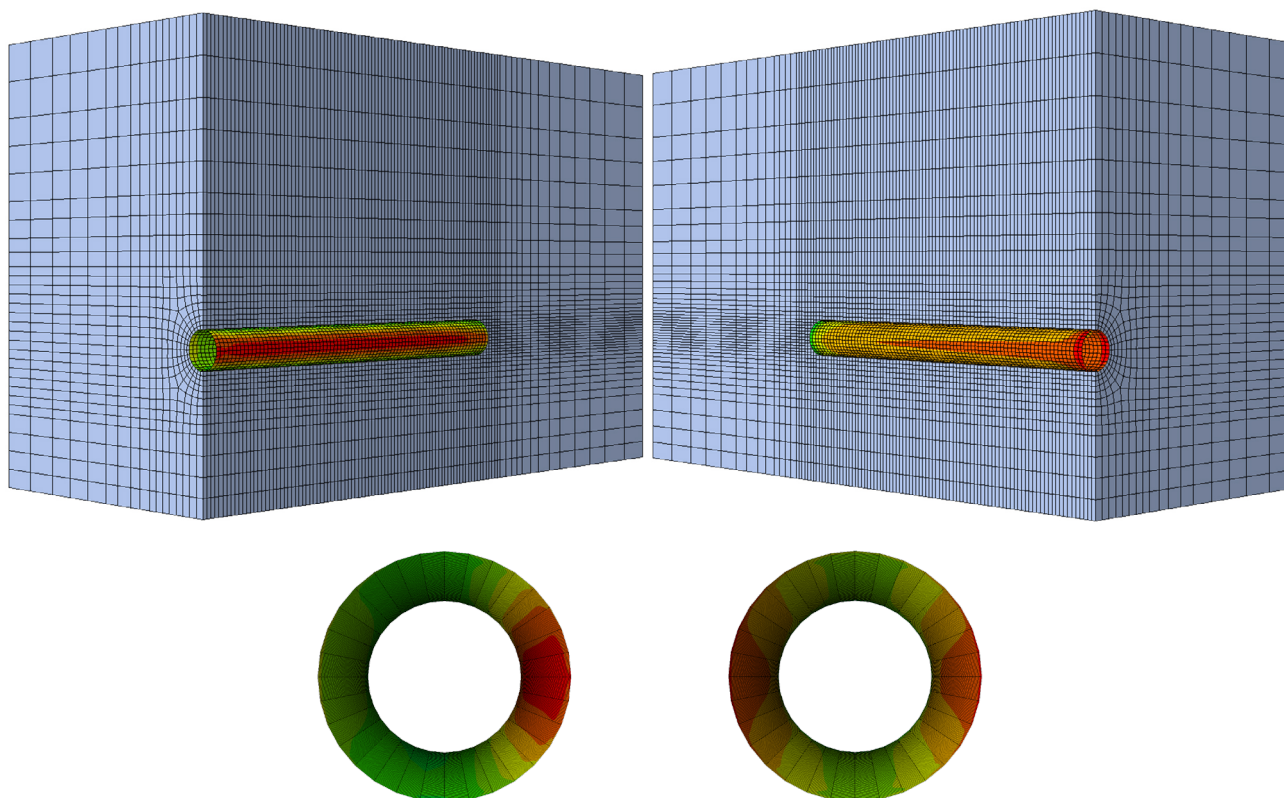

Υπολογιστική διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων βαθιών
σπράγγων με έμφαση στο συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και
στο συντελεστή αποτόνωσης

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΨΥΧΑΡΗ ΕΙΡΗΝΗ

Διπλωματούχος Μηχανικός Μεταλλείων - Μεταλλουργός



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:
ΚΑΒΒΑΔΑΣ ΜΙΧΑΗΛ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

Δ.Π.Μ.Σ. “ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ”

**«ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ
ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΔΥΜΩΝ ΒΑΘΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ
ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΓΕΩΣΤΑΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ»**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΨΥΧΑΡΗ ΕΙΡΗΝΗ

Διπλωματούχος Μηχανικός Μεταλλείων – Μεταλλουργός

*Η διπλωματική εργασία υποβλήθηκε στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού
Μετσόβιου Πολυτεχνείου προς εκπλήρωση των προϋποθέσεων απόκτησης
του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης
(Κατασκευή Σηράγγων & Υπογείων Έργων)*

Επιβλέπων:

Καβαδάς Μιχαήλ

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2016



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

DEPARTMENT OF GEOTECHNICAL ENGINEERING

POSTGRADUATE PROGRAM: "DESIGN AND CONSTRUCTION OF UNDERGROUND WORKS"

**"COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF THE INTERACTION
BETWEEN TWIN DEEP TUNNELS
WITH EMPHASIS ON THE GEOSTATIC STRESS RATIO
AND THE DECONFINEMENT RATIO"**

POSTGRADUATE THESIS

PSYCHARI EIRINI

Mining Engineer

A thesis submitted to the School of Civil Engineering of The National Technical University of Athens in fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (Tunneling & Underground Construction).

Supervisor:

Michael J. Kavvadas

Associate Professor of Civil Engineering

Athens, March 2016

Copyright ©, Ψυχάρη Ειρήνη, 2016.

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ανάπτυξη των μεταφορών απαιτεί συχνά την κατασκευή δίδυμων σηράγγων ή την κατασκευή νέων σηράγγων πλησίον ήδη υπαρχόντων. Στις περιπτώσεις αυτές είναι απαραίτητη η προστασία των υφιστάμενων κατασκευών και ιδιαιτέρως του συστήματος υποστήριξής τους, καθώς η κατασκευή νέων σηράγγων οδηγεί σε μετατοπίσεις του εδάφους και παραμορφώσεις, οι οποίες επηρεάζουν την παρακείμενη σήραγγα. Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία η οποία έχει τίτλο «Υπολογιστική διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων βαθιών σηράγγων με έμφαση στο συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και στο συντελεστή αποτόνωσης», έχει ως βασική επιδίωξη τη διερεύνηση των μεγεθών των φορτίων και των εντατικών μεγεθών που ασκούνται στην άμεση υποστήριξη δίδυμων σηράγγων.

Η εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός & Κατασκευή Υπογείων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και πιο συγκεκριμένα στον Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών. Η ολοκλήρωση της εργασίας, δε θα ήταν δυνατή χωρίς τη βοήθεια ορισμένων προσώπων, η συμβολή των οποίων υπήρξε καθοριστική προκειμένου να διεκπεραιωθεί η εργασία αυτή.

Αρχικά οφείλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα της εργασίας, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, κ. Καββαδά Μιχαήλ, για την ανάθεση της εκπόνησης της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας. Η εποπτεία του και οι επιστημονικές του γνώσεις αποτέλεσαν καθοριστικούς παράγοντες στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον κ. Χόρτη Φίλιππο, MSc, Υποψήφιο Διδάκτωρ ΕΜΠ, γιατί η γενναιόδωρη συνδρομή του, η συνεχής καθοδήγηση και οι επιστημονικές γνώσεις που μου παρείχε, συντέλεσαν καθοριστικά στη διεκπαιρέωση της εργασίας. Τον ευχαριστώ ακόμη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, για την αμέριστη συμπαράστασή του και για τον απεριόριστο χρόνο που αφιέρωσε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης.

Τέλος, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους εκείνους οι οποίοι με βοήθησαν να συνεχίσω και να συνεχίζω.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	4
2.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
2.2.	ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΈΡΕΥΝΕΣ.....	4
2.2.1.	<i>Ghabousi J., Ranken R.E., 1977</i>	4
2.2.2.	<i>Adachi T., Kimura M., Osada H., 1993</i>	5
2.2.3.	<i>Addenbrooke T.I., Potts D.M., 1996</i>	9
2.2.4.	<i>Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C., 1996</i>	11
2.2.5.	<i>Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W., 2004</i>	16
2.2.6.	<i>Koungelis D.K. & Augarde C.E., 2004</i>	31
2.2.7.	<i>Kim S.H., 2004</i>	36
2.2.8.	<i>Karakus M., Ozsan A., Basarir H., 2006.....</i>	39
2.2.9.	<i>Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P., 2007</i>	41
2.2.10.	<i>Chen S.L., Lee S.C., Gui M.W., 2008</i>	52
2.2.11.	<i>Μπεκρή Ε., 2012</i>	59
2.2.12.	<i>Chortis F., Kavvadas M., 2015</i>	67
3.	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	80
3.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	80
3.2.	ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ABAQUS	82
3.3.	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	84
3.3.1.	<i>Γεωμετρία</i>	85
3.3.2.	<i>Διακριτοποίηση καννάβων</i>	87
3.4.	ΑΛΛΗΛΟΥΧΙΑ ΕΚΣΚΑΦΗΣ & ΒΗΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....	90
3.4.1.	<i>Απόσταση εφαρμογής μέτρων υποστήριξης $S_{tunnel\ face}/D = 0.125$ στη δεύτερη σήραγγα</i>	92
3.4.2.	<i>Απόσταση εφαρμογής μέτρων υποστήριξης $S_{tunnel\ face}/D = 0.25$ στη δεύτερη σήραγγα</i>	93
3.4.3.	<i>Απόσταση εφαρμογής μέτρων υποστήριξης $S_{tunnel\ face}/D = 0.5$ στη δεύτερη σήραγγα</i>	94
3.4.4.	<i>Απόσταση εφαρμογής μέτρων υποστήριξης $S_{tunnel\ face}/D = 0.75$ στη δεύτερη σήραγγα</i>	94
3.4.5.	<i>Απόσταση εφαρμογής μέτρων υποστήριξης $S_{tunnel\ face}/D = 1$ στη δεύτερη σήραγγα</i>	95
3.5.	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	98
3.5.1.	<i>Γεωμετρικές παράμετροι</i>	98
3.5.2.	<i>Γεωτεχνικές παράμετροι</i>	100
3.5.3.	<i>Παράμετροι άμεσης υποστήριξης</i>	104
3.6.	ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΒΟΛΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	107
3.7.	ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	108

4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	110
4.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	110
4.2.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ ΠΥΛΩΝΑ (W/D)	110
4.2.1.	Φορτία (ρ)	111
4.2.2.	Αξονικές δυνάμεις (N)	118
4.2.3.	Ροπές κάμψης (M)	120
4.2.4.	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	124
4.3.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΓΕΩΣΤΑΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ (K_0)	132
4.3.1.	Φορτία (ρ)	133
4.3.2.	Αξονικές δυνάμεις (N)	150
4.3.3.	Ροπές κάμψης (M)	152
4.3.4.	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	154
4.4.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ (λ)	162
4.4.1.	Φορτία (ρ)	162
4.4.2.	Αξονικές δυνάμεις (N)	167
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	169
5.1.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	169
5.2.	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	174
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	175

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.2-1: Σχηματικό διάγραμμα της συσκευής μειούμενης διαμέτρου, προς προσομοίωση της εκσκαφής της σήραγγας και του μετρητή της πίεσης των γαιών (αριστερά) και σήραγγα κυκλικής διατομής με τη χρησιμοποίηση συσκευής μειούμενης διαμέτρου (δεξιά) (Adachi T., Kimura M. & Osada H., 1993).....	7
Σχήμα 2.2-2: Συνθήκες δοκιμής και παράμετροι Z & B (αριστερά) και H (δεξιά) (Adachi T., Kimura M. & Osada H., 1993).....	7
Σχήμα 2.2-3: Κανονικοποιημένη κατανομή πίεσης γαιών στην άνω ημικυκλική περιφέρεια της προϋπάρχουσας σήραγγας για: i) σταθερό πλάτος πυλώνα B = 1.0D και μεταβαλλόμενο ύψος υπερκειμένων γαιών Z = 0.5D, 1.0D & 2.0D (αριστερά), ii) σταθερό ύψος υπερκειμένων γαιών Z = 1.0D και μεταβαλλόμενο πλάτος πυλώνα B = 0.5D, 1.0D & 2.0D (δεξιά) (Adachi T., Kimura M. & Osada H., 1993).....	8
Σχήμα 2.2-4: Σχετικές γεωμετρικές δίδυμων σηράγγων και προφίλ του εδάφους (Addenbrooke & Potts, 1996).....	9
Σχήμα 2.2-5: Προφίλ καθιζήσεων πάνω από την δεύτερη (αριστερή) σήραγγα και πάνω από τις δίδυμες, παράλληλες κατά την οριζόντια διεύθυνση, σήραγγες (Addenbrooke & Potts, 1996).....	10
Σχήμα 2.2-6: Εκκεντρότητα της καμπύλης των καθιζήσεων σε σχέση με το πλάτος του πυλώνα (Addenbrooke & Potts, 1996).....	10
Σχήμα 2.2-7: Λόγος πλάτους πυλώνα συναρτήσει της αντοχής του, κανονικοποιημένης ως προς την πίεση των υπερκειμένων γαιών (αριστερά). Εντατική κατάσταση της βραχόμαζας γύρω από τις σήραγγες πριν και μετά την εφαρμογή των προεντεταμένων αγκυρίων (δεξιά) (Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C., 1996).....	13
Σχήμα 2.2-8: Μετακινήσεις που προκαλούνται λόγω της εκσκαφής διατομής 16m σε ζώνη διάρρηξης με τη μέθοδο ορθού μετώπου και βαθμίδας (αριστερά) και με τη μέθοδο πλευρικής προσβολής (δεξιά) (Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C., 1996).....	14
Σχήμα 2.2-9: Τριδιάστατη άποψη της διακριτοποίησης των δίδυμων σηράγγων (Ng, Lee & Tang, 2004).....	18
Σχήμα 2.2-10: Τυπική διατομή – πλάγια όψη από τη θετική διεύθυνση x (αριστερά). Κάτοψη (δεξιά). (Ng, Lee & Tang, 2004).....	18
Σχήμα 2.2-11: Εγκάρσια τομή του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων των δίδυμων παράλληλων σηράγγων: (a) x-z επίπεδο, (b) x-y επίπεδο (Ng, Lee & Tang, 2004).....	18
Σχήμα 2.2-12: Παραμόρφωση στην περιφέρεια της σήραγγας σε διαφορετικά τμήματα για $L_T = 0D$: (a) στην $y = 0m$ ή $0D$ (τομή A – A)· στην $y = -20m$ ή $-2.3D$ (τομή B – B)· στην $y = -75m$ ή $-8.6D$ (τομή E – E, που προσεγγίζει συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης). LLD, αριστερή φάση της αριστερής σήραγγας· LRD, δεξιά φάση της αριστερής σήραγγας· RLD, αριστερή φάση της δεξιάς σήραγγας· RRD, δεξιά φάση της δεξιάς σήραγγας (Ng, Lee & Tang, 2004).....	22
Σχήμα 2.2-13: Παραμόρφωση στην περιφέρεια της σήραγγας σε διαφορετικές διατομές για $L_T = 3.5D$: (a) στην $y = 0m$ ή $0D$ (τομή A – A)· (b) στην $y = -20m$ ή $-2.3D$ (τομή B – B)· (c) στην $y = -30m$ ή $-3.5D$ (τομή C – C)· (d) στην $y = -50m$ ή $-5.8D$ (τομή D – D)· (e) στην $y = -75m$ ή $-8.6D$ (τομή E – E, η οποία προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) (Ng, Lee & Tang, 2004).....	23

Σχήμα 2.2-14: Σύγκριση των παραμορφώσεων στη διατομή E - E ($y = -8.6D$, που προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) για (a) $L_T = 0D$ και (b) $L_T = 3.5D = 30m$ (Ng, Lee & Tang, 2004).....	25
Σχήμα 2.2-15: Κανονικοποιημένες επιφανειακές καθιζήσεις σε διάφορες διαμήκεις αποστάσεις, για $L_T = 3.5D$ (Ng, Lee & Tang, 2004).....	26
Σχήμα 2.2-16: Σχέση μεταξύ των καθαρών μετατοπίσεων καμπυλών επιφανειακής καθιζήσης ($\Delta L_x = L_x$ μείον L_x από την ανάλυση δίδυμων σηράγγων με $L_T = 0$) στη διατομή E - E ($y = -8.6D$, που προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) (Ng, Lee & Tang, 2004).....	27
Σχήμα 2.2-17: Ροπή κάμψης ($kN \cdot m$) στην επένδυση για τη διατομή E - E ($y = -8.6D$, η οποία προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης), για $L_T = 3.5D$ (Ng, Lee & Tang, 2004).....	28
Σχήμα 2.2-18: Διακύμανση της ροπής κάμψης ($kN \cdot m$) στη επένδυση για τη διατομή E - E ($y = -8.6D$, που προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) για διαφορετικές τιμές L_T : (a) αριστερή σήραγγα (b) δεξιά σήραγγα (Ng, Lee & Tang, 2004).....	28
Σχήμα 2.2-19: Διακύμανση της μέγιστης ροπής κάμψης ($M_{max} =$ υπολογισμένη ροπή κάμψης από την ανάλυση παράλληλων σηράγγων - υπολογισμένη ροπή κάμψης από την ανάλυση μονής σήραγγας) στην επένδυση για τη διατομή E - E ($y = -8.6D$, που προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης), για διαφορετικές τιμές L_T (Ng, Lee & Tang, 2004).....	29
Σχήμα 2.2-20: Διακύμανση της αξονικής δύναμης (kN/m) στη διατομή E - E ($y = -8.6D$, που προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης), με διάφορες τιμές L_T : (a) αριστερή σήραγγα (b) δεξιά σήραγγα (Ng, Lee & Tang, 2004).....	30
Σχήμα 2.2-21: Τρεις διαφορετικές γεωμετρίες, με μεταβαλλόμενη τη θέση της δεύτερης σήραγγας (αριστερά) και στρωματογραφία του εδάφους που υιοθετήθηκε στην έρευνα (δεξιά) (Koungelis D.K. & Augarde C.E., 2004).....	32
Σχήμα 2.2-22: Εξέλιξη των επιφανειακών καθιζήσεων συναρτήσει του λόγου του πλάτους πυλώνα προς τη διάμετρο της διατομής, για διαφορετικά πάχη υπερκειμένων γαιών και για διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας του εδάφους (Koungelis D.K. & Augarde C.E., 2004).....	33
Σχήμα 2.2-23: Πλαστική ζώνη γύρω από τη δεύτερη σήραγγα, για πλάτη πυλώνα $P = 0.5D$ (πάνω) και $P = 7D$ (κάτω) (Koungelis D.K. & Augarde C.E., 2004).....	34
Σχήμα 2.2-24: Εξέλιξη των επιφανειακών καθιζήσεων συναρτήσει του λόγου του πλάτους πυλώνα προς τη διάμετρο της διατομής, για διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας του εδάφους (Koungelis D.K. & Augarde C.E., 2004).....	35
Σχήμα 2.2-25: Διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων (Kim S.H., 2004).....	37
Σχήμα 2.2-26: Μετακινήσεις στην υποστήριξη της υφιστάμενης σήραγγας, λόγω της διάνοιξης σήραγγας στα αριστερά της υφιστάμενης, σε απόσταση $2D$ (αριστερά) και λόγω της διάνοιξης σήραγγας στα δεξιά της υφιστάμενης, σε απόσταση $1.4D$ (δεξιά) (Kim S.H., 2004).....	38
Σχήμα 2.2-27: Επιπρόσθετες ροπές κάμψης στην υποστήριξη της υφιστάμενης σήραγγας, λόγω της διάνοιξης της γειτονικής σήραγγας στα αριστερά της υφιστάμενης ($W = 2D$) (αριστερά) και λόγω της διάνοιξης της γειτονικής σήραγγας στα δεξιά της υφιστάμενης ($W = 1.4D$) (δεξιά) (Kim S.H., 2004).....	38
Σχήμα 2.2-28: 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).....	42

Σχήμα 2.2-29: Γεωστατικό πεδίο τάσεων στην περιοχή του Σύδνεϋ (Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P., 2007).....	43
Σχήμα 2.2-30: Εξέλιξη των πεδίων τάσεων ή/και παραμορφώσεων στη βραχώμαζα, στην επένδυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και στα αγκύρια κατά τη διάρκεια των φάσεων εκσκαφής και υποστήριξης της νέας σήραγγας (Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P., 2007).....	46
Σχήμα 2.2-31: Παρακολουθούμενες περιοχές του υφιστάμενου συστήματος υποστήριξης (Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P., 2007).....	48
Σχήμα 2.2-32: Τάσεις στις παρακολουθούμενες περιοχές (οι οποίες αναφέρονται στο Σχήμα 2.2-31) του υφιστάμενου συστήματος υποστήριξης, πριν (εικόνες στα αριστερά) και μετά (εικόνες στα δεξιά) την κατασκευή της νέας σήραγγας (Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P., 2007).....	49
Σχήμα 2.2-33: Επιδράσεις της διάνοιξης στο υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης (Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P., 2007).....	51
Σχήμα 2.2-34: Εξέλιξη των μετακινήσεων των τριών κλάδων για μεταβαλλόμενο πλάτος πυλώνα: (a) Για πεταλοειδή διατομή και (b) Για κυκλική διατομή (Chen, Lee, Gui, 2008).....	54
Σχήμα 2.2-35: Μέγιστες μετακινήσεις για κάθε έναν από τους τέσσερις κλάδους της σήραγγας και κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων εκσκαφής (Chen, Lee, Gui, 2008).....	56
Σχήμα 2.2-36: Διανύσματα τελικών μετατοπίσεων των τεσσάρων παράλληλων κλάδων, (a) πριν και (b) μετά από τη βελτίωση του γεωυλικού (Chen, Lee, Gui, 2008).....	57
Σχήμα 2.2-37: Σύγκριση, περί τη χαρακτηριστική διατομή, των πιέσεων που αναπτύσσονται επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου της διδυμης σήραγγας ($W=0.5D=5m$), του δεύτερου κλάδου αυτής, καθώς και της σήραγγας μονού κλάδου (Μπεκρή, 2012).....	61
Σχήμα 2.2-38: Εξέλιξη των αναπτυσσόμενων μέσων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, κατά τη συνολική διάρκεια της εκσκαφής, για διατομές των δυο κλάδων της διδυμης σήραγγας που βρίσκονται σε απόσταση 40m από την είσοδο της σήραγγας και για $W=0.5D=5m$ (Μπεκρή, 2012).....	62
Σχήμα 2.2-39: Κατανομή ανηγμένης μέσης πίεσης επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $p_{average,(f/s)}/p_{average,single}$, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_o (σ_c : αντοχή σε μονοαξονική θλίψη κατά Mohr – Coulomb με βάση τις ισοδύναμες τιμές συνοχής και γωνίας τριβής), για $W = 0.5D = 5m$ (Μπεκρή, 2012).....	63
Σχήμα 2.2-40: Κατανομή των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, περί τη χαρακτηριστική διατομή, για τα τρία διαφορετικά προσομοιώματα ($W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$) (Μπεκρή, 2012).....	64
Σχήμα 2.2-41: Κατανομή ανηγμένης μέσης πίεσης επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $p_{average,(f/s)}/p_{average,single}$, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_o , για $W=0.5D=5m$, $W = D = 10m$, $W = 2D = 20m$ (Μπεκρή, 2012).....	65
Σχήμα 2.2-42: Κατανομή ανηγμένης πίεσης της δεξιάς παρειάς ($\theta = 90^\circ$) της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $p_{90,(f/s)}/p_{90,single}$, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_o , για $W = 0.5D = 5m$, $W = D = 10m$, $W = 2D = 20m$ (Μπεκρή, 2012).....	65

Σχήμα 2.2-43: Κατανομή ανηγμένης πίεσης της αριστερής παρειάς της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $p_{270,(f/s)}/p_{270,single}$, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/p_o , για $W = 0.5D = 5m$, $W = D = 10m$, $W = 2D = 20m$ (Μπεκρή, 2012).....	65
Σχήμα 2.2-44: : Αριθμητικό μοντέλο για πλάτος πυλώνα $W = 2D$ (Chortis F. & Kavvadas M., 2015).....	69
Σχήμα 2.2-45: Ωρολογιακός προσανατολισμός της γωνίας στην αριστερή και τη δεξιά σήραγγα (Chortis F. & Kavvadas M., 2015)	69
Σχήμα 2.2-46: 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}/p_o) , για πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ (Chortis F. & Kavvadas M., 2015)	71
Σχήμα 2.2-47: Κατανομή των φορτίων, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 1.0$ (αριστερά) και $K_o = 1.5$ (δεξιά) στην τυπική διατομή, για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o) και για λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ (Chortis F. & Kavvadas M., 2015)	72
Σχήμα 2.2-48: Λόγος φορτίων (πρώτης/μονής) στην εσωτερική παρεία της "πρώτης σήραγγας" ($\Theta = 90^\circ$), ως συνάρτηση του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o), για διάφορες τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_o) και λόγου ύψους υπερκειμένων γαιών (H/D) (Chortis F. & Kavvadas M., 2015).....	73
Σχήμα 2.2-49: Λόγος φορτίων (πρώτης/μονής) στην οροφή της «πρώτης σήραγγας» (first tunnel) ($\Theta = 360^\circ$), ως συνάρτηση του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o), για διάφορες τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_o) και λόγου ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ (Chortis F. & Kavvadas M., 2015)	75
Σχήμα 2.2-50: Χρονοϊστορία των φορτίων (μέγιστη τιμή), για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o), συντελεστή γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$, για την «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) στα αριστερά και για τη «δεύτερη σήραγγα» (second tunnel) στα δεξιά (Chortis F. & Kavvadas M., 2015).....	76
Σχήμα 2.2-51: Κατανομή της αξονικής δύναμης, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ (αριστερά) και $K_o = 1.5$ (δεξιά) στην τυπική διατομή, για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o), πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ και λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ (Chortis F. & Kavvadas M., 2015)	77
Σχήμα 2.2-52: Κατανομή της ροπής κάμψης, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ (αριστερά) και $K_o = 1.5$ (δεξιά) στην τυπική διατομή, για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o) που εξετάστηκε, πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ και λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ (Chortis F. & Kavvadas M., 2015)	77
Σχήμα 2.2-53: 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}/p_o), για διάφορες τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_o (Chortis F. & Kavvadas M., 2015).....	78
Σχήμα 3.2-1: Περιβάλλον εργασίας του Abaqus 6.13 (αριστερά) και μορφή αρχείου εισαγωγής δεδομένων – input file (δεξιά).....	83

Σχήμα 3.3-1: Προοπτική όψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 2D = 16m$86

Σχήμα 3.3-2: Εγκάρσια όψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 2D$ (επίπεδο $Z - X$). Στο σχήμα φαίνονται η (αριστερή) «μονή/πρώτη» σήραγγα (single/first tunnel), η (δεξιά) «δεύτερη» σήραγγα (second tunnel) και οι διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου. Η διάμετρος κάθε σήραγγας είναι ίση με $D = 8m$86

Σχήμα 3.3-3: Διαμήκης όψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 2D$ (επίπεδο $Z - Y$). Στο σχήμα φαίνονται η διατομή της σήραγγας (tunnel section) και οι διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου.....87

Σχήμα 3.3-4: Οκτακομβικά εξαπλευρικά (C3D8) πεπερασμένα στοιχεία εδάφους (solid elements) εντός της διατομής εκσκαφής, που προσομοιώνουν το γεωυλικό.....87

Σχήμα 3.3-5: Τετρακομβικά τετραπλευρικά (S4) πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell elements), που προσομοιώνουν την άμεση υποστήριξη (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα).87

Σχήμα 3.3-6: Διαμήκης όψη (επίπεδο $Z - Y$) στην οποία φαίνονται οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων.....89

Σχήμα 3.3-7: Εγκάρσια όψη (επίπεδο $Z - X$) του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D$. Στο σχήμα διακρίνονται οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων σε όλο εγκάρσιο τμήμα του αριθμητικού μοντέλου.....89

Σχήμα 3.4-1: Τομή, στο επίπεδο $X - Y$ του αριθμητικού μοντέλου, που διέρχεται από τις οριζόντιες διαμέτρους των σηράγγων. Στο σχήμα φαίνεται το 40^ο βήμα της αριθμητικής ανάλυσης, στο οποίο έχουν εκσκαφθεί 40m και έχουν υποστηριχθεί 39m της «μονής/πρώτης» σήραγγας (single/first tunnel). Η διαδικασία εκσκαφής και υποστήριξης της δεύτερης σήραγγας (second tunnel) δεν έχει ξεκινήσει σε αυτό το βήμα.....96

Σχήμα 3.4-2: Τομή, στο επίπεδο $X - Y$ του αριθμητικού μοντέλου, που διέρχεται από τις οριζόντιες διαμέτρους των σηράγγων. Στο σχήμα φαίνεται το 80^ο βήμα της αριθμητικής ανάλυσης, στο οποίο έχουν εκσκαφθεί 80m και έχουν υποστηριχθεί 79m της «μονής/πρώτης» σήραγγας (single/first tunnel). Η διαδικασία εκσκαφής και υποστήριξης της δεύτερης σήραγγας (second tunnel) δεν έχει ξεκινήσει σε αυτό το βήμα.....96

Σχήμα 3.4-3: Τομή, στο επίπεδο $X - Y$ του αριθμητικού μοντέλου, που διέρχεται από τις οριζόντιες διαμέτρους των σηράγγων. Πρόκειται για ανάλυση με απόσταση εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης, της δεύτερης σήραγγας από το μέτωπο, $S_{\text{tunnel face}}/D = 0.5$. Στο σχήμα φαίνεται το 120^ο βήμα της αριθμητικής ανάλυσης, στο οποίο έχουν εκσκαφθεί 80m και έχουν υποστηριχθεί 79m της «μονής/πρώτης» σήραγγας (single/first tunnel), ενώ έχουν εκσκαφθεί 43m και έχουν υποστηριχθεί 39m της δεύτερης σήραγγας (second tunnel).....97

Σχήμα 3.4-4: Τομή, στο επίπεδο $X - Y$ του αριθμητικού μοντέλου, που διέρχεται από τις οριζόντιες διαμέτρους των σηράγγων. Πρόκειται για ανάλυση όπου $S_{\text{tunnel face}}/D = 0.5$. Στο σχήμα φαίνεται το 157^ο βήμα της ανάλυσης, όπου έχουν εκσκαφθεί 80m και έχουν υποστηριχθεί 79m της «μονής/πρώτης» σήραγγας (single/first tunnel), ενώ έχουν εκσκαφθεί 80m και έχουν υποστηριχθεί 76m της δεύτερης σήραγγας (second tunnel).....97

Σχήμα 3.5-1: Περιοχή του διαγράμματος GSI η οποία μελετήθηκε στα πλαίσια της έρευνας (Hoek and Marinis, 2000).....101

Σχήμα 3.7-1: Προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (single/first – left – tunnel) και της δεξιάς σήραγγας (second – right – tunnel), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού.....109

Σχήμα 4.2-1: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $\rho_{average}/\rho_{o,m}$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).....111

Σχήμα 4.2-2: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου $\rho_{side} (\Theta = 90^\circ \text{ \& \ } \Theta = 270^\circ)/\rho_{o,m}$ 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) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).....114

Σχήμα 4.2-3: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου $\rho/\rho_{o,m}$ συναρτήσει της γωνίας Θ (°) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).....115

Σχήμα 4.2-4: Χρονοϊστορία των κανονικοποιημένων μέσων φορτίων $\rho_{average}/\rho_{o,m}$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).....117

Σχήμα 4.2-5: Χρονοϊστορία των κανονικοποιημένων φορτίων $\rho_{side} (\Theta = 90^\circ \text{ \& \ } \Theta = 270^\circ)/\rho_{o,m}$ επί των εσωτερικών παρειών στην άμεση υποστήριξη συναρτήσει του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).....117

Σχήμα 4.2-6: Κατανομή της ανηγμένης μέσης αξονικής δύναμης επί της άμεσης υποστήριξης ($N_{abs,average}/\rho_{o,m}D$) συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).....119

Σχήμα 4.2-7: Κατανομή της ανηγμένης αξονικής δύναμης επί των εσωτερικών παρειών ($N_{abs,side} (\Theta = 90^\circ \text{ \& \ } \Theta = 270^\circ)/\rho_{o,m}D$) συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).....119

Σχήμα 4.2-8: 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) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).....120

Σχήμα 4.2-9: Κατανομή της ανηγμένης μέγιστης ροπής κάμψης επί της άμεσης υποστήριξης ($M_{abs,max}/\rho_{o,m}D^2$) συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).....121

Σχήμα 4.2-10: Κατανομή της ανηγμένης ροπής κάμψης επί των εσωτερικών παρειών ($M_{side} (\Theta = 90^\circ \text{ \& \ } \Theta = 270^\circ)/\rho_{o,m}D^2$) συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων, για

αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o = 0.21$).....123

Σχήμα 4.2-11: Κατανομή της κανονικοποιημένης ροπής κάμψης ($M/p_o \cdot mD_2$) συναρτήσει της γωνίας Θ ($^\circ$) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά) συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o = 0.21$).....123

Σχήμα 4.2-12: Λόγος μέσων φορτίων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,avg}/p_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$126

Σχήμα 4.2-13: Λόγος φορτίων στην οροφή (αριστερά) και στην εσωτερική παρειά (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,roof}(\Theta = 360^\circ)/p_{single,roof}(\Theta = 360^\circ)$ & $p_{first,side}(\Theta = 90^\circ)/p_{single,side}(\Theta = 90^\circ)$ αντίστοιχα) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$126

Σχήμα 4.2-14: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,avg}/N_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$129

Σχήμα 4.2-15: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην οροφή (αριστερά) και στην εσωτερική παρειά (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,roof}(\Theta = 360^\circ)/N_{single,roof}(\Theta = 360^\circ)$ & $N_{first,side}(\Theta = 90^\circ)/N_{single,side}(\Theta = 90^\circ)$ αντίστοιχα) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$129

Σχήμα 4.2-16: Λόγος μέγιστων ροπών κάμψης της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($M_{first,max}/M_{single,max}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$131

Σχήμα 4.2-17: Λόγος ροπών κάμψης στην οροφή (αριστερά) και στην εσωτερική παρειά (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($M_{first,roof}(\Theta = 360^\circ)/M_{single,roof}(\Theta = 360^\circ)$ & $M_{first,side}(\Theta = 90^\circ)/M_{single,side}(\Theta = 90^\circ)$ αντίστοιχα) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$131

Σχήμα 4.3-1: Απεικόνιση των τάσεων στην παρειά και την οροφή της διατομής της σήραγγας.....132

Σχήμα 4.3-2: Κατανομή του ανηγμένου φορτίου p/p_o συναρτήσει της γωνίας Θ ($^\circ$) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ (αριστερά) και $K_o = 1.0$ (δεξιά) και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o = 0.21$).....137

Σχήμα 4.3-3: Κατανομή του ανηγμένου φορτίου p/p_o συναρτήσει της γωνίας Θ ($^\circ$) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o = 0.21$).....137

Σχήμα 4.3-4: Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG) στη διατομή που αντιστοιχεί στο 40 ^ο μ της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).....	138
Σχήμα 4.3-5: Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG) στις διατομές που αντιστοιχούν στο 40 ^ο μ της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).....	138
Σχήμα 4.3-6: Διεκτροπικές τάσεις (S, Mises) στη διατομή που αντιστοιχεί στο 40 ^ο μ της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).....	139
Σχήμα 4.3-7: Διεκτροπικές τάσεις (S, Mises) στις διατομές που αντιστοιχούν στο 40 ^ο μ της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).....	139
Σχήμα 4.3-8: Αναπτυσσόμενες μετακινήσεις (U) των εδαφικών στοιχείων περιμετρικά της διατομής που αντιστοιχεί στο 40 ^ο μ της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).....	140
Σχήμα 4.3-9: Αναπτυσσόμενες μετακινήσεις (U) των εδαφικών στοιχείων περιμετρικά των διατομών που αντιστοιχούν στο 40 ^ο μ της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).....	140
Σχήμα 4.3-10: Φορτία (CPRESS) στην άμεση υποστήριξη της «μονής» σήραγγας (single tunnel), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).....	141
Σχήμα 4.3-11: Φορτία (CPRESS) στην άμεση υποστήριξη της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).....	141
Σχήμα 4.3-12: Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG) στη διατομή που αντιστοιχεί στο 40 ^ο μ της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.0$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).....	142
Σχήμα 4.3-13: Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG) στις διατομές που αντιστοιχούν στο 40 ^ο μ της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.0$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).....	142

Σχήμα 4.3-14: Διεκτροπικές τάσεις (S, Mises) στη διατομή που αντιστοιχεί στο 40^ομ της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.0$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....143

Σχήμα 4.3-15: Διεκτροπικές τάσεις (S, Mises) στις διατομές που αντιστοιχούν στο 40^ομ της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.0$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....143

Σχήμα 4.3-16: Αναπτυσσόμενες μετακινήσεις (U) των εδαφικών στοιχείων περιμετρικά της διατομής που αντιστοιχεί στο 40^ομ της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.0$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....144

Σχήμα 4.3-17: Αναπτυσσόμενες μετακινήσεις (U) των εδαφικών στοιχείων περιμετρικά των διατομών που αντιστοιχούν στο 40^ομ της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.0$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....144

Σχήμα 4.3-18: Φορτία (CPRESS) στην άμεση υποστήριξη της «μονής» σήραγγας (single tunnel), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.0$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....145

Σχήμα 4.3-19: Φορτία (CPRESS) στην άμεση υποστήριξη της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.0$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....145

Σχήμα 4.3-20: Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG) στη διατομή που αντιστοιχεί στο 40^ομ της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....146

Σχήμα 4.3-21: Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG) στις διατομές που αντιστοιχούν στο 40^ομ της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....146

Σχήμα 4.3-22: Διεκτροπικές τάσεις (S, Mises) στη διατομή που αντιστοιχεί στο 40^ομ της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....147

Σχήμα 4.3-23: Διεκτροπικές τάσεις (S, Mises) στις διατομές που αντιστοιχούν στο 40^ομ της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....147

Σχήμα 4.3-24: Αναπτυσσόμενες μετακινήσεις (U) των εδαφικών στοιχείων περιμετρικά της διατομής που αντιστοιχεί στο 40^οm της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....148

Σχήμα 4.3-25: Αναπτυσσόμενες μετακινήσεις (U) των εδαφικών στοιχείων περιμετρικά των διατομών που αντιστοιχούν στο 40^οm της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....148

Σχήμα 4.3-26: Φορτία (CPRESS) στην άμεση υποστήριξη της «μονής» σήραγγας (single tunnel), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....149

Σχήμα 4.3-27: Φορτία (CPRESS) στην άμεση υποστήριξη της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....149

Σχήμα 4.3-28: Κατανομή της ανηγμένης αξονικής δύναμης N_{abs}/p_0D συναρτήσει της γωνίας Θ (°) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ (αριστερά) και $K_0 = 1.0$ (δεξιά) και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....151

Σχήμα 4.3-29: Κατανομή της ανηγμένης αξονικής δύναμης N_{abs}/p_0D συναρτήσει της γωνίας Θ (°) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....151

Σχήμα 4.3-30: Κατανομή της κανονικοποιημένης ροπής κάμψης (M/p_0D^2) συναρτήσει της γωνίας Θ (°) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ (αριστερά) και $K_0 = 1.0$ (δεξιά) και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....153

Σχήμα 4.3-31: Κατανομή της κανονικοποιημένης ροπής κάμψης (M/p_0D^2) συναρτήσει της γωνίας Θ (°) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).....153

Σχήμα 4.3-32: Λόγος μέσων φορτίων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,avg}/p_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ (αριστερά) και $K_0 = 1.0$ (δεξιά).....155

Σχήμα 4.3-33: Λόγος μέσων φορτίων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,avg}/p_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$155

Σχήμα 4.3-34: Λόγος φορτίων στην οροφή της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,roof}(\Theta = 360^\circ)/p_{single,roof}(\Theta = 360^\circ)$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους

πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ (αριστερά) και $K_0 = 1.0$ (δεξιά).....156

Σχήμα 4.3-35: Λόγος φορτίων στην οροφή της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,roof} (\Theta = 360^\circ)/p_{single,roof} (\Theta = 360^\circ)$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$156

Σχήμα 4.3-36: : 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}/p_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ (αριστερά) και $K_0 = 1.0$ (δεξιά).....157

Σχήμα 4.3-37: 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}/p_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$157

Σχήμα 4.3-38: Λόγος αξονικών δυνάμεων στον πυθμένα της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,bottom} (\Theta = 180^\circ)/N_{single,bottom} (\Theta = 180^\circ)$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ (αριστερά) και $K_0 = 1.0$ (δεξιά).....159

Σχήμα 4.3-39: Λόγος αξονικών δυνάμεων στον πυθμένα της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,bottom} (\Theta = 180^\circ)/N_{single,bottom} (\Theta = 180^\circ)$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$159

Σχήμα 4.3-40: Λόγος των μέγιστων ροπών κάμψης της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($M_{first,max}/M_{single,max}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ (αριστερά) και $K_0 = 1.0$ (δεξιά).....161

Σχήμα 4.3-41: Λόγος των μέγιστων ροπών κάμψης της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($M_{first,max}/M_{single,max}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$161

Σχήμα 4.4-1: Λόγος μέσων φορτίων ($p_{first,avg}/p_{single,avg}$) (αριστερά) και φορτίων στην εσωτερική παρειά ($p_{first,side} (\Theta = 90 \text{ deg})/p_{single,side} (\Theta = 90 \text{ deg})$) (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ως συνάρτηση της κανονικοποιημένης απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο ($S_{tunnel \text{ face}}/D$) της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$166

Σχήμα 4.4-2: Λόγος μέσων φορτίων ($p_{second,avg}/p_{single,avg}$) (αριστερά) και φορτίων στην εσωτερική παρειά ($p_{second,side} (\Theta = 270 \text{ deg})/p_{single,side} (\Theta = 90 \text{ deg})$) (δεξιά) της «δεύτερης» προς της «μονής» σήραγγας ως συνάρτηση της κανονικοποιημένης απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο ($S_{tunnel \text{ face}}/D$) της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$166

Σχήμα 4.4-3: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων ($N_{first,avg}/N_{single,avg}$) (αριστερά) και αξονικών δυνάμεων στην εσωτερική παρειά ($N_{first,side} (\Theta = 90 \text{ deg})/N_{single,side} (\Theta = 90 \text{ deg})$) (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο ($S_{tunnel \text{ face}}/D$) της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$168

Σχήμα 4.4-4: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων ($N_{second,avg}/N_{single,avg}$) (αριστερά) και αξονικών δυνάμεων στην εσωτερική παρειά ($N_{second,side} (\Theta = 270 \text{ deg})/N_{single,side} (\Theta = 90 \text{ deg})$) (δεξιά) της «δεύτερης» προς της «μονής» σήραγγας συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο ($S_{tunnel \text{ face}}/D$) της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$168

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.2-1: Παράμετροι των υλικών που υιοθετήθηκαν στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Ng, Lee & Tang, 2004).....	20
Πίνακας 2.2-2: Σύγκριση των συγκλίσεων για την αριστερή σήραγγα (Karakus M., Ozsan A. & Basarir H., 2006).....	40
Πίνακας 2.2-3: Επίδραση της βελτίωσης του πυλώνα στις μετακινήσεις των δύο κύριων κλάδων, κατά τη διάρκεια της εκσκαφής (Chen, Lee, Gui, 2008).....	58
Πίνακας 3.5-1: Συγκεντρωτικός πίνακας γεωμετρικών, γεωτεχνικών και παραμέτρων άμεσης υποστήριξης.....	106
Πίνακας 3.6-1: Συγκεντρωτικός πίνακας συμβόλων που υιοθετούνται στις αριθμητικές αναλύσεις.....	107
Πίνακας 4.2-1: Γεωμετρικές και γεωτεχνικές παράμετροι αντιπροσωπευτικών αναλύσεων με τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ & 2	111
Πίνακας 4.2-2: Επίδραση του πλάτους του πυλώνα (W/D) στα φορτία που δέχεται η άμεση υποστήριξη των σηράγγων. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στη χαρακτηριστική διατομή όπου τα φορτία στη διαμήκη διεύθυνση έχουν συγκλίνει την τελική τους τιμή και στις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).....	113
Πίνακας 4.2-3: Λόγος των μέγιστων ροπών κάμψης της «πρώτης» σήραγγας προς της «μονής», για όλα τα μεγέθη πλατών πυλώνα που εξετάστηκαν ($W/D = 0.5, 1, 2, 3$ & 4) και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).....	121
Πίνακας 4.2-4: Λόγος φορτίων («πρώτης»/«μονής») στη στέψη ($\Theta = 360^\circ$) με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$, για τα μεγέθη πλατών πυλώνα (W/D) και τους λόγους των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) που διερευνήθηκαν.....	127
Πίνακας 4.2-5: Λόγος φορτίων («πρώτης»/«μονής») στην εσωτερική παρειά ($\Theta = 90^\circ$) με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$, για τα μεγέθη πλατών πυλώνα (W/D) και τους λόγους των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) που διερευνήθηκαν.....	127
Πίνακας 4.2-6: Λόγος αξονικών δυνάμεων («πρώτης»/«μονής») στην εσωτερική παρειά ($\Theta = 90^\circ$) με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$, για τα μεγέθη πλατών πυλώνα (W/D) και τους λόγους των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) που διερευνήθηκαν.....	128
Πίνακας 4.3-1: Γεωμετρικές και γεωτεχνικές παράμετροι αντιπροσωπευτικών αναλύσεων με τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες, πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5, 1.0$ & 1.5	133
Πίνακας 4.3-2: Λόγος φορτίων («πρώτης»/«μονής») για πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5, 1.0$ & 1.5 και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$)...	136

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνεχής ανάπτυξη των μεγάλων αστικών κέντρων έχει δημιουργήσει την ανάγκη για κατασκευή υποδομών αυξημένων απαιτήσεων, οι οποίες συχνά επιλέγεται να κατασκευαστούν υπογείως, κυρίως για λόγους εξοικονόμησης χώρου. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι γεωτεχνικές συνθήκες είτε άλλοι περιορισμοί, επιβάλλουν την κατασκευή νέων σηράγγων κοντά σε ήδη υπάρχουσες. Σε άλλες περιπτώσεις, η κατασκευή δίδυμων σηράγγων παρουσιάζει μια σειρά από πλεονεκτήματα, όπως ασφάλεια και λειτουργικότητα. Ως συνέπεια των ανωτέρω προκύπτει η ανάγκη για την πρόβλεψη της επιρροής που θα έχει η κατασκευή μιας νέας σήραγγας σε μία υφιστάμενη.

Η πλειονότητα των ερευνών που έχουν διεξαχθεί έως σήμερα επικεντρώνεται στη συμπεριφορά κατά την εκσκαφή και την υποστήριξη μιας μεμονωμένης σήραγγας, στις καθιζήσεις και τις μετακινήσεις του εδάφους, ενώ λίγες είναι εκείνες οι οποίες εστιάζουν στην κατασκευή δίδυμων σηράγγων και στα φαινόμενα αλληλεπίδρασης που παρουσιάζονται μεταξύ τους.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη διερεύνηση των φαινομένων της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων. Συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση που έχει η διάνοιξη μιας νέας σήραγγας στην υφιστάμενη υποστήριξη μιας γειτονικής, προϋπάρχουσας σήραγγας, σε όρους φορτίων και εντατικών μεγεθών. Για το σκοπό της έρευνας συγκεντρώθηκαν βιβλιογραφικά δεδομένα που αναφέρονται στο συγκεκριμένο ζήτημα, ενώ πραγματοποιήθηκαν τριδιάστατες αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Για τη λεπτομερή εξαγωγή αποτελεσμάτων σε ένα ευρύτερο φάσμα μεταβάλλονται ορισμένες παράμετροι. Αναλυτικότερα, εξετάζονται ένα μεγάλο εύρος από μεγέθη πλατών πυλώνων, γεωτεχνικών συνθηκών, συντελεστών οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και συντελεστή αποτόνωσης.

Τα αποτελέσματα των εν λόγω αναλύσεων υποδεικνύουν ότι η κατασκευή της νέας σήραγγας ασκεί σημαντική επιρροή στα φορτία και στα εντατικά μεγέθη της υφιστάμενης. Στην εξάλειψη του φαινομένου της αλληλεπίδρασης συμβάλλει η αύξηση του πλάτους του πυλώνα, η βελτίωση της ποιότητας του γεωυλικού, η αύξηση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και η μείωση του συντελεστή αποτόνωσης.

ABSTRACT

The continuous growth of large cities has created the need for the construction of demanding infrastructures, which are usually chosen to be built underground, mainly for space saving reasons. In some cases the geotechnical conditions or other restrictions, require the construction of new tunnels near existing ones. In other cases twin tunnels are constructed for safety and functionality reasons. As a consequence, the need to predict the impact of the construction of a new tunnel on an already existing one becomes crucial.

The majority of studies that have been conducted, focus on the behavior during the excavation and support of a single tunnel, on settlements and soil movements, while few of them focus on the construction of twin tunnels and the interaction between them.

The current MSc thesis deals with the investigation of the interaction phenomena between twin tunnels. Specifically, the thesis investigates the effect of the construction of a new tunnel to the existing support system of a neighboring, preexisting tunnel, in terms of loads and internal forces. For the purpose of the investigation, bibliographic data were gathered and three-dimensional analyses were conducted, using the finite element code Abaqus. For the extraction of detailed results to a wider range, certain parameters are changed. Specifically, a wide range of pillar width values, geotechnical conditions, geostatic stress ratios and deconfinement ratios are examined.

The results of the current thesis indicate that the construction of a new tunnel significantly affects the loads and internal forces on the support of the existing tunnel. The increase of the pillar width, the improvement of geotechnical conditions, the increase of the geostatic stress ratio and the reduction of the deconfinement ratio, all contribute to the elimination of the interaction effect.

1. Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των αστικών κέντρων έχει οδηγήσει στην ανάγκη για κατασκευή υποδομών αυξημένων απαιτήσεων. Καθώς οι αστικοί χώροι καθίστανται ολοένα και περισσότερο περιορισμένοι, τα υπόγεια έργα – όπως οι σήραγγες – γίνονται όλο και περισσότερο αποτελεσματικά όσον αφορά στην παροχή τέτοιων εξειδικευμένων υποδομών και στην ταυτόχρονη εξοικονόμηση χώρου. Οδικά και σιδηροδρομικά ταχεία συστήματα μαζικής μεταφοράς, υδραυλικές σήραγγες μεταφοράς νερού, υδροηλεκτρικά έργα αλλά και χώροι αναψυχής (κολυμβητήρια, παγοδρόμια κλπ.) είναι ορισμένες μόνο από τις χρήσεις γης οι οποίες έχουν εγκατασταθεί υπογείως ανά τον κόσμο.

Ως επακόλουθο της ανωτέρω ανάπτυξης, η κατασκευή σηράγγων σε άμεση γεινίαση με υφιστάμενα έργα ή η κατασκευή σηράγγων σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, καθίσταται για οικονομικούς, κυρίως, λόγους, επιτακτική στις μεγάλες αστικές περιοχές. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η προστασία των υφιστάμενων κατασκευών και ιδιαιτέρως του συστήματος υποστήριξής τους. Η κατασκευή νέων σηράγγων οδηγεί αναπόφευκτα σε μετατοπίσεις του εδάφους και παραμορφώσεις, οι οποίες δύνανται να επηρεάσουν την παρακείμενη σήραγγα και το υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης, προκαλώντας σημαντική ζημιά. Κατά συνέπεια, η πρόβλεψη της επιρροής που θα έχει η διάνοιξη μιας νέας σήραγγας πλησίον μιας προϋπάρχουσας καθίσταται ένα καίριο ζήτημα κατά τη φάση του σχεδιασμού και της διαδικασίας κατασκευής για τις νέες σήραγγες.

Οι περισσότερες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί επικεντρώνονται κυρίως στις μετακινήσεις του εδάφους και στις καθιζήσεις που προκαλεί η διάνοιξη δίδυμων σηράγγων, ενώ λίγες είναι αυτές που μελετούν την αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Οι προσεγγίσεις γίνονται συνήθως με εμπειρικές, αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους. Στις αριθμητικές μεθόδους, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα αναγνωρισμένο εργαλείο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των επαγόμενων μετακινήσεων του εδάφους λόγω της διάνοιξης σηράγγων, καθώς έχει την ικανότητα να λαμβάνει υπόψη την ετερογένεια του γεωυλικού, τη μη γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά των εδαφών/βράχων, την πολύπλοκη γεωμετρία των σηράγγων κλπ. Η μοντελοποίηση της διάνοιξης των σηράγγων επιλέγεται συνήθως να πραγματοποιηθεί με διδιάστατο τρόπο, επειδή η διεξαγωγή τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων απαιτεί αυξημένο υπολογιστικό χρόνο, περίπλοκη διαδικασία μόρφωσης του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων και πολλά στάδια προσομοίωσης. Ωστόσο, η διαδικασία εκσκαφής των

σηράγγων αποτελεί ένα τυπικό τριδιάστατο πρόβλημα, καθώς επιφέρει ένα τριδιάστατο 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. Κατά συνέπεια, οι τριδιάστατες αναλύσεις εμπεριέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των διδιάστατων.

Στόχο της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση των φαινομένων αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων. Πιο συγκεκριμένα μελετάται η επίδραση που έχει η διάνοιξη μιας νέας σήραγγας στην υφιστάμενη υποστήριξη μιας γειτονικής, προϋπάρχουσας σήραγγας, σε όρους φορτίων και εντατικών μεγεθών (αξονικών δυνάμεων και ροπών κάμψης). Για το σκοπό της έρευνας συγκεντρώθηκαν βιβλιογραφικά δεδομένα που αναφέρονται στο συγκεκριμένο ζήτημα, ενώ πραγματοποιήθηκαν τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Για την περισσότερο λεπτομερή εξαγωγή αποτελεσμάτων σε ένα ευρύτερο φάσμα μεταβάλλονται ορισμένες παράμετροι. Αναλυτικότερα, εξετάζονται ένα μεγάλο εύρος από μεγέθη πλατών πυλώνων, γεωτεχνικών συνθηκών, συντελεστών οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και συντελεστών αποτόνωσης.

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία δομείται, πλέον της εισαγωγής, από τέσσερα κεφάλαια.

Στο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής επισκόπησης παρουσιάζονται συνοπτικά και ενδεικτικά σχετικές έρευνες οι οποίες έχουν διεξαχθεί και μελετούν το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, ενώ επίσης περιλαμβάνονται ορισμένα παραδείγματα πραγματικών περιστατικών διάνοιξης δίδυμων σηράγγων, τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την εκσκαφή και οι τρόποι με τους οποίους αυτά αντιμετωπίστηκαν.

Στο 3^ο κεφάλαιο περιλαμβάνεται η περιγραφή της διαδικασίας των αναλύσεων και της μόρφωσης των αριθμητικών προσομοιωμάτων. Ακόμη 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, ενώ προσδιορίζονται τα βασικά σύμβολα των παραμετρικών αναλύσεων που υιοθετούνται στα πλαίσια της έρευνας.

Το 4^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα από τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της έρευνας, ενώ επίσης εμπεριέχει παρατηρήσεις οι οποίες διαπιστώνονται σχετικά με τα αποτελέσματα αυτά. Η επιλογή των αποτελεσμάτων γίνεται με σκοπό να αναδειχθούν συγκεκριμένα ζητήματα, μεταξύ των οποίων είναι:

- Η επίδραση του πλάτους του πυλώνα (W/D) στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.
- Η μεγιστοποίηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, στην περίπτωση όπου επικρατούν οι δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες (σ_{cm}/ρ_0), σε συνδυασμό με το μικρότερο πλάτος πυλώνα (W/D).
- Η επιρροή του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_0), στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.
- Η επίδραση που έχει η μεταβολή της απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο ($S_{\text{tunnel face}}$) της δεξιάς σήραγγας, στην άμεση υποστήριξη της αριστερής σήραγγας.

Τέλος, το 5^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εν λόγω έρευνας, καθώς επίσης εμπεριέχει προτάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης.

2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1. Εισαγωγή

Σε δίδυμες σήραγγες οι οποίες, σε αρκετές περιπτώσεις, βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, η εκτίμηση της επιρροής που ασκεί η εκσκαφή της μίας σήραγγας στην άλλη (της οποίας η εκσκαφή και υποστήριξη έχει ολοκληρωθεί), αποτελεί σημαντικό παράγοντα τόσο κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού τους, όσο και κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους. Λόγω της σημασίας του φαινομένου, ο μηχανισμός της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης πολλών επιστημόνων ανά τον κόσμο, με κύριο πεδίο έρευνας τις συγκλίσεις και καθιζήσεις στην επιφάνεια των εδαφών (άμμοι και άργιλοι) που προκαλούνται λόγω του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, το πλάτος του πυλώνα μεταξύ των σηράγγων και την κρίσιμη τιμή αυτού, τη σχετική θέση μεταξύ των σηράγγων και τέλος, τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες του περιβάλλοντος γεωυλικού.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά και ενδεικτικά σχετικές έρευνες οι οποίες έχουν διεξαχθεί και μελετούν το συγκεκριμένο φαινόμενο, ενώ επίσης περιλαμβάνονται ορισμένα παραδείγματα πραγματικών περιστατικών διάνοιξης δίδυμων σηράγγων, τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την εκσκαφή και οι τρόποι με τους οποίους αυτά αντιμετωπίστηκαν.

2.2. Σχετικές Έρευνες

2.2.1. Ghabousi J., Ranken R.E., 1977

Οι Ghabousi J. και Ranken R.E. (1977) στην έρευνά τους διεξάγουν μια σειρά από διδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας κυρίως γραμμικώς ελαστικά μοντέλα, προκειμένου να μελετήσουν τη συμπεριφορά ενός συστήματος που αποτελείται από δύο παράλληλες και γειτονικές σήραγγες. Οι σημαντικότερες παράμετροι οι οποίες λαμβάνονται υπόψη είναι το βάθος των σηράγγων, το πλάτος του πυλώνα που παρεμβάλλεται μεταξύ τους, οι συνθήκες υποστήριξης και η αλληλουχία της εκσκαφής των δύο σηράγγων. Τα κύρια μεγέθη που εξετάζονται στο εν λόγω σύστημα είναι οι τάσεις

περιμετρικά των σηράγγων και κυρίως στην περιοχή του πυλώνα, οι μετακινήσεις στο τοίχωμα των σηράγγων και οι δυνάμεις στην επένδυση.

Οι αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων υποδεικνύουν ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο παράλληλων δίδυμων σηράγγων επηρεάζει τη μέση τάση, τις μετακινήσεις στα τοιχώματα και τις δυνάμεις στην επένδυση των σηράγγων σε μία μικρή μόνο περιοχή γύρω από τον πυλώνα που χωρίζει τις σήραγγες, ενώ αυτά τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης μειώνονται, όσο το πλάτος του πυλώνα αυξάνεται.

Διαπιστώνεται ακόμη ότι καθώς το πλάτος του πυλώνα μειώνεται, υπάρχει μια σταδιακή αύξηση των κατακόρυφων τάσεων στον πυλώνα. Αυτή η αύξηση, όμως, συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση των οριζόντιων τάσεων. Κατά συνέπεια, η διεκτροπική τάση μένει σχεδόν ανεπηρέαστη από το πλάτος του πυλώνα. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων καταλήγουν ακόμη στο συμπέρασμα, ότι για μεγέθη πλατών πυλώνα από 2D και άνω, οι σήραγγες συμπεριφέρονται ως αυτόνομες και το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης σταματά. Τέλος, γίνεται σαφές ότι η κατασκευή μιας σήραγγας παράλληλης και γειτονικής σε μία άλλη, προϋπάρχουσα σήραγγα, προκαλεί επιπρόσθετες μετακινήσεις και δυνάμεις στην επένδυση της προϋπάρχουσας.

2.2.2. Adachi T., Kimura M., Osada H., 1993

Οι Adachi T., Kimura M. & Osada H. (1993), διενεργούν μια σειρά από δοκιμές μικρής κλίμακας προκειμένου να διερευνήσουν τη μηχανική συμπεριφορά, σε διδιάστατες συνθήκες, αβαθών, δίδυμων σηράγγων σε αμμώδες έδαφος. Κατά τη διάρκεια της μελέτης καταγράφονται οι μετατοπίσεις, καθώς επίσης η πίεση του υπερκείμενου εδάφους στην επένδυση των σηράγγων. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στη συμπεριφορά του περιβάλλοντος εδάφους και στις πιέσεις που υφίσταται η προϋπάρχουσα σήραγγα, λόγω της διάνοιξης της – γειτονικής σε αυτή – δεύτερης σήραγγας. Μελετάται ακόμη, η σχετική θέση των δύο σηράγγων ούτως ώστε να βελτιστοποιηθεί η τοποθέτησή τους. Οι παράμετροι οι οποίες λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση είναι το πάχος των υπερκείμενων γαιών και η απόσταση μεταξύ των δίδυμων σηράγγων.

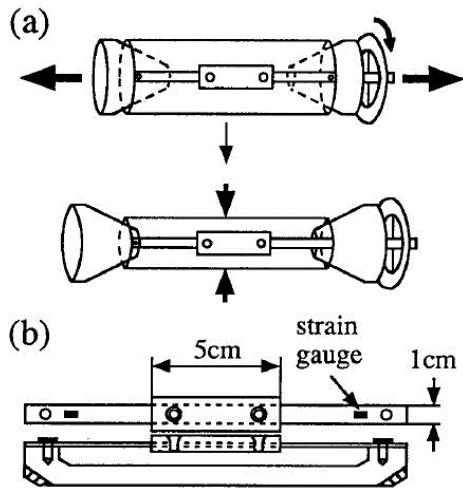
Στα πλαίσια της έρευνας, υιοθετούνται οι ακόλουθες απλουστεύσεις και παραδοχές:

- i. Παρόλο που η διάνοιξη σηράγγων αποτελεί τριδιάστατο πρόβλημα και το πραγματικό έδαφος είναι ετερογενές και ανισότροπο στη φύση, οι διδιάστατες δοκιμές διεξάγονται υπό συνθήκες ομοιογενούς εδάφους.
- ii. Στις δοκιμές το έδαφος προσομοιώνεται εγκαθιστώντας διάταξη ελεγχόμενου κλεισίματος με δύο διαμέτρους στο οποίο δεν υπάρχει συνοχή, η γωνία εσωτερικής τριβής είναι 30° και το οποίο ανταποκρίνεται σε αμμώδες έδαφος.
- iii. Η εκσκαφή προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας συσκευές δύο μειούμενων διαμέτρων, εξ αρχής τοποθετημένες στο έδαφος.

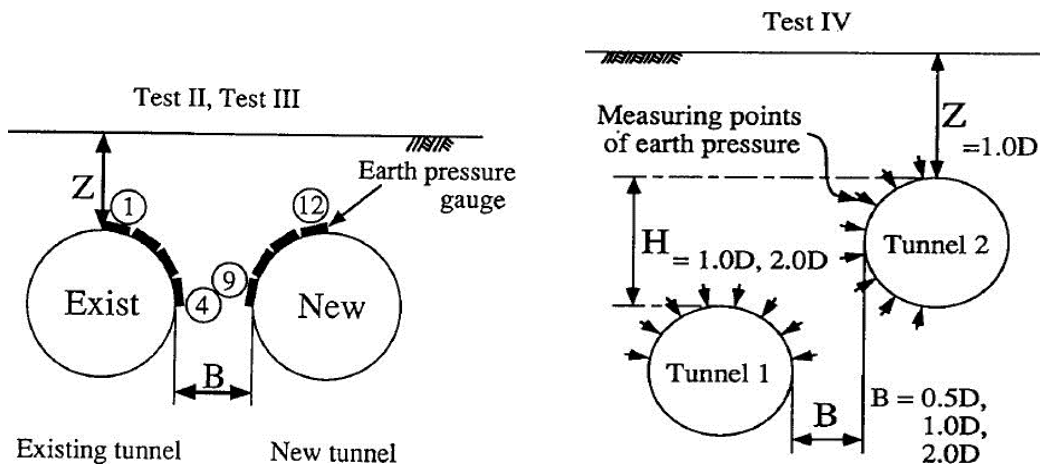
Η συσκευή έχει κυκλικό σχήμα, με αρχική διάμετρο $D = 13\text{cm}$, ενώ στην περιφέρειά της είναι τοποθετημένες 16 πλάκες ίδιου πλάτους όπου κάθε μία από αυτές λειτουργεί ως μετρητής της πίεσης των γαιών (Σχήμα 2.2-1).

Τα προβλήματα της αλληλεπίδρασης διερευνώνται με τη χρήση δύο τέτοιων συσκευών. Για τη μελέτη του φαινομένου πραγματοποιούνται τέσσερα είδη δοκιμών, με την πρώτη (Test I) να αναφέρεται στην εκσκαφή μονής σήραγγας και τις υπόλοιπες τρεις (Test II, III, IV) στην εκσκαφή δίδυμης σήραγγας. Οι δοκιμές πραγματοποιούνται υπό συνθήκες οριζόντιας επιφάνειας του εδάφους, επιλέγοντας αναλόγως το ύψος των υπερκειμένων γαιών, Z (0.5D, 1.0D, 2D και 4.0D) και την απόσταση B (0.5D, 1.0D και 2.0D) μεταξύ των σηράγγων, ως μεταβλητές. Άλλοτε (Test IV) μεταβάλλεται η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των σηράγγων μετρώντας ως προς τις στέψεις ($H = 1.0D$ και $2.0D$), στην περίπτωση διάνοιξης σηράγγων σε διαφορετικό επίπεδο (Σχήμα 2.2-2).

Οι Adachi T., Kimura M. & Osada H. (1993) επισημαίνουν ότι η αρχική πίεση γαιών που δρα στις σήραγγες ήταν μεγαλύτερη από την πίεση των υπερκειμένων γαιών, καθότι υπήρξε συγκέντρωση τάσεων λόγω της τοποθέτησης σχετικά δύσκαμπτης συσκευής προσομοίωσης των σηράγγων εκ των προτέρων.



Σχήμα 2.2-1: Σχηματικό διάγραμμα της συσκευής μειούμενης διαμέτρου, προς προσομοίωση της εκσκαφής της σήραγγας και του μετρητή της πίεσης των γαιών (αριστερά) και σήραγγα κυκλικής διατομής με τη χρησιμοποίηση συσκευής μειούμενης διαμέτρου (δεξιά) (Adachi T., Kimura M. & Osada H., 1993).

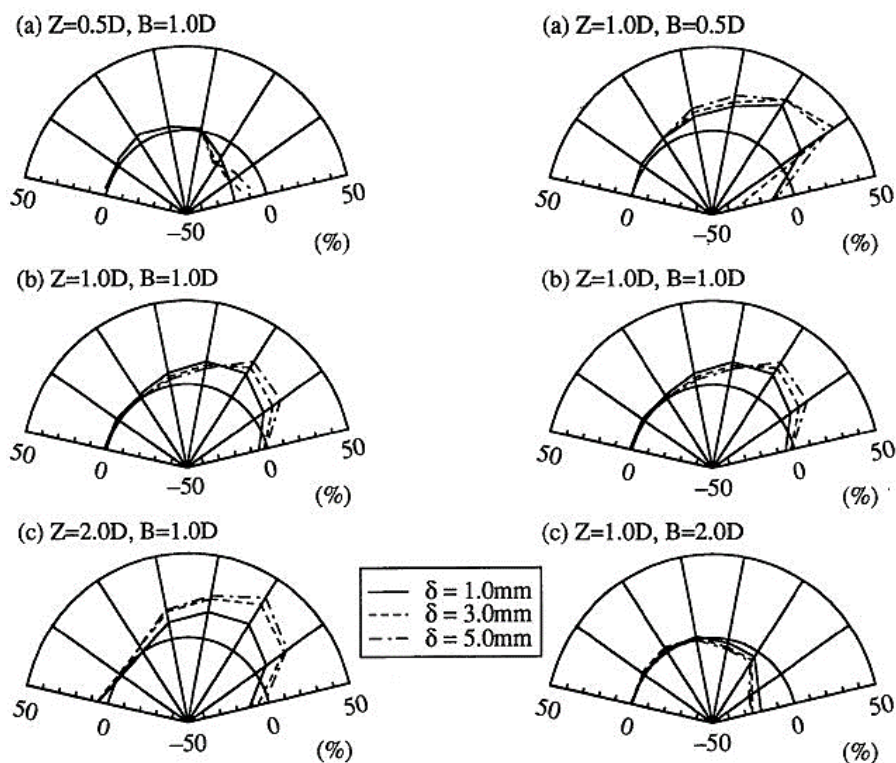


Σχήμα 2.2-2: Συνθήκες δοκιμής και παράμετροι Z & B (αριστερά) και H (δεξιά) (Adachi T., Kimura M. & Osada H., 1993).

Ενδεικτικά στη συνέχεια παρατίθενται αποτελέσματα από τη δοκιμή II (Test II), η οποία πραγματοποιήθηκε με σκοπό να διερευνηθεί η ανακατανομή της πίεσης των γαιών στην προϋπάρχουσα σήραγγα λόγω της εκσκαφής της νέας σήραγγας.

Στο Σχήμα 2.2-3 (αριστερά) παρουσιάζεται η – κανονικοποιημένη ως προς την αρχική πίεση – ανακατανομή της πίεσης στην άνω ημικυκλική περιφέρεια της υφιστάμενης σήραγγας, σε τρία στάδια σύγκλισης της νέας σήραγγας ($\delta = 1\text{mm}, 3\text{mm}$ και 5mm), για μεταβολή του ύψους των υπερκειμένων γαιών ($Z = 0.5D, 1.0D$ και $2.0D$), και πλάτος πυλώνα σταθερό ($B = 1.0D$). Ο εσωτερικός κύκλος αντιστοιχεί στην αρχική κατανομή της πίεσης, κατά συνέπεια η προς τα έξω απόκλιση από τον κύκλο υποδηλώνει αύξηση της

πίεσης, ενώ η προς τα μέσα απόκλιση μείωση της πίεσης. Αποτελεί τεχνικό ενδιαφέρον ότι η πίεση στην επένδυση από τη μεριά της νέας σήραγγας μειώνεται στην περίπτωση όπου $Z = 0.5D$, αλλά αυξάνεται όταν το πάχος των υπερκειμένων καθίσταται μεγαλύτερο ($Z = 1.0D$ και $2.0D$). Στο ίδιο σχήμα (δεξιά) φαίνονται τα αποτελέσματα από δοκιμές που διεξήχθησαν διατηρώντας σταθερό το ύψος των υπερκειμένων γαιών $Z = 1.0D$ και μεταβάλλοντας το πλάτος του πυλώνα ($B = 0.5D, 1.0D$ και $2.0D$). Παρατηρείται ότι καθώς μειώνεται η απόσταση μεταξύ των σηράγγων, η πίεση αυξάνεται.



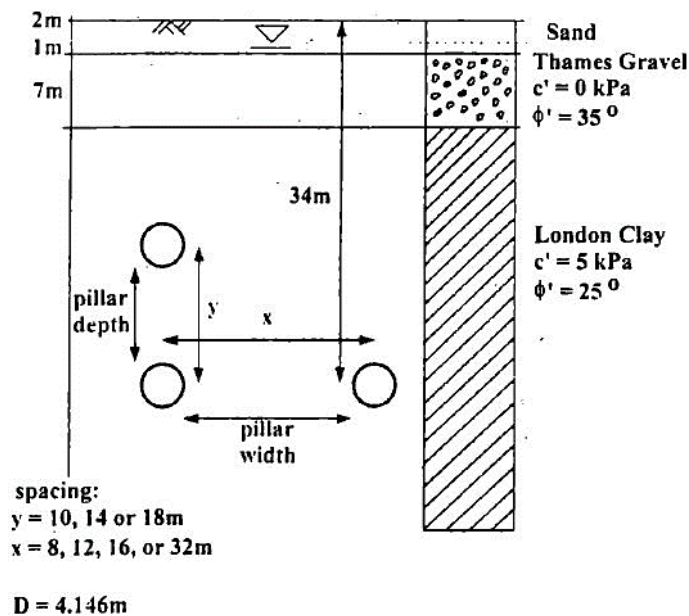
Σχήμα 2.2-3: Κανονικοποιημένη κατανομή πίεσης γαιών στην άνω ημικυκλική περιφέρεια της προϋπάρχουσας σήραγγας για: i) σταθερό πλάτος πυλώνα $B = 1.0D$ και μεταβαλλόμενο ύψος υπερκειμένων γαιών $Z = 0.5D, 1.0D$ & $2.0D$ (αριστερά), ii) σταθερό ύψος υπερκειμένων γαιών $Z = 1.0D$ και μεταβαλλόμενο πλάτος πυλώνα $B = 0.5D, 1.0D$ & $2.0D$ (δεξιά) (Adachi T., Kimura M. & Osada H., 1993).

Η έρευνα των Adachi T., Kimura M. & Osada H. (1993) καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η πίεση που προκαλείται σε μια προϋπάρχουσα σήραγγα λόγω της κατασκευής μιας νέας γειτονικής σήραγγας στο ίδιο επίπεδο, δεν εξαρτάται μόνο από το ύψος των υπερκειμένων γαιών, αλλά ακόμη από το πλάτος του πυλώνα μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, εάν το ύψος των υπερκειμένων γαιών παραμένει σταθερό, η αλληλεπίδραση μεταξύ των σηράγγων γίνεται περισσότερο εμφανής με τη μείωση του πλάτους του πυλώνα. Εάν αντίθετα, το πλάτος του πυλώνα παραμένει σταθερό, ο βαθμός αλληλεπίδρασης αυξάνεται με την αύξηση του πάχους των υπερκειμένων γαιών. Ακόμη, ο λόγος του ύψους των

υπερκειμένων γαιών είναι μια χρήσιμη παράμετρος για την αξιολόγηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Τέλος, οι Adachi T., Kimura M. & Osada H. (1993), επισημαίνουν ότι θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή όταν μια νέα σήραγγα εκσκάπτεται σε χαμηλότερο επίπεδο από μια ήδη προϋπάρχουσα σήραγγα.

2.2.3. Addenbrooke T.I., Potts D.M., 1996

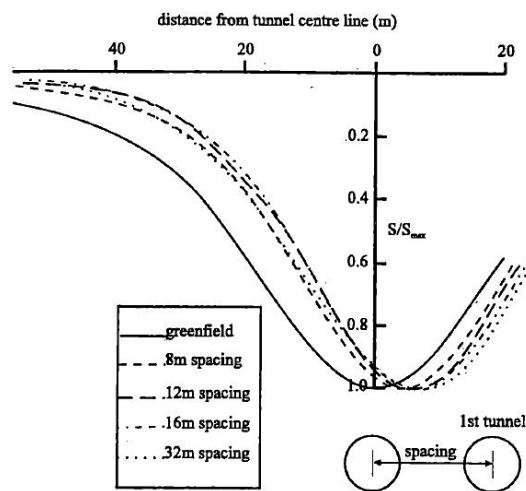
Οι Addenbrooke & Potts (1996) επισημαίνουν την αναγκαιότητα, κατά τη φάση του σχεδιασμού, της μελέτης της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων, καθώς επίσης τη συνολική τους απόκριση στην επιφάνεια του εδάφους. Για το λόγο αυτό εκτελούν διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ICFEP (Imperial College Finite Element Program). Επιλέγουν να αναλύσουν δύο διαφορετικές γεωμετρίες, με την πρώτη να αναφέρεται σε παράλληλες σήραγγες κατά την οριζόντια διεύθυνση (side by side) και τη δεύτερη σε παράλληλες σήραγγες κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (riggy back). Το μοντέλο αναφέρεται στη μη γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά της αργίλου του Λονδίνου, ενώ η απόσταση μεταξύ των σηράγγων κατά τη διάρκεια των αναλύσεων μεταβάλλεται (Σχήμα 2.2-4).



