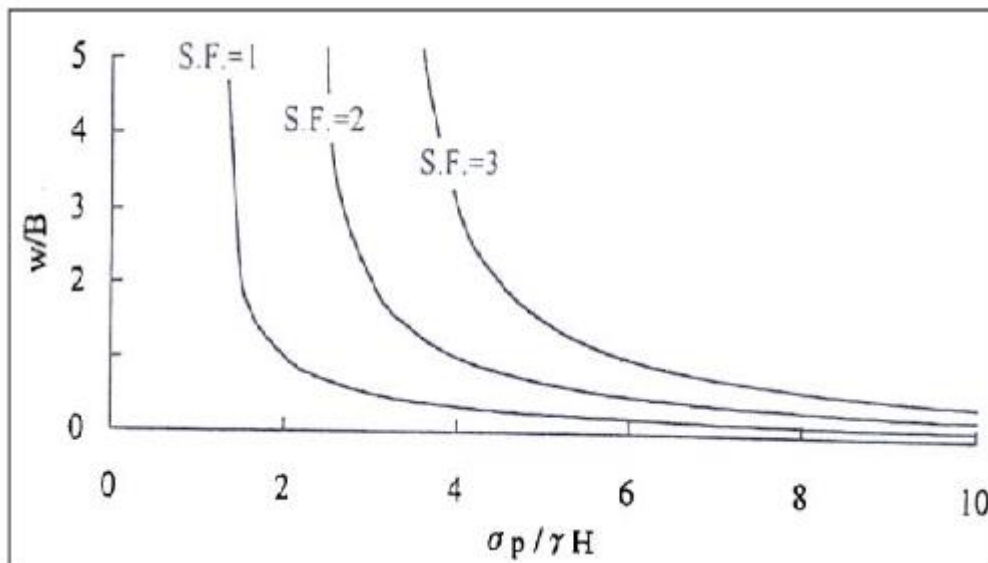
$$\sigma_p = \frac{2c \cos\varphi}{1 - \sin\varphi}$$

Όπου c και φ οι παράμετροι διατμητικής αντοχής της βραχώμαζας.

Συνεπώς ο συντελεστής ασφάλειας έναντι αστοχίας, ο οποίος κατά το σχεδιασμό απαιτείται να είναι αυξημένος, είναι ίσος με:

$$SF = \frac{\sigma_p}{S_p}$$

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο λόγος του πλάτους του πυλώνα προς την διάμετρο των σηράγγων (W/B) σε συνάρτηση με την μονοαξονική αντοχή του πυλώνα κανονικοποιημένη ως προς τις γεωστατικές τάσεις ($\sigma_p/\gamma H$), για κυμαινόμενο συντελεστή ασφαλείας από 1 έως 3.



Γράφημα 3.1: Λόγος του πλάτους του πυλώνα σε σχέση με την μονοαξονική αντοχή του πυλώνα, κανονικοποιημένη ως προς τη γεωστατική τάση.

Από τα παραπάνω προκύπτει πως κατάλληλη απόσταση μεταξύ των δυο κλάδων των σηράγγων είναι εκείνη για την οποία ισχύει $S_p < \sigma_p$. Εάν η απόσταση αυτή δε μπορεί να επιτευχθεί για πρακτικούς λόγους, κυρίως εξαιτίας περιορισμών που επιβάλλει η οδοποιία, τότε θα πρέπει να εφαρμοστούν κατάλληλα μέτρα υποστήριξης. Για παράδειγμα, η βραχώμαζα που βρίσκεται μεταξύ των δυο κλάδων μπορεί να ενισχυθεί με τη χρήση προεντεταμένων αγκυρίων τα οποία τοποθετούνται ταυτόχρονα και από τις δυο πλευρές του πυλώνα. Με τον τρόπο αυτό η αρχικά μονοαξονική φόρτιση μετατρέπεται σε τριαξονική.

Αλληλουχία εκσκαφών

Σχετικά με την αλληλουχία των εκσκαφών, αναφέρεται πως η ολομέτωπη εκσκαφή προκαλεί την ταχύτερη φόρτιση της διατομής, συνεπώς και τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Για το λόγο αυτό δεν κρίνεται κατάλληλη η εφαρμογή της σε μαλακούς σχηματισμούς. Στα εδάφη αυτά ο διαχωρισμός του μετώπου σε μικρότερα τμήματα αποτελεί τη πιο ορθή λύση η οποία θα εξασφαλίσει περιορισμό των παραμορφώσεων και συνεπώς ευστάθεια της κατασκευής.

Αναφέρεται παράλληλα, πως η πιο δημοφιλής μέθοδος εκσκαφής μπορεί να χωριστεί σε δυο υπομεθόδους, τη μέθοδο ορθού μετώπου και βαθμίδας και τη μέθοδο της πλευρικής προσβολής. Η μέθοδος διάνοιξης με πλευρικές στοές είναι κατάλληλη για μεγάλα ανοίγματα, για πτωχή ποιότητα βραχώμαζας και κυρίως για εκείνες τις σήραγγες όπου η εξέλιξη των μετακινήσεων θα πρέπει αυστηρά να ελέγχεται. Εμπειρικά, η χρήση της δεύτερης μεθόδου επιτρέπει σχεδόν την ανάπτυξη των μισών μετακινήσεων σε σχέση με αυτές που θα αναπτύσσονταν ύστερα από εφαρμογή της πρώτης μεθόδου.

Παράλληλα, αναφέρεται ότι η ταυτόχρονη εκσκαφή των δυο κλάδων δε συστήνεται, καθώς είναι πιθανό να προκληθεί αιφνίδια χαλάρωση της περιβάλλουσας βραχώμαζας, η οποία μπορεί να προκαλέσει μη αναμενόμενες και εκτεταμένες παραμορφώσεις. Έτσι, είναι προτιμότερο να επιλέγεται η διαδοχική εκσκαφή των δυο κλάδων.

Μέτρα υποστήριξης

Κατά τη διάνοιξη δίδυμων σηράγγων σε μαλακούς σχηματισμούς υπό υψηλά πεδία τάσεων, οι παραμορφώσεις εμφανίζουν χαρακτηριστικά σύνθλιψης. Συνεπώς τα κλασικά μέτρα υποστήριξης (αγκύρια, πλέγμα, εκτοξευμένο σκυρόδεμα) δεν επαρκούν καθώς δεν μπορούν να παρέχουν την απαραίτητη δυσκαμψία και να εξασφαλίσουν ευστάθεια και περιορισμό των παραμορφώσεων. Για παράδειγμα τα αγκύρια είναι αποτελεσματικά για βραχώμαζες μέτρια ρωγατωμένες αλλά δεν παρέχουν τον απαιτούμενο συντελεστή ασφαλείας για έντονα ρωγατωμένες και αποδομημένες βραχώμαζες. Στις περιπτώσεις αυτές κρίνεται σκόπιμη η τοποθέτηση δύσκαμπτης υποστήριξης.

3.3. Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W., 2004

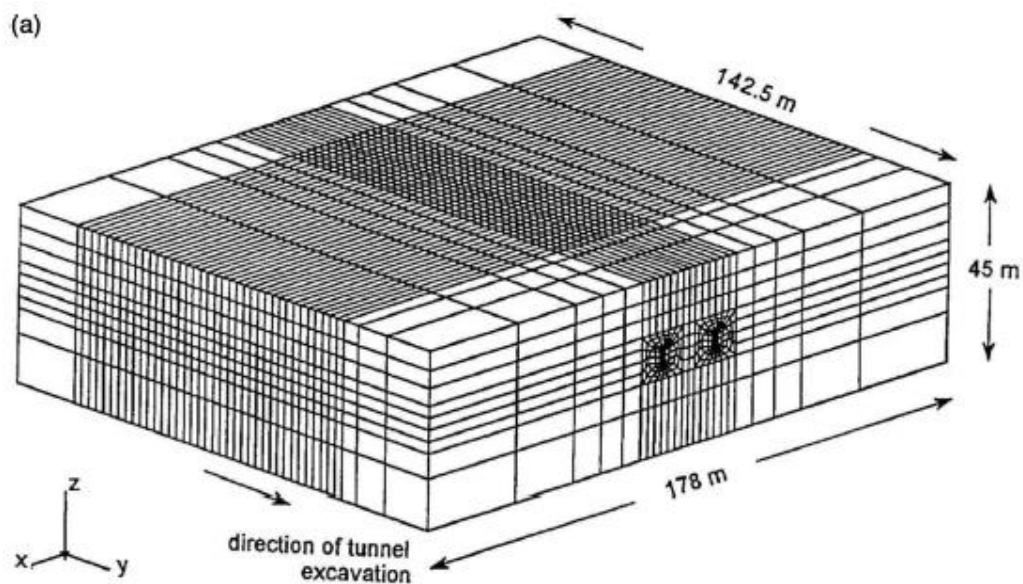
Οι Ng et al. (2004) πραγματοποίησαν μια σειρά τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων σε δίδυμες σήραγγες με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Οι σήραγγες εκσκάπτονται με τη χρήση της Νέας Αυστριακής Μεθόδου (NATM). Στόχος είναι η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των δύο σηράγγων μεταβάλλοντας την απόσταση μεταξύ των δύο μετώπων. Έγιναν πέντε διαφορετικές αναλύσεις στις οποίες εκσκάπτεται πρώτα η αριστερή σήραγγα κι έπειτα η δεξιά σε απόσταση: $LT = 0D, 0.6D, 1.2D, 2.3D$ και $3.5D$. Η προσομοίωση που έκαναν στηρίχθηκε στην πρώτη αστική σήραγγα που κατασκευάστηκε στην Βρετανία με NATM, στην Heathrow Train Tunnel.

Παρατηρήθηκε ότι αναπτύσσονται μεγαλύτερα εντατικά μεγέθη στην αριστερή σήραγγα και μικρότερα στην δεξιά καθώς και ότι όσο μεγαλύτερη απόσταση έχουν τα δύο μέτωπα τόσο μεγαλύτερα είναι αυτά τα εντατικά μεγέθη στην αριστερή, με κρισιμότερες περιοχές το invert και την εσωτερική παρειά της σήραγγας. Συγκεκριμένα, για $LT = 3.5D = 30m$, παρατήρησαν ότι οι καμπτικές ροπές για τις δύο σήραγγες έχουν παρόμοια μορφή με μεγαλύτερες αυτές στην αριστερή σε σχέση με την δεξιά ενώ, οι μέγιστες και ελάχιστες εμφανίζονται στην αριστερή γωνία και στο invert της σήραγγας αντίστοιχα. Γεγονός που αποδίδεται στο ότι η αριστερή σήραγγα καλείται να παραλάβει μεγαλύτερο φορτίο από ότι η δεξιά λόγω μεγάλης απόστασης των δύο

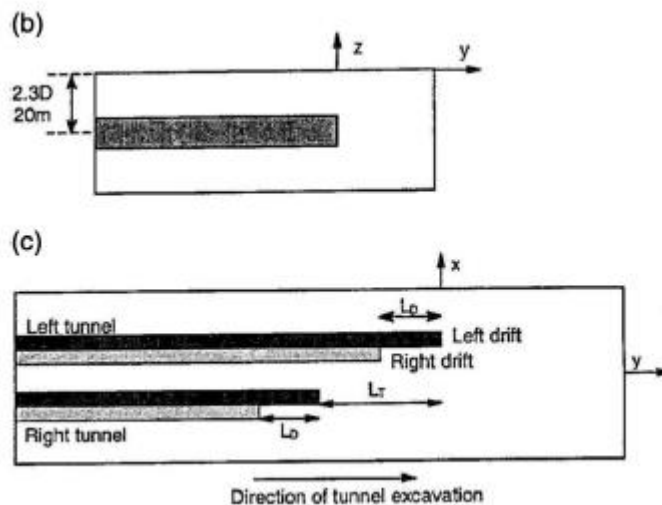
μετώπων. Όταν οι δύο σήραγγες εκσκάπτονται ταυτόχρονα οι μέγιστες καμπτικές ροπές είναι ίδιες και για τις δύο κάτι που υποδεικνύει ότι κάθε μία αναλαμβάνει ίσο φορτίο. Όσο η απόσταση μεγαλώνει (δηλαδή όσο καθυστερεί η εκσκαφή της δεύτερης) τόσο μεγαλύτερο μερίδιο από το φορτίο καλείται να αναλάβει η αριστερή σήραγγα και τόσο μικρότερο κατ' αντιστοιχία η δεξιά.

Ως προς τις δυνάμεις, παρατηρήθηκε ότι οι μεγαλύτερες εμφανίζονται στην εσωτερική παρειά κι όχι στο invert και όσο αυξάνεται η απόσταση των μετώπων αυξάνονται και οι αξονικές δυνάμεις στην αριστερή σήραγγα ενώ μειώνονται στην δεξιά, λόγω της μεταφοράς φορτίου από τη δεύτερη στην πρώτη.

Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε και τα αποτελέσματα των αναλύσεων.



Σχήμα 3.1: Τριδιάστατη άποψη της διακριτοποίησης των δίδυμων σηράγγων (a). (Ng, Lee & Tang, 2004).



Σχήμα 3.2: Τυπική διατομή – πλάγια όψη από τη θετική διεύθυνση x (b). Κάτοψη (c). (Ng, Lee & Tang, 2004).

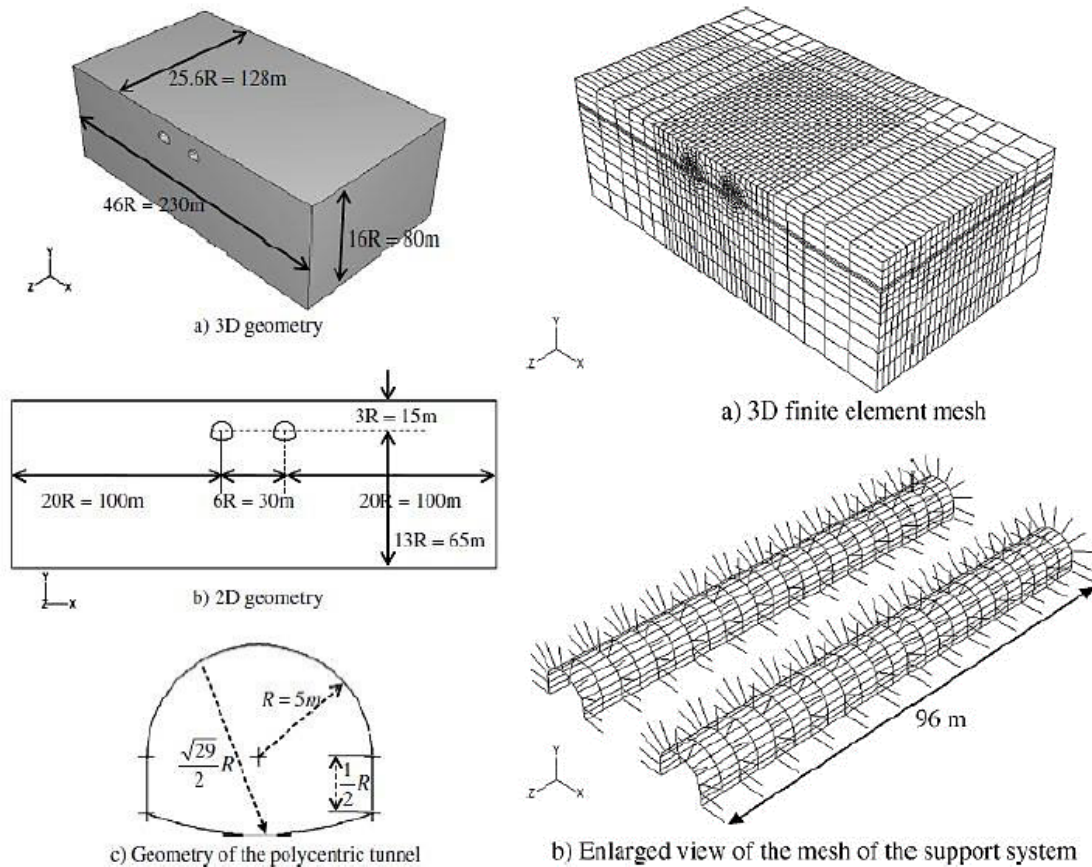
3.4. Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P., 2007

Οι Liu H.Y., Small J.C. & Carter J.P. (2007) στην έρευνά τους μελετούν μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS και το πρόγραμμα TUNNEL3D, το οποίο ανέπτυξαν οι ίδιοι για τη συγκεκριμένη έρευνα, την επίδραση που έχει η διάνοιξη σήραγγας στο υπάρχον σύστημα υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκυρία) μιας γειτονικής σήραγγας, ενώ λαμβάνουν υπόψη τη διαδικασία εκσκαφής, την αλληλεπίδραση μεταξύ της επένδυσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και της βραχόμαζας και την αλληλεπίδραση μεταξύ των αγκυριών και της βραχόμαζας. Οι αναλύσεις αφορούν σε υποθετικές σήραγγες οι οποίες εκσκάπτονται στο Σύννεϋ της Αυστραλίας, περιοχή με την εξής ιδιαιτερότητα: οι οριζόντιες τάσεις είναι πολύ υψηλές.

Καταλήγουν στο ότι η διάνοιξη μιας νέας σήραγγας ασκεί σημαντική επίδραση στο υπάρχον σύστημα υποστήριξης όταν η προώθηση του μετώπου της νέας σήραγγας περνά δίπλα από την υφιστάμενη υποστήριξη, ενώ η επίδραση καθίσταται μικρή όταν το μέτωπο είναι μακριά από αυτήν. Επιπλέον, το σύστημα υποστήριξης της προϋπάρχουσας σήραγγας στη μεριά που εκσκάπτεται η νέα σήραγγα, επηρεάζεται περισσότερο από ότι αυτό που βρίσκεται στην αντίθετη πλευρά.

Επίσης, διερεύνησαν και την απόσταση πυλώνων και την σχετική θέση μεταξύ των δύο σηράγγων και παρατήρησαν ότι η μικρότερη επιρροή υπάρχει όταν διανοίγεται νέα σήραγγα παράλληλη στην προ υπάρχουσα σε απόσταση 30m και την μεγαλύτερη όταν η νέα είναι διαγώνια τοποθετημένη σε απόσταση 20m (σε όρους μέγιστης εφελκυστικής τάσης)

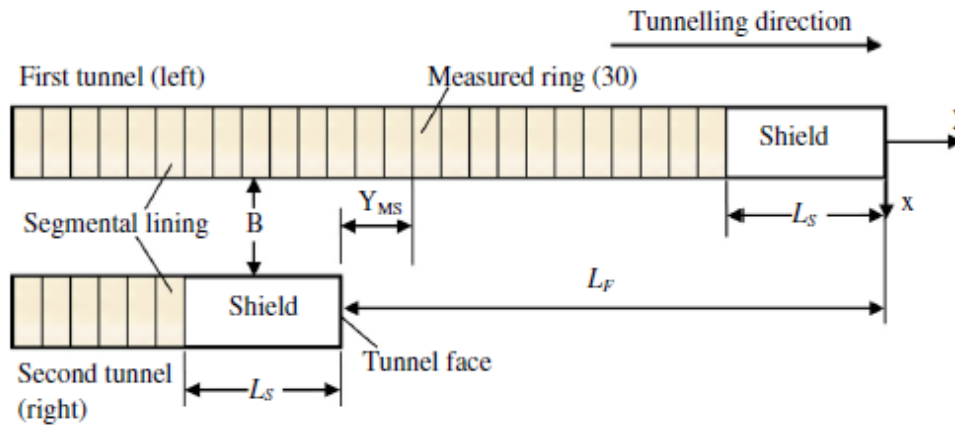
Επισημαίνουν ακόμη ότι σε μια περιοχή όπου κυριαρχούν σχετικά υψηλές οριζόντιες γεωστατικές τάσεις, όπως στο Σύννεϋ, η διάνοιξη μιας νέας σήραγγας δε θα προκαλέσει σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις το υπάρχον σύστημα υποστήριξης, αν η νέα σήραγγα εκσκάπτεται παράλληλα κατά την οριζόντια διεύθυνση με την υφιστάμενη σήραγγα και σε επαρκή απόσταση, καθώς τόσο η εφελκυστική τάση στην υπάρχουσα επένδυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στις παρειές της υφιστάμενης σήραγγας αλλά και η θλιπτική τάση στη στέψη μειώνονται, παρόλο που παρατηρείται αξιοσημείωτη αύξηση της εφελκυστικής τάσης σε ορισμένα τμήματα των υφιστάμενων αγκυριών.



Σχήμα 3.3: Γεωμετρικό μοντέλο (αριστερά): (a) Τριδιάστατη γεωμετρία. (b) Διδιάστατη γεωμετρία. (c) Γεωμετρία της πολυκεντρικής διατομής. Τριδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (δεξιά): (a) Τριδιάστατη διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων. (b) Μεγεθυμένη άποψη της διακριτοποίησης του συστήματος υποστήριξης (Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P., 2007).

3.5. Do N. A., Dias D, Oreste P., Djeran-Maigre I., 2014

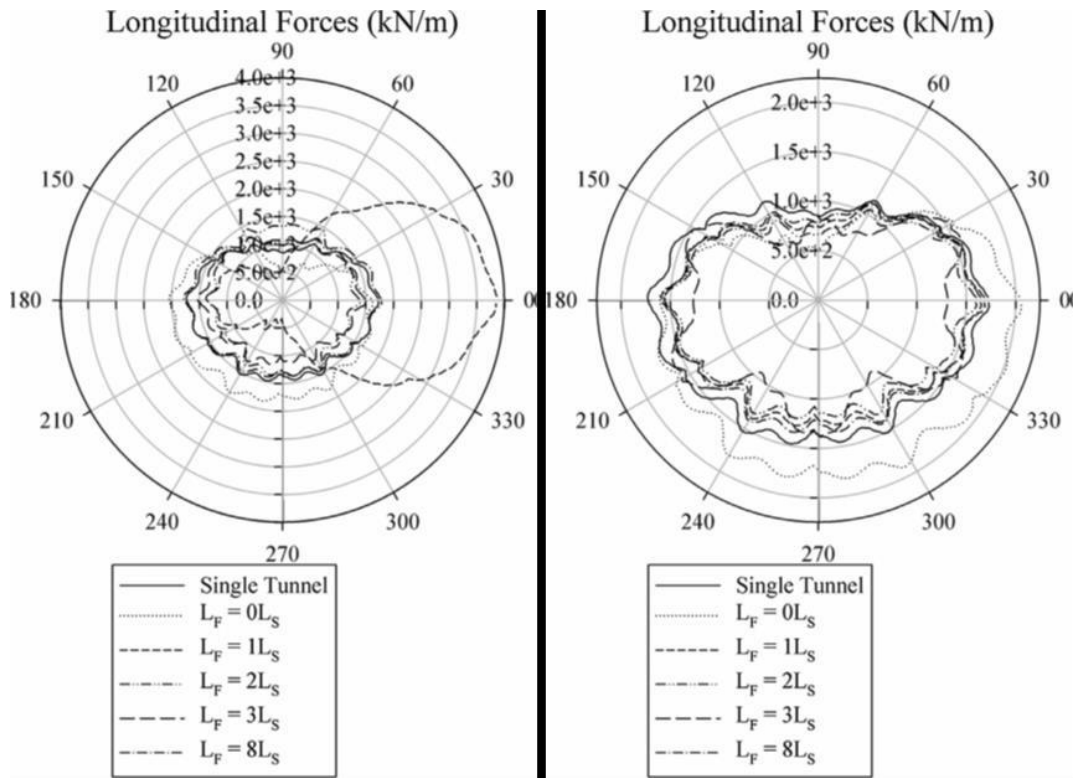
Οι Do et al. (2014) πραγματοποίησαν μια σειρά τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων σε δίδυμες σήραγγες με τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC3D, οι οποίες εκσκάπτονται με τη χρήση της μηχανοποιημένης μεθόδου. Σκοπός τους ήταν η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των δύο σηράγγων μεταβάλλοντας την σχετική απόσταση των δύο μετώπων και η εξαγωγή των εντατικών μεγεθών του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Παρατήρησαν ότι η εκσκαφή της δεύτερης (δεξιάς) σήραγγας έχει μεγαλύτερη επίπτωση στην πρώτη (αριστερή) και κυρίως στην πλευρά που γειτνιάζει με την δεξιά. Επίσης, διαπίστωσαν ότι η μεγαλύτερη επιρροή εμφανίζεται όταν το TBM διέρχεται από την εξεταζόμενη διατομή και ότι αυτή η επιρροή είναι πλέον αμελητέα όταν η απόσταση των δύο μετώπων γίνει 5.3D. Η ταυτόχρονη εκσκαφή των δύο σηράγγων οδηγεί σε μικρότερα εντατικά μεγέθη σε σχέση με την εκσκαφή με μεγάλη απόσταση μεταξύ των μετώπων, ωστόσο, με αυτή την μέθοδο ελλοχεύει ο κίνδυνος μεγάλων καθιζήσεων. Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο που χρησιμοποίησαν και τα αποτελέσματα των αναλύσεων τους:



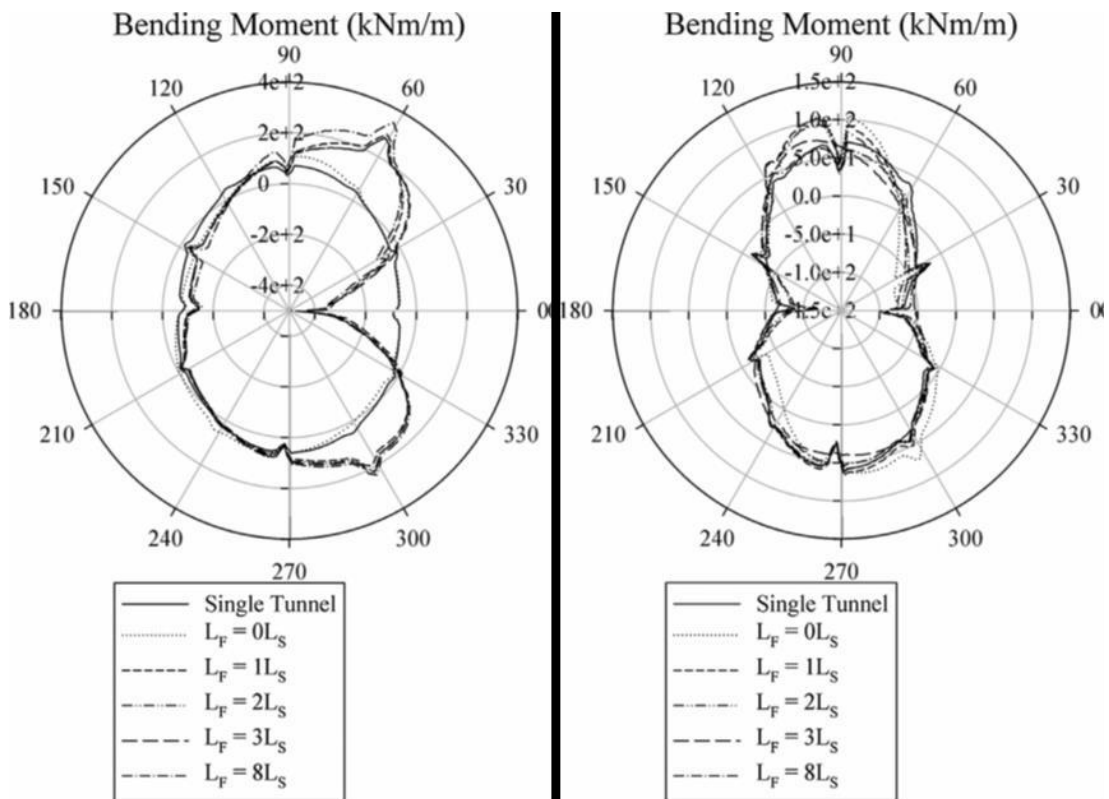
Σχήμα 3.4: Εξεταζόμενες σήραγγες (το σχήμα δεν είναι υπό κλίμακα).

Parameters	Single tunnel	$L_F = 0D$ (A)	$L_F = 10D$ (B)	B/A (%)
Max. pos. bending moment (kN m/m)	71.9	109.9	348.1	316.7
R_{M+} (%)	100.0	152.7	483.8	
Min. neg. bending moment (kN m/m)	-93.8	-97.4	-480.6	493.4
R_{M-} (%)	100.0	103.8	512.0	
Max. normal force (kN/m)	1490	1730	1927	111.4
R_N (%)	100.0	116.1	129.3	
Max. longitudinal force (kN/m)	1745	2057	1798	87.4
R_{LN} (%)	100.0	117.8	103.0	
Max. normal displacement (mm)	5.69	9.39	15.42	164.2
R_{disp+} (%)	100.0	165.1	271.2	
Min. normal displacement (mm)	-2.78	-4.74	-8.65	182.5
R_{disp-} (%)	100.0	170.6	310.8	
Max. settlement (mm)	-27.4	-43.8	-40.3	92.0
R_{set} (%)	100.0	159.9	147.4	

Σχήμα 3.5: Σύγκριση των εντατικών μεγεθών για τις δύο περιπτώσεις σχετικής απόστασης μετώπων.



Σχήμα 3.6: Αξονικές δυνάμεις στη διατομή των σηράγγων, αριστερά η αριστερή σήραγγα και δεξιά η αντίστοιχη.



Σχήμα 3.7: Καμπτικές ροπές στη διατομή των σηράγγων, αριστερά η αριστερή σήραγγα και δεξιά η αντίστοιχη

3.6. Chortis F., Kavvadas M., 2015

Οι Chortis F. & Kavvadas M. (2015) διερευνούν την αλληλεπίδραση μεταξύ δίδυμων, κυκλικής διατομής, υποστηριγμένων σηράγγων, μέσω τριδιάστατων 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: (i) μεγέθη πλάτων πυλώνα (εγκάρσια απόσταση μεταξύ των παρειών των γειτονικών παράλληλων σηράγγων), (ii) γεωτεχνικές συνθήκες (παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας, επί τόπου εντατικό πεδίο κλπ.), (iii) τιμές του ύψους υπερκείμενων γαιών.

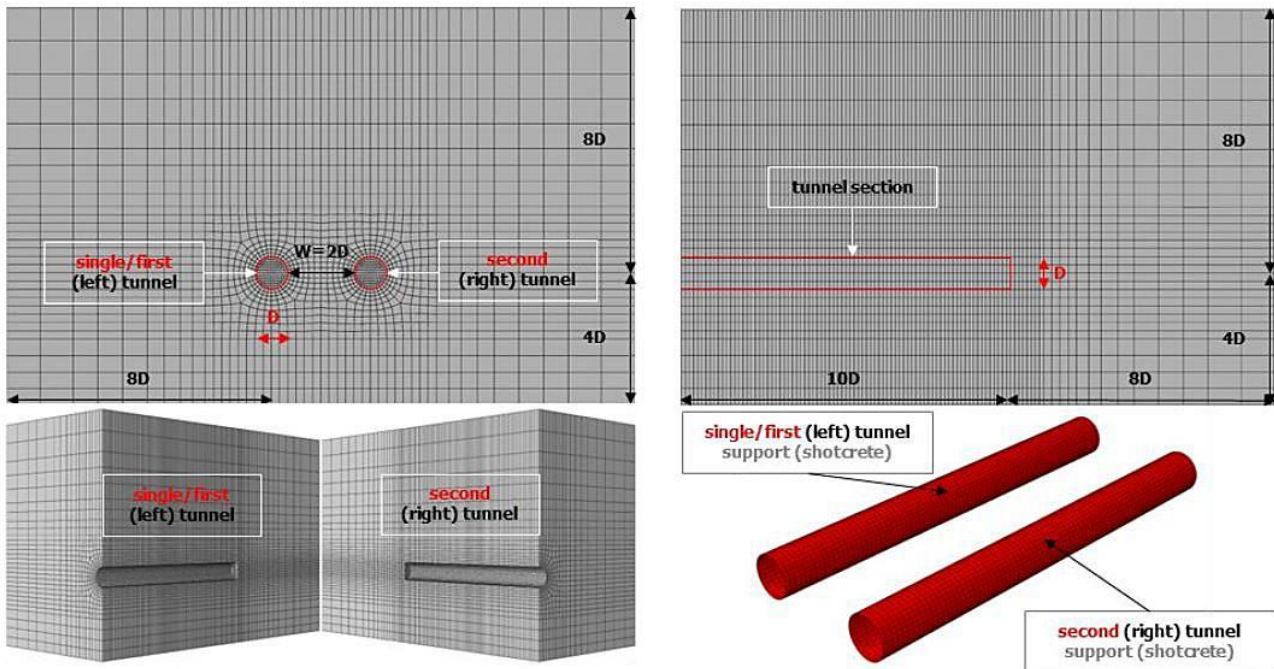
Μια επιπρόσθετη πτυχή της έρευνας των Chortis F. & Kavvadas M. (2015) είναι ο προσδιορισμός της πιο κρίσιμης παραμέτρου αλληλεπίδρασης, δηλαδή, της παραμέτρου που προκαλεί τη μεγαλύτερη επιρροή στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης και ο προσδιορισμός της κρίσιμης τιμής του πλάτους του πυλώνα, η οποία ελαχιστοποιεί το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε κανονικοποιημένα διαγράμματα, τα οποία καταδεικνύουν την επιρροή των παραμέτρων αλληλεπίδρασης που εξετάστηκαν. Η αλληλεπίδραση καθορίζεται ή επηρεάζεται σε ένα σημαντικό βαθμό από τις ακόλουθες παραμέτρους: το πλάτος του πυλώνα, το συντελεστή των οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και τις γεωτεχνικές συνθήκες.

Το πρόβλημα διερευνάται μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων, με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Η διατομή των σηράγγων είναι κυκλική με διάμετρο $D = 8\text{m}$ και το μήκος εκσκαφής είναι $L = 80\text{m} = 10D$ για κάθε σήραγγα αντίστοιχα. Οι Chortis F. & Kavvadas M. (2015) δημιουργούν πέντε αριθμητικά μοντέλα με σκοπό να εξετάσουν το φαινόμενο του πλάτους του πυλώνα, το οποίο ορίζεται ως η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των παρειών των γειτονικών παράλληλων σηράγγων.

Οι βασικές διαστάσεις των αριθμητικών μοντέλων, εξαιρούμενου του πλάτους του πυλώνα που είναι μια μεταβλητή παράμετρος, έχουν σχεδιαστεί σταθερές. Πιο συγκεκριμένα, το μήκος εκσκαφής κάθε σήραγγας, η απόσταση του διαμήκους 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 προσομοίωση του ύψους υπερκείμενων επιτυγχάνεται, εκτός από το ύψος του άνω ορίου, επιβάλλοντας ακόμη επιπρόσθετο, ομοιόμορφα κατανεμημένο, κατακόρυφο φορτίο στην επιφάνεια του αριθμητικού μοντέλου.

Η διαδικασία της εκσκαφής που υιοθετείται στο πλαίσιο της αριθμητικής ανάλυσης και είναι απολύτως κοινή για κάθε σήραγγα, έχει σκοπό να προσομοιώσει με ακρίβεια συμβατική εκσκαφή σήραγγας σε ασθενή βραχώμαζα. Συγκεκριμένα, η εκσκαφή κάθε σήραγγας 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 . Αυτή είναι μια τυπική διαδικασία εκσκαφής σύμφωνα με τις αρχές της Νέας Αυστριακής Μεθόδου (NATM). Η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας πραγματοποιείται ύστερα από την πλήρη εκσκαφή της αριστερής σήραγγας. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί, υπολογιστεί και απομονωθεί η επιρροή της κατά σειρά δεύτερης εκσκαμμένης δεξιάς σήραγγας, στην κατά σειρά πρώτη εκσκαμμένη, αριστερή, σήραγγα, οι Chortis F. & Kavvadas M. (2015) υιοθετούν τις ακόλουθες υποθέσεις: (i) η βάση σύγκρισης είναι η αριστερή σήραγγα πριν ξεκινήσει η εκσκαφή της δεξιάς και ονομάζεται «μονή σήραγγα» (single tunnel), (ii) ύστερα από την εκκίνηση της

εκσκαφής της δεξιάς σήραγγας, η αριστερή ονομάζεται «πρώτη σήραγγα» (first tunnel), (iii) η δεξιά σήραγγα ονομάζεται «δεύτερη σήραγγα» (second tunnel). Αυτή η διάκριση αποτυπώνεται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 3.8: Αριθμητικό μοντέλο για πλάτος πυλώνα $W = 2D$ (Chortis F. & Kavnadas M., 2015)

Η βραχώμαζα προσομοιώνεται ως ισότροπο γραμμικώς ελαστικό – απολύτως πλαστικό υλικό το οποίο ακολουθεί το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι αντοχής (συνοχή, γωνία τριβής) της βραχώμαζας έχουν προσδιοριστεί ως ισοδύναμες παράμετροι με παραμέτρους προέλευσης αυτές του άρρηκτου βράχου, μέσω του συνδυασμού του κριτηρίου Mohr – Coulomb και του γενικευμένου κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown. Επιπροσθέτως, η παράμετρος παραμορφωσιμότητας (μέτρο ελαστικότητας) της βραχώμαζας έχει προσδιοριστεί όπως προτείνεται από τους Hoek and Diederichs (2006). Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προσομοιώνεται ως ισότροπο, γραμμικώς ελαστικό υλικό.

