



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΒΑΘΙΩΝ
ΔΙΔΥΜΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**

ΝΥΧΤΗ ΦΩΤΕΙΝΗ

Επιβλέπων Καθηγητής: Καββαδάς Μιχαήλ, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	3
2.1	Chaboussi J. & Ranken R.E. (Πηγή: Ng C.W.W., Lee K.M, Tang D.K.W.)	3
2.2	Addenbrooke T.I. & Potts D.M., (from Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W.) ..	4
2.3	Adachi T., Kimura M. & Osada H. (from Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W.)	5
2.4	Koungelis D.K. & Augarde C.E	6
2.5	Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W.	10
2.6	Kim S.H.	14
2.7	Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P.	16
2.8	Do N. A., Dias D, Oreste P., Djeran-Maigre I.	19
2.9	Do N. A., Dias D, Oreste P., Djeran-Maigre I.	21
2.10	Σύνοψη.....	23
3	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	24
3.1	Κώδικας Πεπερασμένων Στοιχείων Abaqus v6.13	25
3.2	Περιγραφή Αριθμητικού Προσομοιώματος	26
3.2.1	Γεωμετρία των Αριθμητικών Προσομοιωμάτων.....	27
3.2.2	Διαμόρφωση και Διακριτοποίηση των Αριθμητικών Προσομοιωμάτων 29	
3.3	Βήματα Αριθμητικών Αναλύσεων	32
3.4	Παράμετροι Αριθμητικών Αναλύσεων	36
3.4.1	Γεωμετρικές και Κατασκευαστικές Παράμετροι.....	36
3.4.2	Γεωτεχνικές Παράμετροι	37
3.4.3	Παράμετροι Άμεσης Υποστήριξης	39
3.5	Βασικές Έννοιες και Παραδοχές των Αριθμητικών Αναλύσεων	41
4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	43
4.1	Διερεύνηση της Σχετικής Απόστασης Μεταξύ των Δύο Μετώπων.....	43
4.1.1	Διάνοιξη της Δεξιάς Σήραγγας Όταν Έχει Διανοιχθεί Πλήρως η Αριστερή 43	
4.1.2	Διάνοιξη της Δεξιάς Σήραγγας Όταν η Αριστερή Βρίσκεται στη Μέση	57
4.1.3	Ταυτόχρονη Διάνοιξη των Δύο Σηράγγων.....	65

4.1.4	Συγκεντρωτικά Διαγράμματα	73
4.2	Διερεύνηση της Δυσκαμψίας των Μέτρων Προσωρινής Υποστήριξης.....	90
4.2.1	Μέτρα Προσωρινής Υποστήριξης των Σηράγγων με Αυξημένη Δυσκαμψία	90
4.2.2	Συγκεντρωτικά Διαγράμματα	102
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	109
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	112