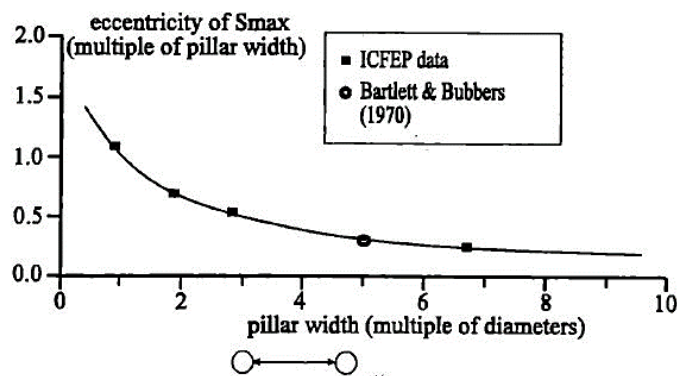
Σχήμα 2.2-4: Σχετικές γεωμετρίες δίδυμων σηράγγων και προφίλ του εδάφους (Addenbrooke & Potts, 1996).

Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων, στις παράλληλες σήραγγες κατά την οριζόντια διεύθυνση, το προφίλ των καθιζήσεων είναι παρόμοιο με αυτό που θα αναπτυσσόταν στο γεωστατικό πεδίο, αν δεν υπήρχε φαινόμενο αλληλεπίδρασης. Η κορυφή, όμως, της καμπύλης των καθιζήσεων είναι μετατοπισμένη προς τον άξονα της προϋπάρχουσας σήραγγας και κατ' επέκταση η αρχή της επαλληλίας δεν ισχύει για το προφίλ των εδαφικών καθιζήσεων (Σχήμα 2.2-5).

Διαπιστώνεται ακόμη ότι όταν το πλάτος του πυλώνα είναι μικρότερο από μια διάμετρο ($W < D$), η εκκεντρότητα της καμπύλης των καθιζήσεων (απόσταση της κορυφής της καμπύλης των καθιζήσεων από τον άξονα συμμετρίας των δίδυμων σηράγγων), τείνει σε μια τιμή ίση με το διπλάσιο του πλάτους του πυλώνα. Τέλος, η εκκεντρότητα, για πλάτη πυλώνα πολύ μεγαλύτερα από πολλαπλές διαμέτρους σηράγγων ($W \gg D$), μειώνεται σε ποσοστό λιγότερο από 25% (Σχήμα 2.2-6).



Σχήμα 2.2-5: Προφίλ καθιζήσεων πάνω από την δεύτερη (αριστερή) σήραγγα και πάνω από τις δίδυμες, παράλληλες κατά την οριζόντια διεύθυνση, σήραγγες (Addenbrooke & Potts, 1996).



Σχήμα 2.2-6: Εκκεντρότητα της καμπύλης των καθιζήσεων σε σχέση με το πλάτος του πυλώνα (Addenbrooke & Potts, 1996).

Οι Addenbrooke & Potts (1996) εξετάζουν ακόμη την επιρροή που ασκεί η εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας στην επένδυση της πρώτης – προϋπάρχουσας – σήραγγας. Λόγω της εκσκαφής της δεύτερης, η οριζόντια διάμετρος της πρώτης σήραγγας αυξάνεται σε μήκος, ενώ η κατακόρυφη μειώνεται. Όταν το πλάτος του πυλώνα είναι μικρότερο από μία διάμετρο, η επιμήκυνση της οριζόντιας διαμέτρου είναι λίγο μικρότερη από το 0.2% της αρχικής διαμέτρου. Αυτή η επιμήκυνση μειώνεται με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των σηράγγων. Αντίστοιχα, η βράχυνση της κατακόρυφης διαμέτρου είναι επίσης λίγο μικρότερη από το 0.2% της αρχικής, για το μικρότερο πλάτος πυλώνα που αναλύθηκε, ενώ και αυτή μειώνεται, με την αύξηση του πυλώνα.

Συμπεραίνεται, τέλος, ότι όταν το πλάτος του πυλώνα είναι μεγαλύτερο από επτά διαμέτρους σηράγγων ($W > 7D$), η διέλευση μια δεύτερης σήραγγας στο ίδιο αξονικό επίπεδο με την πρώτη σήραγγα, επηρεάζει σε αμελητέο βαθμό την υφιστάμενη επένδυση της προϋπάρχουσας σήραγγας.

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

Σύμφωνα με τους Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C. (1996), ο μηχανισμός των παραμορφώσεων των σηράγγων είναι εξαιρετικά πολύπλοκος. Το επί τόπου εντατικό πεδίο, η ποιότητα της βραχόμαζας, η αλληλουχία της εκσκαφής, ο χρόνος τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης και η γεωμετρία των σηράγγων αποτελούν σημαντικούς παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την παραμόρφωση των σηράγγων. Για το λόγο αυτό, παρουσιάζουν στοιχεία της έρευνάς τους η οποία αναφέρεται στο σχεδιασμό δίδυμων σηράγγων σε μαλακούς σχηματισμούς.

2.2.4.1. Πλάτος πυλώνα

Οι Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C. (1996) αναφέρουν ότι αν η απόσταση μεταξύ δίδυμων σηράγγων είναι μεγαλύτερη από δύο διαμέτρους των σηράγγων, τότε οι διατομές μπορούν να θεωρηθούν ως αυτόνομες κατασκευές, ενώ ο βαθμός της αλληλεπίδρασης μεταξύ τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το επί τόπου εντατικό πεδίο και την αντοχή της βραχόμαζας, σε σχέση με το πλάτος του πυλώνα και τη διάμετρο της σήραγγας.

Η μέση τάση που δέχεται ο πυλώνας (S_p), μπορεί να εκφραστεί ως:

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

Όπου:

- γ το ειδικό βάρος της βραχώμαζας
- H το ύψος των υπερκειμένων γαιών
- B το πλάτος της σήραγγας
- W το πλάτος του πυλώνα

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (σ_p), του πυλώνα, μπορεί να εκτιμηθεί ως:

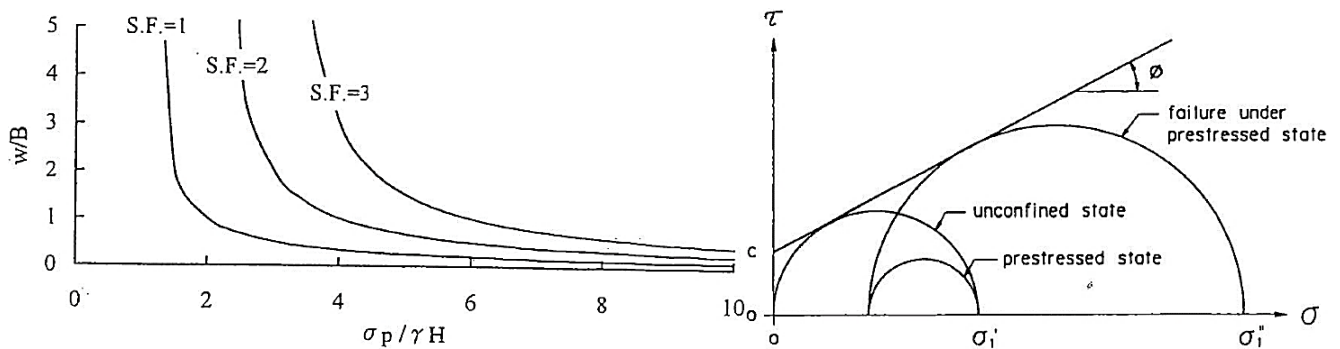
$$\sigma_p = \frac{2 c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

Όπου c και φ είναι η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής της βραχώμαζας, αντίστοιχα.

Με βάση τα παραπάνω, ο συντελεστής ασφαλείας είναι:

$$S.F. = \frac{S_p}{\sigma_p}$$

Το Σχήμα 2.2-7 δείχνει το λόγο W/B συναρτήσει της αντοχής του πυλώνα, κανονικοποιημένου ως προς την πίεση των υπερκειμένων γαιών. Ο συντελεστής ασφαλείας κυμαίνεται μεταξύ των τιμών ένα και τρία ($1 < FS < 3$). Κατά τη φάση του σχεδιασμού, ο συντελεστής ασφαλείας θα πρέπει να είναι επαυξημένος. Το κατάλληλο πλάτος πυλώνα είναι εκείνο για το οποίο η τάση που ασκείται στον πυλώνα είναι μικρότερη της αντοχής του σε μονοαξονική θλίψη. Αν το πλάτος αυτό είναι δύσκολο να επιτευχθεί λόγω περιορισμών που επιβάλλει η οδοποιία, τότε ο πυλώνας θα πρέπει να ενισχυθεί με συστήματα υποστήριξης, όπως με προεντεταμένα αγκύρια τα οποία τοποθετούνται και στις δύο πλευρές του πυλώνα. Με τον τρόπο αυτό, η αντοχή της βραχώμαζας στην περιοχή του πυλώνα από μονοαξονική, μετατρέπεται σε τριαξονική.



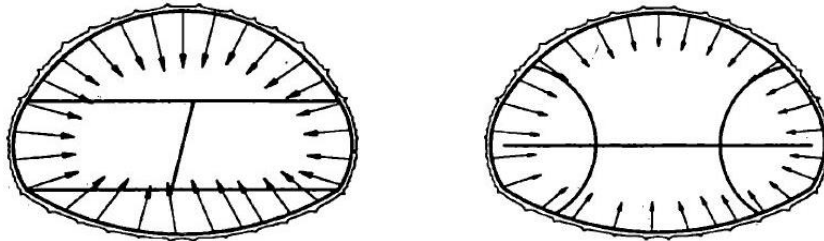
Σχήμα 2.2-7: Λόγος πλάτους πυλώνα συναρτήσει της αντοχής του, κανονικοποιημένης ως προς την πίεση των υπερκειμένων γαιών (αριστερά). Εντατική κατάσταση της βραχόμαζας γύρω από τις σήραγγες πριν και μετά την εφαρμογή των προεντεταμένων αγκυριών (δεξιά) (Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C., 1996).

2.2.4.2. Αλληλουχία εκσκαφής

Για μαλακό βράχο, οι Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C. (1996) επισημαίνουν ότι είναι σχεδόν αδύνατο να μην υπάρξει πλαστική ζώνη ύστερα από την ολοκλήρωση της εκσκαφής και ως εκ τούτου, η αλληλουχία επηρεάζει σημαντικά την παραμόρφωση. Διαφορετική αλληλουχία εκσκαφής σημαίνει διαφορετικό βαθμό αποτόνωσης της διατομής. Εκτιμάται ότι με ολομέτωπη εκσκαφή επιτυγχάνεται η ταχύτερη διαδικασία αποτόνωσης με συνέπεια την πρόκληση των μεγαλύτερων παραμορφώσεων. Σε μαλακό έδαφος είναι προτιμότερο να χωρίζεται το μέτωπο σε περισσότερες φάσεις εκσκαφής, ούτως ώστε να εξασφαλιστεί ευστάθεια της κατασκευής και περιορισμένη παραμόρφωση.

Η δημοφιλέστερη μέθοδος εκσκαφής μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο ομάδες. Στη μέθοδο ορθού μετώπου και βαθμίδας και στη μέθοδο πλευρικής προσβολής. Η μέθοδος πλευρικής προσβολής είναι κατάλληλη για μεγάλα ανοίγματα σε πτωχής ποιότητας βραχόμαζα, ειδικά για εκείνες τις διατομές όπου η παραμόρφωση θα πρέπει να ελέγχεται αυστηρά. Εμπειρικά, η εφαρμογή της δεύτερης μεθόδου εξασφαλίζει την ανάπτυξη των μισών μετακινήσεων σε σχέση με αυτές που θα αναπτύσσονταν με την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου. Η αριθμητική ανάλυση στο Σχήμα 2.2-8 παρουσιάζει δύο διαφορετικές αλληλουχίες εκσκαφής οι οποίες υποδεικνύουν μια σημαντική μείωση στις μετακινήσεις της οροφής για τη μέθοδο της πλευρικής προσβολής συγκριτικά με τη μέθοδο ορθού μετώπου και βαθμίδας.

Ακόμη, οι Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C. (1996) αναφέρουν ότι η ταυτόχρονη εκσκαφή δίδυμων σηράγγων είναι λιγότερο ευνοϊκή από την ξεχωριστή εκσκαφή, καθώς στην πρώτη περίπτωση, μπορεί να υπάρξει αιφνίδια χαλάρωση της περιβάλλουσας βραχώμαζας, η οποία δύναται να επιφέρει εκτεταμένες και μη ανατρεπτικές παραμορφώσεις.



Σχήμα 2.2-8: Μετακινήσεις που προκαλούνται λόγω της εκσκαφής διατομής 16m σε ζώνη διάρρηξης με τη μέθοδο ορθού μετώπου και βαθμίδας (αριστερά) και με τη μέθοδο πλευρικής προσβολής (δεξιά) (Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C., 1996).

2.2.4.3. Σύστημα υποστήριξης

Στην περίπτωση διάνοιξης δίδυμης σήραγγας σε μαλακό βράχο με υψηλές γεωστατικές πιέσεις, παρουσιάζεται διαρκής παραμόρφωση και συνθήκες σύνθλιψης. Κατά συνέπεια, τα παραδοσιακά εύκαμπτα μέτρα υποστήριξης, δύσκολα μπορούν να παρέχουν επαρκή φέρουσα ικανότητα και δυσκαμψία προκειμένου να εξασφαλίσουν ευστάθεια και ελεγχόμενη παραμόρφωση. Για παράδειγμα, τα αγκύρια βράχου είναι αποτελεσματικά ώστε να διαμορφώσουν συνθήκες φαινομένου θόλου – τοξωτής λειτουργίας, αν ο περιβάλλον βράχος είναι μέτρια ρωγματωμένος. Για εξαιρετικά ρωγματωμένο βράχο, είναι δύσκολο να διαμορφωθεί ένα μέσο με αγκύρια βράχου. Για λόγους ευστάθειας, είναι περισσότερο αποτελεσματικό να εφαρμόζεται δύσκαμπτη υποστήριξη, όπως επένδυση σκυροδέματος ή εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τον περιορισμό των παραμορφώσεων.

2.2.4.4. Πραγματικό περιστατικό

Περιγραφή του έργου

Δύο σήραγγες δίδυμες, μήκους 1.85km με άνοιγμα 16m και ύψος 11m εκσκάφθηκαν στην Ταιβάν ταυτόχρονα, τόσο από την πλευρά των βόρειων, όσο και από την πλευρά των νότιων στομιών. Στην πλευρά των βόρειων στομιών, οι δύο σήραγγες διανοίχθηκαν εντός σχηματισμού ο οποίος αποτελείται από μια αλληλουχία εναλλασσόμενων ψαμμιτών και

σχιστόλιθων οι οποίοι έχουν διεύθυνση περίπου κάθετα στον άξονα της σήραγγας και κλίση προς τα νοτιοδυτικά με 20° – 40° περίπου. Οι ψαμμίτες κυριαρχούν, με στρώματα πάχους 50cm, εναλλασσόμενα από στρώματα ιλυολίθων, πάχους 10cm.

Στην περιοχή εκτός των στομιών, στο κύριο τμήμα της χάραξης υπάρχει άρρηκτος βράχος, ο οποίος κυριαρχείται όμως από δύο συστήματα ασυνεχειών οι επιφάνειες των οποίων είναι συχνά αποσαθρωμένες. Στην πλευρά των νότιων στομιών, οι σήραγγες εκσκάφθηκαν εντός σχηματισμού με παρόμοια χαρακτηριστικά. Κατά την εκσκαφή, συναντήθηκε επίσης διατμημένη ζώνη οφειλόμενη στην ύπαρξη ρήγματος.

Προβλήματα κατά την εκσκαφή

Τόσο στη βόρεια, όσο και στη νότια σήραγγα η εκσκαφή πραγματοποιήθηκε σε τρεις φάσεις (top heading, bench, invert). Στην περιοχή της διαρρηγμένης ζώνης, αναπτύχθηκαν εκτεταμένες παραμορφώσεις, οι οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπέρασαν το 7% του ανοίγματος της εκσκαφής. Αμέσως μετά την παρατήρηση των εκτεταμένων συγκλίσεων της στέψης, τοποθετήθηκαν επιπρόσθετα αγκύρια βράχου και πραγματοποιήθηκαν τοπικές επισκευές στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ενώ τελικά οι εργασίες εκσκαφής αναστάλησαν προσωρινά. Η προσωρινή αυτή παύση των εργασιών είχε ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση του ρυθμού παραμόρφωσης.

Ύστερα από κάποιο χρονικό διάστημα, εγκαταστάθηκαν επιπλέον προεντεταμένα αγκύρια στη στέψη, με την κάθε σειρά αγκυρίων να απέχει από την άλλη 1.5m και η εκσκαφή ξανάρχισε μακριά από τη διατμημένη ζώνη. Παρόλα αυτά οι παραμορφώσεις συνεχίστηκαν. Για την ενίσχυση του πυλώνα, εγκαταστάθηκαν τρεις (3) σειρές αγκυρίων και η παραμόρφωση ελέγχθηκε αποτελεσματικά.

2.2.4.5. Σύνοψη

Σύμφωνα με τους Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C. (1996), τα πιο σημαντικά ζητήματα στο σχεδιασμό των σηράγγων είναι η ευστάθεια και ο έλεγχος των παραμορφώσεων. Σκοπός της υποστήριξης είναι η αποτροπή της αστοχίας και η διατήρηση της αντοχής της βραχόμαζας, στο μεγαλύτερο βαθμό που αυτό είναι εφικτό, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της σήραγγας. Ένα ασφαλές πλάτος πυλώνα, μια κατάλληλη αλληλουχία

εκσκαφής και μια έγκαιρη τοποθέτηση της υποστήριξης αποτελούν κρίσιμους παράγοντες στη συμπεριφορά των σηράγγων που διανοίγονται σε μαλακό βράχο.

Η αξιολόγηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων αποτελεί δύσκολη, αλλά εξαιρετικής σημασίας διαδικασία. Εάν το πλάτος του πυλώνα είναι αρκετά μεγάλο, το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μπορεί να αμεληθεί. Για δίδυμες, όμως, σήραγγες σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η εφαρμογή πλευρικής τάσης στην περιοχή της βραχώμαζας του πυλώνα προκειμένου να μετατραπεί η κατάσταση ανεμπόδιστης θλίψης σε κατάσταση τριαξονικής θλίψης, έχει μεγάλη συνεισφορά στη σταθεροποίηση της δίδυμης σήραγγας. Τέλος, οι εργασίες ανασκαφής κοστίζουν και απαιτούν περισσότερο χρόνο αν λαμβάνουν χώρα περαιτέρω παραμορφώσεις από αυτές που αναμένονται, ενώ επίσης η τμηματική εκσκαφή αποτελεί μια πιο ασφαλή λύση σε σχέση με την ολομέτωπη εκσκαφή και η μέθοδος της πλευρικής προσβολής σχεδόν επιβάλλεται σε σήραγγες μεγάλου ανοίγματος που διανοίγονται σε μαλακό βράχο.

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

Προκειμένου να διερευνήσουν τις πολλαπλές αλληλεπιδράσεις μεταξύ παράλληλων, μη κυκλικών, δίδυμων σηράγγων που κατασκευάζονται σε στιφρή άργιλο με τη νέα Αυστριακή μέθοδο (NATM), οι Ng, Lee & Tang (2004) πραγματοποιούν μια σειρά από συστηματικές, τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Ιδιαίτερη προσοχή δίνουν στη διαμήκη απόσταση μεταξύ των μετώπων των δίδυμων σηράγγων (L_T) και στο μηχανισμό με τον οποίο μεταφέρονται τα φορτία μεταξύ τους.

Προκύπτει ότι η απόσταση μεταξύ των μετώπων, L_T , έχει μεγαλύτερη επιρροή στις οριζόντιες μετακινήσεις σε σχέση με τις κατακόρυφες μετακινήσεις κάθε σήραγγας και επηρεάζει σημαντικά τη βράχυνση της οριζόντιας διαμέτρου των σηράγγων. Η μεταβολή του πλάτους του πυλώνα φαίνεται να αποτελεί γραμμική συνάρτηση της απόστασης L_T . Η θέση της μέγιστης καθίζησης αντισταθμίζεται από τον κεντρικό άξονα του πυλώνα και η αντιστάθμιση αυξάνεται με ένα εύρος τιμών L_T . Παρόλα αυτά, η τιμή της μέγιστης καθίζησης είναι ανεξάρτητη από την απόσταση L_T .

Όσο η απόσταση μεταξύ των μετώπων αυξάνεται, υπάρχει μια μεταφορά φορτίου από την επερχόμενη (δεξιά) σήραγγα, στην προπορευόμενη (αριστερή) σήραγγα, η οποία οδηγεί σε αύξηση της καμπτικής ροπής στην αριστερή σήραγγα, αλλά μείωση της καμπτικής ροπής στη δεξιά σήραγγα. Υπάρχει ακόμη μια αντίστοιχη αύξηση της αξονικής δύναμης στην αριστερή παρειά της αριστερής σήραγγας και μία μείωση της αξονικής δύναμης στη δεξιά παρειά της δεξιάς σήραγγας.

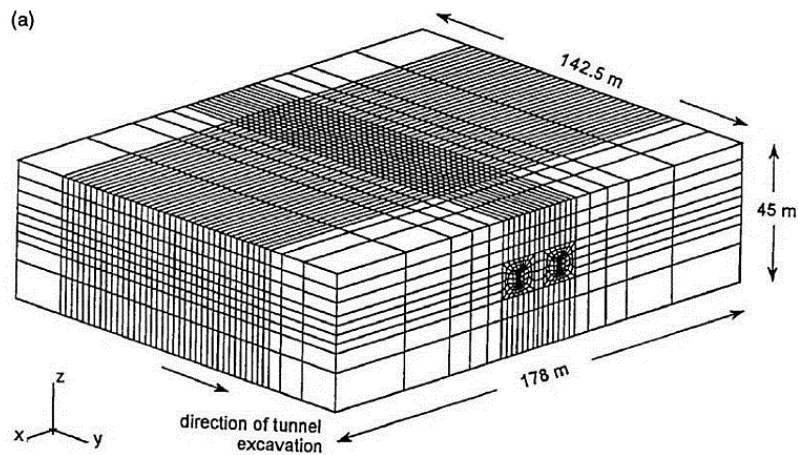
Η γεωμετρία των σηράγγων, η μέθοδος κατασκευής και οι συνθήκες του εδάφους που υιοθετήθηκαν στις τριδιάστατες προσομοιώσεις για αυτή την έρευνα είναι παρόμοιες με εκείνες της δοκιμαστικής σήραγγας Heathrow (New and Bowers 1994; Deane and Bassett 1995).

2.2.5.1. Τριδιάστατη μοντελοποίηση κατασκευής δίδυμων σηράγγων με τη μέθοδο NATM

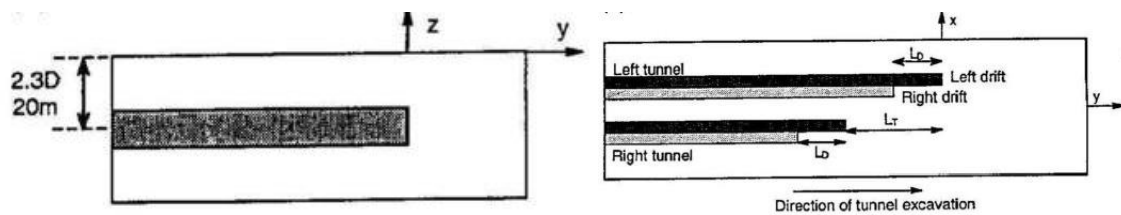
Γεωμετρία σήραγγας, διακριτοποίηση και αρχικές εδαφικές συνθήκες

Για τη μοντελοποίηση, χρησιμοποιείται το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus (Abaqus, Inc. 1998). Η σήραγγα είναι πεταλοειδούς διατομής, οριζόντιας διαμέτρου 9.2m και κατακόρυφης 7.9m. Η διάσταση της διακριτοποίησης στην πλευρική διεύθυνση (x) είναι 178m (περίπου 10.3D από τον άξονα συμμετρίας, όπου D είναι η ισοδύναμη διάμετρος μιας σήραγγας, ίση με 8.64m). Η διάσταση στην κατά μήκος διεύθυνση και το βάθος της διακριτοποίησης είναι 142.5m (16.5D) και 45m (5.2D), αντίστοιχα. Ο άξονας κάθε σήραγγας τοποθετείται σε βάθος 20m (2.3D) και το πλάτος του πυλώνα μεταξύ των δύο σηράγγων είναι 1.0D.

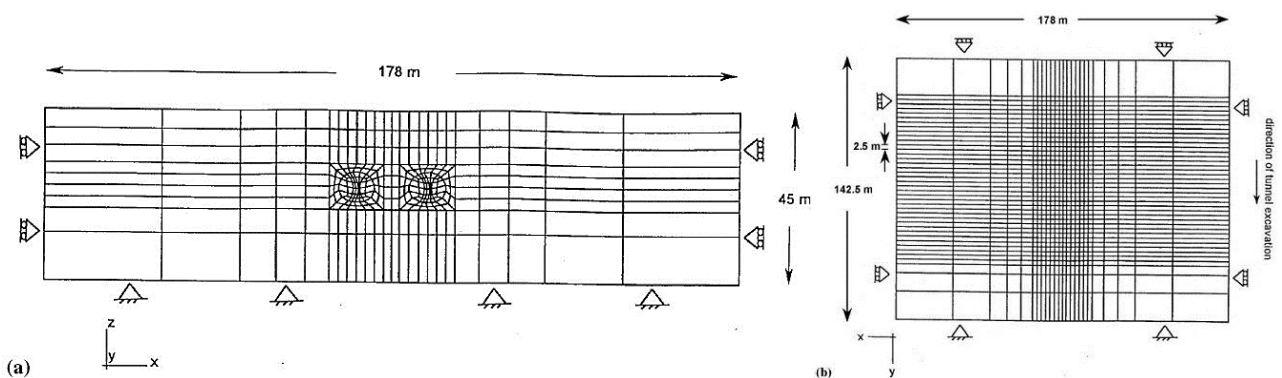
Το έδαφος αποτελείται από 5m χάλικες, το οποίο υπέρκειται της αργίλου του Λονδίνου πάχους 40m. Ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων είναι $K_0 = 1.5$, ενώ οι αναλύσεις προσομοιώνουν ρυθμό προχώρησης 2.5m ανά ημέρα, είτε για την αριστερή, είτε για τη δεξιά φάση της σήραγγας. Λαμβάνεται ακόμα υπόψη υδροστατική πίεση πόρων ίση με 400 kPa, η οποία δύναται να επηρεάσει το μέτωπο εκσκαφής, όχι όμως την άμεση υποστήριξη της σήραγγας, εφόσον το σκυρόδεμα μοντελοποιείται ως αδιαπέρατο υλικό.



Σχήμα 2.2-9: Τριδιάστατη άποψη της διακριτοποίησης των δίδυμων σηράγγων (Ng, Lee & Tang, 2004).



Σχήμα 2.2-10: Τυπική διατομή – πλάγια όψη από τη θετική διεύθυνση x (αριστερά). Κάτοψη (δεξιά). (Ng, Lee & Tang, 2004).



Σχήμα 2.2-11: Εγκάρσια τομή του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων των δίδυμων παράλληλων σηράγγων: (a) x-z επίπεδο, (b) x-y επίπεδο (Ng, Lee & Tang, 2004).

Διαδικασία προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων

Η αλληλουχία της εκσκαφής έχει ως εξής:

(i) εκσκαφή της αριστερής φάσης της αριστερής σήραγγας, (ii) εγκατάσταση επένδυσης σκυροδέματος στην αριστερή φάση της αριστερής σήραγγας, αφήνοντας ένα σταθερό ανυποστήρικτο μήκος $L_U = 5m$ πίσω από το μέτωπο, (iii) εκσκαφή της δεξιάς φάσης της αριστερής σήραγγας σε μία διαμήκη απόσταση από την αριστερή φάση, ίση με $L_D = 2.3D$ (δηλαδή 20m), (iv) εγκατάσταση επένδυσης σκυροδέματος στην εκτεθειμένη επιφάνεια (δηλαδή στη δεξιά φάση της αριστερής σήραγγας), αφήνοντας την ίδια ανυποστήρικτη απόσταση $L_U = 5m$, (v) εκσκαφή της αριστερής φάσης της δεξιάς σήραγγας σε απόσταση L_T πίσω από το μέτωπο της αριστερής φάσης της πρώτης σήραγγας, (vi) εγκατάσταση της επένδυσης του σκυροδέματος στην αριστερή φάση της δεξιάς σήραγγας, αφήνοντας ανυποστήρικτη απόσταση $L_U = 5m$, (vii) εκσκαφή της δεξιάς φάσης της δεξιάς σήραγγας σε απόσταση $L = 2.3D$ πίσω από το μέτωπο της αριστερής φάσης της δεξιάς σήραγγας, (viii) εγκατάσταση της επένδυσης σκυροδέματος στη δεξιά φάση της δεύτερης σήραγγας, αφήνοντας την ίδια απόσταση L_U των 5m, (ix) επανάληψη των βημάτων (i) έως (viii), μέχρι να ολοκληρωθεί η εκσκαφή των δύο σηράγγων.

Στα πλαίσια αυτής της έρευνας, πέντε διαφορετικές διαμήκεις αποστάσεις μεταξύ των μετώπων των σηράγγων μελετήθηκαν και αναλύθηκαν (δηλαδή $L_T = 0D, 0.6D, 1.2D, 2.3D$ και $3.5D$) μεταξύ της αριστερής (πρώτης) και της δεξιάς (δεύτερης) σήραγγας. Ως σύγκριση σε ορισμένα αποτελέσματα οι Ng, Lee & Tang (2004) χρησιμοποιούν την έρευνα των Tang et al. (1999) και Tang (2001).

Εδαφικές παράμετροι

Οι χάλικες και η άργιλος του Λονδίνου μοντελοποιήθηκαν ως ισότροπα και ανισότροπα ελαστικά – απολύτως πλαστικά υλικά με το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Drucker – Prager (Abaqus, Inc. 1998), αντίστοιχα. Το κριτήριο αστοχίας Drucker – Prager, ορίζεται ως εξής:

$$F = t - p' \tan \beta - d' = 0$$

Όπου t είναι η διεκτροπική τάση, p' η ελάχιστη κύρια τάση, β η γωνία τριβής και d' η συνοχή.

Στον Πίνακα 2.2-1 παρατίθενται οι παράμετροι των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

Πίνακας 2.2-1: Παράμετροι των υλικών που υιοθετήθηκαν στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Ng, Lee & Tang, 2004).

	Taplow Gravel	London Clay	Shotcrete
Saturated density (kN/m^3)	20	20	24
Void ratio	0.4	1.0	na
Coefficient of permeability (m/s)	1×10^{-4}	1×10^{-9}	na
K_0	0.43	1.5	na
E_v' or Young's modulus, E' (kPa)	7.5×10^4	$7500 + 3900z^a$	3.0×10^7
E_h'	na	$1.6E_v'$	na
Poisson's ratio, μ_{vh}' or μ'	0.2	0.125	0.3
Poisson's ratio, μ_{hh}'	na	0.125	na
Shear modulus, G_{vh}	na	$0.44E_v'$	na
Frictional parameter, β' ($^\circ$)	54.8 ($\phi' = 30^\circ$)	40.6 ($\phi' = 22^\circ$)	na
Cohesion parameter, d' (kPa)	0.0 ($c' = 0$ kPa)	14.8 ($c' = 5$ kPa)	na
Angle of dilation, ν' ($^\circ$)	17.5	11.0	na

Note: na, not available.

^a z , depth below the ground surface (in metres).

2.2.5.2. Αποτελέσματα της έρευνας

Οι Ng, Lee & Tang (2004) καταλήγουν σε μια σειρά από αποτελέσματα τα οποία αφορούν στις παραμορφώσεις του περιβάλλοντος στις σήραγγες, εδάφους, στις παραμορφώσεις και μετακινήσεις των σηράγγων, στις καθιζήσεις, στις ροπές κάμψης και στις αξονικές δυνάμεις της επένδυσης των σηράγγων.

Εδαφικές παραμορφώσεις περιμετρικά των δίδυμων σηράγγων

Το Σχήμα 2.2-12 (a – c) δείχνει τα διανύσματα μετατόπισης περιμετρικά των δίδυμων σηράγγων σε τρεις διαφορετικές διατομές για $L_T = 0D$ (δηλαδή δεν υπάρχει απόσταση μεταξύ των μετώπων των σηράγγων). Στο μέτωπο εκσκαφής (τομή A – A στη θέση $y = 0$) τα διανύσματα μετατοπίσεων είναι περίπου συμμετρικά γύρω από τον κεντρικό άξονα του πυλώνα μεταξύ των σηράγγων (Σχήμα 2.2-12 – a).

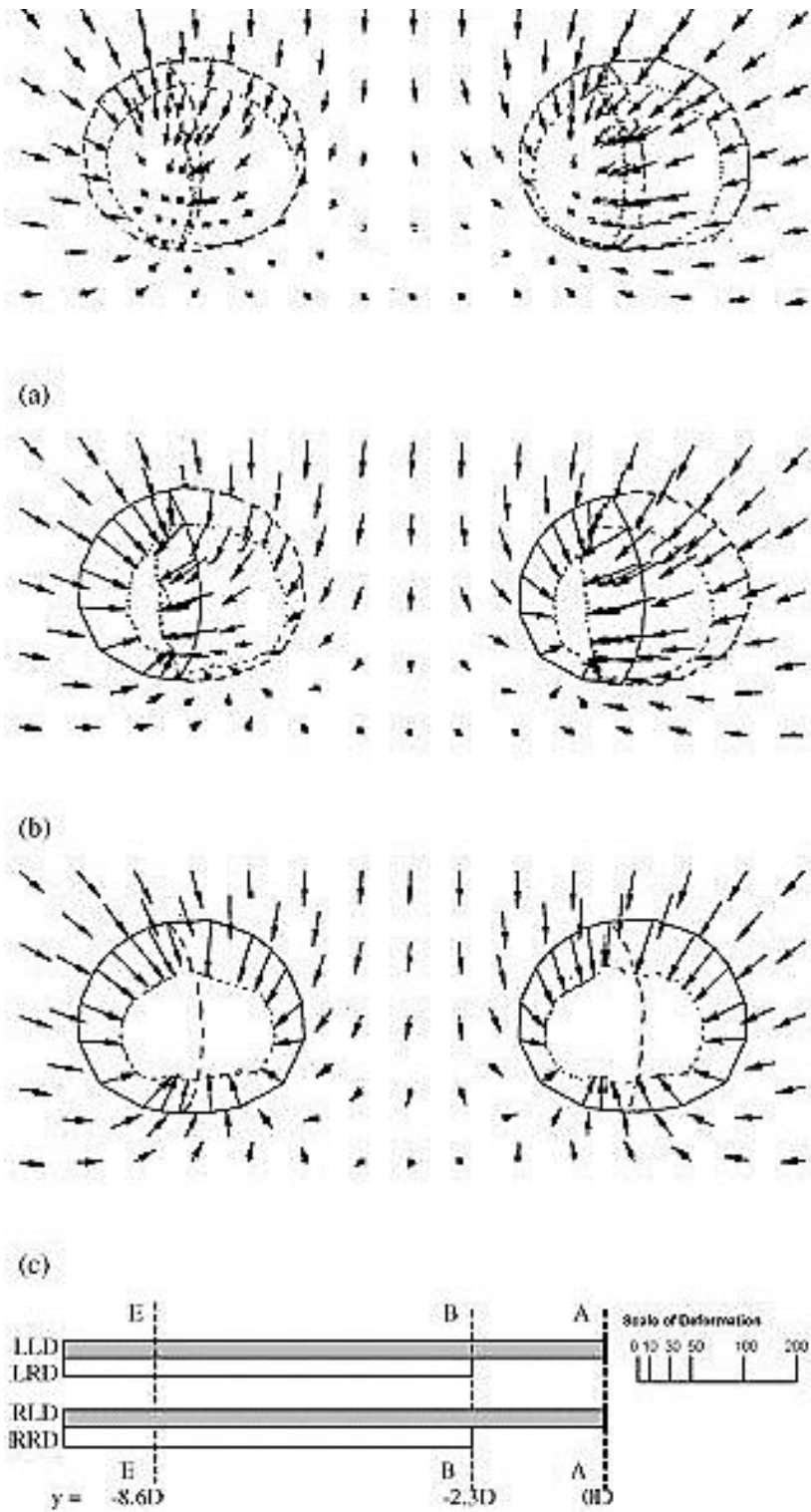
Ακόμη, καθίσταται σαφές ότι το έδαφος κινείται προς την αριστερή φάση κάθε σήραγγας, ως αποτέλεσμα της αποτόνωσης των τάσεων λόγω της εκσκαφής, εκτός από το έδαφος που τοποθετείται στην περιοχή του πυλώνα, όπου στην ουσία αυτό παραμορφώνεται κατακόρυφα προς τα κάτω με μικρή οριζόντια μετατόπιση, λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των σηράγγων.

Η αλληλεπίδραση οδηγεί επίσης σε περίπου 50% μεγαλύτερη πλευρική παραμόρφωση (δηλαδή 28.5mm ή 0.33%D) στην αριστερή παρειά της αριστερής σήραγγας από ότι σε αυτήν (15.5mm ή 0.18%D) της δεξιάς σήραγγας. Αντιθέτως, η πλευρική παραμόρφωση στη δεξιά παρειά της δεξιάς σήραγγας είναι παραπάνω από διπλάσια από αυτή στη δεξιά παρειά της αριστερής σήραγγας. Αυτό υποδεικνύει ότι η αλληλεπίδραση των δίδυμων σηράγγων οδηγεί σε μια μείωση στις πλευρικές μετακινήσεις μεταξύ τους.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2-12 b και στο Σχήμα 2.2-12 c παρόμοια χαρακτηριστικά παραμόρφωσης παρατηρούνται τόσο στη διατομή B – B (στα 20m, $y = -20m$, πίσω από το μέτωπο της αριστερής φάσης κάθε σήραγγας), όσο και στη διατομή E – E (στα 75m, $y = -75m$ ή $-8.6D$, πίσω από το μέτωπο της αριστερής φάσης κάθε σήραγγας, που προσεγγίζει συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης).

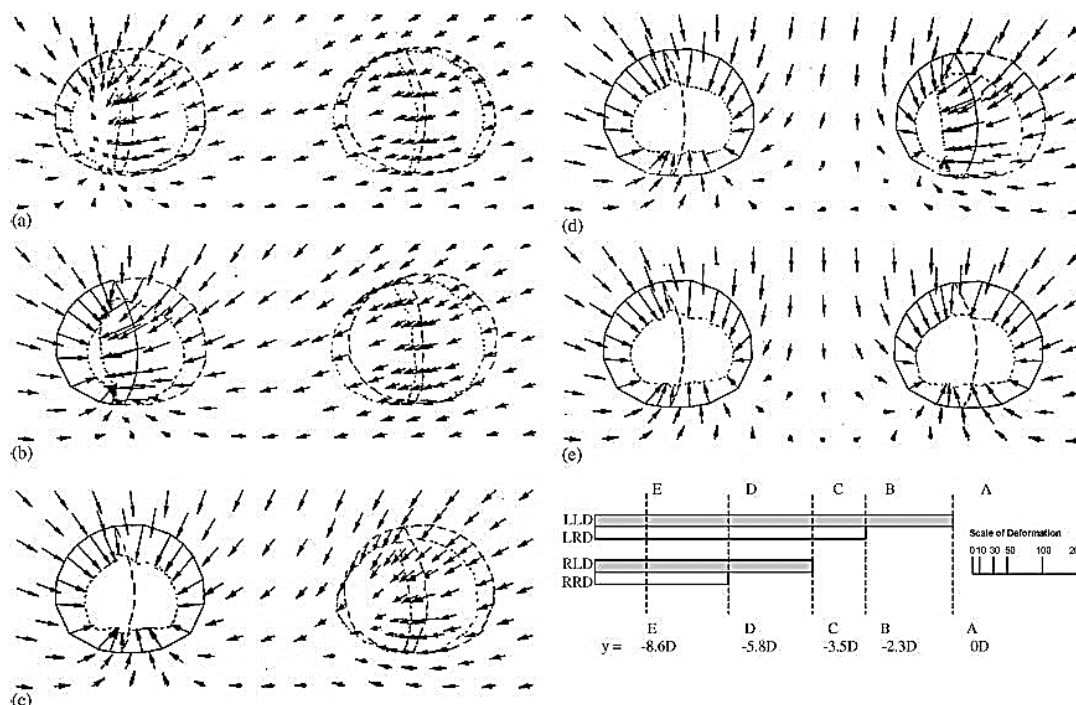
Οι Ng, Lee & Tang (2004) επισημαίνουν ακόμη την αύξηση των 43.6mm στο πλάτος του πυλώνα, ως αποτέλεσμα εκ των έσω μετακινήσεων της τάξεως των 20.7mm και 22.9mm στην παρειά της αριστερής και της δεξιάς σήραγγας, αντίστοιχα.

Συγκριτικά με τις αντίστοιχες προς τα μέσα μετακινήσεις της παρειάς μιας παρόμοιας μονής σήραγγας που κατασκευάστηκε με τη μέθοδο NATM σε αδιατάρακτο πεδίο (Tang, 2001), η κατασκευή και η αλληλεπίδραση των δίδυμων σηράγγων καταλήγουν σε 28% - 35% μείωση στις οριζόντιες μετακινήσεις κάθε σήραγγας.



Σχήμα 2.2-12: Παραμόρφωση στην περιφέρεια της σήραγγας σε διαφορετικά τμήματα για $L_T = 0D$: (a) στην $y = 0m$ ή $0D$ (τομή A – A)· στην $y = -20m$ ή $-2.3D$ (τομή B – B)· στην $y = -75m$ ή $-8.6D$ (τομή E – E, που προσεγγίζει συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης). LLD, αριστερή φάση της αριστερής σήραγγας· LRD, δεξιά φάση της αριστερής σήραγγας· RLD, αριστερή φάση της δεξιάς σήραγγας· RRD, δεξιά φάση της δεξιάς σήραγγας (Ng, Lee & Tang, 2004).

Το Σχήμα 2.2-13 (a – e) δείχνει τα διανύσματα των μετατοπίσεων περιμετρικά των σηράγγων σε πέντε διαφορετικές διατομές για $L_T = 30m$ ή $3.5D$ (δηλαδή η κατασκευή της δεξιάς σήραγγας υπολείπεται σε σχέση με την κατασκευή της αριστερής, για απόσταση $30m$). Στην τομή A – A ($y = 0D$), όλο το έδαφος μετακινείται προς την αριστερή φάση της αριστερής σήραγγας. Οι εδαφικές παραμορφώσεις στη δεξιά σήραγγα κυριαρχούνται από την οριζόντια συνιστώσα των διανυσμάτων, υποδεικνύοντας ότι η επίδραση της μείωσης της οριζόντιας τάσης στις μετακινήσεις του εδάφους είναι περισσότερο σημαντική (λόγω της μεγάλης τιμής του K_0) από ότι η επίδραση της μείωσης της κατακόρυφης τάσης, σε αντίθεση με την περίπτωση που φαίνεται στο Σχήμα 2.2-13 a. Όσο η απόσταση πίσω από την εκσκαμμένη αριστερή φάση της αριστερής σήραγγας αυξάνει από 0 σε $30m$ ($3.5D$), η κατακόρυφη συνιστώσα των διανυσμάτων μετατόπισης σταδιακά γίνεται όλο και περισσότερο σημαντική, ως αποτέλεσμα της κατασκευής της δεξιάς σήραγγας (Σχήμα 2.2-13 b, c και d). Στη διατομή E – E (η οποία προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης), τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης είναι σχεδόν συμμετρικά με τον κεντρικό άξονα του πυλώνα (Σχήμα 2.2-13 e). Τόσο οι οριζόντιες όσο και οι κατακόρυφες διάμετροι του ανοίγματος των δύο σηράγγων βραχύνονται λόγω της αποτόνωσης της τάσης και της αλληλεπίδρασης μεταξύ τους.



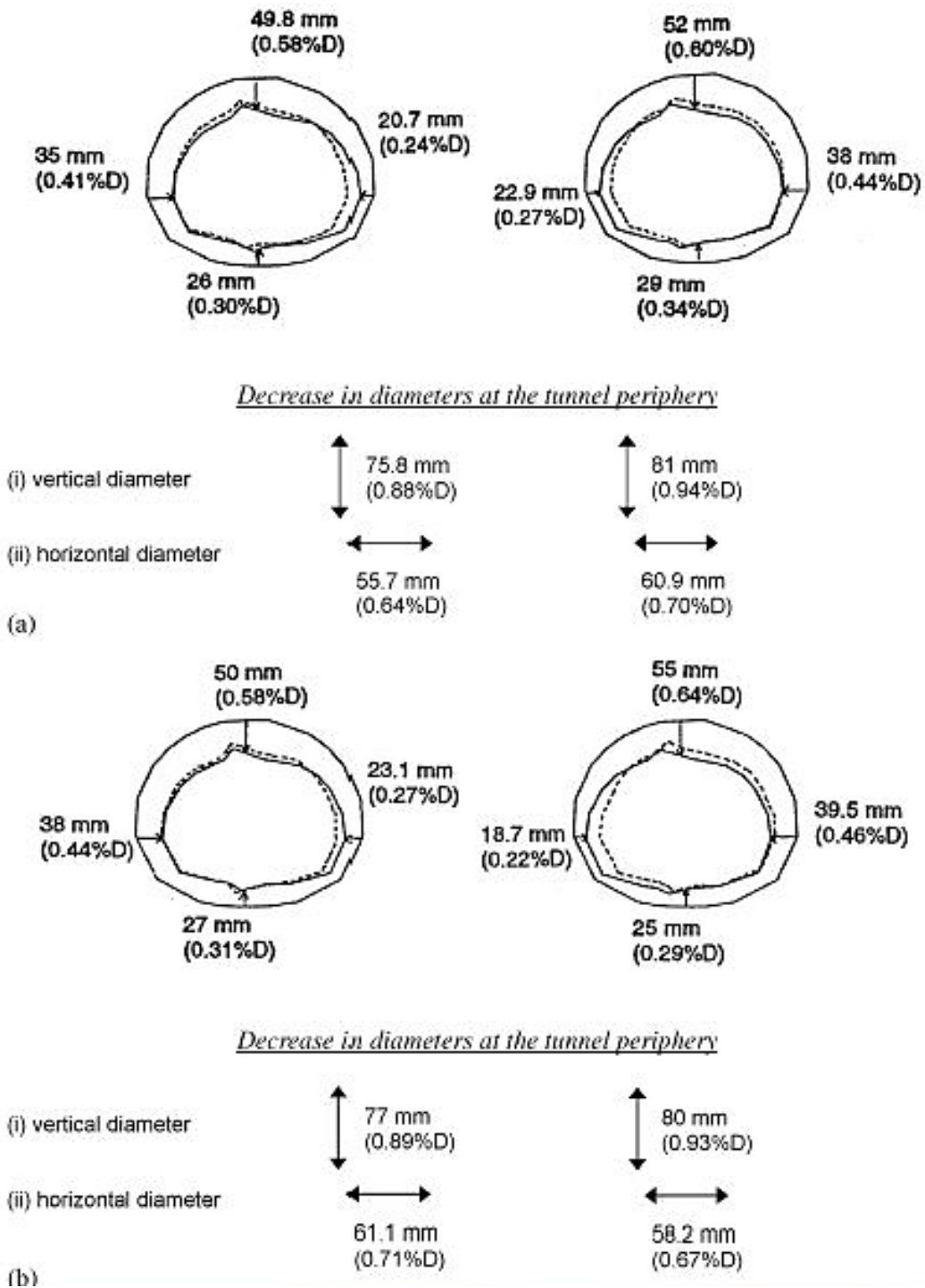
Σχήμα 2.2-13: Παραμόρφωση στην περιφέρεια της σήραγγας σε διαφορετικές διατομές για $L_T = 3.5D$: (a) στην $y = 0m$ ή $0D$ (τομή A – A) (b) στην $y = -20m$ ή $-2.3D$ (τομή B – B) (c) στην $y = -30m$ ή $-3.5D$ (τομή C – C) (d) στην $y = -50m$ ή $-5.8D$ (τομή D – D) (e) στην $y = -75m$ ή $-8.6D$ (τομή E – E, η οποία προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) (Ng, Lee & Tang, 2004).

Παραμορφώσεις και μετακινήσεις των δίδυμων σηράγγων

Το Σχήμα 2.2-14 a και το Σχήμα 2.2-14 b δείχνουν την παραμόρφωση στην περιφέρεια της σήραγγας στην τομή E – E για $L_T = 0\text{m}$ και 30m , αντίστοιχα. Η απόσταση L_T έχει μεγαλύτερη επιρροή στην οριζόντια παραμόρφωση στην παρειά, παρά στην κατακόρυφη μετακίνηση στη στέψη κάθε σήραγγας. Η πλευρική παραμόρφωση της αριστερής σήραγγας μακριά από τον πυλώνα αυξάνεται από 20.7mm για $L_T = 0\text{m}$ σε 23.1mm για $L_T = 30\text{m}$ (11.5% αύξηση), ενώ η πλευρική παραμόρφωση στη δεξιά παρειά της δεξιάς σήραγγας μειώνεται από 22.9mm σε 18.7mm όσο η απόσταση L_T αυξάνεται. Αντίθετα, οι κατακόρυφες μετακινήσεις στη στέψη φαίνονται να λιγότερο ευαίσθητες στην τιμή του L_T .

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2-14 υπάρχει μια μείωση στη διάμετρο στην περιφέρεια των σηράγγων, αλλά τα μεγέθη είναι διαφορετικά στην κατακόρυφη και οριζόντια διάμετρο. Η βράχυνση στην κατακόρυφη διάμετρο της αριστερής σήραγγας είναι 75.8mm (ή 0.88%D) και 77mm (ή 0.89%D), ενώ για τη δεξιά σήραγγα είναι 81mm (ή 0.94%D) και 80mm (ή 0.93%D) για $L_T = 0$ και 30m , αντίστοιχα. Η βράχυνση στην κατακόρυφη διάμετρο φαίνεται να είναι ανεξάρτητη του L_T . Αντίθετα, η απόσταση L_T έχει μεγαλύτερη επιρροή στη βράχυνση της οριζόντιας διαμέτρου των δύο σηράγγων. Για την αριστερή σήραγγα, η βράχυνση της οριζόντιας διαμέτρου αυξάνεται από 55.7mm (ή 0.64%D) για $L_T = 0\text{m}$ σε 61.1mm (ή 0.71%D) για $L_T = 30\text{m}$. Αυτό υποδεικνύει ότι ένα μέρος του φορτίου παραλαμβάνεται από την αριστερή σήραγγα όσο η απόσταση L_T αυξάνεται, καταλήγοντας σε μια αυξημένη μείωση στη διάμετρο της περιφέρειας της σήραγγας.

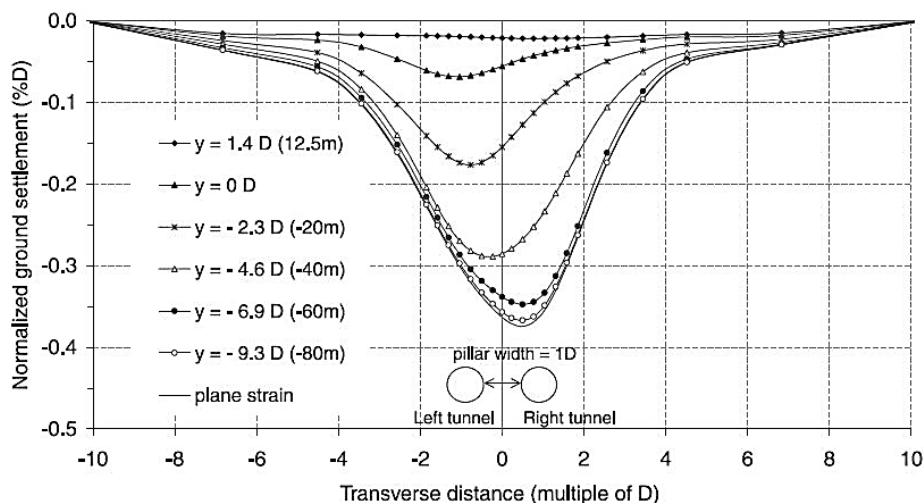
Τα παραπάνω συμφωνούν με μια μείωση στη βράχυνση της διαμέτρου δεξιάς σήραγγας από 60.9mm (ή 0.70%D) σε 58.2mm (ή 0.67%D) για $L_T = 0$ και 30m αντίστοιχα, δεδομένου ότι λιγότερο από το φορτίο μοιράζεται από τη δεξιά σήραγγα όσο το L_T αυξάνει. Η μεταφορά φορτίου από τη δεξιά σήραγγα στην αριστερή όσο το L_T αυξάνεται, επεξηγείται περαιτέρω και επαληθεύεται από τους Ng, Lee & Tang (2004), λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή των καμπτικών ροπών και αξονικών δυνάμεων στη συνέχεια.



Σχήμα 2.2-14: Σύγκριση των παραμορφώσεων στη διατομή Ε - Ε ($y = -8.6D$, που προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) για (a) $L_T = 0D$ και (b) $L_T = 3.5D = 30m$ (Ng, Lee & Tang, 2004).

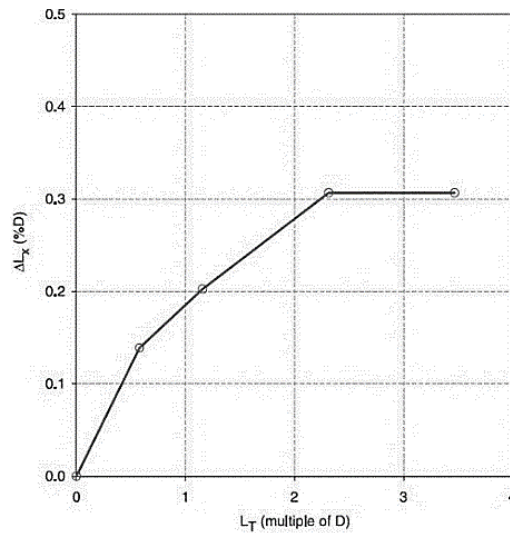
Επιφανειακές καθιζήσεις

Ως προς τις επιφανειακές καθιζήσεις, το Σχήμα 2.2-15 το οποίο παριστάνει τις εγκάρσιες επιφανειακές καθιζήσεις σε διάφορες διαμήκεις αποστάσεις κατά τη διεύθυνση y , για $L_T = 3.5D$ υποδεικνύει μια μετατόπιση της καμπύλης των καθιζήσεων από τα αριστερά προς τα δεξιά και η μέγιστη επιφανειακή καθίζηση αντισταθμίζεται στον κεντρικό άξονα του πυλώνα.



Σχήμα 2.2-15: Κανονικοποιημένες επιφανειακές καθιζήσεις σε διάφορες διαμήκεις αποστάσεις, για $L_T = 3.5D$ (Ng, Lee & Tang, 2004).

Ακόμη, το Σχήμα 2.2-16 δείχνει τη διακύμανση των καθαρών μετατοπίσεων (ΔL_x) της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης του εδάφους, για διάφορες τιμές L_T στη διατομή E – E. Η καθαρή μετατόπιση είναι η μετατόπιση L_x σε οποιαδήποτε τιμή L_T , αφαιρώντας τη μετατόπιση για $L_T = 0$. Η μετατόπιση για $L_T = 0$ λαμβάνεται ως μετατόπιση αναφοράς, καθώς είναι πολύ μικρή και αμελητέα. Γίνεται φανερό ότι η καθαρή μετατόπιση αυξάνεται προοδευτικά με την αύξηση της απόστασης L_T , αλλά προσεγγίζει μια σταθερή τιμή (32%D), όταν η απόσταση $L_T = 2.5D$ ή μεγαλύτερη. Το μέγεθος της μετατόπισης είναι ένας δείκτης του μεγέθους της μεταφοράς του φορτίου που σχετίζεται με την κατασκευή της γειτονικής παράλληλης σήραγγας. Όσο μικρότερη η μετατόπιση, τόσο πιο ομοιόμορφα κατανέμεται το φορτίο μεταξύ των δύο σηράγγων. Πιο συγκεκριμένα, για $L_T = 0$, όπου η μετατόπιση είναι η ελάχιστη, το φορτίο κατανέμεται σχεδόν ομοιόμορφα μεταξύ των σηράγγων. Από την άλλη μεριά, για $L_T = 2.5D$ ή μεγαλύτερο, περισσότερο φορτίο παραλαμβάνεται από την προπορευόμενη σήραγγα (αριστερή).

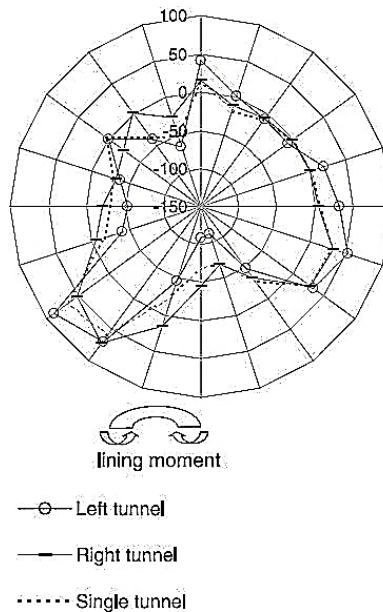


Σχήμα 2.2-16: Σχέση μεταξύ των καθαρών μετατοπίσεων καμπυλών επιφανειακής καθίζησης ($\Delta L_x = L_x$ μείον L_x από την ανάλυση δίδυμων σηράγγων με $L_T = 0$) στη διατομή E – E ($y = -8.6D$, που προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) (Ng, Lee & Tang, 2004).

Ροπές κάμψης στην επένδυση

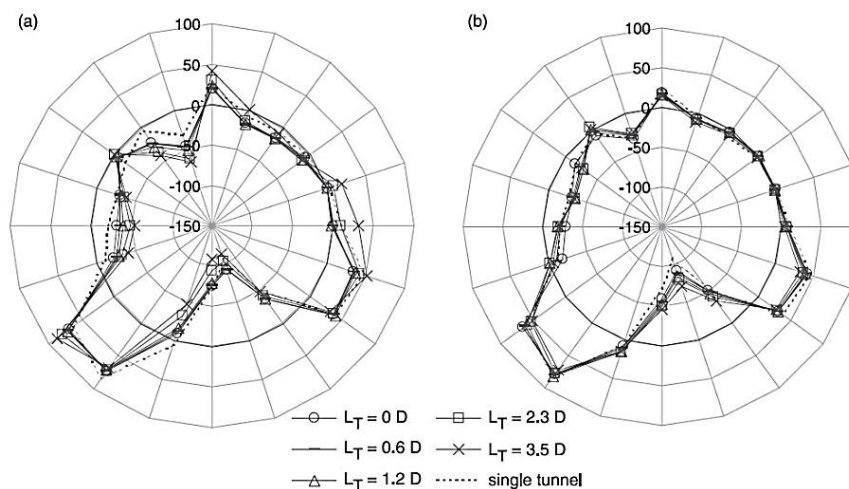
Το Σχήμα 2.2-17 δείχνει την κατανομή της ροπής κάμψης στη διατομή E – E στην επένδυση τόσο της αριστερής, όσο και της δεξιάς σήραγγας για $L_T = 30m = 3.5D$. Ακόμη, στο σχήμα συμπεριλαμβάνεται η ροπή κάμψης μιας μονής σήραγγας (Tang 2001), ως μέτρο σύγκρισης. Οι πραγματικές ιδιότητες του σκυροδέματος, όμως η ακαμψία, εξαρτώνται από το χρόνο και δε λαμβάνονται υπόψη στις παραμετρικές αναλύσεις.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, οι κατανομές των ροπών κάμψης είναι παρόμοιες και για τις δύο σήραγγες, ενώ οι μέγιστες και ελάχιστες ροπές λαμβάνουν χώρα στην αριστερή παρειά και το δάπεδο, αντίστοιχα. Το μέγεθος των ροπών κάμψης είναι μεγαλύτερο στην αριστερή από ότι στη δεξιά σήραγγα. Αυτό υποδεικνύει ότι η αριστερή σήραγγα φέρει μεγαλύτερο μέρος φορτίου σε σχέση με τη δεξιά σήραγγα, λόγω της μεγάλης απόστασης $L_T = 3.5D$. Η ομοιότητα μεταξύ των κατανομών των ροπών κάμψεως στην αριστερή και τη μονή σήραγγα, υποδηλώνει ότι η αριστερή σήραγγα, στην κατασκευή δίδυμων σηράγγων, ουσιαστικά συμπεριφέρεται ως μονή, λόγω της μεγάλης τιμής του L_T .



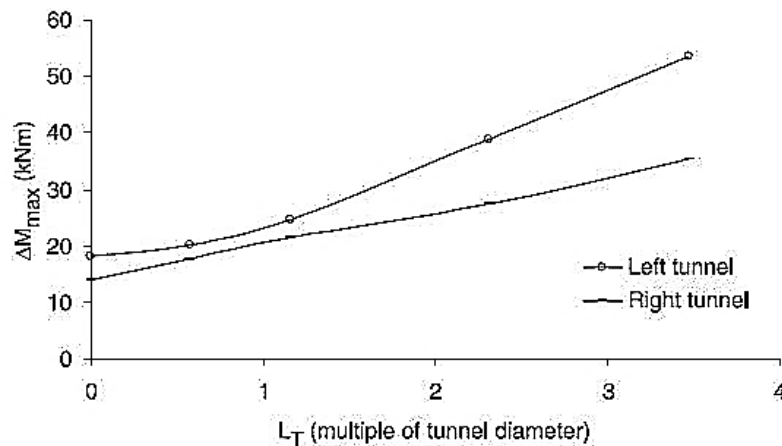
Σχήμα 2.2-17: Ροπή κάμψης (kN·m) στην επένδυση για τη διατομή E - E ($y = -8.6D$, η οποία προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης), για $L_T = 3.5D$ (Ng, Lee & Tang, 2004).

Στο Σχήμα 2.2-18 φαίνονται οι διακυμάνσεις της ροπής κάμψης στην αριστερή και δεξιά σήραγγα στη θέση $y = -75m = -8.6D$, για διαφορετικές αποστάσεις L_T . Γίνεται αντιληπτό ότι το μέγεθος της ροπής κάμψης στην επένδυση της αριστερής σήραγγας αυξάνει, με την αύξηση του L_T . Οι ροπές κάμψης στο δάπεδο και στην περιοχή κοντά στη δεξιά παρειά είναι οι πιο εμφανείς. Από την άλλη μεριά, η επιρροή του L_T στην κατανομή των ροπών κάμψεως της δεξιάς σήραγγας εντοπίζεται κυρίως στην περιοχή του δαπέδου. Οι προσαυξήσεις στις υπόλοιπες περιοχές γύρω από το άνοιγμα της δεξιάς σήραγγας δεν είναι πολύ σημαντικές.



Σχήμα 2.2-18: Διακύμανση της ροπής κάμψης (kN·m) στη επένδυση για τη διατομή E - E ($y = -8.6D$, που προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) για διαφορετικές τιμές L_T : (a) αριστερή σήραγγα (b) δεξιά σήραγγα (Ng, Lee & Tang, 2004).

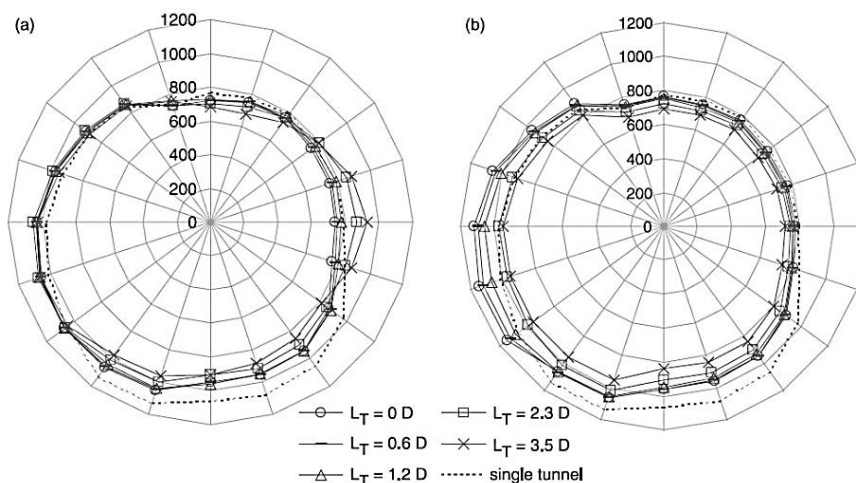
Το Σχήμα 2.2-19 δείχνει τις διακυμάνσεις της μέγιστης στοιχειώδους ροπής κάμψης στην επένδυση, συναρτήσει της απόστασης L_T . Όπως είναι αναμενόμενο, η μέγιστη ροπή κάμψης είναι ίδια και για τις δύο σήραγγες όταν $L_T = 0$, κάτι που υποδηλώνει ίση κατανομή του φορτίου. Όσο η απόσταση L_T αυξάνεται, υπάρχει μια μεταφορά φορτίου από τη δεξιά σήραγγα στην αριστερή, η οποία οδηγεί σε μία αύξηση στη ροπή κάμψης στην αριστερή σήραγγα, αλλά μια μείωση στη ροπή κάμψης στη δεξιά σήραγγα.



Σχήμα 2.2-19: Διακύμανση της μέγιστης ροπής κάμψης (M_{max} = υπολογισμένη ροπή κάμψης από την ανάλυση παράλληλων σηράγγων – υπολογισμένη ροπή κάμψης από την ανάλυση μονής σήραγγας) στην επένδυση για τη διατομή E – E ($y = -8.6D$, που προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης), για διαφορετικές τιμές L_T (Ng, Lee & Tang, 2004).

Αξονικές δυνάμεις στην επένδυση

Τα Σχήματα 2.2-20 (a) και (b) δείχνουν τις διακυμάνσεις της αξονικής δύναμης στην επένδυση για τη διατομή E – E, σε διάφορες αποστάσεις L_T για την αριστερή και τη δεξιά σήραγγα, αντίστοιχα. Από τα σχήματα φαίνεται ότι η επιρροή του L_T στην αξονική δύναμη είναι μεγαλύτερη στην παρειά του πυλώνα και στο δάπεδο. Στην αριστερή σήραγγα, υπάρχει μια αύξηση στην αξονική δύναμη στην αριστερή παρειά, με αύξηση της απόστασης L_T , η οποία απεικονίζει μια μεταφορά φορτίου από τη δεξιά σήραγγα στην αριστερή. Κατά συνέπεια, όσο η απόσταση L_T αυξάνεται, ο μηχανισμός μεταφοράς φορτίου οδηγεί σε μείωση στην αξονική δύναμη στη δεξιά παρειά της δεξιάς σήραγγας. Οι παρατηρούμενες διακυμάνσεις της αξονικής δύναμης με διαφορετικές τιμές της απόστασης L_T είναι σύμφωνες με τις κατανομές των ροπών κάμψης που φαίνονται στο Σχήμα 2.2-19.



Σχήμα 2.2-20: Διακύμανση της αξονικής δύναμης (kN/m) στη διατομή E – E ($y = -8.6D$, που προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης), με διάφορες τιμές L_T : (a) αριστερή σήραγγα (b) δεξιά σήραγγα (Ng, Lee & Tang, 2004).

2.2.5.3. Σύνοψη

Οι Ng, Lee & Tang (2004) συνοψίζουν τα συμπεράσματα της έρευνας, εφιστώντας την προσοχή στην επιρροή της απόστασης L_T μεταξύ της προπορευόμενης (αριστερής) σήραγγας και της επερχόμενης σήραγγας (δεξιάς), όπως επίσης στο μηχανισμό μεταφοράς του φορτίου μεταξύ των δύο σηράγγων. Βασιζόμενοι στις συστηματικές τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποίησαν, καταλήγουν στα εξής:

- i. Λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων, υπάρχει μια μείωση στην παραμόρφωση της παρειάς της σήραγγας στη μεριά του πυλώνα, σε σχέση την αντίστοιχη παραμόρφωση μονής σήραγγας σε αδιατάρακτο πεδίο. Η διαμήκης απόσταση μεταξύ δύο εκσκαμμένων μετώπων δίδυμων σηράγγων έχει μεγαλύτερη επιρροή στην οριζόντια μετακίνηση σε σχέση με την κατακόρυφη μετακίνηση κάθε σήραγγας και επηρεάζει σημαντικά τη βράχυνση της οριζόντιας διαμέτρου των σηράγγων. Η μεταβολή του πλάτους του πυλώνα (ΔH) μεταξύ των δύο σηράγγων εμφανίζεται περίπου ως γραμμική συνάρτηση της απόστασης L_T . Παρόλα αυτά, η μείωση στην κατακόρυφη διάμετρο φαίνεται να είναι ανεξάρτητη του L_T .
- ii. Υπάρχει μια μετακίνηση της καμπύλης των καθιζήσεων πάνω από την προπορευόμενη (αριστερή) σήραγγα προς την επερχόμενη σε απόσταση εκσκαφής (δεξιά) σήραγγα σε διάφορες διαμήκεις αποστάσεις, για μη μηδενικές περιπτώσεις της απόστασης L_T . Η μέγιστη καθίζηση λόγω της κατασκευής των δίδυμων σηράγγων

αντισταθμίζεται στον κεντρικό άξονα του πυλώνα. Η μετατόπιση προοδευτικά αυξάνεται με την αύξηση του L_T , αλλά προσεγγίζει μια σταθερή τιμή (32%D) στη θέση όπου η απόσταση $L_T = 2.5D$ ή μεγαλύτερη. Το μέγεθος της μετατόπισης υποδεικνύει το μέγεθος της μεταφοράς φορτίου που σχετίζεται με την κατασκευή της παράλληλης γειτονικής σήραγγας. Όσο μικρότερη είναι η μετατόπιση, τόσο περισσότερο ομοιόμορφα κατανέμεται το φορτίο μεταξύ των δύο σηράγγων. Το μέγεθος των μέγιστων καθιζήσεων, παρόλα αυτά, φαίνεται να είναι σχεδόν ανεξάρτητο της απόστασης L_T .

- iii. Οι κατανομές των ροπών κάμψης στην επένδυση έχουν παρόμοιο σχήμα, αλλά είναι διαφορετικού μεγέθους, στις δύο σήραγγες. Πιο συγκεκριμένα, οι ροπές κάμψης είναι μεγαλύτερες στην αριστερή και μικρότερες στη δεξιά σήραγγα, κάτι που υποδεικνύει ότι η αριστερή σήραγγα φέρει μεγαλύτερο μέρος φορτίου σε σχέση με τη δεξιά, για μη μηδενικές τιμές της απόστασης L_T . Όσο το L_T αυξάνει, υπάρχει μια μεταφορά φορτίου από τη δεξιά στην αριστερή σήραγγα, η οποία οδηγεί σε αύξηση των ροπών κάμψης στην αριστερή σήραγγα αλλά αντίστοιχη μείωση στη δεξιά. Η επιρροή του L_T στην αξονική δύναμη είναι μεγαλύτερη στην παρειά της μεριάς του πυλώνα και στο δάπεδο. Λόγω της μεταφοράς φορτίου από τη δεξιά στην αριστερή σήραγγα, υπάρχει μια αύξηση της αξονικής δύναμης στην αριστερή παρειά της αριστερής σήραγγας και μια μείωση της αξονικής δύναμης στη δεξιά παρειά της δεξιάς σήραγγας, όσο η απόσταση L_T αυξάνει.

2.2.6. Koungelis D.K. & Augarde C.E., 2004

Στην έρευνα αυτή πραγματοποιούνται αριθμητικές αναλύσεις με τη χρησιμοποίηση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Plaxis, προκειμένου να βελτιωθεί η πρόβλεψη της ελάχιστης απόστασης αλληλεπίδρασης μεταξύ πολλαπλών αβαθών σηράγγων σε μαλακό έδαφος.

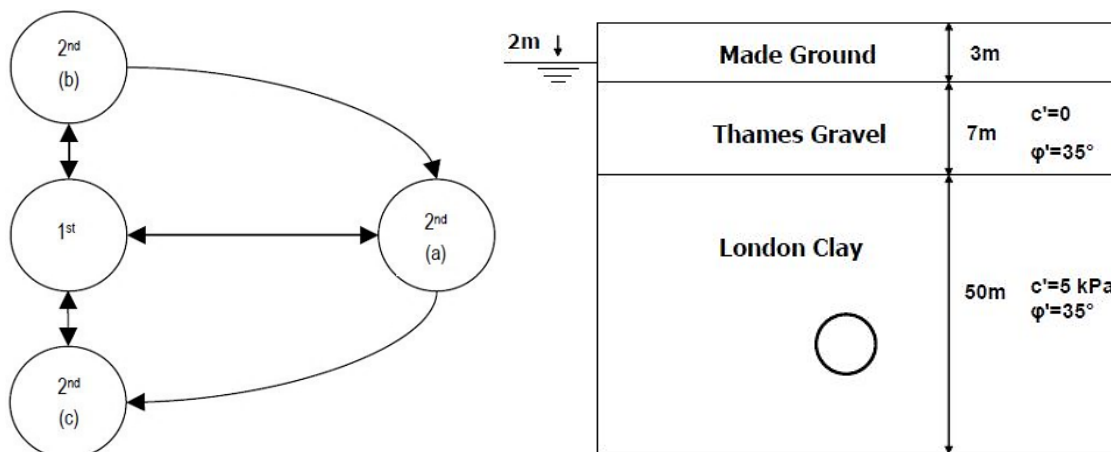
2.2.6.1. Γεωμετρία της ανάλυσης

Οι Koungelis D.K. & Augarde C.E. (2004), μελετούν τρεις γεωμετρίες παράλληλων σηράγγων. Η πρώτη γεωμετρία αναφέρεται σε σήραγγες που έχουν παράλληλους άξονες κατά την οριζόντια διεύθυνση. Η δεύτερη γεωμετρία αναφέρεται σε σήραγγες με παράλληλους άξονες κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και με τη δεύτερη σήραγγα να εκσκάπτεται πάνω από την πρώτη και τέλος, η τρίτη γεωμετρία αφορά σε σήραγγες με

άξονες παράλληλους κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, αλλά η δεύτερη σήραγγα εκσκάπτεται κάτω από την πρώτη (Σχήμα 2.2-21).

Σε όλες τις περιπτώσεις οι σήραγγες θεωρούνται κυκλικής διατομής διαμέτρου $D = 4.174\text{m}$ και η στρωματογραφία του μοντέλου διατηρείται σταθερή. Στην πρώτη γεωμετρία (case a) το βάθος του άξονα των σηράγγων είναι 64m και το πλάτος του πυλώνα μεταβάλλεται από $0.5D$ έως $7D$. Οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται για βάθος σήραγγας 14m . Στη δεύτερη γεωμετρία (case b), το πλάτος του πυλώνα (κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των σηράγγων) μεταβάλλεται από $0.5D$ έως $4D$. Το βάθος της άνω σήραγγας διατηρείται σταθερό στα 14m , ενώ η θέση της κάτω σήραγγας μεταβάλλεται. Στην τρίτη γεωμετρία (case c), το πλάτος του πυλώνα μεταβάλλεται από $0.5D$ έως $7D$. Όπως και στη δεύτερη γεωμετρία, η άνω σήραγγα βρίσκεται σε βάθος 14m ενώ η θέση της κάτω μεταβάλλεται.

Το πρώτο εδαφικό στρώμα (Made Ground) προσομοιώνεται ως γραμμικώς ελαστικό υλικό, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα να βρίσκεται σε βάθος 2m . Το δεύτερο και το τρίτο εδαφικό στρώμα (Thames Gravel και London Clay αντίστοιχα) προσομοιώνονται ως ελαστικά – απολύτως πλαστικά υλικά, χρησιμοποιώντας το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb. Ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων, K_0 , θεωρείται 0.5 για το πρώτο και το δεύτερο στρώμα, ενώ λαμβάνει την τιμή $K_0 = 1.5$ για το τρίτο στρώμα.