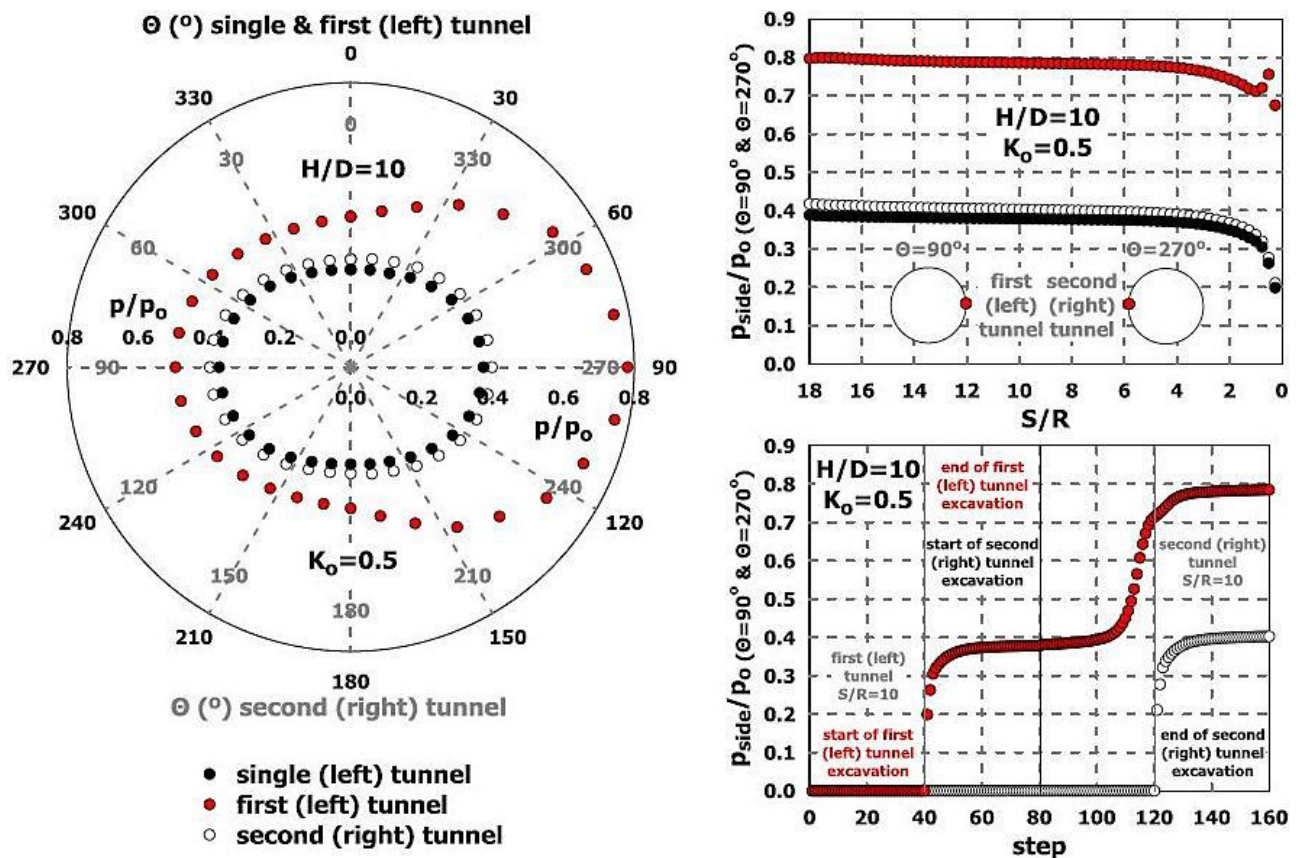
Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που παρουσιάζουν οι Chortis & Kavnadas (2015), αφορούν αρχικά σε μια συγκεκριμένη αριθμητική ανάλυση, η οποία ανταποκρίνεται στη δυσμενέστερη τιμή του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho\sigma$) και στην ελάχιστη τιμή πλάτους του πυλώνα ($W/D = 0.5$), ο συνδυασμός των οποίων, κατά συνέπεια, οδηγεί στη μεγιστοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των σηράγγων. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 2.9 (αριστερά) παρουσιάζεται η κατανομή των φορτίων για τη «μονή σήραγγα» (single tunnel), την «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) και τη «δεύτερη σήραγγα» (second tunnel) συγχρόνως, στην τυπική διατομή όπου τα φορτία κατά τη διαμήκη κατεύθυνση έχουν συγκλίνει στην τελική τιμή.

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν μια υψηλή και κατά συνέπεια σημαντική αύξηση των φορτίων στην «πρώτη σήραγγα» (first tunnel), τα οποία αναπτύσσονται ασύμμετρα και συγκεκριμένα η μεγιστοποίηση της επιρροής παρατηρείται στην εσωτερική παρειά ($\theta = 90^\circ$). Σχετικά με τη «δεύτερη σήραγγα» (second tunnel) τα φορτία αποκλίνουν από το αρχικό μέγεθος όπως αποτυπώνονται για τη «μονή σήραγγα» (single tunnel), σε χαμηλό βαθμό συγκριτικά με την αντίστοιχη αλλαγή που παρατηρείται για την «πρώτη σήραγγα» (first tunnel). Αυτή η

διαφοροποίηση στο βαθμό επιρροής πηγάζει από το γεγονός ότι η «πρώτη σήραγγα» έχει ήδη εκσκαφθεί και υποστηριχθεί όταν η «δεύτερη σήραγγα» εκσκάπτεται. Ως εκ τούτου, η δυνητική ανακατανομή των τάσεων που προκαλείται λόγω της εκσκαφής της «δεύτερης σήραγγας», δεν αναλαμβάνεται μέσω περαιτέρω σύγκλισης, λόγω της άκαμπτης υποστήριξης της «πρώτης σήραγγας», που κατά συνέπεια, οδηγεί σε σημαντική αύξηση των επιβαλλόμενων φορτίων.

Ωστόσο, η «δεύτερη σήραγγα» εκσκάπτεται σε ένα ήδη ανακατανομημένο πεδίο τάσεων με μια προϋπάρχουσα πλαστική ζώνη, στην περίπτωση πτωχών γεωτεχνικών συνθηκών, η οποία οδηγεί σε σχετικά χαμηλή αύξηση των φορτίων.

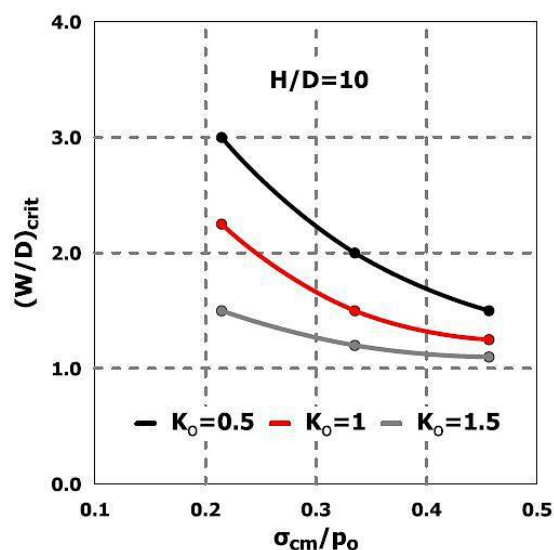
Αυτή η απόκριση στην κατανομή των φορτίων επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα στη διαμήκη διεύθυνση των εσωτερικών παρειών ($\theta = 90^\circ$ & $\theta = 270^\circ$) των σηράγγων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9 (πάνω δεξιά). Επιπροσθέτως, η επιρροή της εκσκαφής της «δεύτερης σήραγγας» στην «πρώτη σήραγγα» απεικονίζεται στη χρονοϊστορία των φορτίων για τη διατομή με κανονικοποιημένη απόσταση από το μέτωπο και για τις δύο σήραγγες $S/R = 10$, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2-46 (κάτω δεξιά) (Chortis F. & Kavvadas M., 2015).



Σχήμα 3.9: Κατανομή των φορτίων: (αριστερά) στην τυπική διατομή, (πάνω δεξιά) στη διαμήκη διεύθυνση, στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων & χρονοϊστορία των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων (κάτω δεξιά), για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0), για πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για λόγο ύψους υπερκευμένων γαιών $H/D = 10$ (Chortis F. & Kavvadas M., 2015)

Η έρευνα των Chortis F. & Kavvadas M. (2015), αποδεικνύει ότι σημαντικά φαινόμενα αλληλεπίδρασης λαμβάνουν χώρα μεταξύ δύο παράλληλων γειτονικών σηράγγων, ειδικά αν η απόσταση μεταξύ τους είναι μικρή. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων καταδεικνύουν ότι η αλληλεπίδραση οδηγεί στη διαφοροποίηση του μεγέθους, σχήματος και κατανομής των φορτίων και των εντατικών μεγεθών (αξονικές δυνάμεις & ροπές κάμψης) της άμεσης υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα). Τα αποτελέσματα ακόμη καταδεικνύουν μια υψηλή και κατά συνέπεια σημαντική αύξηση των φορτίων στην «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) η οποία αναπτύσσεται μη συμμετρικά και ειδικότερα, η μεγιστοποίηση της επιρροής παρατηρείται στην εσωτερική παρειά ($\Theta = 90^\circ$), ανεξαρτήτως της τιμής του λόγου γεωστατικών τάσεων K_0 . Αναφορικά στη «δεύτερη σήραγγα» (second tunnel), τα φορτία αποκλίνουν από το αρχικό μέγεθος όπως φαίνεται για τη «μονή σήραγγα» (single tunnel) σε χαμηλό βαθμό σε σχέση με την αντίστοιχη αλλαγή που παρατηρείται για την «πρώτη σήραγγα» (first tunnel). Ανάλογη τάση παρουσιάζεται για τα εντατικά μεγέθη στην άμεση υποστήριξη (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα). Η αύξηση των φορτίων μπορεί να εκτιμηθεί μέσω των προτεινόμενων κανονικοποιημένων διαγραμμάτων, ως συνάρτηση του λόγου γεωστατικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) και του πλάτους του πυλώνα (W/D). Ο βαθμός της αύξησης καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το πλάτος του πυλώνα (W/D). Υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του πλάτους του πυλώνα $(W/D)_{crit} = 2$ υπό την έννοια ότι για υψηλότερες τιμές αυτού του πλάτους το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι περίπου στο ίδιο επίπεδο. Από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων τα οποία πραγματοποίησαν οι Chortis F. & Kavvadas M. (2015), η εκτίμηση της κρίσιμης τιμής του πλάτους του πυλώνα $(W/D)_{crit}$, επιτυγχάνεται, ως συνάρτηση του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0), μέσω προτεινόμενων καμπύλων οι οποίες είναι κατηγοριοποιημένες σύμφωνα με τις διαφορετικές τιμές του λόγου γεωστατικών τάσεων K_0 (Chortis F. & Kavvadas M., 2015).

Οι Chortis F. & Kavvadas M. (2015) καταλήγουν, τέλος, στο ότι ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0 είναι ένας κρίσιμος παράγοντας, ο οποίος επηρεάζει το εύρος της αλληλεπίδρασης λόγω του διαφορετικού μηχανισμού ανακατανομής που αναπτύσσεται, ο οποίος εξαρτάται από την τιμή αυτού του παράγοντα, στην εκσκαφή δίδυμων σηράγγων. Πιο συγκεκριμένα, το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης σε όρους ποσοστιαίας αύξησης φορτίων είναι υψηλότερο για $K_0 = 0.5$ και χαμηλότερο για $K_0 = 1.5$.



Σχήμα 3.10: Εκτίμηση του πλάτους του πυλώνα (W/D) για το οποίο η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο σηράγγων είναι αμελητέα σε όρους λόγου φορτίων (πρώτης/μονής), ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0), για διάφορες τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0 (Chortis F. & Kavvadas M., 2015)

3.7. Μπεκρή Ε., 2012

Η Μπεκρή Ε. (2012) μελετά την αλληλεπίδραση των δύο κλάδων δίδυμων σηράγγων κατά τη διάνοιξη, καθώς επίσης τον προσδιορισμό της κατάλληλης εγκάρσιας απόστασης η οποία θα εξασφαλίζει την ασφάλεια και τη λειτουργικότητα της κατασκευής. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιεί παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις με τριδιάστατα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων, με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.

Την αλληλεπίδραση των δύο κλάδων ποσοτικοποιεί σε όρους πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης και σε όρους μετακινήσεων στην περίμετρο της εκσκαφής, ενώ στο πλαίσιο των παραμετρικών αναλύσεων μελετά το ρόλο των γεωτεχνικών συνθηκών, της εγκάρσιας απόστασης μεταξύ των δυο κλάδων (πλάτους πυλώνα) και του μέτρου ελαστικότητας.

Η έρευνα της Μπεκρή (2012) καταλήγει, μεταξύ άλλων, στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου της εκσκαφής καταπονείται εντονότερα σε σχέση με το κέλυφος του δεύτερου κλάδου.
- Εξετάζοντας τη χρονοϊστορία των κόμβων μιας τυχαίας διατομής του πρώτου κλάδου, η δυσμενέστερη κατάσταση σημειώνεται όταν ο δεύτερος 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 εκτοξευμένου σκυροδέματος.
- Για τη δυσμενέστερη περίπτωση ($W = 0.5D = 5m$) και για το μέγεθος των πιέσεων, η καμπύλη που αντιστοιχεί στον πρώτο κλάδο παρουσιάζει εκθετική μορφή, με μειούμενο ρυθμό μείωσης. Βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών συνεπάγεται μείωση του βαθμού αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων. Για το εύρος των γεωτεχνικών παραμέτρων που εξετάστηκαν, οι δυσμενέστερες συνθήκες αντιστοιχούν σε λόγο μέσων πιέσεων ίσο με 1.6 (σημαντική αλληλεπίδραση των δυο κλάδων), ενώ όσο οι γεωτεχνικές συνθήκες βελτιώνονται ($\sigma_c/\rho = 0.4$) ο λόγος τείνει στη μονάδα (μηδενική αλληλεπίδραση των δυο κλάδων). Η καμπύλη που αντιστοιχεί στο δεύτερο κλάδο, προσεγγίζει την ευθεία γραμμή ($\rho_{average,s}/\rho_{average,single} = 1$), γεγονός που αποδεικνύει ότι η φόρτιση του δεύτερου κλάδου είναι ανεξάρτητη από την μεταβολή των γεωτεχνικών συνθηκών.
- Αναφορικά στο μέγεθος των πιέσεων, για μικρή εγκάρσια απόσταση ($W = 0.5D = 5m$) η αλληλεπίδραση των δυο 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 σε χαμηλότερες τιμές, γεγονός που αποδεικνύει τη μείωση του βαθμού αλληλεπίδρασης. Για περεταίρω αύξηση της εγκάρσιας απόστασης ($W = 2D = 20m$) οι δυο σήραγγες πρακτικά λαμβάνονται ως δυο ανεξάρτητες κατασκευές, καθώς οι τιμές των λόγων τείνουν στη μονάδα, ανεξάρτητα από την ποιότητα της

βραχώμαζας. Οι αναπτυσσόμενες πιέσεις επί του κελύφους του δεύτερου κλάδου διατηρούνται σταθερές και ανεξάρτητες του πλάτους του πυλώνα.

3.8. Ψυχάρη Ειρήνη, 2016

Η διπλωματική εργασία ,από τη Ψυχάρη Ειρήνη (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.

Ως προς 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:

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

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

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

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

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

Επιπλέον, εξετάζονται 5 αποστάσεις εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο στη «δεύτερη» σήραγγα:

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

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

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

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

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

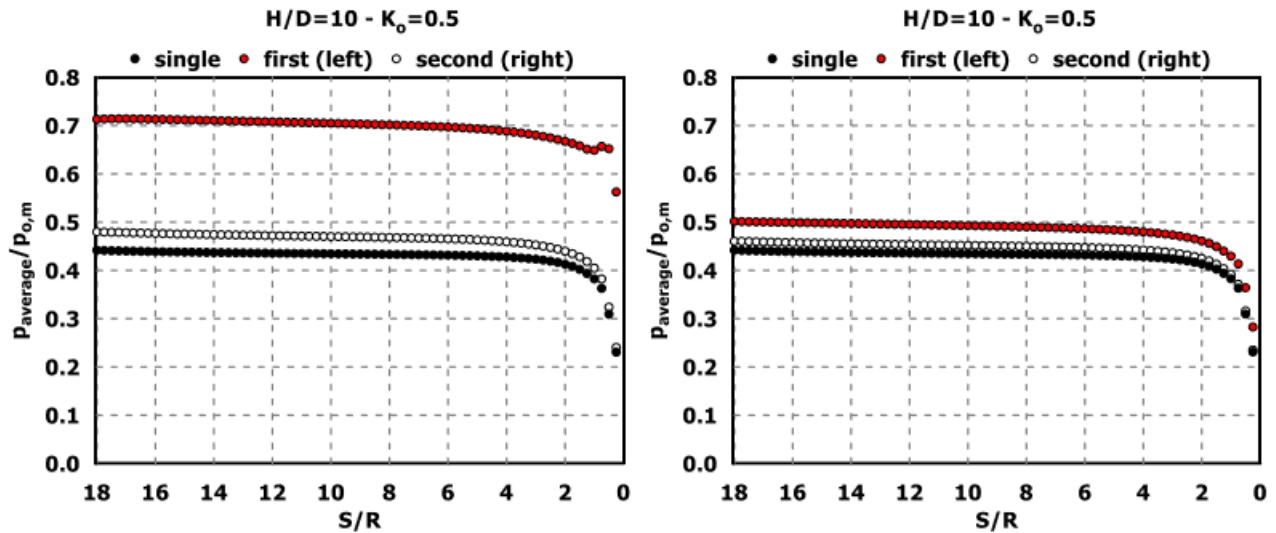
Οι τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων που εξετάζονται είναι :

$$k_o=0.5$$

$$k_o=1.0$$

$$k_o=2.0$$

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, ενδεικτικά παρατίθενται διαγράμματα για την περίπτωση όπου ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων είναι $k_0=0.5$ και τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης τοποθετούνται σε απόσταση $0.125D=1.0m$ από το μέτωπο εκσκαφής για τα διάφορα πλάτη πυλώνα και τις διάφορες γεωτεχνικές συνθήκες.



Σχήμα 3.11: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $p_{average}/p_{0,m}$ 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 $k_0=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0=0.21$), (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)

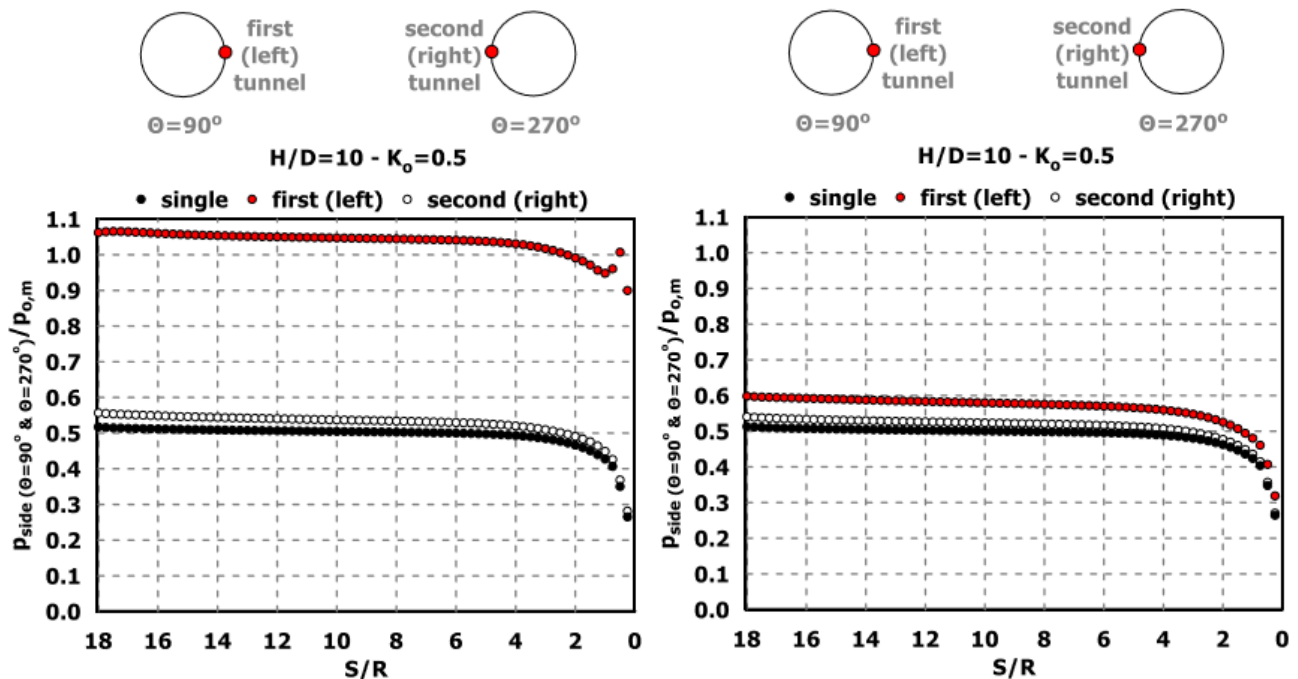
Από το παραπάνω σχήμα, γίνεται αντιληπτό αρχικά ότι ανεξαρτήτως πλάτους πυλώνα, η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας (first tunnel) καταπονείται περισσότερο σε όρους φορτίων συγκριτικά με αυτή της «μονής» σήραγγας (single tunnel) ή της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel). Ακολούθως, το εκτοξευόμενο 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 προυπάρχουσα 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.

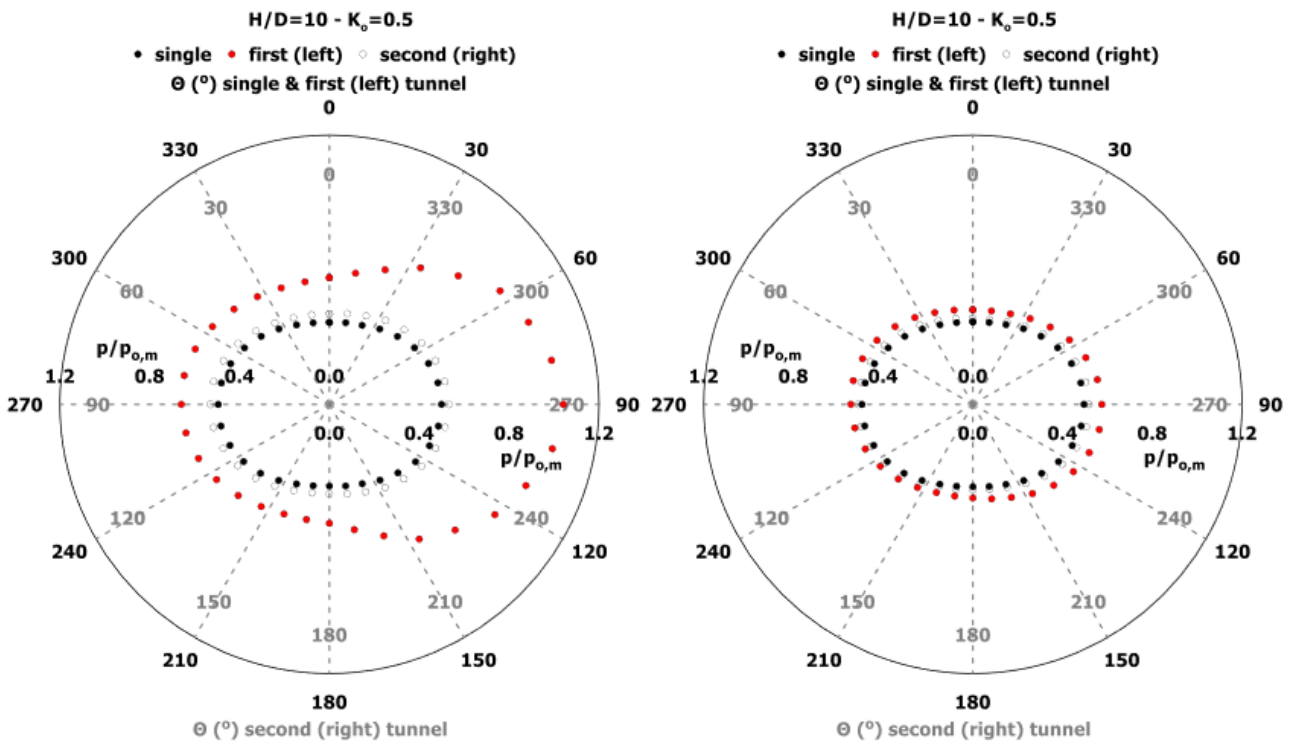
Ανάλογα είναι τα αποτελέσματα που αναφέρονται στο φορτίο που δέχονται οι εσωτερικές παρειές των διατομών, δηλαδή η γωνία $\theta=90^\circ$ για τη «μονή/πρώτη» σήραγγα (single/first tunnel) και η γωνία $\theta=270^\circ$ για τη «δεύτερη» σήραγγα (second tunnel), κατά μήκος του διαμήκου άξονα των δύο κλάδων. Το σχήμα 3.12 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 παρειά της «πρώτης» σήραγγας, σε βαθμό που προσεγγίζει τα φορτία που αναπτύσσονται στην άμεση υποστήριξη της μεμονωμένης σήραγγας.



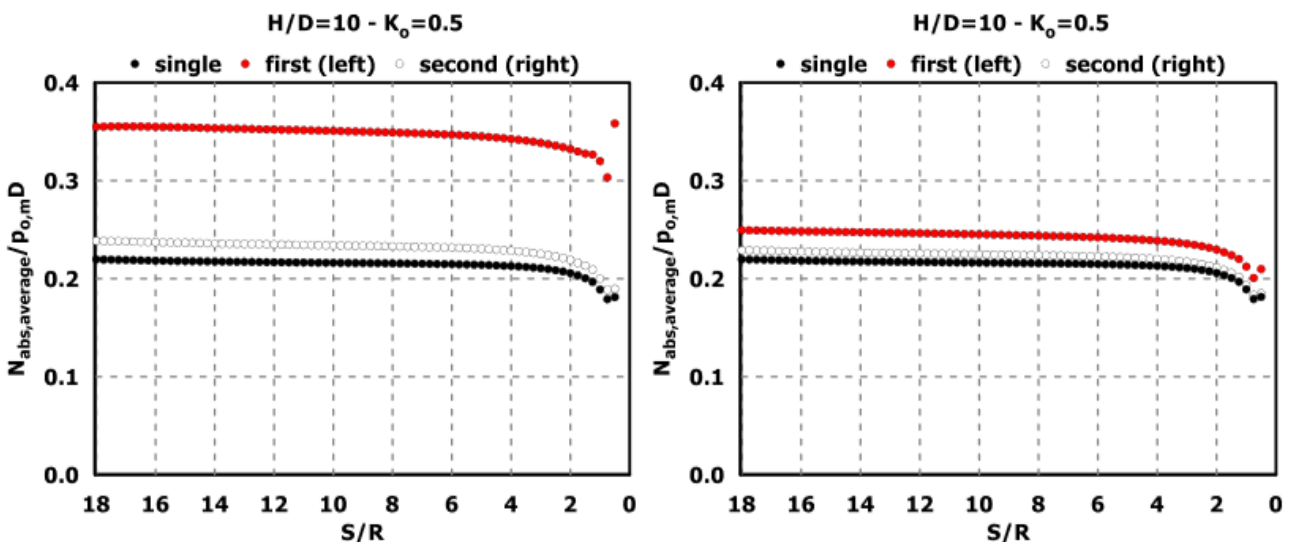
Σχήμα 3.12: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου $p_{side}(\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ)/\rho_{o,m}$ επί των εσωτερικών παρειών συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_m/\rho_o=0.21$), (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)

Στη συνέχεια, το Σχήμα 3.13 αποτυπώνει την κατανομή του ανηγμένου φορτίου $p/\rho_{o,m}$ συναρτήσει 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 3.12, 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.



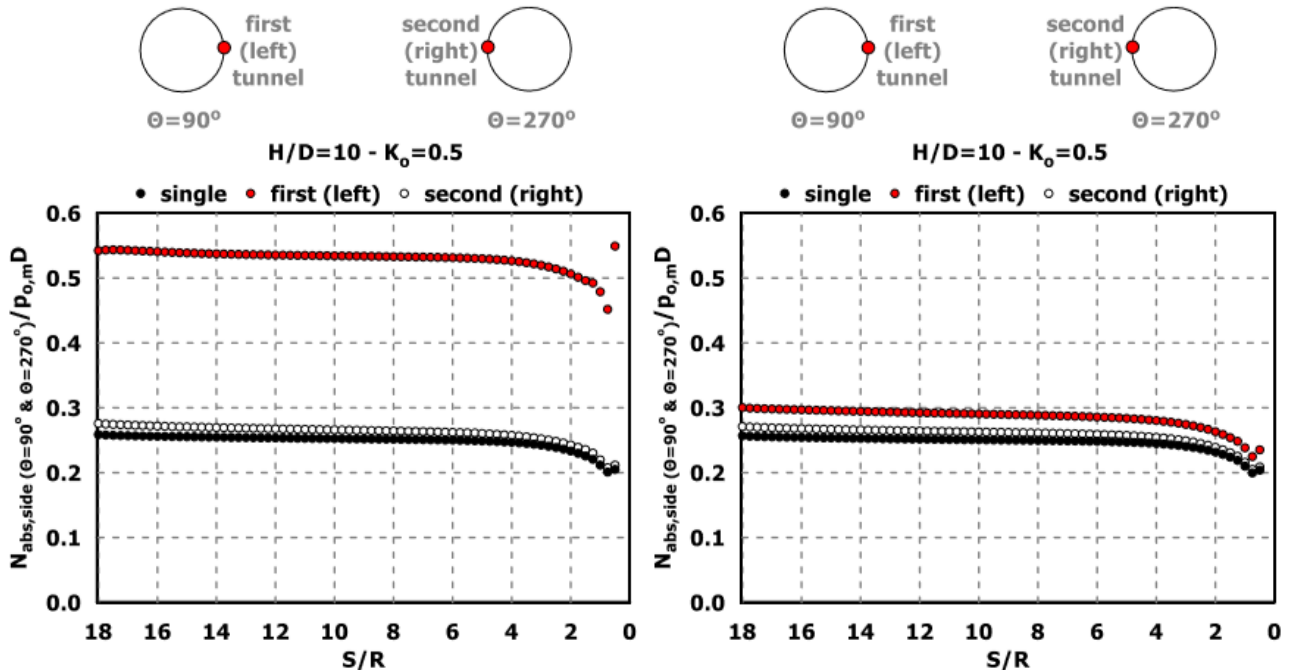
Σχήμα 3.13: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου $p/p_{o,m}$ συναρτήσει της γωνίας θ (ο) στην τυπική διατομή των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_0=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές 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 3.14 προβάλλεται η κατά απόλυτη τιμή μέση αξονική δύναμη ($N_{abs,average}$) κανονικοποιημένη ως προς το γινόμενο της μέσης αρχικής γεωστατικής πίεσης με τη διάμετρο της σήραγγας ($\rho_{o,m}D$). Τα διαγράμματα έχουν παραχθεί συναρτήσει του λόγου S/R (όπου S η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής).



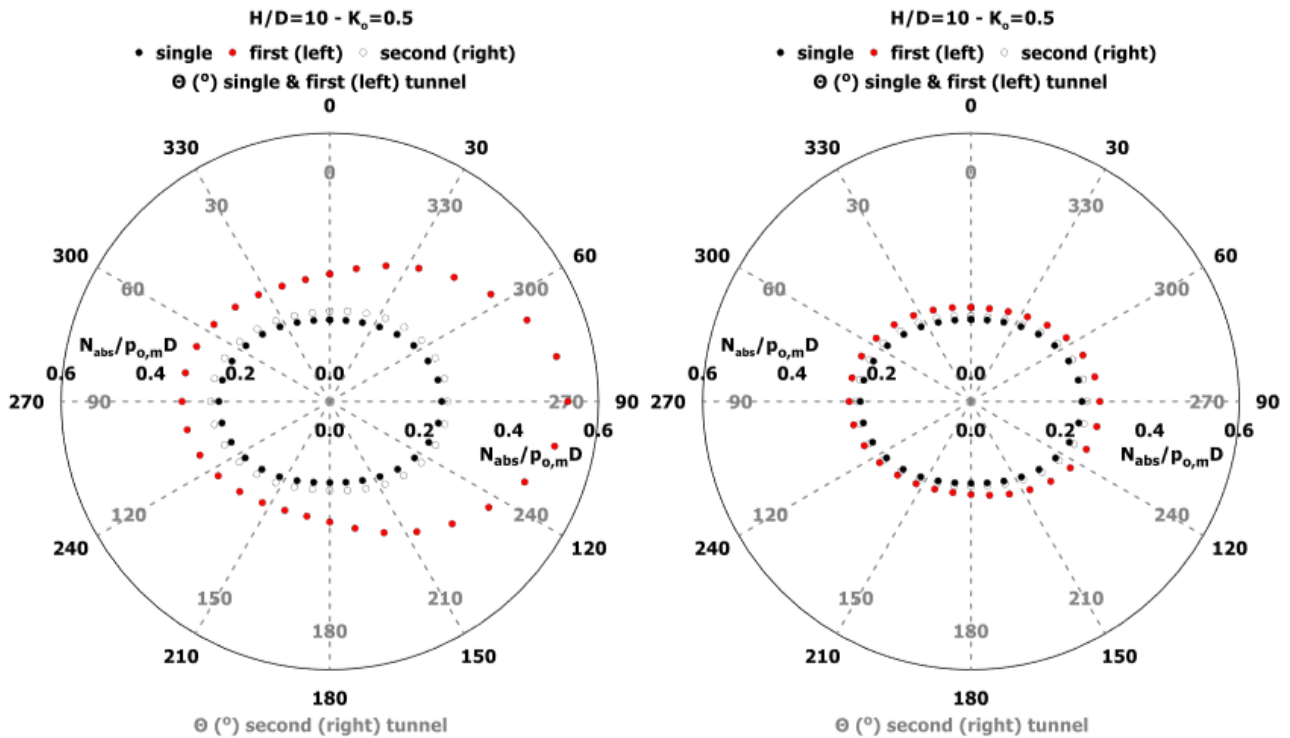
Σχήμα 3.14: Κατανομή της ανηγμένης μέσης αξονικής δύναμης επί της άμεσης υποστήριξης ($N_{abs,average}/\rho_{o,m}D$) συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκους άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) και $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων 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 3.15). Αυτό υποδεικνύει ότι λόγω της εκσκαφής της νέας σήραγγας, παρουσιάζεται μια μεταφορά φορτίου από τη «δεύτερη» στην «πρώτη».