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1: Στρωματογραφία του εδάφους.....	6
Εικόνα 2-2:Οι καθιζήσεις συναρτήσεσι του πλάτους πυλώνα.....	6
Εικόνα 2-3: Πλαστική ζώνη γύρω από τη διανοιγόμενη σήραγγα, για πλάτος πυλώνα 0.5D (αριστερή) και 7D (δεξιά).	7
Εικόνα 2-4:Καθιζήσεις συναρτήσεσι πλάτους πυλώνα για διάφορες δυσκαμψίες.	8
Εικόνα 2-5: Άποψη της διατομής και του καννάβου που δημιουργήθηκε για την ανάλυση.....	11
Εικόνα 2-6: Οι καμπτικές ροπές (kNm) για τις 5 διαφορετικές αναλύσεις (α) της αριστερής σήραγγας και (β) της δεξιάς.....	12
Εικόνα 2-7: Οι μέγιστες καμπτικές ροπές για τις διάφορες αποστάσεις μετώπων....	12
Εικόνα 2-8: Οι αξονικές δυνάμεις (kN) για τις 5 διαφορετικές αναλύσεις (α) της αριστερής και (β) της δεξιάς σήραγγας.....	13
Εικόνα 2-9: Μετακινήσεις στην επένδυση της υφιστάμενης σήραγγας (α) Λόγω της διάνοιξης σήραγγας σε απόσταση $W=2D$, στα αριστερά της υφιστάμενης (β) Λόγω της διάνοιξης σήραγγας σε απόσταση $W=1.4D$, στα δεξιά της υφιστάμενης.	15
Εικόνα 2-10: Καμπτικές ροπές στην επένδυση της υφιστάμενης σήραγγας (α) Λόγω της διάνοιξης σήραγγας σε απόσταση $W=2D$, στα αριστερά της υφιστάμενης (β) Λόγω της διάνοιξης σήραγγας σε απόσταση $W=1.4D$, στα δεξιά της υφιστάμενης.	15
Εικόνα 2-11: Άποψη της διατομής των σηράγγων, των μέτρων υποστήριξης και του κανάβου που δημιουργήθηκε.	17
Εικόνα 2-12:Τάσεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, στις εξεταζόμενες διατομές, πριν (αριστερό διάγραμμα) και μετά την διάνοιξη της νέας σήραγγας (δεξί διάγραμμα).	17
Εικόνα 2-13: Μέγιστη (αριστερό διάγραμμα) και ελάχιστη (δεξί διάγραμμα) τάση για τις διάφορες σχετικές θέσεις που έγινε ανάλυση.	18
Εικόνα 2-14: Μοντέλο 2D για την περίπτωση πλάτους πυλώνα $B=0.25D$	19
Εικόνα 2-15:Επιρροή του πλάτους πυλώνα στους λόγους δυνάμεων και ροπών μεταξύ second και first.....	20
Εικόνα 2-16: Άποψη των εξεταζόμενων σηράγγων (το σχήμα δεν είναι υπό κλίμακα).	21
Εικόνα 2-17: Σύγκριση των εντατικών μεγεθών για τις δύο περιπτώσεις σχετικής απόστασης μετώπων.	21
Εικόνα 2-18: Αξονικές δυνάμεις στη διατομή των σηράγγων, αριστερά η αριστερή σήραγγα και δεξιά η αντίστοιχη.	22

Εικόνα 2-19: Καμπτικές ροπές στη διατομή των σηράγγων, αριστερά η αριστερή σήραγγα και δεξιά η αντίστοιχη	22
Εικόνα 3-1: Προοπτική άποψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$	26
Εικόνα 3-2: Όψη και διαστάσεις του προσομοιώματος για πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$	27
Εικόνα 3-3: Μηκοτομική όψη και διαστάσεις του ίδιου προσομοιώματος.	28
Εικόνα 3-4: Προοπτική τομή του προσομοιώματος και άποψη των μέτρων προσωρινής υποστήριξης,	28
Εικόνα 3-5: Εγκάρσια όψη και διαμόρφωση καννάβου πεπερασμένων στοιχείων. .	30
Εικόνα 3-6: Διαμήκης όψη και διαμόρφωση καννάβου πεπερασμένων στοιχείων. .	30
Εικόνα 3-7: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (οκτακομβικά εξαπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία εδάφους C3D8) της εκσκαφής της σήραγγας.	31
Εικόνα 3-8: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους S4) της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας.	31
Εικόνα 3-9: Τομές στο επίπεδο XY, στα βήματα 81, 121 και 161.	33
Εικόνα 3-10: Τομές στο επίπεδο XY στα βήματα 41, 81 και 121.	35
Εικόνα 3-11: Τομές στο επίπεδο XY στα βήματα 41 και 81.	35
Εικόνα 3-12: Γραφική απεικόνιση της γωνίας θ και στις δύο σήραγγες.	41
Εικόνα 4-1: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.	43
Εικόνα 4-2: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.	45
Εικόνα 4-3: Κατανομή του φορτίου στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.	46
Εικόνα 4-4: Κατανομή του φορτίου στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση	47
Εικόνα 4-5: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα	