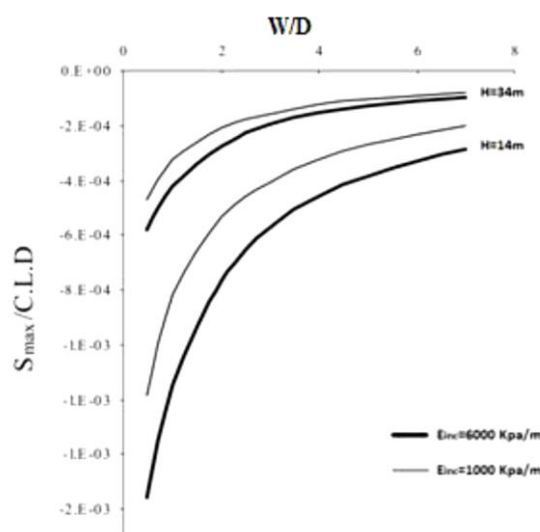
Σχήμα 2.2-21: Τρεις διαφορετικές γεωμετρίες, με μεταβαλλόμενη τη θέση της δεύτερης σήραγγας (αριστερά) και στρωματογραφία του εδάφους που υιοθετήθηκε στην έρευνα (δεξιά) (Koungelis D.K. & Augarde C.E., 2004).

2.2.6.2. Αποτελέσματα της ανάλυσης

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποίησαν οι Koungelis D.K. & Augarde C.E. (2004), για τις γεωμετρίες σηράγγων που εφάρμοσαν.

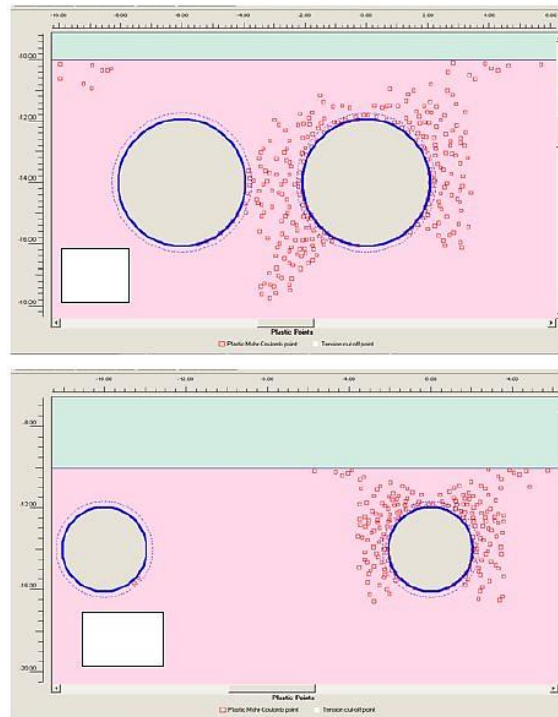
Σήραγγες με παράλληλους άξονες κατά την οριζόντια διεύθυνση (side – by – side geometry)

Στην προκειμένη περίπτωση εξετάζονται οι καθιζήσεις μόνο της δεύτερης σήραγγας. Οι καθιζήσεις λόγω της διάνοιξης της πρώτης σήραγγας, θεωρούνται ως μηδενικό σημείο αναφοράς. Στο Σχήμα 2.2-22 φαίνονται τα αποτελέσματα από μια πρώτη παραμετρική ανάλυση στην οποία εξετάστηκαν η επίδραση του βάθους εκσκαφής και η ελαστική δυσκαμψία του εδάφους στην αλληλεπίδραση. Η μέγιστη επιφανειακή καθίζηση πάνω από τη δεύτερη σήραγγα έχει σχεδιαστεί ως κανονικοποιημένη με βάση την απόσταση των αξόνων των δύο σηράγγων (C.L.D.: center – line to center – line distance) (S_{max}/L), συναρτήσεως του πλάτους του πυλώνα κανονικοποιημένου ως προς της διάμετρο της σήραγγας. Παρατηρείται ότι οι δύο καμπύλες για κάθε βάθος που μελετήθηκε (14m και 34m) είναι παρόμοιες. Όσο το πλάτος του πυλώνα αυξάνεται, η επίδραση της διαφορετικής δυσκαμψίας μειώνεται αισθητά. Για μια βαθιά σήραγγα, οι προβλεπόμενες αναλογίες καθιζήσεων είναι σχεδόν οι ίδιες. Η κλίση αυτών των καμπύλων μειώνεται επίσης αισθητά, για πλάτος πυλώνα από τρεις έως τέσσερις διαμέτρους (3D – 4D), κάτι το οποίο υποδεικνύει απώλεια της αλληλεπίδρασης σε αυτή την απόσταση.



Σχήμα 2.2-22: Εξέλιξη των επιφανειακών καθιζήσεων συναρτήσεως του λόγου του πλάτους πυλώνα προς τη διάμετρο της διατομής, για διαφορετικά πάχη υπερκειμένων γαιών και για διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας του εδάφους (Koungelis D.K. & Augarde C.E., 2004).

Στο Σχήμα 2.2-23 φαίνεται η πλαστική ζώνη που δημιουργείται γύρω από τη δεύτερη σήραγγα, για πλάτη πυλώνα $P = 0.5D$ και $P = 7D$. Όσο το πλάτος του πυλώνα αυξάνεται, η ζώνη πλαστικοποίησης της δεύτερης σήραγγας παύει να επικαλύπτει την πρώτη σήραγγα, ενώ το φαινόμενο αυτό γίνεται περισσότερο αισθητό στο έδαφος με τη μικρότερη δυσκαμψία.

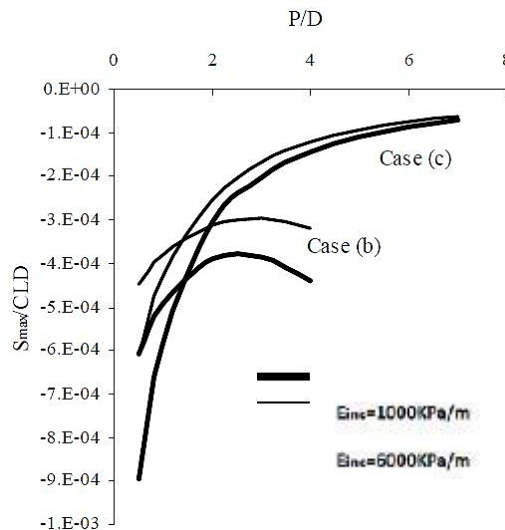


Σχήμα 2.2-23: Πλαστική ζώνη γύρω από τη δεύτερη σήραγγα, για πλάτη πυλώνα $P = 0.5D$ (πάνω) και $P = 7D$ (κάτω) (Koungelis D.K. & Augarde C.E., 2004).

Σήραγγες με παράλληλους άξονες κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (riggy – back geometries)

Στην περίπτωση αυτή εξετάζονται δύο γεωμετρίες. Η πρώτη γεωμετρία (case b) αναφέρεται στη διάνοιξη της πρώτης διατομής σε βάθος 14m, ενώ το βάθος της δεύτερης σήραγγας είναι μεταβλητό. Η δεύτερη σήραγγα εκσκάπτεται πάνω από την ήδη προϋπάρχουσα και η κατακόρυφη απόσταση L μεταξύ των αξόνων των σηράγγων κυμαίνεται από $0.5D$ έως $4D$. Η δεύτερη γεωμετρία (case c), περιλαμβάνει διάνοιξη της πρώτης σήραγγας σε βάθος 14m, η δεύτερη σήραγγα διανοίγεται κάτω από την ήδη προϋπάρχουσα, το βάθος της είναι μεταβλητό και η κάθετη απόσταση L μεταξύ τους είναι από $0.5D$ έως $7D$.

Το Σχήμα 2.2-24 δείχνει τα αποτελέσματα των δύο αυτών περιπτώσεων, χρησιμοποιώντας ανάλογους άξονες όπως και στο Σχήμα 2.2-22. Και σε αυτή την περίπτωση, όσο σφιχρότερο είναι το έδαφος, τόσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος των επιφανειακών καθιζήσεων. Στην περίπτωση όπου η δεύτερη σήραγγα διανοίγεται κάτω από την ήδη προϋπάρχουσα (case c), οι καθιζήσεις αυτές μειώνονται με την αύξηση του πλάτους του πυλώνα, όπως και στην περίπτωση όπου οι σήραγγες διανοίγονται παράλληλα κατά την οριζόντια διεύθυνση (case a). Ακόμη, οι καθιζήσεις φαίνονται να είναι μεγαλύτερες για μικρό πλάτος πυλώνα, όταν η άνω διατομή διανοίγεται πρώτη (case c). Καθώς, όμως, το πλάτος του πυλώνα αυξάνει οι καθιζήσεις για την περίπτωση b είναι εντονότερες σε σχέση με αυτές της περίπτωσης c.



Σχήμα 2.2-24: Εξέλιξη των επιφανειακών καθιζήσεων συναρτήσει του λόγου του πλάτους πυλώνα προς τη διάμετρο της διατομής, για διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας του εδάφους (Koungelis D.K. & Augarde C.E., 2004).

2.2.6.3. Συμπεράσματα

Οι Koungelis D.K. & Augarde C.E. (2004) καταλήγουν, ύστερα από αυτή την έρευνα, στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- i. Για δύο σήραγγες οι οποίες εκσκάπτονται με τους άξονές τους παράλληλους κατά την οριζόντια διεύθυνση, τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης μεταξύ τους είναι εμφανή για πλάτη πυλώνα έως τρεις με τέσσερις διαμέτρους (3D – 4D)
- ii. Για δύο σήραγγες που εκσκάπτονται με τους άξονές τους παράλληλους κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και για την περίπτωση όπου η δεύτερη διατομή διανοίγεται

πάνω από μία ήδη προϋπάρχουσα διατομή, υπάρχουν μικρά φαινόμενα αλληλεπίδρασης σε πλάτος πυλώνα μιας διαμέτρου ($P = 1D$). Για αποστάσεις μεγαλύτερες των τριών διαμέτρων ($P > 3D$), η αλληλεπίδραση καθίσταται αμελητέα.

- iii. Για δύο σήραγγες με άξονες παράλληλους κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, όπου η δεύτερη σήραγγα εκσκάπτεται κάτω από την πρώτη, προϋπάρχουσα σήραγγα, τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης παρουσιάζονται, ακόμη και για μεγάλα βάθη εκσκαφής της δεύτερης σήραγγας.

2.2.7. Kim S.H., 2004

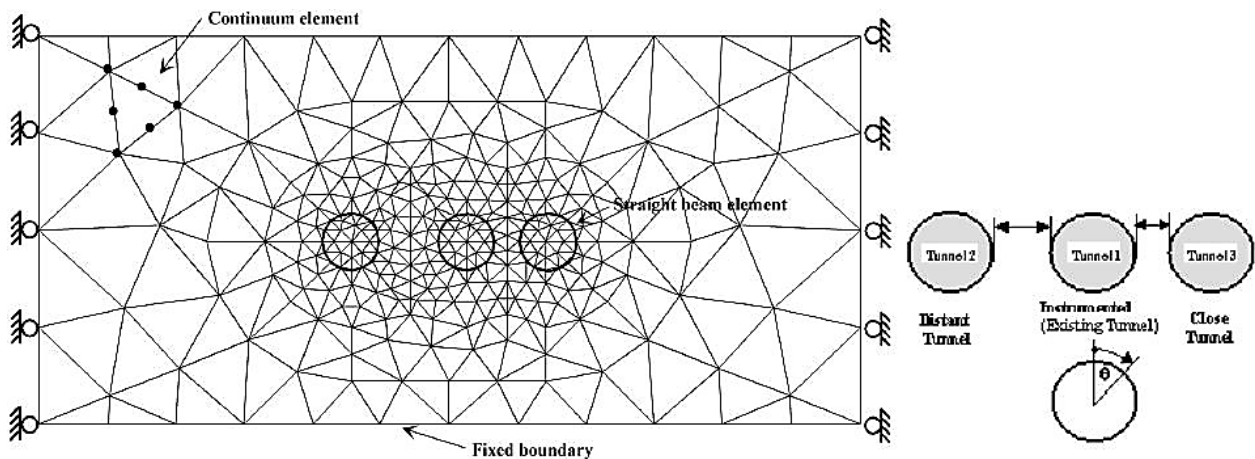
Η έρευνα αναφέρεται στη μελέτη των τάσεων και παραμορφώσεων που υφίσταται η υποστήριξη μιας προϋπάρχουσας σήραγγας, λόγω της κατασκευής μια νέας παράλληλης, γειτονικής σήραγγας. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιούνται εργαστηριακές δοκιμές μικρής κλίμακας οι οποίες διερευνούν την επίδραση του πλάτους του πυλώνα στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης σε σήραγγες που διανοίγονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, σε αργιλικό έδαφος. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων συγκρίνονται στη συνέχεια με αποτελέσματα από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να διερευνηθούν οι τεχνικές οι οποίες πρέπει να χρησιμοποιούνται προκειμένου να λαμβάνονται αξιόπιστες λύσεις σε τέτοιου είδους προβλήματα.

2.2.7.1. Πειραματική διάταξη & διαδικασία πειράματος

Για τη διεξαγωγή του πειράματος, εγκιβωτίστηκε σε κατάλληλη συσκευή αργιλικό υλικό με καολίνη, το οποίο ήταν είτε στερεοποιημένο ή υπερστερεοποιημένο, προκειμένου να είναι αντιπροσωπευτικό των συνθηκών της αργίλου του Λονδίνου (London Clay). Στη συνέχεια διανοίχθηκε εντός του υλικού η πρώτη σήραγγα, διαμέτρου 70mm, της οποίας η υποστήριξη οργανομετρήθηκε με μετρητές παραμόρφωσης (strain gauges). Ύστερα από τη διαδικασία διόγκωσης και στερεοποίησης, διανοίχθηκε η δεύτερη σήραγγα σε απόσταση ίση με $2D$ από την πρώτη. Σε αυτό το στάδιο, μετρήθηκαν οι ακτινικές μετατοπίσεις της πρώτης σήραγγας, χρησιμοποιώντας κατάλληλα όργανα. Ύστερα από το πέρας επαρκούς χρόνου προκειμένου να εξαλειφθούν οι υδατικές πιέσεις, διανοίχθηκε η τρίτη σήραγγα, σε απόσταση ίση με $1.4D$. Κατά τη διάρκεια αυτών των δοκιμών λαμβάνονταν δεδομένα από τα διάφορα όργανα που είχαν εγκατασταθεί στην πρώτη διατομή, προς μέτρηση των ροπών κάμψης, των ολικών τάσεων και των πιέσεων των πόρων.

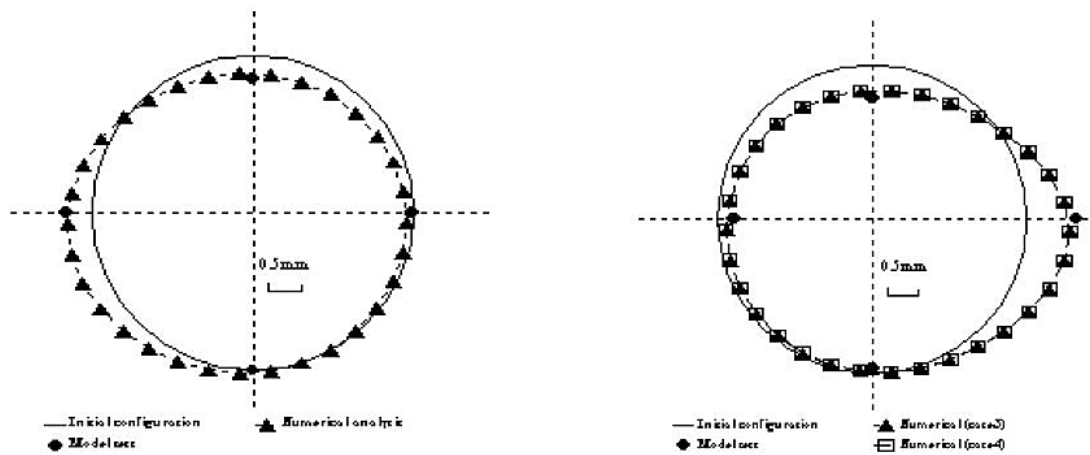
2.2.7.2. Αριθμητικές αναλύσεις & αποτελέσματα

Η αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών σήραγγων είναι περίπλοκη και δε μπορεί να μελετηθεί σε βάθος χρησιμοποιώντας πειραματική διάταξη. Για το λόγο αυτό, στις αριθμητικές αναλύσεις χρησιμοποιούνται οι διαστάσεις του μοντέλου που ενσωματώθηκαν στο πειραματικό μέρος της έρευνας. Όλες οι αναλύσεις έλαβαν χώρα με την προσομοίωση του εδάφους ως γραμμικώς ελαστικό υλικό.



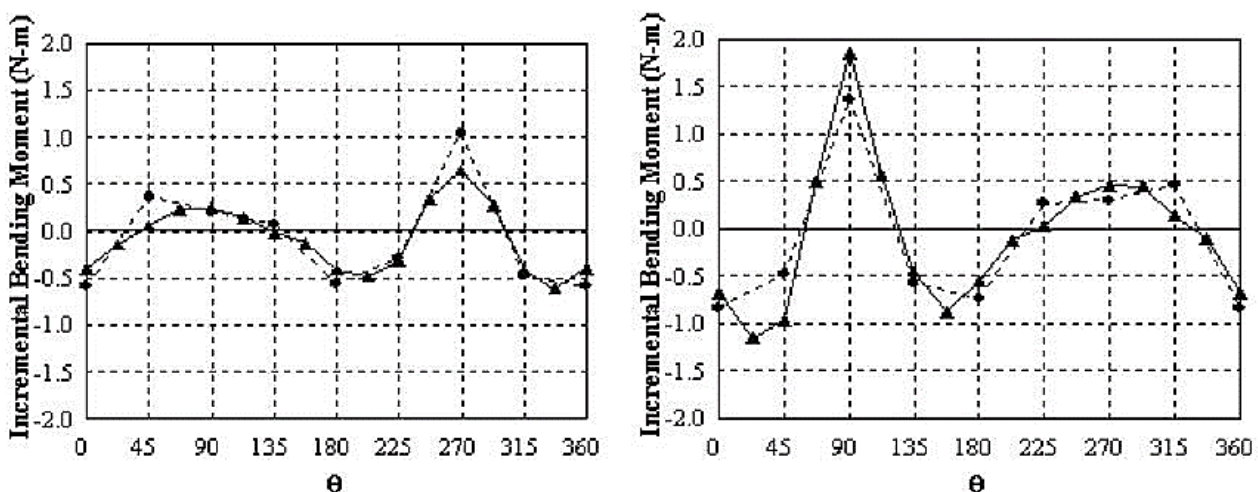
Σχήμα 2.2-25: Διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων (Kim S.H., 2004).

Στο Σχήμα 2.2-26 παρουσιάζονται τυπικά αποτελέσματα των μετακινήσεων στην υποστήριξη της πρώτης σήραγγας, λόγω της κατασκευής της δεύτερης (σε απόσταση 2D) και της τρίτης διατομής (σε απόσταση 1.4D), τόσο από τα πειράματα που διεξήχθησαν, όσο και από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο μεθόδων βρίσκονται σε συμφωνία. Πιο συγκεκριμένα και οι δύο ομάδες αποτελεσμάτων δείχνουν ότι λαμβάνουν χώρα μεγάλες προς τα έξω μετακινήσεις της παρειάς από τη μεριά του πυλώνα, όταν μια νέα σήραग्ga εκσκάπτεται. Σε κάθε περίπτωση, η στέψη της σήραγγας μετακινείται προς τα κάτω, ενώ η μετακίνηση του πυθμένα είναι αμελητέα. Η γενική συμπεριφορά των μετακινήσεων για τη σήραग्ga, είτε πρόκειται για απόσταση 2D από τη γειτονική, είτε για 1.4D, είναι παρόμοια, αλλά διαφορετικού μεγέθους, με τις μεγαλύτερες μετακινήσεις να αναπτύσσονται όταν η δεύτερη σήραग्ga βρίσκεται σε πιο κοντινή απόσταση (1.4D).



Σχήμα 2.2-26: Μετακινήσεις στην υποστήριξη της υφιστάμενης σήραγγας, λόγω της διάνοιξης σήραγγας στα αριστερά της υφιστάμενης, σε απόσταση 2D (αριστερά) και λόγω της διάνοιξης σήραγγας στα δεξιά της υφιστάμενης, σε απόσταση 1.4D (δεξιά) (Kim S.H., 2004).

Στο Σχήμα 2.2-27 φαίνονται οι σταδιακά αυξανόμενες ροπές κάμψης στην υποστήριξη της υφιστάμενης σήραγγας, λόγω της κατασκευής των γειτονικών σηράγγων ($W = 2D$ και $W = 1.4D$). Τα αποτελέσματα αναφέρονται στις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και στις δοκιμές. Παρατηρείται ότι η διάνοιξη των δύο νέων σηράγγων επιφέρει σημαντικές ροπές κάμψης στην προϋπάρχουσα σήραγγα, ενώ και στις δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων και των πειραματικών δοκιμών συμφωνούν. Γίνεται ακόμη αντιληπτό, ότι όσο πιο κοντά μια σήραγγα κατασκευάζεται σε μία υφιστάμενη, τόσο μεγαλύτερη επιπρόσθετη ροπή αναπτύσσεται στην παρειά από τη μεριά του πυλώνα, στην υποστήριξη της υφιστάμενης σήραγγας.



Σχήμα 2.2-27: Επιπρόσθετες ροπές κάμψης στην υποστήριξη της υφιστάμενης σήραγγας, λόγω της διάνοιξης της γειτονικής σήραγγας στα αριστερά της υφιστάμενης ($W = 2D$) (αριστερά) και λόγω της διάνοιξης της γειτονικής σήραγγας στα δεξιά της υφιστάμενης ($W = 1.4D$) (δεξιά) (Kim S.H.,2004).

2.2.7.3. Σύνοψη

Από την έρευνα αυτή, συμπερασματικά προκύπτει ότι η εκσκαφή μιας νέας σήραγγας σε πολύ κοντινή απόσταση από μία προϋπάρχουσα σήραγγα δύναται να επιφέρει σημαντικά προβλήματα παραμορφώσεων και αύξησης των ροπών στην υποστήριξη της υφιστάμενης. Φαίνεται ακόμη ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των σηράγγων είναι αμελητέα, όταν η απόσταση μεταξύ τους είναι μεγαλύτερη από δύο διαμέτρους ($W > 2D$).

2.2.8. Karakus M., Ozsan A., Basarir H., 2006

Οι Karakus M., Ozsan A. & Basarir (2006) μελετούν τη διάνοιξη δίδυμων σηράγγων του μητροπολιτικού σιδηρόδρομου της Άγκυρας. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιούν διδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για τη διερεύνηση των συγκλίσεων, τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίνουν με πραγματικές μετρήσεις που έχουν λάβει χώρα κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

Πρόκειται για αβαθείς σήραγγες, διαμέτρου 7m εκάστη, οι οποίες διανοίγονται σε ελαφρώς υπερστερεοποιημένη άργιλο (Ankara Clay). Η απόσταση μεταξύ των κέντρων των σηράγγων διατηρείται σταθερή και ίση με 15m. Η εκσκαφή κάθε σήραγγας πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Αρχικά εκσκάπτεται το άνω τμήμα και αμέσως μετά τοποθετείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 30mm. Ακολουθεί τοποθέτηση μεταλλικών πλαισίων, πλέγματος και ακόμη 170mm εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Στη συνέχεια εκσκάπτεται το κάτω τμήμα της σήραγγας και έπεται ανάλογη τοποθέτηση υποστήριξης, με τον ίδιο τρόπο. Το βήμα εκσκαφής είναι μεταξύ 1 – 1.5m, ενώ το κάτω τμήμα της διατομής εκσκάπτεται σε μέγιστη απόσταση 6m πίσω από την άνω φάση. Με αυτό τον τρόπο η διατομή κλείνει το συντομότερο δυνατό και αποφεύγονται εκτεταμένες μετακινήσεις.

Οι καταγραφές των συγκλίσεων πραγματοποιούνται ύστερα από την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην περιφέρεια της σήραγγας και πριν από την τοποθέτηση της μόνιμης επένδυσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τοπογραφικές μέθοδοι και οι καταγραφές που λαμβάνονται συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις διδιάστατες αναλύσεις. Εκτιμάται, όμως, ότι κάποιες από τις καταγραφές ενδέχεται να είναι λανθασμένες, καθώς τα όργανα που τοποθετήθηκαν στη σήραγγα, υπέστησαν βλάβη λόγω του εξοπλισμού εργασίας. Επιπλέον, νερό το οποίο

είχε, κατά τόπους, παγιδευτεί εντός της αργίλου προκάλεσε διόγκωση η οποία οδήγησε σε μεταβολές των καταγραφών. Κατ' επέκταση, απαιτείται εφαρμογή μιας περεταίρω αξιόπιστης τεχνικής παρακολούθησης των μετακινήσεων σε μαλακά εδάφη.

Οι καταγραφές των συγκλίσεων, καθώς και τα αποτελέσματα των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων (FEM), παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2-2. Οι καταγραφές αφορούν στη στέψη και στον πυθμένα της δεξιάς και της αριστερής σήραγγας. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις που αναλογούν στην άνω και κάτω φάση της αριστερής σήραγγας και στην άνω φάση της δεξιάς σήραγγας, είναι σύμφωνες με τις επί τόπου παρατηρήσεις, ενώ οι οριζόντιες μετακινήσεις του τοιχώματος των σηράγγων αποκλίνουν από τις καταγραφές. Παρόλα αυτά, για την κάτω φάση της αριστερής σήραγγας, οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων συμπεραίνουν ορθώς μηδενικές μετακινήσεις.

Πίνακας 2.2-2: Σύγκριση των συγκλίσεων για την αριστερή σήραγγα (Karakus M., Ozsan A. & Basarir H., 2006).

Measurement points at the left tunnel (upper part excavation)	Predictions by FEM (in mm)		Observations (in mm)	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
L1 at crown	3.4	0.2	3	7
L2 at left sidewall	2.6	2.8	5	6
L3 at right sidewall	2.9	2.4	2	9
Measurement points at the left tunnel (lower part excavation)	Predictions by FEM (in mm)		Observations (in mm)	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
L1 at crown	3.5	0.2	1	0
L2 at left sidewall	3.6	0.1	2	1
L3 at right sidewall	3.5	0.1	4	7
Measurement points at the right tunnel (upper part excavation)	Predictions by FEM (in mm)		Observations (in mm)	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
L1 at crown	19.7	1	18	17
L2 at left sidewall	17.8	5.7	16	13
L3 at right sidewall	21.2	2.3	12	11

Οι Karakus M., Ozsan A. & Basarir (2006) παρατηρούν ακόμη ότι όταν η δεξιά σήραγγα εκσκάπτεται ύστερα από την ολοκλήρωση της αριστερής, όχι μόνο οι οριζόντιες, αλλά και οι κατακόρυφες μετακινήσεις, είναι 2 – 3 φορές μεγαλύτερες από αυτές που παρατηρούνται για τη μονή σήραγγα. Αυτό υποδεικνύει ότι η εκσκαφή της αριστερής σήραγγας αυξάνει τις συγκλίσεις. Το φαινόμενο αυτό ενδέχεται να λαμβάνει χώρα λόγω του μικρού πλάτους πυλώνα μεταξύ των δύο σηράγγων, το οποίο δημιουργεί εκτεταμένη πλαστική ζώνη γύρω από την αριστερή σήραγγα.

2.2.9. 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 την επίδραση που έχει η διάνοιξη σήραγγας στο υπάρχον σύστημα υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυροδέμα και αγκύρια) 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 αγκυρίων και της βραχόμαζας.

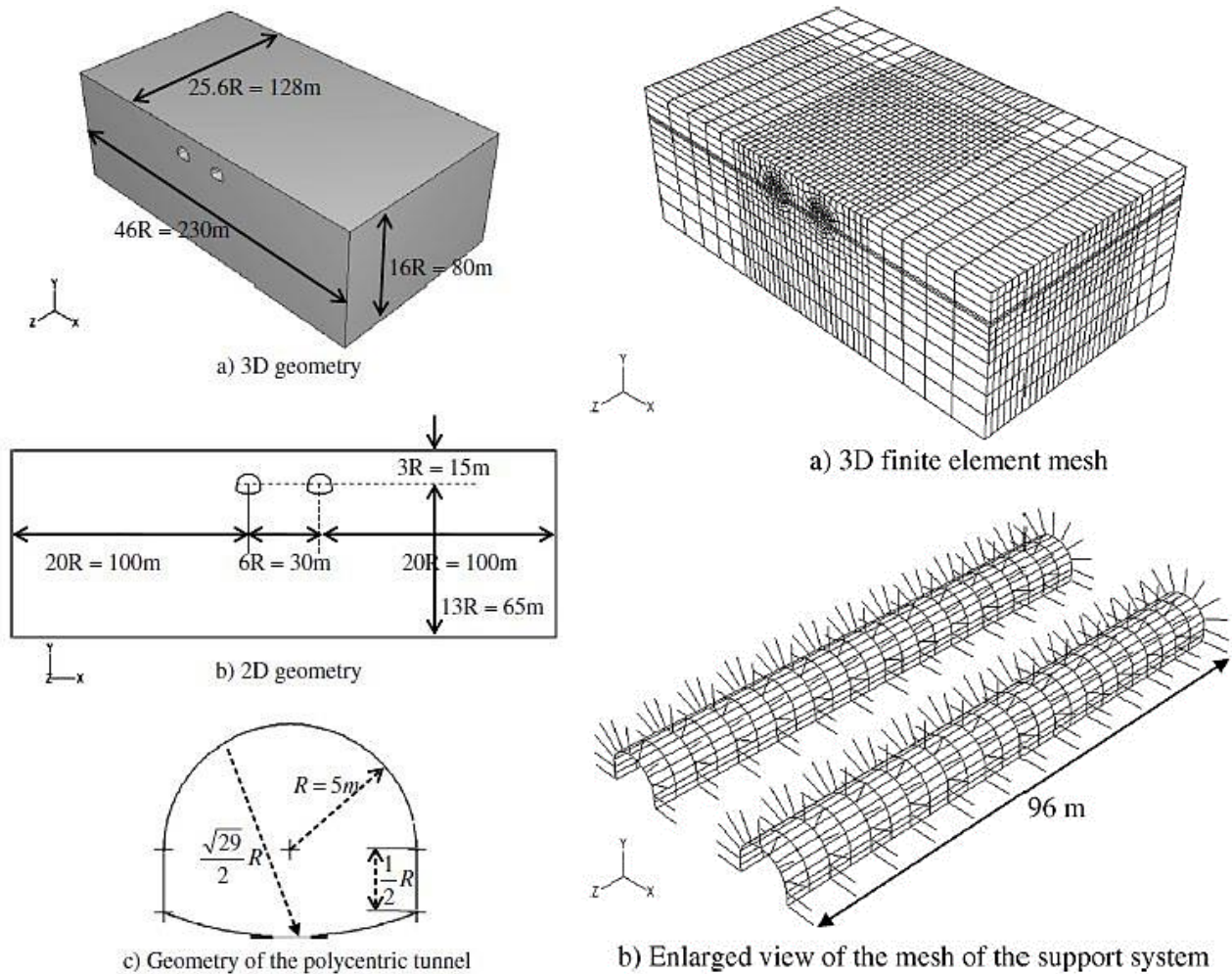
Καταλήγουν στο ότι η διάνοιξη μιας νέας σήραγγας ασκεί σημαντική επίδραση στο υπάρχον σύστημα υποστήριξης όταν η προώθηση του μετώπου της νέας σήραγγας περνά δίπλα από την υφιστάμενη υποστήριξη, ενώ η επίδραση καθίσταται μικρή όταν το μέτωπο είναι μακριά από αυτήν. Επιπλέον, το σύστημα υποστήριξης της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

Επισημαίνουν ακόμη ότι σε μια περιοχή όπου κυριαρχούν σχετικά υψηλές οριζόντιες γεωστατικές τάσεις, όπως στο Σύδνεϋ, 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 αγκυρίων.

2.2.9.1. Αριθμητικό μοντέλο

Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, ενώ για την παραγωγή του αρχικού εντατικού πεδίου, την εκσκαφή των πεπερασμένων στοιχείων βήμα προς βήμα, την προσθήκη των στοιχείων στήριξης κ.ά., χρησιμοποιείται το τριδιάστατο πρόγραμμα TUNNEL 3D. Το μήκος, πλάτος και ύψος του μοντέλου είναι 230m, 128m και 80m αντίστοιχα, η υφιστάμενη και η νέα σήραγγα έχουν πολυκεντρική διατομή και η χαρακτηριστική τους διάμετρος είναι $D_{tun} = 10m$. Η απόσταση μεταξύ των κέντρων των σηράγγων είναι $L_{dis} = 3 D_{tun}$ και το ύψος των υπερκειμένων γαιών $L_{dep} = 1.5 D_{tun}$. Τόσο η υφιστάμενη, όσο και η νέα σήραγγα κατασκευάζονται για μήκος 96m και

υποστηρίζονται με επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και αγκύρια βράχου (Σχήμα 2.2-28). Σε κάθε βήμα το μέτωπο εκσκαφής προχωρά απόσταση $L_{exc} = 4m$. Το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι $t = 250mm$, ενώ το μήκος των αγκυριών $L_{bolt} = 5m$.



Σχήμα 2.2-28: 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).

2.2.9.2. Γεωλογία, γεωστατικές τάσεις, συνοριακές συνθήκες & φορτία

Στο μεγαλύτερο μέρος της μητροπολιτικής περιοχής της περιοχής του Σύδνεϋ τα κυρίαρχα πετρώματα πλησίον της επιφάνειας είναι οι σχιστόλιθοι της ομάδας Wianamatta και οι φαμμίτες του Hawkesbury, αλλά η πλειονότητα των σηράγγων κατασκευάζεται στους φαμμίτες του Hawkesbury, με αντοχή του άρρηκτου βράχου σε ανεμπόδιση θλίψη 45MPa, αντοχή σε εφελκυσμό 2 – 3MPa και μέτρο ελαστικότητας 2.5 – 8GPa. Παρόλα

αυτά υπάρχουν πολλά επίπεδα αδυναμίας στο πέτρωμα όπως ασυνέχειες, διακλάσεις και ρήγματα, τα οποία καθιστούν τις ιδιότητες της βραχώμαζας (στην κλίμακα της σήραγγας) πολύ χαμηλές. Επομένως οι Liu H.Y., Small J.C. & Carter J.P. (2007) χρησιμοποιούν πολύ χαμηλές τιμές για τις ιδιότητες της βραχώμαζας. Το γεωστατικό πεδίο τάσεων στον φαρμίτη του Hawkesbury της περιοχής του Σύδνεϋ (Σχήμα 2.2-29) μπορεί κατά προσέγγιση να παρουσιαστεί χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες σχέσεις οι οποίες προτείνονται από τον Pells (2002):

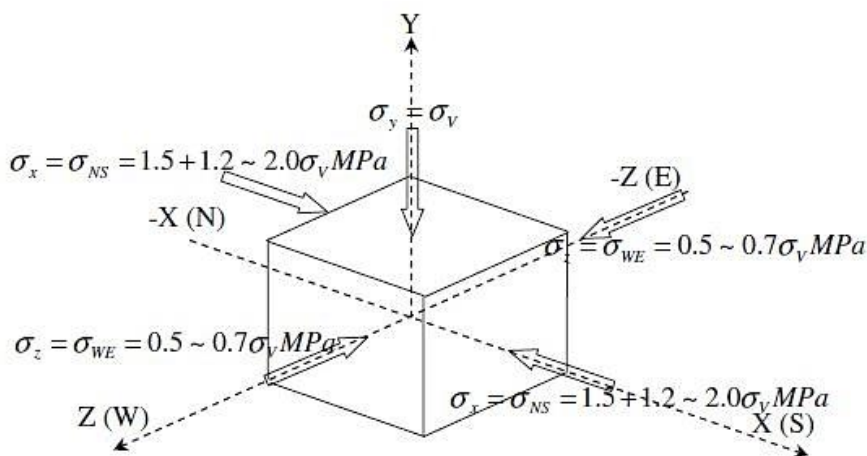
$$\sigma_x = \sigma_{NS} = 1.5 + 1.2\sigma_v \text{ MPa} \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

$$\sigma_y = \sigma_v = 0.024H \text{ MPa} \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

$$\sigma_z = \sigma_{WE} = 0.5\sigma_v \text{ MPa} \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

Όπου

- σ_v η κατακόρυφη τάση
- σ_{NS} η οριζόντια τεκτονική γεωστατική τάση, κάθετα στον οριζόντιο άξονα των σιράγγων
- σ_{WE} η οριζόντια τεκτονική γεωστατική τάση, κατά μήκος του οριζόντιου άξονα των σιράγγων
- H το βάθος της παρακολουθούμενης θέσης.



Σχήμα 2.2-29: Γεωστατικό πεδίο τάσεων στην περιοχή του Σύδνεϋ (Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P., 2007).

Πριν από τη διάνοιξη της νέας σήραγγας, το υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης της γειτονικής σήραγγας και η περιβάλλουσα βραχόμαζα φορτίζονται αρχικά και στη συνέχεια αφήνονται να παραμορφωθούν. Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της διάνοιξης στο υπάρχον σύστημα υποστήριξης, είναι σημαντικό να παράγεται το αρχικό εντατικό και το παραμορφωσιακό πεδίο προτού προσομοιωθεί η διάνοιξη της νέας σήραγγας. Στην έρευνα αυτή τα φορτία επιφανειακών κατασκευών που επιβάλλονται στο έδαφος αγνοούνται. Κατά τη διάρκεια της κατασκευής της νέας σήραγγας, το ληφθέν αρχικό εντατικό πεδίο διατηρείται και η αρχική παραμόρφωση μηδενίζεται. Οι κατακόρυφες τάσεις υπολογίζονται σύμφωνα με το ίδιο βάρος της υπερκείμενης βραχόμαζας (Εξίσωση 2) και οι οριζόντιες τεκτονικές γεωστατικές τάσεις υπολογίζονται με βάση τις Εξισώσεις 1 & 3.

Η βραχόμαζα θεωρείται ότι διέπεται από μια ελαστοπλαστική συστατική σχέση η οποία βασίζεται στο κριτήριο Mohr-Coulomb. Ακόμη, οι πραγματικές ιδιότητες του σκυροδέματος όπως η δυσκαμψία και η αντοχή οι οποίες είναι εξαρτώμενες από το χρόνο, δε λαμβάνονται υπόψη στις δεδομένες παραμετρικές αναλύσεις.

2.2.9.3. Αριθμητικά αποτελέσματα

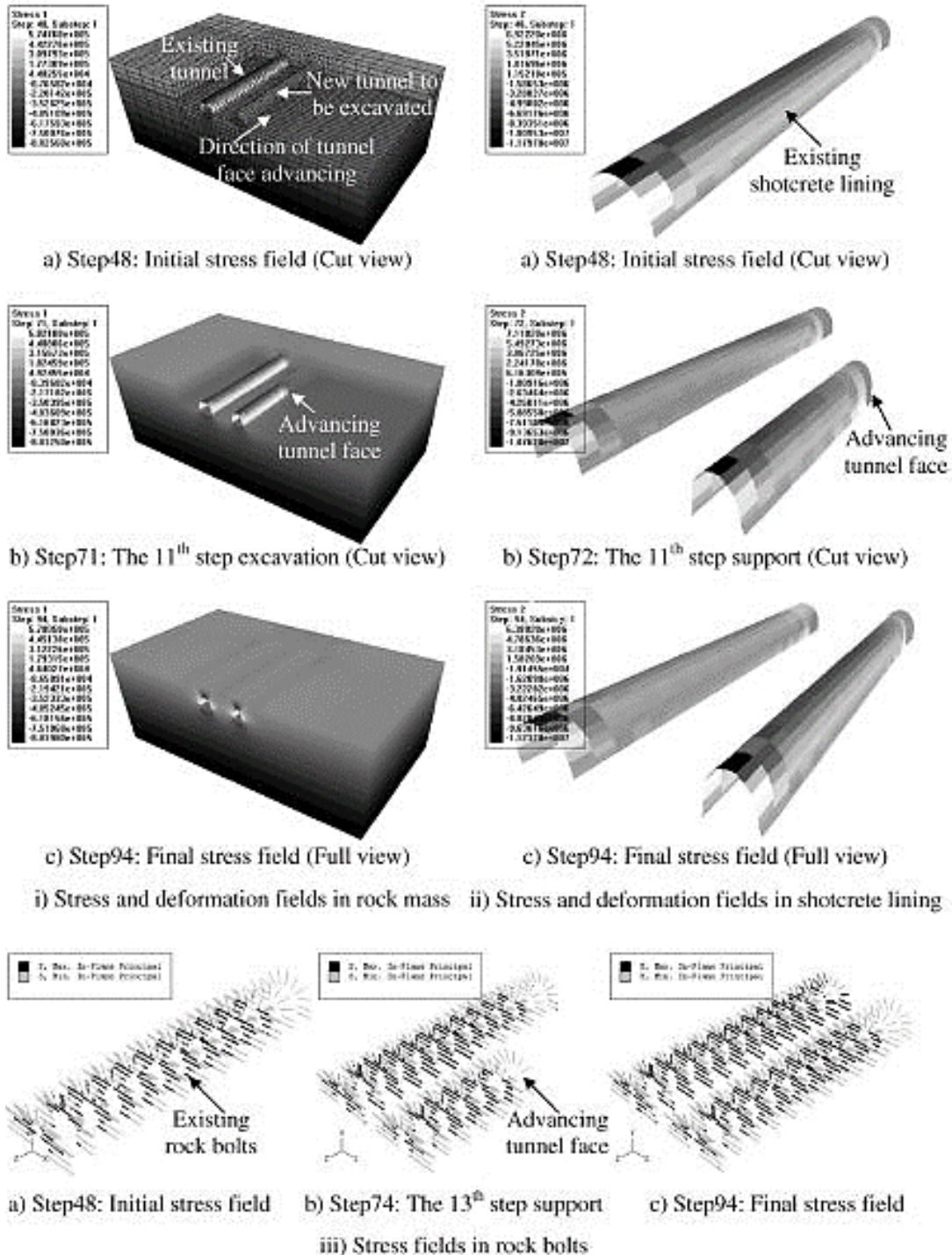
Στην ανάλυση των αποτελεσμάτων ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στις αλλαγές των τάσεων στο υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης. Οι Liu H.Y., Small J.C. & Carter J.P. (2007) ακολουθώντας τη σύμβαση των προσήμων της μηχανικής στερεού, οι εφελκυστικές τάσεις αναφέρονται ως θετικές, ενώ οι θλιπτικές τάσεις και οι παραμορφώσεις λαμβάνονται ως αρνητικές.

Λόγω της σχετικά υψηλής οριζόντιας γεωστατικής τάσης συγκριτικά με τη δύναμη της βαρύτητας στην περιοχή του Σύδνεϋ, η υφιστάμενη σήραγγα συνθλίβεται στην οριζόντια διεύθυνση. Για αυτό το λόγο εμφανίζονται υψηλές θλιπτικές τάσεις (μαύρο χρώμα) στην περιοχή της άνω και κάτω ημιδιατομής (top heading και bench) της προϋπάρχουσας σήραγγας, ενώ πολύ υψηλές εφελκυστικές τάσεις (άσπρο χρώμα) στις παρειές (Σχήμα 2.2-30 i και ii). Τα μέρη των αγκυρίων που βρίσκονται πιο κοντά στο άνοιγμα της σήραγγας υφίστανται εφελκυστικές τάσεις (μαύρα βέλη στο Σχήμα 2.2-30 iii), παρόλο που άλλα σημεία θλίβονται λιγότερο ή περισσότερο (γκρι βέλη στο Σχήμα 2.2-30 iii), λόγω της υψηλής δυσκαμψίας συγκριτικά με τη δυσκαμψία της βραχόμαζας.

Κατά τη διάρκεια κατασκευής της νέας σήραγγας στο Στάδιο II (Stage II), η εκσκαφή επιφέρει υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων στη βραχώμαζα (Σχήμα 2.2-30 ib) και στην επένδυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Σχήμα 2.2-30 iib) περιμετρικά της προχώρησης του μετώπου. Οι παρειές της νέας σήραγγας κινούνται προς το άνοιγμα της διατομής και η στέψη κινείται προς τα πάνω παρά τη δύναμη της βαρύτητας, λόγω των υψηλών οριζόντιων γεωστατικών τάσεων.

Σημειώνεται ότι αμέσως μετά την επανενεργοποίηση των στοιχείων της υποστήριξης, το πρόσφατα τοποθετημένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τα αγκύρια στη δεδομένη ανάλυση φέρουν σχεδόν μηδενική τάση, όπως φαίνεται με τα γκρι χρώματα περιμετρικά του μετώπου προώθησης στο Σχήμα 2.2-30 iib και από την ανυπαρξία βελών περιμετρικά του μετώπου προώθησης στο Σχήμα 2.2-30 iiib, αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει καθότι τοποθετούνται ύστερα από την παραμόρφωση της βραχώμαζας που προκαλείται από την εκσκαφή στο προηγούμενο βήμα. Συνεπώς αποτελούν παθητική υποστήριξη.

Στα επόμενα βήματα, τα στοιχεία υποστήριξης φορτίζονται λόγω της ανακατανομής των τάσεων που προκαλείται από τις μεταγενέστερες εκσκαφές. Οι συγκρίσεις μεταξύ των τάσεων στην υφιστάμενη επένδυση του σκυροδέματος στα Σχήματα 2.2-30 iia και b και μεταξύ των τάσεων στα υφιστάμενα αγκύρια στο Σχήμα 2.2-30 iiia και b της προϋπάρχουσας σήραγγας αποκαλύπτουν ότι η εκσκαφή της νέας σήραγγας επηρεάζει πολύ σημαντικά τις τάσεις στο υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης. Αυτού του είδους η επιρροή καθίσταται περισσότερο εμφανής όταν το μέτωπο προώθησης περνά το υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης και αμελητέα όταν το μέτωπο βρίσκεται μακριά από αυτό. Τα Σχήματα 2.2-30 i – iiic καταγράφουν τα τελικά πεδία τάσεων ή/και παραμορφώσεων ύστερα από την εκσκαφή της νέας σήραγγας.

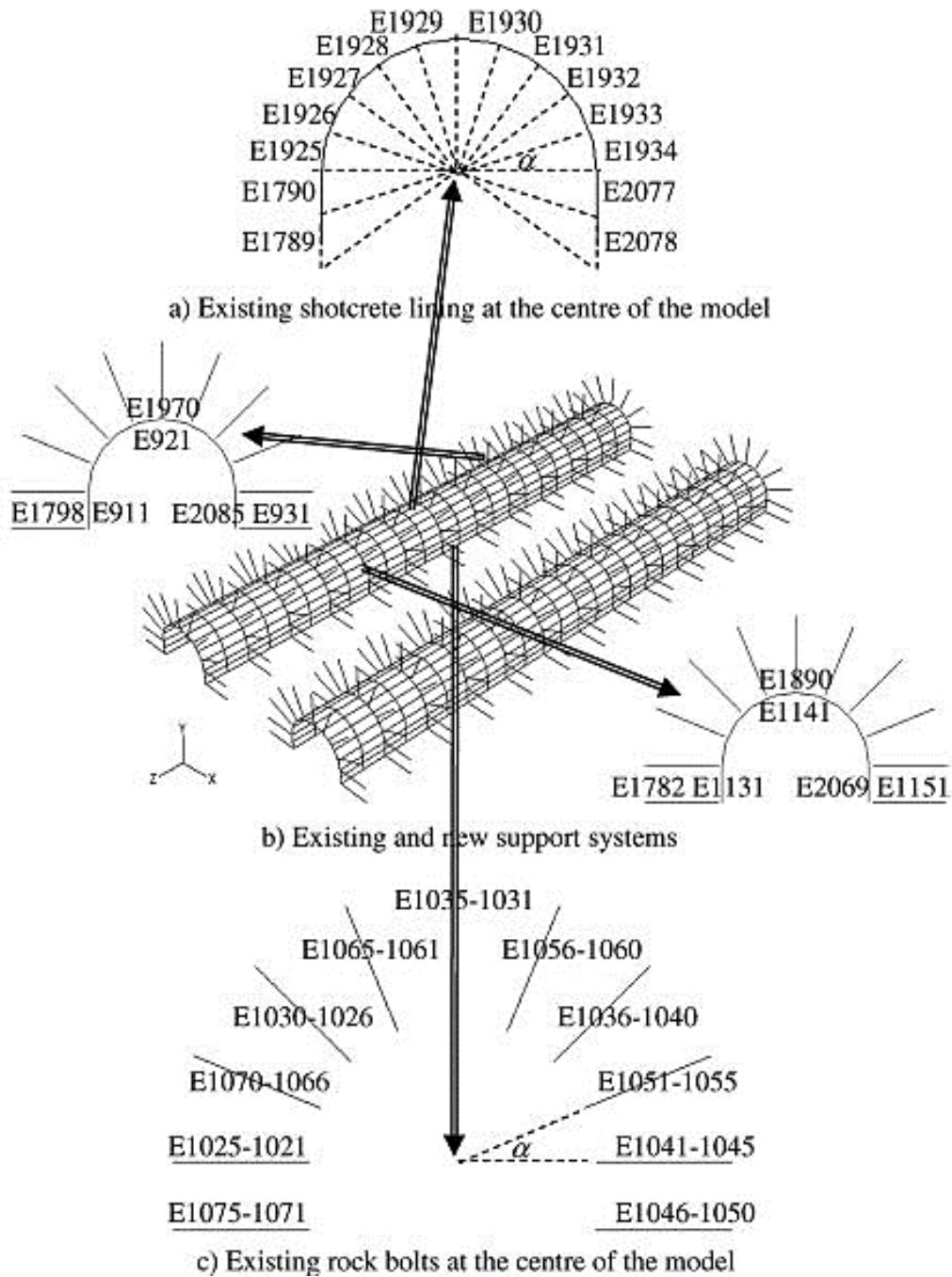


Σχήμα 2.2-30: Εξέλιξη των πεδίων τάσεων ή/και παραμορφώσεων στη βραχώμαζα, στην επένδυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και στα αγκύρια κατά τη διάρκεια των φάσεων εκσκαφής και υποστήριξης της νέας σήραγγας (Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P., 2007).

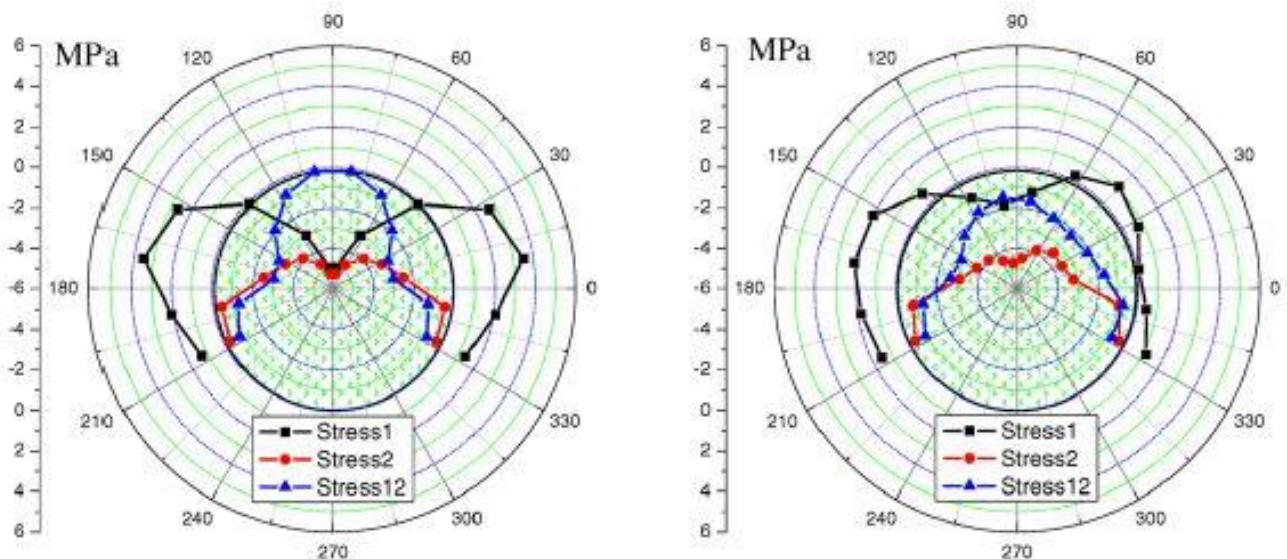
Προκειμένου να αξιολογήσουν ποσοτικά τις επιδράσεις της εκσκαφής στο υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης, οι Liu H.Y., Small J.C. & Carter J.P. (2007) παρακολούθησαν μερικά σημεία (Σχήμα 2.2-31). Το Σχήμα 2.2-32 παρουσιάζει τη μέγιστη κύρια τάση, την ελάχιστη κύρια τάση και τη μέγιστη διατμητική τάση στην επένδυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Σχήμα 2.2-32 a) και τη μέγιστη κύρια τάση στα αγκύρια (Σχήμα 2.2-32 b) στο κέντρο της υφιστάμενης σήραγγας κατά τη διαμήκη διεύθυνση, πριν (εικόνες στα αριστερά στο Σχήμα 2.2-32) και μετά (εικόνες στα δεξιά του Σχήματος 2.2-32) την κατασκευή της νέας σήραγγας. Οι θέσεις της επένδυσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και των αγκυρίων βράχου που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2-32 υποδεικνύονται από τη γωνία σε πολικές συντεταγμένες και η αντίστοιχη σχέση μεταξύ της γωνίας και της θέσης τοποθέτησης φαίνεται στο Σχήμα 2.2-31 α και β για την επένδυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και των αγκυρίων, αντίστοιχα.

Η σύγκριση μεταξύ των αρχικών και τελικών τάσεων υποδεικνύει ότι η κατασκευή της νέας σήραγγας επηρεάζει σημαντικά τις τάσεις στο υπάρχον σύστημα υποστήριξης της υφιστάμενης σήραγγας. Οι εφελκυστικές τάσεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην περιοχή των παρειών της υφιστάμενης σήραγγας μειώνονται λόγω της κατασκευής της νέας σήραγγας και η επιρροή αυτή είναι περισσότερο εμφανής στην παρειά που βρίσκεται από τη μεριά της νέας σήραγγας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2-32 a. Οι θλιπτικές τάσεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οι οποίες τοποθετούνται στη στέψη της υφιστάμενης σήραγγας, μειώνονται, επίσης. Κατ' επέκταση, είναι λογικό να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η κατασκευή της νέας σήραγγας οριζοντίως παράλληλη στην προϋπάρχουσα με μια ορισμένη απόσταση (30m) δεν έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην υφιστάμενη επένδυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Ο λόγος είναι ότι υπάρχουν σχετικά υψηλές οριζόντιες γεωστατικές τάσεις στην περιοχή του Σύδνεϋ, οι οποίες μεταβάλλουν τις τάσεις γύρω από το άνοιγμα της σήραγγας από εφελκυστικές σε θλιπτικές στη στέψη και από θλιπτικές σε εφελκυστικές στις παρειές.

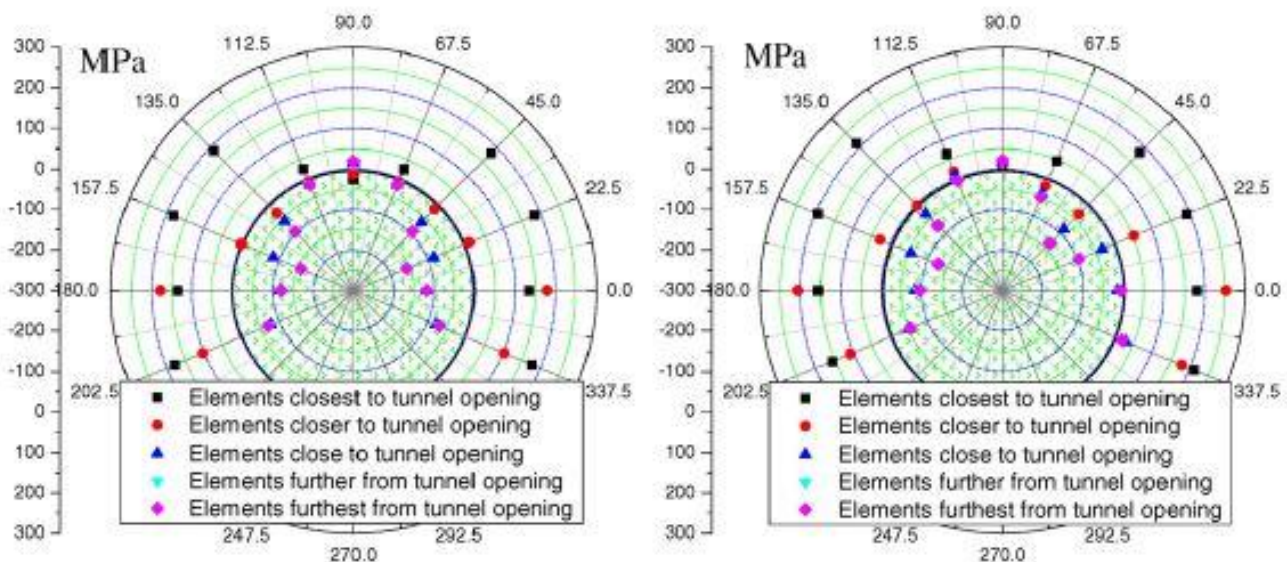
Επιπλέον, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2-32 b, η κατασκευή της νέας σήραγγας επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα υφιστάμενα αγκύρια που βρίσκονται στην πλευρά της προϋπάρχουσας σήραγγας και πλησιέστερα προς τη νέα σήραγγα, όπου οι εφελκυστικές τάσεις στα σημεία των αγκυρίων που βρίσκονται στην πλευρά αυτή αυξάνονται και μερικά σημεία τα οποία αρχικώς συμπιέστηκαν, τώρα υφίστανται εφελκυσμό. Τα υφιστάμενα αγκύρια που τοποθετούνται αντίθετα σε σχέση με τη νέα σήραγγα επηρεάζονται ελαφρώς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2-32b.



Σχήμα 2.2-31: Παρακολουθούμενες περιοχές του υφιστάμενου συστήματος υποστήριξης (Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P., 2007).



a) Shotcrete lining at the centre of the existing support system (refer to Fig. 8a)



b) Rock bolts at the centre of the existing support system (refer to Fig. 8c: the element closest to the existing tunnel opening represents the part of rock bolt closest to the existing tunnel opening, the element furthest from the existing tunnel opening represent the part of rock bolt furthest from the existing tunnel opening, and so on)

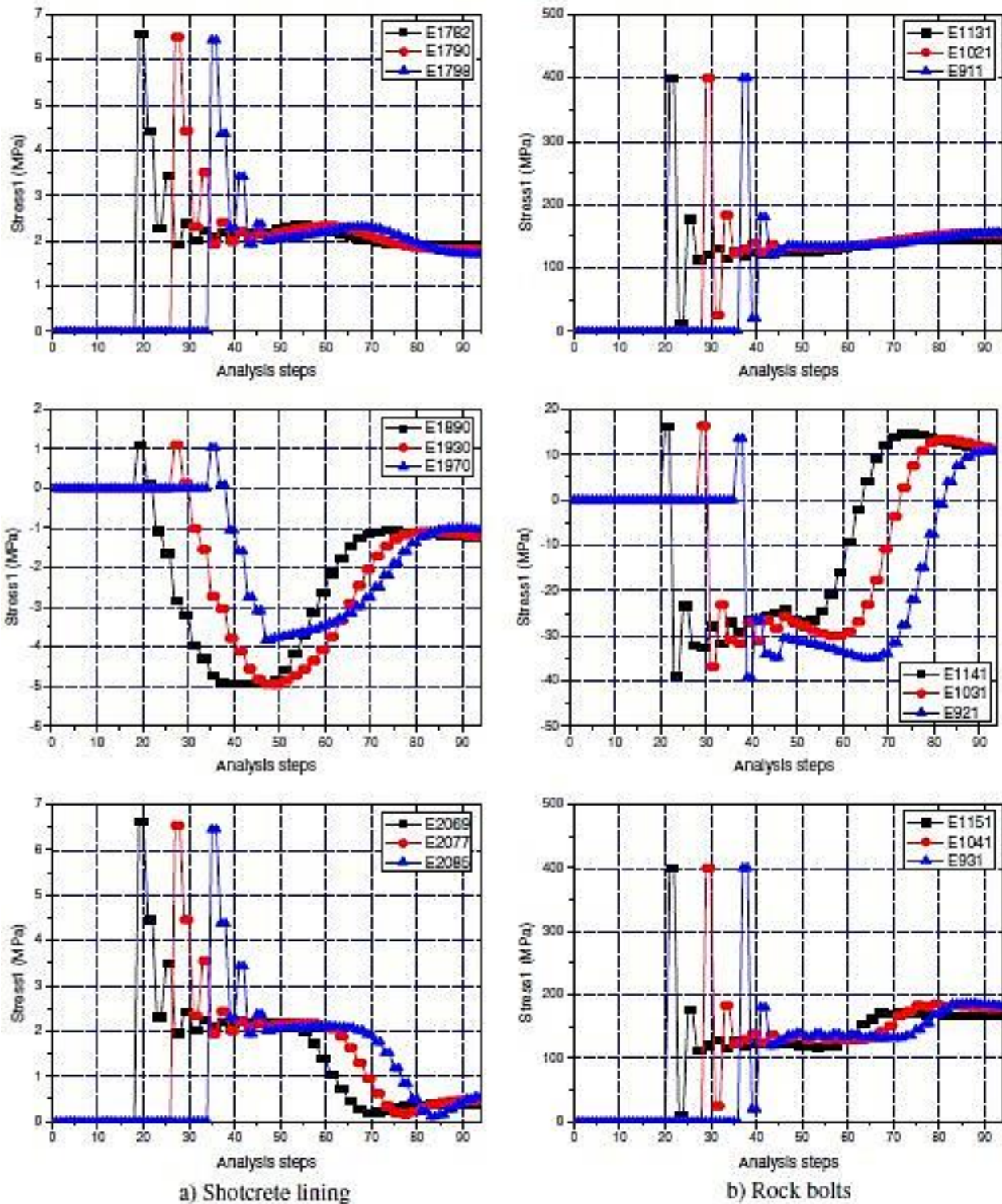
Σχήμα 2.2-32: Τάσεις στις παρακολουθούμενες περιοχές (οι οποίες αναφέρονται στο Σχήμα 2.2-31) του υφιστάμενου συστήματος υποστήριξης, πριν (εικόνες στα αριστερά) και μετά (εικόνες στα δεξιά) την κατασκευή της νέας σήραγγας (Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P., 2007).

Το Σχήμα 2.2-33 παρουσιάζει την επιρροή της εκσκαφής στο υπάρχον εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στα υφιστάμενα αγκύρια στις περιοχές που παρακολουθήθηκαν. Στον άξονα των x βρίσκεται το βήμα της ανάλυσης και στον άξονα των y η μέγιστη κύρια τάση σε MPa. Τα βήματα 1 – 48 είναι εκείνα τα οποία απαιτούνται στο Στάδιο I (Stage I) για την παραγωγή των αρχικών πεδίων τάσεων και παραμορφώσεων για το υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης, ενώ τα βήματα 49 – 94 ανταποκρίνονται στα βήματα της ανάλυσης του Σταδίου II (Stage II) για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης της εκσκαφής της νέας

σήραγγας στο υπάρχον σύστημα υποστήριξης. Η διακύμανση της τάσης στο 1^ο στάδιο υποδηλώνει ότι όταν τα πεπερασμένα στοιχεία της υποστήριξης έχουν μόλις τοποθετηθεί, παραλαμβάνουν σχεδόν μηδενικά φορτία. Καθώς το μέτωπο εκσκαφής προχωρά, υφίστανται κυκλική φόρτιση και αποφόρτιση. Δηλαδή στα επόμενα βήματα εκσκαφής φέρουν μεγαλύτερα φορτία και στα επόμενα βήματα υποστήριξης φέρουν μικρότερα φορτία. Καθώς το μέτωπο εκσκαφής απομακρύνεται από αυτά, οι τάσεις στην επένδυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και στα αγκύρια γίνεται σταθερή.

Η ανάλυση της διακύμανσης των τάσεων στο 2^ο στάδιο υποδηλώνει ότι η διαδικασία εκσκαφής της νέας σήραγγας επηρεάζει το υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης (εκτοξευόμενου σκυροδέματος και αγκυρίων) της γειτονικής σήραγγας με τους ακόλουθους τρόπους:

- i. Προτού το μέτωπο εκσκαφής πλησιάσει τις μετρούμενα σημεία, η επίδραση της διάνοιξης στις τάσεις της υφιστάμενης υποστήριξης είναι πολύ μικρή.
- ii. Όταν το μέτωπο εκσκαφής πλησιάζει, περνά και απομακρύνεται από τα μετρούμενα σημεία, παρατηρείται σημαντική επιρροή: καταγράφονται αξιοσημείωτες μειώσεις των εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στα σημεία των παρειών (E1782, E1790, E1798, E2069, E2077 και E2085) και της στέψης (E1890, E1930 και E1970), αντίστοιχα, για την υφιστάμενη σήραγγα. Αξιοσημείωτη αύξηση της εφελκυστικής τάσης παρατηρείται στα αγκύρια (στα σημεία κοντά στο άνοιγμα της σήραγγας) και στις παρειές (E1131, E1021, E911, E1151, E1041 και E931) στην υφιστάμενη σήραγγα, ενώ αξιοσημείωτη μείωση της θλιπτικής τάσης παρατηρείται στα αγκύρια της στέψης (E1141, E1031 και E921) για την προϋπάρχουσα σήραγγα. Εξάλλου, διακρίνεται ότι η επιρροή στο υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης είναι περισσότερο εμφανής στην πλευρά όπου διανοίγεται η νέα σήραγγα (E2069, E2077 και E2085, E1151, E 1041 και E931) από ότι σε εκείνα που βρίσκονται στην αντίθετη πλευρά (E1782, E1790 και E1798, E1131, E1021 και E911).
- iii. Αφού το μέτωπο απομακρυνθεί από το υπάρχον σύστημα υποστήριξης, η επιρροή προοδευτικά παύει να υφίσταται.



Σχήμα 2.2-33: Επιδράσεις της διάνοιξης στο υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης (Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P., 2007).

2.2.9.4. Συμπεράσματα

Οι Liu H.Y., Small J.C. & Carter J.P. (2007) καταλήγουν, μεταξύ άλλων, στα ακόλουθα συμπεράσματα.

- i. Η διάνοιξη μιας νέας σήραγγας επιδρά στο υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης μιας γειτονικής σήραγγας. Η επίδραση είναι σημαντική όταν το μέτωπο εκσκαφής περνά δίπλα από το υπάρχον σύστημα υποστήριξης και καθίσταται αμελητέα όταν το μέτωπο είναι μακριά από αυτό. Επιπλέον, λόγω της παρουσίας της προϋπάρχουσας σήραγγας, η υφιστάμενη υποστήριξη που τοποθετείται στην πλευρά κοντά στη νέα σήραγγα επηρεάζεται περισσότερο από την εκσκαφή της νέας σήραγγας σε σχέση με την υποστήριξη που βρίσκεται από την αντίθετη μεριά.
- ii. Όταν μια νέα σήραγγα ορύσσεται παράλληλα κατά τον οριζόντιο άξονα σε μια υφιστάμενη σήραγγα σε επαρκή απόσταση και σε μια περιοχή όπως το Σύδνεϋ με σχετικά υψηλές οριζόντιες γεωστατικές τάσεις, η διάνοιξη της νέας σήραγγας δε θα προκαλέσει σημαντικές δυσμενείς επιπτώσεις στο υπάρχον σύστημα υποστήριξης, καθώς τόσο η εφελκυστική τάση στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που τοποθετείται στις παρειές της υφιστάμενης σήραγγας όσο και η θλιπτική τάση στη στέψη μειώνονται, παρόλο που παρατηρείται αύξηση της θλιπτικής τάσης σε κάποια σημεία των υφιστάμενων αγκυρίων.

2.2.10. Chen S.L., Lee S.C., Gui M.W., 2008

Σκοπό της συγκεκριμένης έρευνας αποτελεί η αριθμητική διερεύνηση της επίδρασης των πλατών πυλώνων στη συμπεριφορά των σηράγγων που αποτελούνται από τρεις ή τέσσερις παράλληλους κλάδους, κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης σχετίζονται, όχι μόνο με τις γεωλογικές συνθήκες και τη διατομή των σηράγγων, αλλά ακόμη με τα πλάτη του πυλώνα. Όσο το πλάτος του πυλώνα μειώνεται, το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης καθίσταται περισσότερο εμφανές.

Για τη διερεύνηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, οι Chen S.L., Lee S.C. & Gui M.W. (2008) μελέτησαν τη διάνοιξη της οδικής σήραγγας XueShan στην Ταιβάν, πραγματοποιώντας διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με το πρόγραμμα PLAXIS ver 7.2.

2.2.10.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Σύμφωνα με τα αρχικά σχέδια, το μεγαλύτερο μέρος της εκσκαφής θα γινόταν με μηχανικά μέσα (TBM), εξαιρουμένου του στομίου το οποίο θα διανοιγόταν με τη μέθοδο της διάτρησης και ανατίναξης. Κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, η διάνοιξη με TBM διακόπηκε αναγκαστικά, λόγω αιφνίδιας κατάρρευσης της σήραγγας. Ένα επιπρόσθετο κομμάτι παράκαμψης μεταξύ της μίας εκ των κύριων σηράγγων και της πιλοτικής σήραγγας εκσκάφθηκε, προκειμένου να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο συμβάν. Ως αποτέλεσμα, δημιουργήθηκε ένα νέο δίκτυο από τρεις και τέσσερις παράλληλους κλάδους. Στην περιοχή, όμως, των στομίων των σηράγγων, λόγω περιορισμών της οδοποιίας, υπεβλήθη η κατασκευή μόνο δύο κλάδων και σε πολύ κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Κατ' επέκταση, η μελέτη αυτή αναφέρεται στην αλληλεπίδραση δίδυμων σηράγγων, για μεταβαλλόμενο πλάτος πυλώνων.

2.2.10.2. Γεωμετρικά & γεωλογικά στοιχεία

Η σήραγγα XueShan έχει μήκος 12.9 km και αποτελεί την πέμπτη μεγαλύτερη σε μήκος σήραγγα στον κόσμο. Η κατασκευή αποτελείται από δύο κύριες σήραγγες και μία πιλοτική, η οποία χρησίμευσε για τη γεωλογική παρακολούθηση κατά τη διάρκεια της κατασκευής, ενώ χρησιμεύει για λόγους συντήρησης και ως έξοδος έκτακτης ανάγκης στη διάρκεια της λειτουργίας. Εκτός από τις κύριες και πιλοτικές σήραγγες, τρεις ομάδες από δίδυμα κατακόρυφα φρέατα αερισμού κατασκευάστηκαν εντός των 12.9km. Οι γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της εκσκαφής ήταν περίπλοκες. Το μέγιστο ύψος υπερκειμένων ήταν 750m, ενώ συναντήθηκαν έξι κύρια ρήγματα, πολυάριθμες ζώνες διάρρηξης και υψηλές πιέσεις υπόγειων υδάτων. Ως εκ τούτου, κατά τη διάρκεια της κατασκευής αντιμετωπίστηκαν αρκετά προβλήματα που περιλάμβαναν καταρρεύσεις και εισροές υδάτων.

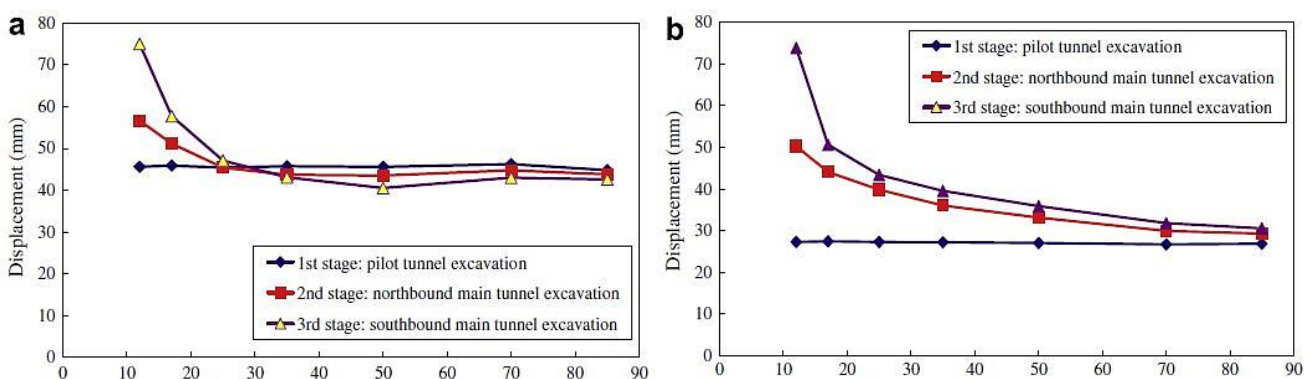
Κατά τη διάρκεια της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε τόσο μηχανική όρυξη, καθώς επίσης διάνοιξη με συμβατικά μέσα. Η διατομή, η οποία διανοίχθηκε με συμβατικά μέσα, είχε πεταλοειδές σχήμα, ενώ αυτή που διανοίχθηκε με μηχανικά μέσα (TBM), κυκλικό, διαμέτρου 12m και 5m για την κύρια και την πιλοτική σήραγγα αντίστοιχα. Ακόμη, η περιοχή εκσκαφής για την κύρια σήραγγα και για τις πιλοτικές σήραγγες ήταν 110m² και 18m² αντίστοιχα. Η προαναφερθείσα γεωμετρία είναι διαφορετική από αυτή που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις, λόγω της διαδικασίας παραγωγής του πλέγματος (mesh)

στο λογισμικό. Τα ακόλουθα αποτελέσματα αναφέρονται σε τρία διαφορετικά τμήματα της σήραγγας, εξετάζοντας την επίδραση του πλάτους του πυλώνα στην εξέλιξη των παραμορφώσεων.

2.2.10.3. Τρεις παράλληλοι κλάδοι

Η απόσταση μεταξύ των δύο κύριων σηράγγων, από κέντρο σε κέντρο, ήταν αρχικά 60m, αλλά αυτή η απόσταση μειώθηκε σταδιακά στα 42m προς το τμήμα του στομίου, λόγω των περιορισμών της οδοποιίας. Σε αυτή την περίπτωση, λοιπόν, μελετήθηκε το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης τριών κλάδων, προκειμένου να διερευνηθεί η εξέλιξη των παραμορφώσεων στις επενδύσεις των σηράγγων, για μεταβαλλόμενα πλάτη πυλώνα. Το ύψος υπερκειμένων λήφθηκε ίσο με 300m, η βραχόμαζα χαρακτηρίστηκε ως πτωχής ποιότητας και ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων K_0 , ίσος με 1.0. Η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου δε συμπεριλήφθηκε στη συγκεκριμένη ανάλυση.

Τα φαινόμενα μελετήθηκαν για αποστάσεις μεταξύ της κύριας και της πιλοτικής σήραγγας, από 12 – 85m. Η αλληλουχία αυτής της – τριών κλάδων – κατασκευής περιλάμβανε αρχικά εκσκαφή της πιλοτικής σήραγγας, ακολουθούμενη από τη βόρεια κύρια σήραγγα και τέλος από την εκσκαφή της νότιας κύριας σήραγγας. Τα φαινόμενα διερευνήθηκαν τόσο για την πεταλοειδή διατομή, όσο και για την κυκλική διατομή. Στα επόμενα διαγράμματα (Σχήμα 2.2-34) παρατίθεται η εξέλιξη των μετακινήσεων που αφορούν στους τρεις κλάδους καθώς μεταβάλλεται το πλάτος του πυλώνα, για πεταλοειδή και κυκλική διατομή.