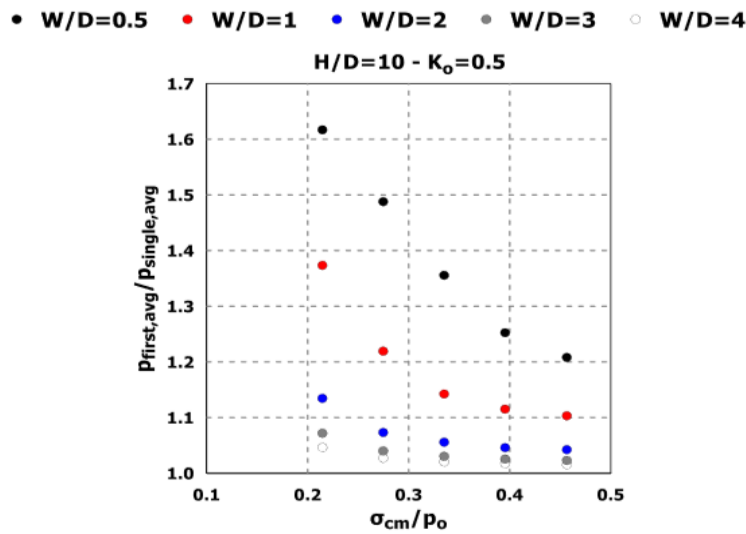
Σχήμα 3.15: Κατανομή της ανηγμένης αξονικής δύναμης επί των εσωτερικών παρειών ($N_{abs,side}(\theta=90^\circ \text{ \& } \theta=270^\circ)/\rho_0 m D$) συναρτήσεως του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4\text{m}$ (αριστερά) και $W=2D=16\text{m}$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_0=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0=0.21$), (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 3.16 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 ασύμμετρία εξαλείφεται με τη διεύρυνση της εγκάρσιας απόστασης μεταξύ των διατομών και κατ' επέκταση τον περιορισμό του φαινομένου της αλληλεπίδρασης.



Σχήμα 3.16: 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)

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 3.17). 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 3.18).

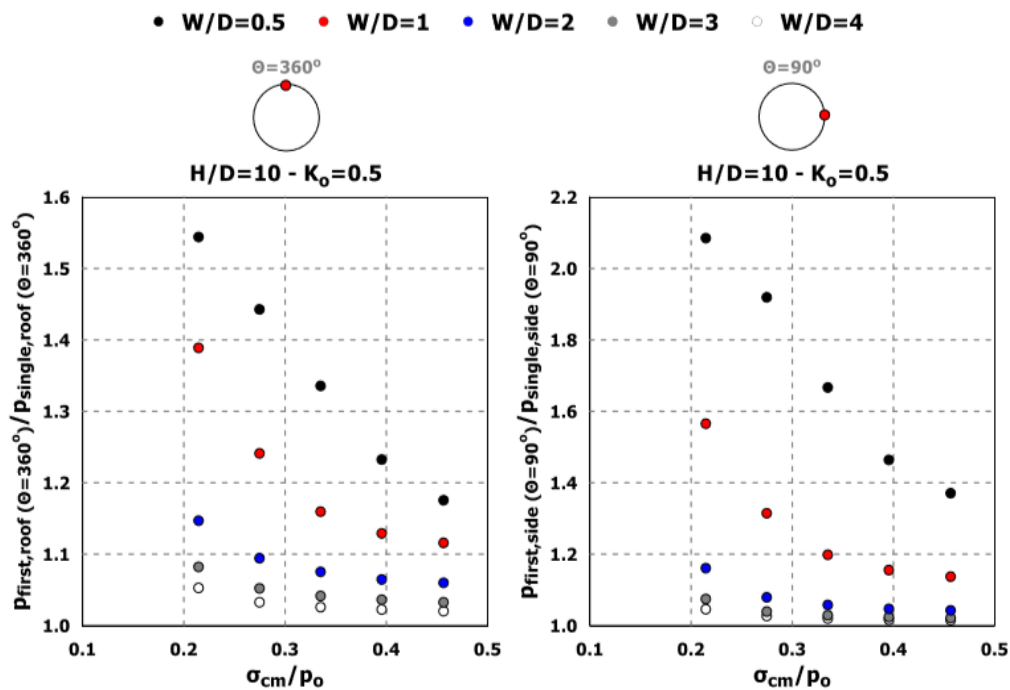


Σχήμα 3.17: Λόγος μέσων φορτίων της «πρώτης» προς τη «μονή» σήραγγας ($p_{first,avg}/p_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_0) για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_0=0.5$, (Ψυχάρη Ειρήνη, 2016)

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 3.18 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 3.18).



Σχήμα 3.18: Λόγος φορτίων στην οροφή (αριστερά) και στην εσωτερική παρειά (δεξιά) της «πρώτης» προς τη «μονή» σήραγγας ($p_{\text{first,roof}}/p_{\text{single,roof}}$ & $p_{\text{first,side}}/p_{\text{single,side}}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{\text{cm}}/\rho_0$) 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.

Συνοψίζοντας, αναφορικά με την επίδραση που έχει η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των παρειών των σηράγγων στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, παρατηρούνται τα ακόλουθα 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 εκσκάπτεται 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».

3.9. Σύνοψη

Συνοψίζοντας, παρατηρούμε πως το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των κλάδων μιας δίδυμης σήραγγας είναι αρκετά περίπλοκο και καθορίζεται από πολλές παραμέτρους, όπως το πλάτος πυλώνα, οι γεωτεχνικές συνθήκες, ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και ο συντελεστής αποτόνωσης.

4. Αριθμητικές Αναλύσεις

4.1. Εισαγωγή

Η κατασκευή δίδυμων σηράγγων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη μηχανική. Κατά το στάδιο του σχεδιασμού δίδυμων σηράγγων βασικές παράμετροι απαιτείται να λαμβάνονται υπόψη για τον καθορισμό του βαθμού αλληλεπίδρασης των δύο κλάδων.

Η αλληλεπίδραση καθορίζεται ή επηρεάζεται σε ένα σημαντικό βαθμό από τις ακόλουθες παραμέτρους: το πλάτος του πυλώνα, το συντελεστή των οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και τις γεωτεχνικές συνθήκες. Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των φορτίων και των εντατικών μεγεθών (αξονικών δυνάμεων) της άμεσης υποστήριξης (εκτοξευόμενου σκυροδέματος) καθώς επίσης και το πεδίο των κύριων τάσεων που αναπτύσσεται στη βραχόμαζα. Στο πλαίσιο αυτό γίνεται αριθμητική ανάλυση για τρία διαφορετικά μεγέθη πλάτους πυλώνα (εγκάρσια απόσταση μεταξύ των παρειών των γειτονικών παράλληλων σηράγγων) και ένα μεγάλο εύρος γεωτεχνικών συνθηκών.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method – FEM). Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι μια μεθοδολογία επίλυσης της μηχανικής συμπεριφοράς ενός συνεχούς σώματος. Δεδομένης της γεωμετρίας, των συνοριακών συνθηκών (μετατοπίσεις και φορτία), των καθολικών δυνάμεων (body forces) και των καταστατικών σχέσεων τάσης – παραμόρφωσης του σώματος, υπολογίζονται οι συνοριακές και οι εσωτερικές μετατοπίσεις, παραμορφώσεις και τάσεις. Το συνεχές μέσο προσομοιώνεται από ένα πεπερασμένο σύνολο στοιχείων που συνδέονται μεταξύ τους στους κόμβους συνιστώντας έτσι το διακριτοποιημένο φορέα. Η επίλυση του φορέα δίνει τις παραμορφώσεις και τάσεις σε όλα τα στοιχεία και τις μετατοπίσεις και δυνάμεις σε όλους τους κόμβους (Μπελόκας Γ. & Καββαδάς Μ., 2010).

Πολλές από τις αριθμητικές αναλύσεις που αναφέρονται σε σήραγγες είναι διδιάστατες (2-D), με προσεγγίσεις επίπεδης παραμόρφωσης. Είναι ευρέως αναγνωρισμένο όμως, ότι η διαδικασία εκσκαφής σηράγγων επιφέρει ένα τυπικό τριδιάστατο (3-D) πεδίο τάσεων και παραμορφώσεων (συνθήκες τριαξονικής εντατικής κατάστασης). Ένα σημαντικό ποσοστό διαταραχής λαμβάνει χώρα μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, το οποίο προκαλεί προσυγκλίσεις και επιφανειακές μετακινήσεις, πριν το μέτωπο φτάσει σε αυτή τη θέση. Επομένως, οι τριδιάστατες αναλύσεις εμπεριέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των διδιάστατων.

Σύμφωνα με τον Καββαδά (2012), οι τρισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις πλεονεκτούν επειδή:

- i. Προσομοιώνουν την πραγματική αλληλουχία της κατασκευής, με την άρση της παραδοχής της «επίπεδης παραμόρφωσης».
- ii. Προσομοιώνουν το πραγματικό γεωτεχνικό προφίλ, το οποίο δύναται να μεταβάλλεται κατά μήκος της διάνοιξης.

- iii. Εξετάζουν την ευστάθεια του μετώπου (μέτωπο χωρίς αντιστήριξη – επίδραση μέτρων αντιστήριξης, προστασίας, ενίσχυσης).
- iv. Πραγματοποιούν ορθολογιστικό σχεδιασμό του μετώπου της σήραγγας (Διαστασιολόγηση των μέτρων αντιστήριξης, προστασίας και ενίσχυσης - ευστάθεια μετώπου, κελύφους - καθιζήσεις στην επιφάνεια).

Σύμφωνα με τα παραπάνω η αλληλεπίδραση μεταξύ των δίδυμων σηράγγων της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε να διερευνηθεί με τη χρήση τριδιάστατων (3-D) αριθμητικών αναλύσεων, με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.

Στο υπάρχον κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιγραφή της διαδικασίας των αναλύσεων και της μόρφωσης των αριθμητικών προσομοιωμάτων. Επιπλέον, αναλύονται η γεωμετρία των προσομοιωμάτων, ο τρόπος διαμόρφωσης και διακριτοποίησης των καννάβων των προσομοιωμάτων, η αλληλουχία της εκσκαφής και οι παράμετροι των αριθμητικών αναλύσεων που χρησιμοποιούνται. Τέλος, προσδιορίζονται τα βασικά σύμβολα των παραμετρικών αναλύσεων που υιοθετούνται στα πλαίσια της έρευνας.

4.2. Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Abaqus

Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Abaqus χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων. Θεωρείται 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.

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 (increments) έτσι ώστε να δίνεται βαρύτητα στις μεταβλητές που ενδιαφέρουν περισσότερο σε κάθε ένα από αυτά.

Για την εκκίνηση της διαδικασίας των αναλύσεων απαιτείται 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 του 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 τρεις στη στροφή. Στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων δημιουργούνται ομάδες (sets) οι οποίες αποτελούνται από κόμβους ή πεπερασμένα στοιχεία.

Παράλληλα εισάγονται οι ιδιότητες των υλικών (μέτρο ελαστικότητας & λόγος Poisson), του εδάφους 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. Τέλος, το αρχείο εισαγωγής δεδομένων (input file) περιλαμβάνει στοιχεία που αφορούν τον προσδιορισμό των ζητούμενων (output files) του προβλήματος, τα οποία συμβάλλουν ουσιαστικά στην παραγωγή των αποτελεσμάτων των αναλύσεων.

Τα εξαγόμενα αποτελέσματα – ζητούμενα (output files) είναι τα ακόλουθα:

- Μετακινήσεις των κόμβων (U)
- Ορθές τάσεις των πεπερασμένων στοιχείων (S)
- Αξονικές δυνάμεις (SF1) και καμπτικές ροπές (SM1) στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- Οι παραμορφώσεις των πεπερασμένων στοιχείων (E)
- Οι πλαστικές παραμορφώσεις των πεπερασμένων στοιχείων (PEMAG)
- Οι πιέσεις επαφής (φορτία) των πεπερασμένων στοιχείων (CPRESS)

Λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος, τα αποτελέσματα παράχθηκαν μέσω κατάλληλης διαδικασίας με χρήση του λογισμικού προγράμματος Excel της Microsoft Office.

4.3. Περιγραφή αριθμητικού προσομοιώματος

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης ανάλυσης σχεδιάστηκαν τρία αριθμητικά μοντέλα, για κάθε πλάτος πυλώνα που διερευνήθηκε. Το πλάτος πυλώνα αποτελεί την εγκάρσια απόσταση μεταξύ των παρειών των γειτονικών σηράγγων. Πιο συγκεκριμένα, σχεδιάστηκαν μοντέλα με πλάτος πυλώνα (W) = 0.5D, 1D, 2D. Για κάθε ένα από αυτά τα τρία προσομοιώματα δημιουργήθηκαν είκοσι διαφορετικά γεωτεχνικά ζεύγη. Οι διαστάσεις των μοντέλων καθορίστηκαν με την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων αλλά ταυτόχρονα και την ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού φόρτου.

Ο σχεδιασμός των προσομοιωμάτων πραγματοποιήθηκε με σκοπό την εξάλειψη της επίδρασης των ορίων του μοντέλου, με τα εξωτερικά όρια να τοποθετούνται αρκετά μακριά από την περιοχή εκσκαφής ώστε τα σφάλματα που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση μεταξύ των εξωτερικών συνόρων και των εκσκαφών να μειώνονται σε ένα ελάχιστο αποδεκτό επίπεδο.

Αναλυτικότερα λήφθηκαν υπόψη οι ακόλουθες παράμετροι:

- i. Η απόσταση του γεωυλικού από τον άξονα κάθε σήραγγας μέχρι τα όρια του αριθμητικού μοντέλου να είναι επαρκή για τη μη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων από τις συνοριακές συνθήκες.
- ii. Το μήκος της σήραγγας κατά τη διαμήκη διεύθυνση (φορά διάνοιξης) θα πρέπει να είναι επαρκές ώστε τα αποτελέσματα που εξάγονται στην περιοχή ενδιαφέροντος να μην επηρεάζονται από τα όρια του αριθμητικού μοντέλου.
- iii. Η κατανομή των τάσεων ύστερα από την εκσκαφή θα πρέπει να είναι ομοιόμορφη ως προς το οριζόντιο επίπεδο και σε αυτό συμβάλλει το κάτω όριο του μοντέλου. Κατά συνέπεια, το κατώτερο αυτό όριο του αριθμητικού προσομοιώματος θα πρέπει να εκτείνεται σε τέτοιο βαθμό από τον άξονα κάθε σήραγγας, που να μην επιδρά στην κατανομή των τάσεων.
- iv. Η κατανομή των τάσεων ακόμη, επηρεάζεται και από τα πλευρικά όρια του προσομοιώματος.

Βάσει των παραπάνω επιλέχθηκε η κατάλληλη γεωμετρία για την εξασφάλιση ικανοποιητικής απόστασης από τον άξονα κάθε σήραγγας μέχρι τα πλευρικά όρια του μοντέλου.

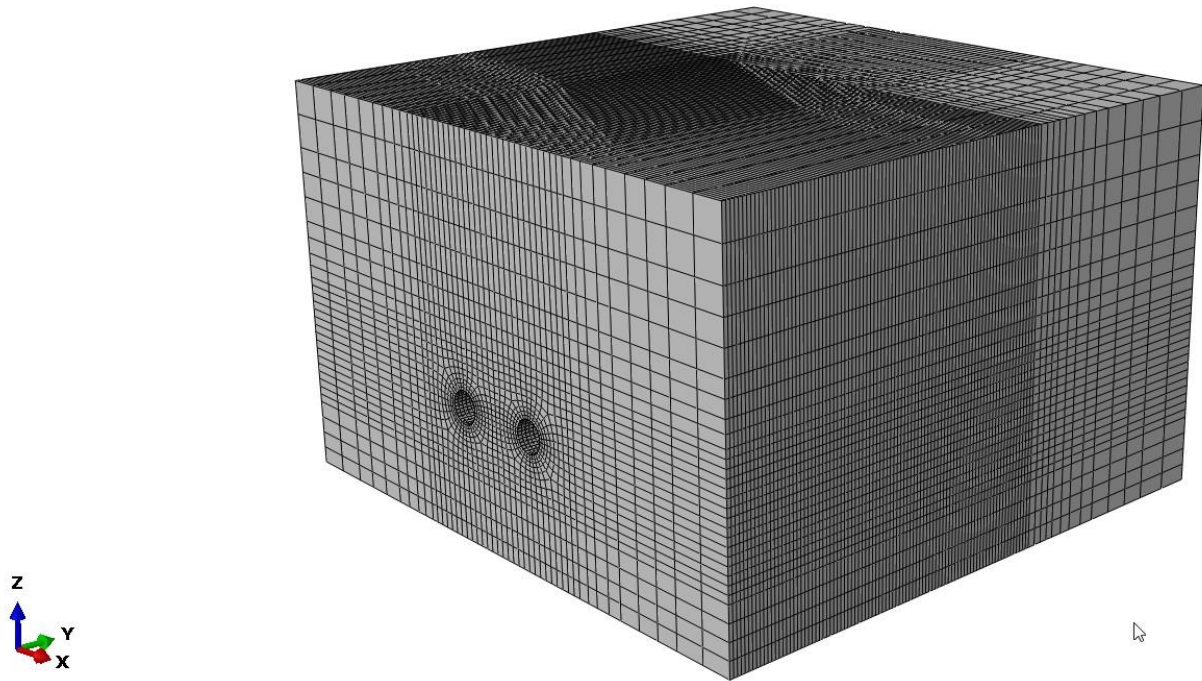
4.3.1. Γεωμετρία μοντέλου

Στην Εικόνα 4.1 φαίνεται η προοπτική όψη ενός ενδεικτικού προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 2D = 16\text{m}$ σε επίπεδο $X - Y - Z$. Παρουσιάζεται η διακριτοποίηση του προσομοιώματος στην περιοχή ενδιαφέροντος, με πύκνωση του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων πλησίον των σηράγγων και σε όλο το μήκος εκσκαφής.

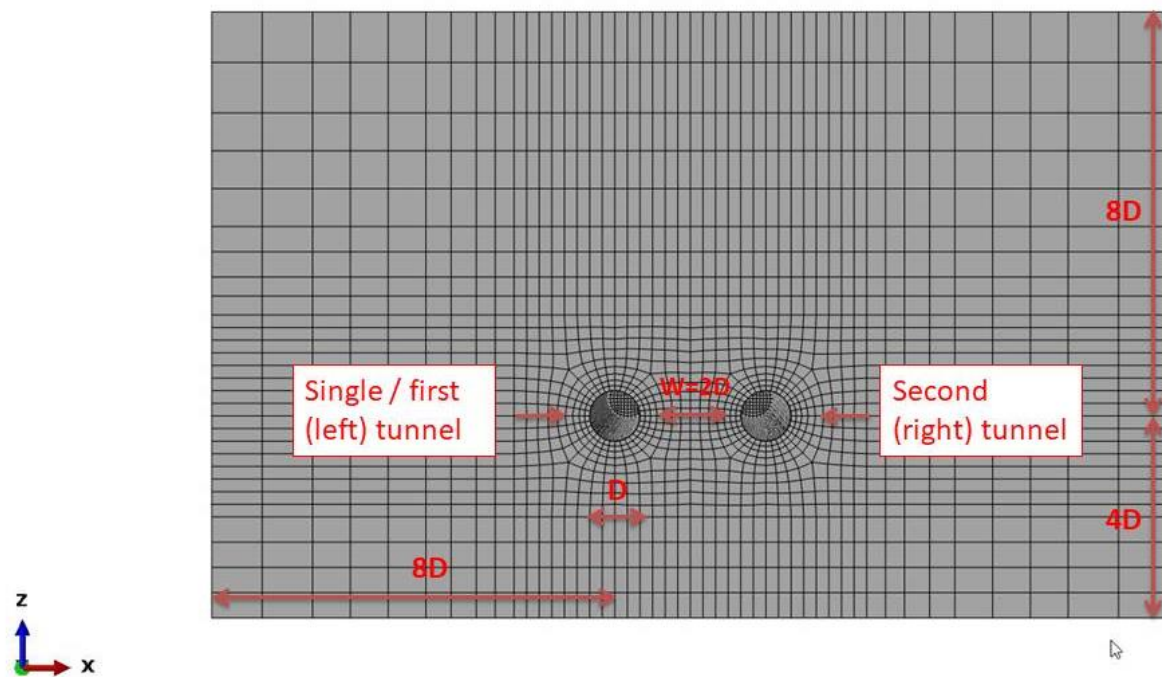
Ειδικότερα, σχεδιάστηκε μοντέλο δίδυμων κυκλικών σηράγγων με διάμετρο $D = 8\text{m}$ και μήκος $L = 10D = 80\text{m}$. Το ύψος των υπερκειμένων γαιών ανέρχεται σε $8D = 64\text{m}$. Η απόσταση από το κατώτερο όριο του προσομοιώματος (με βάση αναφοράς τον άξονα της σήραγγας) επιλέχθηκε $4D = 32\text{m}$, ενώ από τα πλευρικά όρια κατά τον άξονα XX' $8D = 64\text{m}$. Οι παραπάνω λεπτομέρειες απεικονίζονται στην Εικόνα 4.2, με την εγκάρσια όψη του μοντέλου στο επίπεδο $Z - X$, όπου φαίνονται οι υπό διερεύνηση σήραγγες. Αρχικά εκσκάπτεται η αριστερή, «μονή» σήραγγα (single tunnel). Στη συνέχεια, με την ολοκλήρωση της εκσκαφής της «μονής» σήραγγας, ξεκινά η εκσκαφή της δεξιάς, «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel). Με την εκκίνηση της εκσκαφής της δεύτερης, η «μονή» σήραγγα (single tunnel) μετονομάζεται σε «πρώτη» σήραγγα (first tunnel).

Τέλος, η απόσταση κατά τον διαμήκη άξονα της σήραγγας, δηλαδή κατά τον YY' επιλέχθηκε $8D = 64\text{m}$ πέραν του μήκους εκσκαφής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3.

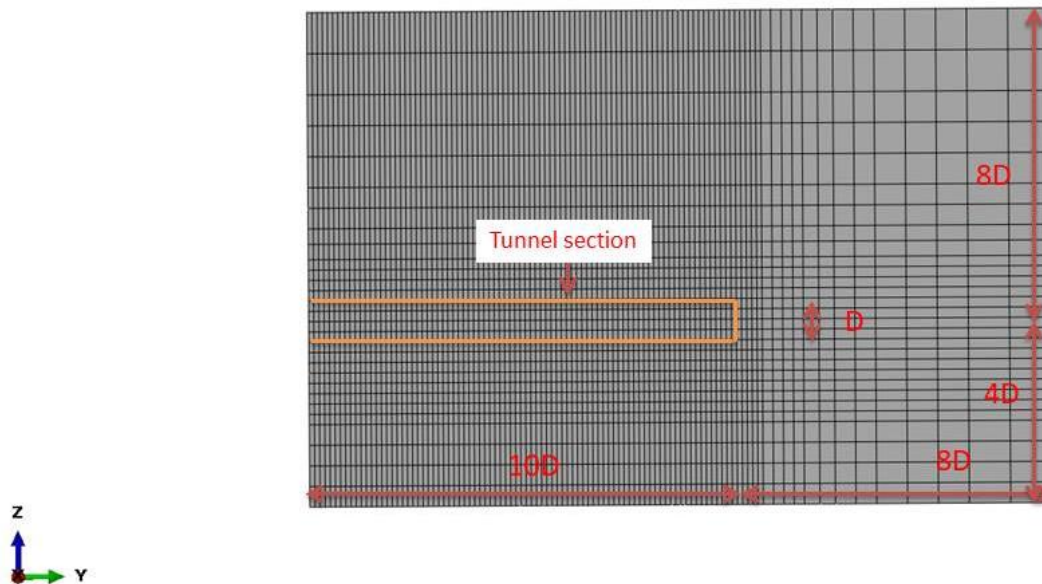
Οι αποστάσεις των ορίων προέκυψαν μετά από αρκετές αναλύσεις ευαισθησίας για να μην υπάρχει επιρροή των αποτελεσμάτων από τις συνοριακές συνθήκες.



Εικόνα 4.1: Προοπτική όψη προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 2D = 16m$.



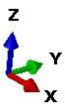
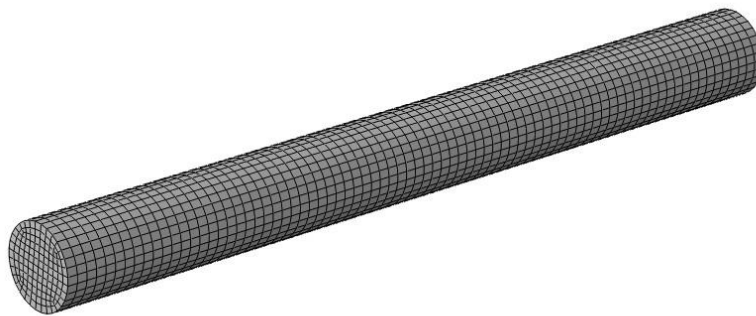
Εικόνα 4.2: Εγκάρσια όψη και διαστάσεις του προσομοιώματος για πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$.



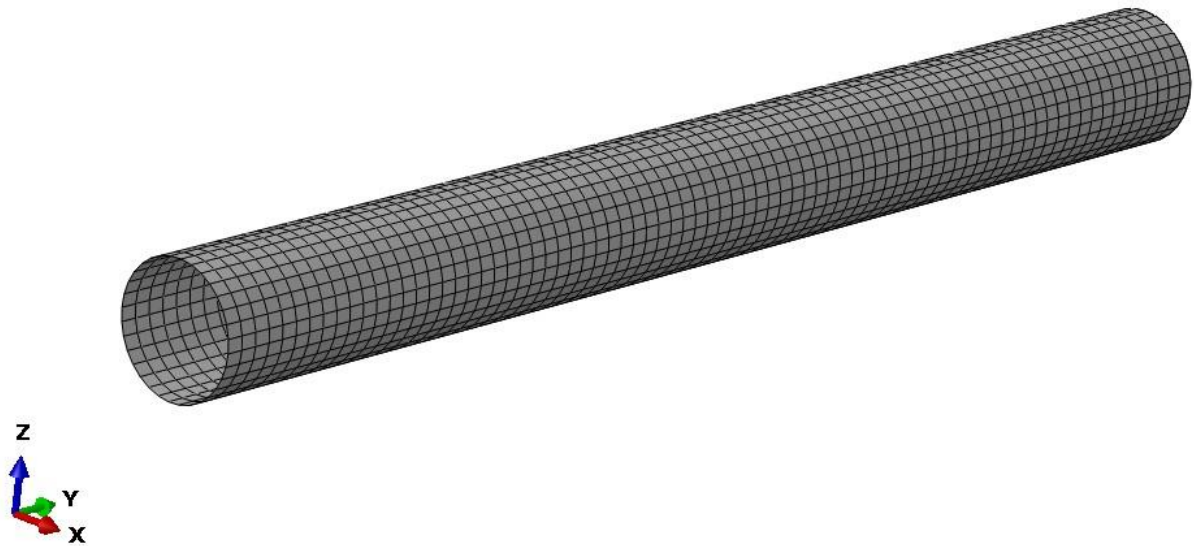
Εικόνα 4.3: Μηκτομική όψη και διαστάσεις του ίδιου προσομοιώματος.

4.3.2. Διακριτοποίηση καννάβων

Η διακριτοποίηση των καννάβων πραγματοποιήθηκε με τρισδιάστατα οκτακομβικά εξαπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία (C3D8) για την προσομοίωση του γεωυλικού (solid elements), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.4. Για την προσομοίωση της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν τετρακομβικά τετραπλευρικά (S4) πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell elements), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5.



Εικόνα 4.4: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (οκτακομβικά εξαπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία εδάφους C3D8) της εκσκαφής της σήραγγας.



Εικόνα 4.5: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους S4) της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας.

Στην περιοχή ενδιαφέροντος και λήψης αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε πύκνωση του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό την ακρίβεια και την ορθότητα των αποτελεσμάτων.

Ειδικότερα, επιλέχθηκε πύκνωση στις περιοχές ελαστοπλαστικής απόκρισης του γεωυλικού, γύρω από τους δύο κλάδους, όπου συντελείται ανακατανομή των τάσεων, πλαστικές παραμορφώσεις και σημαντικές μετακινήσεις. Στην περιοχή ελαστικής απόκρισης της βραχώμαζας πραγματοποιήθηκε σταδιακή αραιώση του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων για την εξοικονόμηση χρόνου και υπολογιστικού φόρτου των αριθμητικών αναλύσεων.

Στη λήψη των αποτελεσμάτων υιοθετείται σε όλα τα αριθμητικά μοντέλα ο νόμος της διεπιφάνειας εδάφους – υποστήριξης (surface interaction), ο οποίος θεωρεί τις εκατέρωθεν πλευρές της διεπιφάνειας δεσμευμένες μεταξύ τους, χωρίς να επιτρέπει της δυνατότητα ολίσθησης ή αποκόλλησης.

Ως προς τις συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) υπήρξαν οι ακόλουθοι περιορισμοί: οι κόμβοι του πυθμένα (soil bottom nodes), στο κάτω όριο του προσομοιώματος, δεσμεύτηκαν κατά τις διευθύνσεις X, Y, Z με την εφαρμογή αρθρώσεων. Οι κόμβοι των πλευρικών ορίων (side nodes) δεσμεύτηκαν κατά τη διεύθυνση X, ούτως ώστε να μην επιτρέπεται η οριζόντια μετακίνηση, με την εφαρμογή κυλίσεων. Ομοίως, οι κόμβοι του εμπρός και πίσω ορίου του προσομοιώματος (front – back nodes) δεσμεύτηκαν κατά τη διεύθυνση Y. Σχετικά με το ανώτερο όριο του αριθμητικού μοντέλου, επιλέχθηκε ελεύθερη απόκριση ως προς τις μετακινήσεις.

4.4. Αλληλουχία εκσκαφής - Βήματα αριθμητικών αναλύσεων

Τα βήματα των αριθμητικών αναλύσεων που επιλέγονται, αποτελούν σημαντικό παράγοντα σε μια μελέτη που αναφέρεται σε σήραγγες, καθώς είναι αυτά που καθορίζουν την αλληλουχία και το ρυθμό προχώρησης της εκσκαφής. Τα στάδια κατασκευής και ο συνολικός αριθμός βημάτων που εφαρμόζονται, εξαρτώνται από τη γεωμετρία της εκσκαφής, τις ιδιότητες του γεωυλικού και την επιλογή της μεθόδου εκσκαφής.

Η διαδικασία της εκσκαφής που υιοθετείται στο πλαίσιο της αριθμητικής ανάλυσης και είναι απολύτως κοινή για κάθε σήραγγα, έχει σκοπό να προσομοιώσει με ακρίβεια συμβατική εκσκαφή σήραγγας. Ως προς την αλληλουχία εκσκαφής, η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας (second tunnel) πραγματοποιείται ύστερα από την ολοκλήρωση της εκσκαφής και υποστήριξης της αριστερής σήραγγας (single/first tunnel), προκειμένου να μελετηθεί η επιρροή της εκσκαφής της «δεύτερης» σήραγγας στην «πρώτη».

Το βήμα εκσκαφής, το οποίο αναφέρεται τόσο στη «μονή/πρώτη» σήραγγα όσο και στη «δεύτερη» σήραγγα, ισούται με 1m (παραδοχή σύμφωνη με τη συνήθη κατασκευαστική πρακτική) σε όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιούνται, ενώ η εκσκαφή αυτών πραγματοποιείται με 80 στατικά βήματα, κατά τη διεύθυνση Υ. Η άμεση υποστήριξη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στη σήραγγα τοποθετείται 1m πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Αυτή είναι μια τυπική διαδικασία εκσκαφής σύμφωνα με τις αρχές της Νέας Αυστριακής Μεθόδου (NATM - New Austrian Tunnelling Method).

Σε κάθε ανάλυση υπάρχουν 160 βήματα (steps). Τα κυριότερα βήματα (steps) των αριθμητικών αναλύσεων είναι τα ακόλουθα:

- Βήμα 0

Το βήμα 0 αναφέρεται στον υπολογισμό του αρχικού εντατικού πεδίου, όπου επικρατούν οι γεωστατικές τάσεις. Στην κατάσταση αυτή δεν έχει ξεκινήσει η εκσκαφή.

- Βήμα 1

Εκσκαφή του 1ου m της «μονής» σήραγγας (single tunnel).

- Βήμα 2

Εκσκαφή του 2ου m και υποστήριξη του 1ου m της «μονής» σήραγγας (single tunnel).

- Βήμα 3 – 80

Εκσκαφή του επόμενου μέτρου και υποστήριξη του προηγούμενου μέτρου της σήραγγας, έως την εκσκαφή του 80ου m και υποστήριξη του 79ου m της «μονής» σήραγγας (single tunnel). Με το βήμα αυτό ολοκληρώνεται η εκσκαφή της «μονής σήραγγας».

- Βήμα 81

Εκκίνηση της όρυξης της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel), με εκσκαφή του 1ου m.

- Βήμα 82

Εκσκαφή του 2ου m και υποστήριξη του 1ου m της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel).

- Βήμα 83 – 160

Εκσκαφή του επόμενου μέτρου και υποστήριξη του προηγούμενου μέτρου της σήραγγας, έως την εκσκαφή του 80ου m και υποστήριξη του 79ου m της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel). Με το βήμα αυτό ολοκληρώνεται η εκσκαφή της «δεύτερης σήραγγας».

4.5. Παράμετροι αριθμητικών αναλύσεων

Στην ενότητα αυτή θα περιγραφούν όλες οι παραδοχές που έγιναν κατά το σχεδιασμό των τριών μοντέλων και όλες οι βασικές παράμετροι που υπεισέρχονται στις τρισδιάστατες αναλύσεις. Ειδικότερα, παρατίθενται οι γεωμετρικές, γεωτεχνικές, καθώς και οι παράμετροι της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν.

4.5.1. Γεωμετρικές παράμετροι

Οι γεωμετρικές παράμετροι που εμπεριέχονται στις αναλύσεις είναι είτε σταθερές είτε μεταβλητές. Οι σταθερές παράμετροι είναι αυτές των οποίων το μέγεθος δε μεταβάλλεται, ενώ οι μεταβλητές παράμετροι δεν έχουν σταθερή τιμή. Το μέγεθός τους να μεταβάλλεται ανάλογα με την ομάδα αναλύσεων που εξετάζεται κάθε φορά.

Σταθερές παράμετροι

Οι σταθερές παράμετροι των αναλύσεων, είναι οι ακόλουθες:

- a) Η διάμετρος της σήραγγας (**D**), όπου:

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

- b) Το μήκος της εκσκαφής (**L_{exc}**), όπου:

$$L_{exc} = 10D = 80 \text{ m}$$

- c) Το ύψος των υπερκειμένων γαιών (**H**). Η προσομοίωση του ύψους των υπερκειμένων λαμβάνεται ως το άθροισμα του ύψους του άνω ορίου του μοντέλου ($8D = 64\text{m}$) μετρούμενο από τον άξονα της σήραγγας και του επιπρόσθετου, ομοιόμορφα κατανεμημένου, κατακόρυφου φορτίου στην άνω επιφάνεια του αριθμητικού μοντέλου, που αντιστοιχεί σε $2D = 16\text{m}$. Επομένως, το τελικό ύψος υπερκειμένων γαιών, είναι:

$$H = 8D + 2D = 10D = 80 \text{ m}$$

- d) Η απόσταση του διαμήκους ορίου μπροστά από κάθε σήραγγα, που ισούται με $8D = 64 \text{ m}$.

Μεταβλητές παράμετροι

Η μεταβλητή παράμετρος των αριθμητικών αναλύσεων είναι το πλάτος του πυλώνα (**W**). Πλάτος πυλώνα ορίζεται η οριζόντια απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων μιας δίδυμης σήραγγας. Η απόσταση αυτή μετριέται από τις εσωτερικές παρειές των δύο σηράγγων. Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής αυτής διπλωματικής εργασίας εξετάζονται τρία μεγέθη πλάτους πυλώνα. Ειδικότερα, επιλέχθηκαν:

- $W = 0.5D = 4 \text{ m}$
- $W = D = 8 \text{ m}$
- $W = 2D = 16 \text{ m}$

4.5.2. Γεωτεχνικές Παράμετροι

Οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας αποτελούν καθοριστικό παράγοντα στο σχεδιασμό και την κατασκευή των σηράγγων, καθώς επηρεάζουν τα φορτία και τα εντατικά μεγέθη που υφίσταται η άμεση υποστήριξη. Σε κάθε σειρά αναλύσεων εκτός από την μεταβολή του πλάτους πυλώνα τροποποιούνται και οι γεωτεχνικές παράμετροι του περιβάλλοντος των σηράγγων, του γεωυλικού. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται αριθμητικές αναλύσεις για είκοσι διαφορετικά γεωτεχνικά ζεύγη χαρακτηριστικών της περιβάλλουσας βραχώμαζας, για κάθε ένα πλάτος πυλώνα.