ως προς την μέση γεωστατική τάση, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.	48
Εικόνα 4-6: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση....	49
Εικόνα 4-7: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων.....	50
Εικόνα 4-8: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.	51
Εικόνα 4-9: Κατανομή της αξονικής δύναμης στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.	52
Εικόνα 4-10: Κατανομή της αξονικής δύναμης στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.	53
Εικόνα 4-11: Μηκοτομική απεικόνιση των καμπτικών ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας. Έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί η απόλυτη τιμή της μέγιστης καμπτικής ροπής.....	54
Εικόνα 4-12: Μηκοτομική απεικόνιση των καμπτικών ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας.	55
Εικόνα 4-13: Κατανομή των καμπτικών ροπών στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας.	56

Εικόνα 4-14: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.	57
Εικόνα 4-15: Κατανομή του φορτίου στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.	58
Εικόνα 4-16: Κατανομή του φορτίου στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.	58
Εικόνα 4-17: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0,5$ και δεξιά $W/D=2$, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.	59
Εικόνα 4-18: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0,5$ και δεξιά $W/D=2$, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση....	60
Εικόνα 4-19: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων.....	61
Εικόνα 4-20: Κατανομή της αξονικής δύναμης στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.	62
Εικόνα 4-21: Κατανομή της αξονικής δύναμης στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.	62
Εικόνα 4-22: Μηκοτομική απεικόνιση των καμπτικών ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας. Έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί η απόλυτη τιμή της μέγιστης καμπτικής ροπής.....	63
Εικόνα 4-23: Κατανομή των καμπτικών ροπών στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$	

και δεξιά $W/D=2$. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας.	64
Εικόνα 4-24: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.	65
Εικόνα 4-25: Κατανομή του φορτίου στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.	66
Εικόνα 4-26: Κατανομή του φορτίου στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.	66
Εικόνα 4-27: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.	67
Εικόνα 4-28: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση....	68
Εικόνα 4-29: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων.....	69
Εικόνα 4-30: Κατανομή της αξονικής δύναμης στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.	70
Εικόνα 4-31: Κατανομή της αξονικής δύναμης στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.	70
Εικόνα 4-32: Μηκοτομική απεικόνιση των καμπτικών ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας. Έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί η απόλυτη τιμή της μέγιστης καμπτικής ροπής.....	71

Εικόνα 4-33: Κατανομή των καμπτικών ροπών στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0,5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας.	72
Εικόνα 4-34: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο του μέσου όρου των φορτίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.1, για όλα τα πλάτη πυλώνα και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	73
Εικόνα 4-35: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.1, για όλα τα πλάτη πυλώνα και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	74
Εικόνα 4-36: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο του μέσου όρου των φορτίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.2, για όλα τα πλάτη πυλώνα και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	75
Εικόνα 4-37: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.2, για όλα τα πλάτη πυλώνα και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	75
Εικόνα 4-38: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο του μέσου όρου των φορτίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.3, για όλα τα πλάτη πυλώνα και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	77
Εικόνα 4-39: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.3, για όλα τα πλάτη πυλώνα και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	77
Εικόνα 4-40: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο του μέσου όρου των αξονικών δυνάμεων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.1, για όλα τα πλάτη πυλώνα και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	79
Εικόνα 4-41: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των αξονικών δυνάμεων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη	

αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	79
Εικόνα 4-42: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο του μέσου όρου των αξονικών δυνάμεων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.2, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	80
Εικόνα 4-43: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των αξονικών δυνάμεων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.2, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	80
Εικόνα 4-44: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο του μέσου όρου των αξονικών δυνάμεων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.3, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	81
Εικόνα 4-45: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των αξονικών δυνάμεων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.3, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	81
Εικόνα 4-46: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των μέγιστων καμπτικών ροπών σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	83
Εικόνα 4-47: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των καμπτικών ροπών στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	83
Εικόνα 4-48: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των μέγιστων καμπτικών ροπών σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.2, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	84
Εικόνα 4-49: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των καμπτικών ροπών στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την	