Σχήμα 2.2-34: Εξέλιξη των μετακινήσεων των τριών κλάδων για μεταβαλλόμενο πλάτος πυλώνα: (α) Για πεταλοειδή διατομή και (β) Για κυκλική διατομή (Chen, Lee, Gui, 2008).

Σύμφωνα με αυτά τα διαγράμματα, προκύπτει ότι:

- i. Σε γενικές γραμμές, η κυκλικής διατομής σήραγγα παράγει μικρότερου μεγέθους μετατοπίσεις συγκριτικά με την πεταλοειδούς διατομής, σε όλα τα στάδια εκσκαφής. Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, όμως, μεταξύ των γειτονικών σηράγγων κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων εκσκαφής, όταν πρόκειται για την κυκλική διατομή, είναι περισσότερο εμφανές σε σχέση με την πεταλοειδή διατομή.
- ii. Για την πεταλοειδή διατομή και για καθαρό πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο των 30m, η αλληλεπίδραση μεταξύ των γειτονικών σηράγγων κατά τη διάρκεια της εκσκαφής παραμένει ανεπηρέαστη. Παρ' όλα αυτά, όταν το καθαρό πλάτος πυλώνα είναι λιγότερο από 30m, η αλληλεπίδραση αυξάνεται σημαντικά. Κατά συνέπεια, η σπουδαιότητα του πλάτους του πυλώνα μεταξύ των σηράγγων, δε μπορεί να αγνοηθεί και αν για λόγους περιορισμού στο χώρο το πλάτος αυτό δε μπορεί να διατηρηθεί σε ένα ελάχιστο επίπεδο, τότε δύναται να χρειαστεί ενίσχυση της βραχόμαζας με τσιμεντενέσεις, είτε επιπρόσθετη υποστήριξη, όπως εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χαλύβδινες νευρώσεις για τη σταθεροποίηση της σήραγγας.

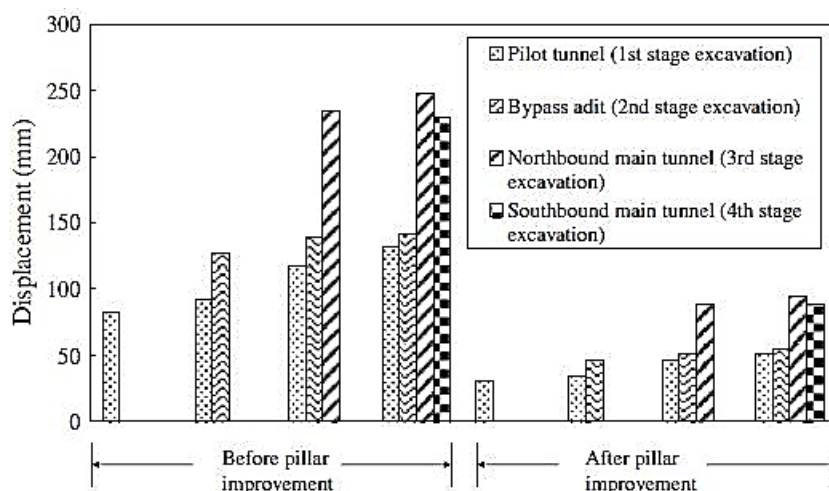
2.2.10.4. Τέσσερις παράλληλοι κλάδοι

Η ετερογένεια και η πολυπλοκότητα των γεωλογικών συνθηκών σε συνδυασμό με τη μαζική εισροή υπόγειων υδάτων υψηλής πίεσης, προκάλεσε αλληπάλληλες καταρρεύσεις στις σήραγγες κατά τη διάρκεια της κατασκευής των τριών κλάδων. Σε ένα σοβαρό περιστατικό, το TBM παγιδεύτηκε εντός της πιλοτικής σήραγγας και για τη διάσωσή του κατασκευάστηκε μεταξύ της κύριας σήραγγας και της πιλοτικής, μία νέα, βοηθητική σήραγγα. Κατά αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκε ένα σύστημα από τέσσερις παράλληλους κλάδους, το οποίο και μελετήθηκε.

Η βραχόμαζα χαρακτηρίστηκε ως πτωχής ποιότητας, το ύψος των υπερκειμένων λήφθηκε 300m, η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα εντοπίζονταν στα 100m βάθος και ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων K_0 , ήταν 1.0. Η αλληλουχία των εκσκαφών είχε ως εξής: εκσκαφή της πιλοτικής σήραγγας, παγίδευση του TBM και εκσκαφή της βοηθητικής σήραγγας, εκσκαφή της αριστερής, βόρειας σήραγγας και τέλος εκσκαφή της δεξιάς, νότιας σήραγγας.

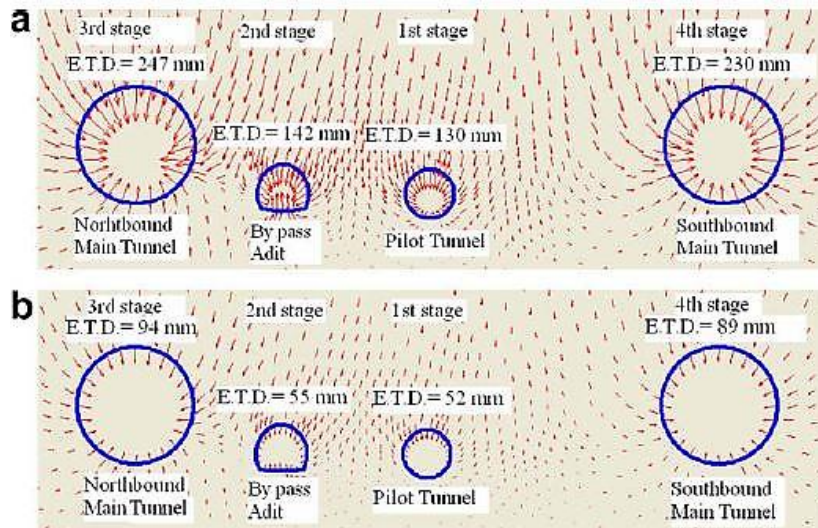
Με βάση τα παραπάνω, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις οι οποίες κατέληξαν σε μη αποδεκτές παραμορφώσεις. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη μετατόπιση της πιλοτικής σήραγγας στην πρώτη εκσκαφή ήταν 82mm, ενώ αν η εκσκαφή συνεχιζόταν χωρίς την ενίσχυση της βραχώμαζας, οι μέγιστες μετακινήσεις των δύο κύριων κλάδων θα ήταν 247mm και 230mm αντίστοιχα. Για αυτό τον έλεγχο των παραμορφώσεων, πραγματοποιήθηκαν εργασίες αποστραγγίσεως των υπόγειων υδάτων και ενίσχυση της βραχώμαζας με τσιμεντενέσεις. Οι τελικές συγκλίσεις του βόρειου και νότιου κλάδου, ύστερα από τις ενέργειες αυτές, ήταν 94mm και 89mm αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 2.2-35 φαίνονται οι μέγιστες μετακινήσεις για τον κάθε ένα από τους τέσσερις παράλληλους κλάδους, πριν και μετά από τη βελτίωση της βραχώμαζας, κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων εκσκαφής. Από το σχήμα γίνεται αντιληπτή και είναι σαφής η σημαντική μείωση των μετακινήσεων σε σχέση με τις μετακινήσεις που εμφανίζονταν πριν από την ενίσχυση της βραχώμαζας.



Σχήμα 2.2-35: Μέγιστες μετακινήσεις για κάθε έναν από τους τέσσερις κλάδους της σήραγγας και κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων εκσκαφής (Chen, Lee, Gui, 2008).

Χαρακτηριστική παρουσιάζεται και η διαφορά των διανυσμάτων συνολικής μετατόπισης για κάθε έναν από τους κλάδους, πριν και μετά από τη βελτίωση του γεωυλικού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2-36.



Σχήμα 2.2-36: Διανύσματα τελικών μετατοπίσεων των τεσσάρων παράλληλων κλάδων, (a) πριν και (b) μετά από τη βελτίωση του γεωυλικού (Chen, Lee, Gui, 2008).

2.2.10.5. Δύο παράλληλοι κλάδοι και εφαρμογή της μεθόδου Central Pillar Gallery

Λόγω των περιορισμών που επιβάλλει η οδοποιία καθώς επίσης η ανάγκη για τη μείωση των καταστροφικών αποτελεσμάτων στο περιβάλλον, ενίοτε οι παράλληλες σήραγγες οφείλουν να βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους οδηγώντας έτσι σε ένα στενό πλάτος πυλώνα.

Στην περίπτωση της σήραγγας XueShan στην περιοχή των στομίων τα υπερκείμενα δεν είχαν μεγάλο πάχος και οι γεωλογικές συνθήκες ήταν δυσμενείς, με τη βραχώμαζα αποσαθρωμένη και κερματισμένη. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν ενδεχόμενα προβλήματα αστάθειας, εφαρμόστηκε μία ελάχιστα διαδεδομένη στον κόσμο μέθοδος, η central – pillar – gallery tunneling method. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει εκσκαφή της περιοχής που θα αποτελέσει τον πυλώνα μεταξύ των σηράγγων, προτού ξεκινήσει η εκσκαφή των κύριων κλάδων. Στη συνέχεια, στην περιοχή αυτή πραγματοποιείται επανεπίχωση με σκυρόδεμα και ακολουθεί η διάνοιξη των δύο κλάδων. Για την περίπτωση που εξέτασαν οι Chen, Lee S.C & Gui, η απόσταση μεταξύ των δύο κύριων κλάδων είναι 16m, ενώ το μέσο πάχος υπερκειμένων (δεδομένου ότι το τοπογραφικό ανάγλυφο είναι

ακανόνιστο), είναι 20m. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν τόσο για μη εφαρμογή της μεθόδου central – pillar – gallery, όσο και για εφαρμογή αυτής.

Στον Πίνακα 2.2-3 παρατηρείται σημαντική μείωση των μέγιστων μετακινήσεων και για τους δύο κλάδους ύστερα από τη βελτίωση του πυλώνα.

Πίνακας 2.2-3: Επίδραση της βελτίωσης του πυλώνα στις μετακινήσεις των δύο κύριων κλάδων, κατά τη διάρκεια της εκσκαφής (Chen, Lee, Gui, 2008).

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

Από τη συγκεκριμένη μελέτη, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- i. Το πλάτος του πυλώνα αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο στο σχεδιασμό και την κατασκευή δίδυμων σηράγγων καθώς αυτό καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την εξέλιξη των παραμορφώσεων. Με βάση την έρευνα αυτή, αν το πλάτος του πυλώνα μεταξύ γειτονικών σηράγγων διατηρηθεί μεγαλύτερο από 2B και υπό κανονικές γεωλογικές συνθήκες, τότε δεν υπάρχουν σημαντικά φαινόμενα αλληλεπίδρασης
- ii. Παρόλο που το μέγεθος των μετακινήσεων είναι μικρότερο για κυκλικής διατομής σήραγγα από ότι για πεταλοειδούς διατομής, τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης μεταξύ των γειτονικών σηράγγων επηρεάζουν περισσότερο την κυκλική σήραγγα, ειδικά εάν το καθαρό πλάτος πυλώνα είναι μικρότερο από 2B.
- iii. Αν η κατασκευή απαιτεί μικρό πλάτος πυλώνα, τότε μπορεί να χρειαστούν τεχνικές βελτίωσης της βραχώμαζας, όπως συστήματα αποστράγγισης και τσιμεντενέσεις
- iv. Σε ορισμένες περιπτώσεις όπως κατά την κατασκευή των σηράγγων στην περιοχή του στομίου, χρειάζεται ειδική αντιμετώπιση η οποία μπορεί να οδηγήσει ακόμη και στην πλήρη αντικατάσταση του υλικού του πυλώνα (central – pillar – gallery tunneling method).

2.2.11. 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 (πλάτος πυλώνα) και του μέτρου ελαστικότητας.

2.2.11.1. Αριθμητικές αναλύσεις

Αναφορικά στη γεωμετρική απεικόνιση, η Μπεκρή (2012) επιλέγει σήραγγες κυκλικής διατομής διαμέτρου $D = 10\text{m}$, ενώ η διάνοιξη πραγματοποιείται με ολομέτωπη εκσκαφή σε ομοιογενή σχηματισμό. Η άμεση υποστήριξη αποτελείται από κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος και η βασική παράμετρος διαφοροποίησης των προσομοιωμάτων είναι η απόσταση W μεταξύ των δύο κλάδων, μετρούμενη από παρειά σε παρειά. Η απόσταση αυτή λαμβάνει τιμές $W = 0.5D = 5\text{m}$, $W = D = 10\text{m}$, $W = 2D = 20\text{m}$, ενώ το ύψος των υπερκειμένων γαιών είναι $H = 40\text{m}$. Το βήμα εκσκαφής λαμβάνεται ίσο με $\beta = 1\text{m}$ και η διάνοιξη πραγματοποιείται και για τους δύο κλάδους με φορά από $y = 0\text{m}$ έως $y = 50\text{m}$.

Αναφορικά στην αλληλουχία των εκσκαφών, επιλέγεται διαδοχική εκσκαφή των δυο κλάδων. Αρχικά εξελίσσεται η εκσκαφή του αριστερού κλάδου και ύστερα από την ολοκλήρωση αυτής ακολουθεί η εκσκαφή του δεξιού. Η πρακτική αυτή προτιμάται από την ταυτόχρονη εκσκαφή των δυο κλάδων, καθώς επιδιώκεται να διερευνηθεί η επίδραση της διάνοιξης του δεύτερου κλάδου στον αρχικό.

Στις αναλύσεις διαφοροποιούνται ορισμένες από τις βασικές παραμέτρους της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας του γεωυλικού, οι οποίες καθορίζουν και τη συμπεριφορά του. Για το συντελεστή οριζόντιων τάσεων K_0 , επιλέγεται τιμή ίση με 0.7 για όλες τις σειρές των αναλύσεων ($K_0 = 0.7$), ενώ το ειδικό βάρος του γεωυλικού λαμβάνεται ίσο με 0.025MN/m^3 .

Οι γεωτεχνικές παράμετροι της περιβάλλουσας βραχώμαζας ποσοτικοποιούνται αρχικά μέσω του κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown. Ύστερα από την ποσοτικοποίηση των γεωτεχνικών παραμέτρων σε όρους του κριτηρίου Hoek – Brown ακολουθεί η συσχέτιση αυτού με το κριτήριο Mohr – Coulomb (Μπεκρή, 2012).

2.2.11.2. Γεωτεχνικές παράμετροι

Ο γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI κυμαίνεται από 10 έως 40, για την αντοχή του άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη επιλέγεται ένα εύρος τιμών, από 8 MPa έως 20 MPa και η σταθερά m_i , λαμβάνει την τιμή 6. Ο συντελεστής διατάραξης της βραχώμαζας D είναι ίσος με μηδέν ($D = 0$) και η τιμή του λόγου Poisson της βραχώμαζας διατηρείται σταθερή σε όλες τις αναλύσεις, ίση με 0.3 ($\nu = 0.3$). Ύστερα από το συσχετισμό του κριτηρίου Hoek – Brown με το κριτήριο Mohr – Coulomb προκύπτουν οι τιμές των ισοδύναμων παραμέτρων διατμητικής αντοχής. Το εύρος των τιμών της ισοδύναμης συνοχής της βραχώμαζας κυμαίνεται από 0.039 MPa έως 0.170 MPa, ενώ το εύρος της ισοδύναμης γωνίας τριβής από 23° έως 42° . Η διαστολικότητα του περιβάλλοντος γεωυλικού λαμβάνεται σε κάθε ανάλυση ίση με $\phi/6$ ($\delta = \phi/6$).

2.2.11.3. Παράμετροι άμεσης υποστήριξης

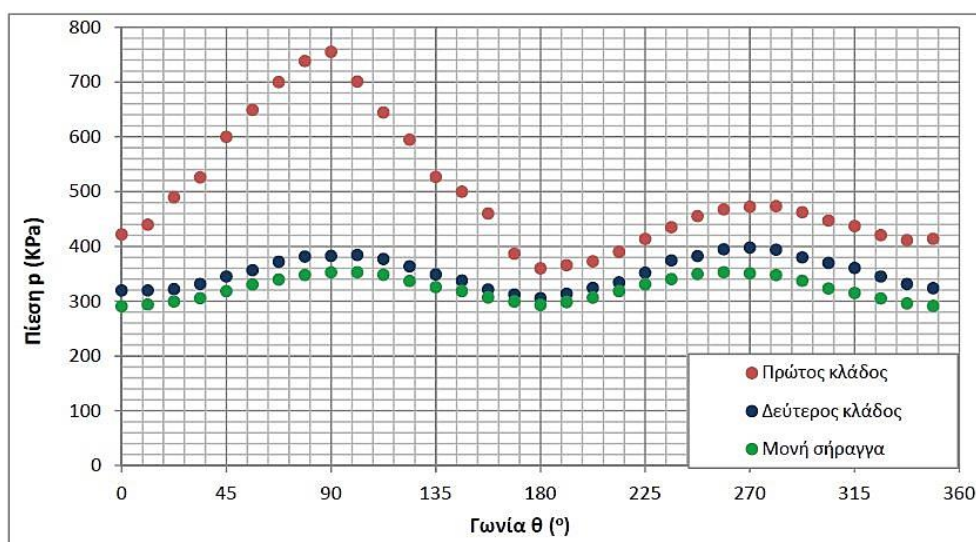
Στις αναλύσεις που πραγματοποιεί η Μπεκρή (2012) θεωρείται ότι η άμεση υποστήριξη αποτελείται από κέλυφος εκτοξευμένου σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα θεωρείται ότι παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά, με μέτρο ελαστικότητας $E=20000$ MPa και λόγο Poisson $\nu = 0.2$. Το πάχος του εκτοξευμένου σκυροδέματος λαμβάνεται ίσο με $d_{sh}=0.20$ m, ενώ το ειδικό βάρος του ίσο με $\gamma_{sh}=0.025$ MN/m³.

2.2.11.4. Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

Η Μπεκρή (2012) παρουσιάζει μια σειρά αποτελεσμάτων τα οποία αναφέρονται στις πιέσεις που δέχεται η άμεση υποστήριξη των σηράγγων και στις μετακινήσεις των εδαφικών στοιχείων, συναρτήσει: i) της απόστασης από το μέτωπο εκσκαφής, ii) της γωνίας θ (με θετική φορά την ωρολογιακή) των σηράγγων και iii) του βήματος εκσκαφής. Ταυτόχρονα συνδυάζει τα αποτελέσματα με τις επικρατούσες γεωτεχνικές συνθήκες, τα διάφορα πλάτη πυλώνων και τα διάφορα μεγέθη μέτρων ελαστικότητας που μελέτησε στα

πλαίσια της έρευνάς της. Ενδεικτικά στη συνέχεια, παρατίθενται τα κυριότερα από τα αποτελέσματα αυτά.

Στο Σχήμα 2.2-37 εμφανίζονται οι κατανομές των πιέσεων περί τη χαρακτηριστική διατομή του κάθε κλάδου. Στην περίπτωση διάνοιξης μονής σήραγγας, η κατανομή της φόρτισης είναι συμμετρική. Αντίθετα, στην περίπτωση διάνοιξης δίδυμης σήραγγας διαπιστώνεται ασυμμετρία στη φόρτιση των δυο κλάδων. Στον αριστερό κλάδο, ο οποίος εκσκάπτεται πρώτος, η μέγιστη τιμή παρατηρείται στην παρειά των 90° ενώ στον δεξιό, που εκσκάπτεται δεύτερος, η μέγιστη τιμή παρατηρείται στην παρειά των 270°. Ουσιαστικά οι «εσωτερικές» παρειές των δυο κλάδων καταπονούνται περισσότερο σε σχέση με τις «εξωτερικές» παρειές (Μπεκρή, 2012).

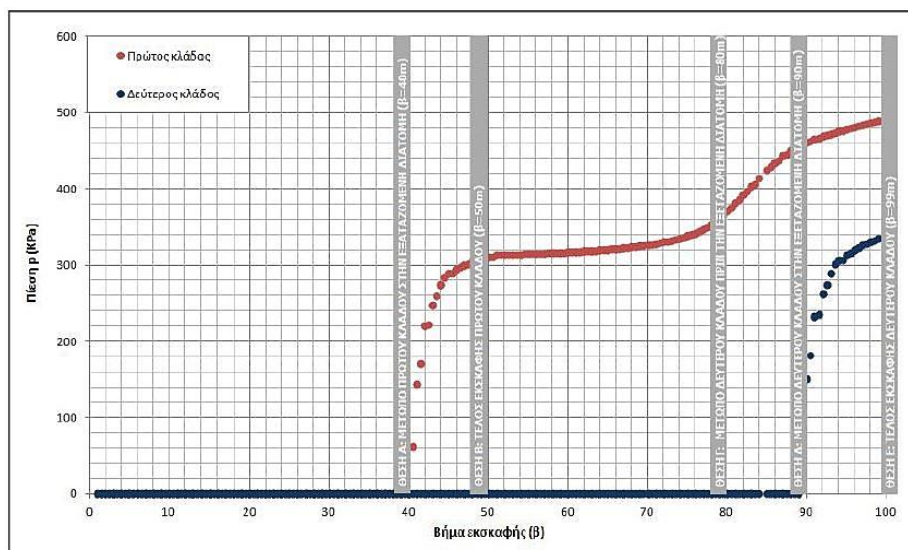


Σχήμα 2.2-37: Σύγκριση, περί τη χαρακτηριστική διατομή, των πιέσεων που αναπτύσσονται επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου της δίδυμης σήραγγας ($W=0.5D=5m$), του δεύτερου κλάδου αυτής, καθώς και της σήραγγας μονού κλάδου (Μπεκρή, 2012).

Στο Σχήμα 2.2-38 παρουσιάζεται η εξέλιξη των μέσων αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης κατά τη διάρκεια της εκσκαφής των δύο κλάδων, για τις διατομές A (η οποία ανήκει στον πρώτο κλάδο και απέχει 40m από την είσοδο της σήραγγας) και B (η οποία ανήκει στο δεύτερο κλάδο και απέχει 40m από το στόμιο).

Το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου αναλαμβάνει τις αναπτυσσόμενες πιέσεις αμέσως μετά τη τοποθέτηση του (Θέση A). Μέχρι το πέρας της εκσκαφής του πρώτου κλάδου (Θέση B), παρατηρείται αύξηση των αναπτυσσόμενων πιέσεων, καθώς η υποστήριξη περιορίζει την ανάπτυξη των μετακινήσεων των γύρω

κόμβων που προκαλεί η προχώρηση του μετώπου. Στα επόμενα βήματα ($50^\circ - 70^\circ$), όπου το μέτωπο της δεύτερης εκσκαφής βρίσκεται μακριά από την εξεταζόμενη διατομή του πρώτου κλάδου, η τιμή της μέσης πίεσης είναι πρακτικά σταθερή. Καθώς, η δεύτερη εκσκαφή πλησιάζει σημειώνεται αύξηση της πίεσης, γεγονός που μαρτυρά την επίδραση της δεύτερης εκσκαφής στη πρώτη. Αξιοσημείωτη είναι η επίδραση του δεύτερου κλάδου στον πρώτο από τη στιγμή που το δεύτερο μέτωπο βρίσκεται $10m = D$ πριν τη διατομή (Θέση Γ) μέχρι τη στιγμή που περνάει δίπλα από τη διατομή (Θέση Δ) (Μπεκρή, 2012).

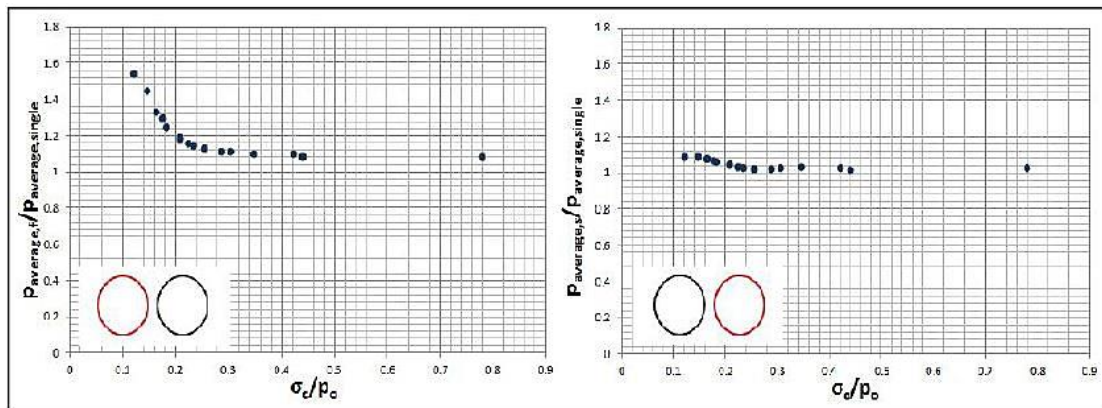


Σχήμα 2.2-38: Εξέλιξη των αναπτυσσόμενων μέσων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, κατά τη συνολική διάρκεια της εκσκαφής, για διατομές των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας που βρίσκονται σε απόσταση 40m από την είσοδο της σήραγγας και για $W=0.5D=5m$ (Μπεκρή, 2012).

Η Μπεκρή (2012), συγκρίνοντας τις κατανομές των μέσων πιέσεων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2-39 διαπιστώνει ότι η μορφή της καμπύλης που αντιστοιχεί στον πρώτο κλάδο είναι εκθετική με μειούμενο ρυθμό μείωσης ενώ η καμπύλη που αντιστοιχεί στο δεύτερο κλάδο προσεγγίζει την ευθεία γραμμή. Οι βελτιωμένες γεωτεχνικές συνθήκες οδηγούν σε μείωση του λόγου των πιέσεων και συνεπώς σε μείωση των αναπτυσσόμενων φορτίσεων. Όσο οι γεωτεχνικές συνθήκες βελτιώνονται τόσο ο λόγος των πιέσεων τείνει στη μονάδα.

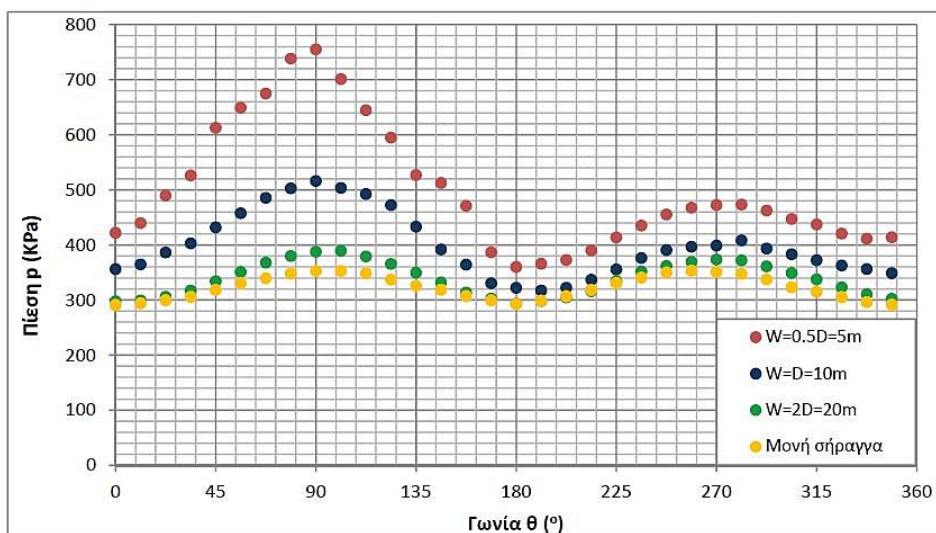
Το γεγονός αυτό αποδεικνύει πως καθώς η ποιότητα της βραχώμαζας βελτιώνεται, η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων τείνει να εκλείψει και συνεπώς αυτοί να λαμβάνονται ως δυο ανεξάρτητες κατασκευές. Επιπρόσθετα, η μεγαλύτερη διασπορά των σημείων του πρώτου διαγράμματος (η μέγιστη τιμή του λόγου των πιέσεων είναι ίση με 1.6) σε

σύγκριση με αυτά του δεύτερου (η μέγιστη τιμή του λόγου είναι ίση με 1.1), μαρτυρούν την μεγαλύτερη καταπόνηση λόγω πιέσεων του πρώτου κλάδου συγκριτικά με το δεύτερο.



Σχήμα 2.2-39: Κατανομή ανηγμένης μέσης πίεσης επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $P_{average,(f/s)}/P_{average,single}$, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_c (σ_c : αντοχή σε μονοαξονική θλίψη κατά Mohr – Coulomb με βάση τις ισοδύναμες τιμές συνοχής και γωνίας τριβής), για $W = 0.5D = 5m$ (Μπεκρή, 2012).

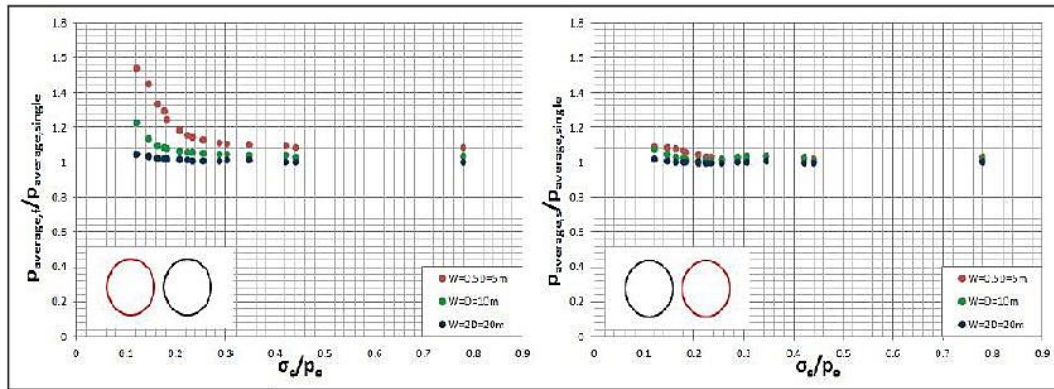
Στο Σχήμα 2.2-40 παρατηρείται έντονη ασυμμετρία φόρτισης στην περίπτωση που το πλάτος του πυλώνα λαμβάνει την ελάχιστη από τις εξεταζόμενες τιμές ($W = 0.5D = 5m$). Με αύξηση του πλάτους οι τιμές των αναπτυσσόμενων φορτίσεων τείνουν να λάβουν τις τιμές των αντίστοιχων πιέσεων της μονής σήραγγας και η κατανομή της φόρτισης τείνει να γίνει συμμετρική. Η αύξηση του πλάτους του πυλώνα συνεπάγεται μικρότερη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας κατά τη διάνοιξη και συνεπώς μικρότερη αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο κλάδων. Όταν η εγκάρσια απόσταση των δυο κλάδων είναι ίση με δυο διαμέτρους, πρακτικά αυτοί μπορούν να λαμβάνονται ως δυο μεμονωμένες κατασκευές και ο σχεδιασμός τους να γίνεται σύμφωνα με τα φορτία που προβλέπεται να αναπτυχθούν σε μια σήραγγα μονού κλάδου, για τις δεδομένες γεωτεχνικές συνθήκες (Μπεκρή, 2012).



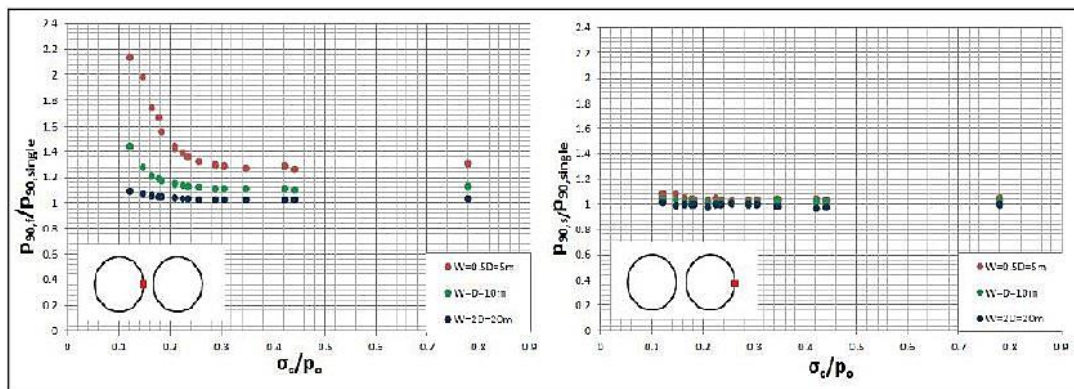
Σχήμα 2.2-40: Κατανομή των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, περί τη χαρακτηριστική διατομή, για τα τρία διαφορετικά προσομοιώματα ($W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$) (Μπεκρή, 2012).

Μελετώντας τις κατανομές των λόγων των μέσων πιέσεων (Σχήμα 2.2-41) η μείωση του πλάτους της βραχόμαζας που παρεμβάλλεται μεταξύ των δυο κλάδων της διδυμης σήραγγας προκαλεί αύξηση των πιέσεων που αναπτύσσονται περί των κελυφών της άμεσης υποστήριξης. Παρατηρείται, επιπρόσθετα, ότι οι λόγοι των μέσων πιέσεων για τα τρία διαφορετικά πλάτη διαφοροποιούνται λιγότερο έντονα και τείνουν να λάβουν την τιμή της μονάδας, καθώς η ποιότητα της περιβάλλουσας βραχόμαζας βελτιώνεται. Συνοψίζοντας, διαπιστώνεται ότι η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων γίνεται λιγότερο έντονη καθώς αυξάνεται η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των δυο κλάδων και καθώς βελτιώνεται η ποιότητα της βραχόμαζας στην οποία πραγματοποιείται η διάνοιξη (Μπεκρή, 2012).

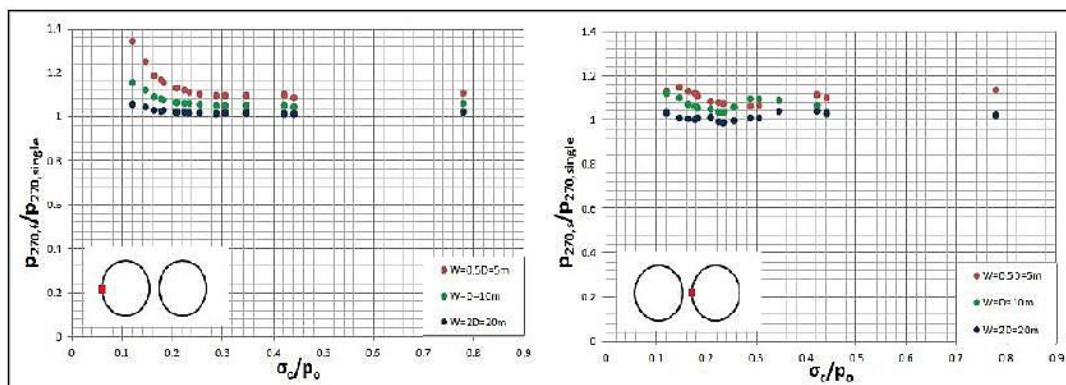
Σε όλα τα διαγράμματα αυτής της κατηγορίας, παρατηρείται ότι το εύρος του λόγου των πιέσεων του πρώτου κλάδου είναι πιο διευρυμένο σε σχέση με το αντίστοιχο του δεύτερου, γεγονός που επιβεβαιώνει την εντονότερη καταπόνηση του κελύφους του πρώτου κλάδου, από άποψη πιέσεων. Εξετάζοντας τις κατανομές των πιέσεων στη δεξιά παρειά (Σχήμα 2.2-42) των κλάδων ($\theta = 90^\circ$), ο λόγος των πιέσεων στην παρειά των 90° του πρώτου κλάδου λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με τους αντίστοιχους λόγους της μέσης πίεσης της παρειάς των 270° . Η παρειά αυτή είναι η εσωτερική του πρώτου κλάδου, συνεπώς καταπονείται περισσότερο κατά τη διάνοιξη του δεύτερου. Ανάλογο φαινόμενο σε μικρότερη κλίμακα παρατηρείται για την παρειά των 270° της διατομής του δεύτερου κλάδου (Σχήμα 2.2-43) (Μπεκρή, 2012).



Σχήμα 2.2-41: Κατανομή ανηγμένης μέσης πίεσης επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $P_{average,(f/s)}/P_{average,single}$, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_s/ρ_o , για $W=0.5D=5m$, $W = D = 10m$, $W = 2D = 20m$ (Μπεκρή, 2012).



Σχήμα 2.2-42: Κατανομή ανηγμένης πίεσης της δεξιάς παρειάς ($\theta = 90^\circ$) της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $P_{90,(f/s)}/P_{90,single}$, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_s/ρ_o , για $W = 0.5D = 5m$, $W = D = 10m$, $W = 2D = 20m$ (Μπεκρή, 2012).



Σχήμα 2.2-43: Κατανομή ανηγμένης πίεσης της αριστερής παρειάς της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $P_{270,(f/s)}/P_{270,single}$, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_s/ρ_o , για $W = 0.5D = 5m$, $W = D = 10m$, $W = 2D = 20m$ (Μπεκρή, 2012).

2.2.11.5. Συμπεράσματα

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

- i. Το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου της εκσκαφής καταπονείται εντονότερα σε σχέση με το κέλυφος του δεύτερου κλάδου.
- ii. Εξετάζοντας τη 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.
- iii. 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 ($\sigma_s/\rho_o = 0.4$) 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.
- iv. 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.

2.2.12. 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 πλατών πυλώνων (εγκάρσια απόσταση μεταξύ των παρειών των γειτονικών παράλληλων σηράγγων), (ii) γεωτεχνικές συνθήκες (παραμέτροι 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.

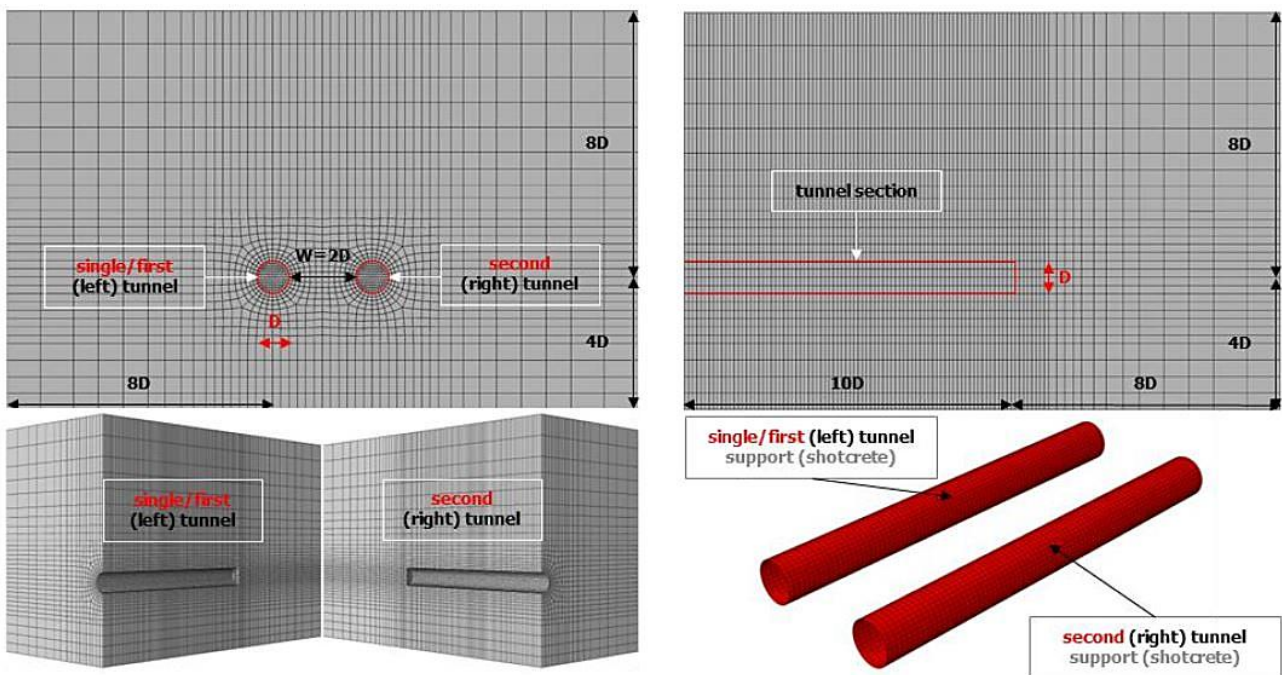
2.2.12.1. Αριθμητικές αναλύσεις

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 τιμές του πλάτους του πυλώνα που εξετάζονται είναι $W = 4\text{m} = 0.5D$, $8\text{m} = 1D$, $16\text{m} = 2D$, $24\text{m} = 3D$, $32\text{m} = 4D$, ενώ οι τιμές του ύψους υπερκείμενων είναι $H = 80\text{m} = 10D$ και $H = 160\text{m} = 20D$ μετρούμενα από το επίπεδο του άξονα της σήραγγας. Το αριθμητικό μοντέλο για πλάτος πυλώνα $W = 2D$ παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2-44.

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 υπερκειμένων 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 2.2-44.



Σχήμα 2.2-44: : Αριθμητικό μοντέλο για πλάτος πυλώνα $W = 2D$ (Chortis F. & Kavvadas 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. Ο προσανατολισμός της γωνίας στην αριστερή και τη δεξιά σήραγγα έχει οριστεί να είναι σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού (Σχήμα 2.2-45). Η σύγκριση πραγματοποιείται ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας του αριθμητικού μοντέλου, στη μέση του πυλώνα. Συγκεκριμένα, οι εσωτερικές, ως προς τον πυλώνα, παρειές των σηράγγων και οι αντίστοιχες εξωτερικές, συγκρίνονται αντίστοιχα (Chortis F. & Kavvadas M., 2015).



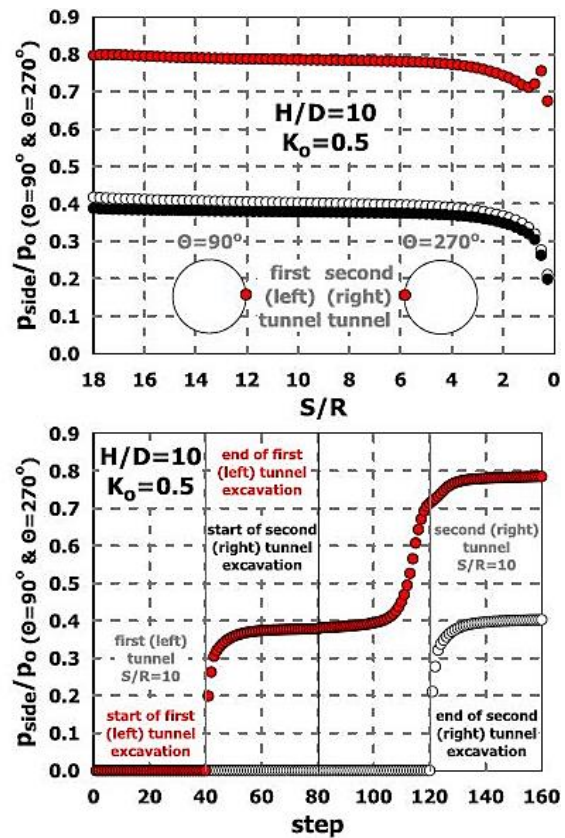
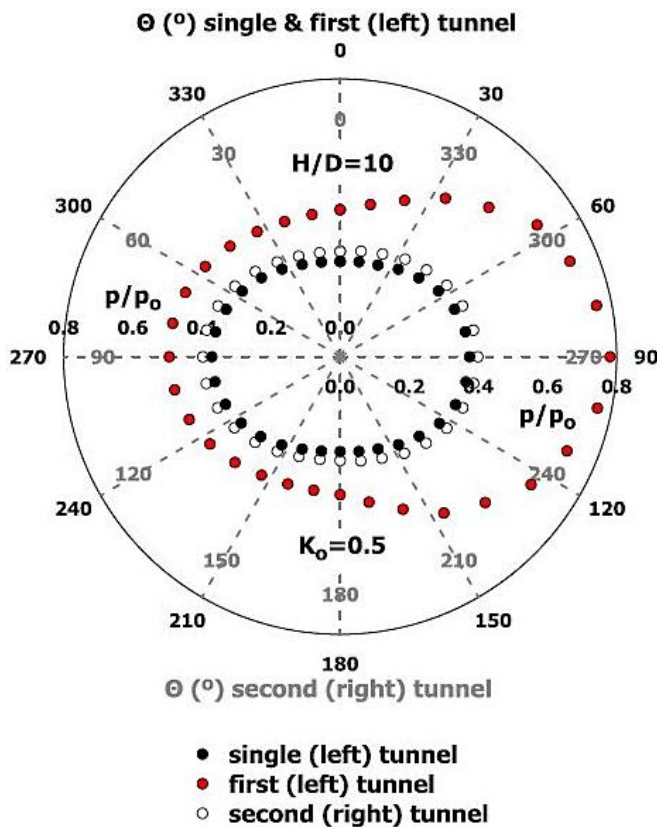
Σχήμα 2.2-45: Ωρολογιακός προσανατολισμός της γωνίας στην αριστερή και τη δεξιά σήραγγα (Chortis F. & Kavvadas M., 2015).

2.2.12.2. Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που παρουσιάζουν οι Chortis & Kanvadas (2015), αφορούν αρχικά σε μια συγκεκριμένη αριθμητική ανάλυση, η οποία ανταποκρίνεται στη δυσμενέστερη τιμή του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) 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 2.2-46 (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.

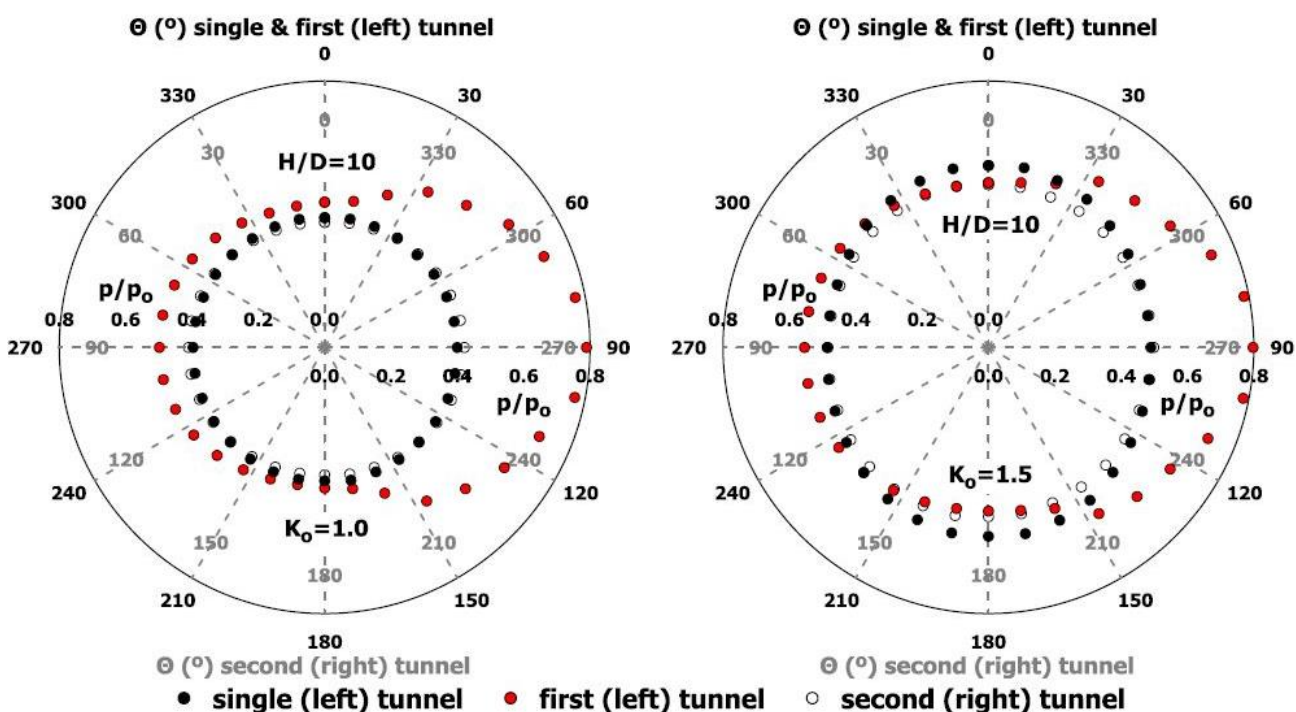
Αυτή η απόκριση στην κατανομή των φορτίων επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα στη διαμήκη διεύθυνση των εσωτερικών παρειών ($\Theta = 90^\circ$ & $\Theta = 270^\circ$) των σηράγγων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2-46 (πάνω δεξιά). Επιπροσθέτως, η επιρροή της εκσκαφής της «δεύτερης σήραγγας» στην «πρώτη 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. & Kanvadas M., 2015).



Σχήμα 2.2-46: Κατανομή των φορτίων: (αριστερά) στην τυπική διατομή, (πάνω δεξιά) στη διαμήκη διεύθυνση, στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων & χρονιοϊστορία των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων (κάτω δεξιά), για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_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. & Kavvadas M., 2015)

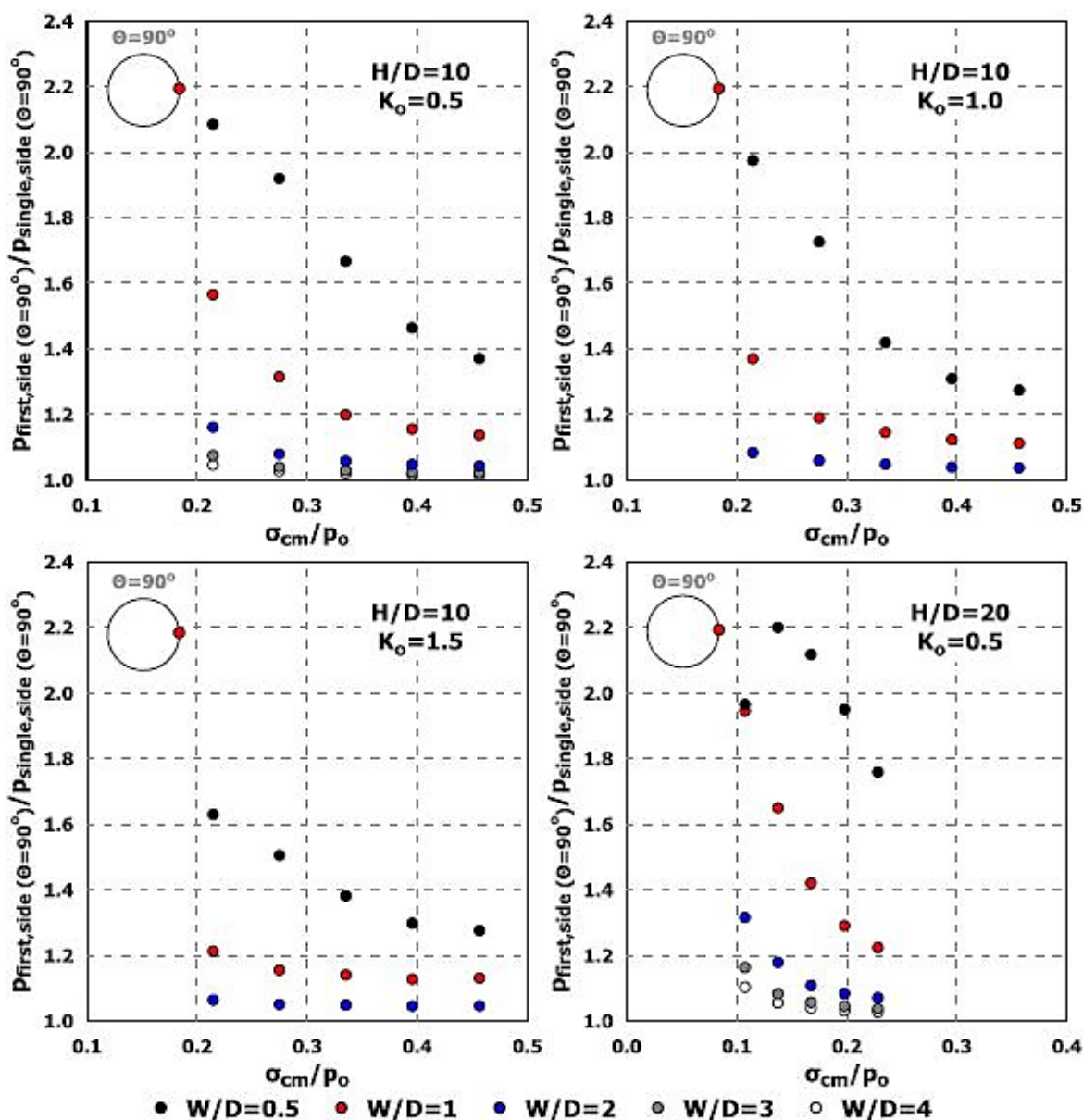
Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης και ειδικά ο βαθμός που επιδρά στα φορτία και το σχήμα της κατανομής είναι εξαρτώμενο και προσδιορίζεται από το συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0 όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2-47. Ο μηχανισμός της ανακατανομής των τάσεων και παραμορφώσεων που αναπτύσσεται είναι διαφορετικός και αυτό απορρέει από το διαφορετικό μέγεθος της κατακόρυφης και οριζόντιας συνιστώσας της τάσης του αρχικού εντατικού πεδίου. Συγκεκριμένα, η αρχική κατανομή των φορτίων της «μονής σήραγγας» είναι διαφοροποιημένη λόγω της τιμής του λόγου γεωστατικών τάσεων K_0 και ειδικότερα, για $K_0 = 0.5$ οι υψηλότερες τιμές των φορτίων είναι ανεπτυγμένες στις παρειές ($\Theta = 90^{\circ}$ & $\Theta = 270^{\circ}$), για $K_0 = 1.5$ οι υψηλότερες τιμές είναι ανεπτυγμένες στην οροφή και το δάπεδο ($\Theta = 180^{\circ}$ & $\Theta = 360^{\circ}$), ενώ για $K_0 = 1.0$ η κατανομή των φορτίων της σήραγγας είναι ομοιόμορφη.

Ως προς το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, για την «πρώτη σήραγγα» η εκσκαφή της «δεύτερης σήραγγας» οδηγεί στην αύξηση των φορτίων στην εσωτερική παρειά ($\Theta = 90^\circ$), ανεξαρτήτως της τιμής του K_o . Σχετικά με τις άλλες περιοχές της διατομής της σήραγγας, παρατηρείται ότι, για $K_o = 1.0$, τα φορτία αυξάνουν σε κάθε περιοχή, ενώ για $K_o = 1.5$, τα φορτία της σήραγγας μειώνονται στην οροφή και στο δάπεδο ($\Theta = 180^\circ$ & $\Theta = 360^\circ$) συγκρίνοντας είτε σε σχέση με τη «μονή» είτε με τη «δεύτερη» σήραγγα. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση όπου το $K_o = 1.5$ η εκσκαφή της «δεύτερης σήραγγας» λειτουργεί «ευεργετικά» μειώνοντας τις τιμές των φορτίων στις περιοχές της διατομής της σήραγγας όπου αναπτύσσονται οι αρχικές μέγιστες τιμές των φορτίων για τη «μονή σήραγγα» (Chortis F. & Kavvadas M., 2015).



Σχήμα 2.2-47: Κατανομή των φορτίων, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 1.0$ (αριστερά) και $K_o = 1.5$ (δεξιά) στην τυπική διατομή, για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_0) και για λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ (Chortis F. & Kavvadas M., 2015)

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων παρουσιάζονται, δευτερευόντως, από τους Chortis F. & Kavvadas M. (2015), για όλες τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν. Η ποσοτικοποίηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μεταξύ των σηράγγων πραγματοποιείται μέσω του λόγου των φορτίων (πρώτης/μονής) στην εσωτερική παρειά της «πρώτης σήραγγας» ($\Theta = 90^\circ$), όπου η επιρροή σε όρους φορτίων μεγιστοποιείται λόγω της εκκαφής της «δεύτερης σήραγγας» και αυτή η απόκριση (αύξηση) επιβεβαιώνεται ότι είναι η επικρατούσα τάση και ότι αναπτύσσεται στον υψηλότερο βαθμό, ανεξαρτήτως της τιμής του λόγου γεωστατικών τάσεων K_0 , όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2-48.

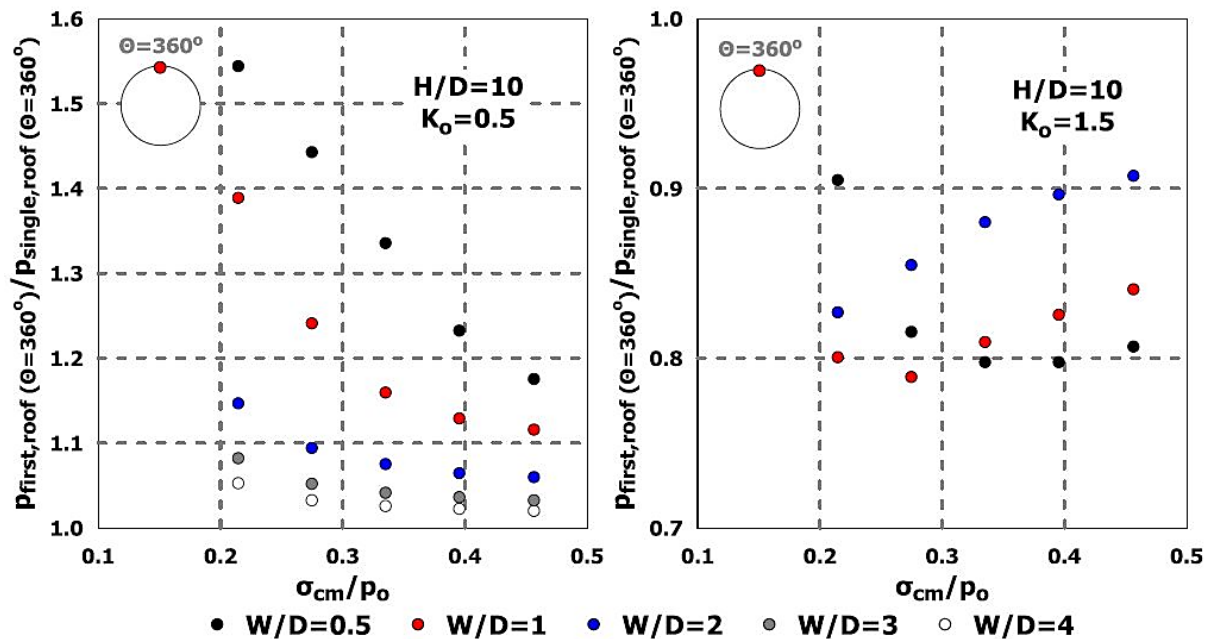


Σχήμα 2.2-48: Λόγος φορτίων (πρώτης/μονής) στην εσωτερική παρειά της "πρώτης σήραγγας" ($\Theta = 90^\circ$), ως συνάρτηση του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o), για διάφορες τιμές πλάτους πυλώνων (W/D), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_0) και λόγου ύψους υπερκειμένων γαιών (H/D) (Chortis F. & Kavvadas M., 2015)

Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης σε όρους ποσοστιαίας αύξησης φορτίων είναι υψηλότερο για $K_o = 0.5$ και χαμηλότερο για $K_o = 1.5$. Ο βαθμός της αύξησης καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το πλάτος του πυλώνα (W/D). Είναι προφανές ότι η κρίσιμη τιμή του πλάτους του πυλώνα θα μπορούσε να προσανατολιστεί περίπου στην τιμή $(W/D)_{crit} = 2$, με την έννοια ότι για υψηλότερες τιμές του πλάτους του πυλώνα το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι περίπου στο ίδιο επίπεδο. Ειδικότερα, η οριακή τιμή είναι προσανατολισμένη με υποτιθέμενο κριτήριο τη σχετική διαφοροποίηση της παραμέτρου που εξετάστηκε να είναι έως 10%. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο για $K_o = 1.0$ και $K_o = 1.5$, τιμές πλάτους του πυλώνα μεγαλύτερες από $W/D = 2$ δεν εξετάστηκαν.

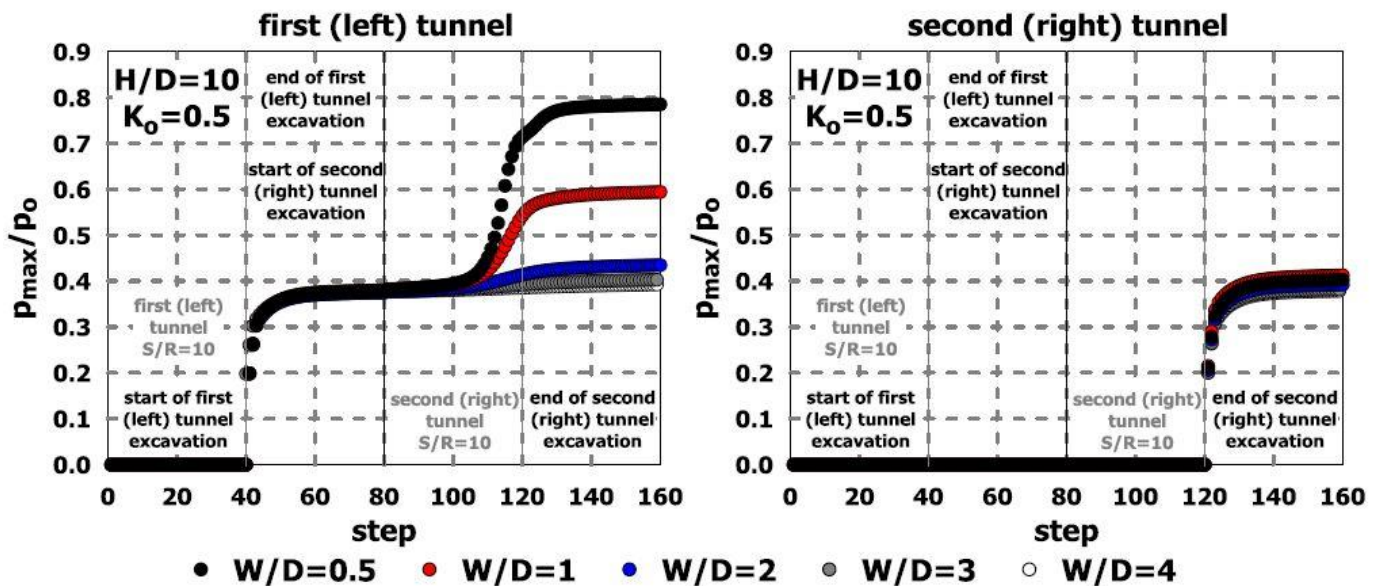
Σχετικά με την επίδραση του λόγου ύψους υπερκειμένων (H/D) παρατηρείται ότι αύξηση αυτής της παραμέτρου οδηγεί στην ενίσχυση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Η απόκριση της «πρώτης σήραγγας» (first tunnel) για $K_o = 0.5$ είναι η αύξηση των φορτίων σε κάθε περιοχή της διατομής της σήραγγας, ανεξαρτήτως της τιμής του πλάτους του πυλώνα (W/D). Για $K_o = 1.0$ στην οροφή και την παρειά της σήραγγας ($\Theta = 180^\circ$ & $\Theta = 360^\circ$) τα φορτία της «πρώτης σήραγγας» τείνουν να μειώνονται συγκριτικά με τα φορτία της «μονής σήραγγας». Το επίπεδο αυτής της μείωσης προσδιορίζεται από την τιμή του πλάτους του πυλώνα (W/D) και το λόγο των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o) (Chortis F. & Kavvadas M., 2015).

Αυτή η τάση επιβεβαιώνεται και ενισχύεται στην περίπτωση όπου $K_o = 1.5$. Η πρώτη σημαντική όψη αυτής της απόκρισης είναι το γεγονός ότι το ποσό της μείωσης είναι μεγαλύτερο για δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες, ενώ ο δεύτερος κρίσιμος παράγοντας του φαινομένου είναι ότι η βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών σε συνδυασμό με την αύξηση του πλάτους του πυλώνα (W/D) οδηγεί στον περιορισμό αυτής της μείωσης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2-49 (δεξιά). Η διαφοροποίηση αυτής της απόκρισης απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2-49 με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ $K_o = 0.5$ και $K_o = 1.5$ για την οροφή της «πρώτης σήραγγας». Ανάλογα είναι τα αποτελέσματα για τον πυθμένα της «πρώτης σήραγγας» (Chortis F. & Kavvadas M., 2015).



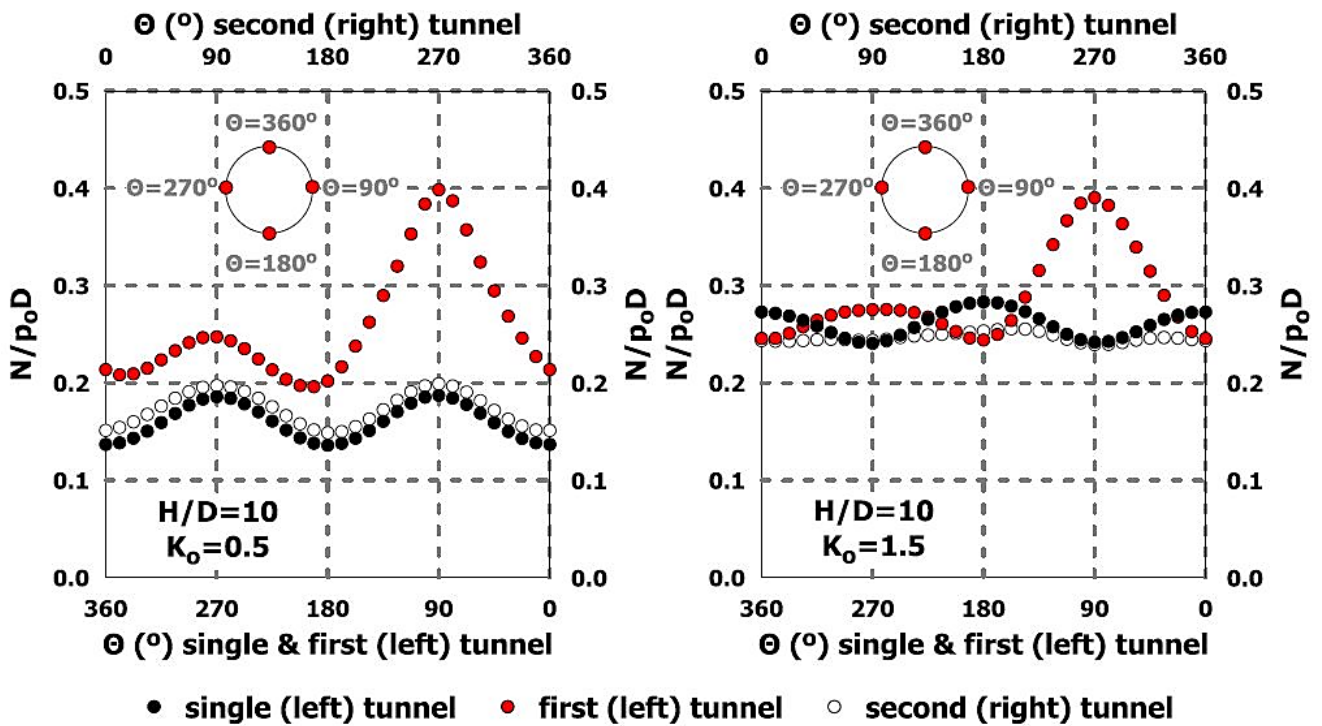
Σχήμα 2.2-49: Λόγος φορτίων (πρώτης/μονής) στην οροφή της «πρώτης σήραγγας» (first tunnel) ($\theta = 360^\circ$), ως συνάρτηση του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o), για διάφορες τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_o) και λόγου ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ (Chortis F. & Kavvas M., 2015)

Στο Σχήμα 2.2-50, απεικονίζεται η χρονοϊστορία των φορτίων για την «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) και τη «δεύτερη σήραγγα» (second tunnel), για τη διατομή με κανονικοποιημένη διαμήκη απόσταση από το μέτωπο της σήραγγας $S/R = 10$, η οποία είναι σταθερή και για τις δύο σήραγγες. Η επίδραση του πλάτους του πυλώνα (W/D) προσδιορίζει και επηρεάζει σημαντικά την κατανομή των φορτίων για την «πρώτη σήραγγα» η οποία επηρεάζεται από την προχώρηση της εκσκαφής της «δεύτερης σήραγγας». Ειδικότερα, το πλάτος του πυλώνα (W/D) σχετίζεται με την αύξηση των φορτίων η οποία τελικά σταθεροποιείται για $(W/D) > 2$. Επιπροσθέτως, σχετικά με τα φορτία της «δεύτερης σήραγγας» η επίδραση του πλάτους του πυλώνα (W/D) είναι αμελητέα. Παρατηρείται ότι το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης ξεκινά σε μια απόσταση περίπου $2D$ πριν από τη διατομή που εξετάζεται. Η παραλλαγή σε αυτή την απόσταση προσδιορίζεται από τους ακόλουθους παράγοντες: το πλάτος του πυλώνα (W/D) και το λόγο των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) (Chortis F. & Kavvas M., 2015).

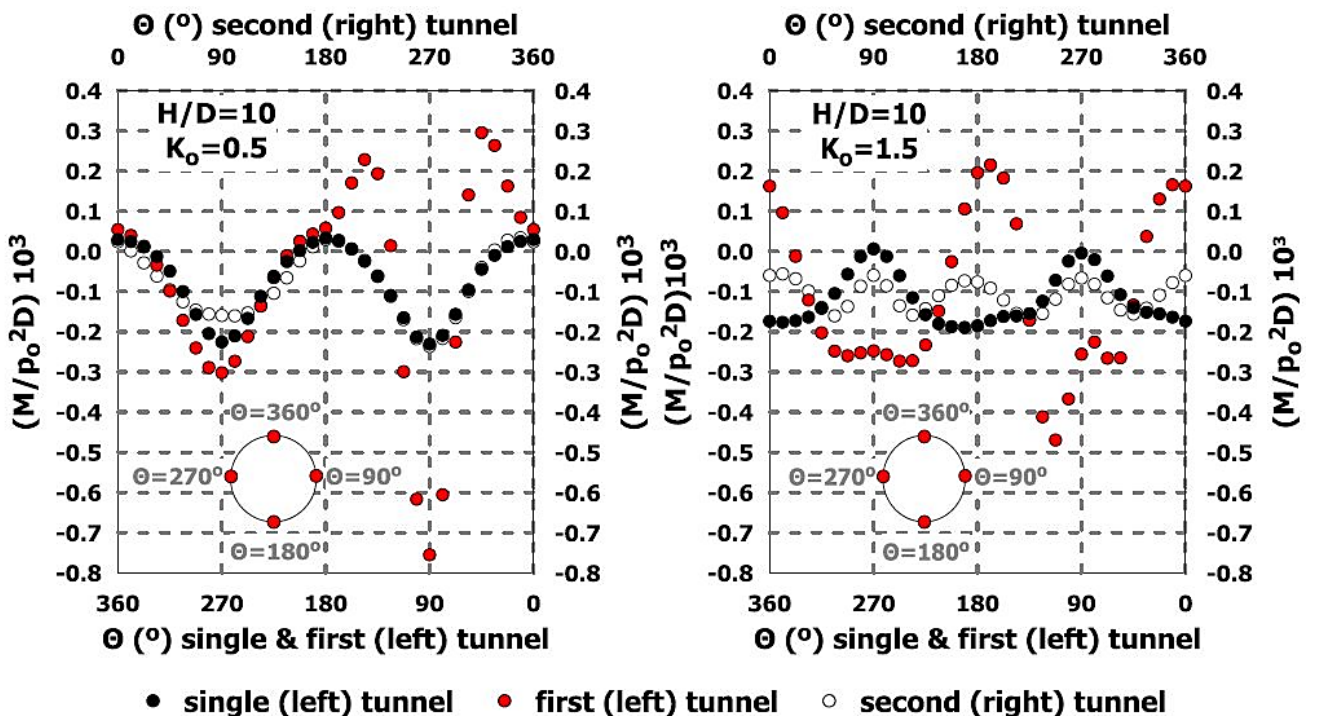


Σχήμα 2.2-50: Χρονοϊστορία των φορτίων (μέγιστη τιμή), για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o), συντελεστή γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$, για την «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) στα αριστερά και για τη «δεύτερη σήραγγα» (second tunnel) στα δεξιά (Chortis F. & Kavvadas M., 2015)

Εκτός από το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης στα φορτία, η εκσκαφή δίδυμων σηράγγων οδηγεί στη διαφοροποίηση των εσωτερικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην υποστήριξη της σήραγγας (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα). Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 2.2-51 παρουσιάζεται η επίδραση, στην αξονική δύναμη, της εκσκαφής της «δεύτερης σήραγγας» (second tunnel), στην «πρώτη σήραγγα» (first tunnel), ενώ η επίδραση αυτή στην καμπτική ροπή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2-52. Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης προκαλεί υψηλή και κατ' επέκταση σημαντική αύξηση της αξονικής δύναμης για την «πρώτη σήραγγα» και η μεγιστοποίηση αυτής της απόκρισης τοποθετείται στην εσωτερική παρειά της σήραγγας ($\Theta = 90^\circ$). Η επιρροή στη «δεύτερη σήραγγα» είναι σχετικά χαμηλότερη αντίστοιχα. Το εύρος της αύξησης και το σχήμα της ανακατανεμημένης αξονικής δύναμης είναι προσδιορισμένα από την τιμή λόγου γεωστατικών τάσεων K_o και την τιμή του πλάτους του πυλώνα (W/D), όπως παρουσιάζεται για τα φορτία. Στο Σχήμα 2.2-52 παρουσιάζεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης για τη ροπή κάμψης και τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ανάλογη τάση (Chortis F. & Kavvadas M., 2015).

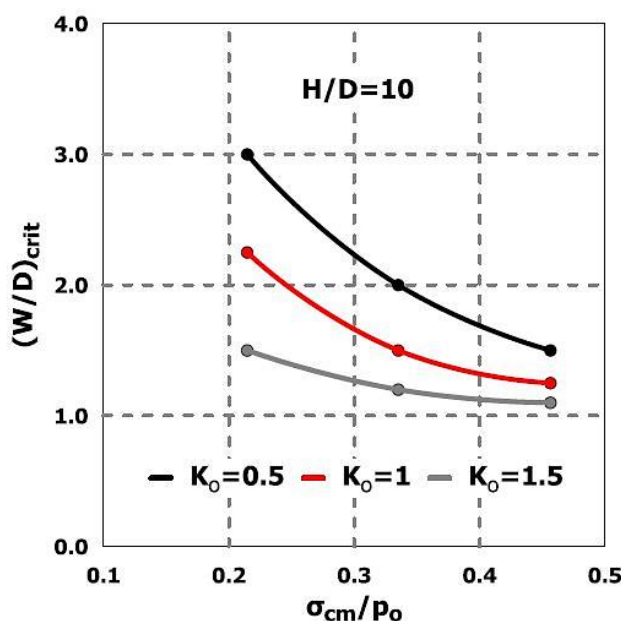


Σχήμα 2.2-51: Κατανομή της αξονικής δύναμης, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ (αριστερά) και $K_0 = 1.5$ (δεξιά) στην τυπική διατομή, για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_0), πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ και λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ (Chortis F. & Kavnadas M., 2015)



Σχήμα 2.2-52: Κατανομή της ροπής κάμψης, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ (αριστερά) και $K_0 = 1.5$ (δεξιά) στην τυπική διατομή, για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_0) που εξετάστηκε, πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ και λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ (Chortis F. & Kavnadas M., 2015)

Από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, οι Chortis F. & Kanvadas M. (2015) επιτυγχάνουν την εκτίμηση της κρίσιμης τιμής του πλάτους του πυλώνα $(W/D)_{crit}$, με υποθετικό κριτήριο τη σχετική διαφοροποίηση των παραμέτρων που εξέτασαν (φορτία) να είναι έως 10%, ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o) . Οι καμπύλες που παρήχθησαν οι οποίες συνδυάζουν τις προαναφερθείσες παραμέτρους παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2-53 και είναι κατηγοριοποιημένες σύμφωνα με το συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων, λόγω του διαφορετικού μηχανισμού ανακατανομής που αναπτύσσεται, ο οποίος εξαρτάται από αυτό τον παράγοντα.