Κάποια βασικά μεγέθη διατηρήθηκαν σταθερά, όπως το ειδικό βάρος του γεωυλικού και ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_0). Το ειδικό βάρος της βραχώμαζας κυμαίνεται μεταξύ 23-26 kN/m³. Αντίστοιχα, ο συντελεστής (K_0) συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.4-1.0 χωρίς να αποκλείονται και μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα, σε υγιείς βραχώμαζες χωρίς επιρροή από τεκτονικές πιέσεις: $K_0 = 0.6-1.0$. Σε αποσαθρωμένες βραχώμαζες: $K_0 = 0.4-0.7$. Στην περίπτωση όπου η βραχώμαζα επηρεάζεται από τεκτονικές πιέσεις ο συντελεστής K_0 μπορεί να υπερβαίνει σημαντικά τη μονάδα (έχουν μετρηθεί τιμές έως και 4 στην περίπτωση έντονου θλιπτικού τεκτονικού καθεστώτος) αλλά και να έχει πολύ μικρές τιμές ($K_0 = 0-0.3$ στην περίπτωση έντονου εφελκυστικού τεκτονικού καθεστώτος). Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι σε μεγάλα βάθη (άνω των 400-500 μέτρων) η γεωστατική εντατική κατάσταση είναι πρακτικώς ισότροπη ($K_0 = 1$), ενώ αντίθετα, σε μικρά βάθη (100- 400m) συνήθως μετρώνται τιμές του K_0 αρκετά μεγαλύτερες από τη μονάδα.

Στις αριθμητικές αναλύσεις που έγιναν στη μεταπτυχιακή αυτή διπλωματική εργασία, το ειδικό βάρος του γεωυλικού έλαβε τη σταθερή τιμή $\gamma = 0,025 \text{ MN/m}^3$ και ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων την τιμή $K_0 = 1$.

Η βραχώμαζα προσομοιώνεται ως 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 βραχώμαζας υπολογίζεται με βάση τη σχέση που προτείνουν οι Hoek & Diederichs (2006).

Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή των γεωτεχνικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις.

- **Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής (Geological Strength Index – GSI)**

Για την καλύτερη προσέγγιση του προβλήματος, επιλέχθηκε να προσομοιωθούν πτωχής ποιότητας βραχώμαζες, όπου αναμένονται προβλήματα παραμορφώσεων. Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 10 και 30. Πιο συγκεκριμένα, το GSI λαμβάνει τις τιμές 10, 15, 20, 25 και 30.

- **Αντοχή άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη (σ_{ci})**

Για την αντοχή του άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη επιλέχθηκε ένα εύρος τιμών, από 5MPa έως 20 MPa. Το εύρος αυτό αντιστοιχεί σε ασθενή έως μέτρια βραχώμαζα.

- **Σταθερά υλικού για άρρηκτο βράχο m_i**

Η σταθερά m_i εξαρτάται από το είδος του πετρώματος. Ελαβε την τιμή 7 σε όλες τις αναλύσεις υποδηλώνοντας μέτριο αλληλοκλείδωμα και μέτρια χαρακτηριστικά τριβής μεταξύ των τεμαχών της βραχώμαζας.

- **Λόγος Poisson ν**

Η τιμή του λόγου Poisson διατηρήθηκε σταθερή σε όλες τις αναλύσεις και ίση με $\nu=0,3$.

- **Μέτρο Ελαστικότητας Άρρηκτου Βράχου E_i και Βραχώμαζας E_m**

Για τον καθορισμό τους χρησιμοποιήθηκαν οι πιο σύγχρονες σχέσεις που έχουν προταθεί από τους Hoek & Diederichs, 2006:

$$E_i = \sigma_{ci} \cdot MR$$

$$E_m = E_i \cdot \left[0,02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{\frac{60+15D-GSI}{11}}} \right]$$

Ο συντελεστής διατάραξης της βραχώμαζας D λήφθηκε $D=0$ και η σταθερά $MR=350$ για όλες τις αναλύσεις. Με βάση την παραπάνω σχέση προκύπτει ένα φάσμα τιμών από 53,38 MPa έως 596,68 MPa.

- **Αντοχή Βραχόμαζας σ_{cm}**

Η αντοχή της βραχόμαζας σ_{cm} υπολογίστηκε βάσει του τύπου των Hoek & Brown, 1997:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \cdot \frac{\left[(m_b + 4s - a(mb - 8s)) \left(\frac{mb}{4} + s \right)^{a-1} \right]}{[2(1+a)(2+a)]}$$

Το εύρος τιμών της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη της κυμαίνεται από 0,17 MPa έως 0,80 MPa

- **Ισοδύναμες Παράμετροι Διατμητικής Αντοχής c και ϕ**

Από το συσχετισμό του κριτηρίου Hoek-Brown με το κριτήριο Mohr-Coulomb προκύπτουν για κάθε μια από τις γεωτεχνικές παραμέτρους που έχουμε ορίσει οι τιμές των ισοδύναμων παραμέτρων διατμητικής αντοχής. Το εύρος των τιμών της ισοδύναμης συνοχής της βραχόμαζας κυμαίνεται από 0,062 MPa έως 0,209 MPa, ενώ της ισοδύναμης γωνίας τριβής από 17,5° έως 34,5°.

- **Γωνία Διαστολικότητας δ**

Η διαστολικότητα της περιβάλλουσας βραχόμαζας ισούται με $\phi/4$, άρα: $\delta = 4,375^\circ \div 8,625^\circ$

4.5.3. Παράμετροι Άμεσης Υποστήριξης

Η τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης αποτελεί σημαντικό στοιχείο της επένδυσης των σηράγγων, καθώς περιορίζει τη σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας και συμβάλλει στην αποφυγή κατάρρευσης της οροφής και αποσφηνώσεων βραχωδών τεμαχών. Στις περιπτώσεις που μελετώνται επιλέγεται η άμεση υποστήριξη των σηράγγων να αποτελείται από κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος (shotcrete) με γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά. Οι παράμετροι της άμεσης υποστήριξης καθορίζονται στη συνέχεια, ενώ η δυσκαμψία και η αντοχή του σκυροδέματος, παράμετροι οι οποίες εξαρτώνται από το χρόνο, δεν εξετάζονται στις αριθμητικές αναλύσεις.

- **Πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος (dsh)**

Το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος λαμβάνεται ίσο με 0,20 m, σε όλες τις αναλύσεις.

- **Ειδικό βάρος εκτοξευόμενου σκυροδέματος (γ_{sh})**

Η τιμή του ειδικού βάρους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος θεωρείται ίση με 0,025 MN/m³.

- **Μέτρο ελαστικότητας εκτοξευόμενου σκυροδέματος (E_{sh})**

Στο φάσμα των αναλύσεων το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης λαμβάνεται ίσο με 20 GPa.

- Λόγος Poisson (ν_{sh})

Ο λόγος Poisson του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, λαμβάνεται ίσος με 0.2.

Στον πίνακα που ακολουθεί, Πίνακας 4.1, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι γεωμετρικές, γεωτεχνικές και οι παράμετροι της άμεσης υποστήριξης.

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικός πίνακας γεωμετρικών, γεωτεχνικών και παραμέτρων άμεσης υποστήριξης.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΤΙΜΕΣ	ΜΟΝΑΔΕΣ
Γεωμετρικές Παράμετροι	Διάμετρος Σήραγγας	D	8	m
	Ύψος Υπερκείμενων Γαιών	H	80	m
	Πλάτος Πυλώνα	W	4,8,16	m
Γεωτεχνικές Παράμετροι	Συντελεστής Οριζόντιων Γεωστατικών Τάσεων	K_0	1	-
	Ειδικό Βάρος Γεωυλικού	γ	0.025	MN/m ³
	Λόγος Poisson	ν	0.3	-
	Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής	GSI	10 - 30	-
	Μέτρο Παραμορφωσιμότητας Βραχώμαζας	E_m	53.38 – 596.68	MPa
	Αντοχή Άρρηκτου Βράχου σε Μονοαξονική Θλίψη	σ_{ci}	5 - 20	MPa
	Σταθερά Γεωυλικού	m_i	7	-
	Συντελεστής Διατάραξης	D	0	-
	Σταθερά MR	MR	350	-
	Αντοχή Βραχώμαζας	σ_{cm}	0.17 – 0.80	MPa
	Συνοχή	c	0.062 – 0.209	MPa
	Γωνία Τριβής	ϕ	17.5 – 34.5	(°)
	Διαστολικότητα	δ	4.375 – 8.625	(°)
	Παράμετροι Άμεσης Υποστήριξης	Μέτρο Ελαστικότητας	E_{sh}	20
Λόγος Poisson		ν_{sh}	0.2	-
Πάχος		d_{sh}	0.2	m
Ειδικό Βάρος		γ_{sh}	0.025	MN/m ³

4.6. Βασικές Έννοιες - Παραδοχές των Αριθμητικών Αναλύσεων

Σκοπός της ενότητας είναι η παρουσίαση και η επεξήγηση βασικών εννοιών παραδοχών που χρησιμοποιούνται κατά την επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Για την μελέτη της κατανομής των μεγεθών στη χαρακτηριστική διατομή ορίζεται η γωνία θ , η οποία έχει θετική φορά την ωρολογιακή. Ο ορισμός αυτός απεικονίζεται γραφικά στο σχήμα που ακολουθεί, Σχήμα 4.1. Στις δύο σήραγγες, προφανώς, οι γωνίες αυτές δεν είναι οι ίδιες αλλά ακριβώς συμμετρικές ως προς το κέντρο του πλάτους πυλώνα.



Σχήμα 4.1: Γραφική απεικόνιση της γωνίας θ και στις δύο σήραγγες.

Τέλος, τα βασικά σύμβολα που υιοθετούνται στις αριθμητικές αναλύσεις, είναι τα ακόλουθα:

- p_o : Κατακόρυφη γεωστατική τάση στο επίπεδο του άξονα της σήραγγας, $p_o = \gamma H$
- σ_{cm} : αντοχή της βραχώμαζας σε μονοαξονική θλίψη
- σ_{cm}/p_o : λόγος γεωτεχνικών συνθηκών
- S : Η απόσταση της χαρακτηριστικής διατομής από το μέτωπο
- S/R : κανονικοποιημένη διαμήκης απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής
- p : Πίεση επαφής (φορτίο) στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- N : Αξονική δύναμη στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- p/p_o : κανονικοποιημένο φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα)
- $N/(p_o * D)$: κανονικοποιημένη αξονική δύναμη στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας
- H/D : κανονικοποιημένο ύψος υπερκειμένων γαιών
- W/D : κανονικοποιημένο πλάτος πυλώνα
- L/D : κανονικοποιημένο μήκος εκσκαφής της σήραγγας

5. Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων

5.1. Εισαγωγή

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο περιλαμβάνει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα από τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της έρευνας με τις αντίστοιχες παρατηρήσεις που διαμορφώνονται λόγω των αποτελεσμάτων. Η επιλογή των αποτελεσμάτων γίνεται με σκοπό να αναδειχθούν τα ακόλουθα ζητήματα:

- Η επίδραση του πλάτους του πυλώνα (W/D) στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.
- Η επίδραση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών μέσω του λόγου (σ_{cm}/ρ_0) στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.

5.2. Επίδραση πλάτους πυλώνα (W/D)

Για την επίδραση της εγκάρσιας απόστασης μεταξύ των παρειών των σηράγγων στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης έχουν επιλεγεί να παρουσιαστούν αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ και $W/D = 2$. Οι αναλύσεις αυτές επιλέχθηκαν καθώς αποτελούν τις δύο ακραίες τιμές των αναλύσεων που έγιναν. Επιπλέον για πλάτος πυλώνα $W/D > 2$, έχει παρατηρηθεί ότι το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης παραμένει περίπου στο ίδιο επίπεδο (Chortis F. & Kanvadas M. 2015). Οι αναλύσεις περιλαμβάνουν ταυτόχρονα τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά (Πίνακας 5.1), με σκοπό να επισημανθεί η μεγιστοποίηση του φαινομένου στην περίπτωση αυτή. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν αναφέρονται στα φορτία, στα εντατικά μεγέθη (αξονικές δυνάμεις) που δέχεται η άμεση υποστήριξη των σηράγγων και στις κύριες τάσεις που αναπτύσσονται στη βραχώμαζα.

Πίνακας 5.1: Γεωμετρικές και γεωτεχνικές παράμετροι αντιπροσωπευτικών αναλύσεων με τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$ και πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ & 2 .

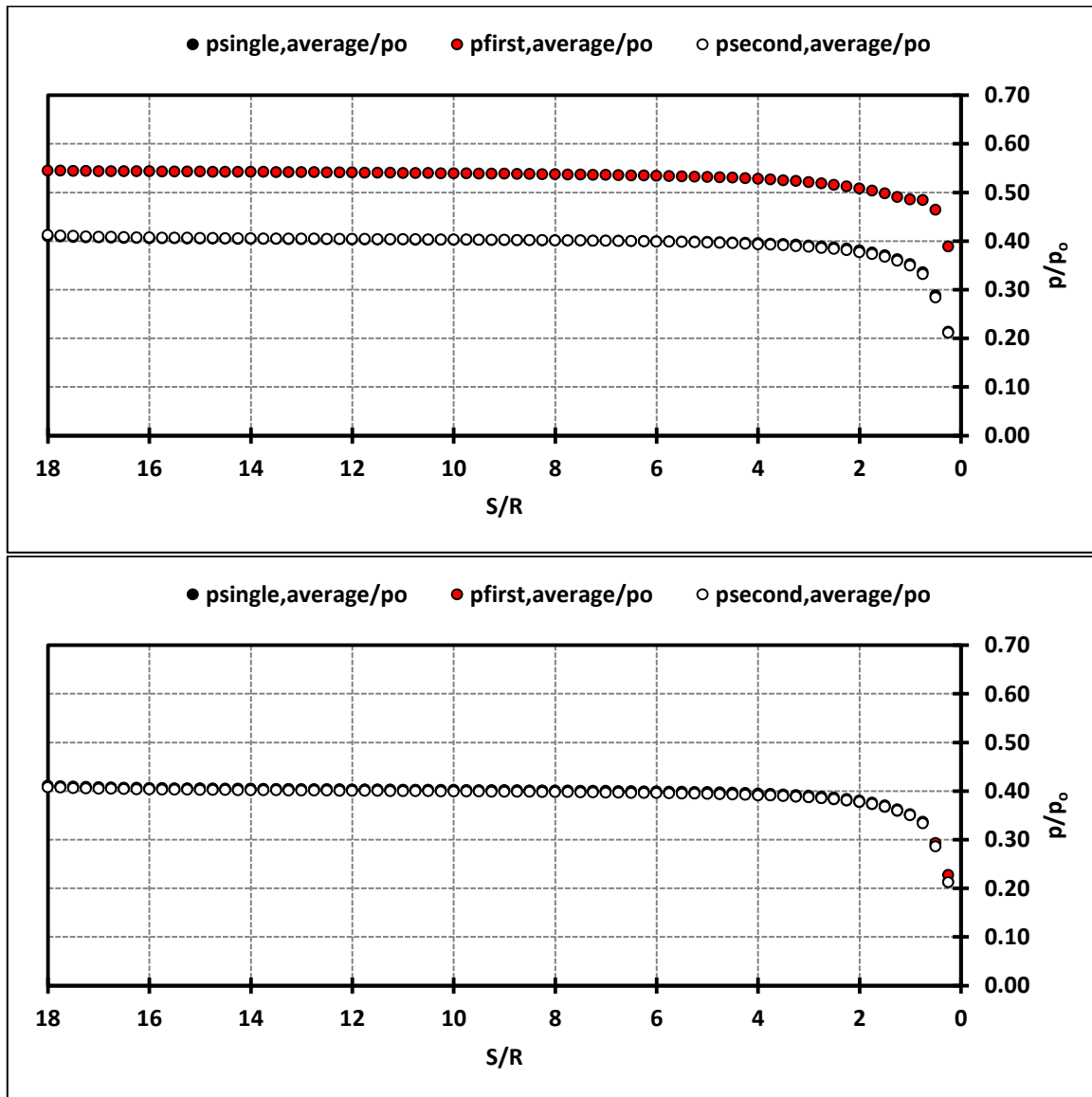
W/D	K_0	GSI	σ_{cm}	E_m	c	ϕ	σ_{cm}/ρ_0
0.5	1	10	0.43	106.76	0.079	21.1	0.21
2	1	10	0.43	106.76	0.079	21.1	0.21

5.2.1. Φορτία (p)

Τα αποτελέσματα των φορτίων (p) στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων, για αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ και $W = 2D = 16m$ φαίνονται στα διαγράμματα του Γραφήματος 5.1. Αναλυτικότερα, στο σχήμα προβάλλεται το μέσο φορτίο ($p_{average}$) κανονικοποιημένο ως προς τη αρχική γεωστατική πίεση (ρ_0), συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα της σήραγγας ($R = 4m$, ακτίνα σήραγγας).

Για τη «μονή» και τη «δεύτερη» σήραγγα, η επιρροή της τοποθέτησης άμεσης υποστήριξης από στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι η ακόλουθη: με την περαιτέρω προώθηση του μετώπου της σήραγγας η διατομή τείνει να συγκλίνει περαιτέρω, ενώ στην περαιτέρω σύγκλιση ανθίσταται ο δακτύλιος από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αναλαμβάνοντας φορτία. Σε απόσταση

περίπου ίση με πέντε διαμέτρους της σήραγγας από το μέτωπο ($S = 5R$) τα φορτία που αναλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σταθεροποιούνται.



Γράφημα 5.1: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.

Από τα παραπάνω γραφήματα παρατηρείται αύξηση του φορτίου στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της «πρώτης» σήραγγας σε σχέση με την «μονή» λόγω της διάνοιξης της «δεύτερης». Όταν το πλάτος πυλώνα είναι 4m τα μεγέθη στην «πρώτη» σήραγγα είναι αυξημένα σε σχέση με την «μονή». Εν αντιθέσει, όσο το πλάτος πυλώνα αυξάνεται η αλληλεπίδραση εξαλείφεται. Αυτό παρατηρείται στο κάτω διάγραμμα, με πλάτος πυλώνα 16m.

Αύξηση των τιμών του φορτίου υπάρχει και στη «δεύτερη» σήραγγα, φυσικά πολύ μικρότερη σε σχέση με την αύξηση της «πρώτης» και πολύ μικρή συγκρινόμενη με αυτήν.

Η διάνοιξη μιας δεύτερης σήραγγας, ειδικά σε κοντινή απόσταση, προκαλεί σημαντική αύξηση στα φορτία της προσωρινής υποστήριξης της «πρώτης». Ο μηχανισμός ανάπτυξης του

φαινομένου είναι ο εξής: Η μονή-πρώτη σήραγγα διανοίγεται προκαλώντας ανακατανομή και μεταβολή στο τασικό και παραμορφωσιακό πεδίο του περιβάλλοντος γεωυλικού (ανάπτυξη πλαστικής ζώνης, δημιουργία ακτινικών μετατοπίσεων) . Στη συνέχεια επιτυγχάνεται η ισορροπία του συστήματος βραχόμαζα - άμεση υποστήριξη με βάση την εξέλιξη του φαινομένου της σύγκλισης - αποτόνωσης. Η δεξιά - δεύτερη σήραγγα διανοίγεται στη συνέχεια σε ήδη ανακατανομημένο πεδίο τάσεων και παραμορφώσεων, εντός δυναμικής πλαστικής ζώνης, ισορροπώντας όμως με βάση την απόκριση κατά την εξέλιξη της σύγκλισης - αποτόνωσης προσεγγίζοντας τη συμπεριφορά μεμονωμένης σήραγγας. Η ήδη διανοιχθείσα αριστερή - πρώτη σήραγγα λόγω της δυσκαμψίας της υποστήριξής της δε μπορεί να παραλάβει τη μεταβολή τάσεων και παραμορφώσεων που συντελείται στον πυλώνα (στην περιοχή ανάμεσα στις παρειές των δύο σηράγγων), λόγω της ανάπτυξης του «φαινομένου θόλου» - «τοξωτής λειτουργίας» του γεωυλικού κατά την εκσκαφή και υποστήριξη της δεξιάς - δεύτερης σήραγγας, ως επιπρόσθετη ακτινική μετατόπιση. Η δυσκαμψία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος παρεμποδίζει την εξέλιξη πλεονάζουσας σύγκλισης οδηγώντας στην επιπρόσθετη φόρτιση του κελύφους της υποστήριξης της αριστερής - πρώτης σήραγγας.

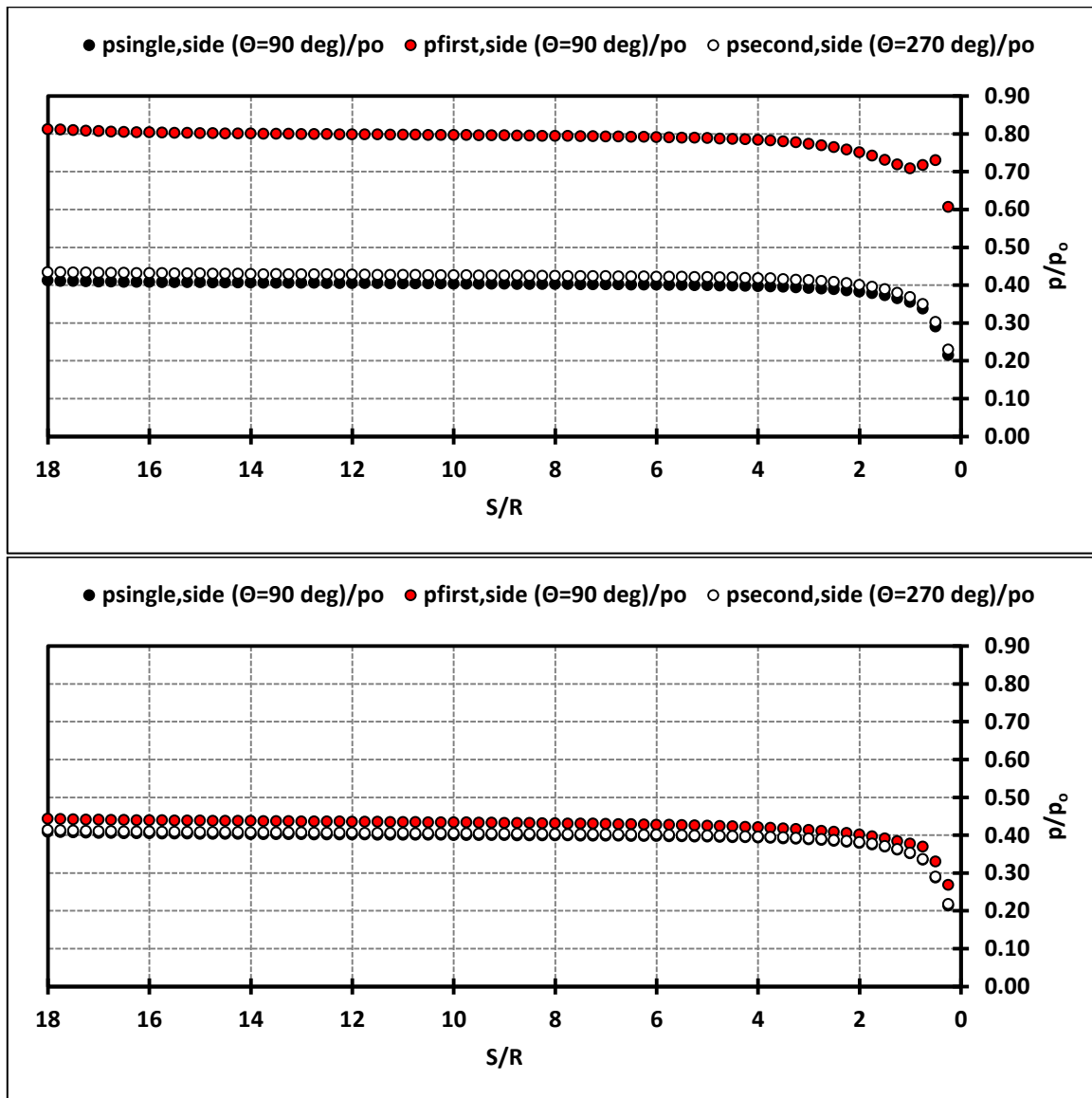
Παρατηρείται, τέλος, ότι με την αύξηση του πλάτους του πυλώνα, το φορτίο στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων μειώνεται σημαντικά, καθώς η ζώνη αλληλεπίδρασης μεταξύ των δίδυμων σηράγγων συρρικνώνεται.

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 διαμήκη άξονα των κλάδων (Γράφημα 5.2). Το γράφημα 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 παρειά της «πρώτης» σήραγγας, σε βαθμό που προσεγγίζει τα φορτία που αναπτύσσονται στην άμεση υποστήριξη της μεμονωμένης σήραγγας.

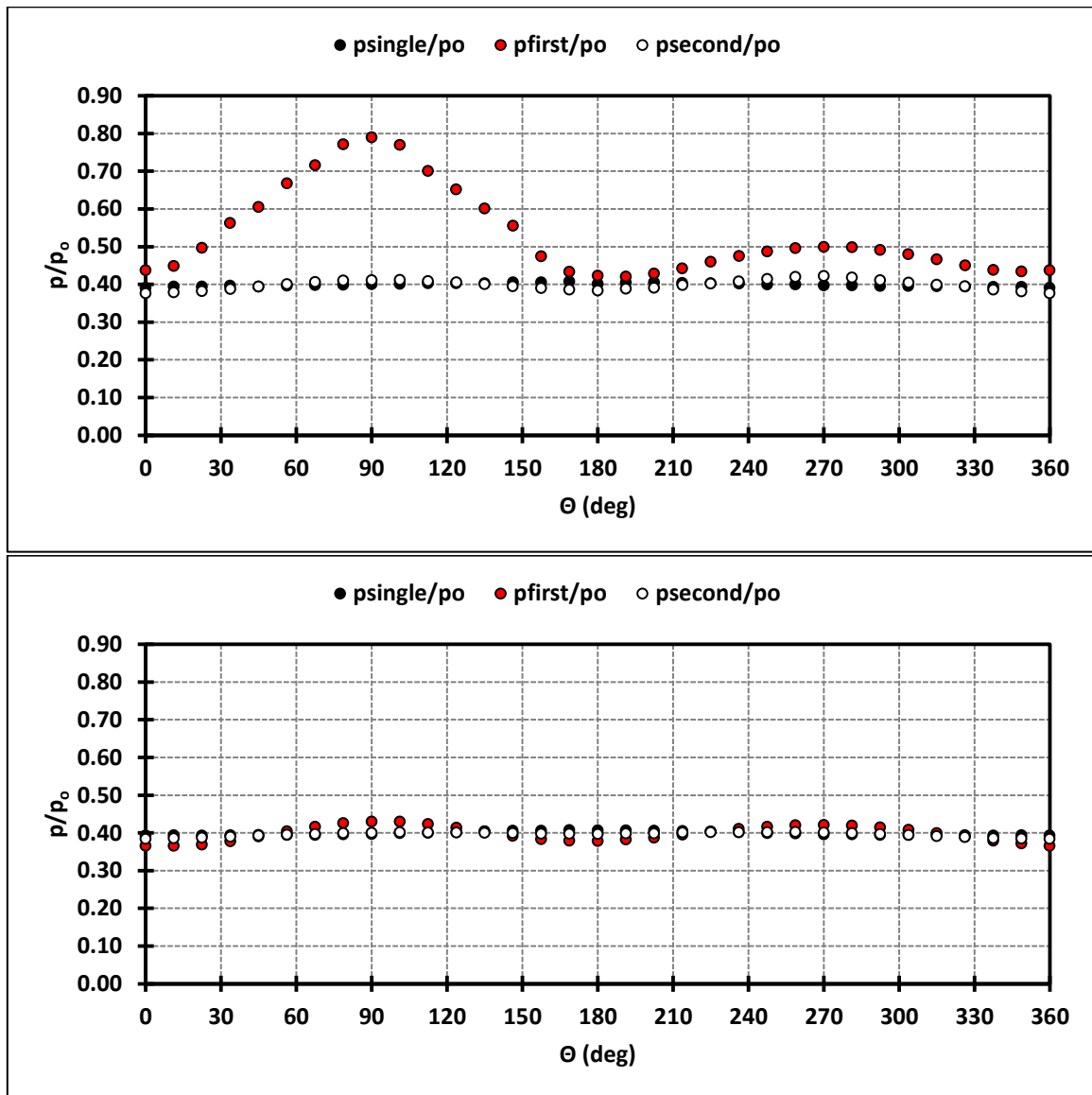


Σχήμα 5.1: Απεικόνιση της γωνίας θ και στις δύο σήραγγες



Γράφημα 5.2: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη γεωστατική τάση.

Στη συνέχεια, το Γράφημα 5.3 αποτυπώνει την κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου p/p_0 συναρτήσει της γωνίας Θ (°) 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). Περισσότερο καταπονούνται οι εσωτερικές παρειές των σηράγγων. Αξιοσημείωτη είναι η ελαχιστοποίηση των φορτίων στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» σήραγγας όταν το πλάτος του πυλώνα αυξάνεται.



Γράφημα 5.3: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου p/p_0 συναρτήσει της γωνίας θ ($^\circ$) για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4\text{m}$ (πάνω) & $W = 2D = 16\text{m}$ (κάτω)

Στο επόμενο γράφημα, Γράφημα 5.4, απεικονίζεται η χρονοϊστορία των μέσων φορτίων (p_{average}) της «πρώτης» (first tunnel) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) σε επιλεγμένη διατομή με κανονικοποιημένη διαμήκη απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ($S/R = 10$), συναρτήσει του βήματος (step) της ανάλυσης. Τα φορτία είναι ανηγμένα ως προς την αρχική γεωστατική τάση (p_0). Αναλυτικότερα, στη διάρκεια των βημάτων 0 έως 80 πραγματοποιείται η εκσκαφή και υποστήριξη της «μονής» σήραγγας, ενώ το βήμα 41 αναφέρεται στην τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης στη διατομή που απέχει 40m από το μέτωπο. Ακολούθως, από το βήμα 81 έως 160 πραγματοποιείται η εκσκαφή και η υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας, ενώ στο βήμα 121 τοποθετείται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της διατομής που βρίσκεται 40m από το μέτωπο.

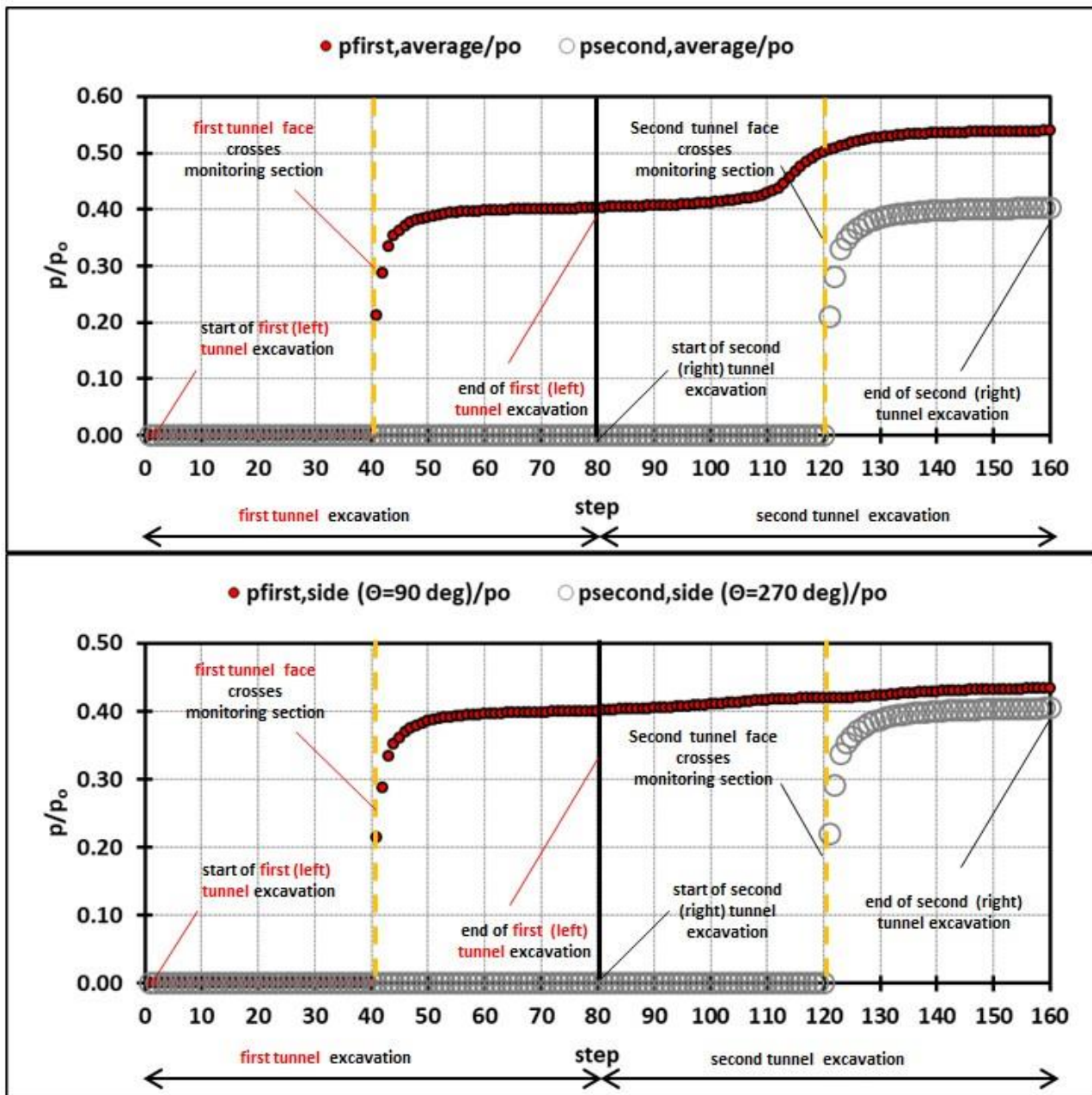
Παρατηρείται ότι μέχρι το βήμα 41 δεν έχουν αναπτυχθεί φορτία καθώς η διατομή που εξετάζουμε βρίσκεται στο $Y=40\text{m}$, που σημαίνει ότι στο βήμα 40 εκσκάπτεται και στο βήμα 41 τοποθετείται η προσωρινή της υποστήριξη. Από εκείνο το σημείο και μέχρι το βήμα 80, που είναι

και το πέρας της εκσκαφής της αριστερής σήραγγας, η σήραγγα ξεκινάει να αναπτύσσει φορτία, ωστόσο συμπεριφέρεται ακόμη σαν «single». Στο βήμα 80 ξεκινά η διάνοιξη της «second». Η επιρροή όμως της «second» στην εξεταζόμενη διατομή θα ξεκινήσει στο βήμα 121. Η συμπεριφορά της θα είναι ανάλογη της «single» με ελαφρώς υψηλότερες τιμές. Η «first» πλέον σήραγγα ξεκινά από το βήμα 80 να επηρεάζεται από την εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας («second»). Στην αρχή η επιρροή είναι πολύ μικρή και όσο η εκσκαφή πλησιάζει στην εξεταζόμενη διατομή, ειδικά μετά το βήμα 100, παρατηρείται απότομη αύξηση των φορτίων η οποία όταν η εκσκαφή περάσει τη διατομή $Y=40m$ σιγά σιγά αρχίζει και ισορροπεί λαμβάνοντας την τελική τιμή της στο βήμα 160.