ανάλυση της ενότητας 4.1.2, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	84
Εικόνα 4-50: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των μέγιστων καμπτικών ροπών σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.3, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	85
Εικόνα 4-51: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των καμπτικών ροπών στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.3, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".	85
Εικόνα 4-52: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.	90
Εικόνα 4-53: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.	91
Εικόνα 4-54: Κατανομή του φορτίου στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$. Με κουκίδες απεικονίζονται οι τρεις περιπτώσεις για την παρούσα ανάλυση ενώ, με διακεκομμένη της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.	92
Εικόνα 4-55: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.	94
Εικόνα 4-56: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.	94
Εικόνα 4-57: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm	

και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων.....96

Εικόνα 4-58: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.97

Εικόνα 4-59: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$. Με κουκίδες απεικονίζονται οι τρεις περιπτώσεις για την παρούσα ανάλυση ενώ, με διακεκομμένη της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας.98

Εικόνα 4-60: Μηκοτομική απεικόνιση των καμπτικών ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη της μέγιστης καμπτικής ροπής. ...99

Εικόνα 4-61: Μηκοτομική απεικόνιση των καμπτικών ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας.....100

Εικόνα 4-62: Κατανομή των καμπτικών ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην τυπική διατομή των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας.101

Εικόνα 4-63: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο του μέσου όρου των φορτίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.2.1, για όλα τα πλάτη πυλώνα και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".102

Εικόνα 4-64: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της

βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.2.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".102

Εικόνα 4-65: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο του μέσου όρου των αξονικών δυνάμεων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.2.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".103

Εικόνα 4-66: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των αξονικών δυνάμεων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.2.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".103

Εικόνα 4-67: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των μέγιστων καμπτικών ροπών σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.2.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".104

Εικόνα 4-68: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των καμπτικών ροπών στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.2.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".104

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Οι περιοχές και οι αποστάσεις βάσει των οποίων μορφώθηκε ο κάρναβος στις τρεις διαστάσεις.	29
Πίνακας 2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τα φορτία που καλείται να παραλάβει η προσωρινή υποστήριξη, για όλες τις αναλύσεις της παραγράφου 4.1.....	87
Πίνακας 3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην προσωρινή υποστήριξη, για όλες τις αναλύσεις της παραγράφου 4.1.....	88
Πίνακας 4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις καμπτικές ροπές που αναπτύσσονται στην προσωρινή υποστήριξη, για όλες τις αναλύσεις της παραγράφου 4.1.....	89

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, κυρίως για λόγους ασφαλείας, έχει παγιωθεί η κατασκευή δίδυμων σηράγγων αντί αυτών μονού κλάδου. Η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων μια δίδυμης σήραγγας αποτελεί ένα σύνθετο φαινόμενο το οποίο καλείται να αντιμετωπίσει ο μελετητής μηχανικός κατά το στάδιο του σχεδιασμού του έργου. Οι περισσότερες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί εστιάζουν στην αλληλεπίδραση αβαθών σηράγγων με κύρια παράμετρο διερεύνησης την εγκάρσια απόσταση μεταξύ τους (πλάτος πυλώνα), ενώ, τα αποτελέσματα τους αφορούν κυρίως στις μετακινήσεις/καθιζήσεις. Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό να διερευνηθεί σε βάθος και να ποσοτικοποιηθεί το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης βαθιών σηράγγων. Δίνεται έμφαση, εκτός από το πλάτος πυλώνα των δύο σηράγγων, στη σχετική απόσταση μεταξύ των δύο μετώπων εκσκαφής και στη δυσκαμψία των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Πραγματοποιήθηκαν τρισδιάστατες παραμετρικές αναλύσεις με τη βοήθεια του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, ενώ η ποσοτικοποίηση του φαινομένου γίνεται σε όρους φορτίου και εντατικών μεγεθών (αξονικές δυνάμεις και καμπτικές ροπές) επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης. Οι αναλύσεις έδειξαν ότι τη μεγαλύτερη επίπτωση από τη διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας την έχει η προπορεύουσα και κυρίως η πλευρά που γειτνιάζει με τη δεύτερη ενώ, η αλληλεπίδραση τους σχεδόν παύει να υπάρχει όταν το πλάτος πυλώνα είναι 2D. Όταν οι δύο σήραγγες διανοίγονται ταυτόχρονα το φαινόμενο ελαχιστοποιείται στην προπορεύουσα σήραγγα, καθώς κατ' αυτόν τον τρόπο, ισομοιράζεται η επιρροή και στις δύο σήραγγες. Τέλος, οι αναλύσεις υπέδειξαν ότι πιο δύσκαμπτα μέτρα υποστήριξης όχι μόνο δεν αποτελούν παράμετρο μείωσης του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, εν αντιθέσει, το ενισχύουν. Στα φορτία και στις αξονικές δυνάμεις η μεταβολή είναι πολύ μικρή, ωστόσο, στις καμπτικές ροπές η αύξηση είναι πολύ σημαντική.