Σχήμα 2.2-53: 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}/p_o) , για διάφορες τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_o (Chortis F. & Kanvadas M., 2015)

2.2.12.3. Συμπεράσματα

Η έρευνα των Chortis F. & Kanvadas 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}/p_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}/p_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 $K_0 = 1.5$.

3. Αριθμητικές Αναλύσεις

3.1. Εισαγωγή

Η διάνοιξη και κατασκευή σηράγγων σε αστικές, κυρίως, περιοχές, παρουσιάζει σημαντική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, ενώ συχνά απαιτείται η εκσκαφή μιας νέας σήραγγας γειτονικά σε μια υφιστάμενη. Η κατασκευή δίδυμων σηράγγων παρουσιάζει προκλήσεις στη μηχανική. Όχι μόνο οι γεωλογικές και οι γεωτεχνικές συνθήκες της περιοχής, αλλά οι μετακινήσεις τους εδάφους λόγω της εκσκαφής της γειτονικής σήραγγας και τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης μεταξύ των διατομών είναι μερικές από τις παραμέτρους που πρέπει να εξετάζονται κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και της κατασκευής δίδυμων σηράγγων.

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας διερευνώνται τα μεγέθη των φορτίων και των εντατικών μεγεθών (αξονικών δυνάμεων και ροπών κάμψης) που ασκούνται στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα), εξετάζοντας ένα μεγάλο εύρος από μεγέθη πλατών πυλώνων, γεωτεχνικών συνθηκών, συντελεστών οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και συντελεστών αποτόνωσης.

Παρά την ολοένα και δημοφιλέστερη χρήση εξοπλισμού διάνοιξης σηράγγων με μηχανοποιημένη εκσκαφή (TBMs), σε πολλές περιπτώσεις προτιμάται η κατασκευή να γίνεται με συμβατικές μεθόδους, χρησιμοποιώντας τη Νέα Αυστριακή Μέθοδο (NATM), λόγω της ευελιξίας της να προσαρμόζεται σε διαφορετικές γεωλογικές – γεωτεχνικές συνθήκες. Παρόλα αυτά, η εφαρμογή των τεχνικών της NATM βασίζεται στην εμπειρική γνώση, ενώ η σχετική εμπειρία είναι αυτή που πολλές φορές καθοδηγεί, με βάση την επί τόπου παρατήρηση. Η χρησιμοποίηση αριθμητικών μεθόδων με τεχνικές όπως η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method – FEM), δύναται να έχει πολύ μεγάλη αξία σε τέτοιου είδους σχεδιασμό.

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)

Οι αριθμητικές αναλύσεις λειτουργούν ως ένα είδος δοκιμής μοντέλου, στο οποίο μπορούν να διερευνηθούν πολλές σχετικές παράμετροι σχεδιασμού με παραμετρικές αναλύσεις. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να ποσοτικοποιηθεί η σχετική σημασία κάθε πιθανής παρέμβασης, προκειμένου να επιλεγεί η ασφαλέστερη και η πιο οικονομική λύση. 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. Κατά συνέπεια, οι τριδιάστατες αναλύσεις εμπεριέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των διδιάστατων.

Σύμφωνα με τον Καββαδά (2012), τα πλεονεκτήματα των τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων είναι τα ακόλουθα:

- 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).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων, επιλέχθηκε να διερευνηθεί μέσω τριδιάστατων (3 – D) αριθμητικών αναλύσεων, με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.

Στο παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνεται η περιγραφή της διαδικασίας των αναλύσεων και της μόρφωσης των αριθμητικών προσομοιωμάτων. Ακόμη 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.

3.2. Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Abaqus

Το Abaqus αποτελεί ένα από τα πιο εξελιγμένα λογισμικά για την πραγματοποίηση τριδιάστατων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. Έχει ευρεία εφαρμογή στη μηχανική και μπορεί να εξάγει πληθώρα αποτελεσμάτων που αφορούν το χρήστη. Αρχικός αντικειμενικός σκοπός για την εκκίνηση της διαδικασίας των αναλύσεων, είναι η δημιουργία ενός αρχείου εισαγωγής δεδομένων (input file). Στο αρχείο αυτό εισάγονται υπό μορφή κώδικα τα δεδομένα του μοντέλου (model data), τα οποία περιγράφουν τους κόμβους (nodes), τα πεπερασμένα στοιχεία του γεωυλικού (solid elements – type C3D8) και τα πεπερασμένα στοιχεία του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (shell elements – type S4). Σε κάθε κόμβο των πεπερασμένων στοιχείων γεωυλικού, υπάρχουν τρεις βαθμοί ελευθερίας οι οποίοι περιγράφουν τις μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση X, Y και Z. Στα πεπερασμένα στοιχεία του κελύφους, κάθε κόμβος κατέχει έξι βαθμούς ελευθερίας εκ των οποίων οι τρεις αναφέρονται στη μετακίνηση και οι υπόλοιποι στη στροφή.

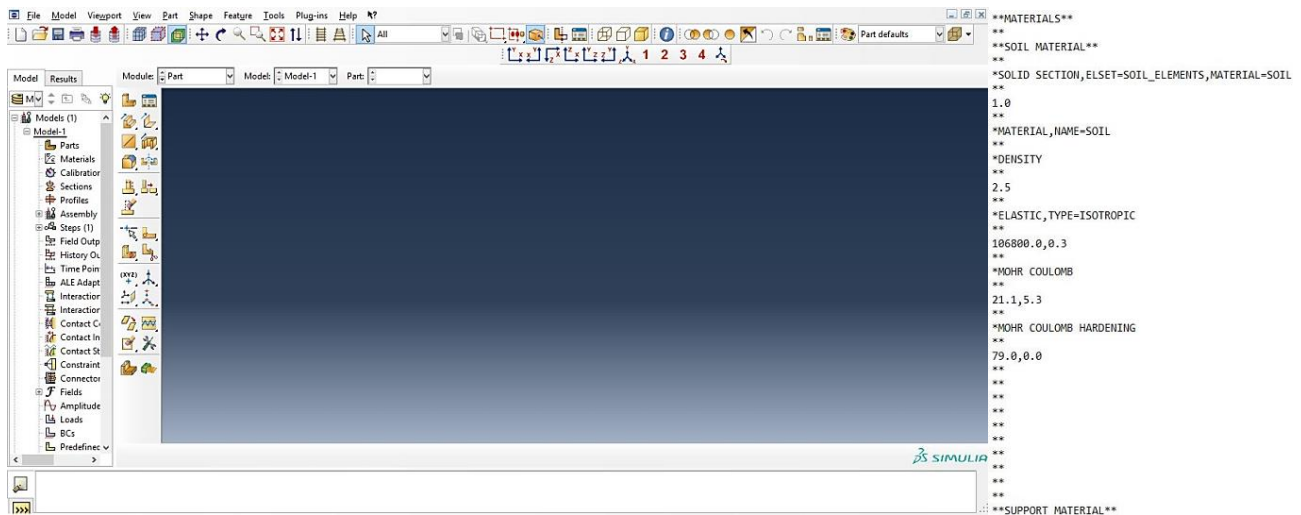
Εισάγονται ακόμη οι ιδιότητες των υλικών (μέτρο ελαστικότητας & λόγος Poisson), του εδάφους και του σκυροδέματος (soil material & support material), το αρχικό (γεωστατικό) εντατικό πεδίο (initial conditions), οι συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) και κάθε άλλο στοιχείο που προσδιορίζει το μοντέλο αυτό καθ' αυτό. Το αρχείο εισαγωγής δεδομένων (input file) περιλαμβάνει, τέλος, στοιχεία που αφορούν στον προσδιορισμό των ζητούμενων (output) του προβλήματος, τα οποία συμβάλλουν ουσιαστικά στην παραγωγή των αποτελεσμάτων των αναλύσεων.

Τα εξαγόμενα που παράγονται από τα αποτελέσματα (ouput), είναι:

- Οι μετακινήσεις των κόμβων (U)
- Οι τάσεις των πεπερασμένων στοιχείων (S)
- 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, το αρχείο αυτό μορφώθηκε μέσω κατάλληλης διαδικασίας, με χρήση του λογισμικού Excel της Microsoft.

Η εξέλιξη του μοντέλου κλιμακώνεται μέσω μιας αλληλουχίας βημάτων (steps), με κάθε βήμα να αντιπροσωπεύει μια περίοδο απόκρισης συγκεκριμένου τύπου, ενώ στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων δημιουργούνται ομάδες (sets) οι οποίες αποτελούνται από κόμβους ή πεπερασμένα στοιχεία.



Σχήμα 3.2-1: Περιβάλλον εργασίας του Abaqus 6.13 (αριστερά) και μορφή αρχείου εισαγωγής δεδομένων – input file (δεξιά).

3.3. Σχεδιασμός αριθμητικών μοντέλων

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης έρευνας σχεδιάστηκαν πέντε αριθμητικά μοντέλα, για κάθε πλάτος πυλώνα που διερευνήθηκε. Το πλάτος πυλώνα αποτελεί την εγκάρσια απόσταση μεταξύ των παρειών των γειτονικών σήραγγων. Πιο συγκεκριμένα, σχεδιάστηκαν μοντέλα με πλάτος πυλώνα (W) $0.5D = 4m$, $1D = 8m$, $2D = 16m$, $3D = 24m$ και $4D = 32m$. Οι διαστάσεις των μοντέλων καθορίστηκαν με στόχο να παρέχονται αξιόπιστα αποτελέσματα, αλλά ταυτόχρονα να εξασφαλίζεται η ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού φόρτου των αναλύσεων.

Πιο συγκεκριμένα, η επίτευξη του σχεδιασμού 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.

Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός έγινε λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένα κριτήρια, δηλαδή:

- I. Η απόσταση του γεωυλικού από τον άξονα κάθε σήραγγας έως τα όρια του αριθμητικού μοντέλου θα πρέπει να είναι επαρκής, ούτως ώστε οι συνοριακές συνθήκες να μη συντελούν στη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων.
- II. Το μήκος της σήραγγας κατά τη διαμήκη διεύθυνση (φορά διάνοιξης) θα πρέπει να είναι επαρκές, ούτως 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 δύναται να 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, ώστε να μην επιδρά στην κατανομή των τάσεων.
- IV. Η κατανομή των τάσεων ακόμη, επηρεάζεται και από τα πλευρικά όρια του προσομοιώματος.

Με βάση τα παραπάνω επιλέχθηκε κατάλληλη γεωμετρία η οποία εξασφαλίζει ικανοποιητική απόσταση από τον άξονα κάθε σήραγγας έως τα πλευρικά όρια του μοντέλου και η οποία αναλύεται στη συνέχεια.

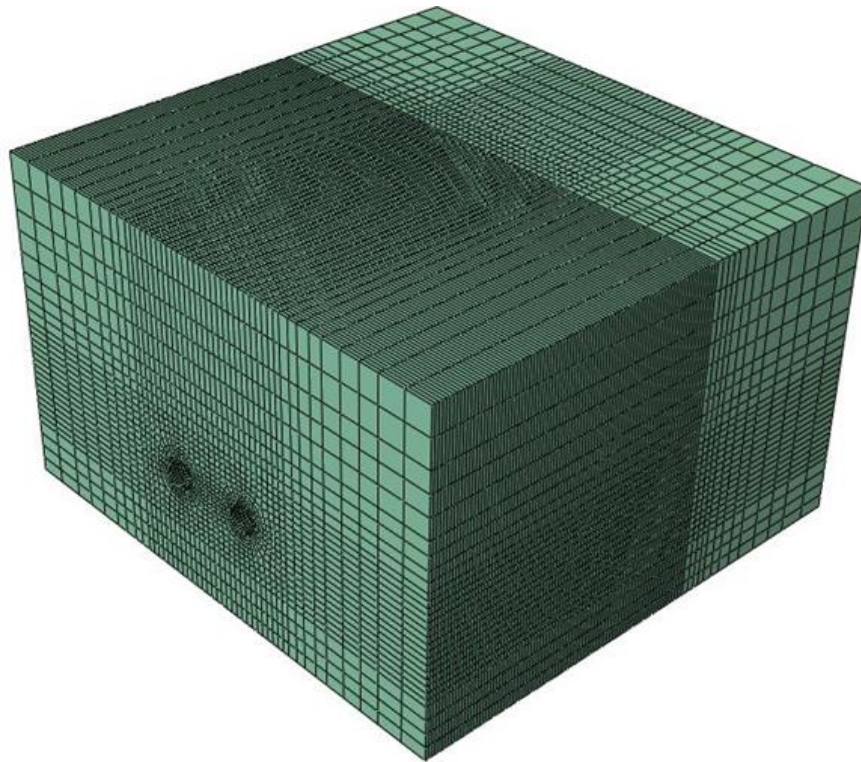
3.3.1. Γεωμετρία

Στο Σχήμα 3.3-1 φαίνεται η προοπτική όψη ενός ενδεικτικού μοντέλου με πλάτος πυλώνων $W = 2D = 16\text{m}$, καθώς επίσης οι άξονες X , Y και Z . Διακρίνεται ακόμη η διακριτοποίηση του προσομοιώματος στην περιοχή ενδιαφέροντος, με την πύκνωση του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων πλησίον των σήραγγων και σε όλο το μήκος εκσκαφής.

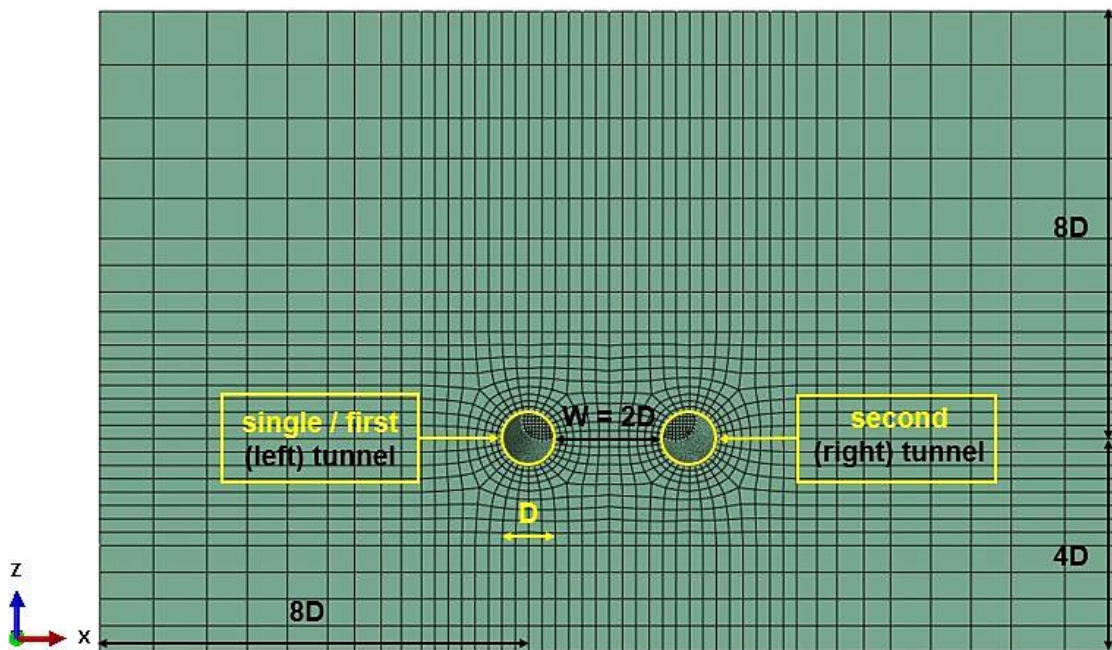
Το Σχήμα 3.3-2 απεικονίζει την εγκάρσια όψη του προσομοιώματος, στο επίπεδο $Z - X$. Στο σχήμα φαίνονται οι υπό διερεύνηση σήραγγες. Αρχικά εκσκάπτεται η αριστερή, «μονή» σήραγγα (single tunnel). Στη συνέχεια, με την ολοκλήρωση της εκσκαφής της «μονής» σήραγγας, ξεκινά η εκσκαφή της δεξιάς, «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel). Με την εκκίνηση της εκσκαφής της δεύτερης, η «μονή» σήραγγα (single tunnel) μετονομάζεται σε «πρώτη» σήραγγα (first tunnel).

Στο ίδιο σχήμα διακρίνονται με λεπτομέρεια οι διαστάσεις του μοντέλου. Αναλυτικά, για διάμετρο σήραγγας $D = 8\text{m}$, η απόσταση κάθε πλευρικού ορίου του μοντέλου έως τον άξονα κάθε σήραγγας κατά τη διεύθυνση X είναι $8D = 64\text{m}$. Η απόσταση από το ανώτερο όριο έως τον άξονα κάθε σήραγγας, κατά τη διεύθυνση Z είναι $8D = 64\text{m}$. Η απόσταση του κατώτερου ορίου του προσομοιώματος μέχρι τον άξονα κάθε σήραγγας κατά τη διεύθυνση Z , είναι $4D = 32\text{m}$, ενώ η συνολική απόσταση από το ανώτερο έως το κατώτερο όριο του μοντέλου είναι $12D = 96\text{m}$. Τέλος, η απόσταση μεταξύ των πλευρικών ορίων του μοντέλου είναι ίση με $19D = 152\text{m}$.

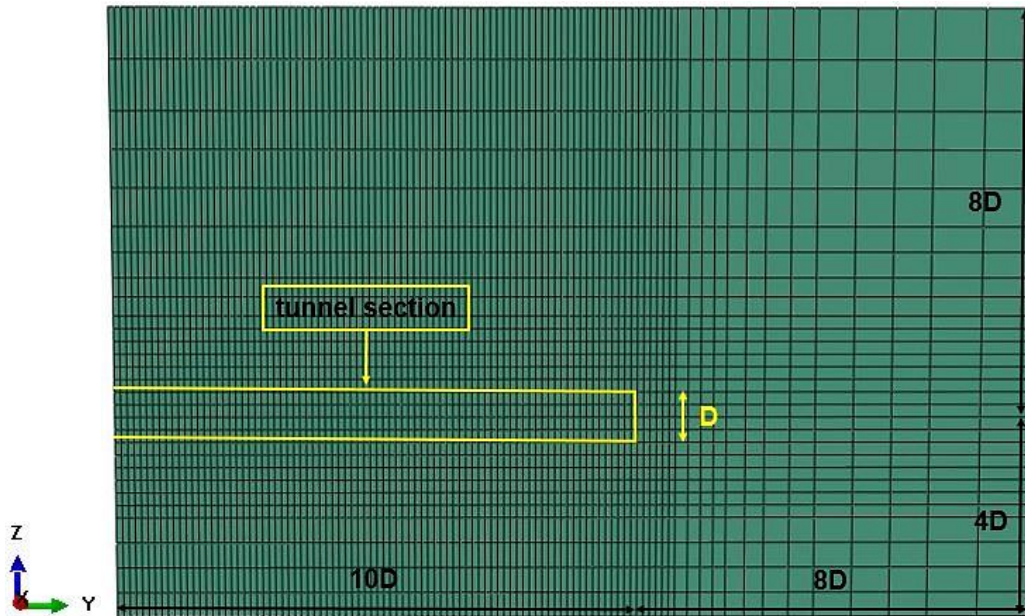
Τέλος, το Σχήμα 3.3-3 δείχνει τη διαμήκη όψη του μοντέλου, στο επίπεδο $Z - Y$. Το μήκος εκσκαφής της διατομής της σήραγγας (tunnel section) είναι $L_{exc} = 10D = 80\text{m}$ ($D = 8\text{m}$), ενώ το συνολικό μήκος του μοντέλου κατά τη διεύθυνση Y είναι ίσο με $18D = 144\text{m}$.



Σχήμα 3.3-1: Προοπτική όψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 2D = 16\text{m}$.



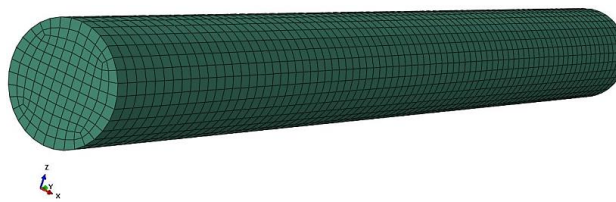
Σχήμα 3.3-2: Εγκάρσια όψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 2D$ (επίπεδο Z – X). Στο σχήμα φαίνονται η (αριστερή) «μονή/πρώτη» σήραγγα (single/first tunnel), η (δεξιά) «δεύτερη» σήραγγα (second tunnel) και οι διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου. Η διάμετρος κάθε σήραγγας είναι ίση με $D = 8\text{m}$.



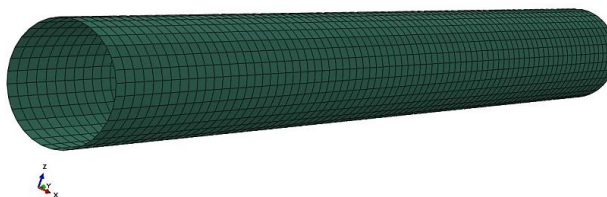
Σχήμα 3.3-3: Διαμήκης όψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 2D$ (επίπεδο $Z - Y$). Στο σχήμα φαίνονται η διατομή της σήραγγας (tunnel section) και οι διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου.

3.3.2. Διακριτοποίηση καννάβων

Η διακριτοποίηση των καννάβων πραγματοποιήθηκε με τριδιάστατα οκτακομβικά εξαπλευρικά (C3D8) πεπερασμένα στοιχεία εδάφους (solid elements) για την προσομοίωση του γεωυλικού (Σχήμα 3.3-4), ενώ με τετρακομβικά τετραπλευρικά (S4) πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell elements) για την προσομοίωση της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Σχήμα 3.3-5).



Σχήμα 3.3-4: Οκτακομβικά εξαπλευρικά (C3D8) πεπερασμένα στοιχεία εδάφους (solid elements) εντός της διατομής εκσκαφής, που προσομοιώνουν το γεωυλικό.



Σχήμα 3.3-5: Τετρακομβικά τετραπλευρικά (S4) πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell elements), που προσομοιώνουν την άμεση υποστήριξη (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα).

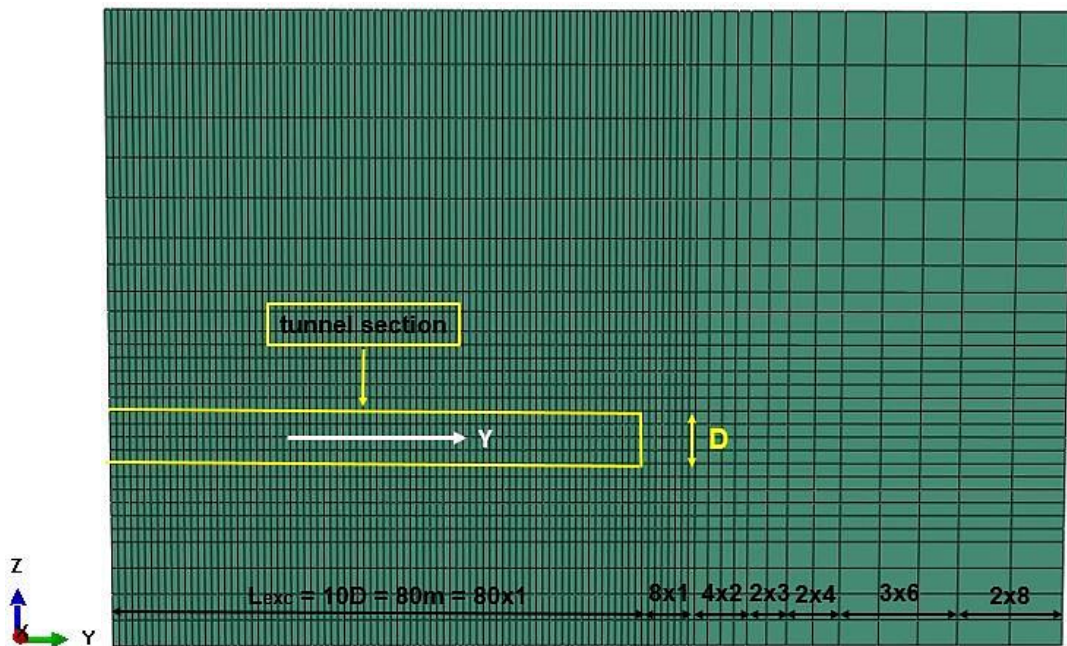
Στην περιοχή ενδιαφέροντος και λήψης αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε πύκνωση του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό την ακρίβεια και την ορθότητα των αποτελεσμάτων.

Ειδικότερα, επιλέχθηκε η πύκνωση να γίνει στις περιοχές ελαστοπλαστικής απόκρισης του γεωυλικού, γύρω από τους δύο κλάδους, όπου συντελείται ανακατανομή των τάσεων, πλαστικές παραμορφώσεις και σημαντικές μετακινήσεις. Απομακρυνόμενοι από αυτή την περιοχή, όπου υπάρχει ελαστική απόκριση, πραγματοποιήθηκε σταδιακή αραίωση του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό την εξοικονόμηση χρόνου και υπολογιστικού φόρτου των αριθμητικών αναλύσεων.

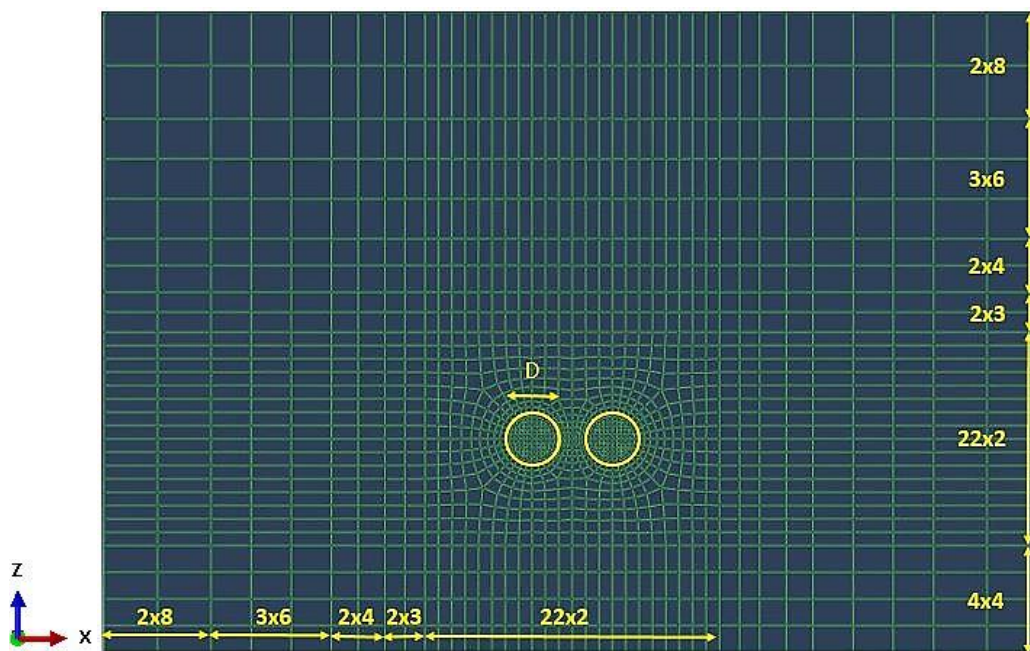
Με βάση τα παραπάνω, οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων που επιλέχθηκαν κατά τη διαμήκη διεύθυνση (διεύθυνση Y), οι οποίες αποτελούν και τη διακριτοποίηση του αριθμητικού μοντέλου, είναι οι ακόλουθες (Σχήμα 3.3-6):

- Για $Y = 0$ έως $Y = 80$, μήκος πεπερασμένων στοιχείων 1m.
- Για $Y = 80$ έως $Y = 88$, μήκος πεπερασμένων στοιχείων 1m.
- Για $Y = 88$ έως $Y = 96$, μήκος πεπερασμένων στοιχείων 2m.
- Για $Y = 96$ έως $Y = 102$, μήκος πεπερασμένων στοιχείων 3m.
- Για $Y = 102$ έως $Y = 110$, μήκος πεπερασμένων στοιχείων 4m.
- Για $Y = 110$ έως $Y = 128$, μήκος πεπερασμένων στοιχείων 6m.
- Για $Y = 128$ έως $Y = 144$, μήκος πεπερασμένων στοιχείων 8m.

Αναφορικά στην εγκάρσια όψη του αριθμητικού προσομοιώματος, πραγματοποιήθηκε επίσης πύκνωση του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων, με ιδιαίτερη έμφαση στην περιοχή περιμετρικά των σηράγγων. Οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων κατά την εγκάρσια όψη (επίπεδο $Z - X$) του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D$ διακρίνονται στο Σχήμα 3.3-7.



Σχήμα 3.3-6: Διαμήκης όψη (επίπεδο Z – Y) στην οποία φαίνονται οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 3.3-7: Εγκάρσια όψη (επίπεδο Z – X) του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D$. Στο σχήμα διακρίνονται οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων σε όλο εγκάρσιο τμήμα του αριθμητικού μοντέλου.

Ενδεικτικά, για το αριθμητικό μοντέλο με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D$, δημιουργήθηκαν συνολικά 160388 πεπερασμένα στοιχεία εδάφους (solid elements), 169116 κόμβοι (nodes) και 5120 πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell elements) για τις δύο σήραγγες. Ακόμη, για τη λήψη των αποτελεσμάτων σε όλα τα αριθμητικά μοντέλα υιοθετείται 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.

Αναφορικά στις 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 σχετικά με τις μετακινήσεις.

3.4. 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 πρόκειται να εφαρμοστούν, εξαρτώνται από τη γεωμετρία της εκσκαφής, τις ιδιότητες του – περιβάλλοντος των σηράγγων – γεωυλικού και την επιλογή της μεθόδου εκσκαφής.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης έρευνας, η μέθοδος που προσομοιώνεται αντικατοπτρίζει συμβατική εκσκαφή σηράγγων κυκλικής διατομής με ολομέτωπη προχώρηση, ενώ οι αριθμητικές αναλύσεις αναφέρονται σε ασθενείς, γενικά, γεωτεχνικές συνθήκες.

Σχετικά με την αλληλουχία, η εκσκαφή της δεξιάς, «δεύτερης» σήραγγας (second – right tunnel) πραγματοποιείται ύστερα από την ολοκλήρωση της εκσκαφής και υποστήριξης της αριστερής, «μονής/πρώτης» σήραγγας (single/first – left 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 σε όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιούνται, ενώ η εκσκαφή αυτών πραγματοποιείται με 80 στατικά βήματα, κατά τη διεύθυνση Υ.

Η διαφοροποίηση σε κάποιες ομάδες αναλύσεων έγκειται στην «καθυστέρηση» της εφαρμογής της άμεσης υποστήριξης, στη «δεύτερη» σήραγγα. Πιο συγκεκριμένα, η άμεση υποστήριξη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στη «μονή/πρώτη» σήραγγα τοποθετείται 1m πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Στη «δεύτερη» σήραγγα, εξετάζονται οι ακόλουθες κανονικοποιημένες, ως προς τη διάμετρο της σήραγγας ($D = 8m$) αποστάσεις εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο: $S_{\text{tunnel face}}/D = 0.125, 0.25, 0.5, 0.75$ και 1. Οι εν λόγω αποστάσεις αναφέρονται σε 1m, 2m, 4m, 6m και 8m πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, αντίστοιχα.

Στη συνέχεια ακολουθεί αντιπροσωπευτική περιγραφή των κυριότερων βημάτων (steps) που υιοθετούνται στις αριθμητικές αναλύσεις.

3.4.1. Απόσταση εφαρμογής μέτρων υποστήριξης $S_{\text{tunnel face}}/D = 0.125$ στη δεύτερη σήραγγα

Σε αυτή την ομάδα αναλύσεων, υπάρχουν συνολικά 160 βήματα (steps). Το βήμα εκσκαφής είναι 1m και για τις δύο σήραγγες, ενώ το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόζεται σε απόσταση $S_{\text{tunnel face}} = 1\text{m}$ πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, τόσο στη «μονή» (single tunnel) όσο και στη «δευτέρα» σήραγγα (second tunnel). Αντιπροσωπευτικά βήματα, είναι:

❖ 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, ενώ επίσης δεν έχει εφαρμοστεί η άμεση υποστήριξη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

❖ Βήμα 1

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

❖ Βήμα 2

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

❖ Βήμα 3 – 80

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

❖ Βήμα 81

Εκκίνηση της όρυξης της «δευτέρας» σήραγγας (second tunnel), με εκσκαφή του 1^{ου} m.

❖ Βήμα 82

Εκσκαφή του 2^{ου} m και υποστήριξη του 1^{ου} m της «δευτέρας» σήραγγας (second tunnel).

❖ Βήμα 83 - 160

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

3.4.2. Απόσταση εφαρμογής μέτρων υποστήριξης $S_{\text{tunnel face}}/D = 0.25$ στη δεύτερη σήραγγα

Η ομάδα αναλύσεων με $S_{\text{tunnel face}}/D = 0.25$ περιέχει συνολικά 159 βήματα (steps). Το βήμα εκσκαφής είναι 1m και για τις δύο σήραγγες, ενώ το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόζεται σε απόσταση $S_{\text{tunnel face}} = 1\text{m}$ πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της «μονής» (single) σήραγγας και $S_{\text{tunnel face}} = 2\text{m}$ πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της «δεύτερης» (second) σήραγγας. Αντιπροσωπευτικά βήματα, είναι:

❖ Βήμα 0

Υπολογισμός αρχικού εντατικού πεδίου.

❖ Βήμα 1

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

❖ Βήμα 2

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

❖ Βήμα 3 – 80

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

❖ Βήμα 81

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

❖ Βήμα 82

Εκσκαφή του 3^{ου} m και υποστήριξη του 1^{ου} m της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel).

❖ Βήμα 83 – 159

Στα βήματα αυτά πραγματοποιείται εκσκαφή του επόμενου μέτρου και υποστήριξη του μέτρου το οποίο απέχει 2m από το μέτωπο εκσκαφής, έως την εκσκαφή του 80^{ου} m και υποστήριξη του 78^{ου} m της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel).

3.4.3. Απόσταση εφαρμογής μέτρων υποστήριξης $S_{\text{tunnel face}}/D = 0.5$ στη δεύτερη σήραγγα

Σε αυτή την ομάδα αναλύσεων, υπάρχουν συνολικά 157 βήματα (steps). Το βήμα εκσκαφής είναι 1m και για τις δύο σήραγγες, ενώ το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα τοποθετείται σε απόσταση $S_{\text{tunnel face}} = 1\text{m}$ πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της «μονής» (single) σήραγγας και $S_{\text{tunnel face}} = 4\text{m}$ πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της «δεύτερης» (second) σήραγγας. Αντιπροσωπευτικά βήματα, είναι:

❖ Βήματα 0 – 80

Τα βήματα 0 έως 80, τα οποία αναφέρονται στη «μονή/πρώτη» (single/first tunnel) σήραγγα, ακολουθούν όμοια διαδικασία με τις ανωτέρω περιπτώσεις.

❖ Βήμα 81

Εκσκαφή του 1^{ου} m, 2^{ου} m, 3^{ου} και 4^{ου} m της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel).

❖ Βήμα 82

Εκσκαφή του 5^{ου} m και υποστήριξη του 1^{ου} m της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel).

❖ Βήμα 83 – 157

Στα βήματα 83 έως 157 πραγματοποιείται εκσκαφή του επόμενου μέτρου και υποστήριξη του μέτρου που απέχει 4m από το μέτωπο εκσκαφής, έως την εκσκαφή του 80^{ου} m και υποστήριξη του 76^{ου} m της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) όπου ολοκληρώνεται η κατασκευή.

3.4.4. Απόσταση εφαρμογής μέτρων υποστήριξης $S_{\text{tunnel face}}/D = 0.75$ στη δεύτερη σήραγγα

Η ομάδα αναλύσεων με $S_{\text{tunnel face}}/D = 0.75$, εμπεριέχει συνολικά 155 βήματα (steps). Το βήμα εκσκαφής είναι 1m και για τις δύο σήραγγες. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόζεται σε απόσταση $S_{\text{tunnel face}} = 1\text{m}$ πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της «μονής» (single) σήραγγας, ενώ $S_{\text{tunnel face}} = 6\text{m}$ πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της «δεύτερης» (second) σήραγγας. Αντιπροσωπευτικά βήματα, είναι:

❖ Βήματα 0 – 80

Τα βήματα 0 έως 80, τα οποία αναφέρονται στη «μονή/πρώτη» (single/first tunnel) σήραγγα, ακολουθούν όμοια διαδικασία με τις παραπάνω περιπτώσεις.

❖ Βήμα 81

Εκσκαφή του 1^{ου} m έως και 6^{ου} m της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel).

❖ Βήμα 82

Εκσκαφή του 7^{ου} m και υποστήριξη του 1^{ου} m της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel).

❖ Βήμα 83 – 155

Εκσκαφή του επόμενου μέτρου και υποστήριξη του μέτρου το οποίο βρίσκεται 6m πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, έως την εκσκαφή του 80^{ου} m και υποστήριξη του 74^{ου} m της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel).

3.4.5. Απόσταση εφαρμογής μέτρων υποστήριξης $S_{\text{tunnel face}}/D = 1$ στη δεύτερη σήραγγα

Η ομάδα αναλύσεων με $S_{\text{tunnel face}}/D = 1$, αποτελείται από 153 βήματα (steps) συνολικά. Όπως και παραπάνω, το βήμα εκσκαφής είναι 1m τόσο για την αριστερή, όσο και για τη δεξιά σήραγγα, ενώ η άμεση υποστήριξη εφαρμόζεται σε απόσταση $S_{\text{tunnel face}} = 1\text{m}$ πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της «μονής/πρώτης» σήραγγας (single/first tunnel) και $S_{\text{tunnel face}} = 8\text{m}$ πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel). Αντιπροσωπευτικά βήματα, είναι:

❖ Βήματα 0 – 80

Όμοια με τις ανωτέρω περιπτώσεις.

❖ Βήμα 81

Εκσκαφή του 1^{ου} m έως και 8^{ου} m της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel).

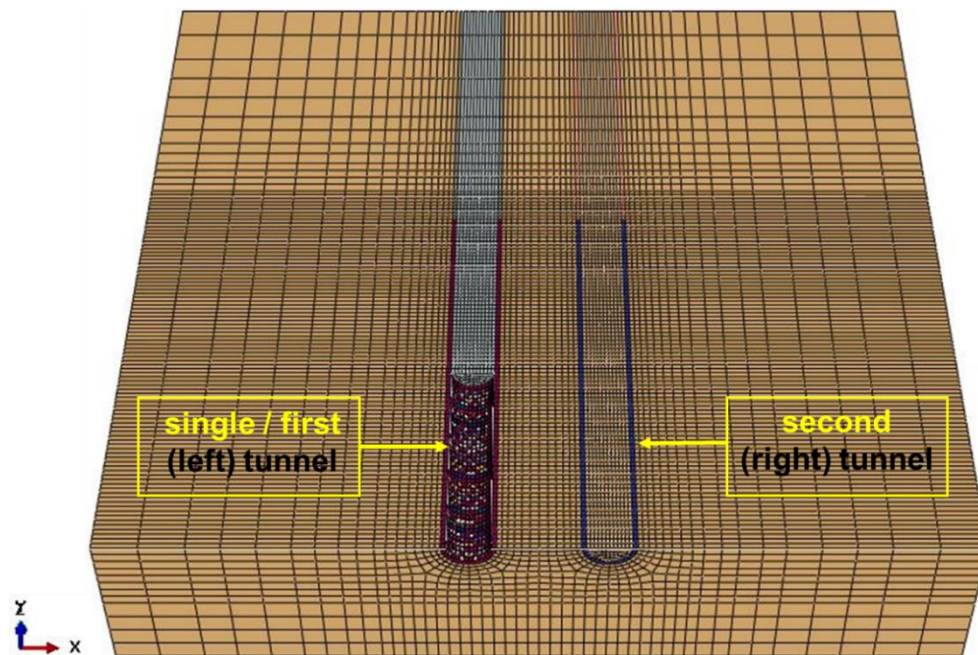
❖ Βήμα 82

Εκσκαφή του 9^{ου} m και υποστήριξη του 1^{ου} m της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel).

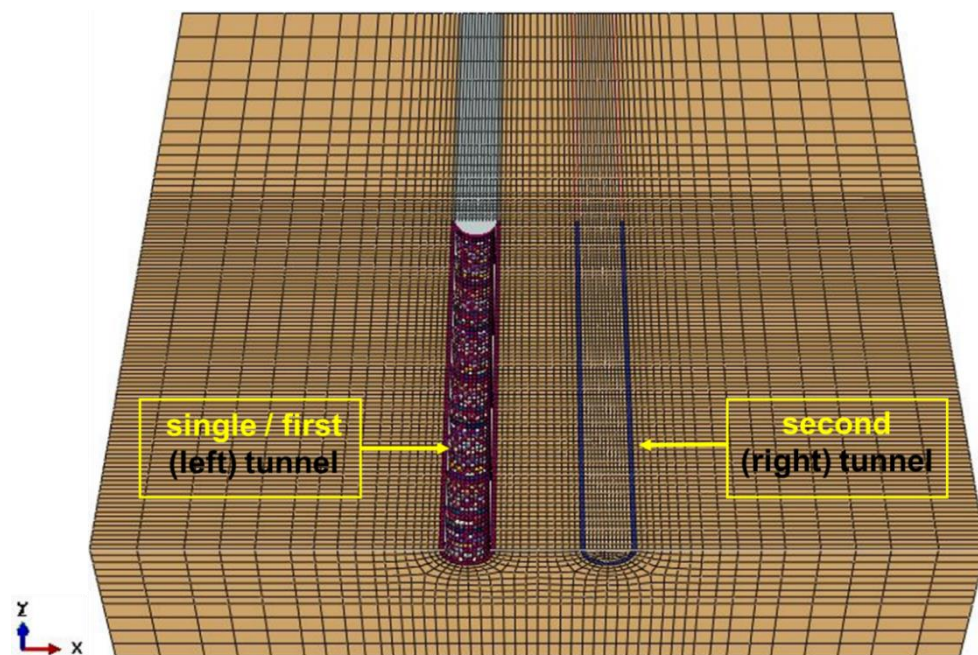
❖ Βήμα 83 – 153

Εκσκαφή του επόμενου μέτρου και υποστήριξη του μέτρου το οποίο βρίσκεται 8m πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, έως την εκσκαφή του 80^{ου} m και υποστήριξη του 72^{ου} m της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel). Με το βήμα 153 ολοκληρώνεται η κατασκευή της δεξιάς σήραγγας.

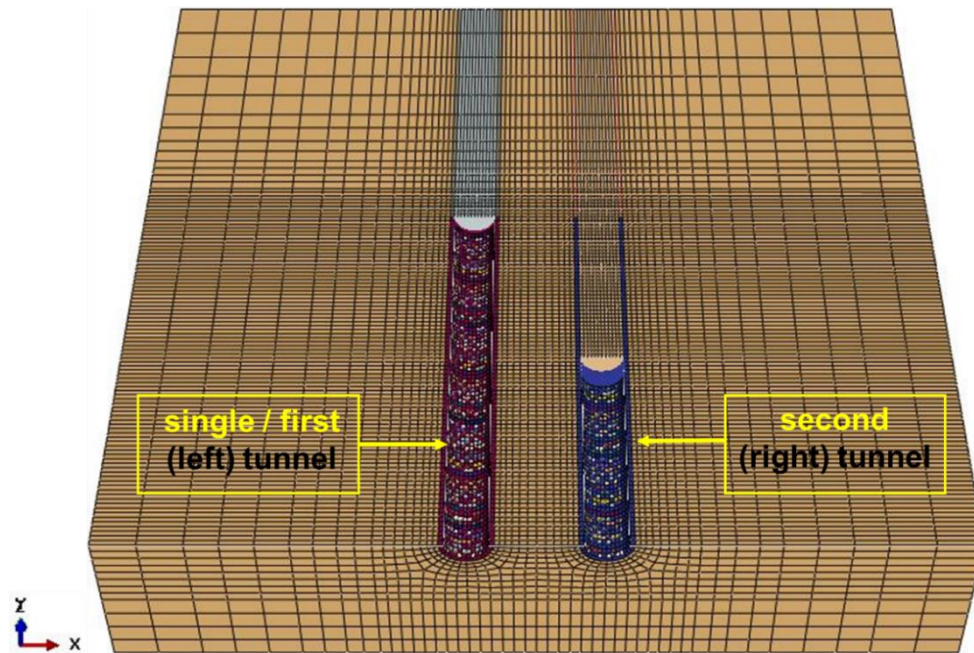
Στη συνέχεια παρατίθενται σχήματα στα οποία απεικονίζονται ενδεικτικά βήματα από μια αριθμητική ανάλυση (Σχήμα 3.4-1, Σχήμα 3.4-2, Σχήμα 3.4-3 & Σχήμα 3.4-4).



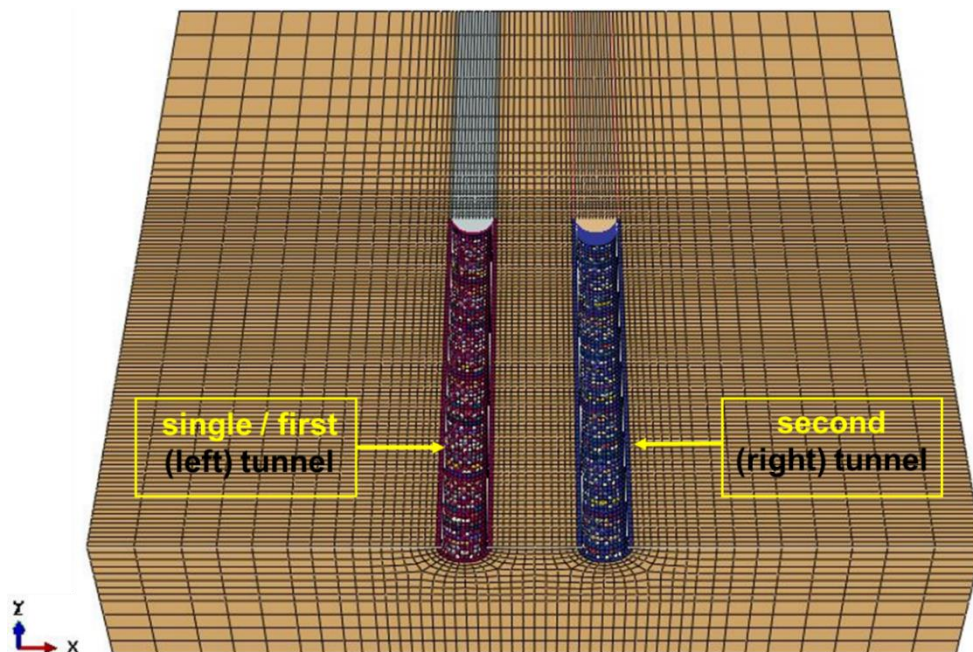
Σχήμα 3.4-1: Τομή, στο επίπεδο X – Y του αριθμητικού μοντέλου, που διέρχεται από τις οριζόντιες διαμέτρους των σηράγγων. Στο σχήμα φαίνεται το 40^ο βήμα της αριθμητικής ανάλυσης, στο οποίο έχουν εκσκαφθεί 40m και έχουν υποστηριχθεί 39m της «μονής/πρώτης» σήραγγας (single/first tunnel). Η διαδικασία εκσκαφής και υποστήριξης της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) δεν έχει ξεκινήσει σε αυτό το βήμα.



Σχήμα 3.4-2: Τομή, στο επίπεδο X – Y του αριθμητικού μοντέλου, που διέρχεται από τις οριζόντιες διαμέτρους των σηράγγων. Στο σχήμα φαίνεται το 80^ο βήμα της αριθμητικής ανάλυσης, στο οποίο έχουν εκσκαφθεί 80m και έχουν υποστηριχθεί 79m της «μονής/πρώτης» σήραγγας (single/first tunnel). Η διαδικασία εκσκαφής και υποστήριξης της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) δεν έχει ξεκινήσει σε αυτό το βήμα.



Σχήμα 3.4-3: Τομή, στο επίπεδο X – Y του αριθμητικού μοντέλου, που διέρχεται από τις οριζόντιες διαμέτρους των σηράγγων. Πρόκειται για ανάλυση με απόσταση εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης, της δεύτερης σήραγγας από το μέτωπο, $S_{\text{tunnel face}}/D = 0.5$. Στο σχήμα φαίνεται το 120° βήμα της αριθμητικής ανάλυσης, στο οποίο έχουν εκσκαφθεί 80m και έχουν υποστηριχθεί 79m της «μονής/πρώτης» σήραγγας (single/first tunnel), ενώ έχουν εκσκαφθεί 43m και έχουν υποστηριχθεί 39m της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel).



Σχήμα 3.4-4: Τομή, στο επίπεδο X – Y του αριθμητικού μοντέλου, που διέρχεται από τις οριζόντιες διαμέτρους των σηράγγων. Πρόκειται για ανάλυση όπου $S_{\text{tunnel face}}/D = 0.5$. Στο σχήμα φαίνεται το 157° βήμα της ανάλυσης, όπου έχουν εκσκαφθεί 80m και έχουν υποστηριχθεί 79m της «μονής/πρώτης» σήραγγας (single/first tunnel), ενώ έχουν εκσκαφθεί 80m και έχουν υποστηριχθεί 76m της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel).

3.5. Παράμετροι αριθμητικών αναλύσεων

Σε αυτό το σημείο παρατίθενται οι γεωμετρικές, γεωτεχνικές, καθώς και οι παράμετροι της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές αναλύσεις, ενώ ακόμη περιλαμβάνονται συγκεντρωτικοί πίνακες οι οποίοι συνοψίζουν τις ανωτέρω παραμέτρους με τα μεγέθη τους.

3.5.1. Γεωμετρικές παράμετροι

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

3.5.1.1. Σταθερές παράμετροι

Οι σταθερές παράμετροι των αναλύσεων, είναι οι ακόλουθες:

I. Η διάμετρος της σήραγγας (**D**), όπου

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

II. Το μήκος της εκσκαφής (**L_{exc}**), όπου

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

III. 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
- ✓ επιπρόσθετου, ομοιόμορφα κατανεμημένου, κατακόρυφου φορτίου στην άνω επιφάνεια του αριθμητικού μοντέλου ($2D = 16\text{m}$).

Δηλαδή, το τελικό ύψος υπερκειμένων γαιών, είναι:

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

- IV. Η απόσταση του διαμήκου ορίου μπροστά από κάθε σήραγγα, η οποία ισούται με $8D = 64 \text{ m}$.

3.5.1.2. Μεταβλητές παράμετροι

Οι μεταβλητές παράμετροι των αναλύσεων, είναι:

- I. Το πλάτος του πυλώνα (**W**), το οποίο ορίζεται ως η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των παρειών των γειτονικών παράλληλων σηράγγων. Στα πλαίσια της εργασίας, εξετάζονται πέντε μεγέθη πλατών πυλώνα. Πιο συγκεκριμένα μελετώνται:

- $W = 0.5D = 4 \text{ m}$
- $W = 1D = 8 \text{ m}$
- $W = 2D = 16 \text{ m}$
- $W = 3D = 24 \text{ m}$
- $W = 4D = 32 \text{ m}$

- II. Η απόσταση της εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο (**S_{tunnel face}**) στη «δεύτερη» σήραγγα (second – right tunnel). Τα μεγέθη τα οποία εξετάζονται είναι:

- $S_{tunnel \text{ face}} = 0.125D = 1 \text{ m}$
- $S_{tunnel \text{ face}} = 0.25D = 2 \text{ m}$
- $S_{tunnel \text{ face}} = 0.5D = 4 \text{ m}$
- $S_{tunnel \text{ face}} = 0.75D = 6 \text{ m}$
- $S_{tunnel \text{ face}} = 1D = 8 \text{ m}$

3.5.2. Γεωτεχνικές παράμετροι

Οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας, αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες στο σχεδιασμό και την κατασκευή των σηράγγων, καθώς επηρεάζουν τα φορτία και τα εντατικά μεγέθη που υφίσταται η άμεση υποστήριξη. Με σκοπό τη μελέτη των μεγεθών αυτών συναρτήσει και των γεωτεχνικών συνθηκών, σε κάθε σειρά αναλύσεων, πέρα από τις μεταβλητές παραμέτρους του πλάτους του πυλώνα και της απόστασης της εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο τροποποιούνται και οι γεωτεχνικές παράμετροι του περιβάλλοντος, των σηράγγων, γεωυλικού. Μία ακόμη παράμετρος που επιλέγεται να διερευνηθεί, είναι η μεταβολή του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_0), ο οποίος καθορίζει την εντατική κατάσταση της βραχόμαζας.

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

Στα επόμενα, περιλαμβάνεται μια περιγραφή του εύρους των γεωτεχνικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις.

3.5.2.1. Ειδικό βάρος πετρώματος (γ)

Το ειδικό βάρος του πετρώματος, θεωρείται ίσο με 0.025 MN/m^3 , σε όλες τις αναλύσεις.

3.5.2.2. Αντοχή άρρηκτου βράχου (σ_{ci})

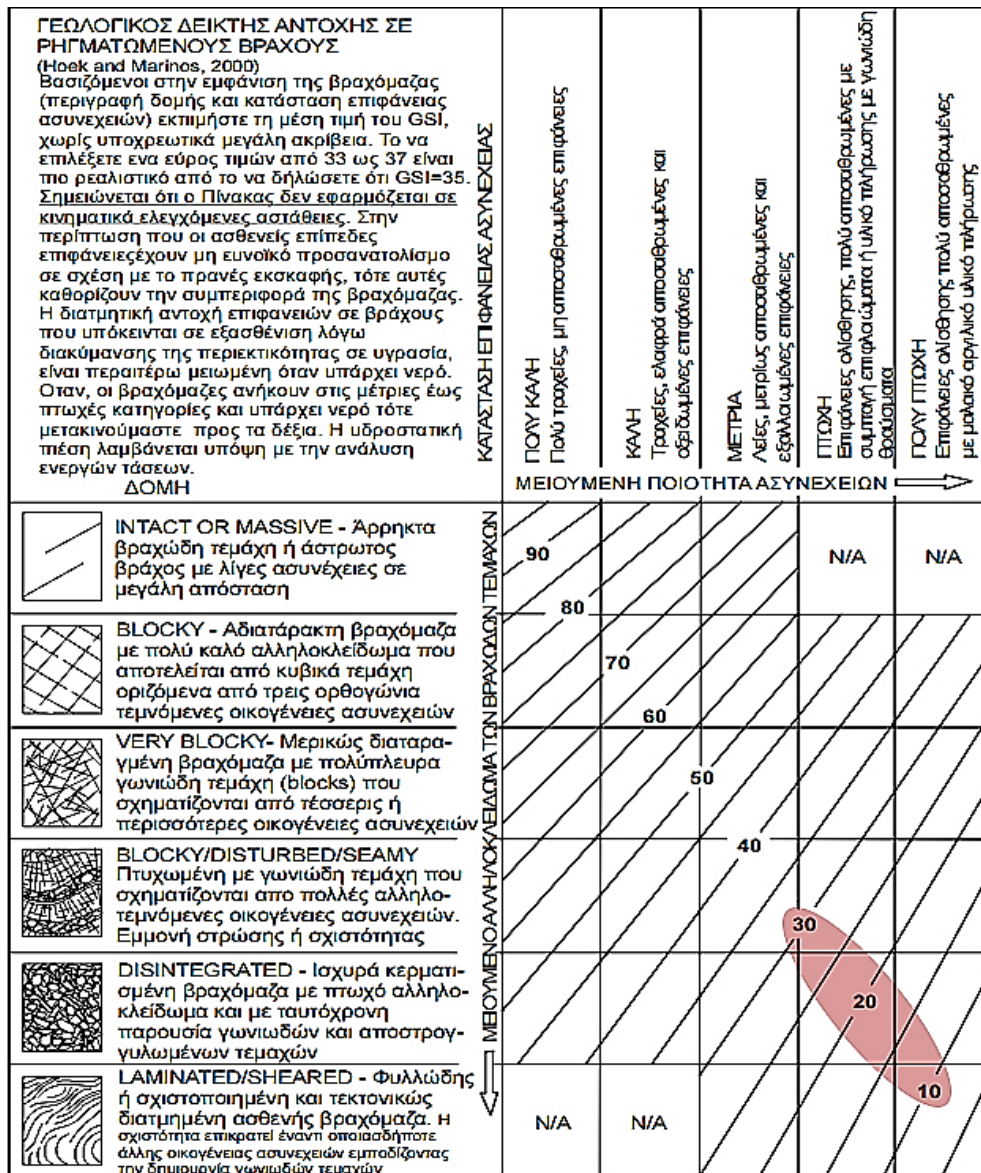
Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη του άρρηκτου βράχου, στο φάσμα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, λαμβάνει την τιμή 10 MPa .

3.5.2.3. Σταθερά άρρηκτου γεωυλικού

Η τιμή της σταθεράς m_i , του άρρηκτου βράχου είναι ίση με 7 σε όλες τις αναλύσεις.

3.5.2.4. Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής (Geological Strength Index – GSI)

Ανάλογα με την ομάδα κάθε ανάλυσης, ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 10 και 30. Πρόκειται, δηλαδή, για πτωχής ποιότητας βραχώμαζα στην οποία αναμένονται προβλήματα παραμορφώσεων. Πιο συγκεκριμένα, το GSI λαμβάνει τις τιμές 10, 15, 20, 25 και 30. Στο Σχήμα 3.5-1 φαίνεται η περιοχή του διαγράμματος GSI, η οποία μελετήθηκε στα πλαίσια της εργασίας.



Σχήμα 3.5-1: Περιοχή του διαγράμματος GSI η οποία μελετήθηκε στα πλαίσια της έρευνας (Hoek and Marinos, 2000).

3.5.2.5. Συντελεστής διατάραξης βραχόμαζας (D)

Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει γενικά τιμές από μηδέν (0) για αδιατάρακτη βραχόμαζα, έως ένα (1) για πολύ διαταραγμένη βραχόμαζα. Στα πλαίσια της εργασίας μελετώνται βαθιές σήραγγες και η δομή της βραχόμαζας θεωρείται συμπαγής και μη διαταραγμένη. Κατά συνέπεια, η τιμή του συντελεστή διατάραξης της βραχόμαζας λαμβάνεται ίση με μηδέν (0).

3.5.2.6. Παράμετροι διατμητικής αντοχής του πετρώματος. Συνοχή (c) & Γωνία τριβής (φ)

Ύστερα από το συσχετισμό των παραμέτρων του γενικευμένου κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown με το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb, προκύπτουν οι ισοδύναμες τιμές των παραμέτρων διατμητικής αντοχής. Η συνοχή, η οποία εκφράζει τη «συγκόλληση», δηλαδή την αντοχή σε εφελκυσμό, λόγω κλειδώματος, των κόκκων, λαμβάνει στο φάσμα των αναλύσεων που πραγματοποιούνται τιμές από 0.08 MPa έως 0.16 MPa . Η γωνία τριβής, λαμβάνει τιμές από 21.1° έως 29.4°.

3.5.2.7. Αντοχή βραχόμαζας (σ_{cm})

Η αντοχή της βραχόμαζας σε μονοαξονική θλίψη (σ_{cm}), υπολογίζεται με βάση τον ακόλουθο τύπο, που προτείνουν οι Hoek et al. (2002):

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

Όπου

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

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

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

Το εύρος τιμών της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη της βραχόμαζας, που προκύπτει από τις ανωτέρω εξισώσεις, κυμαίνεται από 0.43 MPa έως 0.91 MPa

3.5.2.8. Γωνία διαστολικότητας (ψ)

Η γωνία διαστολικότητας (ψ) σε όλες τις αναλύσεις λαμβάνεται ίση με το $1/4$ της γωνίας εσωτερικής τριβής, δηλαδή

$$\psi = \varphi/4$$

Το εύρος των τιμών της γωνίας διαστολικότητας είναι από 5.3° έως 7.3° .

3.5.2.9. Μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου (E_i) & Μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας (E_m)

❖ Το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου υπολογίζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

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

Όπου η σταθερά MR (Modulus Ratio) λαμβάνει την τιμή 350, ενώ το μέτρο ελαστικότητας 3500 MPa .

❖ Το μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας, υπολογίζεται με βάση τη σχέση που προτείνουν οι Hoek and Diederichs (2006):

$$E_m = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{\left(\frac{60+15D-GSI}{11}\right)}} \right)$$

Με βάση την ανωτέρω σχέση, προκύπτει ένα φάσμα τιμών από 106.8 MPa έως 284.8 MPa.

3.5.2.10. Λόγος Poisson (ν) της βραχόμαζας

Η τιμή του λόγου Poisson της βραχόμαζας λαμβάνεται ως 0.3, τιμή που αντιστοιχεί σε πτωχής ποιότητας γεωυλικό.

3.5.2.11. Συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_o)

Σύμφωνα με τον Καββαδά (2012), ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_o) συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.4 – 1.0 χωρίς να αποκλείονται και μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα, σε υγείς βραχώμαζες χωρίς επιρροή από τεκτονικές πιέσεις, ο συντελεστής $K_o = 0.6 - 1.0$, ενώ σε αποσαθρωμένες βραχώμαζες, $K_o = 0.4-0.7$. Στην περίπτωση όπου η βραχώμαζα επηρεάζεται από τεκτονικές πιέσεις ο συντελεστής K_o 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 ($K_o = 0 - 0.3$ στην περίπτωση έντονου εφελκυστικού τεκτονικού καθεστώτος).

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, οι τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων που εξετάζονται, είναι οι ακόλουθες:

- $K_o = 0.5$
- $K_o = 1.0$
- $K_o = 1.5$

3.5.3. Παράμετροι άμεσης υποστήριξης

Η τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης αποτελεί πολύ σημαντικό στοιχείο της επένδυσης των σηράγγων, καθώς περιορίζει τη σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας και συμβάλλει στην αποφυγή κατάρρευσης της οροφής και την αποφυγή αποσφηνώσεων βραχωδών τεμαχών. Στις περιπτώσεις που μελετώνται επιλέγεται η άμεση υποστήριξη των σηράγγων να αποτελείται από κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος (shotcrete) το οποίο ακολουθεί γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά και του οποίου οι παράμετροι καθορίζονται στη συνέχεια.

3.5.3.1. Πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος (d_{sh})

Το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος λαμβάνεται ίσο με 0.2m, σε όλες τις αναλύσεις.

3.5.3.2. Ειδικό βάρος εκτοξευόμενου σκυροδέματος (γ_{sh})

Η τιμή του ειδικού βάρους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος θεωρείται ίση με 0.025 MN/m³.

3.5.3.3. Μέτρο ελαστικότητας εκτοξευόμενου σκυροδέματος (E_{sh})

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

3.5.3.4. Λόγος Poisson (ν_{sh})

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

Σημειώνεται ότι η δυσκαμψία και η αντοχή του σκυροδέματος, παράμετροι οι οποίες εξαρτώνται από το χρόνο δε λαμβάνονται υπόψη στις παραμετρικές αναλύσεις.

Ο Πίνακας 3.5-1 περιλαμβάνει συγκεντρωτικά τις γεωμετρικές, τις γεωτεχνικές και τις παραμέτρους της άμεσης υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν στις τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις.

Πίνακας 3.5-1: Συγκεντρωτικός πίνακας γεωμετρικών, γεωτεχνικών και παραμέτρων άμεσης υποστήριξης.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΙΜΕΣ	ΜΟΝΑΔΕΣ
ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	Διάμετρος Σήραγγας	D	8	m
	Ύψος Υπερκειμένων Γαιών	H/D	10	
	Μήκος Εκσκαφής	L/D	10	
	Πλάτος Πυλώνα	W/D	0.5, 1, 2, 3, 4	
	Απόσταση Εφαρμογής Άμεσης Υποστήριξης από το Μέτωπο («Δεύτερη» Σήραγγα - Second Tunnel)	$S_{\text{tunnel face}}/D$	0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1	
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής	GSI	10 - 30	
	Συντελεστής Διατάραξης της Βραχώμαζας	D	0	
	Αντοχή Άρρηκτου Βράχου σε Ανεμπόδιση Θλίψη	σ_{ci}	10	MPa
	Συντελεστής Αναλογίας	MR	350	
	Μέτρο Ελαστικότητας Άρρηκτου Βράχου	$E_i = MR \cdot \sigma_{ci}$	3500	MPa
	Σταθερά γεωυλικού	m_i	7	
	Αντοχή Βραχώμαζας σε Ανεμπόδιση Θλίψη	σ_{cm}	0.43 - 0.91	MPa
	Μέτρο Παραμορφωσιμότητας Βραχώμαζας	E_m	106.8 - 284.8	MPa
	Λόγος Poisson	ν	0.3	
	Ειδικό Βάρος	γ	0.025	MN/m ³
	Συνοχή	c	0.08 - 0.16	MPa
	Γωνία Τριβής	ϕ	21.1 - 29.4	(^ο)
	Γωνία Διαστολικότητας	$\psi = \phi/4$	5.3 - 7.3	(^ο)
	Συντελεστής Οριζόντιων Γεωστατικών Τάσεων	K_o	0.5, 1, 1.5	
	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ	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

3.6. Βασικά σύμβολα αριθμητικών αναλύσεων

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

- i. **p** (press): φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα)
- ii. **N** (Normal Force): αξονική δύναμη στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα)
- iii. **M** (Bending Moment): ροπή κάμψης στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα)
- iv. σ_{cm} : αντοχή της βραχόμαζας σε μονοαξονική θλίψη
- v. p_o : γεωστατική τάση πριν την εκσκαφή στο επίπεδο του άξονα της σήραγγας ($p_o = \gamma H$)
- vi. σ_{cm}/p_o : λόγος γεωτεχνικών συνθηκών
- vii. $p_{o,m} = [(1+K_o)/2] \cdot \gamma H$: μέση αρχική γεωστατική πίεση
- viii. $N_s = 2p_o/\sigma_{cm}$: συντελεστής υπερφόρτισης (overload factor)
- ix. p/p_o : κανονικοποιημένο φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα)
- x. $N/(p_o \cdot D)$: κανονικοποιημένη αξονική δύναμη στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας
- xi. $M/(p_o \cdot D^2) \cdot 10^3$: κανονικοποιημένη ροπή κάμψης στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας
- xii. **S/R**: κανονικοποιημένη διαμήκης απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής
- xiii. **S_{tunnel face}/D**: κανονικοποιημένη απόσταση εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής
- xiv. **H/D**: κανονικοποιημένο ύψος υπερκειμένων γαιών
- xv. **W/D**: κανονικοποιημένο πλάτος πυλώνα
- xvi. **L/D**: κανονικοποιημένο μήκος εκσκαφής της σήραγγας

Πίνακας 3.6-1: Συγκεντρωτικός πίνακας συμβόλων που υιοθετούνται στις αριθμητικές αναλύσεις

p	Φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας
N	Αξονική Δύναμη στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας
M	Ροπή Κάμψης στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας
σ_{cm}	Αντοχή βραχόμαζας σε ανεμπόδιστη θλίψη
p_o	Γεωστατική τάση πριν την εκσκαφή στο επίπεδο του άξονα της σήραγγας
σ_{cm}/p_o	Λόγος γεωτεχνικών συνθηκών
p/p_o	Κανονικοποιημένο φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας
$N/(p_o \cdot D)$	Κανονικοποιημένη Αξονική Δύναμη στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας
$M/(p_o \cdot D^2) \cdot 10^3$	Κανονικοποιημένη Ροπή Κάμψης στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας
S/R	Κανονικοποιημένη διαμήκης απόσταση από το μέτωπο της σήραγγας
S_{tunnel face}/D	Κανονικοποιημένη απόσταση εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής

3.7. Παραδοχές αριθμητικών αναλύσεων

Στα πλαίσια της έρευνας, υιοθετούνται μια σειρά από παραδοχές, οι οποίες παρατίθενται σε αυτό το σημείο για την ευχερέστερη κατανόηση των αποτελεσμάτων που ακολουθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

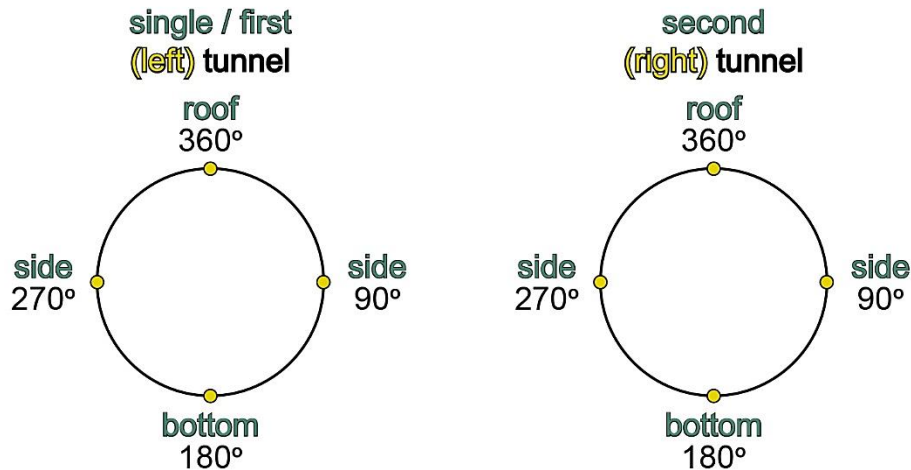
Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας πραγματοποιείται ύστερα από την πλήρη εκσκαφή της αριστερής σήραγγας. Ως βάση σύγκρισης κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων, λαμβάνεται η «μονή» σήραγγα (single tunnel). Συγκρίνονται δηλαδή τα εξαγόμενα αποτελέσματα της «πρώτης» (first tunnel) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel), με τα εξαγόμενα μεγέθη της «μονής» (single tunnel). Για το λόγο αυτό, στο επόμενο κεφάλαιο, των αποτελεσμάτων, τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα είναι κανονικοποιημένα, ως προς τα εξαγόμενα αποτελέσματα της «μονής» σήραγγας (single tunnel).

Αναλυτικότερα, για το σκοπό της μελέτης της επιρροής της κατά σειρά «δεύτερης» εκσκαμμένης, δεξιάς σήραγγας, στην κατά σειρά πρώτη εκσκαμμένη, αριστερή σήραγγα, υιοθετούνται οι εξής παραδοχές:

- I. Η βάση σύγκρισης είναι η αριστερή σήραγγα πριν ξεκινήσει η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας και ονομάζεται «μονή» σήραγγα (single tunnel).
- II. Από τη στιγμή που ξεκινά η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας, η αριστερή σήραγγα από «μονή» (single) μετονομάζεται σε «πρώτη» σήραγγα (first tunnel).
- III. Η δεξιά, ονομάζεται «δεύτερη» σήραγγα (second tunnel).

Ως χαρακτηριστική, «τυπική», διατομή (typical section) λαμβάνεται εκείνη στην οποία έχει υπάρξει σταθεροποίηση της εντατικής και παραμορφωσιακής απόκρισης της περιβάλλουσας, των σηράγγων, βραχώμαζας και το σύστημα γεωυλικό – άμεση υποστήριξη έχει πρακτικά ισορροπήσει λόγω της προχώρησης του μετώπου εκσκαφής.

Παράγοντας ο οποίος συντελεί στην ορθότητα της σύγκρισης κατά τη διαδικασία της ανάλυσης των αποτελεσμάτων, είναι ο προσανατολισμός των γωνιών των σηράγγων και η ανάλογη σύγκριση αυτών. Αναφορικά στον προσανατολισμό αυτό, στην αριστερή (single & first – left – tunnel) και στη δεξιά σήραγγα (second – right – tunnel), έχει προσδιοριστεί να είναι σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Πιο συγκεκριμένα, η γωνία 360° αντιστοιχεί στην κλειδα, η γωνία 90° στη δεξιά παρειά, η γωνία 180° αναφέρεται στον πυθμένα και η γωνία 270° στην αριστερή παρειά (Σχήμα 3.7-1) .



Σχήμα 3.7-1: Προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (single/first – left – tunnel) και της δεξιάς σήραγγας (second – right – tunnel), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού.

Προκειμένου να υποβληθούν σε ακριβή αντιπαραβολή οι παράμετροι που εξετάζονται μεταξύ της αριστερής και της δεξιάς σήραγγας, υιοθετείται σύμβαση η οποία οδηγεί τη σύγκριση να πραγματοποιείται ως προς τον κάθετο άξονα συμμετρίας του αριθμητικού μοντέλου, στη μέση του πυλώνα. Αναλυτικότερα, οι εσωτερικές, ως προς τον πυλώνα, παρειές των σηράγγων και οι αντίστοιχες εξωτερικές, συγκρίνονται αντίστοιχα με τη γωνία 90° της αριστερής σήραγγας να συγκρίνεται με τη γωνία 270° της δεξιάς σήραγγας και τη γωνία 270° της «μονής/πρώτης» σήραγγας να συγκρίνεται με τη γωνία 90° της «δεύτερης» σήραγγας.

Στο επόμενο κεφάλαιο, οι δείκτες οι οποίοι είναι ενσωματωμένοι στα κύρια σύμβολα και αναφέρονται στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, ανταποκρίνονται στον ανωτέρω προσανατολισμό.

4. Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων

4.1. Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα από τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της έρευνας, ενώ επίσης εμπεριέχει παρατηρήσεις οι οποίες διαπιστώνονται σχετικά με τα αποτελέσματα αυτά. Η επιλογή των αποτελεσμάτων γίνεται με σκοπό να αναδειχθούν συγκεκριμένα ζητήματα, μεταξύ των οποίων είναι:

- Η επίδραση του πλάτους του πυλώνα (W/D), στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.
- Η μεγιστοποίηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, στην περίπτωση όπου επικρατούν οι δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες (σ_{cm}/ρ_0), σε συνδυασμό με το μικρότερο πλάτος πυλώνα (W/D).
- Η επιρροή του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_0), στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.
- Η επίδραση που έχει η μεταβολή της απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο ($S_{\text{tunnel face}}$) της δεξιάς σήραγγας, στην άμεση υποστήριξη της αριστερής σήραγγας, δηλαδή ο βαθμός αποτόνωσης της δεξιάς σήραγγας.