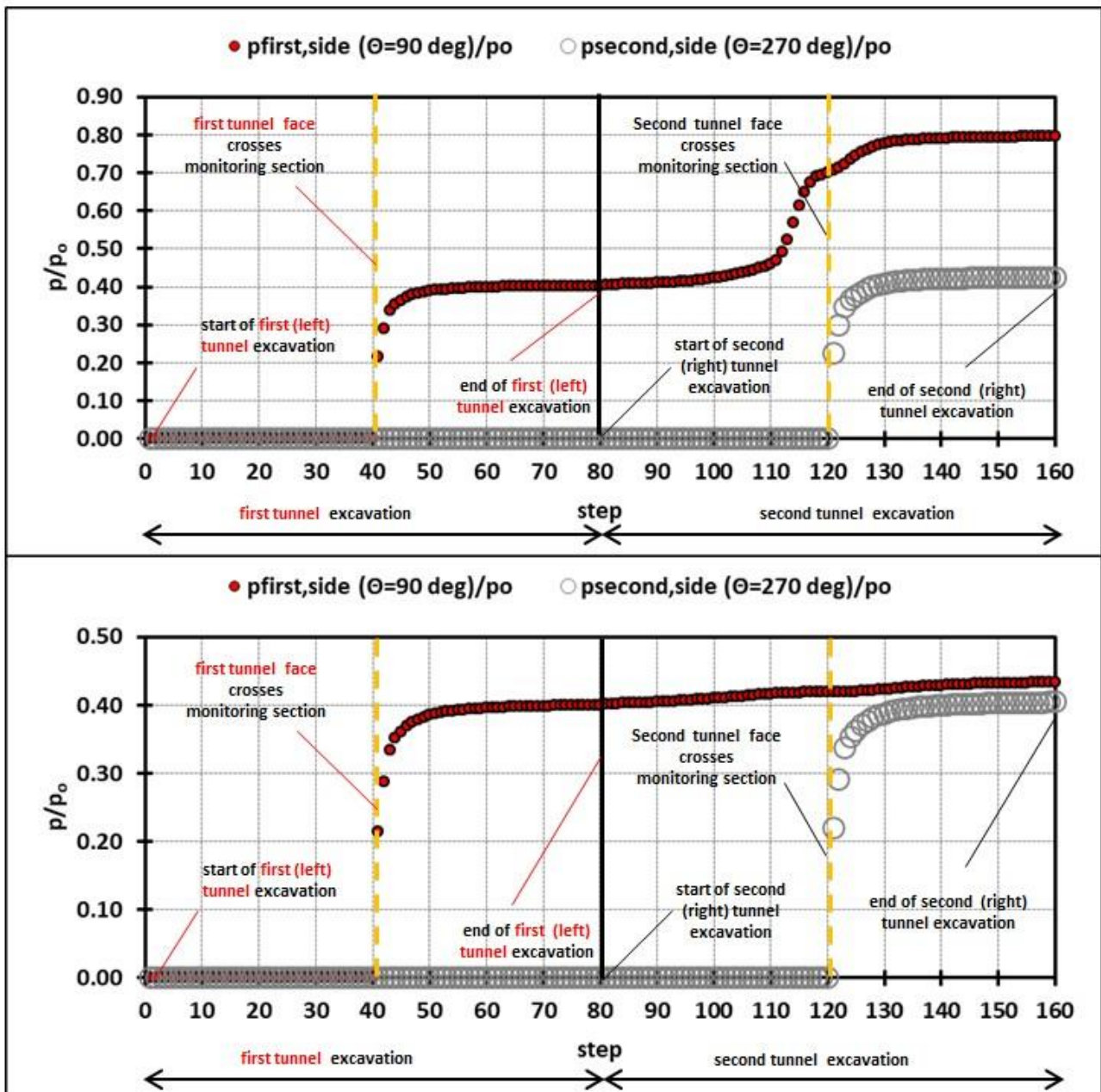
Η διάνοιξη λοιπόν της νέας σήραγγας επηρεάζει σημαντικά το υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης της «πρώτης» σήραγγας όταν η προώθηση του μετώπου της «δεύτερης» περνά δίπλα από την υπό διερεύνηση διατομή, ενώ αυτή η επιρροή μειώνεται με την απομάκρυνση του μετώπου της «δεύτερης» σήραγγας από τη δεδομένη διατομή της αριστερής σήραγγας.

Με τη διεύρυνση του πλάτους του πυλώνα, τα πρόσθετα φορτία που παραλαμβάνει η αριστερή σήραγγα λόγω της εκσκαφής της δεξιάς μειώνονται και θεωρούνται σχεδόν αμελητέα. Η επίδραση του πλάτους του πυλώνα (W/D) καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την κατανομή των φορτίων και επιδρά στο μέγεθος αυτών όσον αφορά στην «πρώτη» σήραγγα, η οποία επηρεάζεται από την προχώρηση της εκσκαφής της «δεύτερης» σήραγγας.

Τέλος, στο Γράφημα 5.5 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων για τις δύο περιπτώσεις, καθώς τα μέγιστα φορτία λαμβάνονται στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων όπου το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεγιστοποιείται. Τα φορτία που αναλαμβάνει η άμεση υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας είναι περίπου στο ίδιο επίπεδο ενώ το πλάτος πυλώνα έχει εξίσου την ίδια σημασία.



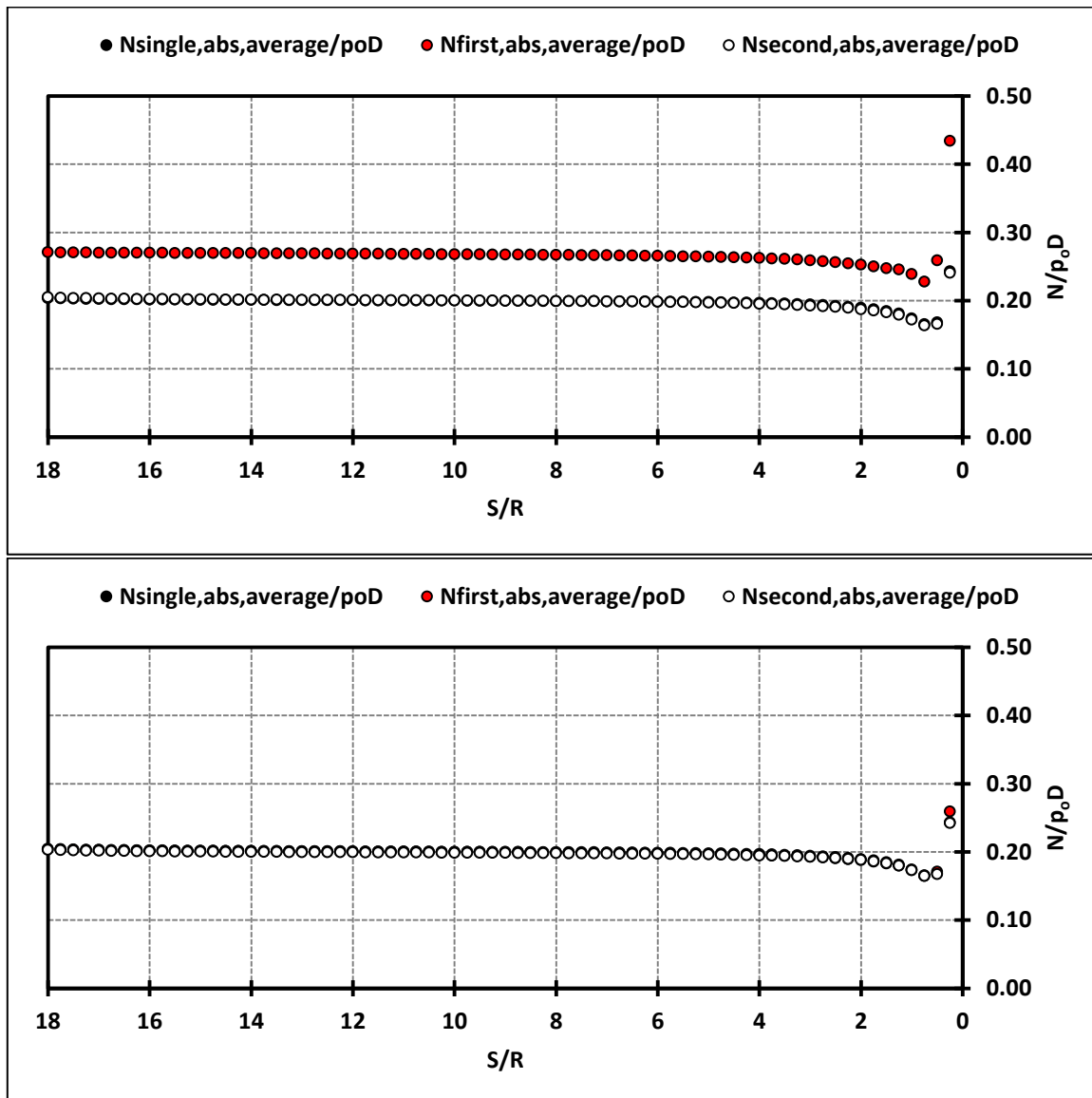
Γράφημα 5.4: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη γεωστατική τάση, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.



Γράφημα 5.5: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40\text{m}$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη γεωστατική τάση.

5.2.2. Αξονικές δυνάμεις (N)

Σύμφωνα με τα γραφήματα που ακολουθούν, οι αξονικές δυνάμεις (N) παρουσιάζουν ανάλογα αποτελέσματα – συμπεριφορά με αυτή των φορτίων (p) στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων για αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ και $W/D = 2$. Στο Γράφημα 5.6 προβάλλεται η κατά απόλυτη τιμή μέση αξονική δύναμη ($N_{abs,average}$), κανονικοποιημένη ως προς το γινόμενο της γεωστατικής πίεσης με τη διάμετρο της σήραγγας (p_0D). Τα διαγράμματα έχουν σχεδιαστεί συναρτήσει του λόγου S/R (όπου S η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής).

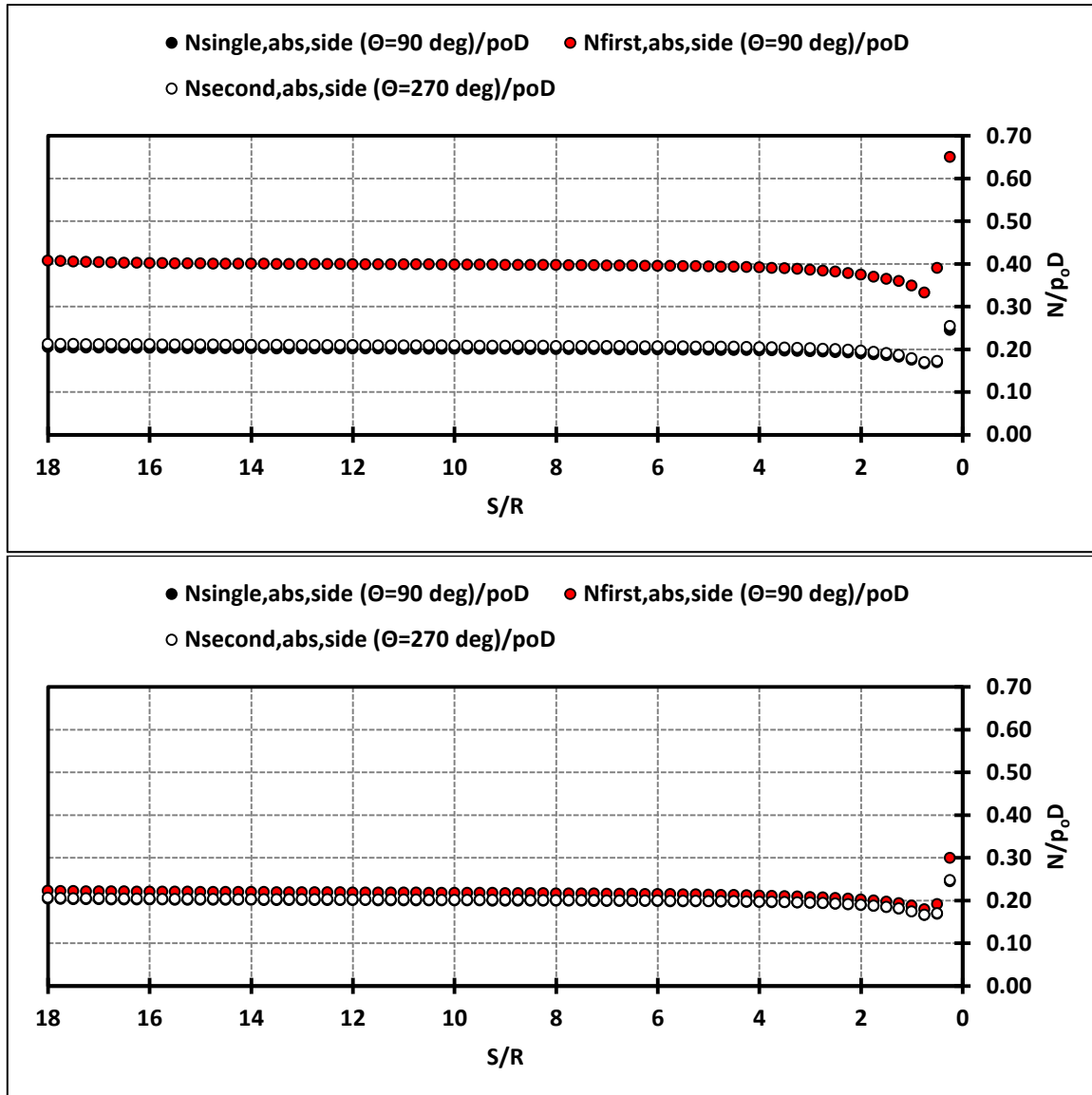


Γράφημα 5.6: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων.

Για $W/D = 0.5$ παρατηρείται ότι η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας επηρεάζει σημαντικά το υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης της αριστερής με εμφανή αύξηση των αξονικών δυνάμεων, η οποία σταδιακά ελαττώνεται με τη διεύρυνση του πλάτους του πυλώνα. Από τα παραπάνω

γίνεται σαφές ότι η διάνοιξη μιας δεύτερης σήραγγας, ειδικά σε κοντινή απόσταση, προκαλεί σημαντική αύξηση και στις αξονικές δυνάμεις της προσωρινής υποστήριξης.

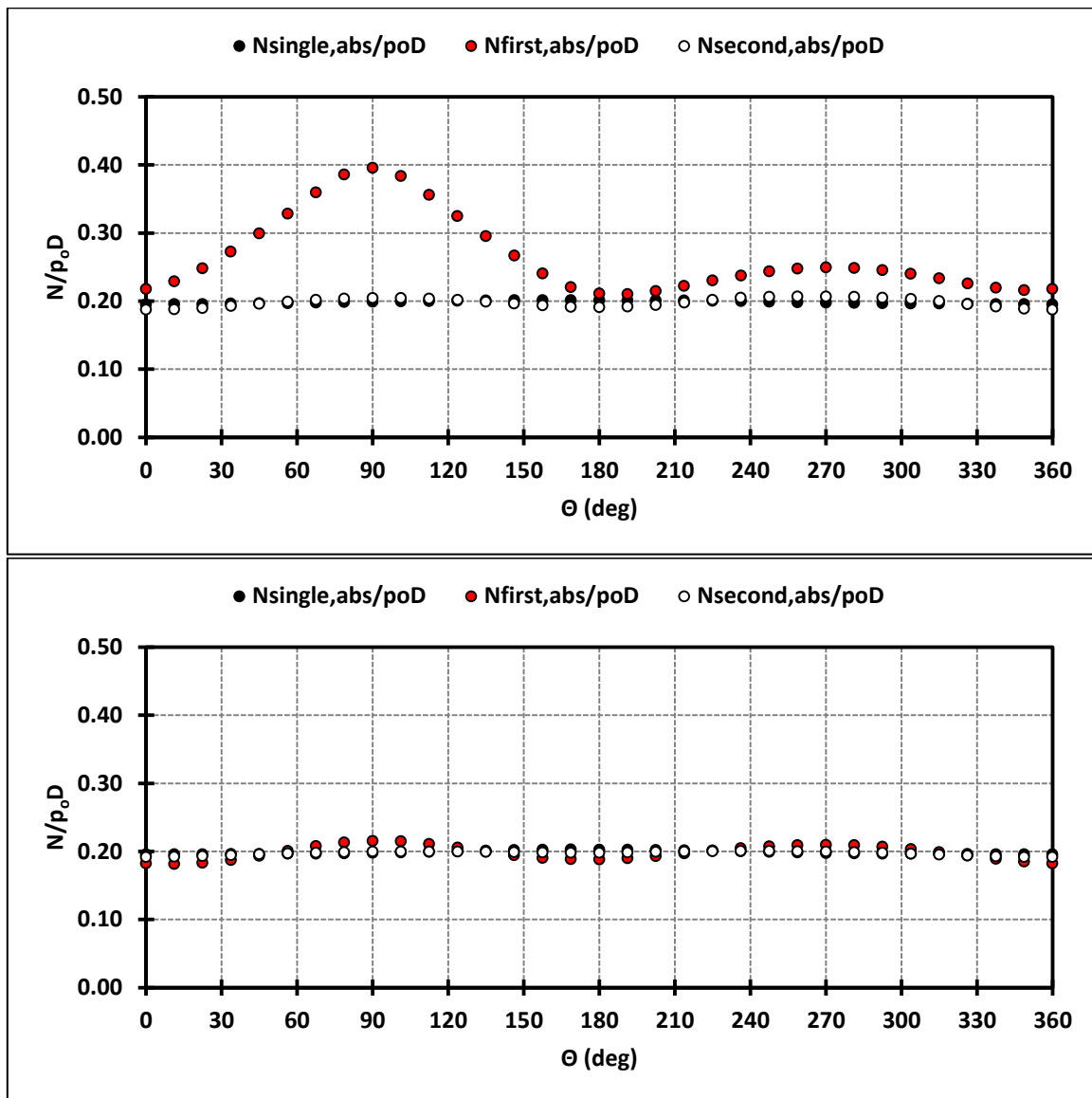
Η μεγιστοποίηση της αξονικής δύναμης εμφανίζεται πάλι στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων καθώς εδώ υπάρχει η μεγαλύτερη επιρροή του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Πιο συγκεκριμένα, η γωνία $\Theta = 90^\circ$ για τη «μονή/πρώτη» σήραγγα (single/first tunnel) και η γωνία $\Theta = 270^\circ$ για τη «δεύτερη» σήραγγα (second tunnel), όπως φαίνεται στο Γράφημα 5.7. Είναι εμφανής όπως και πριν η επιρροή του πλάτους πυλώνα.



Γράφημα 5.7: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.

Στη συνέχεια, στο Γράφημα 5.8 αποτυπώνεται η κατανομή της κανονικοποιημένης αξονικής δύναμης N/p_0D συναρτήσεως της γωνίας Θ ($^\circ$) για πλάτη πυλώνα $W = 0.5D = 4\text{m}$ και $W = 2D = 16\text{m}$. Παρατηρείται αύξηση των δυνάμεων σε κάθε περιοχή της «πρώτης» σήραγγας (first tunnel) λόγω της διάνοιξης της «δεύτερης» (second tunnel). Περισσότερο καταπονούνται οι εσωτερικές

παρειές των σηράγγων. Αξιοσημείωτη είναι η ελαχιστοποίηση των αξονικών δυνάμεων στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» σήραγγας όταν το πλάτος του πυλώνα αυξάνεται.



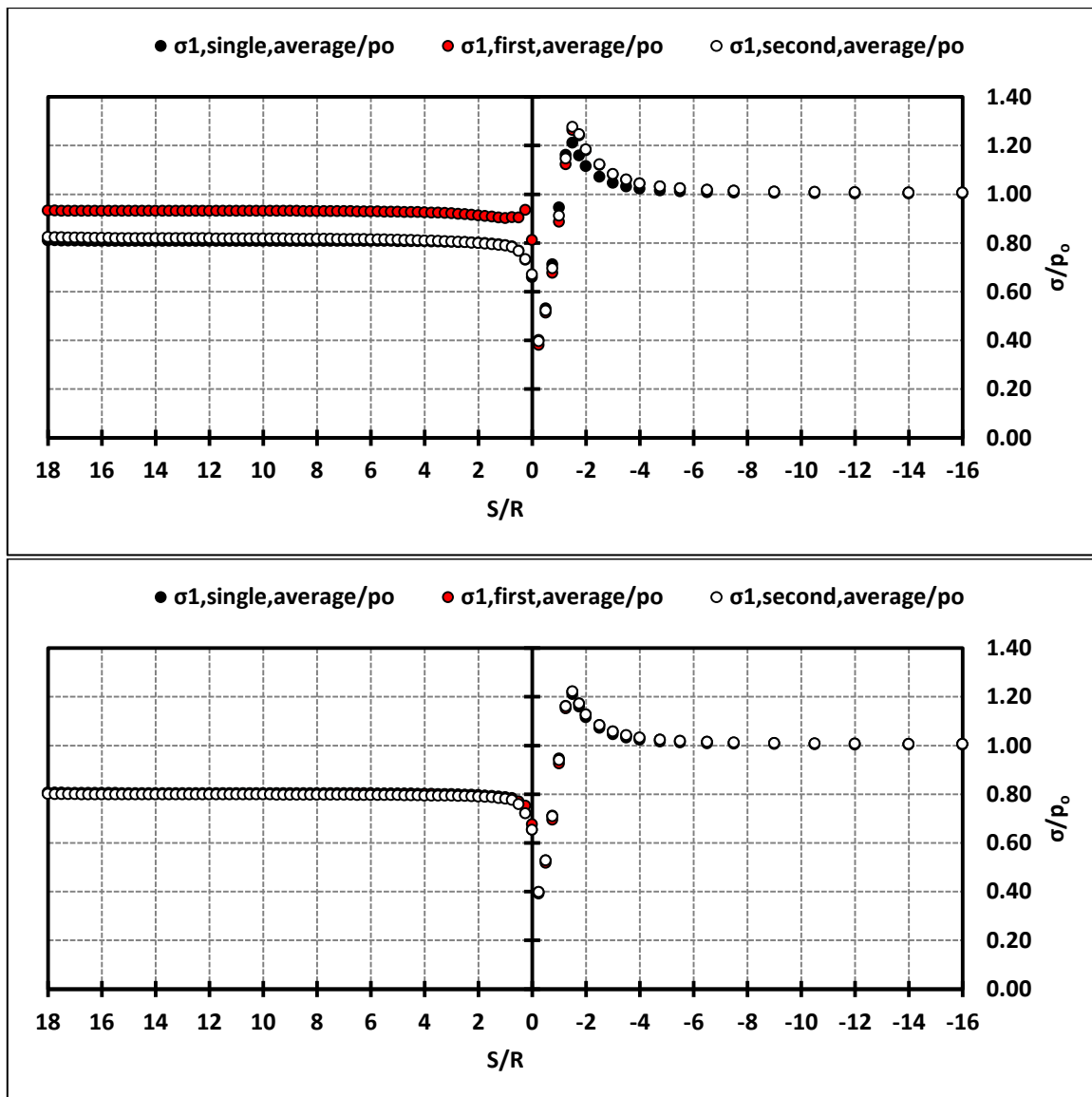
Γράφημα 5.8: Κατανομή κανονικοποιημένης αξονικής δύναμης N/p_oD συναρτήσει της γωνίας Θ (°) για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (πάνω) & $W = 2D = 16m$ (κάτω)

5.2.3. Κύριες τάσεις (σ_1, σ_3)

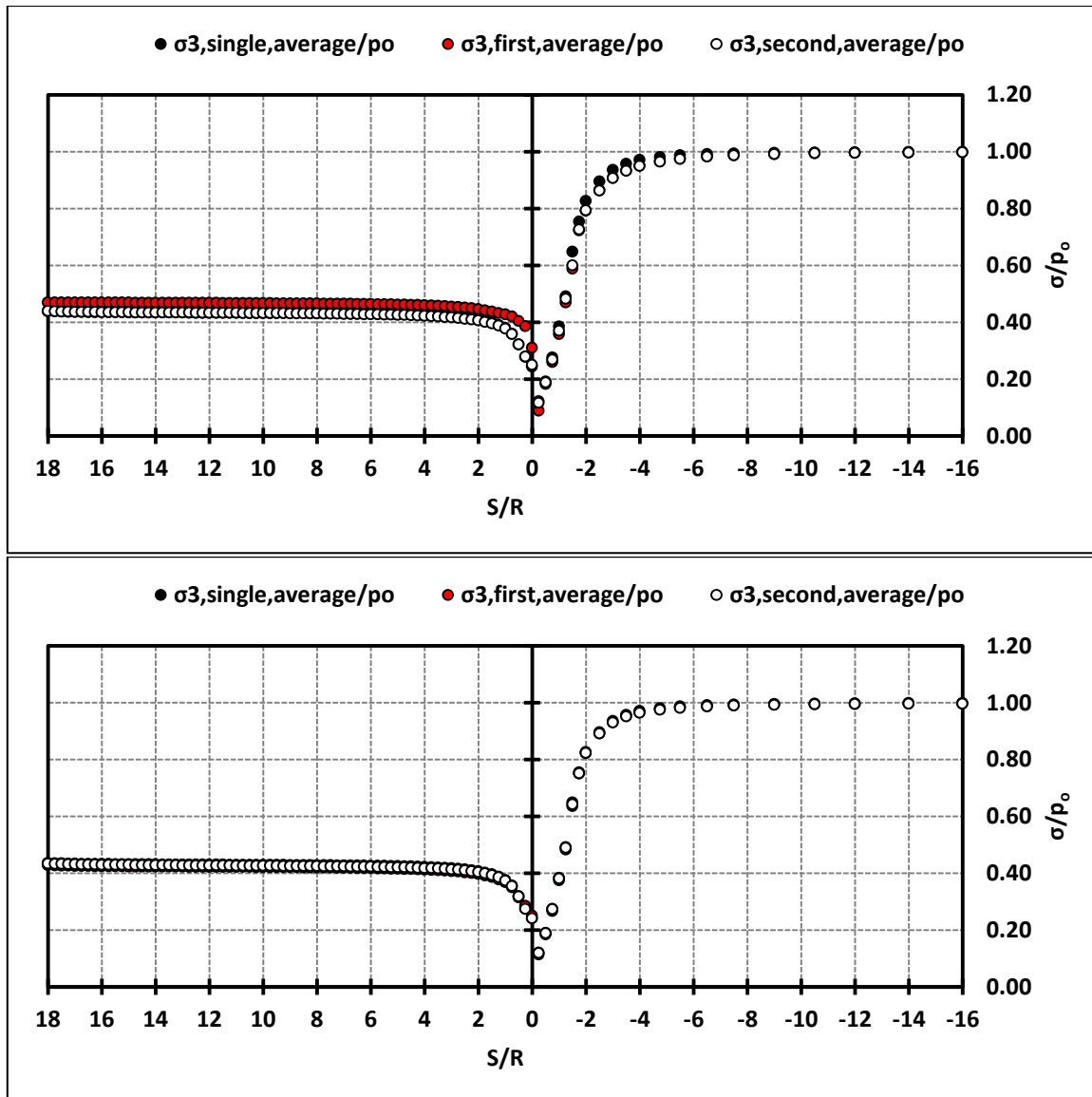
Οι γεωστατικές και τεκτονικές τάσεις που είναι «συσσωρευμένες» στη βραχώμαζα αποτελούν τις «παραμένουσες» τάσεις και «εκτονώνονται» - ανακατανέμονται με τη διάνοιξη ενός υπόγειου έργου με αποτέλεσμα την εκδήλωση παραμορφώσεων στην περιβάλλουσα βραχώμαζα. Μάλιστα, η εκκαφή μίας σήραγγας σε περιβάλλουσα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

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κύριων τάσεων (σ_1, σ_3) στη βραχώμαζα, για αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4\text{m}$ και $W = 2D = 16\text{m}$, όπως φαίνονται στα διαγράμματα του γραφημάτων που ακολουθούν.

Αναλυτικότερα, στα γραφήματα 5.9 και 5.10 παρουσιάζονται οι μέσες κύριες τάσεις, σ_1 και σ_3 αντίστοιχα, κανονικοποιημένες ως προς τη αρχική γεωστατική πίεση (p_0), συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκους άξονα της σήραγγας ($R = 4\text{m}$, ακτίνα σήραγγας).



Γράφημα 5.9: Μηκοτομική απεικόνιση της σ_1 στη βραχόμαζα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των τάσεων.



Γράφημα 5.10: Μηκοτομική απεικόνιση της σ_3 στη βραχόμαζα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των τάσεων.

Από τα παραπάνω γραφήματα φαίνεται ότι στο φυσικό εντατικό πεδίο και πριν την εκσκαφή οποιασδήποτε σήραγγας οι αρχικές κύριες τάσεις είναι ίσες μεταξύ τους και έχουν την ίδια τιμή με τη γεωστατική πίεση (p_0). Αυτό οφείλεται στην αρχική μας παραδοχή για το συντελεστή πλευρικών γεωστατικών τάσεων (K_0), όπου $K_0=1$.

Κατά τη διάρκεια εκσκαφής και προχώρησης του μετώπου έχουμε ανακατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων στη βραχόμαζα γύρω από κάθε κυκλική σήραγγα. Είναι εμφανές ότι έχουμε μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής αύξηση της κύριας κατακόρυφης τάσης σ_1 και μείωση αντίστοιχα της σ_3 . Αντίστοιχα στο μέτωπο εκσκαφής και πίσω από αυτό παρατηρείται μείωση των τάσεων και σταθεροποίηση τους μετά από περίπου δύο διαμέτρους. Η διαταραχή αυτή των τάσεων είναι που προκαλεί συγκλίσεις στη βραχόμαζα. Ειδικότερα, Οι συγκλίσεις αρχίζουν σε απόσταση περίπου 0.5-0.75 D εμπρός από το μέτωπο. Στο μέτωπο έχει συμβεί το 25% - 35% της

συνολικής σύγκλισης, ενώ οι συγκλίσεις ολοκληρώνονται σε απόσταση περίπου 1.5D πίσω από το μέτωπο.

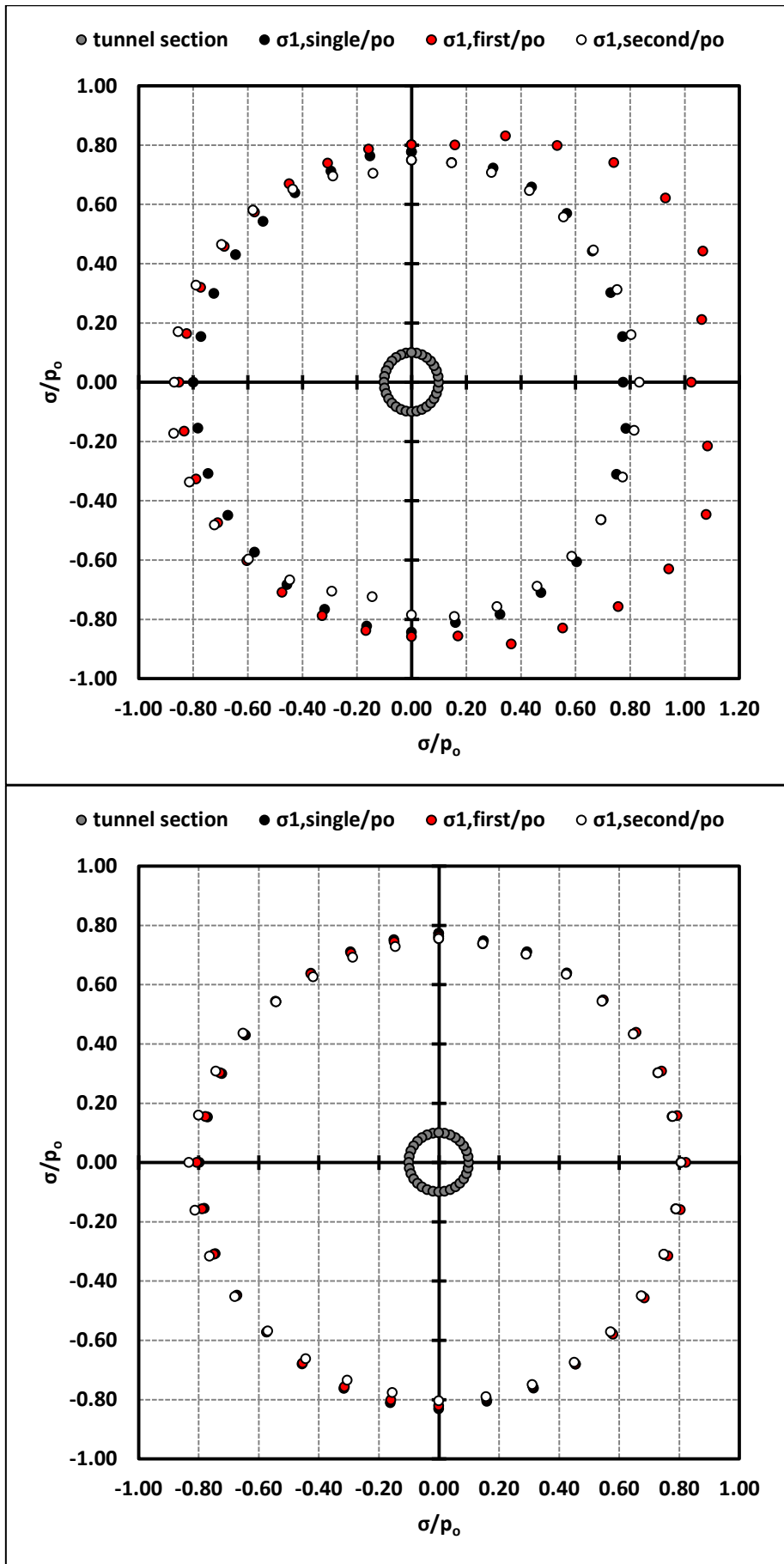
Η μονή-πρώτη σήραγγα διανοίγεται προκαλώντας ανακατανομή και μεταβολή στο τασικό και παραμορφωσιακό πεδίο του περιβάλλοντος γεωυλικού. Στη συνέχεια επιτυγχάνεται η ισορροπία του συστήματος βραχόμαζα - άμεση υποστήριξη με βάση την εξέλιξη του φαινομένου της σύγκλισης - αποτόνωσης. Η δεξιά - δεύτερη σήραγγα διανοίγεται στη συνέχεια σε ήδη ανακατανομημένο πεδίο τάσεων και παραμορφώσεων, εντός δυνητικής πλαστικής ζώνης, προσεγγίζοντας τη συμπεριφορά μεμονωμένης σήραγγας. Η ήδη διανοιχθείσα αριστερή - πρώτη σήραγγα λόγω της δυσκαμψίας της άμεσης υποστήριξής παρεμποδίζει την εξέλιξη πλεονάζουσας σύγκλισης οδηγώντας στην αύξηση των τάσεων της αριστερής - πρώτης σήραγγας.

Παρατηρείται, τέλος, ότι με την αύξηση του πλάτους του πυλώνα από $W/D=0.5$ σε $W/D=2$ μειώνεται σημαντικά η αύξηση αυτή των τάσεων στην πρώτη σήραγγα καθώς η ζώνη αλληλεπίδρασης μεταξύ των δίδυμων σηράγγων συρρικνώνεται.

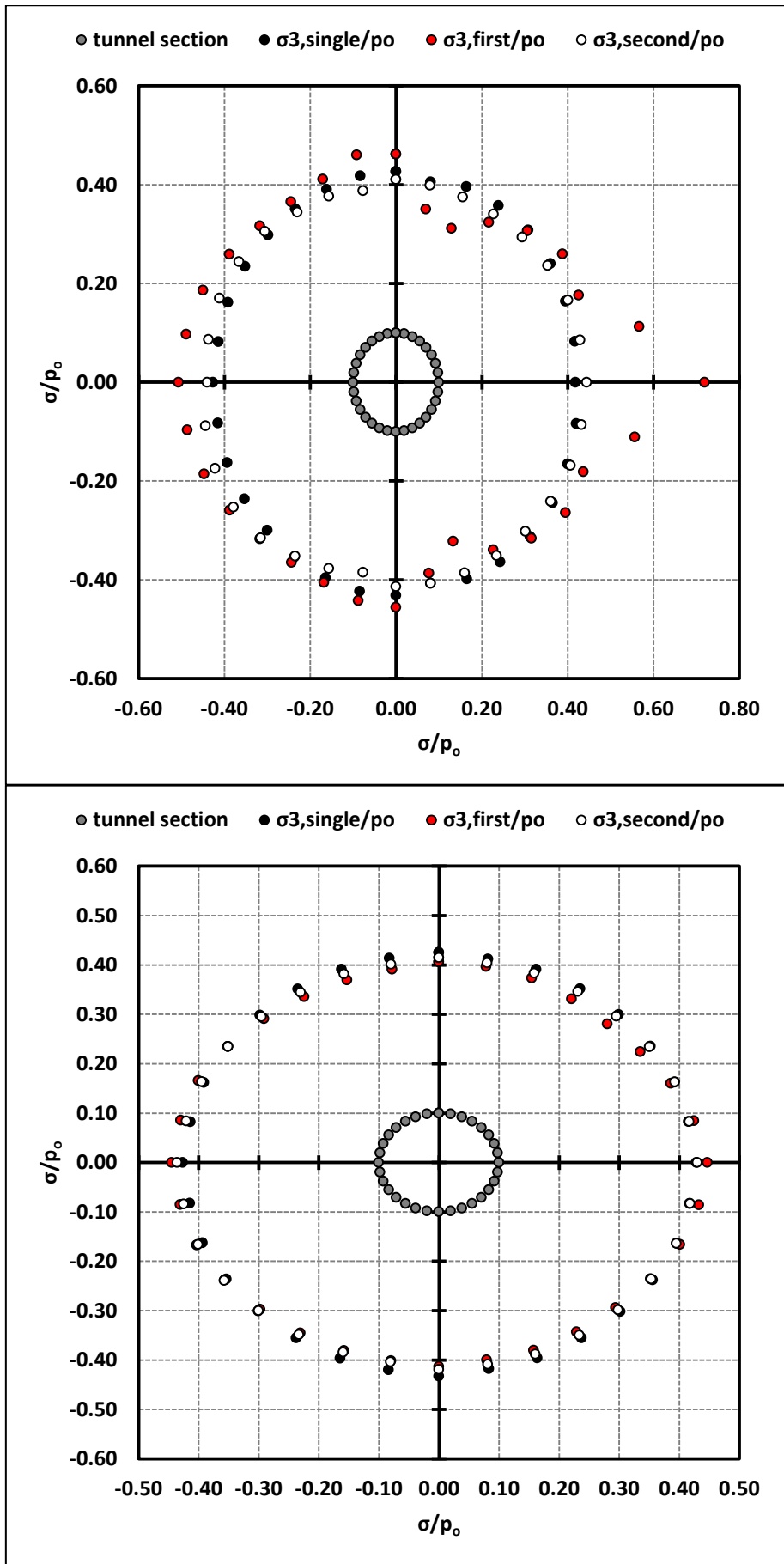
Στη συνέχεια, στα γραφήματα που ακολουθούν (Γράφημα 5.11 και 5.12) παρουσιάζονται στη διατομή οι τάσεις σ_1 και σ_3 αντίστοιχα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second tunnel, για πλάτη πυλώνα, $W/D=0.5$ και $W/D=2$. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την αρχική γεωστατική τάση.