ABSTRACT

In recent years, mostly due to security reasons, the construction of twin tunnels, rather than single ones, has prevailed. The interaction between them is a very complex phenomenon and it should be taken into consideration during the design of the project. Most of the research in the literature have focused on the influence of the transverse distance between shallow tunnels or on the relative position between them, while their results were settlements. This dissertation was conducted in order to investigate in depth and to quantify the interaction between twin deep tunnels. In addition to the pillar width, special attention was paid to the lagging distance between the two tunnels and to the stiffness of the primary lining. 3D numerical analyses were carried out using the finite element code Abaqus, while the quantification of the phenomenon was in terms of load and internal forces (axial forces and bending moments) induced in the primary lining. The numerical results indicated that, when the following tunnel is excavated, the biggest effect occurs on the preceding tunnel and mostly on its adjacent side, while their interaction can be negligible when the pillar width is about two tunnel diameters. As concerns the simultaneous excavation, the interaction is equally shared between the two tunnels, therefore, the effect on the preceding is minimized. Finally, when the primary lining is stiffer, the results pointed out a slight increase in the loads and axial forces and on the contrary, a large increase in the bending moments induced in the shotcrete.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια μεγάλη αύξηση στο πλήθος και στο μέγεθος υπόγειων κατασκευών για να εξυπηρετήσουν διάφορα έργα υποδομής. Οι λόγοι για τους οποίους συνέβη αυτό αναλύονται παρακάτω. Η απότομη αύξηση του πληθυσμού, σε συνδυασμό με την έλλειψη ανάλογου χωροταξικού σχεδιασμού, οδήγησε πολλές φορές κατά το παρελθόν σε σημαντικότερη υποβάθμιση της ποιότητας ζωής, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές, όπου πολύ συχνά παρατηρείται το φαινόμενο έλλειψης χώρου και περιβαλλοντικών προϋποθέσεων για την ανάπτυξη ζωτικών δραστηριοτήτων. Οι αστικές περιοχές χαρακτηρίζονται γενικά από υψηλό ποσοστό κατακράτησης πολύτιμων εκτάσεων για την εξυπηρέτηση δραστηριοτήτων υποδομής, με αποτέλεσμα την σοβαρή επιβάρυνση του περιβάλλοντος με κάθε μορφής ρύπο αλλά και την αδυναμία εξεύρεσης διαθέσιμων επιφανειακών χώρων για τη δημιουργία πνευμόνων πρασίνου, χώρων αναψυχής, κ.λπ. Αναζητήθηκαν, λοιπόν, εναλλακτικές λύσεις για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων οι οποίες αρχικά, είχαν θεωρηθεί οικονομικά ασύμφωρες. Οι λύσεις αυτές, αποσκοπούν στη στροφή προς την ανάπτυξη της τρίτης διάστασης, είτε αυτή είναι η οικοδόμηση κτιριακών εγκαταστάσεων αρκετά μεγάλου ύψους είτε η δημιουργία υπόγειων κατασκευών. Μέρος της δεύτερης εναλλακτικής, οι σήραγγες δηλαδή, αποτελεί και αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Τα υπόγεια έργα γενικά αλλά και οι σήραγγες ειδικότερα αποτελούν πλέον μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες έργων Πολιτικού Μηχανικού. Κατά το παρελθόν η χρήση τους περιοριζόταν σε μεταλλευτικές και υδραυλικές δραστηριότητες, ωστόσο, για τους λόγους που αναλύθηκαν, πλέον οι σήραγγες κατασκευάζονται κυρίως για οδική και σιδηροδρομική χρήση (χωρίς όμως να έχουν απωλέσει και την κατά το παρελθόν χρήση τους).