4.2. Επίδραση πλάτους πυλώνα (W/D)

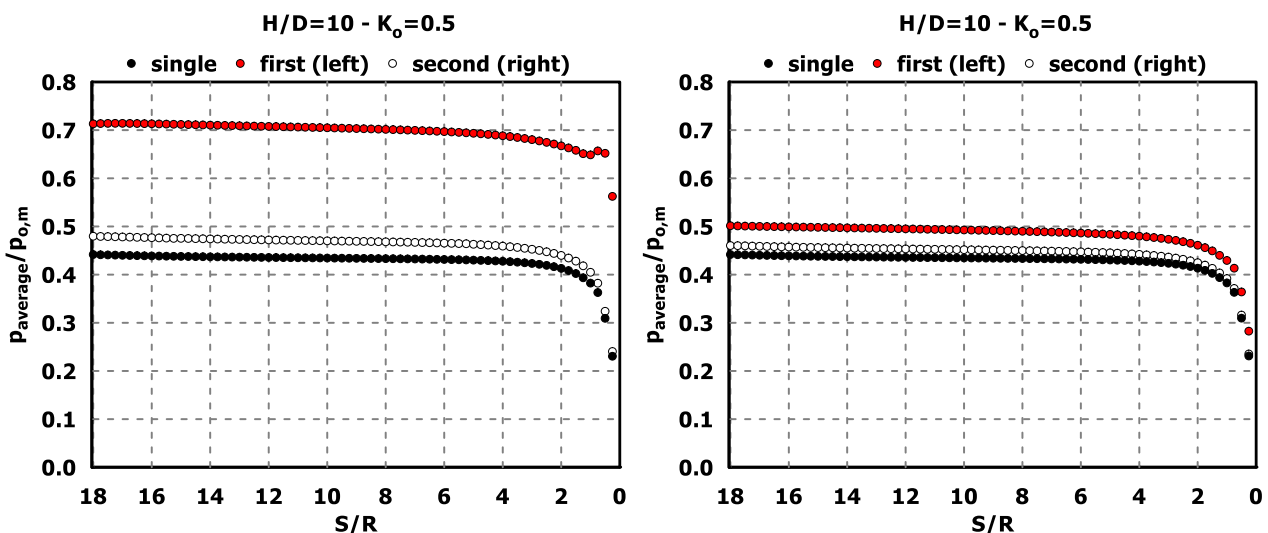
Προκειμένου να αναδειχθεί η επίδραση της εγκάρσιας απόστασης μεταξύ των παρειών των σηράγγων στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, έχουν επιλεγεί να παρουσιαστούν αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ και $W/D = 2$. Οι αναλύσεις αυτές επιλέχθηκαν καθότι για πλάτος πυλώνα $W/D > 2$, παρατηρήθηκε ότι το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης παραμένει περίπου στο ίδιο επίπεδο. Πέραν τούτων, οι αναλύσεις περιλαμβάνουν ταυτόχρονα τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά (Πίνακας 4.2-1), με σκοπό να επισημανθεί η μεγιστοποίηση του φαινομένου στην περίπτωση αυτή. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν αναφέρονται στα φορτία και στα εντατικά μεγέθη (αξονικές δυνάμεις και ροπές κάμψης) που δέχεται η άμεση υποστήριξη των σηράγγων.

Πίνακας 4.2-1: Γεωμετρικές και γεωτεχνικές παράμετροι αντιπροσωπευτικών αναλύσεων με τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ & 2 .

W/D	$S_{\text{tunnel face}}/D$	K_0	GSI	σ_{cm} (MPa)	E_m (MPa)	c (MPa)	ϕ (°)	σ_{cm}/ρ_0
0.5	0.125	0.5	10	0.43	106.8	0.08	21.1	0.21
2	0.125	0.5	10	0.43	106.8	0.08	21.1	0.21

4.2.1. Φορτία (p)

Τα αποτελέσματα του φορτίου (p) στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων, για αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ και $W = 2D = 16m$ φαίνονται στα διαγράμματα του Σχήματος 4.2-1. Αναλυτικότερα, στο σχήμα προβάλλεται το μέσο φορτίο (p_{average}) κανονικοποιημένο ως προς τη μέση αρχική γεωστατική πίεση ($\rho_{0,m}$), 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 έχει ως εξής: με την περαιτέρω προώθηση του μετώπου της σήραγγας η διατομή τείνει να συγκλίνει περαιτέρω, ενώ στην περαιτέρω σύγκλιση ανθίσταται ο δακτύλιος από εκτοξευόμενο σκυροδέμα αναλαμβάνοντας φορτία. Σε απόσταση περίπου ίση με τρεις διαμέτρους της σήραγγας από το μέτωπο ($S = 6R$) τα φορτία που αναλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυροδέμα σταθεροποιούνται.



Σχήμα 4.2-1: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $p_{\text{average}}/\rho_{0,m}$ 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) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).

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

Η απόκριση αυτή είναι λογική, καθότι η δεξιά σήραγγα εκσκάπτεται ύστερα από την ολοκλήρωση της εκσκαφής και υποστήριξης της αριστερής. Κατά συνέπεια, 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 περισσότερα φορτία. Ως αποτέλεσμα, η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας επιφέρει έντονη αύξηση των φορτίων στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας. Στην περίπτωση, δε, των δυσμενέστερων γεωτεχνικών συνθηκών που αναλύονται στην προκειμένη περίπτωση, η δεξιά σήραγγα εκσκάπτεται σε ένα ήδη ανακατανομημένο πεδίο τάσεων με μία προϋπάρχουσα πλαστική ζώνη, το οποίο οδηγεί σε μικρή παραλαβή φορτίων από την υποστήριξή της.

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.

Αναλυτικότερα, στον Πίνακα 4.2-2 παρουσιάζεται η επίδραση του πλάτους του πυλώνα (W/D) στο μέσο φορτίο ($p_{average}$) που δέχεται η άμεση υποστήριξη των σηράγγων, σε όρους ποσοστιαίας μεταβολής. Πιο συγκεκριμένα, συγκρίνεται το μέσο φορτίο που δέχεται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της «πρώτης» (first tunnel) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) σε σχέση με το μέσο φορτίο της «μονής» σήραγγας (single tunnel) για κάθε ανάλυση, ενώ ακολούθως συγκρίνονται αυτά τα μεγέθη για τα δύο πλάτη πυλώνα ($W/D = 0.5$ και $W/D = 2$).

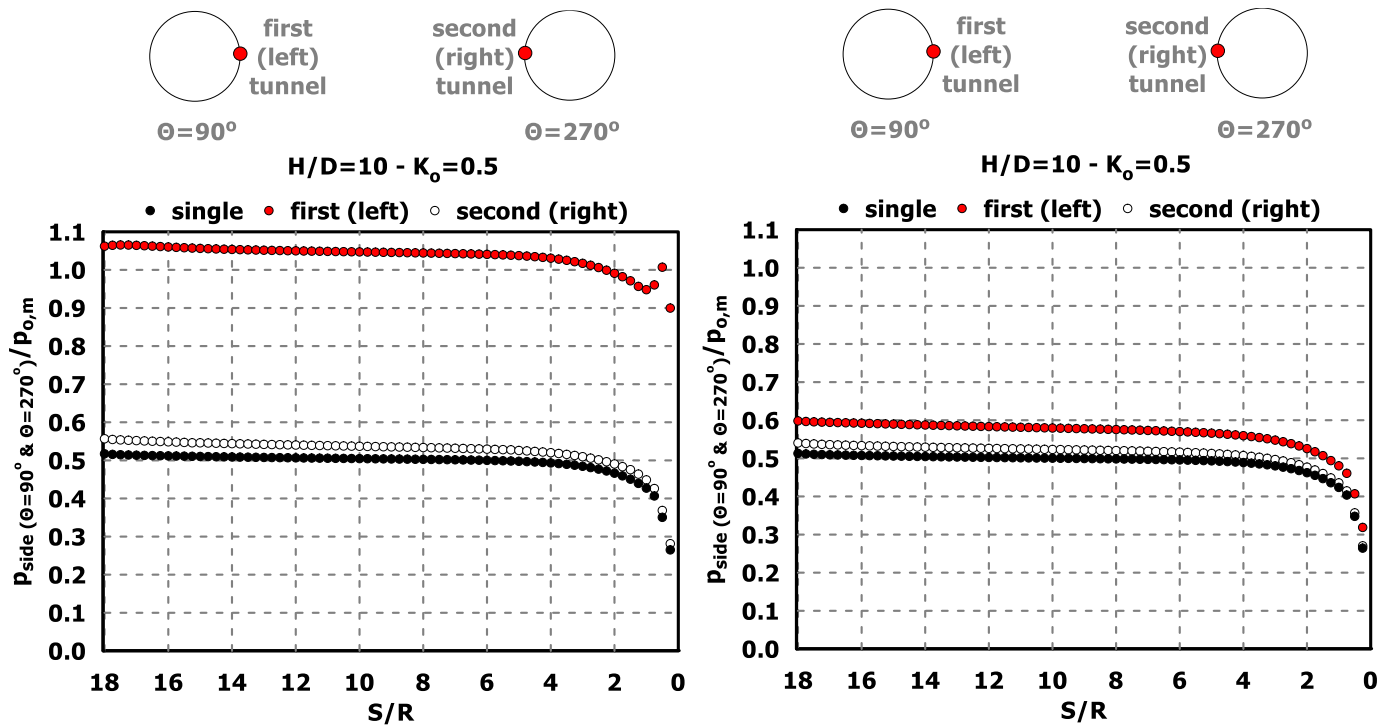
Για το μικρότερο πλάτος πυλώνα που εξετάσθηκε ($W = 0.5D = 4m$), το μέσο φορτίο που δέχεται η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας είναι αυξημένο σε σχέση με το φορτίο που δέχεται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της «μονής» κατά 38.6%. Αντίστοιχα, τα φορτία της άμεσης υποστήριξης της «δεύτερης» σήραγγας είναι αυξημένα σε ποσοστό 8.5%. Ακολούθως, για πλάτος πυλώνα $W = 2D = 16m$ τα ποσοστά παρουσιάζονται

εμφανώς μειωμένα και είναι 12.2% και 4.4% αντίστοιχα. Η διαφορά αυτή έγκειται στο γεγονός ότι με την αύξηση της εγκάρσιας απόστασης μεταξύ των διατομών, υπάρχει μικρότερη διατάραξη της περιβάλλουσας βραχώμαζας και κατ' επέκταση μικρότερη αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο κλάδων. Επιπλέον, η ανακατανομή των τάσεων συγκεντρώνεται στις περιοχές κοντά στις σήραγγες, ενώ σε απόσταση περίπου δύο φορές τη διάμετρο της σήραγγας η διαταραχή του επί τόπου εντατικού πεδίου καθίσταται αμελητέα. Κατά συνέπεια, το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης ξεκινά να εξαλείφεται για πλάτος πυλώνα από 2D και άνω, ενώ υπό τις δεδομένες γεωτεχνικές συνθήκες, οι σήραγγες δύνανται να λαμβάνονται ως ανεξάρτητες, μεταξύ τους, κατασκευές.

Πίνακας 4.2-2: Επίδραση του πλάτους του πυλώνα (W/D) στα φορτία που δέχεται η άμεση υποστήριξη των σηράγγων. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στη χαρακτηριστική διατομή όπου τα φορτία στη διαμήκη διεύθυνση έχουν συγκλίνει την τελική τους τιμή και στις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).

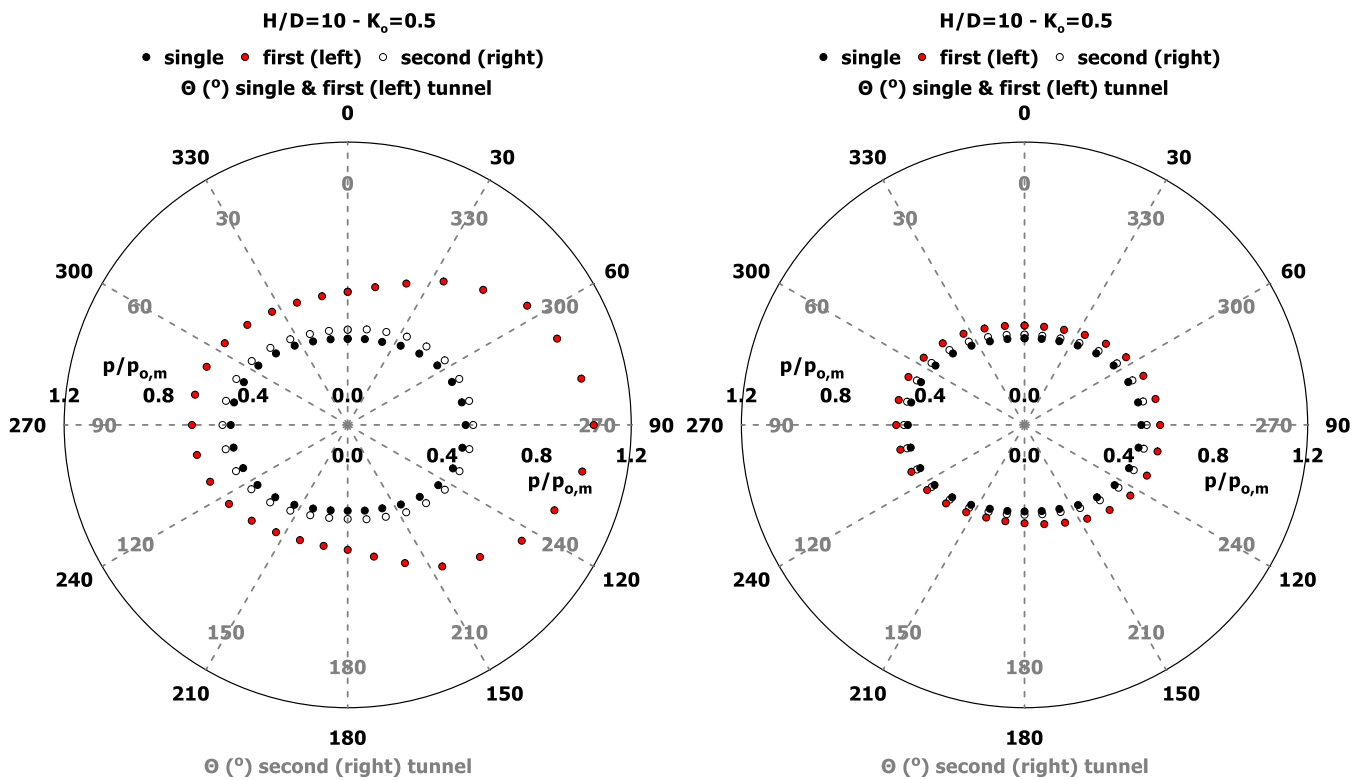
W/D = 0.5							
Μονή σήραγγα (Single tunnel)		Πρώτη σήραγγα (First tunnel)		Δεύτερη σήραγγα (Second tunnel)		ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ (%)	
S/R	$\rho_{single,average}/\rho_{o,m}$	S/R	$\rho_{first,average}/\rho_{o,m}$	S/R	$\rho_{second,average}/\rho_{o,m}$	$(\rho_{first,average} - \rho_{single,average}) / \rho_{first,average}$	$(\rho_{second,average} - \rho_{single,average}) / \rho_{second,average}$
5.5	0.43	6	0.70	6.5	0.47	38.6	8.5
W/D = 2							
S/R	$\rho_{single,average}/\rho_{o,m}$	S/R	$\rho_{first,average}/\rho_{o,m}$	S/R	$\rho_{second,average}/\rho_{o,m}$	$(\rho_{first,average} - \rho_{single,average}) / \rho_{first,average}$	$(\rho_{second,average} - \rho_{single,average}) / \rho_{second,average}$
5.5	0.43	7.5	0.49	6.5	0.45	12.2	4.4

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 διαμήκους άξονα των κλάδων (Σχήμα 4.2-2). Το σχήμα 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 4.2-2: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου $p_{\text{side}}(\theta = 90^\circ \text{ \& } \theta = 270^\circ)/p_{o,m}$ επί των εσωτερικών παρειών συναρτήσεσι του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4\text{m}$ (αριστερά) & $W = 2D = 16\text{m}$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o = 0.21$).

Στη συνέχεια, το Σχήμα 4.2-3 αποτυπώνει την κατανομή του ανηγμένου φορτίου $p/p_{o,m}$ συναρτήσεσι της γωνίας Θ ($^\circ$) στη χαρακτηριστική διατομή των σηράγγων, για πλάτη πυλώνα $W = 0.5D = 4\text{m}$ και $W = 2D = 16\text{m}$. 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 πρωτίτερα, ανεξαρτήτως πλάτους πυλώνα, περισσότερο καταπονούνται οι εσωτερικές παρείες 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 4.2-3, 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 4.2-3: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου $p/p_{o,m}$ συναρτήσει της γωνίας Θ ($^{\circ}$) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4\text{m}$ (αριστερά) & $W = 2D = 16\text{m}$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o = 0.21$).

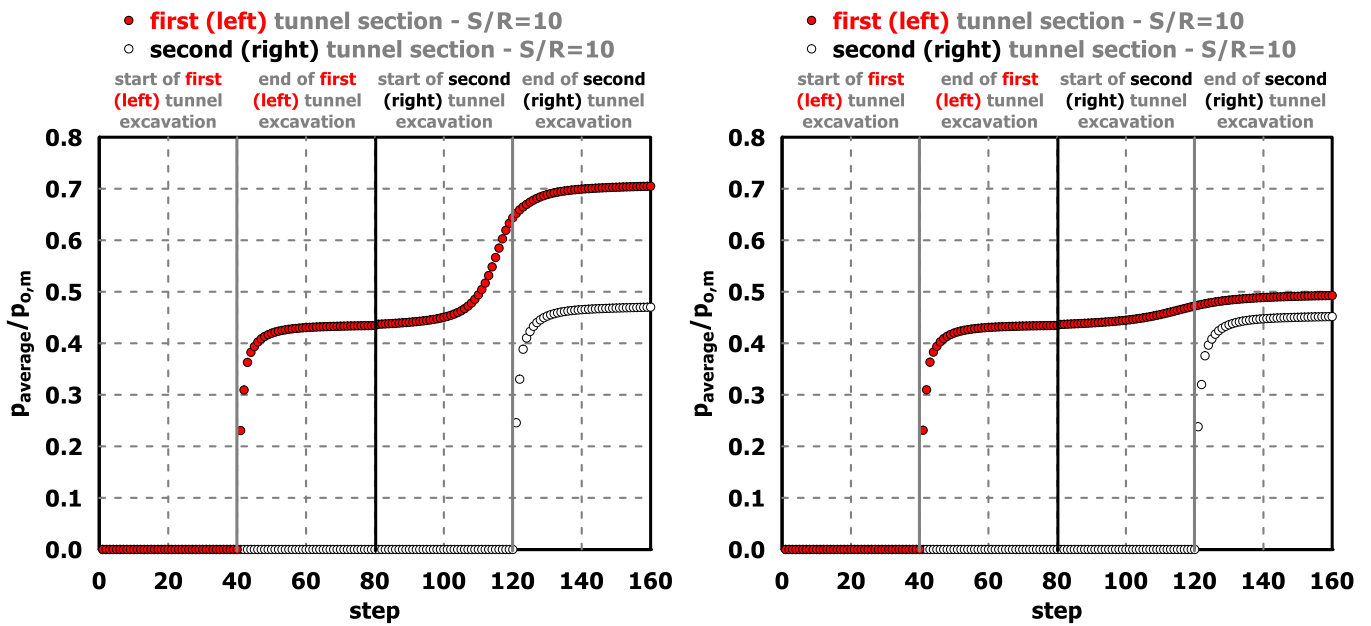
Το Σχήμα 4.2-4 απεικονίζει τη χρονοϊστορία των μέσων φορτίων (p_{average}) της «πρώτης» (first tunnel) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) σε επιλεγμένη διατομή με κανονικοποιημένη διαμήκη απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ($S/R = 10$), συναρτήσει του βήματος (step) της ανάλυσης. Τα φορτία είναι ανηγμένα ως προς τη μέση αρχική γεωστατική τάση ($p_{o,m}$). 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 υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας, ενώ στο βήμα 121 τοποθετείται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της διατομής που βρίσκεται 40m από το μέτωπο.

Από το εν λόγω σχήμα παρατηρείται σταδιακή αύξηση των φορτίων με την προχώρηση της εκσκαφής της αριστερής σήραγγας και την εκκίνηση της εκσκαφής της δεξιάς, ενώ όσον αφορά στην ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D$, εμφανίζεται απότομη αύξηση καθώς το μέτωπο της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) πλησιάζει τη δεδομένη διατομή της «πρώτης» (first tunnel). Πιο συγκεκριμένα, τη στιγμή που το μέτωπο της

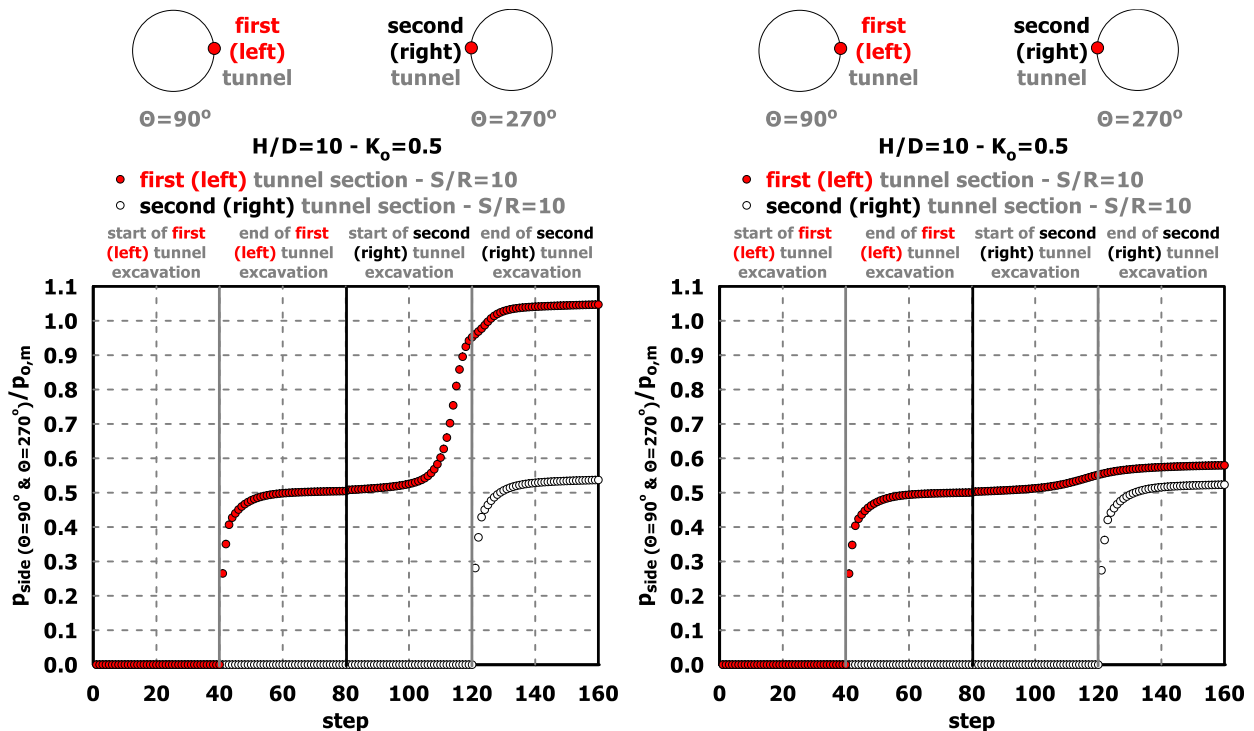
δεξιάς σήραγγας περνά ακριβώς δίπλα από την εξεταζόμενη διατομή της αριστερής, με δεδομένο ότι η διατομή της «μονής» σήραγγας έχει ισορροπήσει, τα φορτία στην εσωτερική παρειά ($\Theta = 90^\circ$) αυξάνονται σε ποσοστό 47% σε σχέση με αυτά που υπήρχαν στη συγκεκριμένη διατομή πριν τη διάνοιξη της «δεύτερης» σήραγγας. Καθώς το μέτωπο της δεξιάς σήραγγας απομακρύνεται κατά τη διαμήκη διεύθυνση από τη δεδομένη διατομή της αριστερής, τα φορτία σταθεροποιούνται. Επομένως, η διάνοιξη 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 περαιτέρω φορτία που παραλαμβάνει η αριστερή σήραγγα λόγω της εκσκαφής της δεξιάς μειώνονται σε τέτοιο βαθμό, που σχεδόν θεωρούνται επουσιώδη. Επομένως, 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. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση του πλάτους του πυλώνα (W/D) σχετίζεται με την αύξηση των φορτίων στην άμεση υποστήριξη, η οποία αύξηση τελικά σταθεροποιείται για πλάτος πυλώνα $(W/D) > 2$.

Τέλος, ανεξαρτήτως πλάτους πυλώνα τα μέγιστα φορτία λαμβάνονται, όπως είναι αναμενόμενο, στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων όπου το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεγιστοποιείται, ενώ τα φορτία που αναλαμβάνει η άμεση υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας είναι περίπου στο ίδιο επίπεδο. (Σχήμα 4.2-5).



Σχήμα 4.2-4: Χρονοϊστορία των κανονικοποιημένων μέσων φορτίων $p_{average}/p_{o,m}$ επί της άμεσης υποστήριξης συναρτήσεϊ του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o = 0.21$).



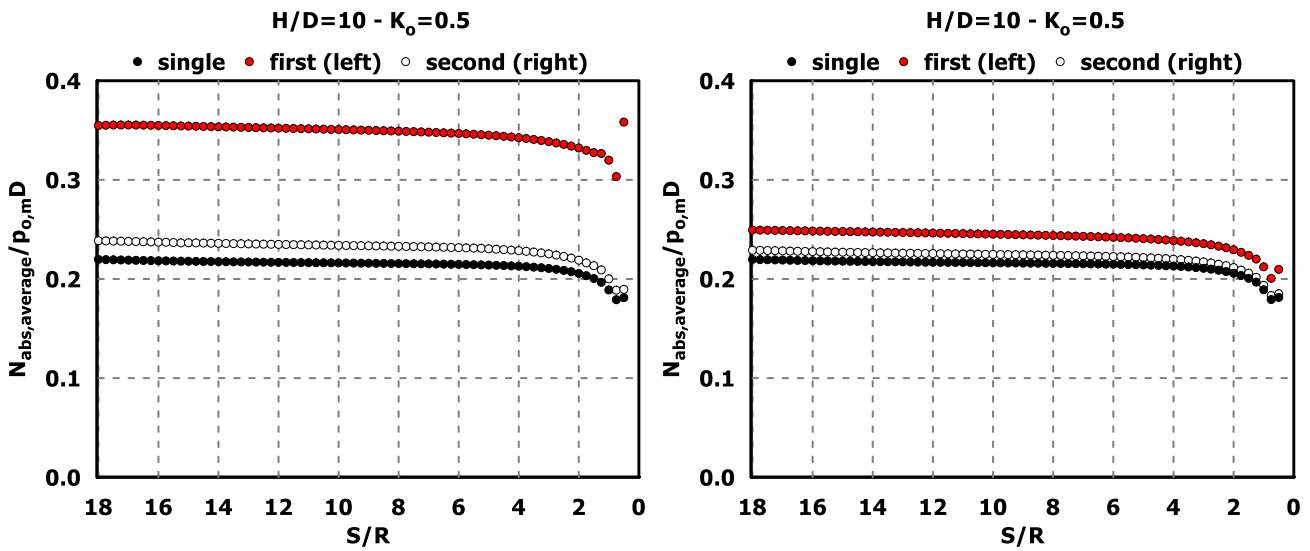
Σχήμα 4.2-5: Χρονοϊστορία των κανονικοποιημένων φορτίων $p_{side} (\theta = 90^\circ \text{ \& } \theta = 270^\circ)/p_{o,m}$ επί των εσωτερικών παρεϊών στην άμεση υποστήριξη συναρτήσεϊ του βήματος (step) κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o = 0.21$).

4.2.2. Αξονικές δυνάμεις (N)

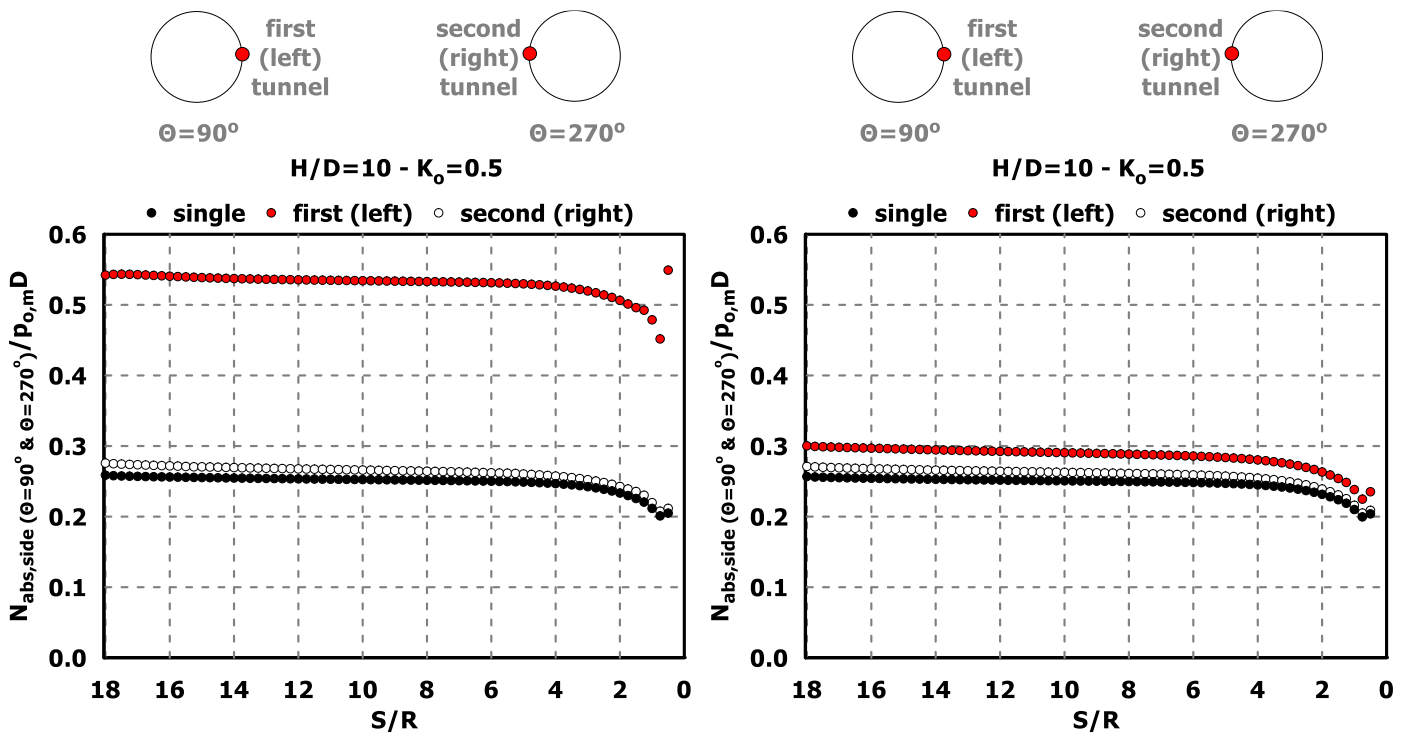
Όπως φαίνεται στα διαγράμματα του Σχήματος 4.2-6, ανάλογα με των φορτίων (p) είναι τα αποτελέσματα των αξονικών δυνάμεων (N) που δρουν στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων για αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ και $W/D = 2$. Στο σχήμα προβάλλεται η – κατά απόλυτη τιμή – μέση αξονική δύναμη ($N_{abs,average}$), ανηγμένη ως προς το γινόμενο της μέσης αρχικής γεωστατικής πίεσης με τη διάμετρο της σήραγγας ($p_{o,m}D$). Τα διαγράμματα έχουν σχεδιαστεί συναρτήσει του λόγου S/R (όπου S η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής).

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 4.2-7). Αυτό υποδεικνύει ότι λόγω της εκσκαφής της νέας σήραγγας, παρουσιάζεται μια μεταφορά φορτίου από τη «δεύτερη» στην «πρώτη».

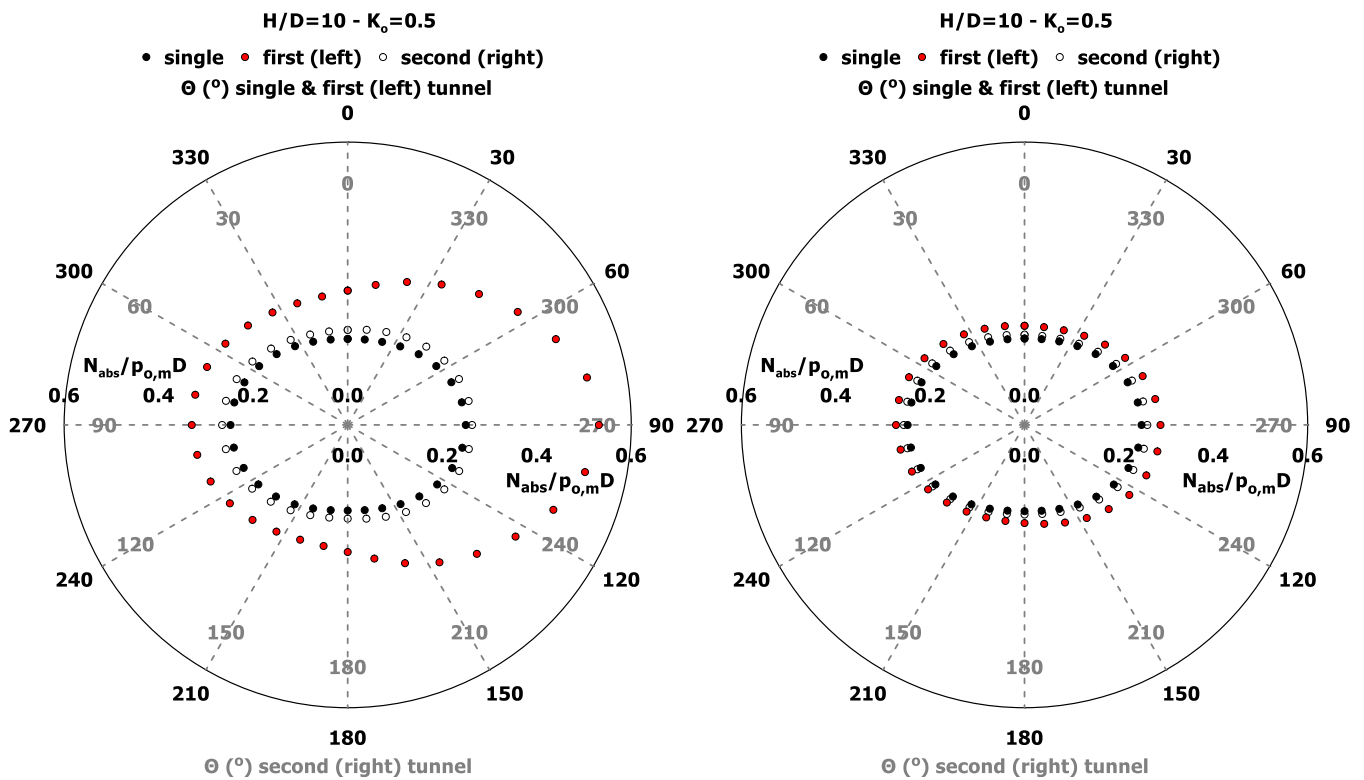
Σχετικά με τη δεξιά σήραγγα οι αξονικές δυνάμεις της άμεσης υποστήριξης είναι λίγο μεγαλύτερες από αυτές της «μονής» σήραγγας αλλά για πλάτος πυλώνα $W/D > 2$, οι επαγόμενες αξονικές δυνάμεις στην άμεση υποστήριξη της νέας σήραγγας είναι πρακτικά ίδιες με αυτές της μεμονωμένης, όχι μόνο σε όρους κατανομής κατά μήκος του ορίου της σήραγγας, αλλά και σε όρους μεγέθους. Παράλληλα, μελετώντας το Σχήμα 4.2-8 που αναφέρεται στην τυπική διατομή των σηράγγων επιβεβαιώνεται η αύξηση των αξονικών δυνάμεων σε κάθε περιοχή της διατομής της «πρώτης» σήραγγας, ανεξαρτήτως πλάτους πυλώνα και η απομείωση αυτής με την αύξηση του λόγου W/D . Ακόμη, διακρίνεται η ασύμμετρη ανάπτυξη των αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» σήραγγας για το ελάχιστο πλάτος πυλώνα που διερευνήθηκε με τη μέγιστη τιμή να εμφανίζεται στην εσωτερική παρειά. Η ασυμμετρία εξαλείφεται με τη διεύρυνση της εγκάρσιας απόστασης μεταξύ των διατομών και κατ' επέκταση τον περιορισμό του φαινομένου της αλληλεπίδρασης.



Σχήμα 4.2-6: Κατανομή της ανηγμένης μέσης αξονικής δύναμης επί της άμεσης υποστήριξης ($N_{abs,average}/\rho_{o,m}D$) συναρτήσεως του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκους άξονα των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζώντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



Σχήμα 4.2-7: Κατανομή της ανηγμένης αξονικής δύναμης επί των εσωτερικών παρειών ($N_{abs,side}(\theta = 90^\circ$ & $\theta = 270^\circ)/\rho_{o,m}D$) συναρτήσεως του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκους άξονα των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζώντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



Σχήμα 4.2-8: Κατανομή της κανονικοποιημένης αξονικής δύναμης ($N_{abs}/\rho_{o,m}D$) συναρτήσει της γωνίας Θ ($^\circ$) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4\text{m}$ (αριστερά) & $W = 2D = 16\text{m}$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).

4.2.3. Ροπές κάμψης (M)

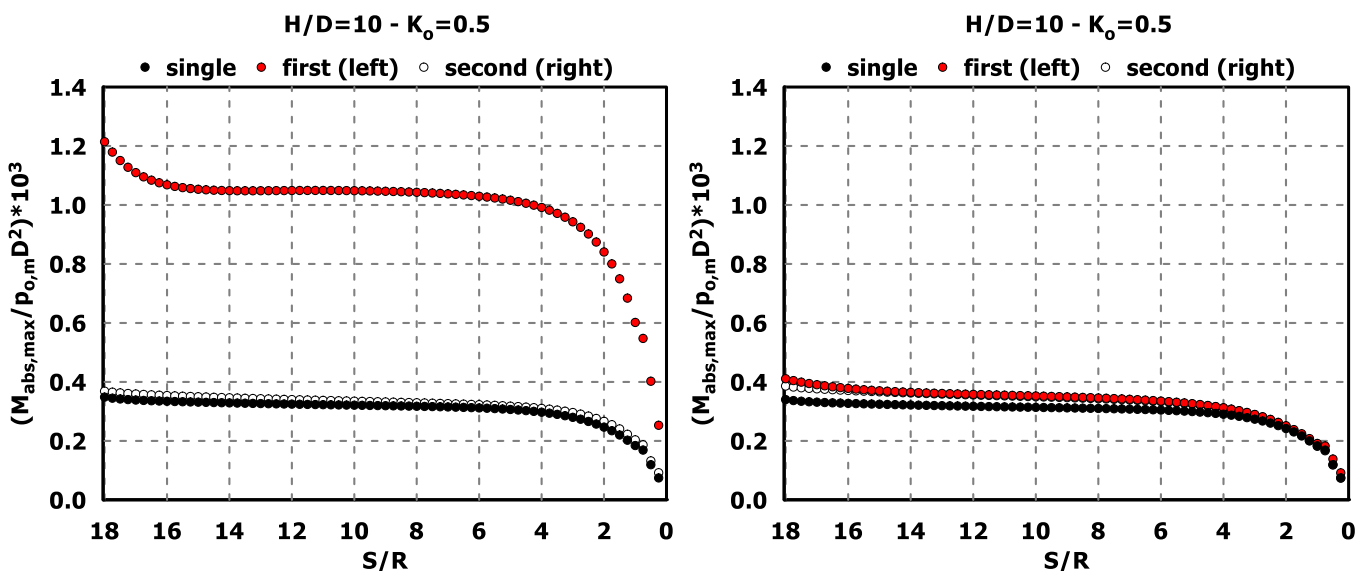
Στο Σχήμα 4.2-9 παρουσιάζονται οι – κατά απόλυτη τιμή – μέγιστες καμπτικές ροπές ($M_{abs,max}$) που εφαρμόζονται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα των σηράγγων με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ και $W/D = 2$, κανονικοποιημένες ως προς το γινόμενο του μέσου φορτίου με το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας ($\rho_{o,m}D^2$). Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο σχήμα για $W/D = 0.5$ υποδεικνύουν μια προοδευτική αύξηση στο απόλυτο μέγεθος της ροπής κάμψης που επιφέρεται στην άμεση υποστήριξη της υφιστάμενης σήραγγας. Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα για διαφορετικά πλάτη πυλώνα παρατηρείται ότι η εκσκαφή της γειτονικής, «δεύτερης», σήραγγας επενεργεί στο μέγεθος και την κατανομή των καμπτικών ροπών της «πρώτης» όταν πρόκειται για μικρό πλάτος πυλώνα ($W/D = 0.5$), αλλά για μεγάλο πλάτος πυλώνα ($W/D = 2$), η επίδραση καθίσταται αμελητέα. Πιο συγκεκριμένα, για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$) και το μικρότερο πλάτος πυλώνα ($W/D = 0.5$) οι ροπές της «πρώτης» σήραγγας είναι αυξημένες σε σχέση με της «μονής» κατά 69.7%. Για τις ίδιες γεωτεχνικές συνθήκες και πλάτος πυλώνα ίσο με δύο διαμέτρους, οι μέγιστες ροπές κάμψης της «μονής» σήραγγας

λόγω της διάνοιξης της «δεύτερης» μεταβάλλονται (αυξάνονται) σε μικρό ποσοστό, 12.6%. Τέλος, το μέγεθος των ροπών κάμψης είναι μεγαλύτερο στην αριστερή («πρώτη») από ότι στη δεξιά («δεύτερη») σήραγγα, κάτι που υποδεικνύει ότι η αριστερή σήραγγα φέρει μεγαλύτερο μέρος φορτίου σε σχέση με τη δεξιά, ενώ αυτή η διαφορά στην καταπόνηση μειώνεται με την αύξηση του πλάτους του πυλώνα.

Ενδεικτικά στη συνέχεια παρατίθεται ο Πίνακας 4.2-3 ο οποίος περιλαμβάνει για όλες τις τιμές του πλάτους πυλώνα που εξετάσθηκαν και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες, το λόγο των μέγιστων καμπτικών ροπών της «πρώτης» (first tunnel) προς τις μέγιστες καμπτικές ροπές της «μονής» σήραγγας (single tunnel). Για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο από δύο διαμέτρους ($W/D > 2$) είναι εμφανής η εξάλειψη του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, με τις καμπτικές ροπές της «πρώτης» σήραγγας να είναι μεγαλύτερες από αυτές της «μονής» σε τόσο μικρό βαθμό, που η διαφορά θεωρείται αμελητέα.

Πίνακας 4.2-3: Λόγος των μέγιστων ροπών κάμψης της «πρώτης» σήραγγας προς της «μονής», για όλα τα μεγέθη πλατών πυλώνα που εξετάσθηκαν ($W/D = 0.5, 1, 2, 3 \text{ \& } 4$) και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$)

		W/D				
		0.5	1	2	3	4
		$M_{first,abs,max}/M_{single,abs,max}$				
		3.30	1.11	1.14	1.01	1.02

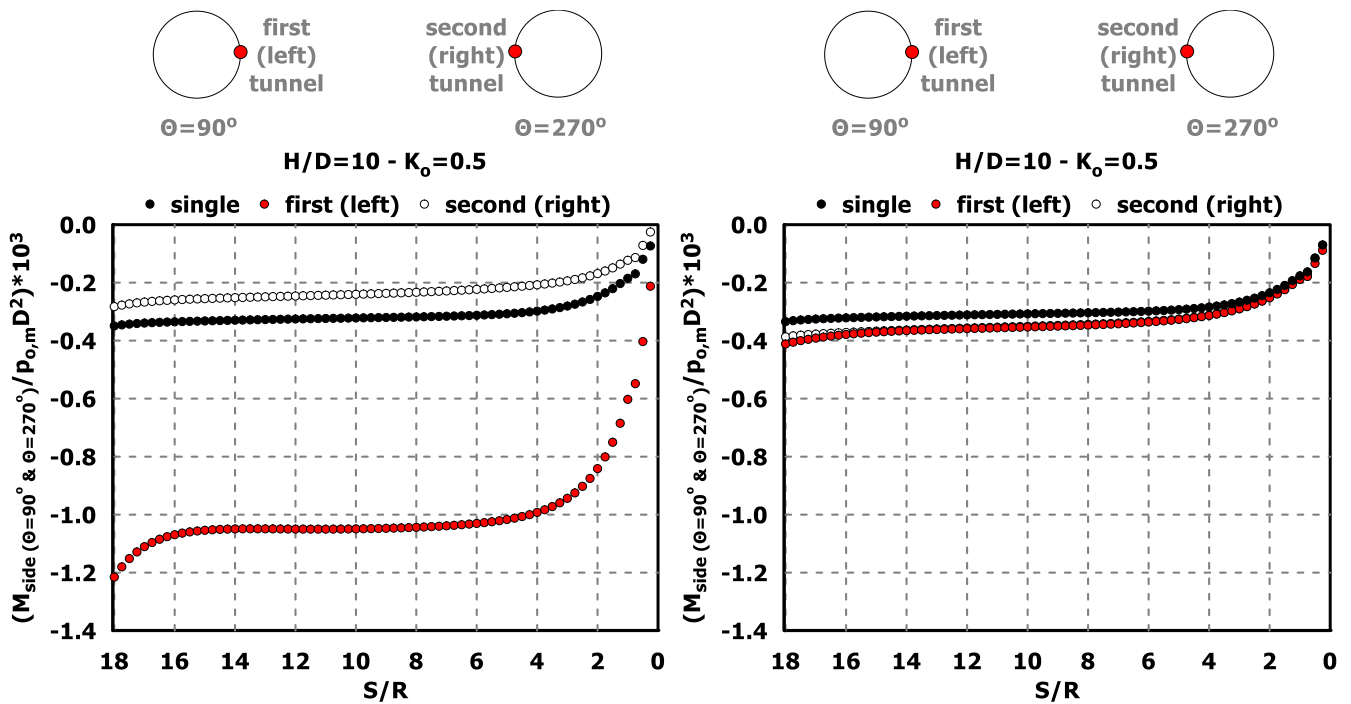


Σχήμα 4.2-9: Κατανομή της ανηγμένης μέγιστης ροπής κάμψης επί της άμεσης υποστήριξης ($M_{abs,max}/\rho_{o,m}D^2$) συναρτήσεως του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκου άξονα των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).

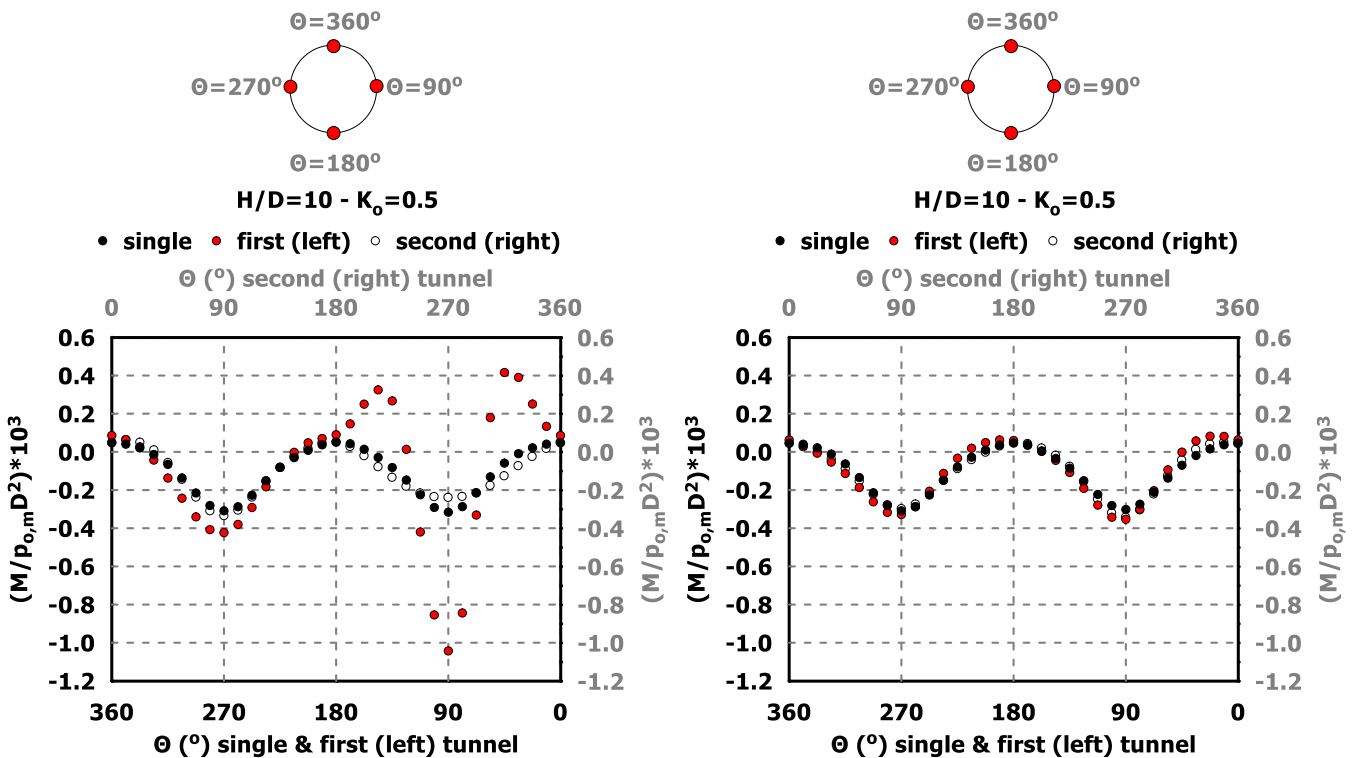
Η κατανομή της ανηγμένης ροπής κάμψης επί των εσωτερικών παρειών των σηράγγων ($M_{\text{side}} (\Theta = 90^\circ \ \& \ \Theta = 270^\circ) / \rho_{o,m} D^2$) συναρτήσει της ανηγμένης απόστασης από το μέτωπο εκσκαφής (S/R) φαίνεται στο Σχήμα 4.2-10, ενώ η κατανομή της κανονικοποιημένης ροπής κάμψης ($M / \rho_{o,m} D^2$) συναρτήσει της γωνίας Θ ($^\circ$) στην τυπική διατομή των σηράγγων, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2-11.

Παρατηρείται ότι η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας προκαλεί μια σημαντική αύξηση στην επαγόμενη ροπή κάμψης στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας, ιδιαιτέρως δε στην περιοχή της εσωτερικής παρειάς ($\Theta = 90^\circ$) όπου εντείνεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης. Με την αύξηση του εύρους του πυλώνα και την εξάλειψη του φαινομένου, η κατανομή γίνεται συμμετρική. Αναφορικά στην κατανομή και στο μέγεθος των επαγόμενων καμπτικών ροπών στην άμεση υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας, είναι παρόμοια με αυτά της «μονής». Τέλος, για πλάτος πυλώνα $W/D = 2$ οι ροπές κάμψης της «μονής», «πρώτης» και «δεύτερης» σήραγγας είναι σχεδόν ίσες και οι κλάδοι σχεδόν δεν αλληλοεπιδρούν. Κατά συνέπεια, υπό τις δεδομένες γεωτεχνικές συνθήκες και για πλάτος πυλώνα $W/D > 2$ οι σήραγγες δύνανται να σχεδιαστούν ως ανεξάρτητες μεταξύ τους κατασκευές.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα μεγέθη των καμπτικών ροπών, των οποίων η μέγιστη τιμή για τη διατομή της «πρώτης» σήραγγας, το μικρότερο πλάτος πυλώνα και τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες φτάνει την τιμή 100kNm, είναι υπερεκτιμημένα καθότι στο πλαίσιο των αριθμητικών αναλύσεων της εργασίας υιοθετείται η παραδοχή ότι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα λαμβάνει ακαριαία, με την τοποθέτησή του, την πλήρη δυσκαμψία του, κάτι το οποίο δε συμβαίνει στην πραγματικότητα λόγω της φύσης των διαδικασιών τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης αλλά και λόγω χρόνου που απαιτείται για την επίτευξη αυτή, της πλήρους δυσκαμψίας κατά την εξέλιξη της σκλήρυνσής του.



Σχήμα 4.2-10: Κατανομή της ανηγμένης ροπής κάμψης επί των εσωτερικών παρειών ($M_{side}(\theta = 90^\circ \text{ \& } \theta = 270^\circ) / \rho_{o,m} D^2$) 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) & $W = 2D = 16\text{m}$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm} / \rho_o = 0.21$).



Σχήμα 4.2-11: Κατανομή της κανονικοποιημένης ροπής κάμψης ($M / \rho_{o,m} D^2$) συναρτήσεως της γωνίας θ ($^\circ$) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4\text{m}$ (αριστερά) & $W = 2D = 16\text{m}$ (δεξιά) συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm} / \rho_o = 0.21$).

4.2.4. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

4.2.4.1. Φορτία (p)

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 4.2-12). Τα διαγράμματα αναφέρονται στα πλάτη πυλώνων (W/D) και στους λόγους γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) που εξετάστηκαν στα πλαίσια της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$. Ακόμη, παρατίθενται αντίστοιχα διαγράμματα τα οποία αναφέρονται στη στέψη ($\Theta = 360^\circ$) και στην εσωτερική παρειά ($\Theta = 90^\circ$) της αριστερής σήραγγας («πρώτης»/«μονής») (Σχήμα 4.2-13).

Αναλύοντας το Σχήμα 4.2-12, παρατηρείται αρχικά ότι ο λόγος των φορτίων παρουσιάζεται μεγαλύτερος της μονάδας, γεγονός που υποδεικνύει ότι για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ 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 πυλώνων $W/D = 3$ 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.

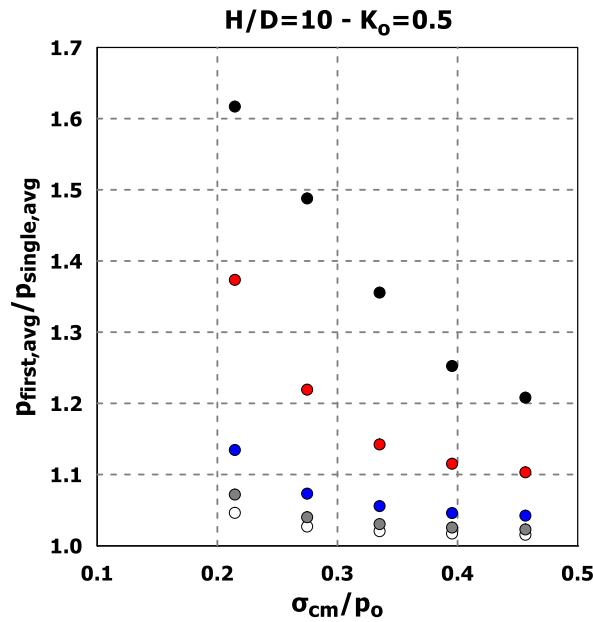
Κατ' επέκταση, η κρίσιμη τιμή πλάτους του πυλώνα μπορεί να προσανατολιστεί στο μέγεθος $(W/D)_{crit} = 2$, υπό την έννοια ότι για εγκάρσια απόσταση μεταξύ των κλάδων μεγαλύτερη από αυτή ($W/D > 2$), το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης σε όρους φορτίων παραμένει προσεγγιστικά στο ίδιο επίπεδο. Το φαινόμενο επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 4.2-13 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 4.2-13).

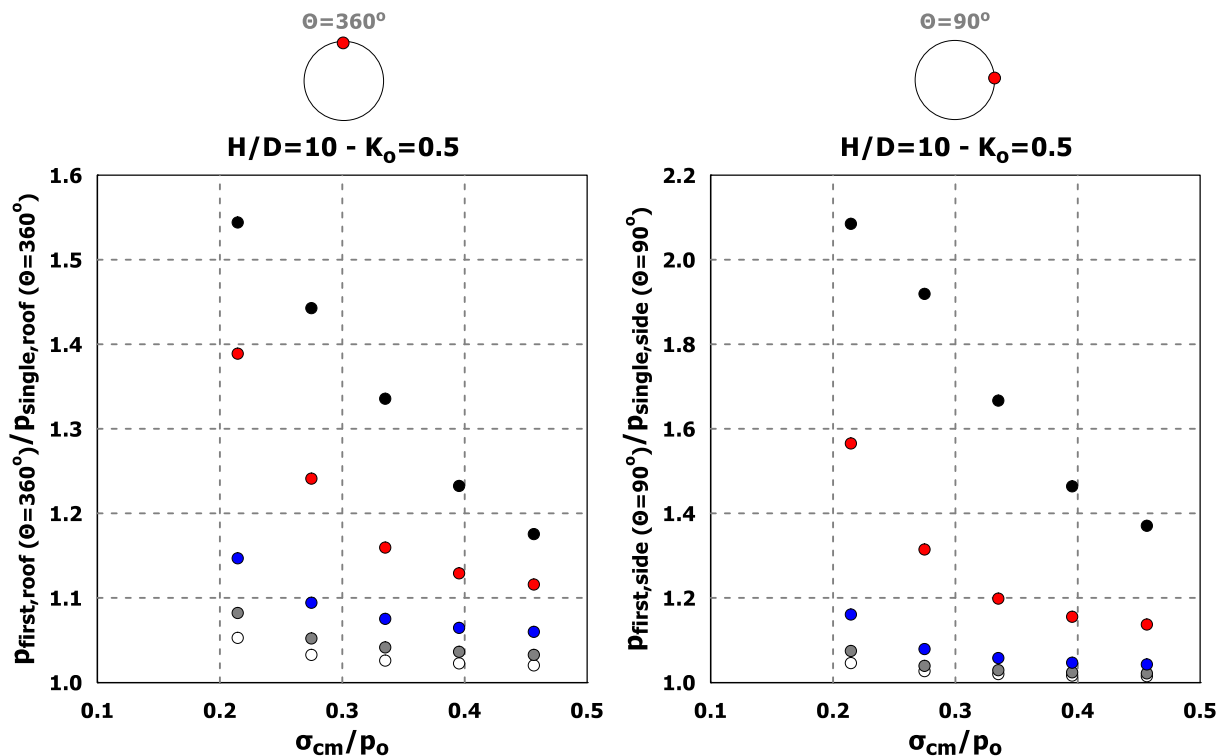
Ενδεικτικά, στον Πίνακα 4.2-4 και τον Πίνακα 4.2-5 παρουσιάζονται οι τιμές του φορτίου («πρώτης»/«μονής») της στέψης ($\Theta = 360^\circ$) και της εσωτερικής παρειάς ($\Theta = 90^\circ$) για όλο το εύρος πλατών πυλώνα και γεωτεχνικών συνθηκών που διερευνήθηκαν, με σκοπό να αναδειχθεί η διαφορά αυτή της καταπόνησης λόγω της μεγιστοποίησης του φαινομένου στην περιοχή του πυλώνα, αλλά και η μείωση των φορτίων με την αύξηση της εγκάρσιας απόστασης μεταξύ των παρειών και τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών.

- W/D=0.5
- W/D=1
- W/D=2
- W/D=3
- W/D=4



Σχήμα 4.2-12: 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 $K_0 = 0.5$.

- W/D=0.5
- W/D=1
- W/D=2
- W/D=3
- W/D=4



Σχήμα 4.2-13: Λόγος φορτίων στην οροφή (αριστερά) και στην εσωτερική παρειά (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,roof}(\theta = 360^\circ)/p_{single,roof}(\theta = 360^\circ)$ & $p_{first,side}(\theta = 90^\circ)/p_{single,side}(\theta = 90^\circ)$ αντίστοιχα) 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 $K_0 = 0.5$.

Πίνακας 4.2-4: Λόγος φορτίων («πρώτης»/«μονής») στη στέψη ($\Theta = 360^\circ$) με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$, για τα μεγέθη πλατών πυλώνων (W/D) και τους λόγους των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) που διερευνήθηκαν.

	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D
	0.5	1	2	3	4
σ_{cm}/ρ_o	$\rho_{first,roof}(\Theta=360 \text{ deg})/\rho_{single,roof}(\Theta=360 \text{ deg})$	$\rho_{first,roof}(\Theta=360 \text{ deg})/\rho_{single,roof}(\Theta=360 \text{ deg})$	$\rho_{first,roof}(\Theta=360 \text{ deg})/\rho_{single,roof}(\Theta=360 \text{ deg})$	$\rho_{first,roof}(\Theta=360 \text{ deg})/\rho_{single,roof}(\Theta=360 \text{ deg})$	$\rho_{first,roof}(\Theta=360 \text{ deg})/\rho_{single,roof}(\Theta=360 \text{ deg})$
0.21	1.54	1.39	1.15	1.08	1.05
0.27	1.44	1.24	1.09	1.05	1.03
0.34	1.34	1.16	1.08	1.04	1.03
0.40	1.23	1.13	1.06	1.04	1.02
0.46	1.18	1.12	1.06	1.03	1.02

Πίνακας 4.2-5: Λόγος φορτίων («πρώτης»/«μονής») στην εσωτερική παρειά ($\Theta = 90^\circ$) με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$, για τα μεγέθη πλατών πυλώνων (W/D) και τους λόγους των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) που διερευνήθηκαν.

	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D
	0.5	1	2	3	4
σ_{cm}/ρ_o	$\rho_{first,side}(\Theta=90 \text{ deg})/\rho_{single,side}(\Theta=90 \text{ deg})$	$\rho_{first,side}(\Theta=90 \text{ deg})/\rho_{single,side}(\Theta=90 \text{ deg})$	$\rho_{first,side}(\Theta=90 \text{ deg})/\rho_{single,side}(\Theta=90 \text{ deg})$	$\rho_{first,side}(\Theta=90 \text{ deg})/\rho_{single,side}(\Theta=90 \text{ deg})$	$\rho_{first,side}(\Theta=90 \text{ deg})/\rho_{single,side}(\Theta=90 \text{ deg})$
0.21	2.09	1.57	1.16	1.07	1.05
0.27	1.92	1.31	1.08	1.04	1.03
0.34	1.67	1.20	1.06	1.03	1.02
0.40	1.46	1.16	1.05	1.02	1.02
0.46	1.37	1.14	1.04	1.02	1.02

4.2.4.2. Αξονικές δυνάμεις (N)

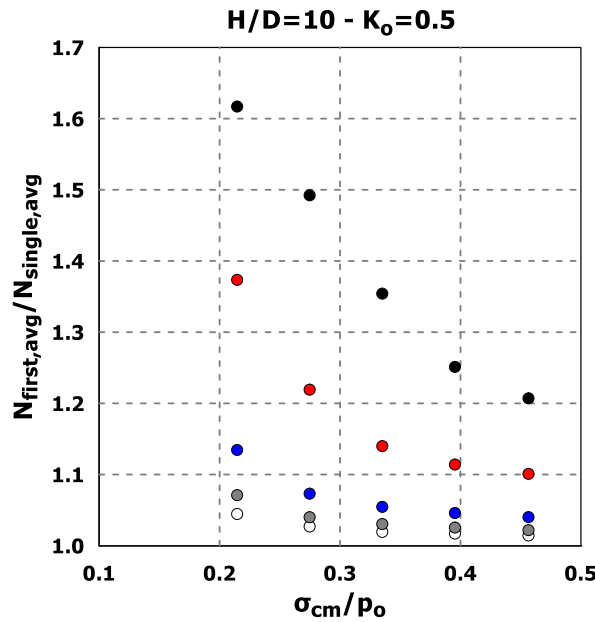
Τα αποτελέσματα που αναφέρονται στις αξονικές δυνάμεις ακολουθούν αντίστοιχη τάση με αυτή των φορτίων, με το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης να επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις στο μέγεθος και την κατανομή των αξονικών δυνάμεων της άμεσης υποστήριξης (Σχήμα 4.2-14 & Σχήμα 4.2-15). Ο λόγος των αξονικών 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 πρακτικά τα ίδια μεγέθη αξονικών δυνάμεων.

Όσο πιο κοντά κατασκευάζονται οι κλάδοι της δίδυμης σήραγγας, τόσο μεγαλύτερη επιπρόσθετη αξονική δύναμη αναπτύσσεται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της «πρώτης» σήραγγας και όσο βελτιώνεται η ποιότητα της βραχόμαζας, τόσο το μέγεθος αυτό των αξονικών δυνάμεων μειώνεται, κάτι που ισχύει για όλες τις περιοχές της διατομής. Υπό οποιοδήποτε πλάτος πυλώνα και λόγο γεωτεχνικών συνθηκών, η εσωτερική παρειά ($\Theta = 90^\circ$) δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση μέχρις ότου το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης εξαλειφθεί (Πίνακας 4.2-6).

Πίνακας 4.2-6: Λόγος αξονικών δυνάμεων («πρώτης»/«μονής») στην εσωτερική παρειά ($\Theta = 90^\circ$) με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$, για τα μεγέθη πλατών πυλώνα (W/D) και τους λόγους των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) που διερευνήθηκαν.

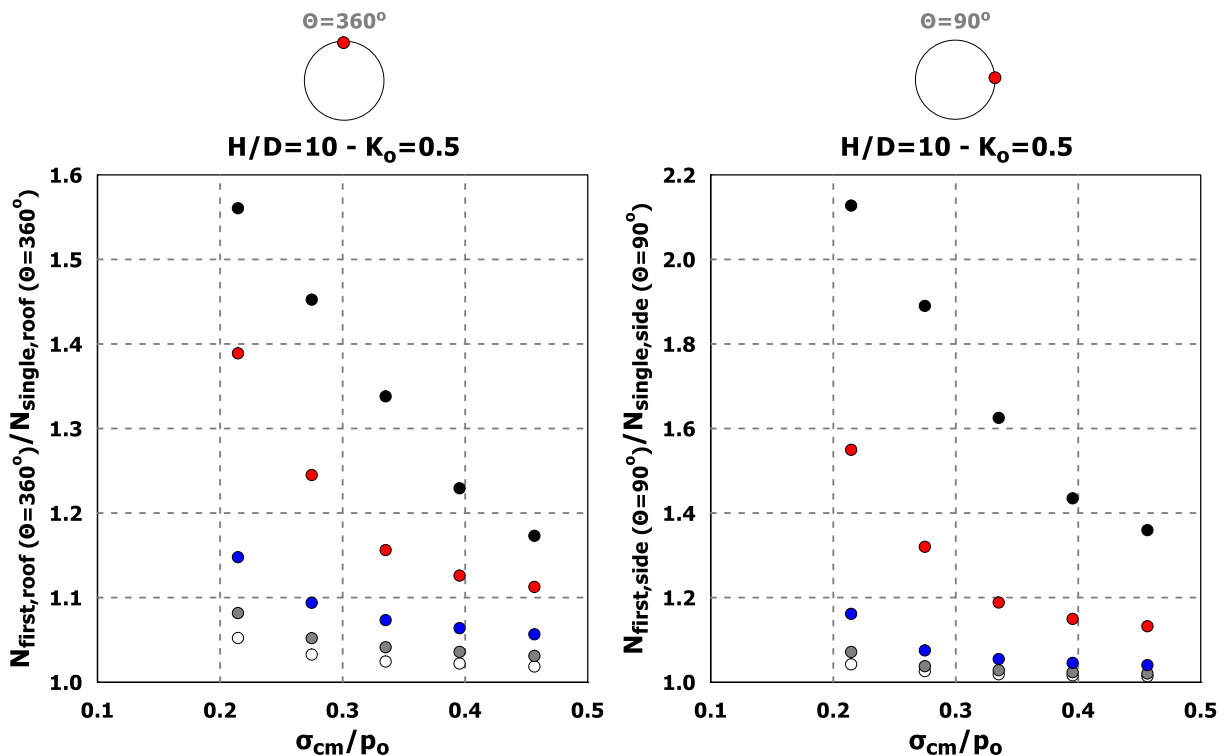
	W/D				
	0.5	1	2	3	4
σ_{cm}/ρ_0	$N_{first,side}(\Theta=90 \text{ deg})/N_{single,side}(\Theta=90 \text{ deg})$	$N_{first,side}(\Theta=90 \text{ deg})/N_{single,side}(\Theta=90 \text{ deg})$	$N_{first,side}(\Theta=90 \text{ deg})/N_{single,side}(\Theta=90 \text{ deg})$	$N_{first,side}(\Theta=90 \text{ deg})/N_{single,side}(\Theta=90 \text{ deg})$	$N_{first,side}(\Theta=90 \text{ deg})/N_{single,side}(\Theta=90 \text{ deg})$
0.21	2.13	1.55	1.16	1.07	1.04
0.27	1.89	1.32	1.08	1.04	1.03
0.34	1.63	1.19	1.05	1.03	1.02
0.40	1.44	1.15	1.05	1.02	1.02
0.46	1.36	1.13	1.04	1.02	1.01

• W/D=0.5 • W/D=1 • W/D=2 • W/D=3 • W/D=4



Σχήμα 4.2-14: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,avg}/N_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$.

• W/D=0.5 • W/D=1 • W/D=2 • W/D=3 • W/D=4



Σχήμα 4.2-15: Λόγος αξονικών δυνάμεων στην οροφή (αριστερά) και στην εσωτερική παρειά (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,roof(\theta = 360^\circ)}/N_{single,roof(\theta = 360^\circ)}$ & $N_{first,side(\theta = 90^\circ)}/N_{single,side(\theta = 90^\circ)}$) αντίστοιχα) 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 $K_0 = 0.5$.

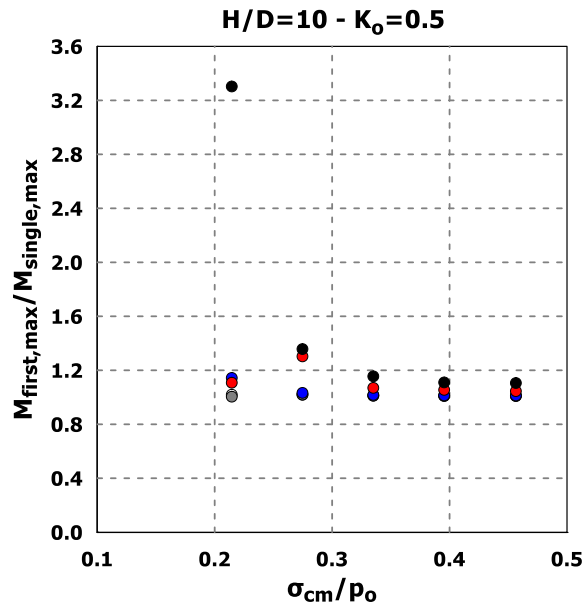
4.2.4.3. Ροπές κάμψης (M)

Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 4.2-16, 4.2-17) διακρίνεται το μέγεθος και η κατανομή της καμπτικής ροπής στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας (first tunnel) κανονικοποιημένης ως προς την καμπτική ροπή στην άμεση υποστήριξη της «μονής» σήραγγας (single tunnel), για το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$. Οι ροπές κάμψης αποτελούν περισσότερο ευαίσθητα μεγέθη συγκριτικά με αυτά των φορτίων ή των αξονικών δυνάμεων, καθότι δεν ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη τάση.

Εν γένει παρατηρούνται αυξημένες ή περίπου ίσες οι καμπτικές ροπές στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας σε σχέση με αυτές στην άμεση υποστήριξη της «μονής», με τους περισσότερους λόγους ροπών («πρώτης»/«μονής») να παρουσιάζονται μεγαλύτεροι ή ίσοι της μονάδας. Αναφορικά στη στέψη της «πρώτης» σήραγγας και για πλάτη πυλώνα $W/D = 0.5, 1$ και 2 παρατηρείται μείωση των ροπών για τους δύο πρώτους λόγους γεωτεχνικών συνθηκών με ακόλουθη αυξητική τάση όσο βελτιώνονται οι γεωτεχνικές συνθήκες, με το διάγραμμα να παρουσιάζει ένα τοπικό ελάχιστο. Για τα πλάτη πυλώνα $W/D = 3$ και $W/D = 4$ εμφανίζεται αντίστοιχη αύξηση και στη συνέχεια σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων.

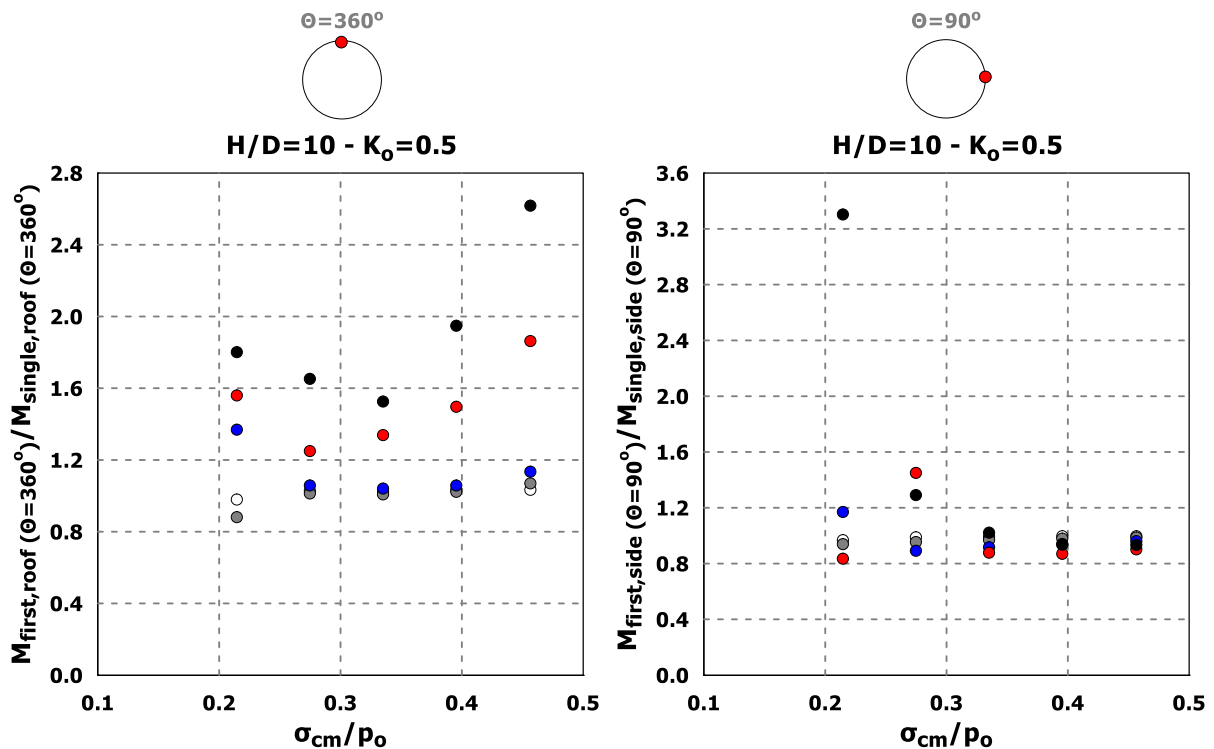
Τέλος, από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα φαίνεται ότι για πλάτη πυλώνα $W/D > 2$ τα αποτελέσματα των καμπτικών ροπών πρακτικά συμπίπτουν, κάτι που υποδεικνύει ότι το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των σηράγγων έχει περιοριστεί σε τέτοιο βαθμό που θεωρείται αμελητέο.

- W/D=0.5
- W/D=1
- W/D=2
- W/D=3
- W/D=4



Σχήμα 4.2-16: Λόγος μέγιστων ροπών κάμψης της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($M_{first,max}/M_{single,max}$) 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 $K_0 = 0.5$.

- W/D=0.5
- W/D=1
- W/D=2
- W/D=3
- W/D=4

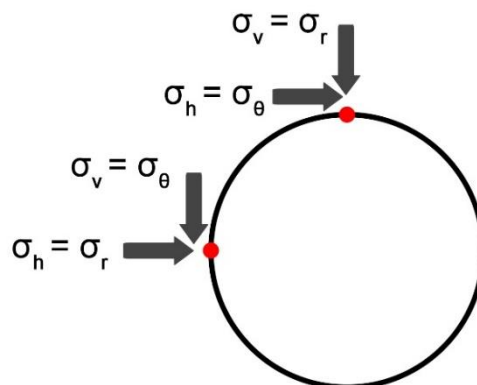


Σχήμα 4.2-17: Λόγος ροπών κάμψης στην οροφή (αριστερά) και στην εσωτερική παρειά (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($M_{first,roof}(\theta = 360^\circ)/M_{single,roof}(\theta = 360^\circ)$ & $M_{first,side}(\theta = 90^\circ)/M_{single,side}(\theta = 90^\circ)$ αντίστοιχα) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών H/D = 10 και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$.

4.3. Επίδραση συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_0)

Ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων επηρεάζει σημαντικά τα φορτία και τα εντατικά μεγέθη που δέχεται η άμεση υποστήριξη των σηράγγων, καθότι από το μέγεθος αυτό υπολογίζεται η τιμή του μέσου αρχικού εντατικού πεδίου, από το οποίο εξαρτάται το μέσο φορτίο που εφαρμόζεται στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων. Επιπλέον, ο συντελεστής αυτός καθορίζει την κατανομή των τάσεων περιμετρικά των διατομών, επηρεάζοντας τις αναπτυσσόμενες πλαστικές παραμορφώσεις και μετατοπίσεις του περιβάλλοντος γεωυλικού και κατ' επέκταση την κατανομή των φορτίων που δέχεται η άμεση υποστήριξη των σηράγγων.