Παρατηρείται από τα παρακάτω γραφήματα ότι η σ_1 είναι μεγαλύτερη από τη σ_3 . Κατά τη διάνοιξη της μονής και της πρώτης σήραγγας οι μέγιστες τιμές για τις τάσεις παρουσιάζονται στη στέψη, τον πυθμένα και τις παρειές και έχουν την ίδια τιμή. Αυτό οφείλεται στο συντελεστή πλευρικών γεωστατικών τάσεων που ισούται με τη μονάδα.

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 p_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



Γράφημα 5.11: Προβολή της σ_1 στην τυπική διατομή για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την αρχική γεωστατική τάση.



Γράφημα 5.12: Προβολή της σ_3 στην τυπική διατομή για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, πάνω $W/D=0.5$ και κάτω $W/D=2$. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση

5.3. Επίδραση γεωτεχνικών χαρακτηριστικών

Οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων καθορίζουν τη συμπεριφορά της βραχώμαζας κατά τη διάρκεια της εκσκαφής μιας δίδυμης σήραγγας. Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των γεωτεχνικών συνθηκών στην εξέλιξη των φορτίων και των αξονικών δυνάμεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης αλλά και στην εξέλιξη των τάσεων στο γεωυλικό κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, για κάθε ένα από τα τρία προσομοιώματα που κατασκευάστηκαν, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις για ένα εύρος γεωτεχνικών συνθηκών. Για κάθε ένα από τα τρία μοντέλα πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για είκοσι διαφορετικά γεωτεχνικά ζεύγη.

Στις υποενότητες που ακολουθούν, παρουσιάζεται η σύγκριση δύο αριθμητικών αναλύσεων με ίδιο πλάτος πυλώνα. Το πλάτος πυλώνα που επιλέχτηκε είναι το $W=0.5D=4m$ λόγω της αυξημένης επιρροής του φαινόμενου της αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο δίδυμων σηράγγων. Η πρώτη ανάλυση (Ανάλυση I) αναφέρεται σε ευμενείς ενώ η δεύτερη ανάλυση (Ανάλυση II) αναφέρεται σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες. Οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων για τις δυο αυτές αναλύσεις παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα, Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Γεωτεχνικές παράμετροι αντιπροσωπευτικών αναλύσεων για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$ και πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$.

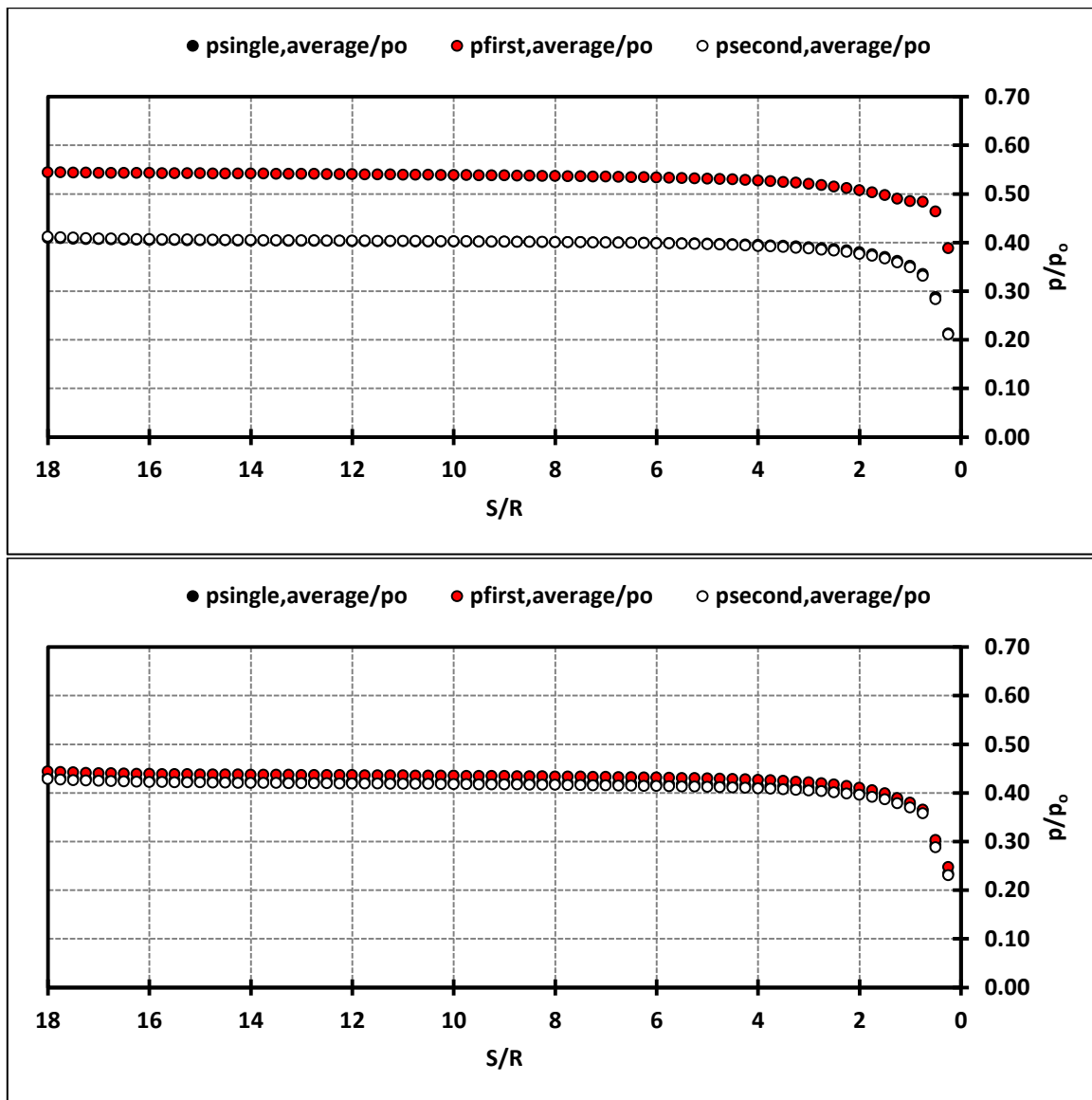
	Ανάλυση I	Ανάλυση II
Γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI	10	30
Ισοδύναμη συνοχή c (KPa)	0,079	0,159
Ισοδύναμη γωνία τριβής ϕ (°)	21,1	29,4
Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)	106,76	284,84
σ_{cm}/ρ_0	0,21	0,46

5.3.1. Φορτία (p)

Τα αποτελέσματα των φορτίων (p) στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων, για τις δύο αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ φαίνονται στα διαγράμματα του Γραφήματος 5.13. Αναλυτικότερα, στο σχήμα προβάλλεται το μέσο φορτίο ($p_{average}$) κανονικοποιημένο ως προς τη αρχική γεωστατική πίεση (p_0), συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα της σήραγγας ($R = 4m$, ακτίνα σήραγγας).

Παρατηρείται ότι σε απόσταση περίπου ίση με πέντε διαμέτρους της σήραγγας από το μέτωπο ($S = 5R$) τα φορτία που αναλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σταθεροποιούνται. Επιπλέον, σημαντική είναι η αύξηση του φορτίου στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της «πρώτης» σήραγγας σε σχέση με την «μονή» λόγω της διάνοιξης της «δεύτερης». Από την ανάλυση σε ασθενή βραχώμαζα διαπιστώνεται τα μεγέθη στην «πρώτη» σήραγγα είναι αυξημένα σε σχέση με την «μονή». Εν αντιθέσει, όσο πιο ισχυρή είναι η βραχώμαζα τόσο οι τιμές των φορτίων στη «δεύτερη» σήραγγα μειώνονται. Αυτό παρατηρείται στο κάτω διάγραμμα, Ανάλυση II.

Αύξηση των τιμών των φορτίων υπάρχει και στη «δεύτερη» σήραγγα, φυσικά πολύ μικρότερη σε σχέση με την αύξηση της «πρώτης» και πολύ μικρή συγκρινόμενη με αυτήν.

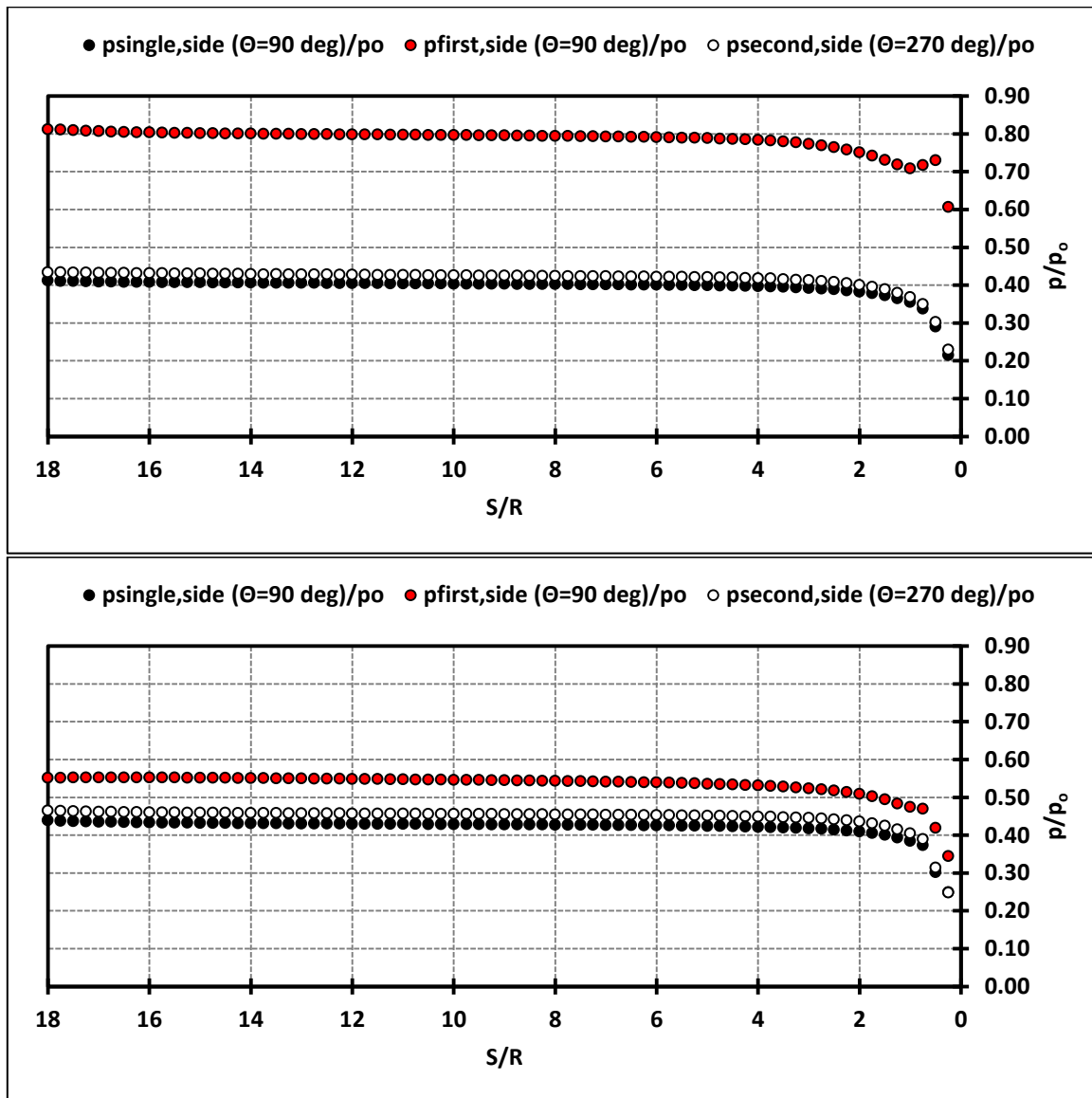


Γράφημα 5.13: Μηκτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα W/D=0.5, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.

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 διαμήκη άξονα των κλάδων. Τα αποτελέσματα αυτά προβάλλονται στο Γράφημα 5.14.

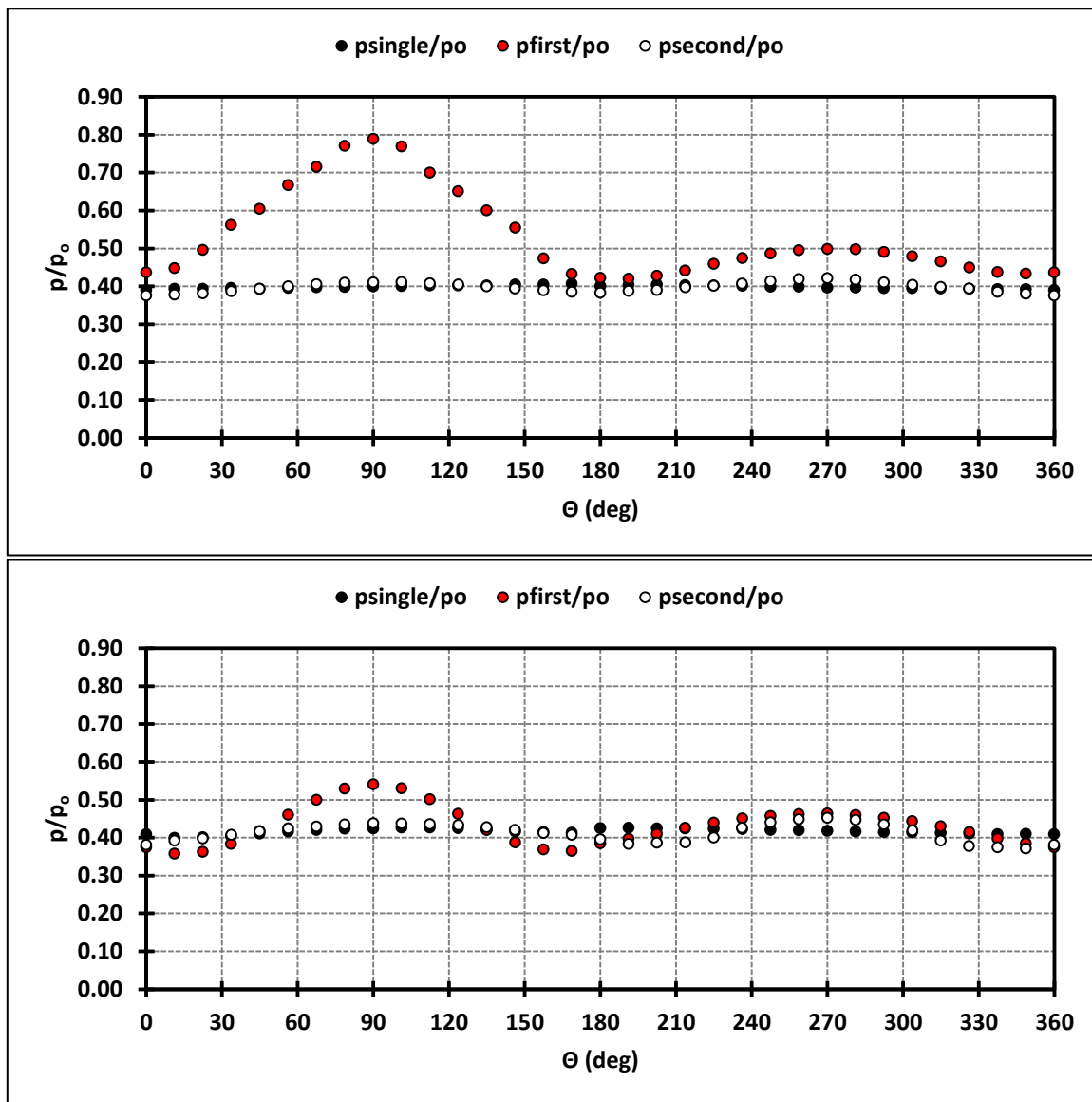
Το γράφημα παρουσιάζει ταυτόχρονα τις μέγιστες τιμές των φορτίων, καθώς στα σημεία αυτά εντοπίζεται η μέγιστη διατάραξη του αρχικού εντατικού πεδίου.

Παρατηρείται ότι για μία πιο ισχυρή βραχώμαζα, Ανάλυση II, το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δίδυμων σηράγγων περιορίζεται, καθώς εμφανίζεται μείωση των φορτίων στην εσωτερική παρεία της «πρώτης» σήραγγας. Σε αντίθεση, σε μία ασθενή βραχώμαζα, Ανάλυση I, παρατηρείται διπλασιασμός των τιμών των φορτίων στην «πρώτη» σήραγγα. Αυτό οφείλεται στο ότι η ήδη διανοιχθείσα αριστερή - πρώτη σήραγγα λόγω της δυσκαμψίας της άμεσης υποστήριξής παρεμποδίζει την εξέλιξη πλεονάζουσας σύγκλισης οδηγώντας στην αύξηση των φορτίων της αριστερής - πρώτης σήραγγας.



Γράφημα 5.14: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα για πλάτος πυλώνα W/D=0.5, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη γεωστατική τάση.

Στη συνέχεια, το Γράφημα 5.15 αποτυπώνει την κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου p/p_0 συναρτήσει της γωνίας Θ (°) για μια ασθενή και μια πιο ισχυρή βραχώμαζα. Παρατηρείται αύξηση των φορτίων σε κάθε περιοχή της «πρώτης» σήραγγας (first tunnel) λόγω της διάνοιξης της «δεύτερης» (second tunnel). Περισσότερο καταπονούνται οι εσωτερικές παρειές των σηράγγων, όπου το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι μεγαλύτερο. Αξιοσημείωτη είναι η ελαχιστοποίηση των φορτίων στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» σήραγγας κατά περίπου 20% στην πιο ισχυρή βραχώμαζα, Ανάλυση II.



Γράφημα 5.15: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου p/p_0 συναρτήσει της γωνίας Θ (°) για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II.

Στο επόμενο γράφημα, Γράφημα 5.16, απεικονίζεται η χρονοϊστορία των μέσων φορτίων ($p_{average}$) της «πρώτης» (first tunnel) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) σε επιλεγμένη διατομή με κανονικοποιημένη διαμήκη απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ($S/R = 10$), συναρτήσει του βήματος (step) της ανάλυσης. Τα φορτία είναι ανηγμένα ως προς την αρχική γεωστατική τάση (p_0). Αναλυτικότερα, στη διάρκεια των βημάτων 0 έως 80 πραγματοποιείται η εκσκαφή και υποστήριξη της «μονής» σήραγγας, ενώ το βήμα 41 αναφέρεται στην τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης στη διατομή που απέχει 40m από το μέτωπο. Ακολούθως, από το βήμα 81 έως 160 πραγματοποιείται η εκσκαφή και η υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας, ενώ στο βήμα 121 τοποθετείται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της διατομής που βρίσκεται 40m από το μέτωπο.

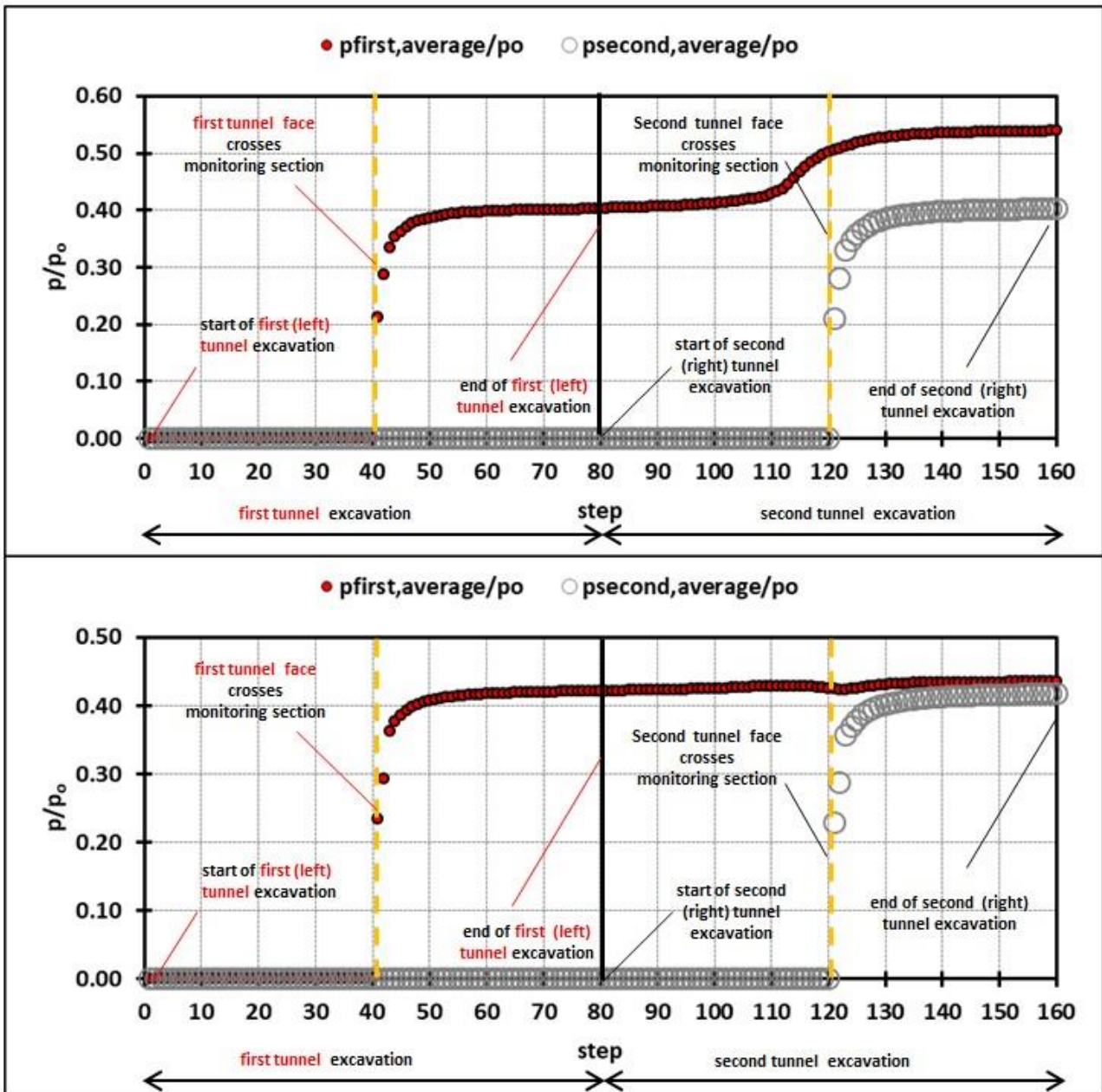
Παρατηρείται ότι μέχρι το βήμα 41 δεν έχουν αναπτυχθεί φορτία καθώς η διατομή που εξετάζουμε βρίσκεται στο $Y=40m$, που σημαίνει ότι στο βήμα 40 εκσκάπτεται και στο βήμα 41 τοποθετείται η προσωρινή της υποστήριξη. Από εκείνο το σημείο και μέχρι το βήμα 80, που είναι και το πέρας της εκσκαφής της αριστερής σήραγγας, η σήραγγα ξεκινάει να αναπτύσσει φορτία, ωστόσο συμπεριφέρεται ακόμη σαν «single». Στο βήμα 80 ξεκινά η διάνοιξη της «second». Η

επιρροή όμως της «second» στην εξεταζόμενη διατομή θα ξεκινήσει στο βήμα 121. Η συμπεριφορά της θα είναι ανάλογη της «single» με ελαφρώς υψηλότερες τιμές. Η «first» πλέον σήραγγα ξεκινά από το βήμα 80 να επηρεάζεται από την εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας («second»). Στην αρχή η επιρροή είναι πολύ μικρή και όσο η εκσκαφή πλησιάζει στην εξεταζόμενη διατομή, ειδικά μετά το βήμα 100, παρατηρείται απότομη αύξηση των φορτίων η οποία όταν η εκσκαφή περάσει τη διατομή $Y=40m$ σιγά σιγά αρχίζει και ισορροπεί λαμβάνοντας την τελική τιμή της στο βήμα 160.

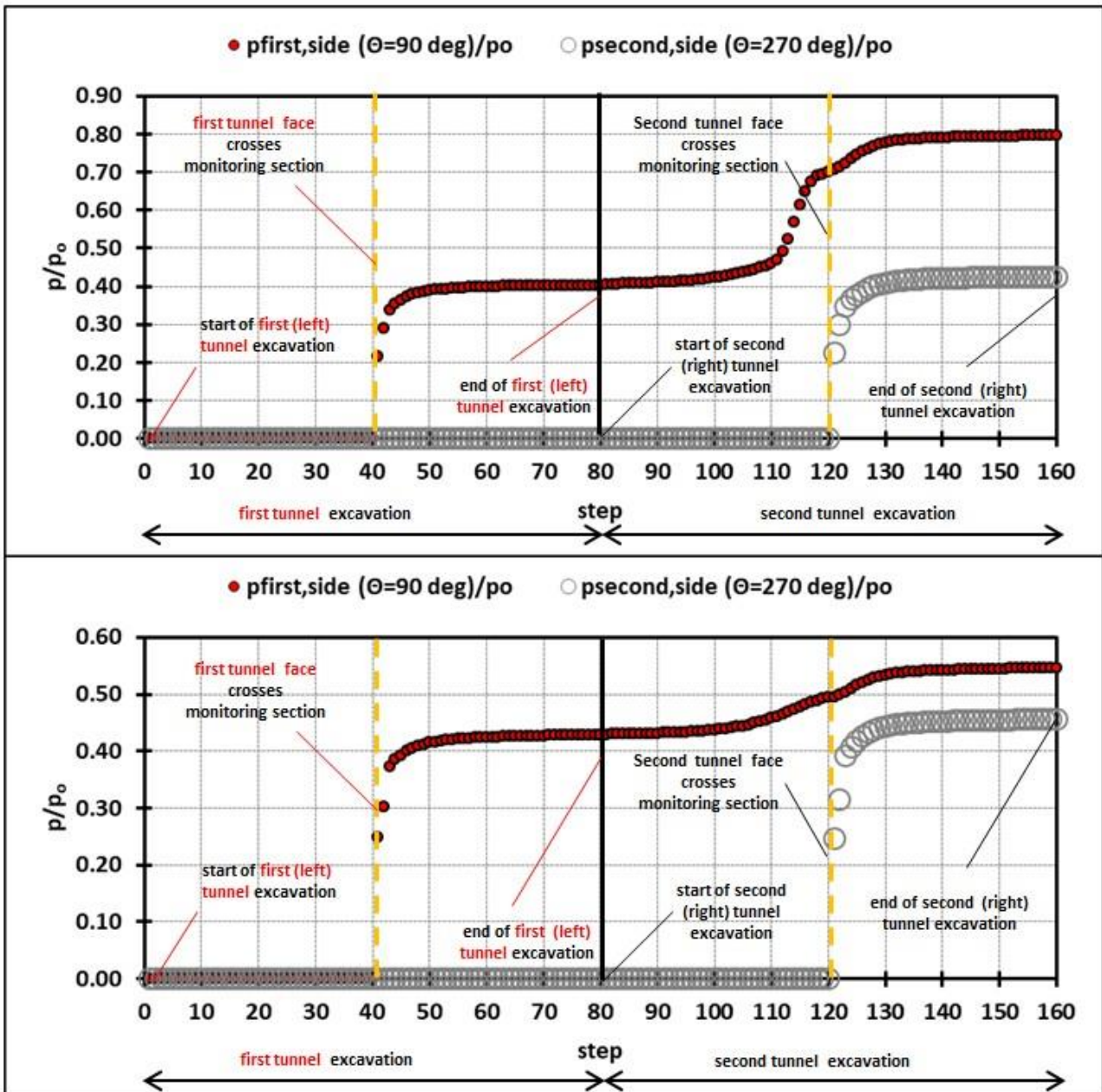
Η διάνοιξη λοιπόν της νέας σήραγγας επηρεάζει σημαντικά το υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης της «πρώτης» σήραγγας όταν η προώθηση του μετώπου της «δεύτερης» περνά δίπλα από την υπό διερεύνηση διατομή, ενώ αυτή η επιρροή μειώνεται με την απομάκρυνση του μετώπου της «δεύτερης» σήραγγας από τη δεδομένη διατομή της αριστερής σήραγγας.

Οι γεωτεχνικές συνθήκες καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την κατανομή των φορτίων και τη δράση τους ως προς την «πρώτη» σήραγγα, η οποία επηρεάζεται από την προχώρηση της εκσκαφής της «δεύτερης» σήραγγας. Σε ασθενή βραχώμαζα έχουμε έντονο το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης και σημαντική αύξηση των φορτίων ενώ στην πιο ισχυρή βραχώμαζα η αλληλεπίδραση και η προσθήκη φορτίου στην «πρώτη» σήραγγα είναι πολύ μικρή έως αμελητέα.

Τέλος, στο Γράφημα 5.17 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων για τις δύο περιπτώσεις, καθώς τα μέγιστα φορτία λαμβάνονται στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων όπου το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεγιστοποιείται. Τα φορτία που αναλαμβάνει η άμεση υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας είναι περίπου στο ίδιο επίπεδο ενώ οι γεωτεχνικές συνθήκες έχουν ακριβώς την ίδια σημασία με πριν στην αλληλεπίδραση των δίδυμων σηράγγων.



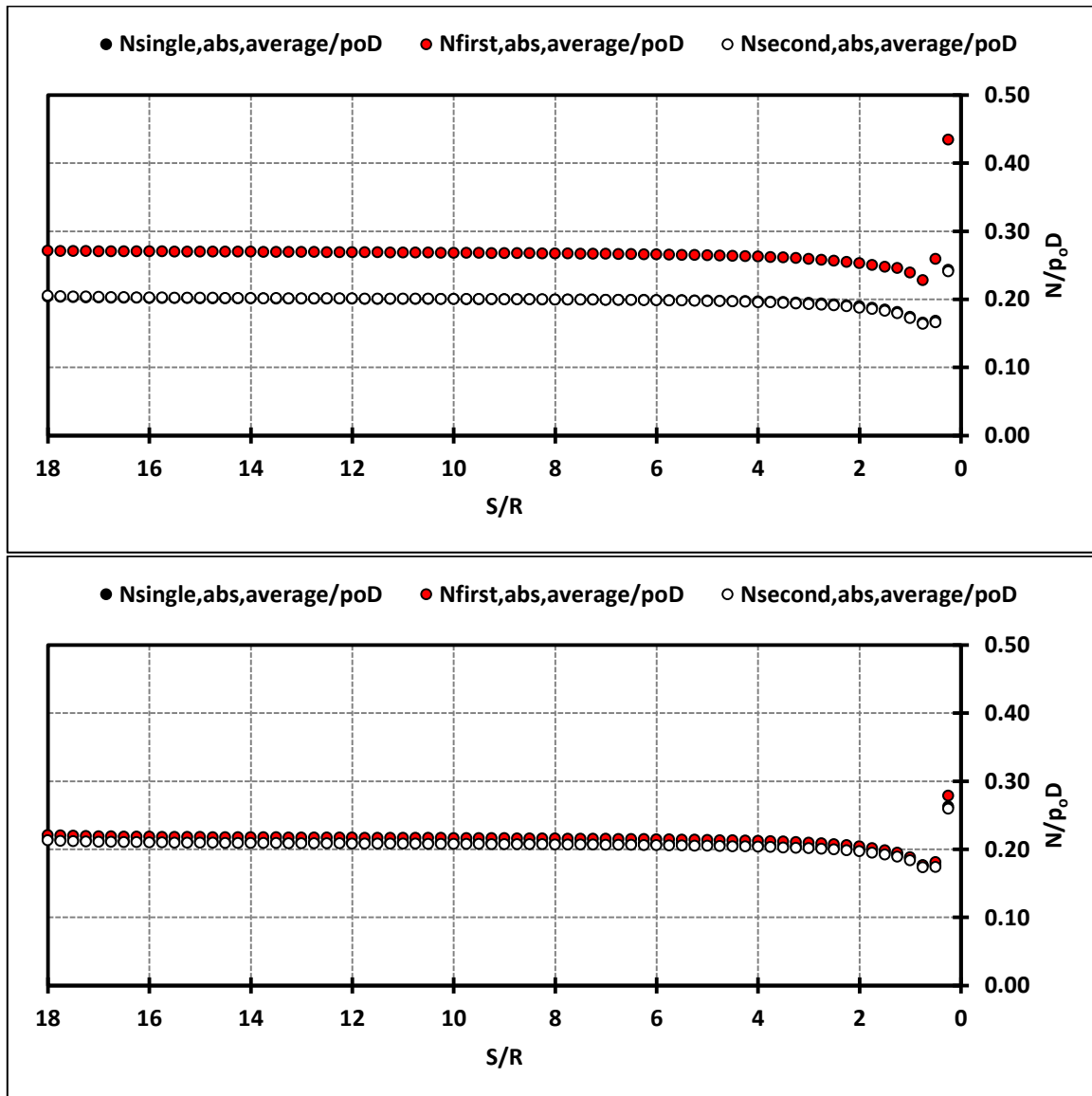
Γράφημα 5.16: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη γεωστατική τάση, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.



Γράφημα 5.17: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4\text{m}$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40\text{m}$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς τη γεωστατική τάση.

5.3.2. Αξονικές δυνάμεις (N)

Σύμφωνα με τα γραφήματα που ακολουθούν, οι αξονικές δυνάμεις (N) παρουσιάζουν ανάλογα αποτελέσματα – συμπεριφορά με αυτή των φορτίων (ρ) στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων για αναλύσεις που αφορούν ασθενή βραχώμαζα, Ανάλυση I και πιο ισχυρή αντίστοιχα βραχώμαζα, Ανάλυση II. Στο Γράφημα 5.18 προβάλλεται η κατά απόλυτη τιμή μέση αξονική δύναμη ($N_{abs,average}$), κανονικοποιημένη ως προς το γινόμενο της γεωστατικής πίεσης με τη διάμετρο της σήραγγας ($\rho_0 D$). Τα διαγράμματα έχουν σχεδιαστεί συναρτήσει του λόγου S/R (όπου S η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής).