Τα τελευταία χρόνια, οι οδικές σήραγγες κυρίως, αλλά και πολλές σιδηροδρομικές, κατασκευάζονται με δυο κλάδους, έναν για κάθε κατεύθυνση. Στην επιλογή αυτή συντελούν κυρίως λόγοι ασφαλείας και δευτερευόντως κατασκευαστικοί λόγοι (ευκολότερη η κατασκευή δυο διατομών μικρότερων διαστάσεων σε σχέση με μια διατομή μεγαλύτερης διαμέτρου). Σχετικά με τους λόγους ασφαλείας, επιλέγεται η κατασκευή σιδηροδρόμων διπλού κλάδου, έτσι ώστε σε περίπτωση ατυχήματος στον ένα κλάδο να είναι δυνατή η διαφυγή στο δεύτερο μέσω συνδετήριας σήραγγας. Παράλληλα, η επικρατούσα νομοθεσία, υπ' αριθμ. 230 Προεδρικού Διατάγματος, αποτελεί έναν επιπλέον λόγο που επιβάλλει την παγίωση της τακτικής των δίδυμων σιδηροδρόμων.

Η εκκαφή κάθε σήραγγας προκαλεί τη δημιουργία μιας ζώνης διαταραχής στον περιβάλλοντα χώρο. Στην περίπτωση των δίδυμων σηράγγων είναι σημαντική η εκτίμηση του μεγέθους της διαταραχής που προκαλεί στον προπορευόμενο κλάδο η έλευση του δεύτερου αλλά και η εκτίμηση της συμπεριφοράς του δεύτερου κλάδου κατά τη διάνοιξη συγκριτικά με την περίπτωση σήραγγας μονού κλάδου. Ο βαθμός αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων εξαρτάται κυρίως από την εγκάρσια απόσταση μεταξύ τους (πλάτος πυλώνα), από το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα στη διάνοιξη των δυο κλάδων, καθώς και από το σύστημα άμεσης υποστήριξης που εφαρμόζεται. Οι περισσότερες έρευνες που έχουν γίνει κατά καιρούς ασχολήθηκαν κυρίως με τη διερεύνηση της επιρροής πλάτους πυλώνα σε σχέση με τις μετακινήσεις και τις τάσεις. Σύμφωνα με τα παραπάνω, εμφανίζεται επιτακτική η ανάγκη περεταίρω διερεύνησης του φαινομένου γενικά της αλληλεπίδρασης προκειμένου να αποφεύγεται η υπερδιαστασιολόγηση και συνεπώς να μειώνεται το κόστος του έργου χωρίς όμως να μειώνεται η αξιοπιστία της κατασκευής.

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι να συμβάλει στη γνώση σχετικά και με τους τρεις αυτούς παράγοντες που επηρεάζουν την αλληλεπίδραση των δίδυμων σηράγγων. Για το σκοπό αυτό, με τη βοήθεια λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων εκτελούνται παραμετρικές αναλύσεις, για ένα εύρος γεωτεχνικών συνθηκών και για μεταβαλλόμενα πλάτη πυλώνα, για διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των δύο μετώπων και διαφορετικές δυσκαμψίες των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών επιτρέπουν τη μελέτη της συμπεριφοράς των δυο κλάδων, καθώς και της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η εξέλιξη των φορτίων που καλείται να παραλάβει το κελυφών της άμεσης υποστήριξης καθώς και τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται σε αυτό (αξονικές δυνάμεις και καμπτικές ροπές).