Για τιμές του συντελεστή οριζόντιων τάσεων μικρότερες από τη μονάδα ($K_0 < 1.0$) πριν από την εκσκαφή η οριζόντια τάση είναι μικρότερη από την κατακόρυφη, άρα η οριζόντια είναι η ελάχιστη κύρια τάση και η κατακόρυφη η μέγιστη κύρια τάση. Στην παρειά, η οριζόντια τάση είναι για την εκσκαφή ακτινική και η κατακόρυφη εφαπτομενική. Επομένως, κατά τη διάνοιξη η οριζόντια/ακτινική τάση, η οποία αποτελεί τη μικρότερη εκ των δύο, μειώνεται και η κατακόρυφη/εφαπτομενική τάση, η οποία αποτελεί τη μεγαλύτερη εκ των δύο, αυξάνεται. Αντίθετη ακριβώς είναι η ανακατανομή που προκαλείται στη στέψη, με την οριζόντια/εφαπτομενική να αυξάνεται και την κατακόρυφη/ακτινική τάση να μειώνεται. Ως εκ τούτου, στην παρειά παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση των διεκτροπικών τάσεων, και αντίστοιχα του εύρους του κύκλου Mohr, με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται μεγαλύτερο εύρος και μεγαλύτερες τιμές πλαστικών παραμορφώσεων. Στην περίπτωση όπου $K_0 > 1.0$, ισχύουν ακριβώς τα αντίστροφα, με το μεγαλύτερο εύρος πλαστικών παραμορφώσεων να αναπτύσσεται στην οροφή και στο δάπεδο της διατομής (Φορτσάκης Π., 2012).



Σχήμα 4.3-1: Απεικόνιση των τάσεων στην παρειά και την οροφή της διατομής της σήραγγας.

Για τη μελέτη της επίδρασης του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_0) στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο κλάδων, έχουν επιλεγεί να παρουσιαστούν ενδεικτικά αποτελέσματα, τα οποία περιλαμβάνουν τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες σε συνδυασμό με το ελάχιστο πλάτος πυλώνα που διερευνήθηκε (Πίνακας 4.3-1). Η επιλογή της ανάδειξης αυτών των αποτελεσμάτων έγινε με σκοπό να εξαχθούν περισσότερο λεπτομερή συμπεράσματα, καθώς ο συνδυασμός των συγκεκριμένων τιμών των ανωτέρω παραμέτρων εντείνει το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.

Πίνακας 4.3-1: Γεωμετρικές και γεωτεχνικές παράμετροι αντιπροσωπευτικών αναλύσεων με τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες, πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5, 1.0$ & 1.5

K_0	$S_{\text{tunnel face}}/D$	W/D	GSI	σ_{cm}	E_m	c	φ	σ_{cm}/p_0
0.5	0.125	0.5	10	0.43	106.8	0.08	21.1	0.21
1.0	0.125	0.5	10	0.43	106.8	0.08	21.1	0.21
1.5	0.125	0.5	10	0.43	106.8	0.08	21.1	0.21

4.3.1. Φορτία (p)

Στα επόμενα γραφήματα (Σχήμα 4.3-2, 4.3-3) παρουσιάζεται η κατανομή του ανηγμένου φορτίου p/p_0 συναρτήσει της γωνίας Θ ($^\circ$) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αναλύσεις με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$, $K_0 = 1.0$ και $K_0 = 1.5$. Η κανονικοποίηση ως προς τη γεωστατική τάση (p_0) και όχι ως προς τη μέση γεωστατική τάση ($p_{0,m}$) έγινε με σκοπό τα διαγράμματα που ακολουθούν να είναι ανηγμένα ως προς το ίδιο μέγεθος και προκειμένου να πραγματοποιείται ευχερέστερη σύγκριση, καθότι το μέγεθος της μέσης γεωστατικής τάσης καθορίζεται από το συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0 . Εμφανές είναι, ότι το μέγεθος της κατακόρυφης και της οριζόντιας συνιστώσας της τάσης επιδρά τόσο στο μέγεθος όσο και στην κατανομή των φορτίων, καθώς επηρεάζει το μηχανισμό ανακατανομής των τάσεων.

Αναλυτικότερα (Σχήμα 4.3-2, αριστερά) και με αναφορά στην αρχική κατανομή των φορτίων, παρατηρείται ότι όταν η κατακόρυφη συνιστώσα της τάσης είναι ποσοτικά μεγαλύτερη από την οριζόντια ($K_0 = 0.5$), το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της «μονής» σήραγγας (single tunnel) παραλαμβάνει μεγαλύτερα φορτία στις παρειές ($\Theta = 90^\circ$ & $\Theta = 270^\circ$), ενώ μικρότερα στη στέψη και τον πυθμένα ($\Theta = 180^\circ$ & $\Theta = 360^\circ$). Οι μέγιστες τιμές

των φορτίων παρατηρούνται δηλαδή στις περιοχές όπου εμφανίζονται οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις σε συνδυασμό με τις ελάχιστες μετατοπίσεις.

Πιο συγκεκριμένα, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$, το μεγαλύτερο εύρος πλαστικής ζώνης και οι μέγιστες τιμές πλαστικών παραμορφώσεων εντοπίζονται στις παρειές όπου παρατηρείται αύξηση των διεκτροπικών τάσεων (Σχήμα 4.3-6) και αντίστοιχη αύξηση του εύρους του κύκλου του Mohr. Αντιθέτως, οι ελάχιστες πλαστικές παραμορφώσεις εντοπίζονται στη στέψη και τον πυθμένα (Σχήμα 4.3-4). Επίσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3-8, για $K_0 = 0.5$ οι μέγιστες ακτινικές μετατοπίσεις ($u_{R,max}$) εντοπίζονται στη στέψη ($\Theta = 360^\circ$) και τον πυθμένα ($\Theta = 180^\circ$), ενώ οι ελάχιστες ($u_{R,min}$) στις παρειές ($\Theta = 90^\circ$ & $\Theta = 270^\circ$).

Ως αντίστροφο φαινόμενο, όταν η οριζόντια συνιστώσα της τάσης ξεπερνά σε μέγεθος την κατακόρυφη ($K_0 = 1.5$), η οροφή ($\Theta = 360^\circ$) και το δάπεδο ($\Theta = 180^\circ$) της «μονής» σήραγγας δέχονται μεγαλύτερα φορτία σε σχέση με τις παρειές ($\Theta = 90^\circ$ & $\Theta = 270^\circ$) (Σχήμα 4.3-3), καθότι στα σημεία αυτά αναπτύσσονται οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις (Σχήμα 4.3-20) σε συνδυασμό με τις ελάχιστες μετατοπίσεις (Σχήμα 4.3-24). Με βάση τα ανωτέρω προκύπτει ότι για την περίπτωση όπου ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 \neq 1$, τα μέγιστα φορτία στην άμεση υποστήριξη εντοπίζονται στις περιοχές όπου λαμβάνουν χώρα οι ελάχιστες μετακινήσεις και οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις.

Στην περίπτωση όπου οι γεωστατικές τάσεις είναι ισομεγέθεις ($K_0 = 1.0$), παρατηρείται γενικά ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων στην άμεση υποστήριξη της «μονής» σήραγγας (Σχήμα 4.3-2, δεξιά), όπως επίσης ομοιόμορφη ανάπτυξη των πλαστικών παραμορφώσεων γύρω από τη σήραγγα (Σχήμα 4.3-12).

Σχετικά με το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, από τα Σχήματα 4.3-2 και 4.3-3 διακρίνεται ότι η εκσκαφή της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) επιδρά στην ανάπτυξη των φορτίων που δέχεται η «πρώτη» σήραγγα (first tunnel) για οποιαδήποτε τιμή K_0 . Οι μέγιστες τιμές των φορτίων εντοπίζονται στην περιοχή του πυλώνα και πιο συγκεκριμένα στη γωνία $\Theta = 90^\circ$. Παρατηρείται ακόμη ότι ανεξαρτήτως συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_0) η εσωτερική παρειά ($\Theta = 90^\circ$) της «πρώτης» σήραγγας παραλαμβάνει σχεδόν το ίδιο κατά μέγεθος φορτίο p/p_0 . Αναφορικά στην εξωτερική παρειά ($\Theta = 270^\circ$), στην οροφή και στο δάπεδο ($\Theta = 360^\circ$ και $\Theta = 180^\circ$ αντίστοιχα), για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και $K_0 = 1.0$ τα φορτία της «πρώτης» σήραγγας

αυξάνονται λόγω της εκσκαφής της «δεύτερης» σήραγγας, σε κάθε περιοχή. Για $K_0 = 1.5$, στα σημεία όπου η «μονή» σήραγγα (single tunnel) λαμβάνει τις μέγιστες τιμές των φορτίων, δηλαδή στη στέψη ($\Theta = 360^\circ$) και στον πυθμένα ($\Theta = 180^\circ$), για την «πρώτη» σήραγγα (first tunnel) σημειώνεται μείωση της τιμής των φορτίων. Κατά συνέπεια η διάνοιξη της «δεύτερης» σήραγγας δρα ανακουφιστικά/ευεργετικά στη στέψη και τον πυθμένα της «πρώτης» στην περίπτωση όπου $K_0 = 1.5$.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_0) επηρεάζει την κατανομή των φορτίων και το μέγεθος αυτών, ενώ επίσης σημαντική είναι η επίδρασή του στο μηχανισμό ανάπτυξης του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Όπως φαίνεται και στα Σχήματα 4.3-5 και 4.3-21, μεγαλύτερο εύρος πλαστικών παραμορφώσεων στην περιοχή του πυλώνα αναπτύσσεται όταν $K_0 = 0.5$ ενώ μικρότερο όταν $K_0 = 1.5$. Σε όρους ποσοστιαίας αύξησης φορτίων, το φαινόμενο καθίσταται περισσότερο έντονο όταν $K_0 = 0.5$, λιγότερο έντονο όταν $K_0 = 1.0$, ενώ η ελάχιστη αλληλεπίδραση μεταξύ των δίδυμων σηράγγων παρατηρείται όταν $K_0 = 1.5$ (Πίνακας 4.3-2).

Σε αυτό το φαινόμενο συμβάλλει το φαινόμενο της τοξωτής λειτουργίας του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, για $K_0 = 0.5$ το έδαφος γύρω από τη σήραγγα μέσω του λεγομένου «φαινομένου θόλου», δημιουργεί ένα τόξο ανάληψης των ανακατανομημένων τάσεων στο άνω μέρος της διατομής της σήραγγας το οποίο μεταφέρει μέρος των φορτίων του υπερκείμενου εδάφους στους εκατέρωθεν της σήραγγας πόδες του τόξου, που εντοπίζονται στις παρειές της σήραγγας. Δεδομένης αυτής της τοξωτής λειτουργίας που εκτρέπει τη μεγιστοποίηση των τάσεων στις παρειές της σήραγγας και με την ταυτόχρονη αλληλεπίδραση που εκτυλίσσεται σε μεγαλύτερο βαθμό στην περιοχή του πυλώνα λόγω εγγύτητας των δύο σηράγγων, το φαινόμενο της αύξησης των φορτίων εντείνεται. Ειδικότερα, η ανακατανομή των τάσεων και η μεγιστοποίηση των φορτίων λόγω της διάνοιξης της σήραγγας συντελείται στη διεύθυνση της μέγιστης αρχικής τάσης που, για $K_0 = 0.5$, είναι η κατακόρυφη και η ανάπτυξη των εντονότερων μεταβολών στο παραμορφωσιακό και εντατικό πεδίο γίνεται στην περιοχή του πυλώνα που γειτνιάζει με τις σήραγγες.

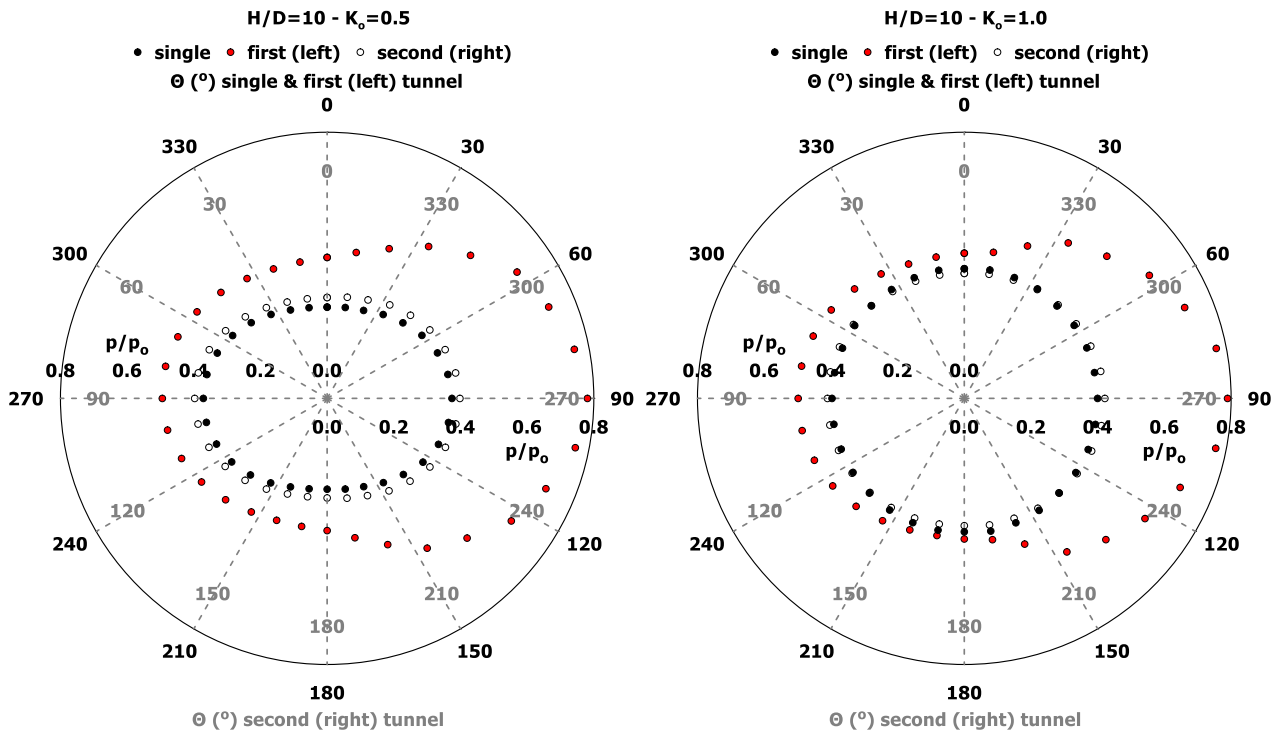
Αντιθέτως, στην περίπτωση όπου $K_0 = 1.5$, το φαινόμενο του θόλου πραγματοποιείται αντίστροφα, κατά την οριζόντια διεύθυνση, εφόσον τη μέγιστη κύρια τάση αποτελεί η οριζόντια συνιστώσα, η οποία καταπονεί τις παρειές των σηράγγων. Πιο συγκεκριμένα, για

$K_o = 1.5$ το έδαφος γύρω από τη σήραγγα μέσω του λεγομένου “φαινομένου θόλου”, δημιουργεί ένα τόξο ανάληψης των ανακατανεμημένων τάσεων στα πλευρικά μέρη της διατομής της σήραγγας το οποίο μεταφέρει μέρος των φορτίων του υπερκείμενου εδάφους στους εκατέρωθεν της σήραγγας πόδες του τόξου που εντοπίζονται στη στέψη και τον πυθμένα της σήραγγας.

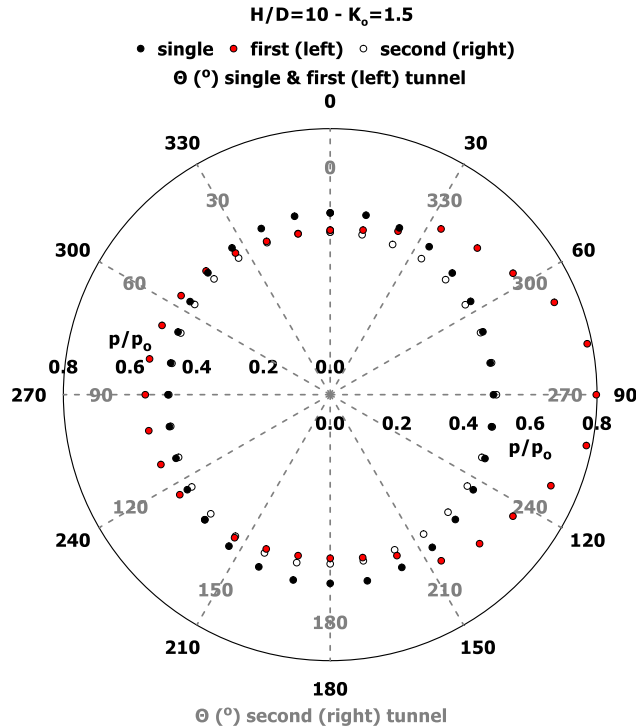
Δεδομένης αυτής της τοξωτής λειτουργίας που εκτρέπει τη μεγιστοποίηση των τάσεων στη στέψη και τον πυθμένα της σήραγγας και συνεκτιμώντας το γεγονός ότι η αλληλεπίδραση εκτυλίσσεται σε μεγαλύτερο βαθμό στην περιοχή του πυλώνα λόγω εγγύτητας των δύο σηράγγων, το φαινόμενο της αύξησης των φορτίων αμβλύνεται σε σχέση με την περίπτωση όπου $K_o = 0.5$. Ειδικότερα, η ανακατανομή των τάσεων και η μεγιστοποίηση των φορτίων λόγω της διάνοιξης της σήραγγας συντελείται στη διεύθυνση της μέγιστης αρχικής τάσης που είναι η οριζόντια και η ανάπτυξη των εντονότερων μεταβολών στο παραμορφωσιακό κι εντατικό πεδίο γίνεται στις περιοχές που δεν αλληλεπιδρούν με τον πυλώνα που γειτνιάζει με τις σήραγγες. Κατά συνέπεια το φαινόμενο του θόλου σε αυτή την περίπτωση δεν ασκεί τόσο μεγάλη επιρροή στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης. Στην περίπτωση δίδυμων σηράγγων παράλληλων κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, θα ίσχυε το αντίστροφο. Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης θα ήταν ανάλογο με το αντίστοιχο με την περίπτωση για $K_o = 0.5$ δίδυμων σηράγγων παράλληλων κατά την οριζόντια διεύθυνση.

Πίνακας 4.3-2: Λόγος φορτίων («πρώτης/«μονής») για πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5, 1.0$ & 1.5 και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).

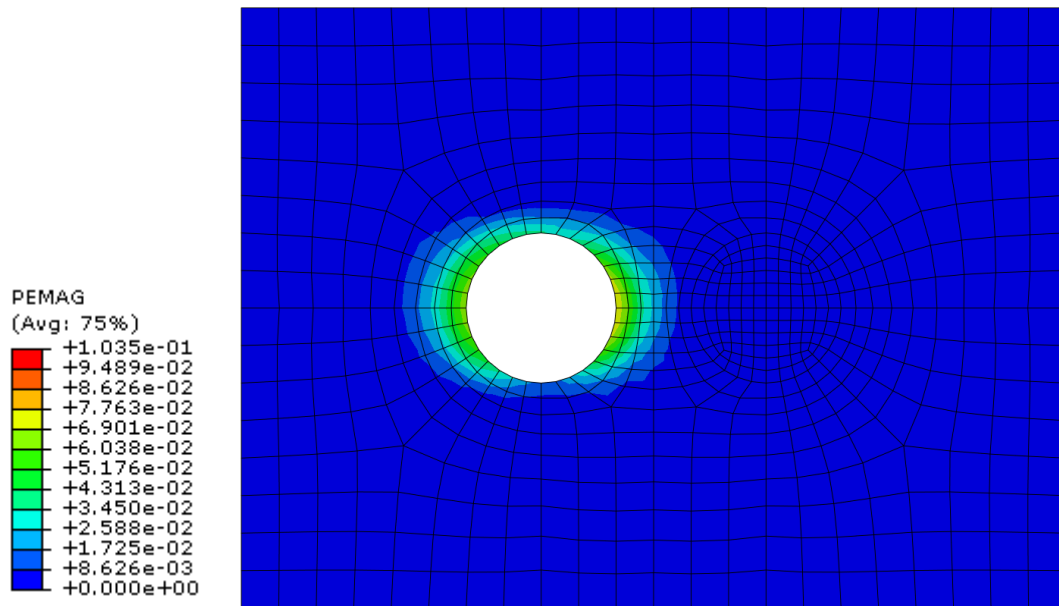
W/D	σ_{cm}/ρ_o	K_o	$\rho_{first,average}/\rho_{single,average}$
0.5	0.21	0.5	1.62
		1.0	1.34
		1.5	1.10



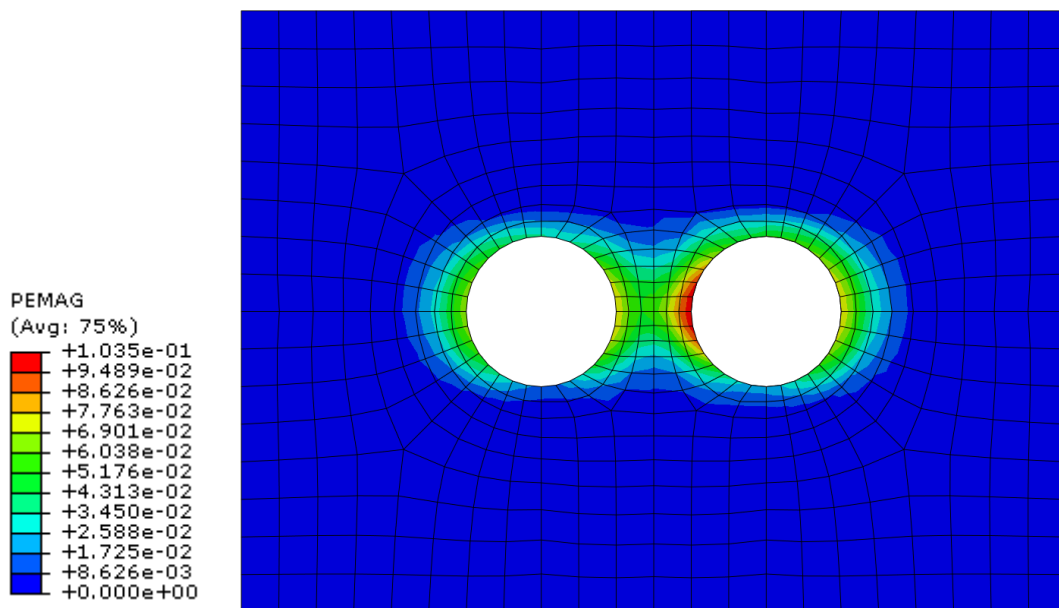
Σχήμα 4.3-2: Κατανομή του ανηγμένου φορτίου p/p_0 συναρτήσει της γωνίας Θ ($^\circ$) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ (αριστερά) και $K_0 = 1.0$ (δεξιά) και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).



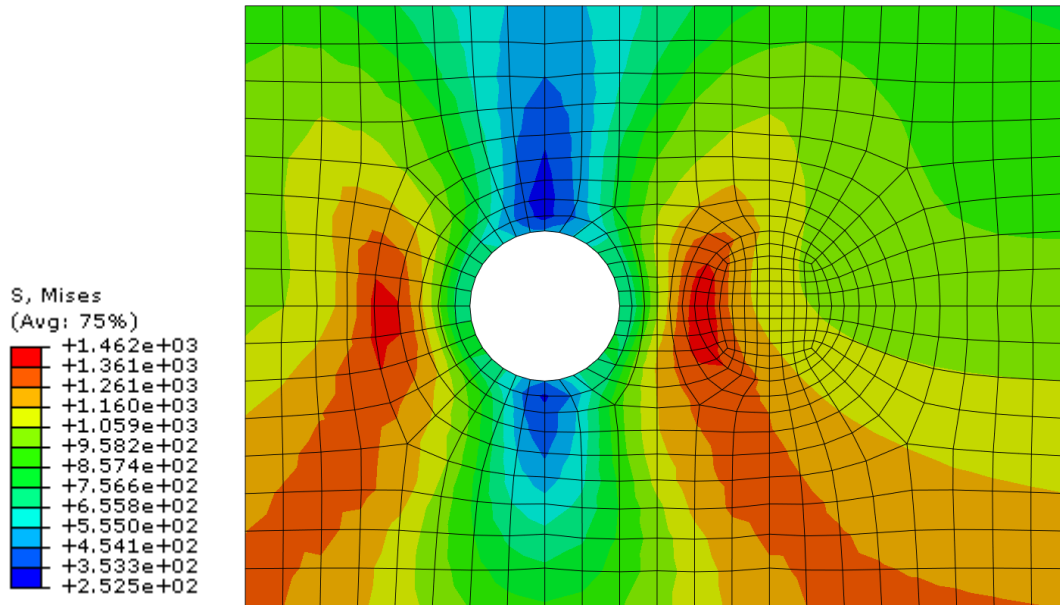
Σχήμα 4.3-3: Κατανομή του ανηγμένου φορτίου p/p_0 συναρτήσει της γωνίας Θ ($^\circ$) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).



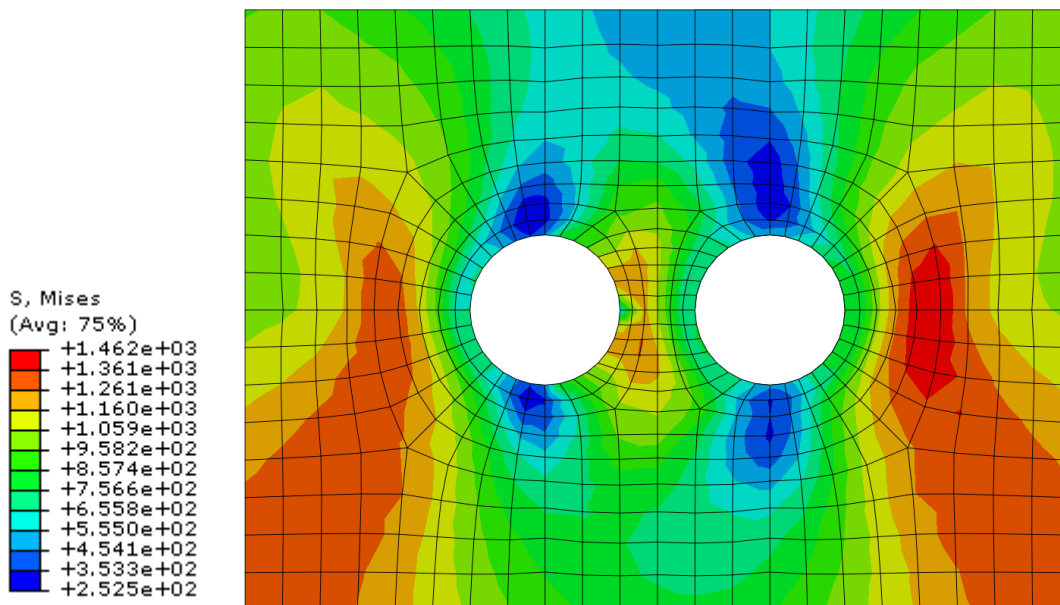
Σχήμα 4.3-4: Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG) στη διατομή που αντιστοιχεί στο 40^ομ της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



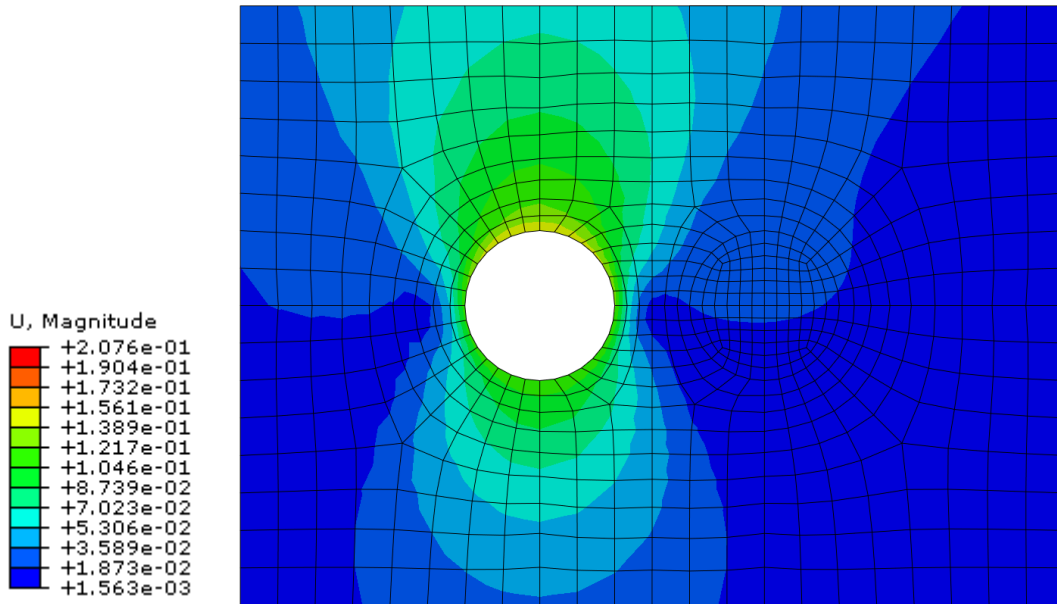
Σχήμα 4.3-5: Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG) στις διατομές που αντιστοιχούν στο 40^ομ της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



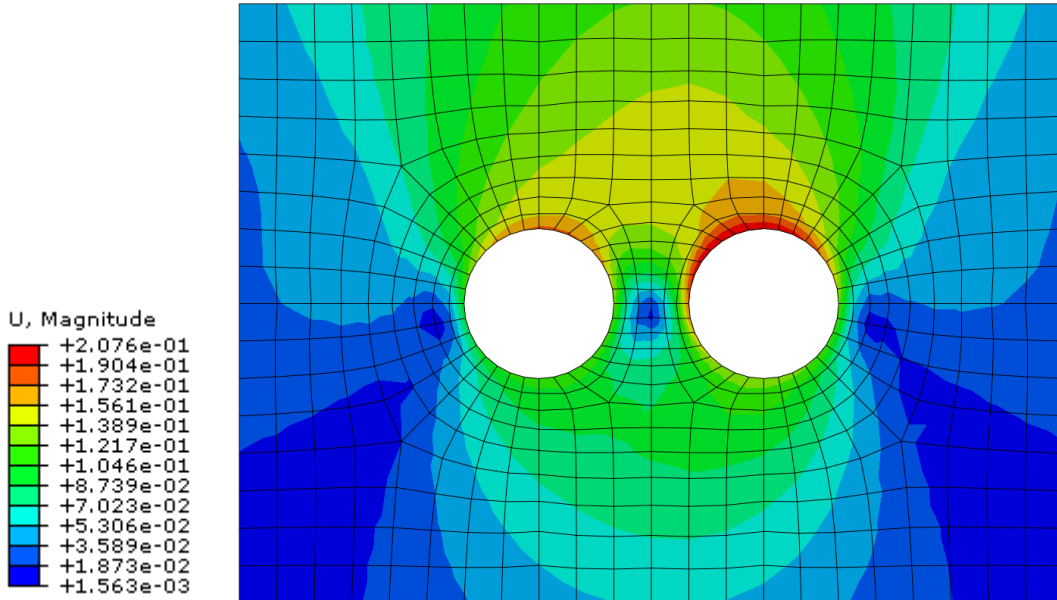
Σχήμα 4.3-6: Διεκτροπικές τάσεις (S, Mises) στη διατομή που αντιστοιχεί στο 40^οm της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).



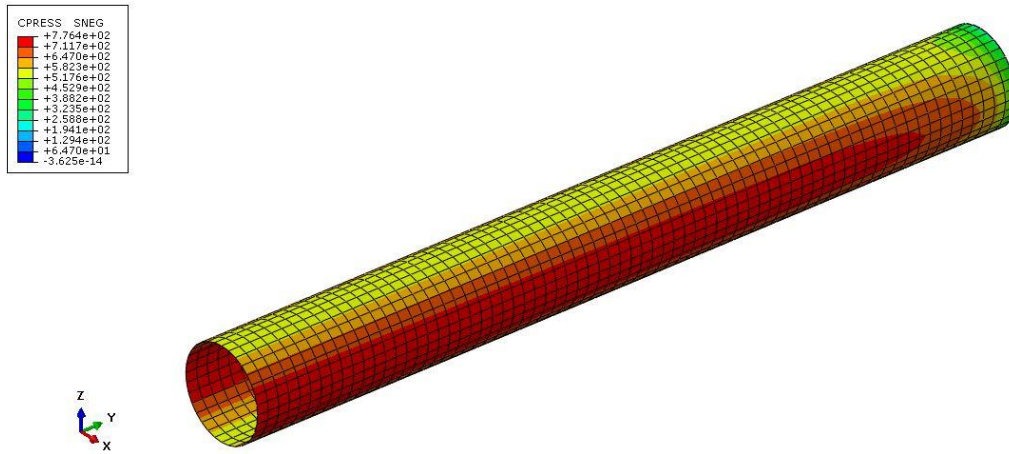
Σχήμα 4.3-7: Διεκτροπικές τάσεις (S, Mises) στις διατομές που αντιστοιχούν στο 40^οm της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).



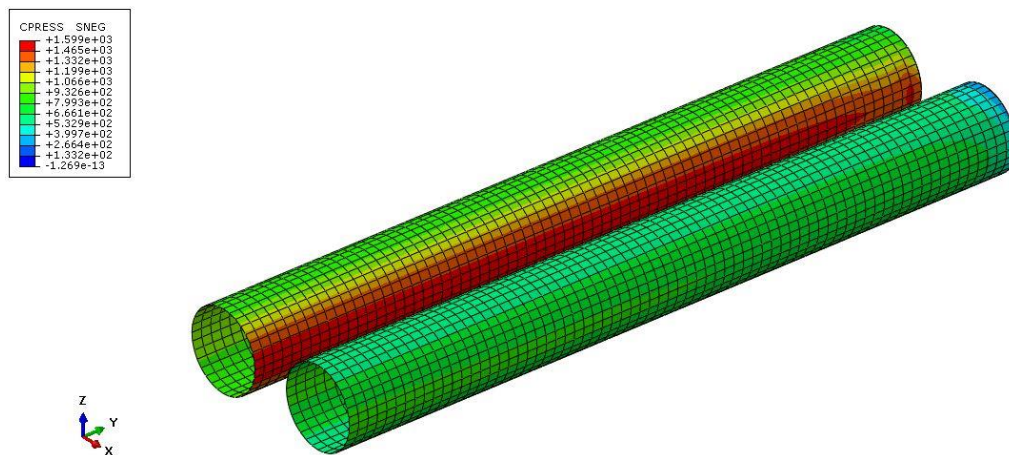
Σχήμα 4.3-8: Αναπτυσσόμενες μετακινήσεις (U) των εδαφικών στοιχείων περιμετρικά της διατομής που αντιστοιχεί στο 40^οm της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).



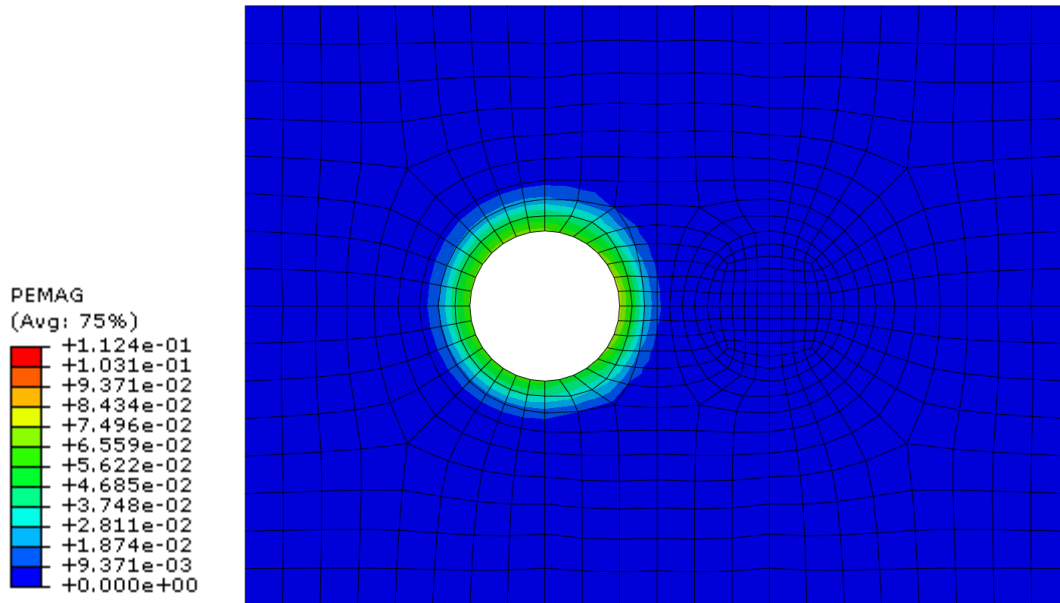
Σχήμα 4.3-9: Αναπτυσσόμενες μετακινήσεις (U) των εδαφικών στοιχείων περιμετρικά των διατομών που αντιστοιχούν στο 40^οm της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).



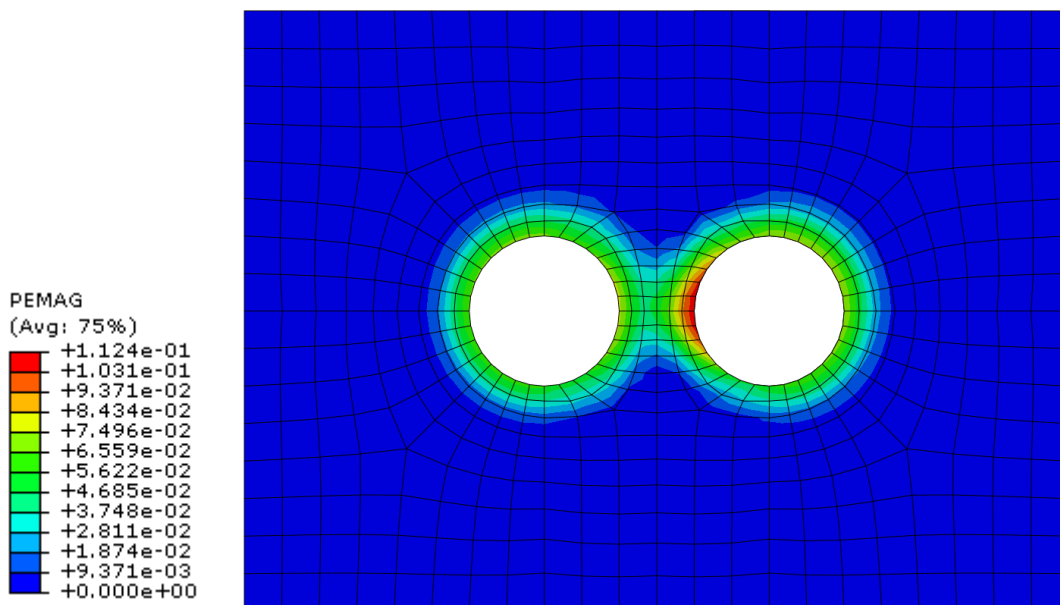
Σχήμα 4.3-10: Φορτία (CPRESS) στην άμεση υποστήριξη της «μονής» σήραγγας (single tunnel), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



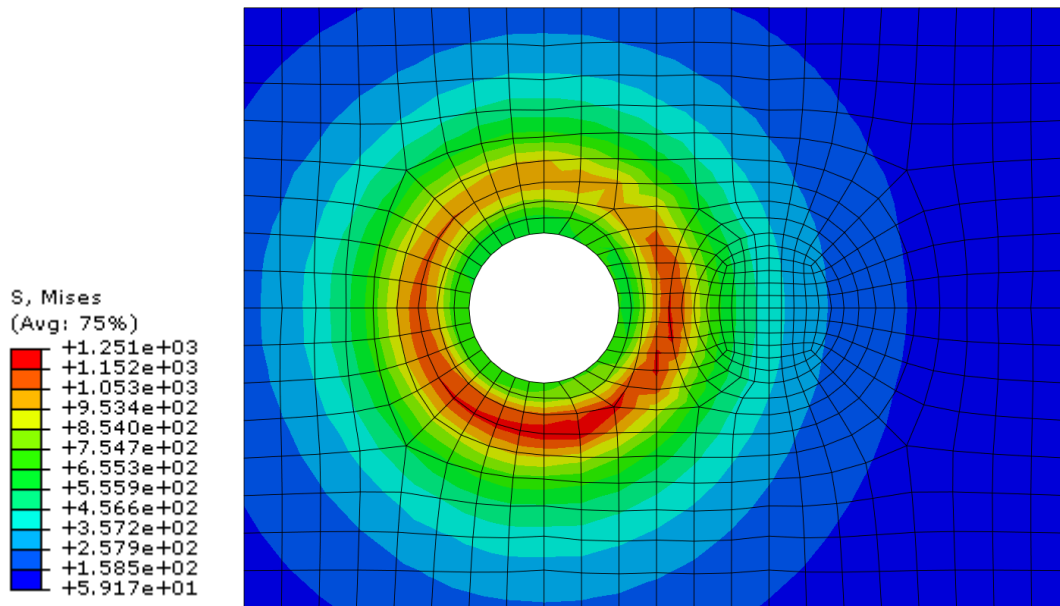
Σχήμα 4.3-11: Φορτία (CPRESS) στην άμεση υποστήριξη της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



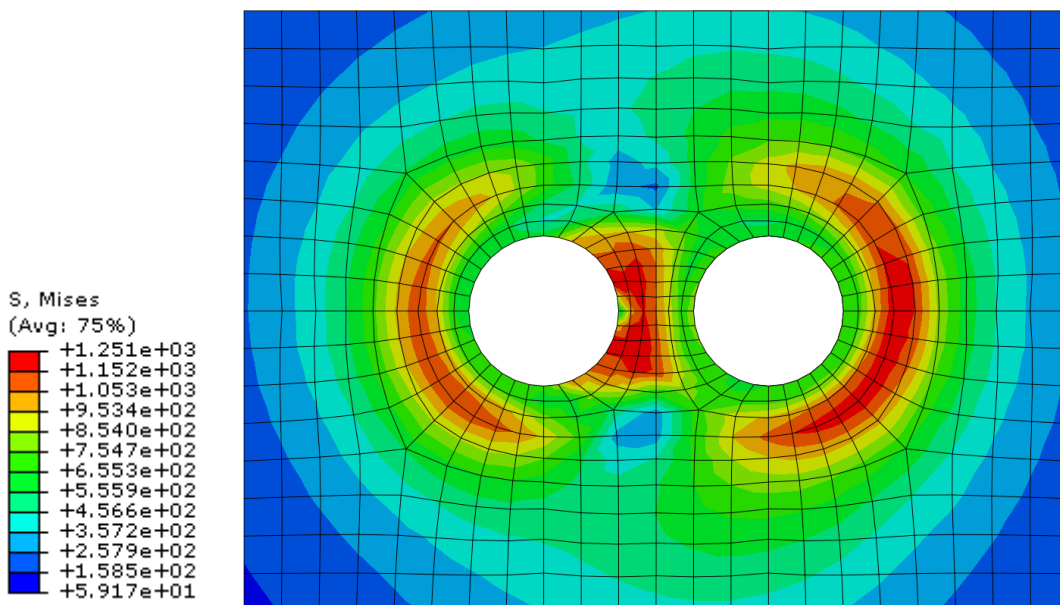
Σχήμα 4.3-12: Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG) στη διατομή που αντιστοιχεί στο 40^ομ της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.0$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



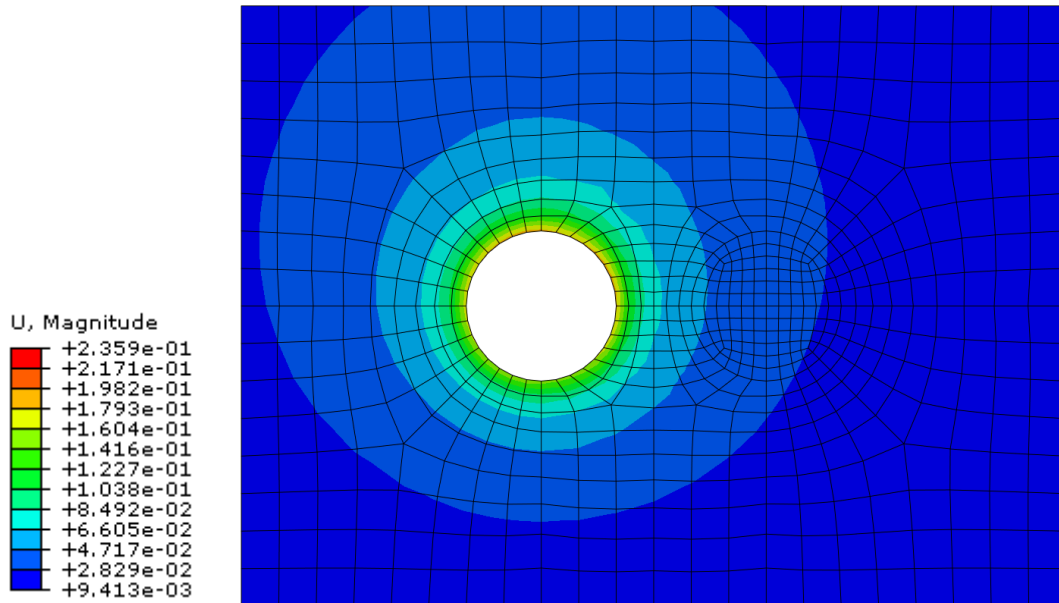
Σχήμα 4.3-13: Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG) στις διατομές που αντιστοιχούν στο 40^ομ της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.0$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



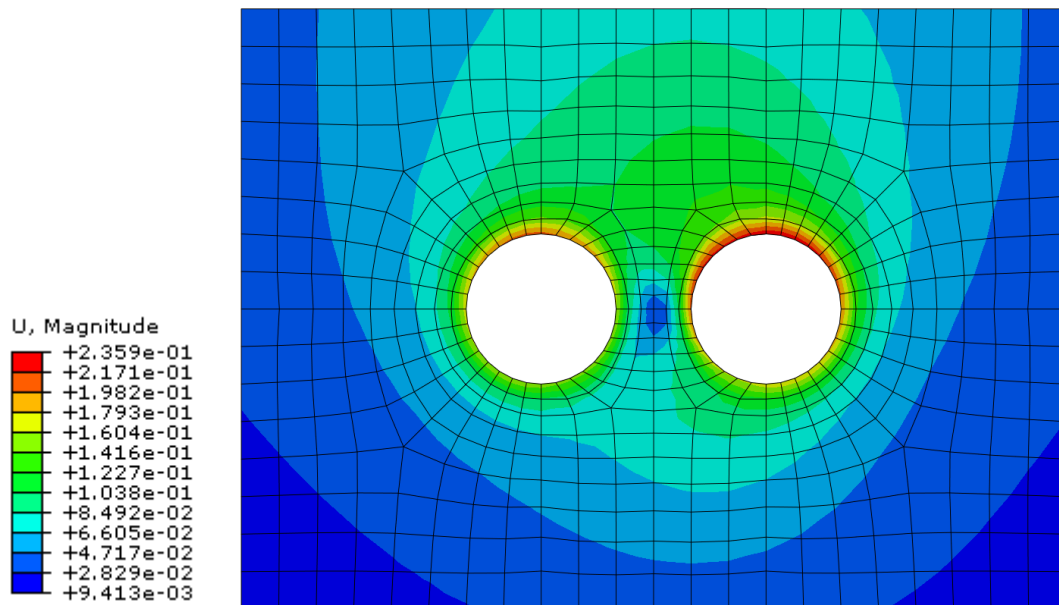
Σχήμα 4.3-14: Διεκτροπικές τάσεις (S, Mises) στη διατομή που αντιστοιχεί στο 40^οm της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.0$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



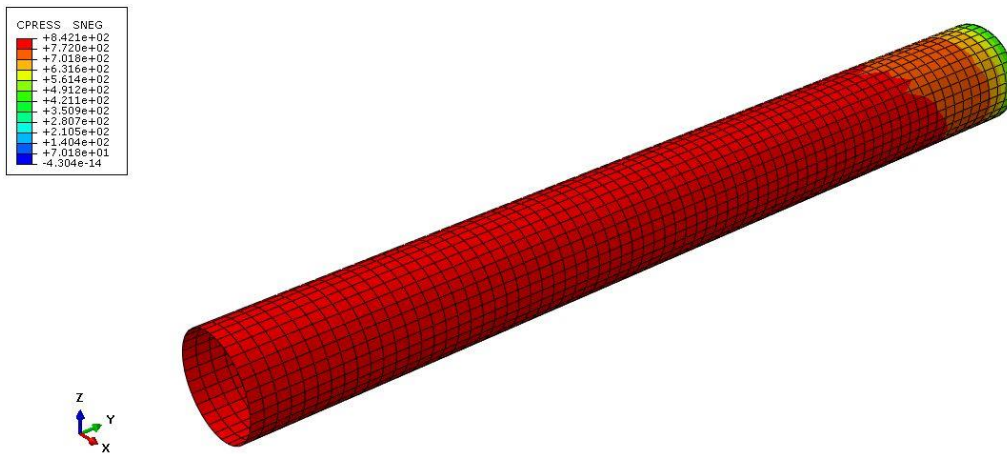
Σχήμα 4.3-15: Διεκτροπικές τάσεις (S, Mises) στις διατομές που αντιστοιχούν στο 40^οm της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.0$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



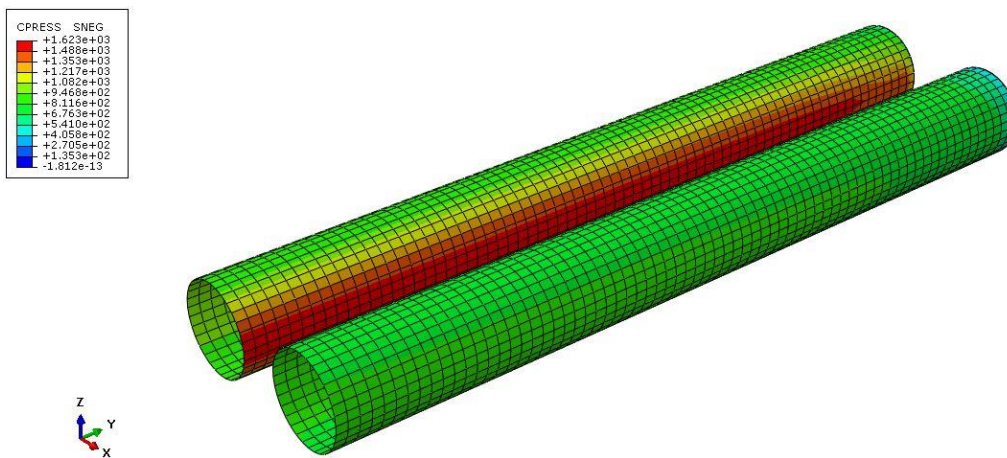
Σχήμα 4.3-16: Αναπτυσσόμενες μετακινήσεις (U) των εδαφικών στοιχείων περιμετρικά της διατομής που αντιστοιχεί στο 40^οm της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 1.0$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



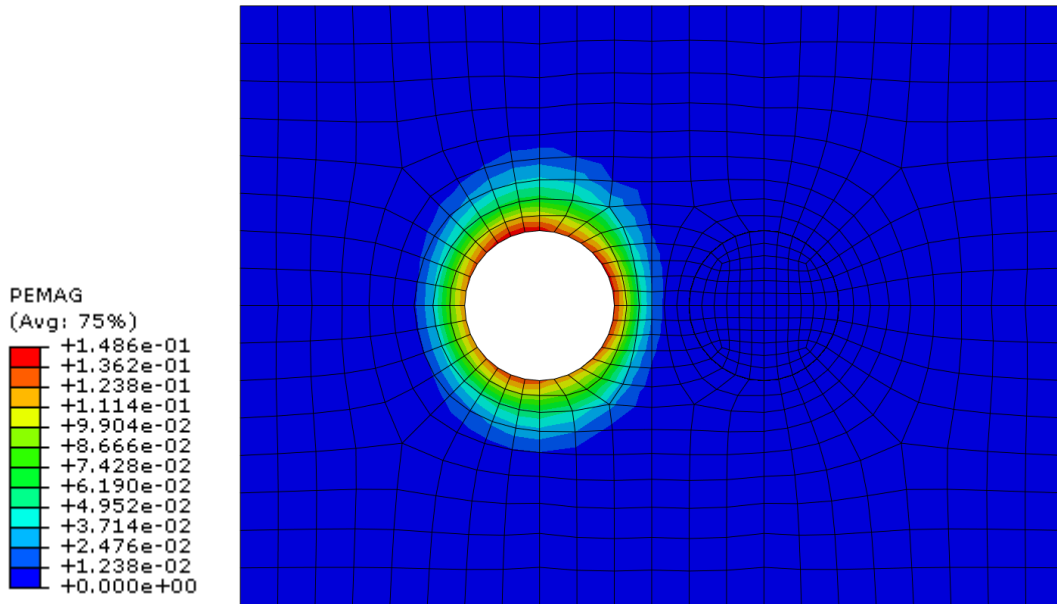
Σχήμα 4.3-17: Αναπτυσσόμενες μετακινήσεις (U) των εδαφικών στοιχείων περιμετρικά των διατομών που αντιστοιχούν στο 40^οm της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 1.0$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



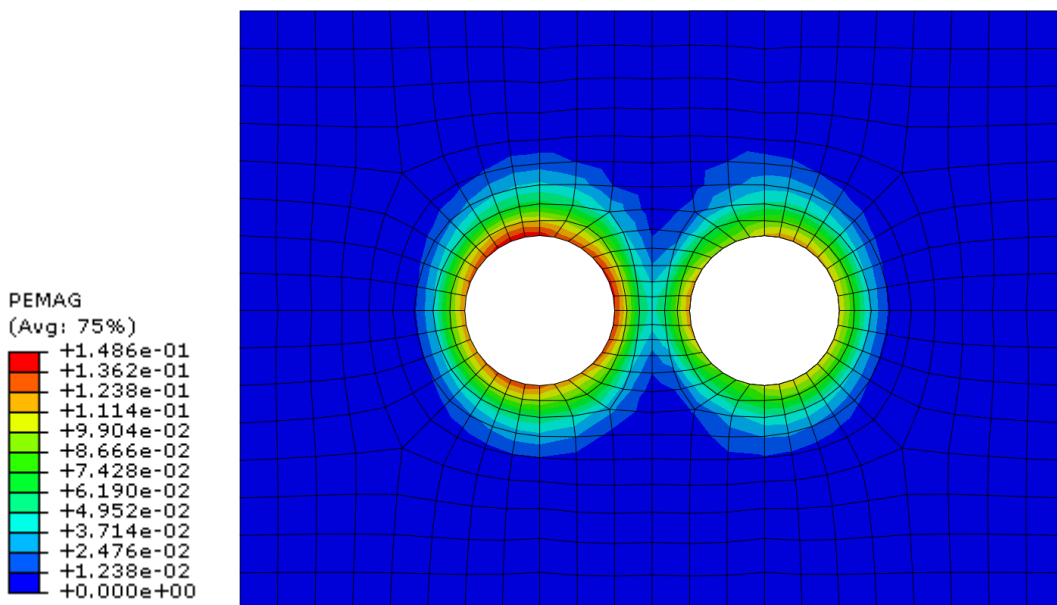
Σχήμα 4.3-18: Φορτία (CPRESS) στην άμεση υποστήριξη της «μονής» σήραγγας (single tunnel), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.0$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).



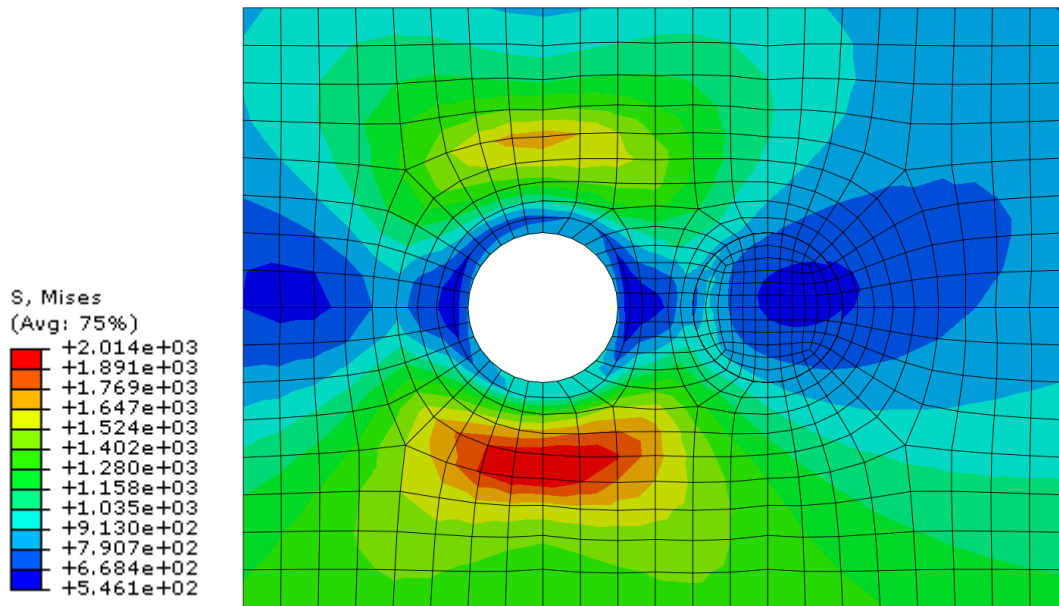
Σχήμα 4.3-19: Φορτία (CPRESS) στην άμεση υποστήριξη της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.0$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).



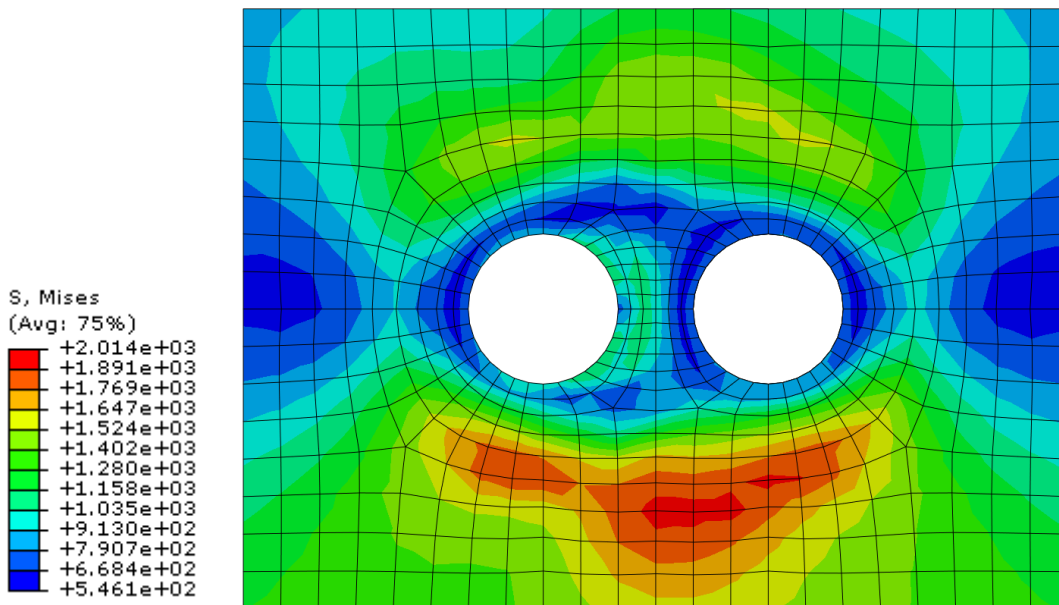
Σχήμα 4.3-20: Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG) στη διατομή που αντιστοιχεί στο 40^οm της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



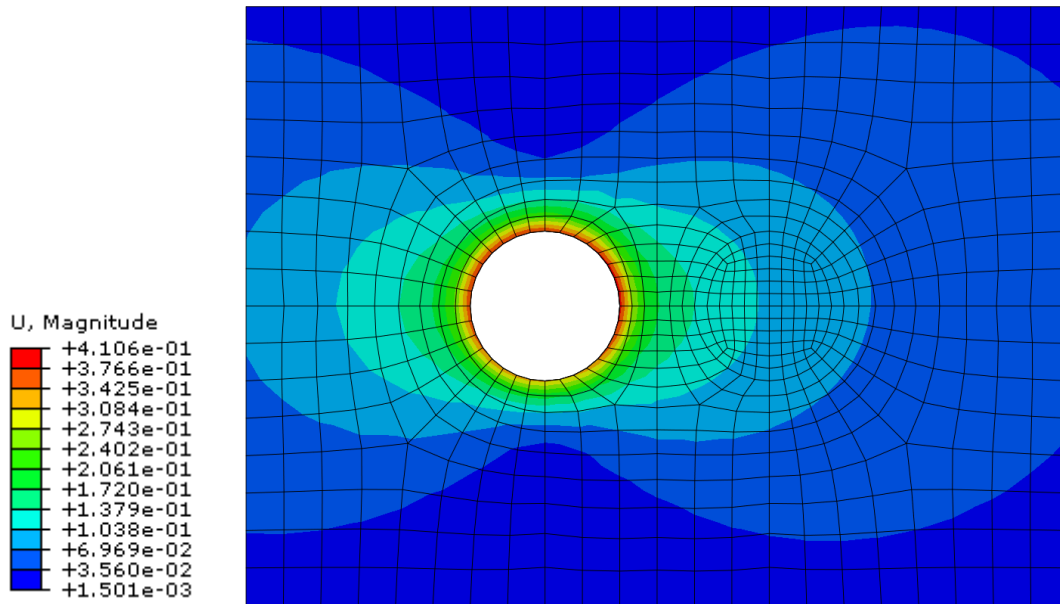
Σχήμα 4.3-21: Πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG) στις διατομές που αντιστοιχούν στο 40^οm της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



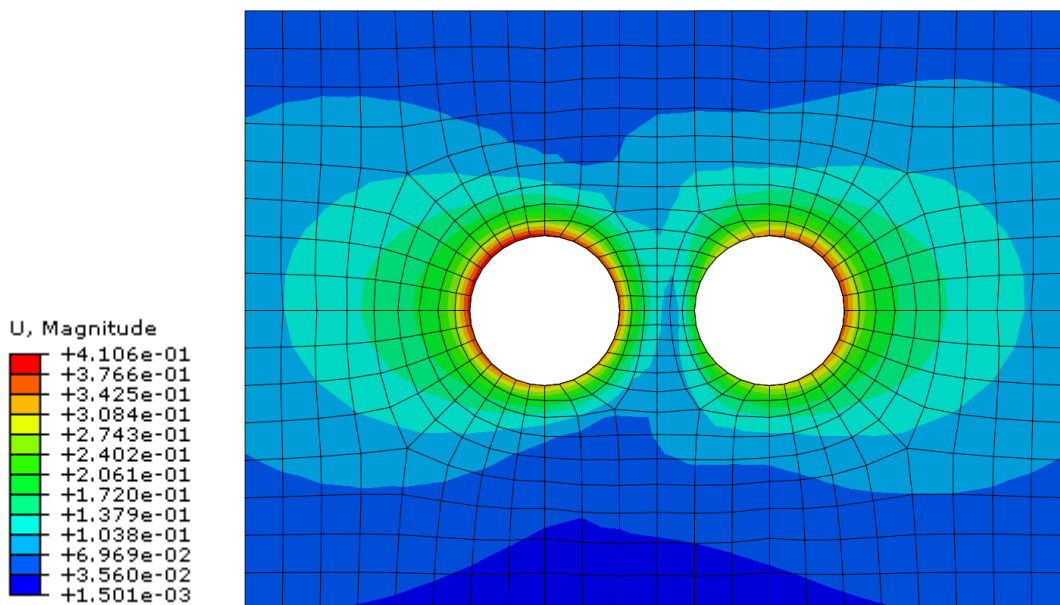
Σχήμα 4.3-22: Διεκτροπικές τάσεις (S, Mises) στη διατομή που αντιστοιχεί στο 40^οm της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).



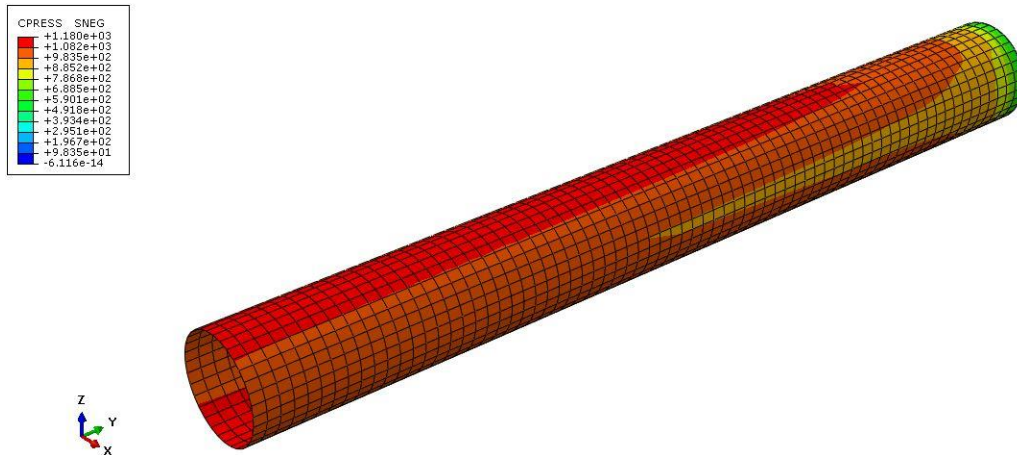
Σχήμα 4.3-23: Διεκτροπικές τάσεις (S, Mises) στις διατομές που αντιστοιχούν στο 40^οm της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).



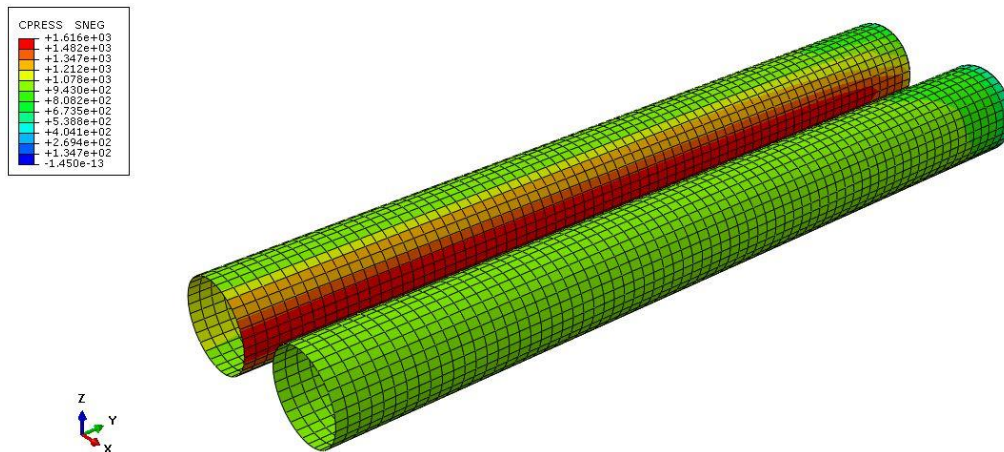
Σχήμα 4.3-24: Αναπτυσσόμενες μετακινήσεις (U) των εδαφικών στοιχείων περιμετρικά της διατομής που αντιστοιχεί στο 40^οm της «μονής» σήραγγας (single tunnel) αφού έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή (step 80), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



Σχήμα 4.3-25: Αναπτυσσόμενες μετακινήσεις (U) των εδαφικών στοιχείων περιμετρικά των διατομών που αντιστοιχούν στο 40^οm της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) αφού έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές (step 160), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



Σχήμα 4.3-26: Φορτία (CPRESS) στην άμεση υποστήριξη της «μονής» σήραγγας (single tunnel), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



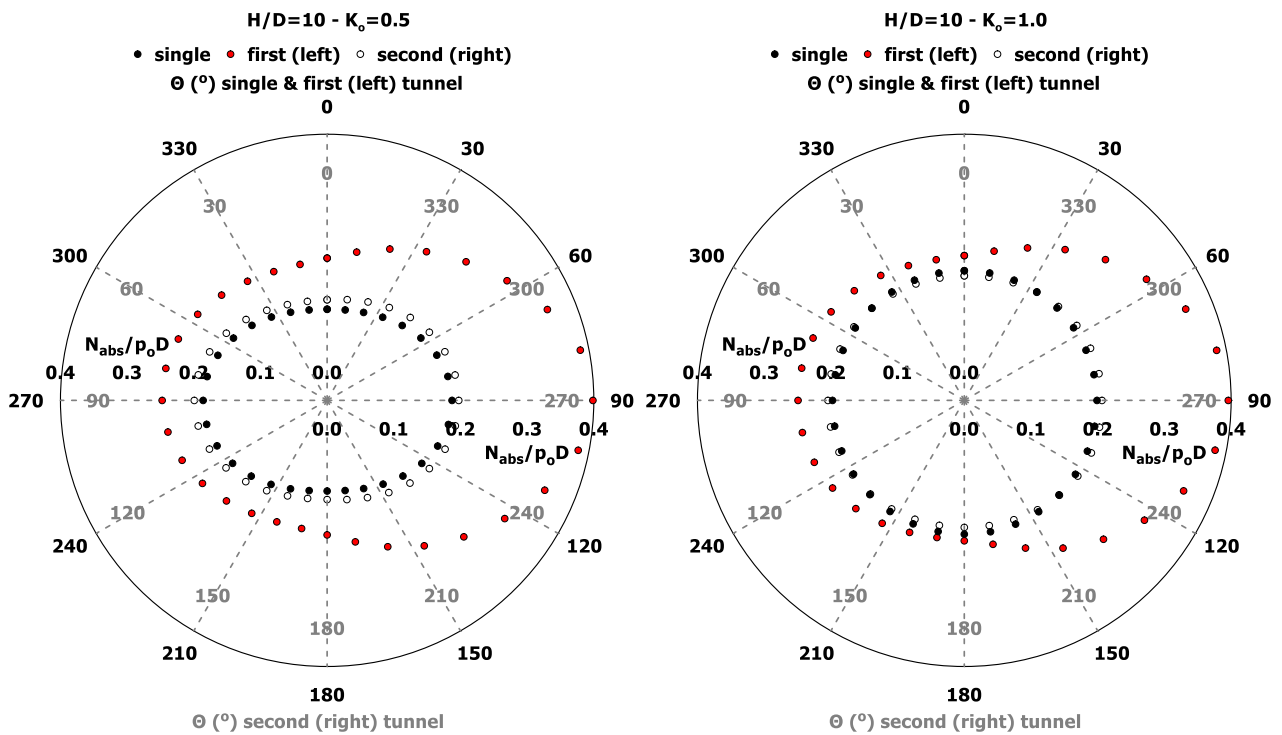
Σχήμα 4.3-27: Φορτία (CPRESS) στην άμεση υποστήριξη της «μονής/πρώτης» (single/first) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel), για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).

4.3.2. Αξονικές δυνάμεις (N)

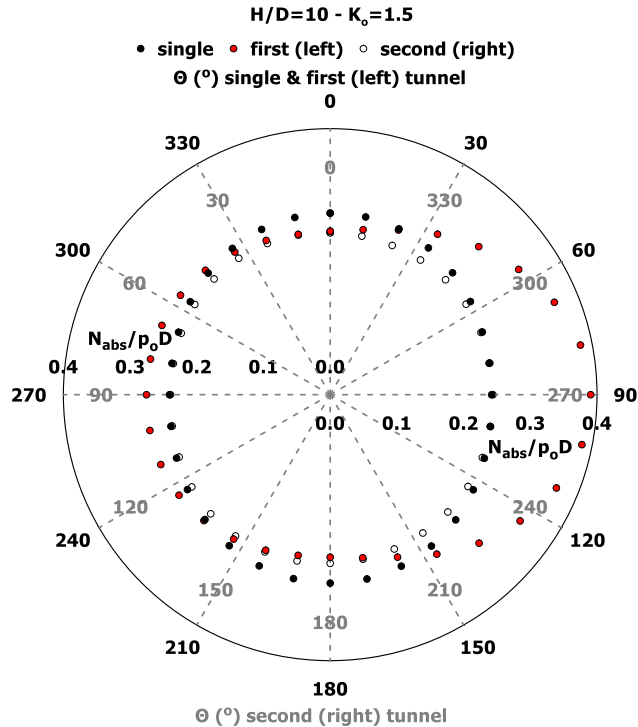
Τα διαγράμματα που ακολουθούν (Σχήμα 4.3-28 & Σχήμα 4.3-29) αναφέρονται στα κανονικοποιημένα, ως προς το γινόμενο της γεωστατικής τάσης (p_o) με τη διάμετρο της σήραγγας (D), μεγέθη των αξονικών δυνάμεων (N) στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων. Οι αξονικές δυνάμεις ακολουθούν παρόμοια κατανομή με αυτή των φορτίων. Στην περίπτωση όπου ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ διακρίνονται αυξημένες στις παρειές ($\Theta = 90^\circ$ & $\Theta = 270^\circ$) της «μονής» σήραγγας (single tunnel), ενώ για $K_o = 1.5$ οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στην οροφή και στο δάπεδο ($\Theta = 360^\circ$ & $\Theta = 180^\circ$), εκεί όπου επικρατούν οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις σε συνδυασμό με τις ελάχιστες μετακινήσεις. Στην περίπτωση όπου $K_o = 1.0$ η κατανομή των αξονικών δυνάμεων είναι ομοιόμορφη όσον αφορά στη «μονή» σήραγγα. Ακόμη, το μέγεθος των αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» σήραγγας (first tunnel) σε σχέση με το αντίστοιχο μέγεθος της «μονής» αυξάνεται με τη μείωση του K_o .

Ανεξάρτητα από την τιμή του συντελεστή K_o οι μεγαλύτερες κατά μέγεθος αξονικές δυνάμεις καταγράφονται στην εσωτερική παρεία της «πρώτης» σήραγγας ($\Theta = 90^\circ$), όπου όπως και στην περίπτωση των φορτίων καταλήγουν, με αμελητέα διαφορά, στην ίδια σχεδόν τιμή $N_{abs}/p_o D$.

Αναφορικά στην κατανομή και στις τιμές των αξονικών δυνάμεων της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) και για τις περιπτώσεις όπου $K_o = 0.5$ και $K_o = 1.0$ παρατηρούνται όμοια αποτελέσματα με αυτά της «μονής». Για $K_o = 1.5$ υπάρχει διαφοροποίηση ιδιαίτερος στην οροφή και στο δάπεδο, όπου οι αξονικές δυνάμεις στην άμεση υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας παρατηρούνται μειωμένες σε σχέση με αυτές που δρουν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της «μονής» και περίπου ίσες με αυτές που δρουν στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης». Όπως παρατηρήθηκε και στα διαγράμματα των φορτίων, παρατηρείται και σε αυτό το σημείο ότι όταν η οριζόντια γεωστατική τάση είναι μεγαλύτερη από την κατακόρυφη ($K_o = 1.5$), η εκσκαφή της «δεύτερης» σήραγγας επηρεάζει με ευεργετικό τρόπο την οροφή ($\Theta = 360^\circ$) και το δάπεδο ($\Theta = 180^\circ$) της «πρώτης» σήραγγας, με τη μείωση των αξονικών δυνάμεων στα σημεία αυτά.



Σχήμα 4.3-28: Κατανομή της ανηγμένης αξονικής δύναμης $N_{abs}/p_o D$ συναρτήσει της γωνίας Θ (°) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ (αριστερά) και $K_o = 1.0$ (δεξιά) και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o = 0.21$).