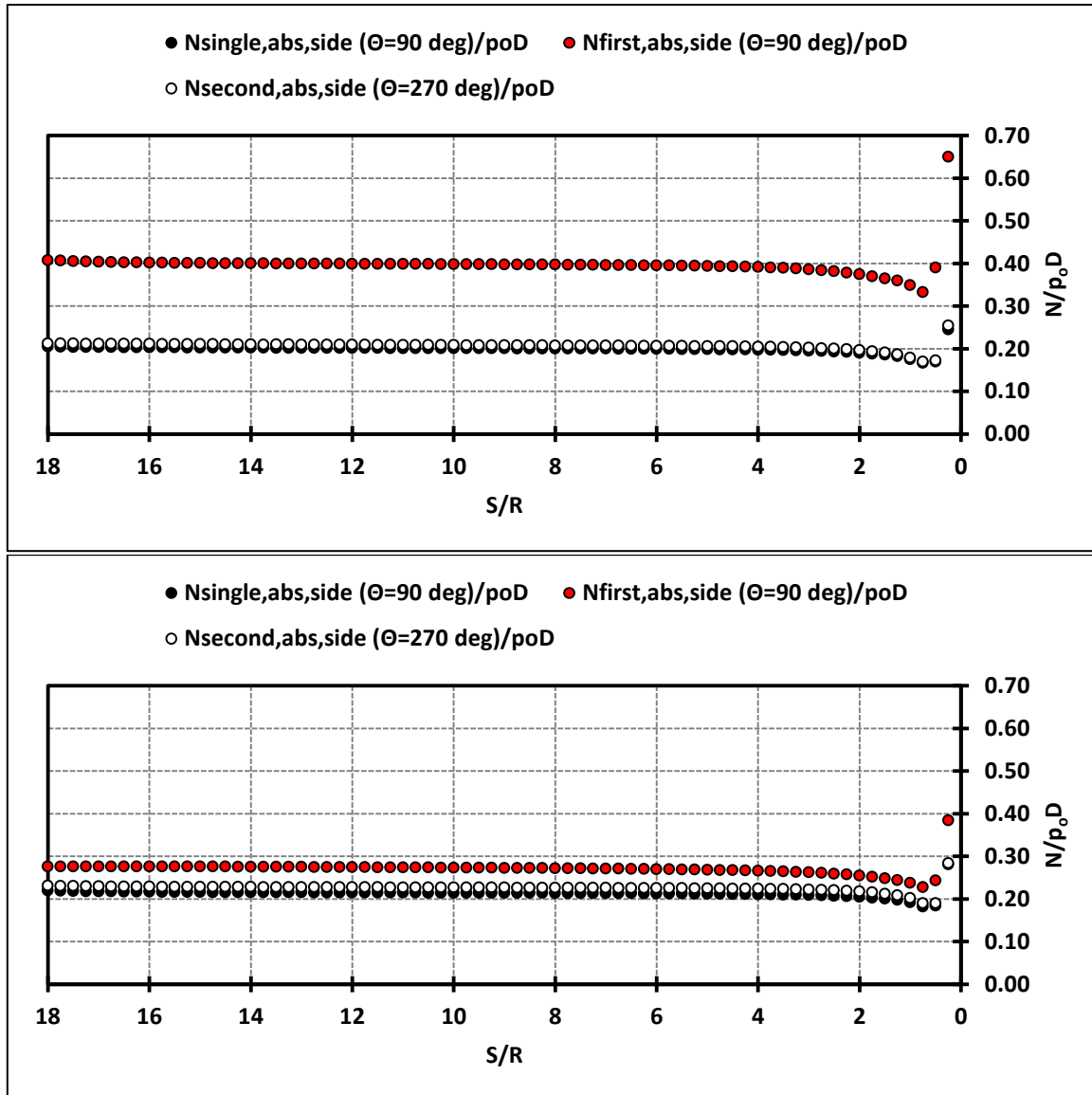


Γράφημα 5.18: Μηκτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων

Από το παραπάνω γράφημα παρατηρείται ότι σε ασθενή βραχώμαζα η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας επηρεάζει σημαντικά το υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης της αριστερής με εμφανή αύξηση των αξονικών δυνάμεων. Σε μία πιο ισχυρή βραχώμαζα, όπως στην Ανάλυση II, το

φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι πολύ μικρότερο και η αύξηση των αξονικών δυνάμεων στην «πρώτη» σήραγγα είναι ελάχιστη.

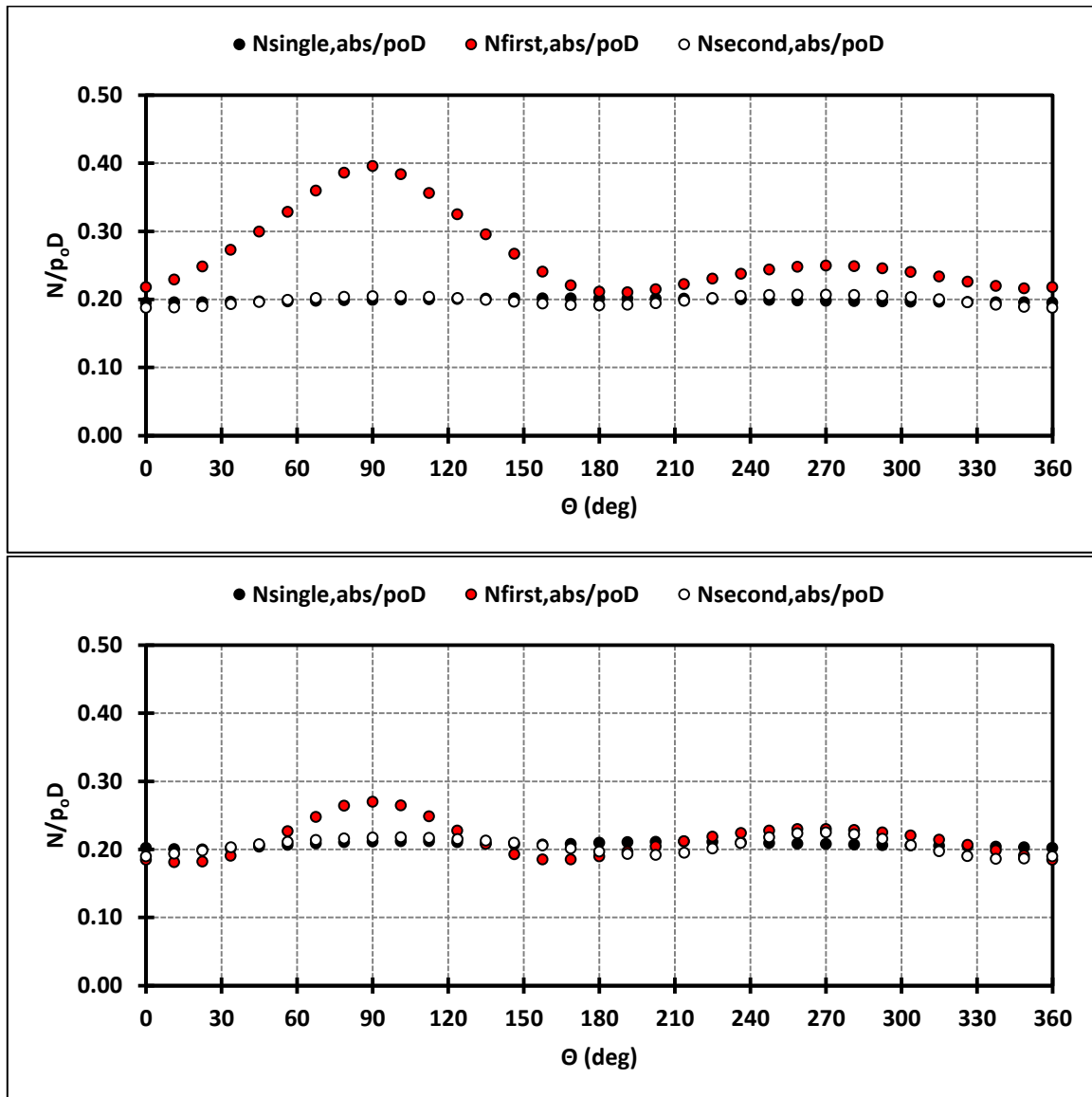
Η μεγιστοποίηση της αξονικής δύναμης εμφανίζεται πάλι στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων καθώς εδώ υπάρχει η μεγαλύτερη επιρροή του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Πιο συγκεκριμένα, η γωνία $\Theta = 90^\circ$ για τη «μονή/πρώτη» σήραγγα (single/first tunnel) και η γωνία $\Theta = 270^\circ$ για τη «δεύτερη» σήραγγα (second tunnel), όπως φαίνεται στο Γράφημα 5.19. Είναι εμφανής όπως και πριν η επιρροή των γεωτεχνικών συνθηκών.



Γράφημα 5.19: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4\text{m}$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια, στο Γράφημα 5.20 αποτυπώνεται η κατανομή της κανονικοποιημένης αξονικής δύναμης $N/\rho_0 D$ συναρτήσει της γωνίας Θ ($^\circ$) για πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4\text{m}$ και για μία ασθενή και μία πιο ισχυρή βραχώμα, Ανάλυση I και II. Παρατηρείται αύξηση των δυνάμεων σε κάθε περιοχή της «πρώτης» σήραγγας (first tunnel) λόγω της διάνοιξης της «δεύτερης» (second tunnel). Περισσότερο καταπονούνται οι εσωτερικές παρειές των σηράγγων. Αξιοσημείωτη είναι η

ελαχιστοποίηση των αξονικών δυνάμεων στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» σήραγγας όταν έχουμε πιο ισχυρή βραχώμαζα.



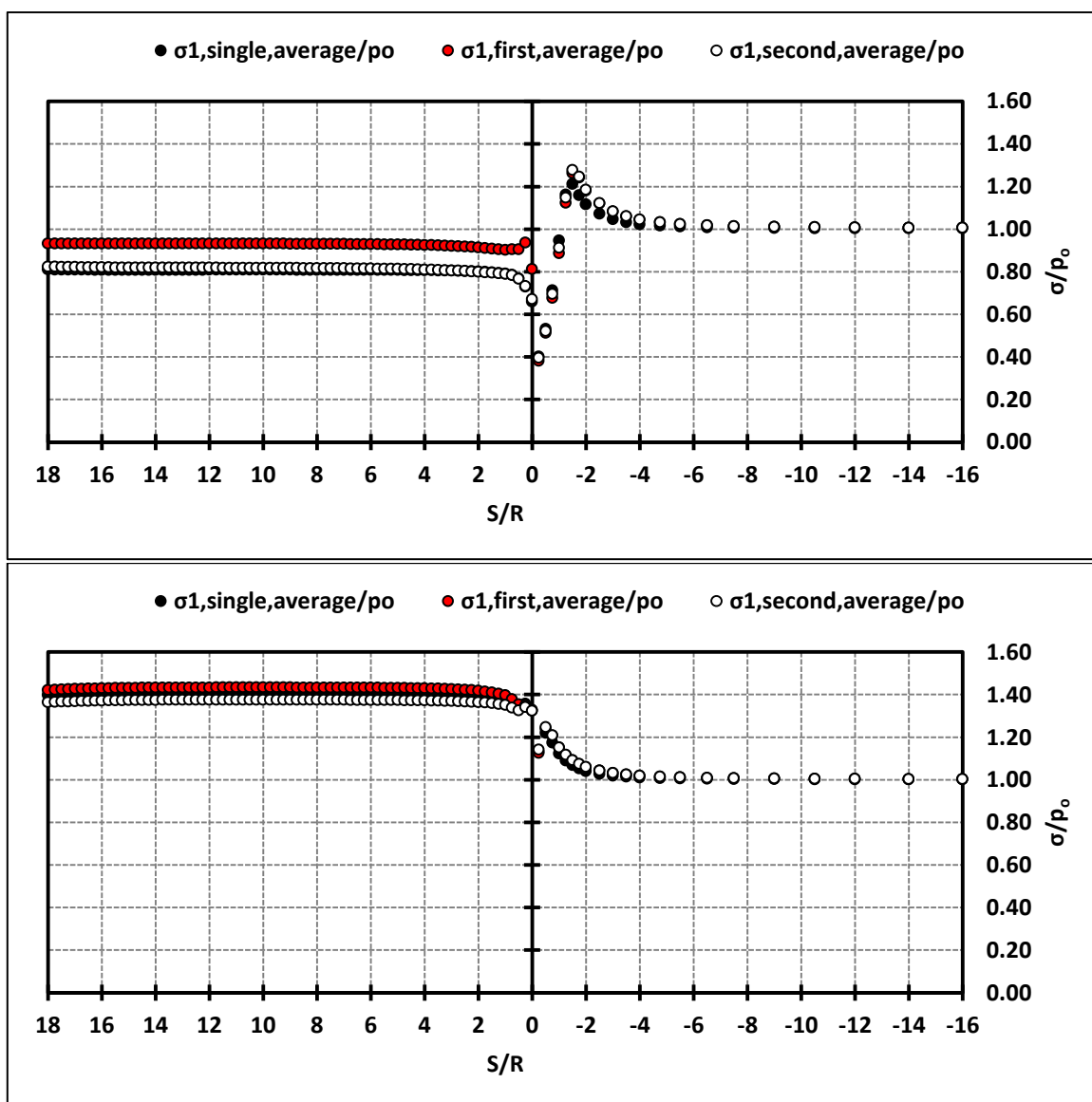
Γράφημα 5.20: Κατανομή κανονικοποιημένης αξονικής δύναμης $N/\rho_0 D$ συναρτήσει της γωνίας Θ (°) για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II.

5.3.3. Κύριες τάσεις (σ_1, σ_3)

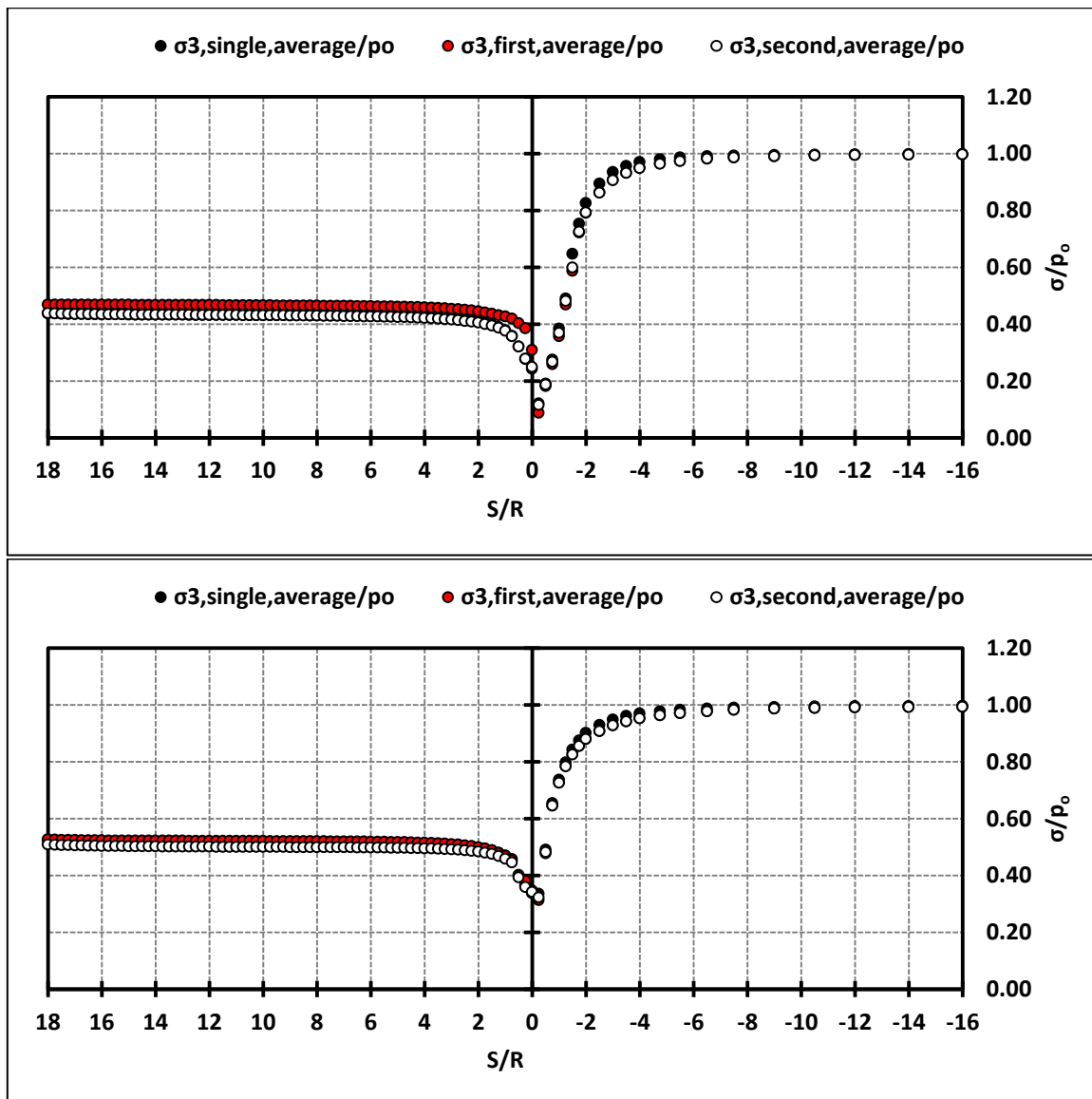
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κύριων τάσεων (σ_1, σ_3) στη βραχόμαζα για δύο διαφορετικές γεωτεχνικές συνθήκες, για μια ασθενή και μία πιο ισχυρή βραχόμαζα (Ανάλυση I και II αντίστοιχα), με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4\text{m}$. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα διαγράμματα του γραφημάτων που ακολουθούν.

Αναλυτικότερα, στα γραφήματα 5.21 και 5.22 παρουσιάζονται οι μέσες κύριες τάσεις, σ_1 και σ_3 αντίστοιχα, κανονικοποιημένες ως προς τη αρχική γεωστατική πίεση (p_0), συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκους άξονα της σήραγγας ($R = 4\text{m}$, ακτίνα σήραγγας).

Πριν την εκσκαφή οποιασδήποτε σήραγγας οι αρχικές κύριες τάσεις είναι ίσες μεταξύ τους και έχουν την ίδια τιμή με τη γεωστατική πίεση (p_0). Αυτό οφείλεται στην αρχική μας παραδοχή για το συντελεστή πλευρικών γεωστατικών τάσεων (K_0), όπου $K_0=1$.



Γράφημα 5.21: Μηκοτομική απεικόνιση της σ_1 στη βραχόμαζα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4\text{m}$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των τάσεων.



Γράφημα 5.22: Μηκοτομική απεικόνιση της σ_3 στη βραχόμαζα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4\text{m}$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των τάσεων.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, διαπιστώνεται ότι οι μέγιστες κύριες τάσεις των στοιχείων της βραχόμαζας ισοδυναμούν με p_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 μέγιστες τάσεις, 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 $S/R = 2$ από το μέτωπο λόγω της παρουσίας του εκτοξευόμενου σκυρόδεματος που τοποθετείται και σταδιακά ισορροπεί με το γεωλικό που το περιβάλλει.

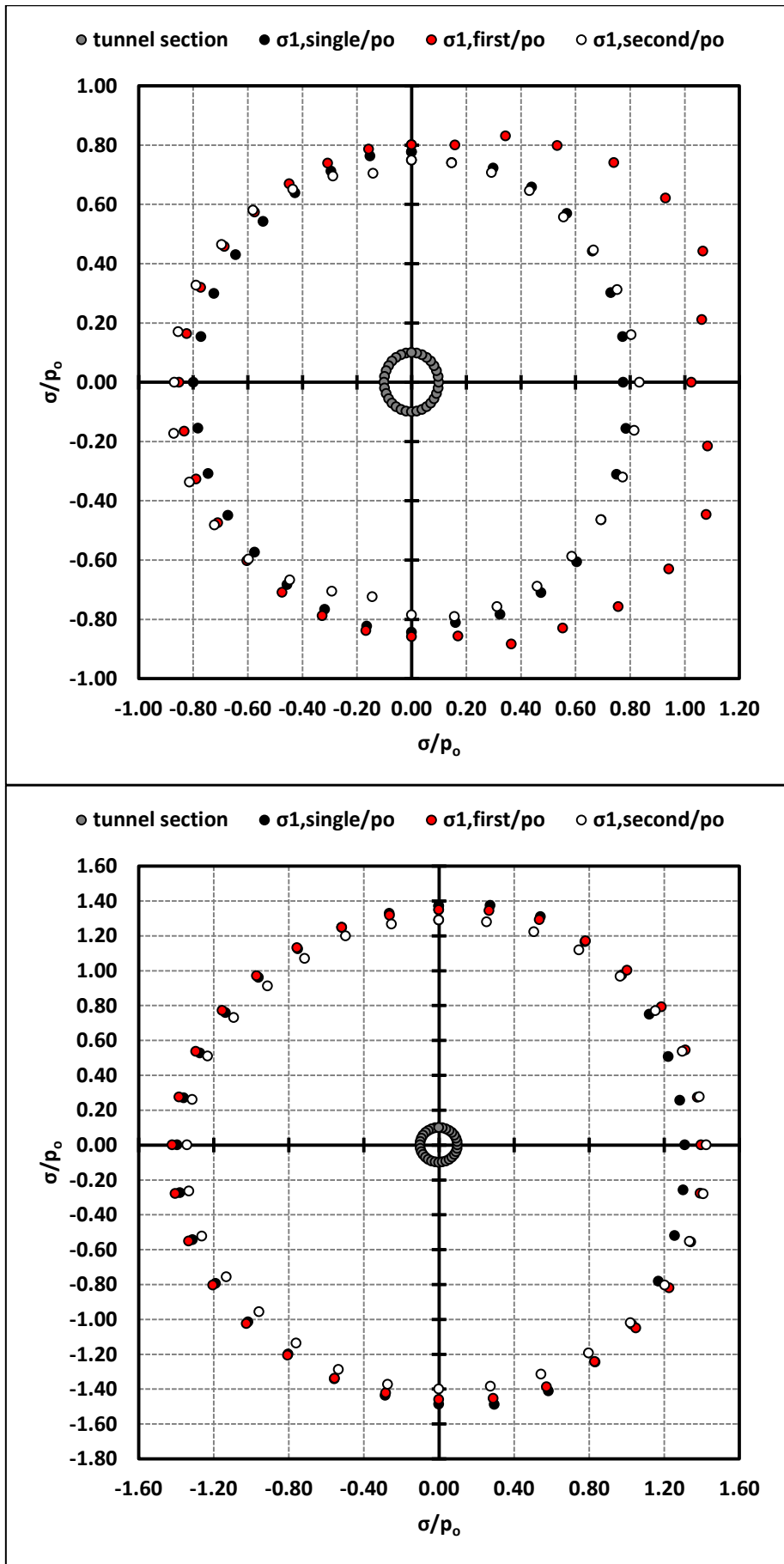
Σχετικά με τις τιμές των αποτελεσμάτων, παρατηρείται αρχικά πως και στην περίπτωση των τάσεων τα στοιχεία που περιβάλλουν την «πρώτη» σήραγγα επηρεάζονται αρκετά από την διάνοιξη του δεξιού κλάδου. Αυτό γίνεται αντιληπτό από την καμπύλη κατανομής των τάσεων που αναφέρονται στην «πρώτη» σήραγγα η οποία αποκλίνει από τις αντίστοιχες καμπύλες

κατανομής της «μονής» και «δεύτερης» σήραγγας, ιδιαίτερα όταν οι γεωτεχνικές συνθήκες είναι τόσο δυσμενείς όπως στην Ανάλυση I. Από την Ανάλυση II παρατηρείται ότι οι καμπύλες σχεδόν συγκλίνουν μεταξύ τους, κάτι που αποδεικνύει την ανθεκτικότητα της βραχώμαζας στη διάνοιξη δίδυμης σήραγγας εφαρμόζοντας μικρό πλάτος πυλώνα. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται καθώς για περίπου ίδια ελάχιστη κύρια τάση σ_3 στην Ανάλυση II παρατηρείται μεγαλύτερο επίπεδο τάσης σ_1 , δηλαδή μικρότερο εύρος πλαστικής ζώνης.

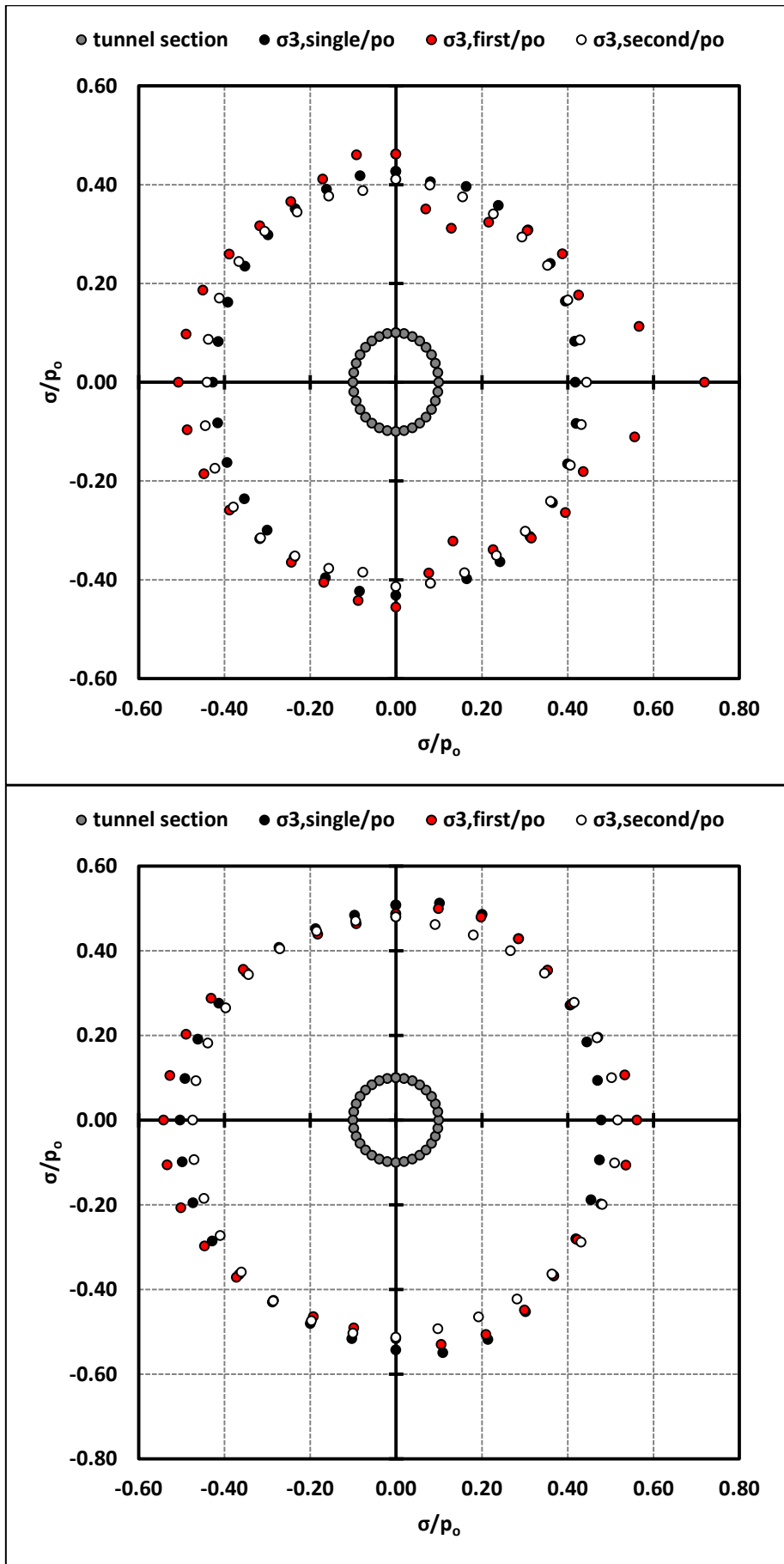
Στη συνέχεια, στα γραφήματα που ακολουθούν (Γράφημα 5.23 και 5.23) παρουσιάζονται εν διατομή οι τάσεις σ_1 και σ_3 αντίστοιχα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second tunnel, για μια ασθενή και μία πιο ισχυρή βραχώμαζα (Ανάλυση I και II αντίστοιχα) και για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την αρχική γεωστατική τάση.

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

Επιπλέον, στην περίπτωση όπου η βραχώμαζα είναι ασθενής η αλληλεπίδραση είναι πιο έντονη και γι' αυτό το λόγο οι καμπύλες αποκλίνουν μεταξύ τους. Στην περίπτωση της Ανάλυσης II, όμως, όπου πρόκειται για βραχώμαζα 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 βραχώμαζες 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.



Γράφημα 5.23: Προβολή της σ_1 στην τυπική διατομή για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την αρχική γεωστατική τάση.



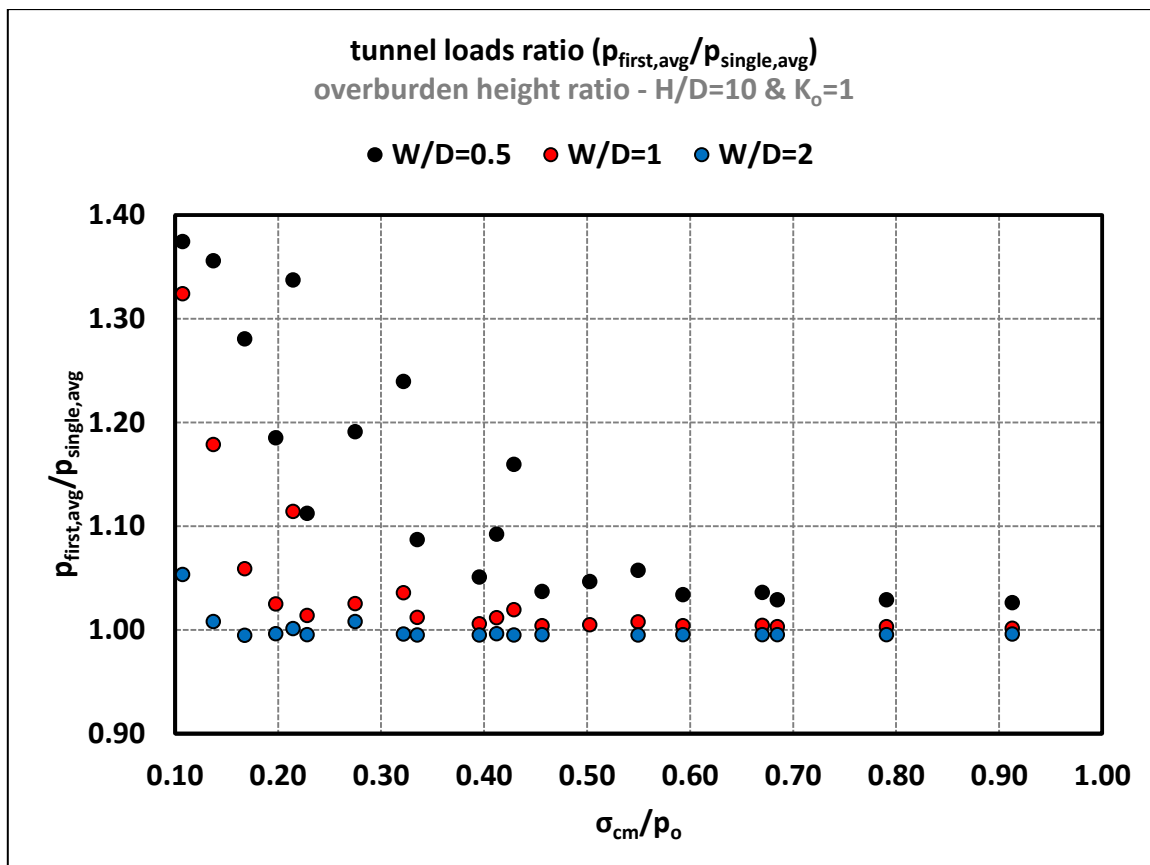
Γράφημα 5.24: Προβολή της σ_3 στην τυπική διατομή για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, πάνω Ανάλυση I και κάτω Ανάλυση II. Οι τάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τη γεωστατική τάση

5.4. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στα επόμενα γραφήματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν. Το μαύρο χρώμα απεικονίζει τις αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$, το κόκκινο χρώμα απεικονίζει τις αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W/D=1$ και το μπλε χρώμα απεικονίζει τις αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W/D=2$. Κάθε κουκίδα αντιστοιχεί σε ένα από τα είκοσι διαφορετικά γεωτεχνικά ζεύγη που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε πλάτος πυλώνα. Τα διαγράμματα λοιπόν αναφέρονται στα πλάτη πυλώνα (W/D) και στους λόγους γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) που εξετάστηκαν στα πλαίσια της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$ και ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$.

5.4.1. Φορτία (P)

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), όπως φαίνεται στο Γράφημα 5.25

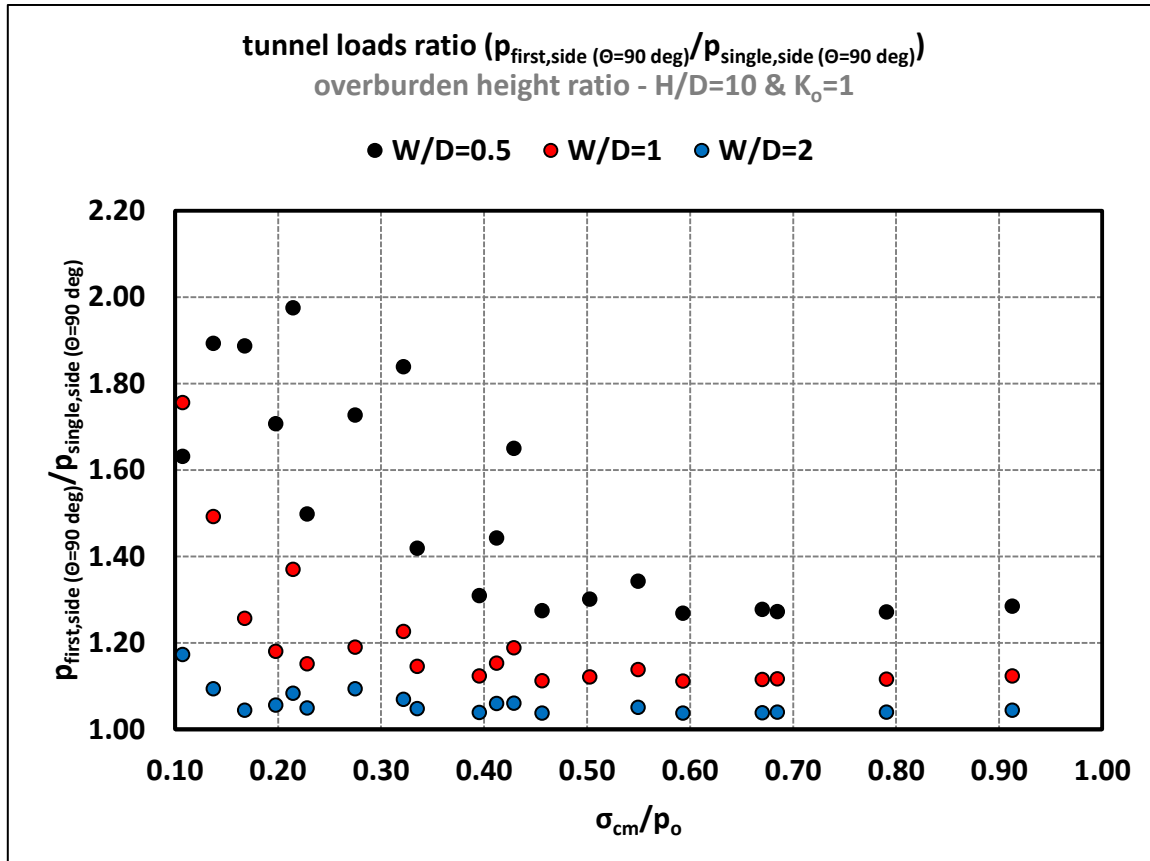


Γράφημα 5.25: Λόγος μέσων φορτίων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,avg}/p_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$.

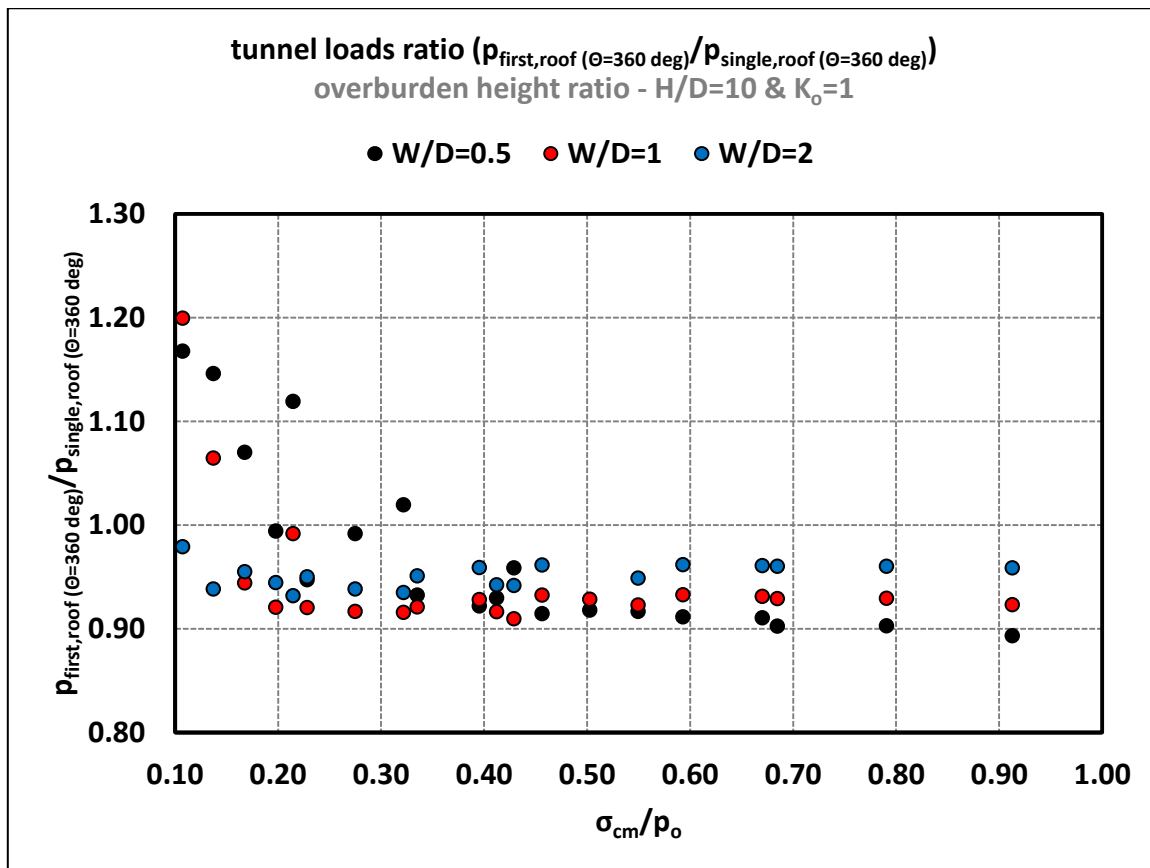
Από το παραπάνω γράφημα διαπιστώνεται ότι ο λόγος των φορτίων παρουσιάζεται μεγαλύτερος της μονάδας, γεγονός που υποδεικνύει ότι η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας φέρει μεγαλύτερο φορτίο σε σχέση με την άμεση υποστήριξη της «μονής», λόγω της διάνοιξης της «δεύτερης» σήραγγας. Αυτό συντελείται ανεξάρτητα από το μέγεθος του πλάτους του πυλώνα ή την ποιότητα του γεωυλικού. Ωστόσο, για τα πλάτη πυλώνα $W/D = 2$ ο λόγος των φορτίων

(«πρώτης»/«μονής») βρίσκεται πολύ κοντά στη μονάδα. Το γεγονός αυτό δηλώνει ότι για πλάτος πυλώνα $W/D = 2$ (ή μεγαλύτερο) οι κλάδοι της δίδυμης σήραγγας στην ουσία δεν αλληλεπιδρούν.

Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν και από τα Γραφήματα 5.26 και 5.27 που αναφέρονται στην εσωτερική παρειά και στη στέψη αντίστοιχα. Αξιοσημείωτη είναι η διαφορά των φορτίων μεταξύ των δύο αυτών διαγραμμάτων. Ειδικότερα, η εσωτερική παρειά καταπονείται εμφανώς περισσότερο από την οροφή λόγω της ενίσχυσης του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο κλάδων στην περιοχή αυτή.



Γράφημα 5.26: Λόγος φορτίων στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{\text{first,side}}(\theta=90^\circ)/p_{\text{single,side}}(\theta=90^\circ)$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$.



Γράφημα 5.27: Λόγος φορτίων στην οροφή της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{\text{first,side}}(\theta=360^\circ)/p_{\text{single,side}}(\theta=360^\circ)$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{\text{cm}}/\rho_o$) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνων (W/D), ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$.

Συμπερασματικά, η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας (first tunnel) δέχεται λόγω της διάνοιξης της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) μικρότερη καταπόνηση όσο οι δύο κλάδοι απομακρύνονται μεταξύ τους. Παράλληλα, στην εξάλειψη του φαινομένου της αλληλεπίδρασης συμβάλλει επίσης η βελτιστοποίηση των γεωτεχνικών συνθηκών.

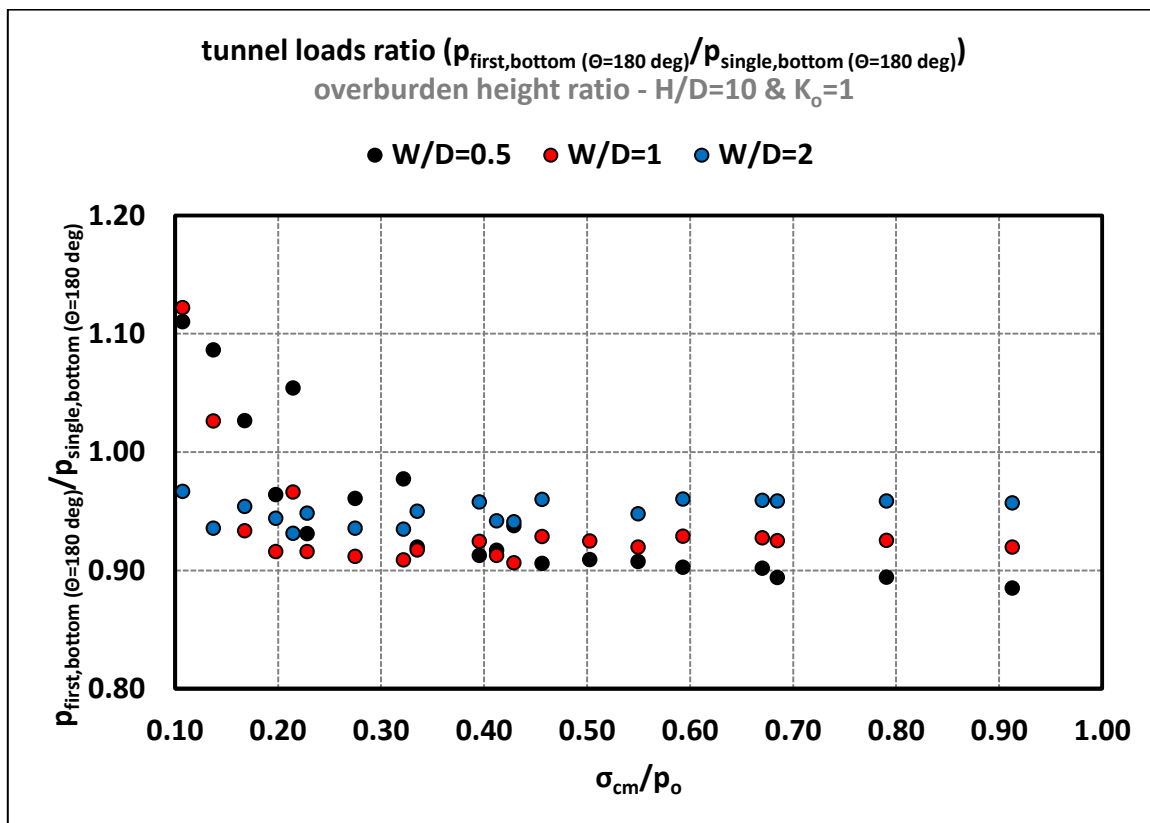
Ειδικότερα, όταν το πλάτος πυλώνα είναι $W=0.5D=4\text{m}$ οι τιμές αυξάνουν πάρα πολύ, η αλληλεπίδραση μεταξύ των σήραγγων είναι έντονη και σε αυτή την περίπτωση πρέπει να ληφθεί υπόψη η γεωλογία της περιοχής στην οποία θα πραγματοποιηθεί η διάνοιξη της δίδυμης σήραγγας.

Σύμφωνα, λοιπόν, με τη γεωλογία της περιοχής, οι τιμές του $\sigma_{\text{cm}}/\rho_o$ 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 $\sigma_{\text{cm}}/\rho_o$. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι για πολύ άσχημες γεωτεχνικές συνθήκες με $\sigma_{\text{cm}}/\rho_o < 0.3$ περίπου, οι τιμές της μέσης πίεσης που ασκούνται στην υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας αυξάνονται δυσανάλογα σε σχέση με τις τιμές που αντιστοιχούν σε τιμές $\sigma_{\text{cm}}/\rho_o > 0.3$. Λαμβάνοντας υπόψη μαζί τις γεωτεχνικές συνθήκες και τα πλάτη πυλώνων, φαίνεται πως στην περίπτωση εφαρμογής του μικρότερου πλάτους πυλώνα ($W=0.5D=4\text{m}$) η αλληλεπίδραση επιφέρει πολύ δυσμενή αποτελέσματα για τις βραχώμαζες που έχουν $\sigma_{\text{cm}}/\rho_o < 0.6$. Στην περίπτωση εφαρμογής του ενδιάμεσου πλάτους πυλώνα η αλληλεπίδραση είναι έντονη για $\sigma_{\text{cm}}/\rho_o < 0.5$ και στην περίπτωση εφαρμογής του μεγαλύτερου

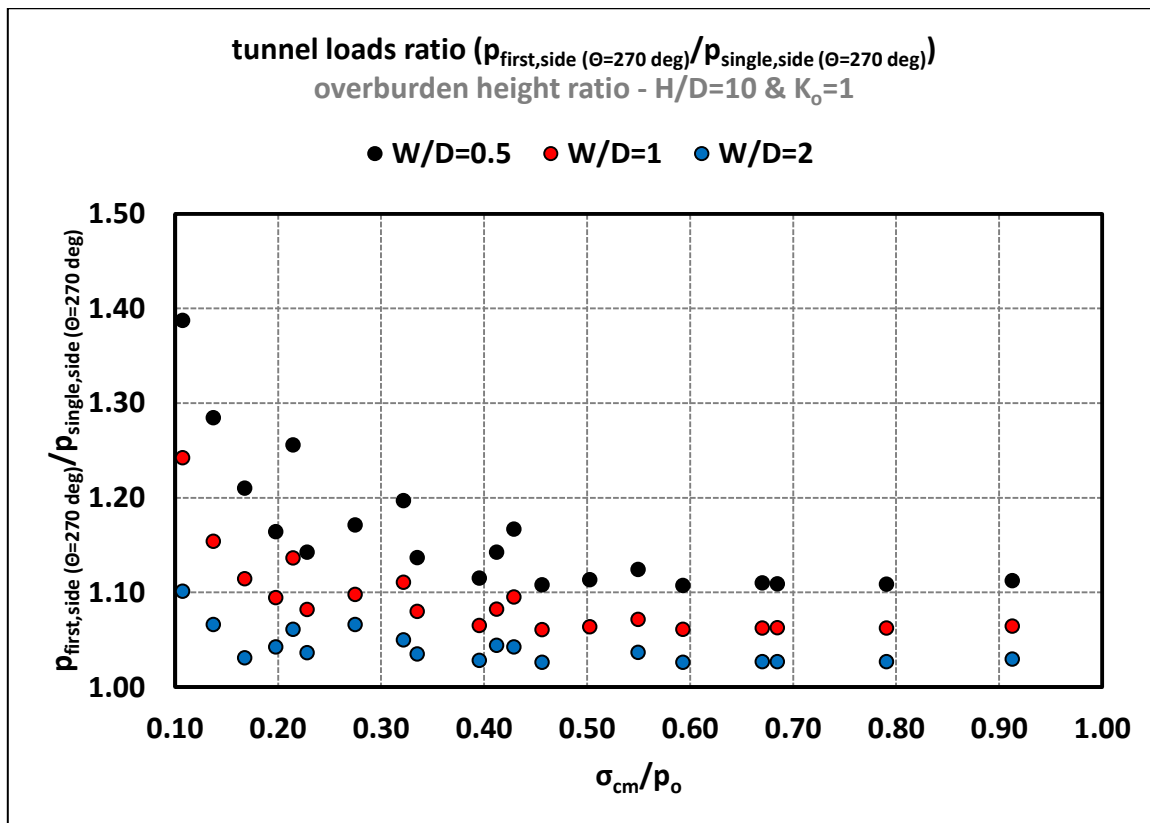
πλάτους πυλώνα ($W=2D=16m$) η αλληλεπίδραση εμφανίζεται ελάχιστα και μόνο για τις τιμές $\sigma_{cm}/\rho_o < 0.2$.

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.

Ενδεικτικά, στα επόμενα γραφήματα παρουσιάζονται οι τιμές του φορτίου («πρώτης»/«μονής») για τις άλλες δύο περιοχές της διατομής της σήραγγας, για όλο το εύρος πλατών πυλώνα και γεωτεχνικών συνθηκών που διερευνήθηκαν.



Γράφημα 5.28: Λόγος φορτίων στην οροφή της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,side (\Theta = 180^\circ)}/p_{single,side (\Theta = 180^\circ)}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$.

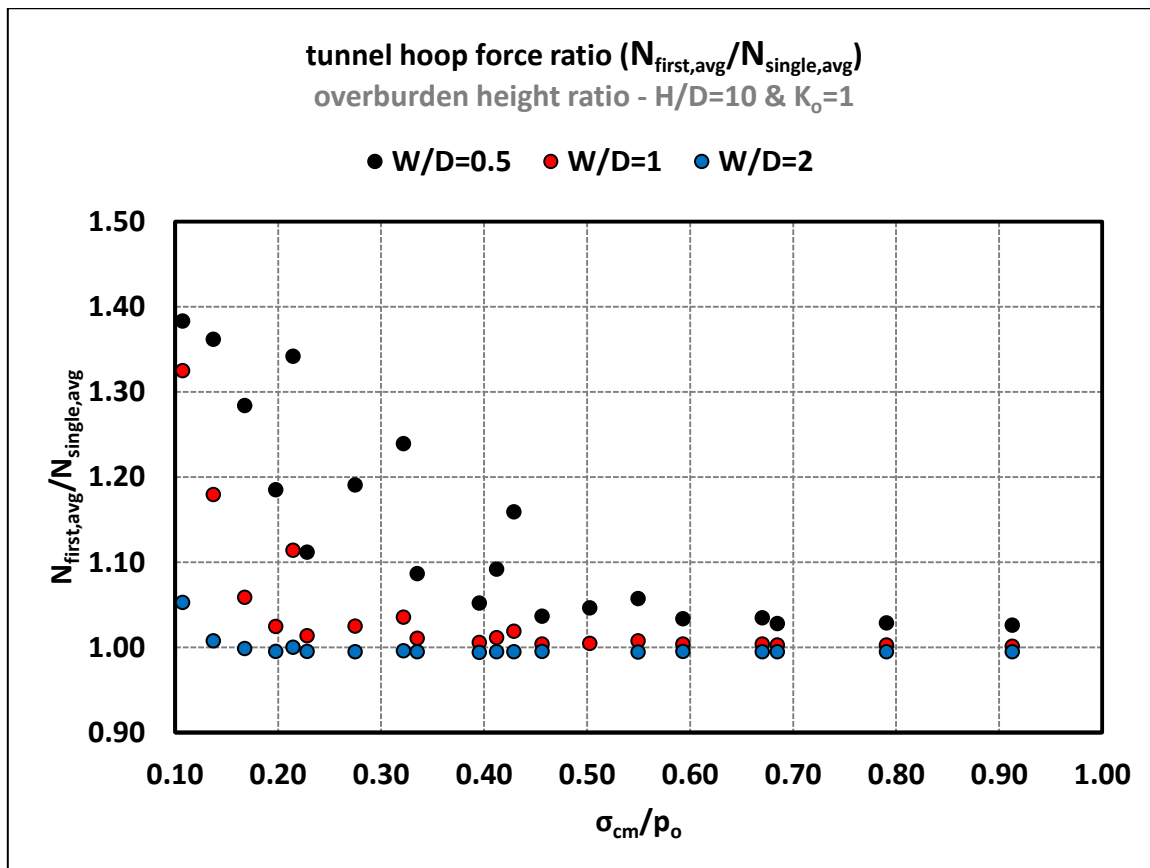


Γράφημα 5.29: Λόγος φορτίων στην οροφή της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($\rho_{\text{first,side}}(\Theta = 270^\circ)/\rho_{\text{single,side}}(\Theta = 270^\circ)$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$.

5.4.2. Αξονικές δυνάμεις (N)

Τα αποτελέσματα που αναφέρονται στις αξονικές δυνάμεις είναι αντίστοιχα με αυτά των φορτίων. Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις στο μέγεθος και την κατανομή των αξονικών δυνάμεων της άμεσης υποστήριξης. Πιο συγκεκριμένα, όπως παρουσιάζεται και στο Γράφημα 5.30 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 της «μονής» σήραγγας εμφανίζουν περίπου τα ίδια μεγέθη αξονικών δυνάμεων.

Όσο πιο κοντά κατασκευάζονται οι κλάδοι της δίδυμης σήραγγας τόσο μεγαλύτερη αξονική δύναμη αναπτύσσεται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της «πρώτης» σήραγγας και όσο βελτιώνεται η ποιότητα της βραχώμαζας τόσο το μέγεθος αυτό των αξονικών δυνάμεων μειώνεται. Αυτό ισχύει για όλες τις περιοχές της διατομής. Τέλος, υπό οποιοδήποτε πλάτος πυλώνα και λόγο γεωτεχνικών συνθηκών, η εσωτερική παρειά ($\Theta = 90^\circ$) δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση λόγω του έντονου φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Όπως και στην προηγούμενη υποενοότητα, εξετάζονται και τώρα κατά πόσο μεγαλύτεροι της μονάδας είναι οι λόγοι που παρουσιάζονται ανά περίπτωση για τον προσδιορισμό της τάξης μεγέθους της αύξησης λόγω αλληλεπίδρασης.

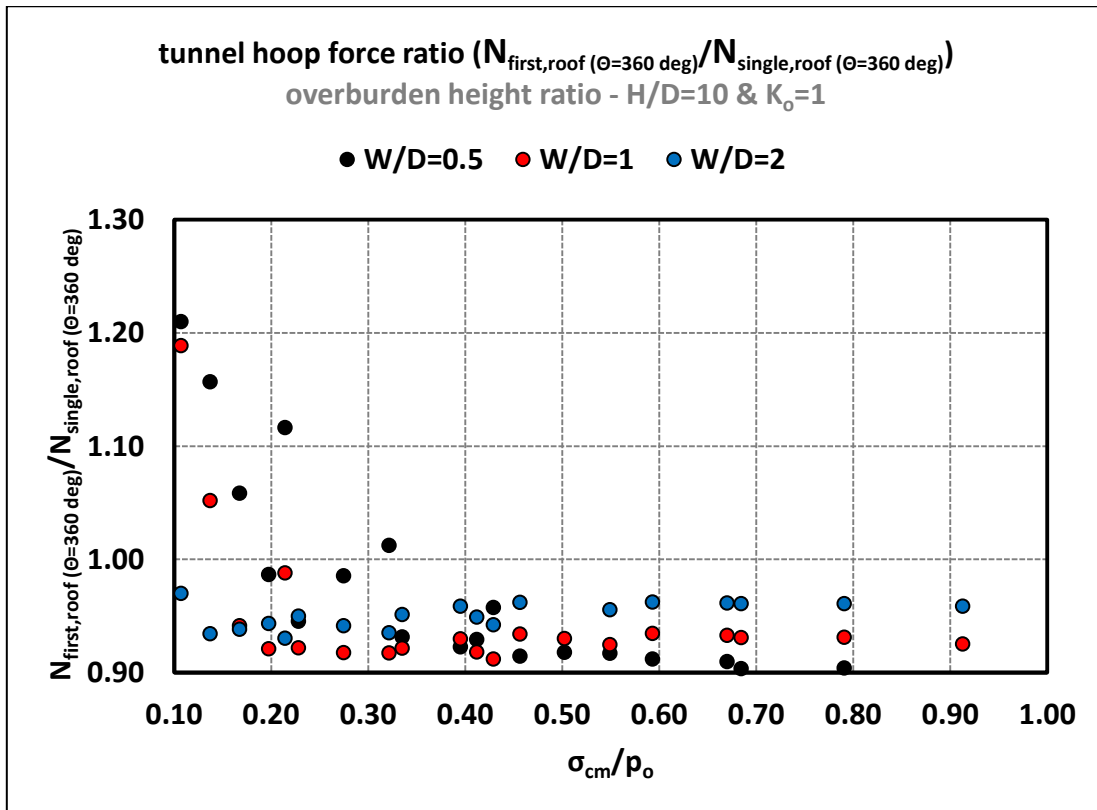


Γράφημα 5.30: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,avg}/N_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$.

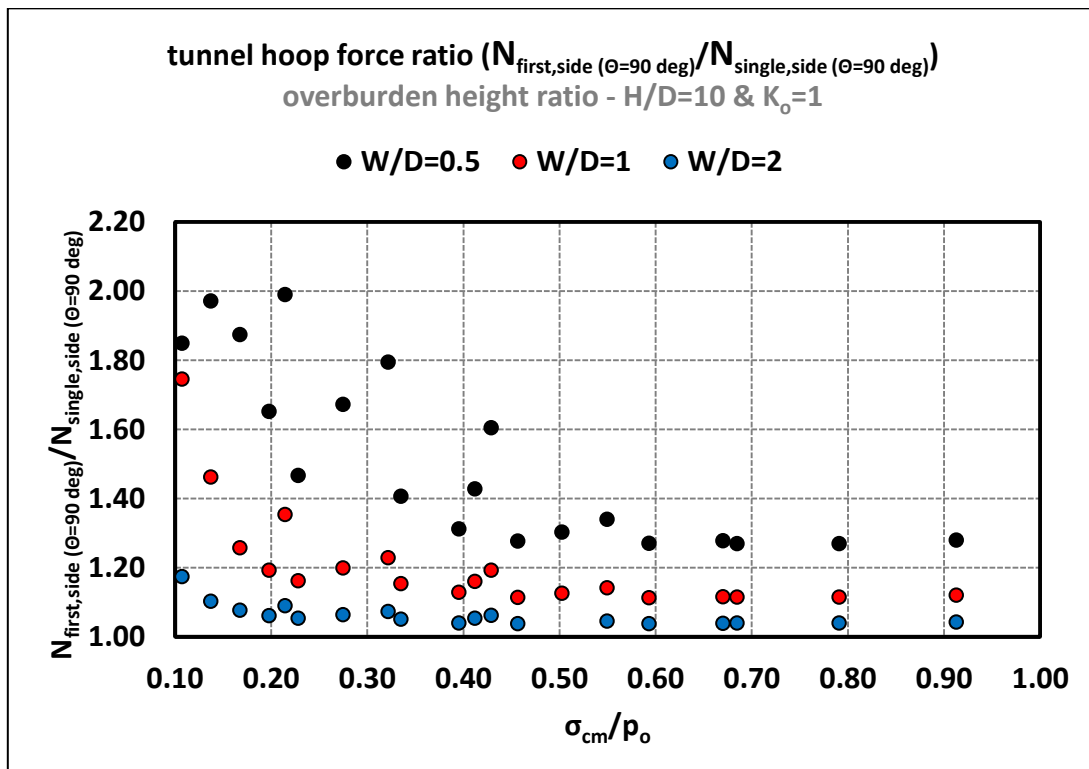
Σύμφωνα με το παραπάνω γράφημα, οι μεγαλύτεροι λόγοι εντοπίζονται για το μικρότερο πλάτος πυλώνα ($W=0.5D=4m$) και για ένα εύρος γεωτεχνικών συνθηκών $0.1 < \sigma_{cm}/\rho_o < 0.6$. Οι λόγοι μειώνονται για $W=1.0D=8m$ και οι μεγαλύτερες τιμές σε αυτή την περίπτωση εμφανίζονται για $0.1 < \sigma_{cm}/\rho_o < 0.4$. Στην περίπτωση του μεγαλύτερου πλάτους πυλώνα οι τιμές μειώνονται αισθητά και πολύ μικρή δυσμέμεια εντοπίζεται για τιμές $0.1 < \sigma_{cm}/\rho_o < 0.3$. 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.

Ως προς 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. Για μικρούς λόγους σ_{cm}/ρ_o οι τιμές αυξάνονται δυσανάλογα. Ουσιαστικά όταν είναι αυξημένη η αντοχή σε μονοαξονική θλιψη 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.

Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν και από τα Γραφήματα 5.31 και 5.32 που αναφέρονται στη στέψη και στην εσωτερική παρειά αντίστοιχα. Αξιοσημείωτη είναι η διαφορά των τιμών των αξονικών δυνάμεων μεταξύ των δύο αυτών διαγραμμάτων. Ειδικότερα, η εσωτερική παρειά καταπονείται εμφανώς περισσότερο από την οροφή λόγω της ενίσχυσης του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο κλάδων στην περιοχή αυτή.



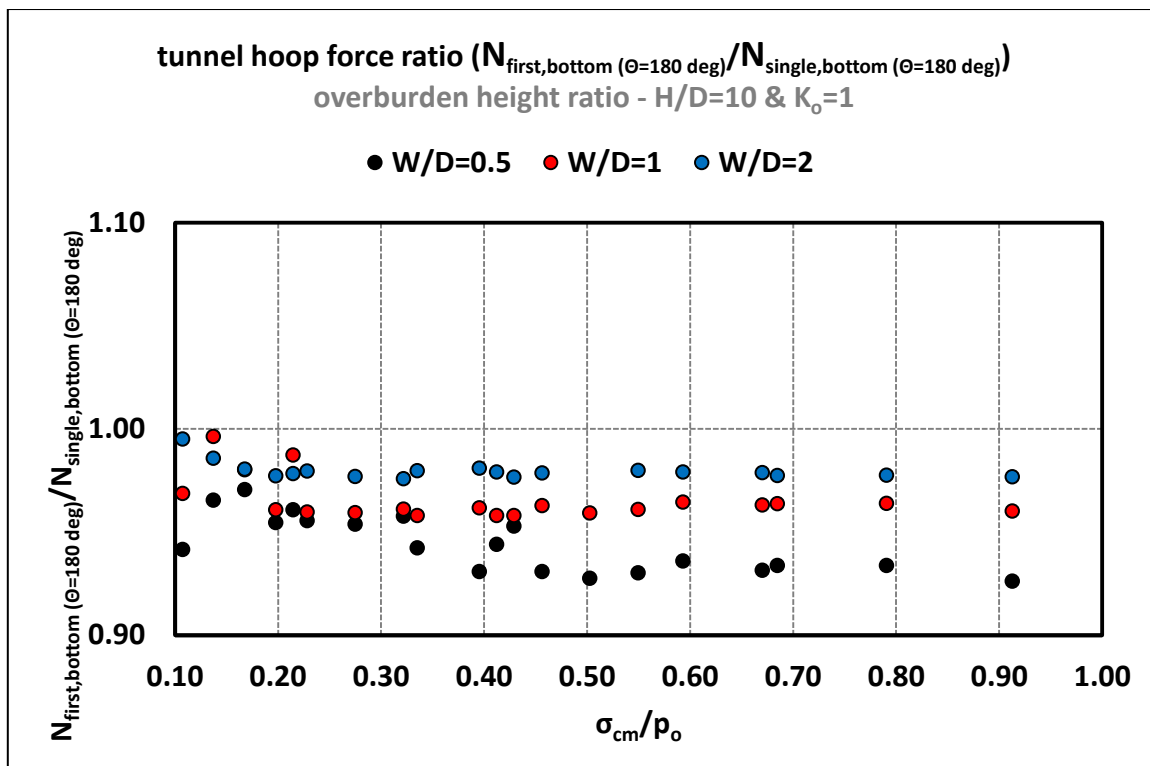
Γράφημα 5.31: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην οροφή της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,side(\theta = 360^\circ)}/N_{single,side(\theta = 360^\circ)}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$.



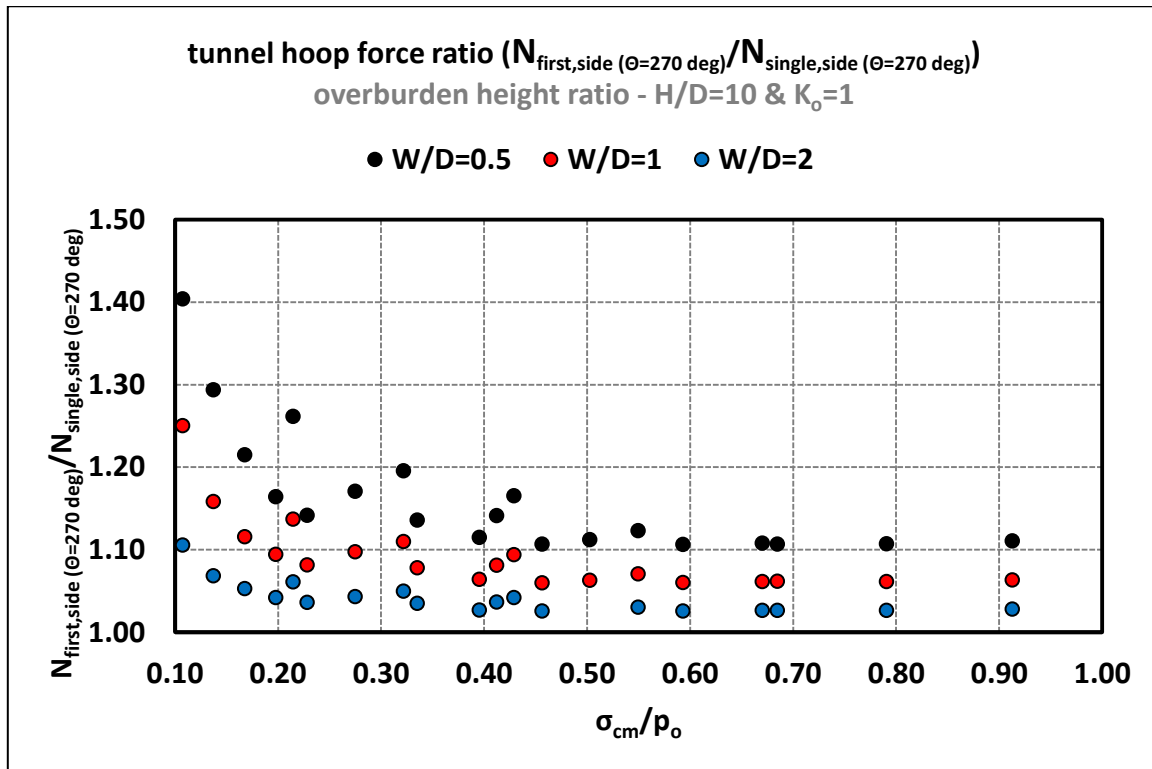
Γράφημα 5.32: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,side(\theta = 90^\circ)}/N_{single,side(\theta = 90^\circ)}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$.

Ενδεικτικά, στα επόμενα γραφήματα παρουσιάζονται οι τιμές των αξονικών δυνάμεων («πρώτης»/«μονής») για τις άλλες δύο περιοχές της διατομής της σήραγγας, για όλο το εύρος πλατών πυλώνα και γεωτεχνικών συνθηκών που διερευνήθηκαν.

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.



Γράφημα 5.33: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{\text{first,side}}(\theta=180^\circ)/N_{\text{single,side}}(\theta=180^\circ)$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{\text{cm}}/\rho_o$) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1$.



Γράφημα 5.34: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,side(\theta = 270^\circ)}/N_{single,side(\theta = 270^\circ)}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 1$.

6. Συμπεράσματα & Προτάσεις

6.1. Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν μετά τον έλεγχο και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων και είναι τα ακόλουθα:

- Αύξηση του πλάτους του πυλώνα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των φορτίων και των αξονικών δυνάμεων στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων καθώς η ζώνη αλληλεπίδρασης μεταξύ τους συρρικνώνεται.
- Η κρίσιμη τιμή πλάτους του πυλώνα μπορεί να προσανατολιστεί στο μέγεθος $(W/D)_{crit} = 2$ καθώς στην απόσταση αυτή το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης σε όρους φορτίων και αξονικών δυνάμεων παραμένει προσεγγιστικά στο ίδιο επίπεδο
- Όσο βελτιώνονται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας τόσο μικρότερα είναι τα μεγέθη των φορτίων και των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στο κέλυφος της άμεσης υποστήριξης και τόσο τείνει να εξαλείφεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δίδυμων σηράγγων.
- Ανεξάρτητα του πλάτους του πυλώνα ή των γεωτεχνικών συνθηκών η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας καταπονείται περισσότερο σε όρους φορτίων και αξονικών δυνάμεων συγκριτικά με αυτή της «μονής» ή της «δεύτερης» σήραγγας, ενώ η «δεύτερη» σήραγγα δέχεται λίγο μεγαλύτερα σε σχέση με τη μεμονωμένη.
- Ανεξάρτητα του πλάτους του πυλώνα ή των γεωτεχνικών συνθηκών περισσότερο καταπονούνται οι εσωτερικές παρειές των σηράγγων, όπου το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεγιστοποιείται.
- Τα αποτελέσματα των αξονικών δυνάμεων συμφωνούν ποιοτικά και ποσοτικά με αυτά των φορτίων.

Συνοψίζοντας, παρατηρείται μείωση των φορτίων και των αξονικών δυνάμεων με τη βελτίωση της ποιότητας του γεωυλικού και τη διεύρυνση του πλάτους του πυλώνα ως προς το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης. Δηλαδή η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας λόγω της διάνοιξης της «δεύτερης» δέχεται μικρότερη καταπόνηση όσο οι δύο κλάδοι απομακρύνονται μεταξύ τους, ενώ στην εξάλειψη του φαινομένου της αλληλεπίδρασης συμβάλλει η βελτιστοποίηση των γεωτεχνικών συνθηκών της βραχώμαζας.

6.2. Προτάσεις

Στο πλαίσιο περαιτέρω διερεύνησης του φαινομένου της αλληλεπίδρασης κατά τη διάνοιξη δίδυμων σηράγγων προτείνονται τα εξής: (i) 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 και (ii) εκτέλεση αριθμητικών αναλύσεων για μη-κυκλικές (πεταλοειδείς) διατομές σηράγγων και για τμηματική διάνοιξη με πολλαπλές φάσεις.

Βιβλιογραφία

- ABAQUS 6.13 Documentation, 2013, SIMULIA, United States of America
- Chortis F., Kavvadas M., 2015, Numerical Investigation of the Interaction between Twin Tunnels. World Tunnel Congress WTC, Duvrovnik, Croatia
- Addenbrooke T.I., Potts D.M., 1996, Twin tunnel construction-ground movements and lining behaviour. In proceedings of the 1st International Symposium on the Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Balkema, Rotterdam, 441-446.
- Cantieni L., Anagnostou G., 2010, On a Paradox of Elasto-Plastic Tunnel Analysis. Rock Mechanics and Rock Engineering, 44, 129-147, DOI: 10.1007/s00603-010-0126-1
- Chang C.T., Lee M.C., Hou P.C., 1996, Design of twin-tube tunnel through soft rock. Proceedings of the International Symposium on the Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Balkema, Rotterdam, 251-255
- 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
- Do N.A., Dias D., Oreste P., Djeran-Maigre I., 2014, Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin tunnels in soft ground. Tunnelling and Underground Space Technology, 42, 40 – 51, DOI: 10.1016/j.tust.2014.02.001
- Graziani A., Boldini D., Ribacchi r., 2005, Practical Estimate of Deformations and Stress Relief Factors for Deep Tunnels Supported by Shotcrete. Rock Mechanincs and Rock Engineering, 38, 345 – 372, DOI: 10.1007/s00603-005-0059-2
- Ghaboussi J., Ranken R.E., 1977, Interaction Between Two Parallel Tunnels. International Journal For Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1, 75-103
- 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
- Karakus M., Ozsan A., Hakan B., 2006, Finite element analysis for the twin metro tunnel constructed in Ankara Clay, Turkey. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66, 71-79, DOI: 10.1007/s10064-006-0056-z
- Kim S.H., 2004, Interaction behaviors between parallel tunnels in soft ground. Tunneling and Underground Space Technology, 19, 448-454
- Koungeles D.K., Augarde C.E., 2004, Interaction between multiple tunnels in soft ground. In Developments in mechanics of structures & materials: Proceedings of the 18th Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, Perth. Australia
- Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P., 2007, Full 3D modelling for effects of tunnelling on existing support systems in the Sydney region. Tunnelling and Underground Space Technology, 23, 399-420, DOI: 10.1016/j.tust.2007.06.009
- Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W., 2004, Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunnelling method (NATM) twin tunnel interactions. Canadian Geotechnical Journal, 41, 523-539, DOI: 10.1139/T04-008
- 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 Αναλυτική 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