Σχήμα 4.3-29: Κατανομή της ανηγμένης αξονικής δύναμης $N_{abs}/p_o D$ συναρτήσει της γωνίας Θ (°) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o = 0.21$).

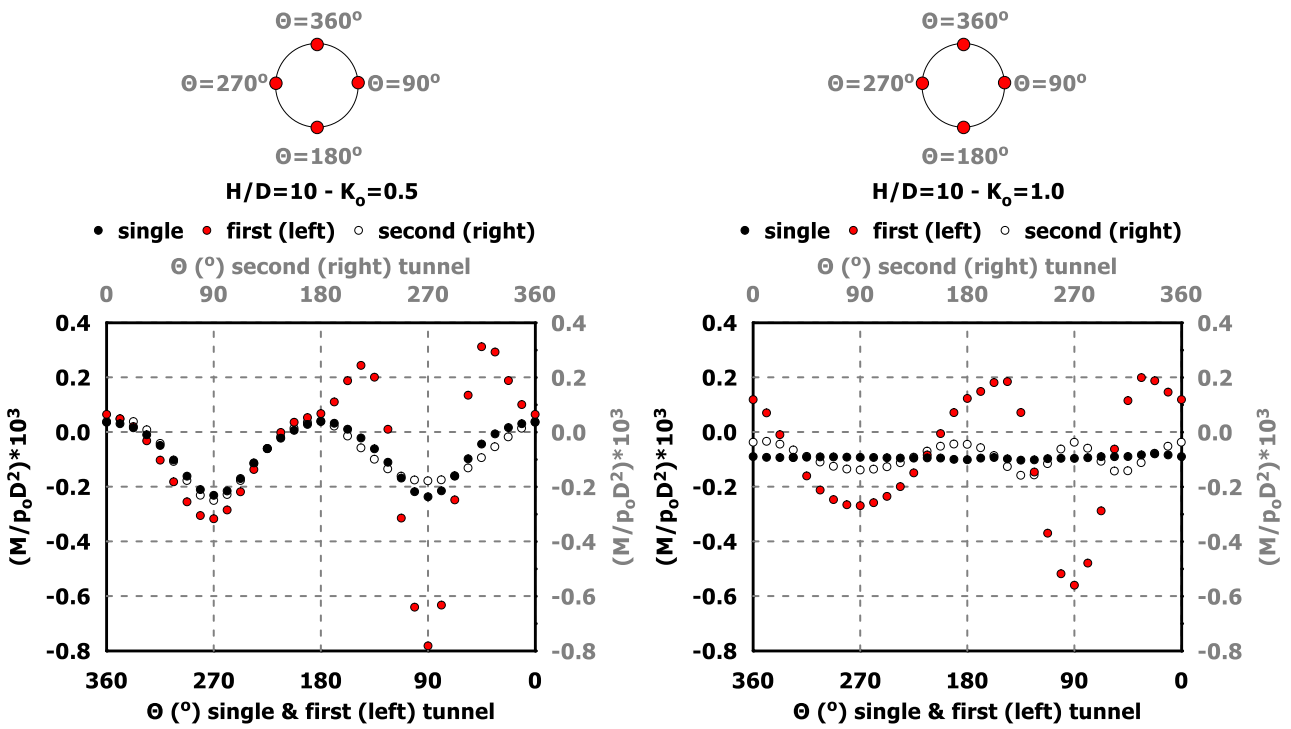
4.3.3. Ροπές κάμψης (M)

Τα Σχήματα 4.3-30 και 4.3-31 παρουσιάζουν την κανονικοποιημένη ροπή κάμψης ($M/\rho_0 D^2$) στην άμεση υποστήριξη, ως συνάρτηση της γωνίας Θ στην τυπική διατομή των σηράγγων, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$, $K_0 = 1.0$ και $K_0 = 1.5$.

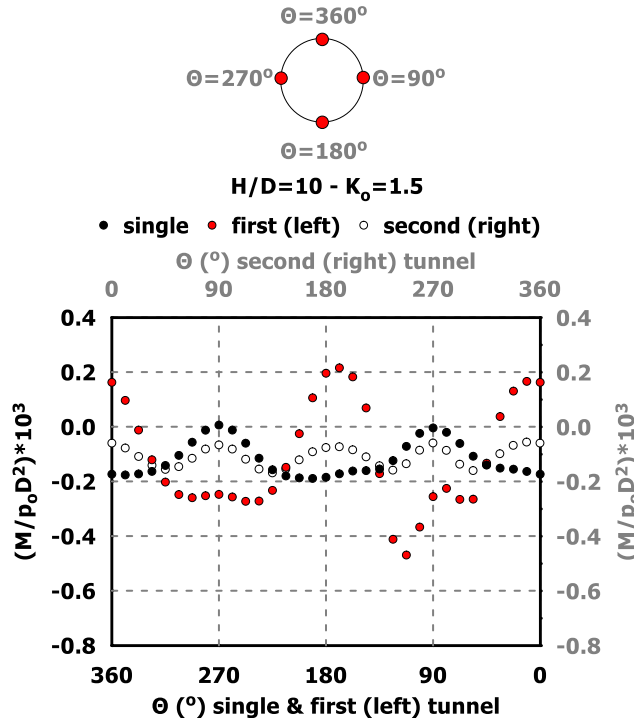
Όσον αφορά στη «μονή» (single tunnel) και τη «δεύτερη» σήραγγα (second tunnel) και για την περίπτωση όπου οι κατακόρυφες γεωστατικές τάσεις είναι μεγαλύτερες από τις οριζόντιες ($K_0 = 0.5$), οι μεγαλύτερες ροπές κάμψης εμφανίζονται στις παρειές ($\Theta = 90^\circ$ και $\Theta = 270^\circ$), καθότι οι μεγαλύτερες πιέσεις από το περιβάλλον έδαφος επιβάλλονται στην στέψη και τον πυθμένα.

Για $K_0 = 1.5$ παρατηρείται αντίστροφο φαινόμενο, με τις μέγιστες ροπές κάμψης να εμφανίζονται στην οροφή ($\Theta = 360^\circ$) και το δάπεδο ($\Theta = 180^\circ$) και τις ελάχιστες στις παρειές. Για $K_0 = 1.0$ οι αντίστοιχες καμπτικές ροπές είναι σχεδόν μηδενικές, καθώς υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων από τη βραχόμαζα στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων.

Σχετικά με την «πρώτη» σήραγγα (first tunnel), η άμεση υποστήριξη δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση λόγω κάμψης στις παρειές ($\Theta = 90^\circ$ και $\Theta = 270^\circ$), με τη μεγιστοποίηση του φαινομένου να εμφανίζεται στην περιοχή της εσωτερικής παρειάς ($\Theta = 90^\circ$), ανεξαρτήτως συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_0). Το γεγονός αυτό υποδεικνύει μια μεταφορά φορτίου από τη «δεύτερη» σήραγγα στην «πρώτη». Το συγκεκριμένο φαινόμενο καθίσταται λιγότερο έντονο με την αύξηση του συντελεστή K_0 , όπου παρατηρείται μείωση της καμπτικής ροπής στην εσωτερική παρειά για $K_0 = 1.0$ και $K_0 = 1.5$ σε σχέση με τη ροπή που αναπτύσσεται όταν $K_0 = 0.5$.



Σχήμα 4.3-30: Κατανομή της κανονικοποιημένης ροπής κάμψης ($M/\rho_0 D^2$) συναρτήσει της γωνίας Θ (°) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ (αριστερά) και $K_0 = 1.0$ (δεξιά) και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).



Σχήμα 4.3-31: Κατανομή της κανονικοποιημένης ροπής κάμψης ($M/\rho_0 D^2$) συναρτήσει της γωνίας Θ (°) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).

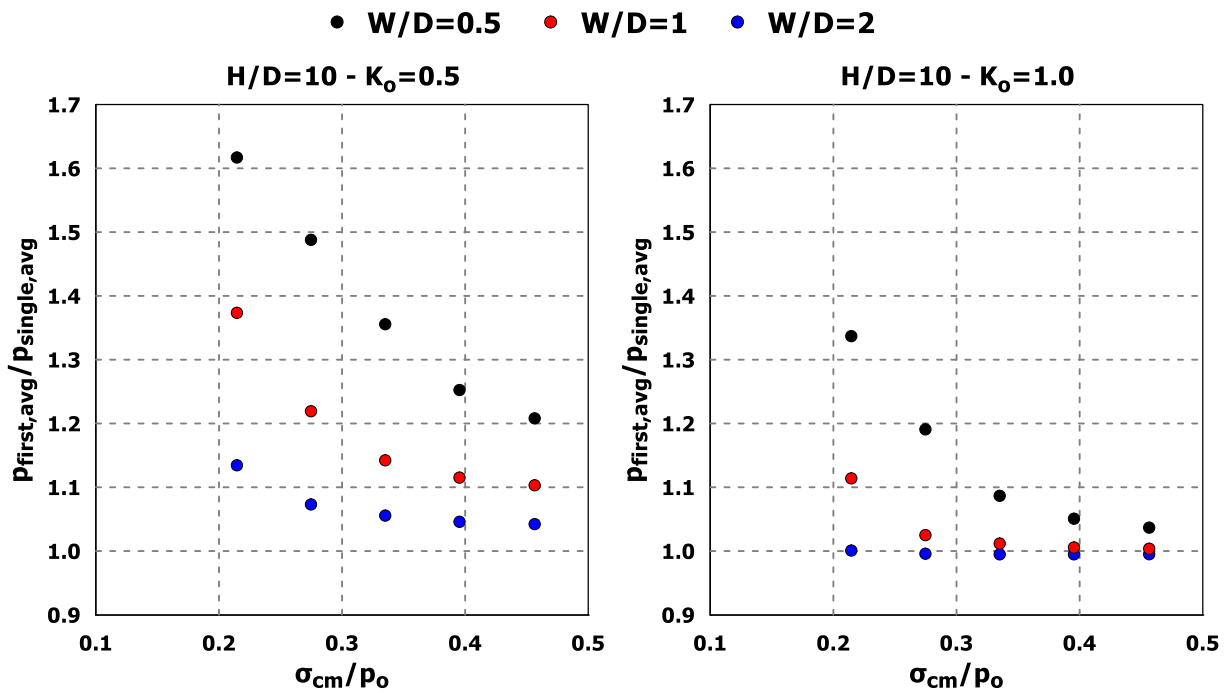
4.3.4. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

4.3.4.1. Φορτία (p)

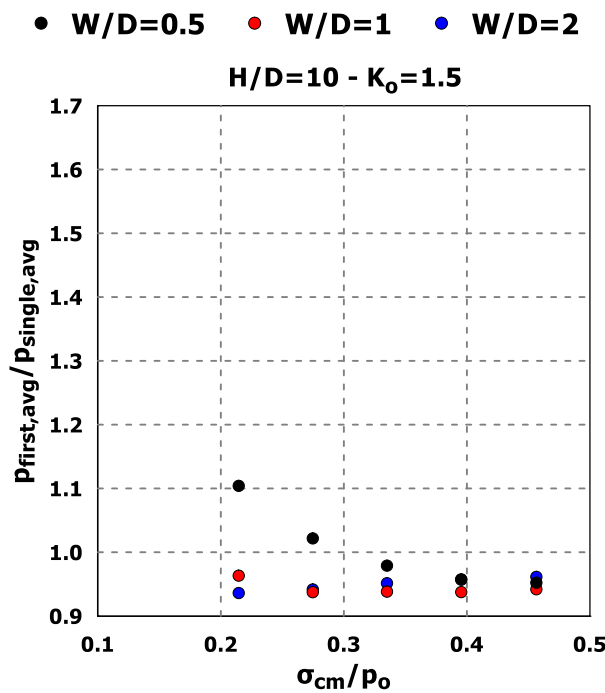
Τα επόμενα γραφήματα συνοψίζουν τα μεγέθη των φορτίων της «πρώτης» σήραγγας σε σχέση με τα φορτία στην άμεση υποστήριξη της «μονής», ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) και των πλατών πυλώνα (W/D). Τα συγκεντρωτικά διαγράμματα αναφέρονται στους συντελεστές οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_o) που διερευνήθηκαν.

Για $K_o = 0.5$, διακρίνεται αύξηση των φορτίων στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας, σε κάθε περιοχή, καθώς ο λόγος των φορτίων («πρώτης»/«μονής») παρουσιάζεται σε όλα τα διαγράμματα μεγαλύτερος της μονάδας (Σχήμα 4.3-32, 4.3-34, 4.3-36, αριστερά). Επομένως, η «πρώτη» σήραγγα (first tunnel) για όλα τα πλάτη πυλώνα και το εύρος των γεωτεχνικών συνθηκών που μελετήθηκαν παραλαμβάνει περισσότερα φορτία σε σχέση με τη μεμονωμένη σήραγγα (single tunnel), ενώ το φαινόμενο εντείνει η τοξωτή λειτουργία του εδάφους. Το εύρος της αύξησης των φορτίων σε σχέση με τη «μονή» σήραγγα μειώνεται με τη βελτιστοποίηση των γεωτεχνικών συνθηκών και την αύξηση του πλάτους του πυλώνα. Για τους συντελεστές οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 1.0$ και $K_o = 1.5$ τα φορτία στη στέψη της «πρώτης» σήραγγας είναι εν γένει μειωμένα σε σχέση με τα αντίστοιχα της «μονής», καθώς ο αντίστοιχος λόγος φορτίων εμφανίζεται μικρότερος της μονάδας (Σχήμα 4.3-34, δεξιά και Σχήμα 4.3-35). Επομένως η διάνοιξη της δεξιάς σήραγγας δρα ανακουφιστικά/ευεργετικά ως προς τα φορτία που δέχεται η οροφή της άμεσης υποστήριξης της υφιστάμενης σήραγγας. Όσο βελτιώνονται οι γεωτεχνικές συνθήκες και αυξάνεται το πλάτος του πυλώνα, ο λόγος των φορτίων «πρώτης»/«μονής» τείνει να λάβει την τιμή της μονάδας, δηλαδή το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης εξαλείφεται και οι σήραγγες δρουν ως μεμονωμένα εκσκαπτόμενες.

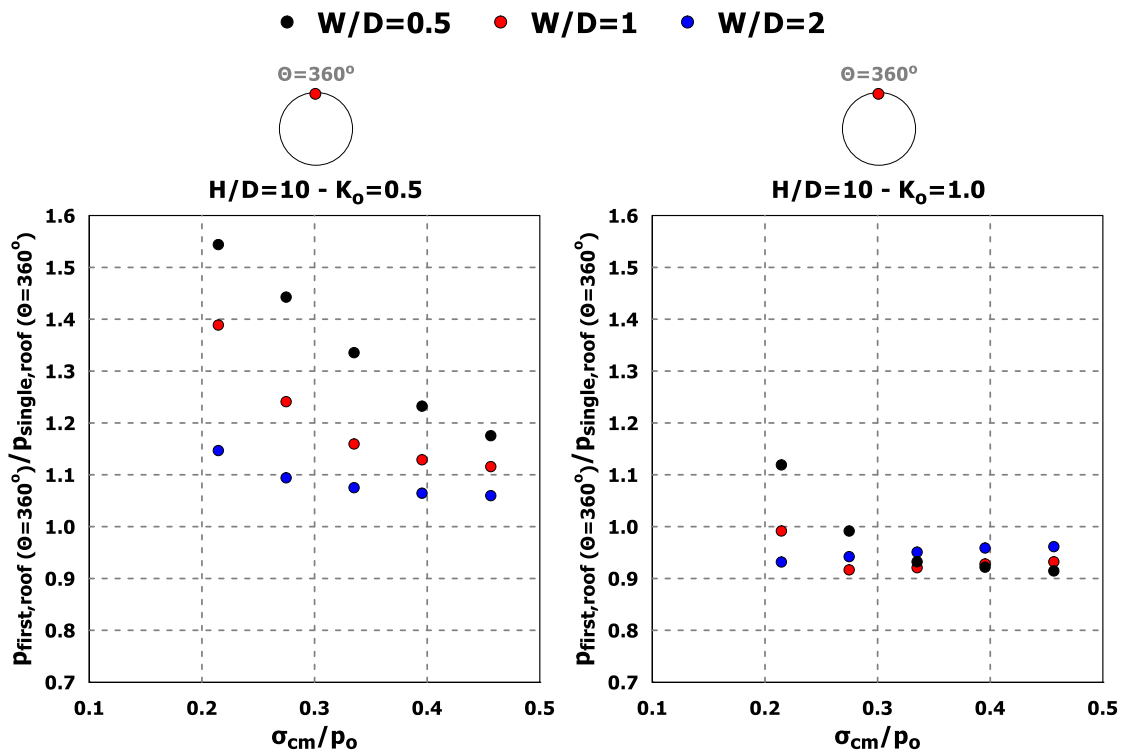
Αναφορικά στην εσωτερική παρειά ($\Theta = 90^\circ$) παρατηρείται αύξηση των φορτίων στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας ανεξαρτήτως τιμής K_o , με το λόγο $\rho_{first,side}(\Theta = 90^\circ)/\rho_{single,side}(\Theta = 90^\circ)$ να παρουσιάζεται για όλο το φάσμα πλατών πυλώνα και γεωτεχνικών συνθηκών, μεγαλύτερος της μονάδας, λόγω του φαινομένου της αλληλεπίδρασης (Σχήμα 4.3-36, 4.3-37). Η αύξηση αυτή ακολουθεί μειωτική τάση με την βελτιστοποίηση των γεωτεχνικών συνθηκών και την αύξηση του πλάτους του πυλώνα, όπου το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης εξαλείφεται.



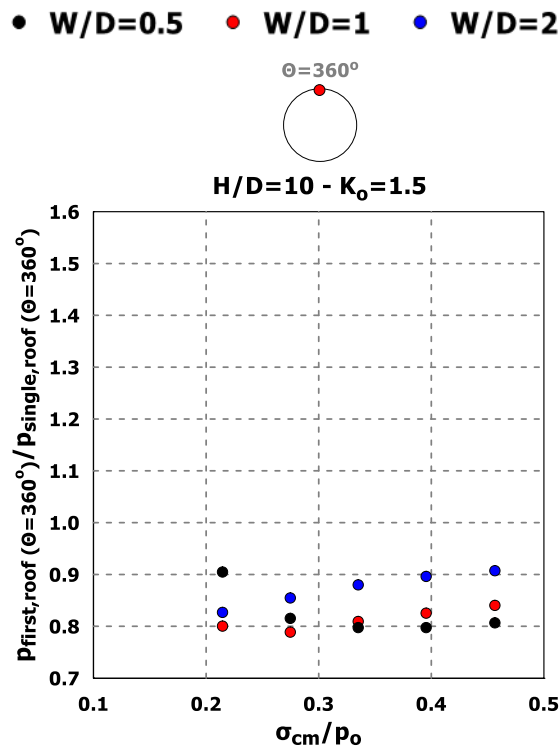
Σχήμα 4.3-32: Λόγος μέσων φορτίων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,avg}/p_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ (αριστερά) και $K_0 = 1.0$ (δεξιά).



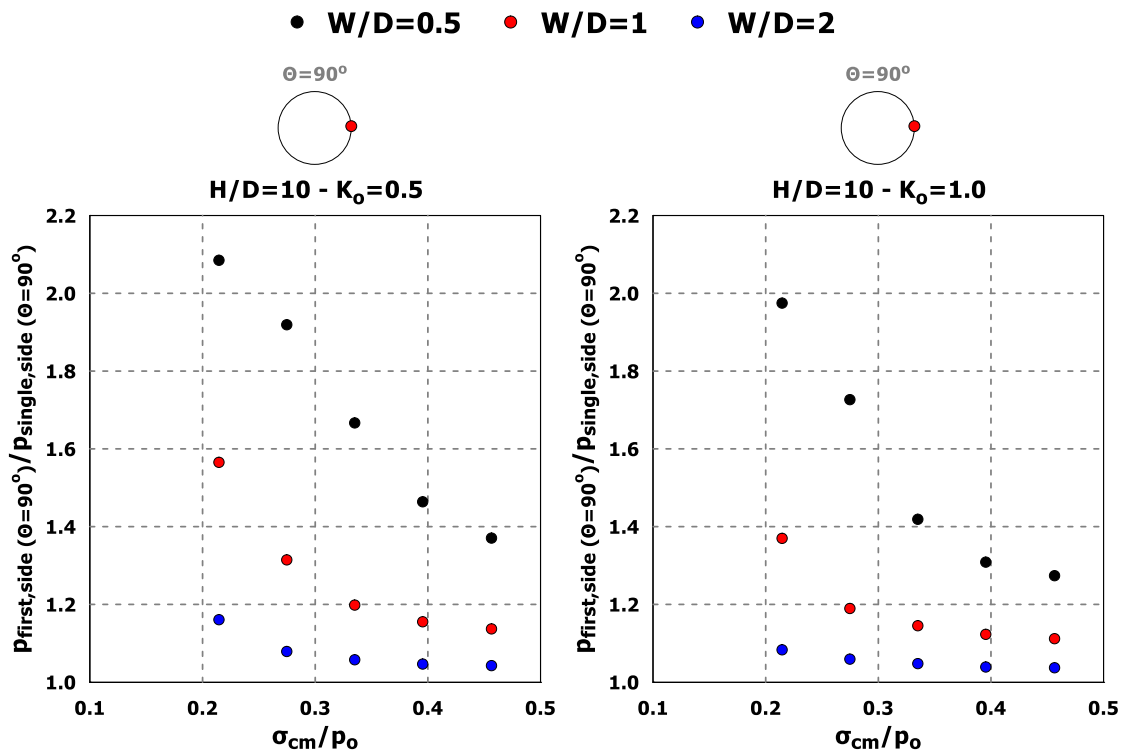
Σχήμα 4.3-33: Λόγος μέσων φορτίων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,avg}/p_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$.



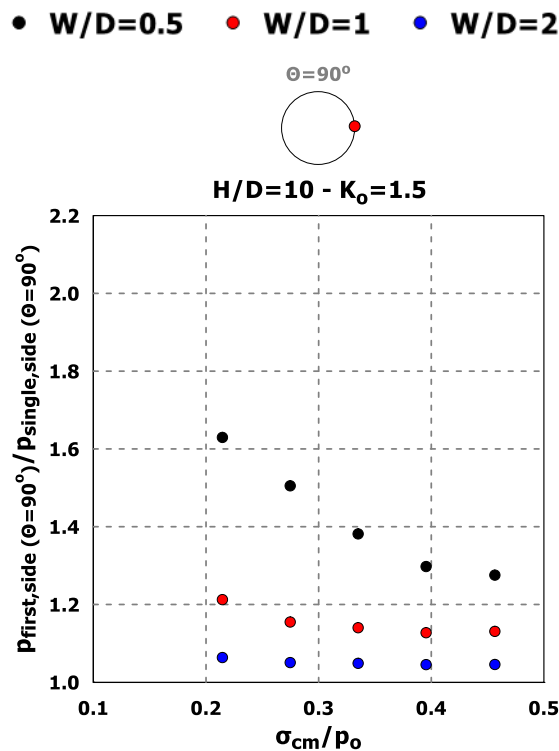
Σχήμα 4.3-34: Λόγος φορτίων στην οροφή της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{\text{first,roof}}(\theta = 360^\circ)/p_{\text{single,roof}}(\theta = 360^\circ)$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{\text{cm}}/\rho_0$) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώννα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών H/D = 10 και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ (αριστερά) και $K_0 = 1.0$ (δεξιά).



Σχήμα 4.3-35: Λόγος φορτίων στην οροφή της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{\text{first,roof}}(\theta = 360^\circ)/p_{\text{single,roof}}(\theta = 360^\circ)$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{\text{cm}}/\rho_0$) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώννα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών H/D = 10 και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 1.5$.



Σχήμα 4.3-36: : 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_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών H/D = 10 και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ (αριστερά) και $K_o = 1.0$ (δεξιά).



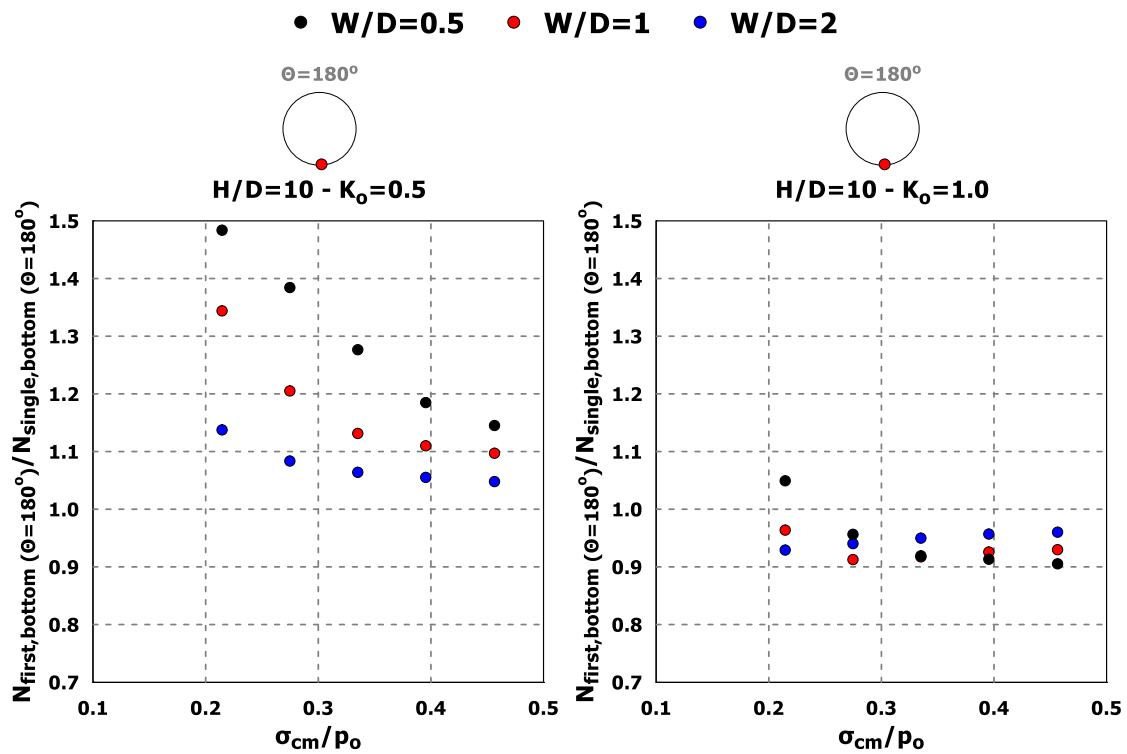
Σχήμα 4.3-37: Λόγος φορτίων στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας $P_{first,side(\theta = 90^\circ)}/P_{single,side(\theta = 90^\circ)}$ ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών H/D = 10 και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 1.5$.

4.3.4.2. Αξονικές δυνάμεις (N)

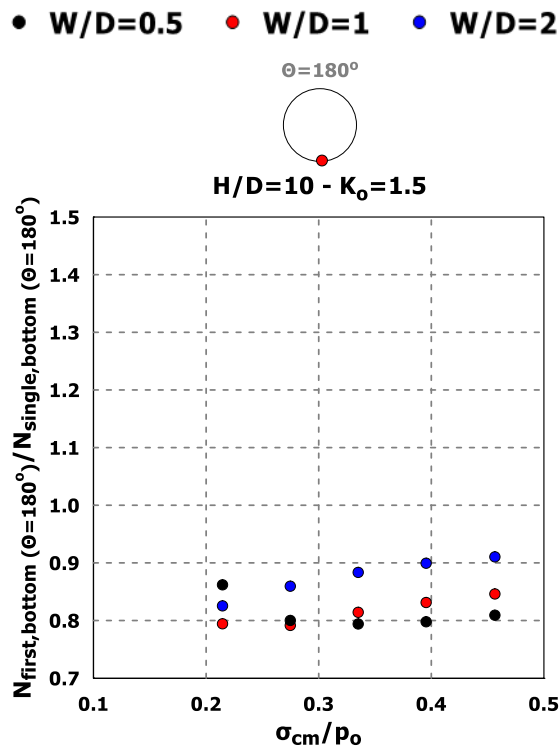
Στα Σχήματα 4.3-38 και 4.3-39 παρουσιάζεται ο λόγος των αξονικών δυνάμεων στον πυθμένα της «πρώτης» σήραγγας προς της «μονής», για συντελεστές οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5, 1.0$ και 1.5 , ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) και για το φάσμα των πλατών πυλώνα (W/D) που διερευνήθηκε.

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν αύξηση των αξονικών δυνάμεων στον πυθμένα της «πρώτης» σήραγγας όταν ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$. Η αύξηση αυτή μειώνεται και τείνει να λάβει την τιμή της μονάδας, όσο βελτιώνεται η ποιότητα της βραχώμαζας. Προφανές είναι, ότι όσο πιο κοντά τοποθετούνται μεταξύ τους οι σήραγγες, τόσο περισσότερο βελτιωμένες συνθήκες προϋποθέτουν την εξάλειψη του φαινομένου της αλληλεπίδρασης.

Στην περίπτωση όπου $K_0 = 1.0$ και $K_0 = 1.5$ οι αξονικές δυνάμεις της «μονής» σήραγγας είναι μεγαλύτερες από αυτές της «πρώτης», αποτελέσματα που συμφωνούν με εκείνα των φορτίων. Επομένως η διάνοιξη της «δεύτερης» σήραγγας δρα ανακουφιστικά/ευεργετικά ως προς τις αξονικές δυνάμεις που δέχεται η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας. Ακόμη, όπως και στην περίπτωση των φορτίων και για ορισμένους συνδυασμούς παραμέτρων ($K_0 = 1.0, K_0 = 1.5$ και για τα μεγαλύτερα πλάτη πυλώνα), παρατηρείται μια τάση αύξησης του λόγου των αξονικών δυνάμεων ο οποίος από τις ελάχιστες τιμές τείνει να λάβει την τιμή της μονάδας που σημαίνει, για τους δύο κλάδους της δίδυμης σήραγγας, ότι με τη βελτιστοποίηση της ποιότητας της βραχώμαζας, το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μειώνεται στο ελάχιστο έως ότου αποσβεσθεί πλήρως.



Σχήμα 4.3-38: Λόγος αξονικών δυνάμεων στον πυθμένα της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,bottom}(\theta = 180^\circ)/N_{single,bottom}(\theta = 180^\circ)$) 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 $K_o = 0.5$ (αριστερά) και $K_o = 1.0$ (δεξιά).



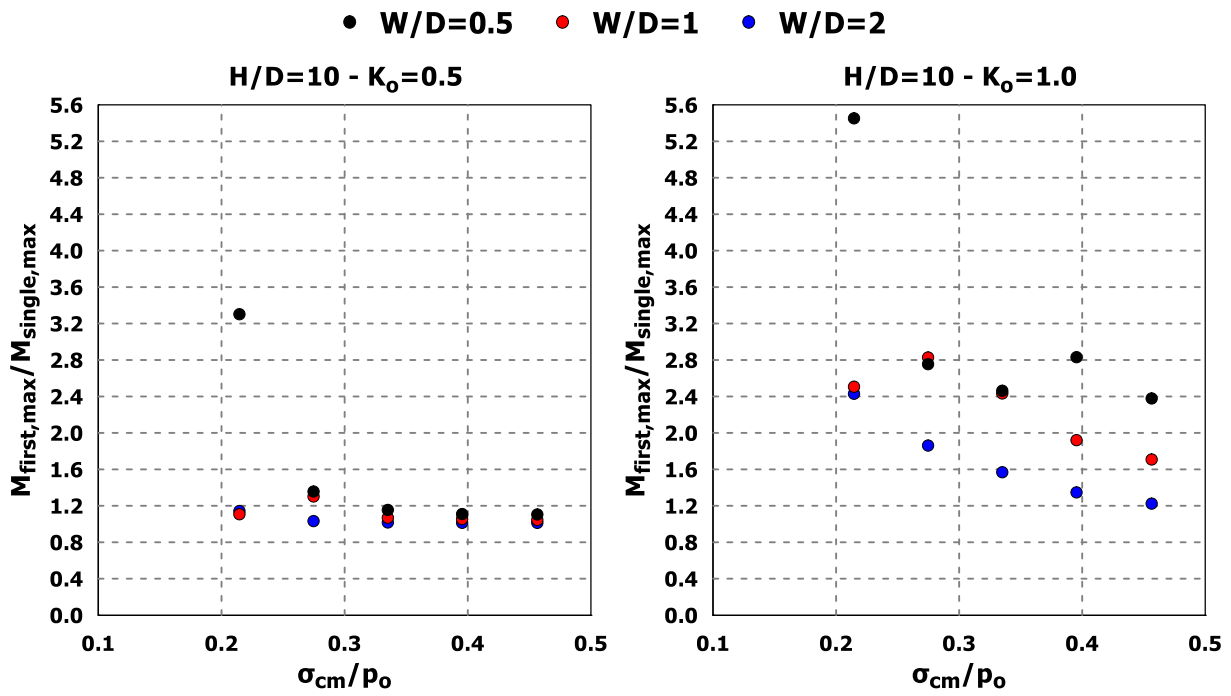
Σχήμα 4.3-39: Λόγος αξονικών δυνάμεων στον πυθμένα της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,bottom}(\theta = 180^\circ)/N_{single,bottom}(\theta = 180^\circ)$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών H/D = 10 και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 1.5$.

4.3.4.3. Ροπές κάμψης (M)

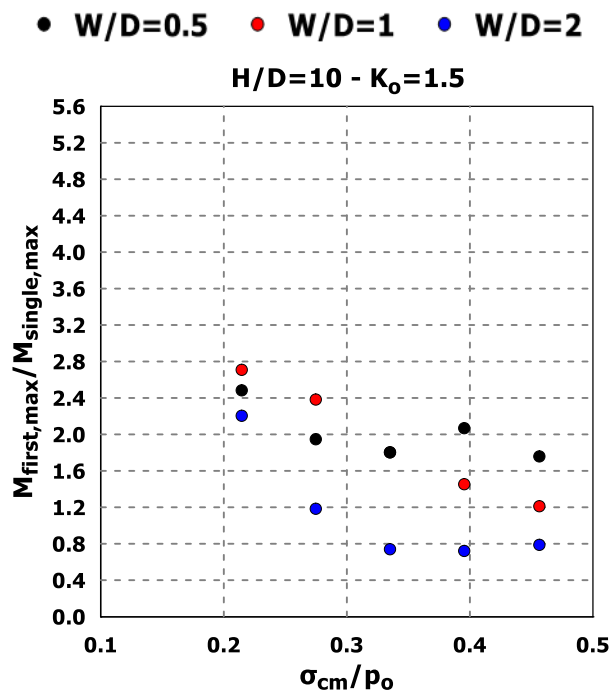
Στα Σχήματα 4.3-40 και 4.3-41 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα στα οποία απεικονίζεται ο λόγος των μέγιστων ροπών κάμψης («πρώτης»/«μονής») συναρτήσεως του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για όλο το εύρος των πλατών πυλώνων (W/D) που διερευνήθηκε. Φαίνεται ότι οι ροπές κάμψης αποτελούν ένα ευαίσθητο μέγεθος συγκριτικά με τα προηγούμενα μεγέθη, καθότι τα διαγράμματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα των αναλύσεων δεν ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη τάση. Παρατηρείται όμως πολύ μεγαλύτερη αύξηση των μεγεθών συγκριτικά με τα αποτελέσματα των φορτίων, η οποία για $K_o = 1.0$, $\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$ και $W/D = 0.5$ φτάνει έως 5 – 6 φορές μεγαλύτερη.

Το φαινόμενο της, σε τέτοιο βαθμό, μεγάλης ανάπτυξης των μεγεθών των ροπών υπερτονίζεται, καθώς στις αριθμητικές αναλύσεις θεωρείται ότι η ενεργοποίηση της πλήρους δυσκαμψίας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πραγματοποιείται ακαριαία, κάτι το οποίο υπό ρεαλιστικές συνθήκες δεν επιτυγχάνεται λόγω της φύσης των διαδικασιών τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης και του χρόνου που απαιτείται για να επιτευχθεί το αποτέλεσμα αυτό. Επομένως στην πραγματικότητα η ροπή θα αναλαμβάνονταν με παραμόρφωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και η διατομή, λόγω του μικρού μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος, θα παραμορφωνόταν χωρίς να αναλάβει σημαντικές καμπτικές ροπές.

Ακόμη, η μέγιστη καμπτική ροπή στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας είναι εν γένει μεγαλύτερη από αυτή της «μονής» γεγονός που υποδεικνύει ότι ανεξαρτήτως συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων η εκσκαφή της «δεύτερης» σήραγγας δε δρα «ευεργετικά» ως προς τις μέγιστες ροπές που αναπτύσσονται στην «πρώτη» σήραγγα. Επίσης, με τη βελτίωση της ποιότητας του γεωυλικού ο λόγος των καμπτικών ροπών τείνει να λάβει την τιμή της μονάδας δηλαδή οι κλάδοι ξεκινούν να συμπεριφέρονται ως ανεξάρτητες μεταξύ τους κατασκευές, λόγω της εξάλειψης του φαινομένου της αλληλεπίδρασης.



Σχήμα 4.3-40: Λόγος των μέγιστων ροπών κάμψης της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($M_{first,max}/M_{single,max}$) 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 $K_o = 0.5$ (αριστερά) και $K_o = 1.0$ (δεξιά).



Σχήμα 4.3-41: Λόγος των μέγιστων ροπών κάμψης της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($M_{first,max}/M_{single,max}$) 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 $K_o = 1.5$.

4.4. Επίδραση συντελεστή αποτόνωσης (λ)

Σύμφωνα με τον Καββαδά (2012) ο βαθμός αποτόνωσης (λ), δηλαδή η μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική της τιμή (p_0) σε μια μικρότερη τιμή (p) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της χρονικής υστέρησης στην τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης σηράγγων.

Επομένως η επίδραση του βαθμού αποτόνωσης (λ) στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δίδυμων σηράγγων μελετήθηκε μέσω της μεταβολής της απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο της «δεύτερης» σήραγγας ($S_{\text{tunnel face}/D}$). Η μεταβολή αυτής της απόστασης διερευνήθηκε για τις περιπτώσεις όπου ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων είναι $K_0 = 0.5$. Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αναφέρονται στα φορτία και στις αξονικές δυνάμεις της άμεσης υποστήριξης των δίδυμων σηράγγων.

4.4.1. Φορτία (p)

Τα επόμενα γραφήματα συνοψίζουν τα μεγέθη των φορτίων της «πρώτης» (first tunnel) και της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) σε σχέση με τα φορτία στην άμεση υποστήριξη της «μονής» (single tunnel), ως συνάρτηση της κανονικοποιημένης απόστασης ($S_{\text{tunnel face}/D}$) εφαρμογής της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής και των πλατών πυλώνων (W/D) που διερευνήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας. Τα συγκεντρωτικά διαγράμματα αναφέρονται στο συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$.

Αναφορικά στη «δεύτερη» σήραγγα (second tunnel), η βαθμιαία αύξηση της απόστασης εφαρμογής της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο (αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης) οδηγεί σε αντίστοιχη μείωση της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης κατά μήκος της σήραγγας και συμβάλλει στην αποτόνωση του γεωυλικού, η οποία επιφέρει περαιτέρω μετακινήσεις στο ανυποστηρίκτο τμήμα της σήραγγας. Η σύγκλιση της βραχόμαζας πριν από την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης συντελεί στην αποτόνωση της βραχόμαζας και στη μείωση των πιέσεων που θα ασκηθούν επί των μέτρων υποστήριξης.

Σύμφωνα με τον Καββαδά (2012), κατά τη διάνοιξη σηράγγων με τη μέθοδο NATM, η διαδικασία εκσκαφής και άμεσης υποστήριξης έχει σκοπό να επιτρέψει την ελεγχόμενη σύγκλιση της βραχόμαζας προς το εσωτερικό της σήραγγας ώστε να αναπτυχθεί

φαινόμενο θόλου, δηλαδή θλιπτική ένταση (σ_θ) της βραχόμαζας κατά την περιφέρεια της σήραγγας, και με τον τρόπο αυτό να μειωθεί η πίεση στην άμεση υποστήριξη, δεδομένου ότι η πίεση της βραχόμαζας 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. Αντιθέτως, όσο περισσότερο ενδόσιμη είναι η άμεση υποστήριξη και όσο αργότερα τοποθετείται τόσο μικρότερα φορτία αναλαμβάνει υπό την προϋπόθεση ότι η καθυστέρηση στην τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης δεν θα προκαλέσει υπερβολική χαλάρωση και αποδιοργάνωση της βραχόμαζας (οπότε θα αυξηθούν σημαντικά τα φορτία της άμεσης υποστήριξης).

Ως επαλήθευση των παραπάνω για τη «δεύτερη» σήραγγα παρατηρείται γενικά μείωση των μέσων φορτίων ($\rho_{\text{second,avg}}/\rho_{\text{single,avg}}$) με την αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης σε σχέση με τα φορτία της «μονής» σήραγγας (Σχήμα 4.4-2, αριστερά) στην οποία η άμεση υποστήριξη τοποθετείται πολύ κοντά στο μέτωπο εκσκαφής ($S_{\text{tunnel face}}/D = 0.125$). Παρατηρείται ακόμη ότι η άμεση υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) για ορισμένους συνδυασμούς παραμέτρων (W/D και $S_{\text{tunnel face}}/D$) αναλαμβάνει μικρότερα φορτία συγκριτικά με τη «μονή» (single tunnel). Παρόμοια τάση (Σχήμα 4.4-2, δεξιά) επικρατεί και στα φορτία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην εσωτερική παρειά της «δεύτερης» σήραγγας ($\rho_{\text{second,side}}(\Theta = 270 \text{ deg})/\rho_{\text{single,side}}(\Theta = 90 \text{ deg})$).

Αναφορικά στην «πρώτη» σήραγγα παρατηρείται μια γενικότερη αύξηση τόσο των μέσων ($\rho_{\text{first,avg}}/\rho_{\text{single,avg}}$), όσο και των φορτίων στην εσωτερική παρειά ($\rho_{\text{first,side}}(\Theta = 90 \text{ deg})/\rho_{\text{single,side}}(\Theta = 90 \text{ deg})$) καθώς ο λόγος των φορτίων («πρώτης»/«μονής») παρουσιάζεται ανεξαρτήτως πλάτους πυλώνα και απόστασης εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος από το μέτωπο της «δεύτερης» σήραγγας, μεγαλύτερος από τη μονάδα (Σχήμα 4.4-1). Το φαινόμενο αυτό είναι αναμενόμενο καθώς, όπως έχει αναλυθεί και πρωτύτερα, η εκσκαφή της «δεύτερης» σήραγγας διαταράσσει την περιβάλλουσα βραχόμαζα, η οποία τείνει να μετακινηθεί προς την υφιστάμενη σήραγγα. Το άκαμπτο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας εμποδίζει αυτή τη μετακίνηση με αποτέλεσμα η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας να παραλαμβάνει μεγαλύτερα φορτία σε σχέση με την άμεση υποστήριξη της «μονής».

Μια δεύτερη γενική παρατήρηση είναι ότι όσο αυξάνεται η απόσταση εφαρμογής της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο της «δεύτερης» σήραγγας ($S_{\text{tunnel face}/D}$), τόσο μεγαλύτερη είναι η μεγιστοποίηση των φορτίων στην «πρώτη» σήραγγα.

Η απόκριση αυτή εμφανίζεται, καθώς η μεγαλύτερη αποτόνωση του γεωυλικού γύρω από τη «δεύτερη» σήραγγα τείνει να οδηγήσει σε μεγαλύτερες συγκλίσεις, αλλά στην περιοχή της εσωτερικής παρειάς ($\Theta = 270^\circ$) το γεωυλικό έχει ήδη υποστεί μια ανακατανομή τάσεων, έχει παραμορφωθεί και έχει ήδη πλαστικοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό, λόγω της εκσκαφής της προϋπάρχουσας σήραγγας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στο εύρος του πυλώνα στο οποίο δεν έχει εφαρμοστεί υποστήριξη στη νέα σήραγγα, να παρουσιάζεται ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων στα υπολειπόμενα σημεία τα οποία δεν είχαν ήδη πλαστικοποιηθεί, δεδομένου ότι ο βαθμός αποτόνωσης συμβάλλει στη διεύρυνση της πλαστικής ζώνης.

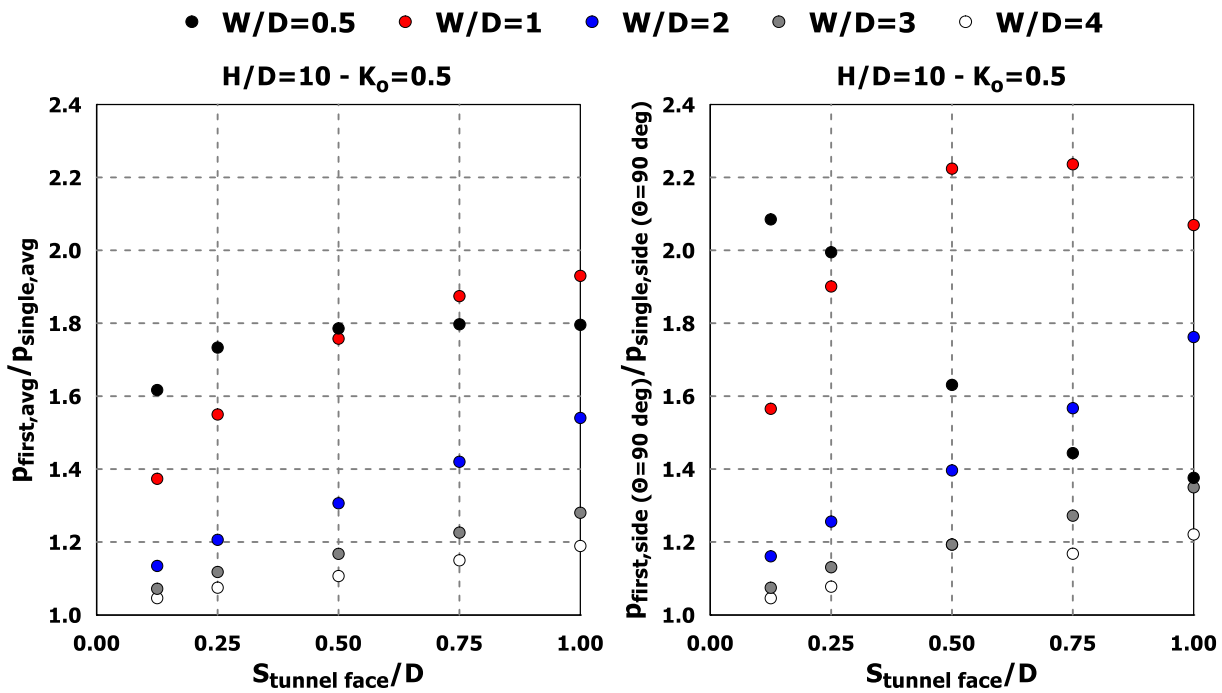
Επομένως, όσο μεγαλύτερη η απόσταση $S_{\text{tunnel face}/D}$ τόσο μεγαλύτερη περιοχή υποβάλλεται σε νέες ανακατανομές τάσεων, καθώς επίσης σε παραμορφώσεις, με αποτέλεσμα η επιφόρτιση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της υφιστάμενης σήραγγας (first tunnel) να καθίσταται εντονότερη.

Στην ένταση του φαινομένου συμβάλλει επίσης η τοξωτή λειτουργία του εδάφους η οποία, δεδομένου του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ μεταφέρει τα φορτία εκατέρωθεν της «δεύτερης» σήραγγας στην περιοχή του πυλώνα και έχει ως αποτέλεσμα την επιφόρτιση της «πρώτης». Πιο συγκεκριμένα, στη διάνοιξη σηράγγων το φαινόμενο της τοξωτής λειτουργίας του εδάφους εντοπίζεται όπου η ενυπάρχουσα αντοχή του εδάφους, συμπεριλαμβανομένης της γωνίας τριβής και της συνοχής ενεργοποιείται για να συμβάλλει στη μεταφορά φορτίου μέσω του εδάφους. Σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες η σήραγγα δημιουργεί ένα κενό εντός του γεωλογικού μέσου το οποίο επιτρέπει κάποια σύγκλιση του εδάφους πάνω από τη σήραγγα. Καθώς το έδαφος συγκλίνει προς τα μέσα (προς το άνοιγμα της σήραγγας) συμπιέζει πλευρικά, δημιουργώντας ένα θλιβόμενο τόξο. Το τόξο οδηγεί σε μείωση των κατακόρυφων τάσεων στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας, με τη μεταφορά του φορτίου προς τα έξω, εντός της βραχώμαζας.

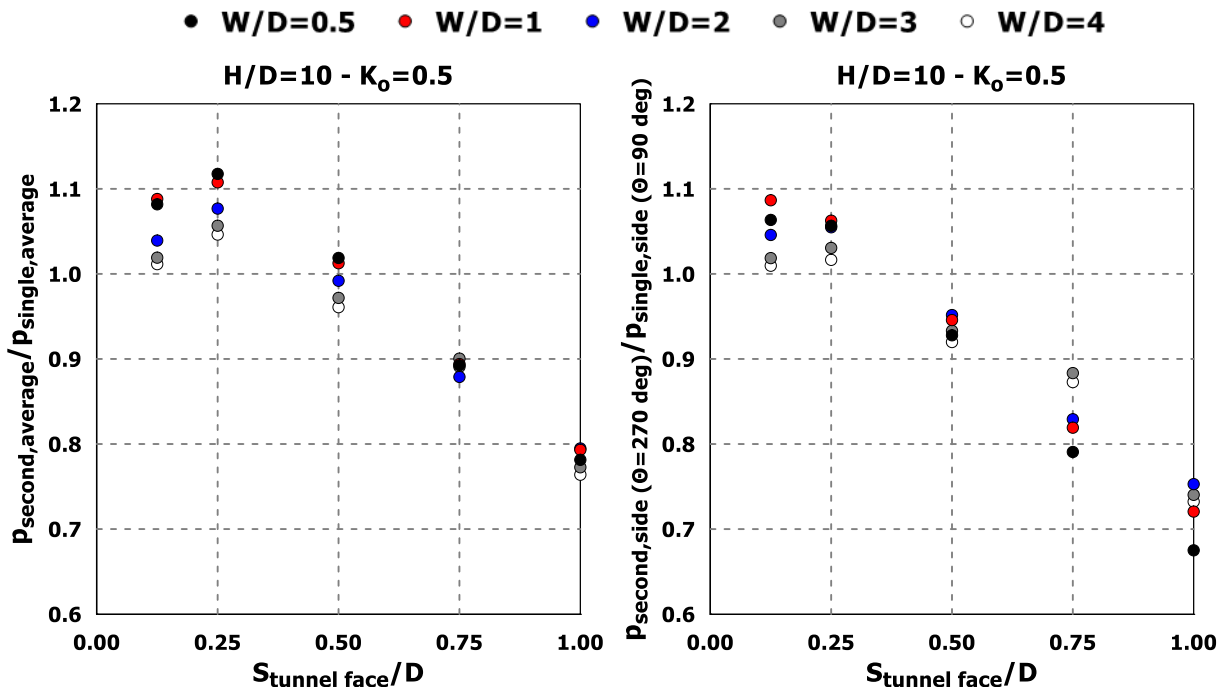
Κατά συνέπεια, όσο αυξάνεται ο συντελεστής αποτόνωσης, τόσο περισσότερο εντείνεται το φαινόμενο του θόλου, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερων μετακινήσεων γύρω από τη «δεύτερη» σήραγγα και ταυτόχρονη μεγαλύτερη αύξηση των φορτίων στην άμεση, δύσκαμπτη, υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας. Η δυσκαμψία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος από τη μία μεριά του πυλώνα στην «πρώτη» σήραγγα (first tunnel) σε συνδυασμό με τη μη παρεμπόδιση παραμορφωσιακής και μετακινησιακής μεταβολής του γεωυλικού από την άλλη στη «δεύτερη σήραγγα» (second tunnel) εντείνει το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.

Για την «πρώτη» σήραγγα παρατηρείται ακόμη ότι οι μέγιστες τιμές των φορτίων από τη γωνία $\Theta = 90^\circ$ της εσωτερικής παρειάς εκτρέπονται στις περιοχές άνω και κάτω της γωνίας αυτής, από τη μεριά του πυλώνα.

Σχετικά με τα πλάτη πυλώνα παρατηρείται ότι αύξηση της εγκάρσιας απόστασης μεταξύ των παρειών έχει ως αποτέλεσμα την άμβλυση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, καθώς η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας παραλαμβάνει ολοένα και μικρότερα φορτία.



Σχήμα 4.4-1: Λόγος μέσων φορτίων ($\rho_{first,avg}/\rho_{single,avg}$) (αριστερά) και φορτίων στην εσωτερική παρειά ($\rho_{first,side (\theta = 90 \text{ deg})}/\rho_{single,side (\theta = 90 \text{ deg})}$) (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ως συνάρτηση της κανονικοποιημένης απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο ($S_{tunnel \text{ face}}/D$) της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$.



Σχήμα 4.4-2: Λόγος μέσων φορτίων ($\rho_{second,avg}/\rho_{single,avg}$) (αριστερά) και φορτίων στην εσωτερική παρειά ($\rho_{second,side (\theta = 270 \text{ deg})}/\rho_{single,side (\theta = 90 \text{ deg})}$) (δεξιά) της «δεύτερης» προς της «μονής» σήραγγας ως συνάρτηση της κανονικοποιημένης απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο ($S_{tunnel \text{ face}}/D$) της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$.

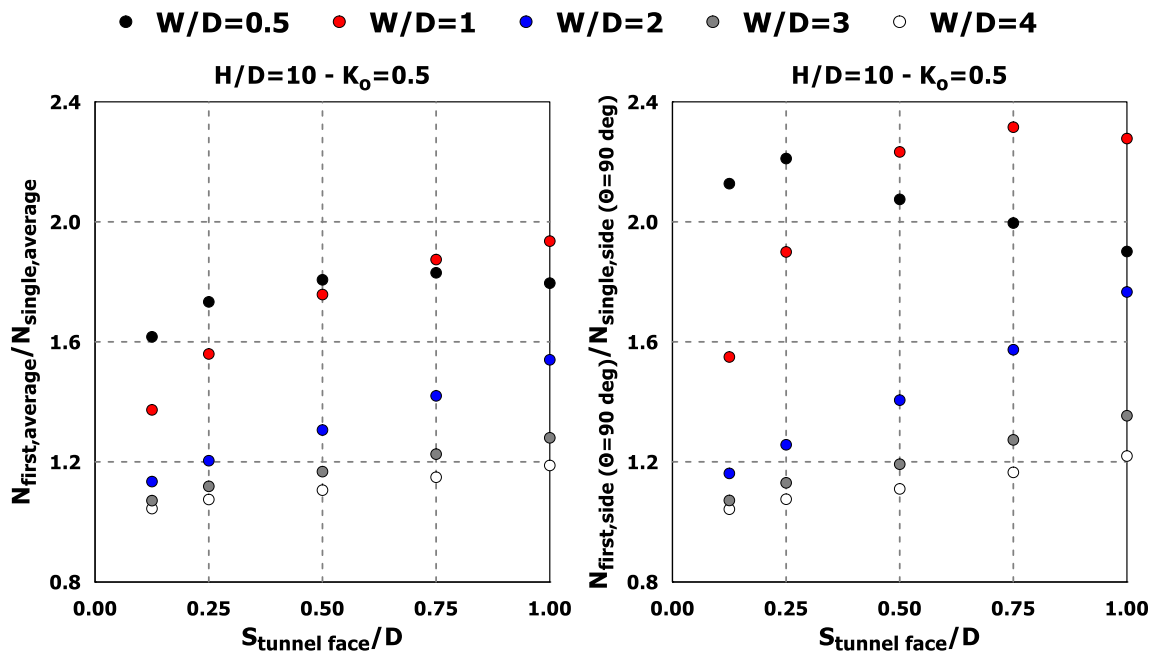
4.4.2. Αξονικές δυνάμεις (N)

Στα Σχήματα 4.4-3 και 4.4-4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέσω του λόγου των μέσων αξονικών δυνάμεων ($N_{\text{first,avg}}/N_{\text{single,avg}}$) και του λόγου των αξονικών δυνάμεων στην εσωτερική παρειά ($N_{\text{first,side}}(\Theta = 90 \text{ deg})/N_{\text{single,side}}(\Theta = 90 \text{ deg})$) για την «πρώτη» και τη «δεύτερη» σήραγγα. Η τάση που επικρατεί είναι όμοια με αυτή που προκύπτει στα διαγράμματα των φορτίων.

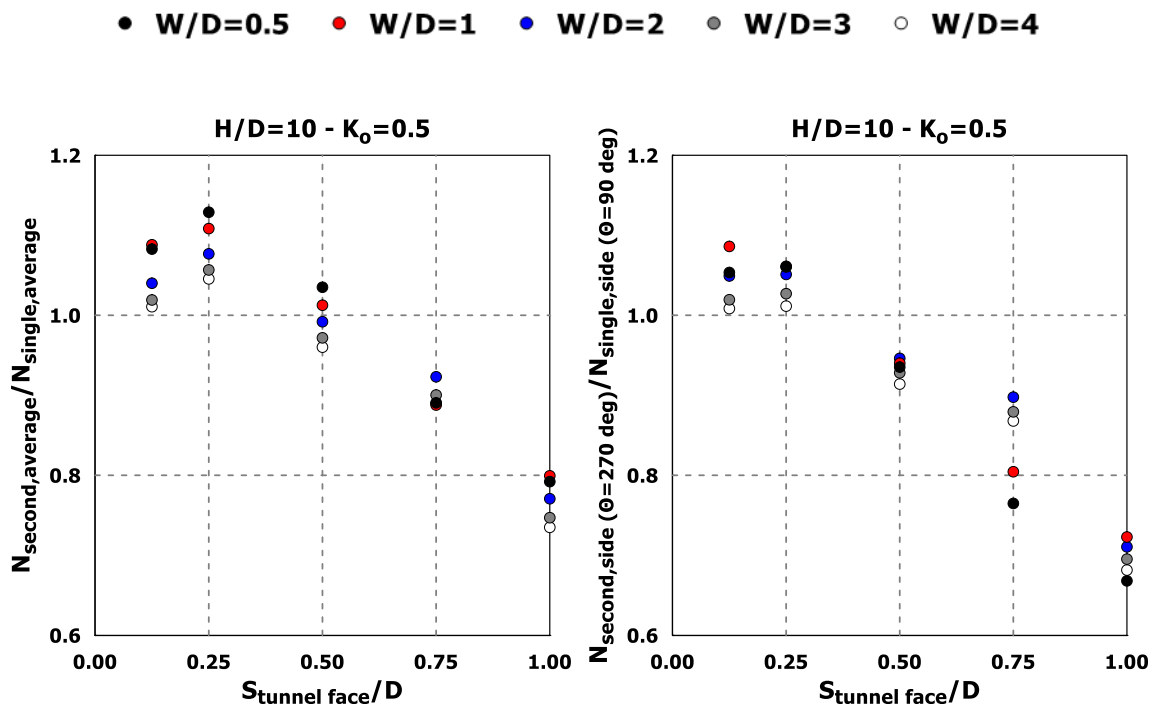
Οι αξονικές δυνάμεις της «πρώτης» σήραγγας (Σχήμα 4.4-3) αυξάνονται με την αντίστοιχη αύξηση της απόστασης εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος από το μέτωπο της «δεύτερης» σήραγγας, λόγω του φαινομένου της αλληλεπίδρασης αλλά και της τοξωτής λειτουργίας του εδάφους με βάση την οποία, τα φορτία μεταφέρονται εκατέρωθεν της «δεύτερης» σήραγγας και κατά συνέπεια οι αξονικές δυνάμεις παρουσιάζονται αυξημένες στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης». Αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης εντείνει το φαινόμενο του θόλου και επιφέρει μεγαλύτερες μετακινήσεις γύρω από τη νέα σήραγγα οι οποίες αναπτύσσουν τις αξονικές δυνάμεις στη δύσκαμπτη υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας.

Σχετικά με τη «δεύτερη» σήραγγα (Σχήμα 4.4-4) οι αξονικές δυνάμεις μειώνονται με την αύξηση της απόστασης εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος από το μέτωπο ($S_{\text{tunnel face}}/D$) καθώς η σύγκλιση της βραχόμαζας πριν από την εφαρμογή της άμεσης υποστήριξης συντελεί στην αποτόνωση του γεωυλικού και κατά συνέπεια στη μείωση των πιέσεων που θα ασκηθούν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Επιπλέον οι αξονικές δυνάμεις στην άμεση υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας για την πλειοψηφία συνδυασμών των παραμέτρων (W/D και $S_{\text{tunnel face}}/D$) παρουσιάζονται μικρότερες σε σχέση με τις αξονικές δυνάμεις της υφιστάμενης.

Ως γενικότερη παρατήρηση των ανωτέρω, προκύπτει ότι αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης επιφέρει αύξηση των αξονικών δυνάμεων στην άμεση υποστήριξη της υφιστάμενης σήραγγας, αλλά μείωση στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της νέας. Φαίνεται δηλαδή ότι λειτουργεί ευμενώς για τον ένα, αλλά δυσμενώς για τον άλλο κλάδο των δίδυμων σηράγγων.



Σχήμα 4.4-3: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων ($N_{\text{first,avg}}/N_{\text{single,avg}}$) (αριστερά) και αξονικών δυνάμεων στην εσωτερική παρειά ($N_{\text{first,side}}(\theta = 90 \text{ deg})/N_{\text{single,side}}(\theta = 90 \text{ deg})$) (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο ($S_{\text{tunnel face}}/D$) της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$.



Σχήμα 4.4-4: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων ($N_{\text{second,avg}}/N_{\text{single,avg}}$) (αριστερά) και αξονικών δυνάμεων στην εσωτερική παρειά ($N_{\text{second,side}}(\theta = 270 \text{ deg})/N_{\text{single,side}}(\theta = 90 \text{ deg})$) (δεξιά) της «δεύτερης» προς της «μονής» σήραγγας συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο ($S_{\text{tunnel face}}/D$) της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$.

5. Συμπεράσματα & Προτάσεις

Ο σκοπός που πραγματοποιήθηκε η συγκεκριμένη έρευνα ήταν η διερεύνηση του μηχανισμού της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων. Για το σκοπό αυτό διερευνήθηκαν τα μεγέθη των φορτίων και των εντατικών μεγεθών (αξονικών δυνάμεων και ροπών κάμψης) που ασκούνται στην άμεση υποστήριξη των δύο κλάδων εξετάζοντας μια σειρά από μεγέθη πλατών πυλώνα μεταξύ των σηράγγων, γεωτεχνικών συνθηκών, συντελεστών οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και συντελεστών αποτόνωσης. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εν λόγω έρευνα, καθώς επίσης προτάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Τα συμπεράσματα αναφέρονται στις συγκεκριμένες παραδοχές που υιοθετήθηκαν στα πλαίσια της έρευνας.

5.1. Συμπεράσματα

Επίδραση πλάτους πυλώνα (W/D)

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

- i. 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.
- ii. 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.

- iii. 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.
- iv. 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.
- v. 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».

Συνοψίζοντας, παρατηρείται μείωση των φορτίων 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. Τα αποτελέσματα των αξονικών δυνάμεων ακολουθούν αντίστοιχη τάση. Τέλος, υπό οποιοδήποτε πλάτος πυλώνα και λόγο γεωτεχνικών συνθηκών, η εσωτερική παρειά δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση μέχρις ότου το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης εξαλειφθεί πλήρως.

Επίδραση συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_0)

Ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων επηρεάζει σημαντικά τα φορτία και τα εντατικά μεγέθη που δέχεται η άμεση υποστήριξη των σηράγγων καθώς από το μέγεθος αυτό υπολογίζεται η τιμή του μέσου αρχικού εντατικού πεδίου, από το οποίο εξαρτάται το μέσο φορτίο που εφαρμόζεται στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων. Επιπλέον καθορίζει την κατανομή των τάσεων περιμετρικά των διατομών, επηρεάζοντας τις αναπτυσσόμενες πλαστικές παραμορφώσεις και μετατοπίσεις του περιβάλλοντος γεωυλικού και κατ' επέκταση την κατανομή των φορτίων. Παρατηρείται ότι:

- i. Για $K_0 = 0.5$ η άμεση υποστήριξη της «μονής» σήραγγας παραλαμβάνει μεγαλύτερα φορτία στις παρειές, ενώ μικρότερα στη στέψη και τον πυθμένα. Για $K_0 = 1.5$ λαμβάνει χώρα το αντίθετο φαινόμενο. Επομένως στην περίπτωση όπου ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 \neq 1$ τα μέγιστα φορτία εντοπίζονται στις περιοχές όπου λαμβάνουν χώρα οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις (περιοχή αύξησης των διεκτροπικών τάσεων) σε συνδυασμό με τις ελάχιστες μετατοπίσεις. Στην περίπτωση όπου οι γεωστατικές τάσεις είναι ισομεγέθεις ($K_0 = 1.0$) παρατηρείται ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων στην άμεση υποστήριξη της «μονής» σήραγγας.
- ii. Σχετικά με το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, η εκσκαφή της «δεύτερης» σήραγγας επιδρά στην ανάπτυξη των φορτίων που δέχεται η «πρώτη» για οποιαδήποτε τιμή K_0 . Οι μέγιστες τιμές των φορτίων εντοπίζονται στην περιοχή του πυλώνα με έμφαση την εσωτερική παρειά η οποία, ανεξαρτήτως συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων, παραλαμβάνει τελικά το ίδιο κατά μέγεθος φορτίο p/p_0 . Αύξηση των φορτίων στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» σήραγγας παρατηρείται ανεξαρτήτως K_0 και για όλο το φάσμα πλατών πυλώνα και γεωτεχνικών συνθηκών. Η αύξηση αυτή ακολουθεί μειωτική τάση με τη βελτίωση της ποιότητας του γεωυλικού και την αύξηση των πλατών του πυλώνα. Αναφορικά στην εξωτερική παρειά, τη στέψη και τον πυθμένα για $K_0 = 0.5$ και $K_0 = 1.0$, τα φορτία της «πρώτης» σήραγγας αυξάνονται σε κάθε περιοχή. Για $K_0 = 1.5$ στην «πρώτη» σήραγγα σημειώνεται μείωση των φορτίων στη στέψη και τον πυθμένα και επομένως η διάνοιξη της «δεύτερης» δρα με ευεργετικό/ανακουφιστικό τρόπο στις περιοχές αυτές της υφιστάμενης σήραγγας. Βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών συνεπάγεται μείωση του εύρους της ανακούφισης. Σε όρους ποσοστιαίας αύξησης φορτίων, το φαινόμενο καθίσταται περισσότερο έντονο με τη μείωση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων. Η ανωτέρω απόκριση οφείλεται στην τοξωτή λειτουργία του εδάφους η οποία αναπτύσσεται με διαφορετικό μηχανισμό ανάλογα με

την τιμή του K_0 . Οι αξονικές δυνάμεις ακολουθούν παρόμοια κατανομή με αυτή των φορτίων.

- iii. Για $K_0 = 0.5$ οι μεγαλύτερες ροπές κάμψης στη «μονή» και τη «δεύτερη» σήραγγα εμφανίζονται στις παρειές καθώς οι μεγαλύτερες πιέσεις από το περιβάλλον έδαφος επιβάλλονται στη στέψη και τον πυθμένα. Για $K_0 = 1.5$ παρατηρείται αντίστροφο φαινόμενο, με τις μέγιστες ροπές κάμψης να εμφανίζονται στην οροφή και το δάπεδο. Για $K_0 = 1.0$ οι καμπτικές ροπές είναι σχεδόν μηδενικές καθώς υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων από τη βραχόμαζα στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων. Σχετικά με την «πρώτη» σήραγγα, η άμεση υποστήριξη δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση λόγω κάμψης στην εσωτερική παρειά, ανεξαρτήτως K_0 . Το γεγονός αυτό υποδεικνύει μια μεταφορά φορτίου από τη δεξιά σήραγγα στην αριστερή, ενώ το φαινόμενο καθίσταται λιγότερο έντονο με την αύξηση του K_0 .
- iv. Οι ροπές κάμψης αποτελούν ένα ευαίσθητο μέγεθος συγκριτικά με τα υπόλοιπα καθώς δεν ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη τάση. Παρατηρείται όμως πολύ μεγαλύτερη αύξηση των μεγεθών συγκριτικά με αυτά των φορτίων. Το φαινόμενο της, σε τέτοιο βαθμό, ανάπτυξης των μεγεθών των ροπών υπερτονίζεται καθώς στις αριθμητικές αναλύσεις θεωρείται ότι η ενεργοποίηση της πλήρους δυσκαμψίας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πραγματοποιείται ακαριαία, κάτι που υπό ρεαλιστικές συνθήκες δεν επιτυγχάνεται. Στην πραγματικότητα η ροπή θα αναλαμβάνονταν με παραμόρφωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και η διατομή λόγω του μικρού μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος θα παραμορφωνόταν χωρίς να αναλάβει σημαντικές καμπτικές ροπές.

Επίδραση συντελεστή αποτόνωσης

Η επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης (λ) στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δίδυμων σηράγγων μελετήθηκε μέσω της μεταβολής της απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο ($S_{\text{tunnel face}}/D$) της «δεύτερης» σήραγγας, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$.

- i. Στη «δεύτερη» σήραγγα, η βαθμιαία αύξηση της απόστασης εφαρμογής της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο (αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης) επιφέρει περαιτέρω μετακινήσεις στο ανυποστήρικτο τμήμα της σήραγγας που οδηγούν στη μείωση των πιέσεων που ασκούνται επί του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Επομένως για τη «δεύτερη» σήραγγα παρατηρείται γενικά μείωση των φορτίων με την αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης. Παρατηρείται ακόμη ότι η άμεση υποστήριξη της «δεύτερης»

σήραγγας για ορισμένους συνδυασμούς παραμέτρων (W/D και $S_{\text{tunnel face}/D}$) αναλαμβάνει μικρότερα φορτία συγκριτικά με τη «μονή». Στην «πρώτη» σήραγγα παρατηρείται αύξηση των φορτίων καθώς η εκσκαφή της «δεύτερης» σήραγγας διαταράσσει σε μεγαλύτερο εύρος και βαθμό την περιβάλλουσα βραχόμαζα και σε συνδυασμό με τη μεγαλύτερη αποτόνωση που συντελείται λόγω της διάνοιξής της, το άκαμπτο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας εμποδίζει αυτή τη μετακίνηση. Ως αποτέλεσμα, η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας παραλαμβάνει μεγαλύτερα φορτία σε σχέση με αυτή της «μονής». Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση $S_{\text{tunnel face}/D}$ τόσο μεγαλύτερη περιοχή υποβάλλεται σε νέες ανακατανομές τάσεων και σε παραμορφώσεις με αποτέλεσμα η επιφόρτιση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της υφιστάμενης σήραγγας να καθίσταται εντονότερη.

- ii. Στην ένταση του φαινομένου συμβάλλει η τοξωτή λειτουργία του εδάφους η οποία, δεδομένου του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$, μεταφέρει τα φορτία εκατέρωθεν της «δεύτερης» σήραγγας και έχει ως αποτέλεσμα την επιφόρτιση της «πρώτης». Συνεπώς όσο αυξάνεται ο συντελεστής αποτόνωσης τόσο περισσότερο εντείνεται το φαινόμενο του θόλου, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερων μετακινήσεων γύρω από τη «δεύτερη» σήραγγα και ταυτόχρονη μεγαλύτερη αύξηση των φορτίων στην άμεση, δύσκαμπτη, υποστήριξη της «πρώτης». Η δυσκαμψία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος από τη μία μεριά του πυλώνα στην «πρώτη» σήραγγα σε συνδυασμό με τη μη παρεμπόδιση παραμορφωσιακής και μετακινησιακής μεταβολής του γεωυλικού από την άλλη στη «δεύτερη» σήραγγα εντείνει το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.
- iii. Αύξηση της εγκάρσιας απόστασης μεταξύ των παρειών των σήραγγων έχει ως αποτέλεσμα την άμβλυση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, καθώς η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας παραλαμβάνει ολοένα και μικρότερα φορτία.
- iv. Τα αποτελέσματα των αξονικών δυνάμεων ακολουθούν όμοια κατανομή με αυτή των φορτίων.

Συνοψίζοντας, η αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης επιφέρει σημαντική αύξηση στα φορτία και τις αξονικές δυνάμεις της υφιστάμενης σήραγγας, ενώ μείωση στα αντίστοιχα μεγέθη της νέας σήραγγας. Κατά συνέπεια λειτουργεί ευμενώς για τον ένα, αλλά δυσμενώς για τον άλλο κλάδο των δίδυμων σήραγγων, εντείνοντας το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.

5.2. Προτάσεις

Λαμβάνοντας υπόψη βιβλιογραφικά δεδομένα και τα αποτελέσματα της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, αλλά συνεκτιμώντας επίσης τη διεθνή εξέλιξη της μελέτης και κατασκευής των σηράγγων, παρατίθενται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση. Συγκεκριμένα, προτείνεται:

- I. Δημιουργία καταστατικού προσομοιώματος για μαλακούς βράχους, το οποίο θα ακολουθεί το γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown και σύγκριση με τα αποτελέσματα που αναφέρονται στο κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb.
- II. Μελέτη της συμπεριφοράς πεταλοειδούς διατομής σηράγγων και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά των κυκλικών διατομών. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των εντατικών μεγεθών, καθώς η μη εφαρμογή κυκλικού σχήματος πρόκειται να επιφέρει ανάπτυξη σημαντικών ροπών.
- III. Διενέργεια αναλύσεων που προσομοιώνουν τμηματική εκσκαφή των σηράγγων σε δύο φάσεις, με παράλληλη σύγκριση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ολομέτωπη εκσκαφή.
- IV. Διερεύνηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης για διαφορετικές γεωμετρίες δίδυμων σηράγγων με έμφαση σε σήραγγες παράλληλες κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση δίδυμων σηράγγων παράλληλων κατά την οριζόντια διεύθυνση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ABAQUS 6.13 Documentation, 2013, SIMULIA, United States of America

Adachi T., Kimura M., Osada H., 1993, Interaction Between Multi-Tunnels Under Construction. Proceedings of the Eleventh Southeast Asian Geotechnical Conference, National University of Singapore and Nanyang Technological University, Singapore, 51-61

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

Cantieni L., Anagnostou G., 2008, The effect of the Stress Path on Squeezing Behavior in Tunneling. Rock Mechanics and Rock Engineering, 42, 289-318, DOI: 10.1007/s00603-008-0018-9

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

Cehade F.H., Shahrour I., 2007, Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure. Tunnelling and Underground Space Technology, 23, 210-214, DOI: 10.1016/j.tust.2007.03.004

Chen S.L., Lee S.C., Gui M.W., 2008, Effects of rock pillar width on the excavation behavior of parallel tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, 24, 148-154, DOI: 10.1016/j.tust.2008.05.006

Chortis F., Kavvadas M., 2015, Numerical Investigation of the Interaction between Twin Tunnels. World Tunnel Congress WTC, Duvrovnik, Croatia

Do N.A., Dias D., Oreste P., Djeran-Maigre I., 2013, 2D numerical investigations of twin tunnel interaction. *Geomechanics and Engineering*, 6, No.3, DOI: 10.12989/gae.2014.6.3.263

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 Mechanics 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

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

Koungelis 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

Kuyt L., 2015, Observed loading behavior during cross passage construction for Brisbane Airport Link Project. MSc Thesis. Colorado School of Mines, Colorado

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

Márcio Muniz de Farias, Álvaro Henrique Moraes Júnior, André Pacheco de Assis, 2004, Displacement control in tunnels excavated by the NATM: 3-D numerical simulations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19, 283-293, DOI: 10.1016/j.tust.2003.11.006

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

Καββαδάς Μ., 2012, Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 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. 6ο 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