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Προκειμένου να αποτυπωθεί η μέχρι τώρα επικρατούσα αντίληψη σχετικά με την απαιτούμενη απόσταση μεταξύ των παράλληλων κλάδων μιας δίδυμης σήραγγας (πλάτος πυλώνα –pillar width) και την βέλτιστη σχετική απόσταση των μετώπων εκσκαφής (lagging distance) ανατρέξαμε στη διεθνή βιβλιογραφία. Αναζητήθηκαν έρευνες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν και εξετάζουν τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν μεταξύ τους οι δυο κλάδοι μιας δίδυμης σήραγγας, κατά τη διάνοιξή τους. Προτιμήθηκαν έρευνες που σαν αποτελέσματα αναζητήθηκαν τα εντατικά μεγέθη της προσωρινής υποστήριξης, ωστόσο λόγω έλλειψης πληθώρας τέτοια μελετών, χρησιμοποιήθηκαν και έρευνες, τα αποτελέσματα των οποίων είναι οι συγκλίσεις και οι επιφανειακές καθιζήσεις. Συγκεντρώνοντας τα στοιχεία, παρατίθενται στο παρόν κεφάλαιο περιληπτικά και κατά χρονολογική σειρά οι έρευνες αυτές οι οποίες περιλαμβάνουν πειραματικές αλλά και αριθμητικές προσεγγίσεις.

2.1 Chaboussi J. & Ranken R.E. (Πηγή: Ng C.W.W., Lee K.M, Tang D.K.W.)

Κατά την έρευνά τους οι [Chaboussi J. & Ranken R.E. \(1977\)](#), επιχειρούν να διερευνήσουν την επίδραση της μεταβολής της απόστασης μεταξύ παράλληλων σηράγγων στην εξέλιξη των μετακινήσεων κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιούν δισδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας γραμμικά ελαστικά μοντέλα.

Διαπιστώνουν ότι καθώς το πλάτος του πυλώνα μειώνεται παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση στις κατακόρυφες τάσεις που αναπτύσσονται στον πυλώνα και μια αντίστοιχη αύξηση στις οριζόντιες τάσεις. Συνεπώς η διεκτροπική τάση πρακτικά δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή της απόστασης μεταξύ των σηράγγων.

Παράλληλα, προκύπτει ότι για απόσταση σηράγγων ίση ή μεγαλύτερη των δυο διαμέτρων οι μετακινήσεις που σημειώνονται σε κάθε μια εκ των δίδυμων σηράγγων είναι πανομοιότυπες με τις μετακινήσεις που θα μπορούσαν να παρατηρηθούν σε μια σήραγγα μονού κλάδου. Συνεπώς για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο των δυο διαμέτρων, οι δυο κλάδοι δεν αλληλεπιδρούν.

2.2 Addenbrooke T.I. & Potts D.M., (from Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W.)

Κατά την έρευνα των [Addenbrooke T.I. & Potts D.M. \(1996\)](#), πραγματοποιείται μια σειρά δισδιάστατων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων υιοθετώντας το μοντέλο της μη γραμμικώς ελαστικής συμπεριφοράς της αργίλου του Λονδίνου. Σκοπός των αναλύσεων είναι να διερευνηθεί η συμπεριφορά μιας δίδυμης σήραγγας κυκλικής διατομής, κατά τη διάνοιξή της.

Για σήραγγες παράλληλες κατά την οριζόντια διεύθυνση, διαπιστώνουν ότι το προφίλ των καθιζήσεων πάνω από τη δεύτερη σήραγγα είναι παρόμοιας μορφής με αυτό που θα αναπτυσσόταν στο γεωστατικό πεδίο (κατάσταση πριν από τη διάνοιξη και της πρώτης σήραγγας). Παράλληλα, η κορυφή της καμπύλης των καθιζήσεων είναι μετατοπισμένη προς τον άξονα της πρώτης – υπάρχουσας - σήραγγας. Συνεπώς είναι προφανές ότι δεν ισχύει η αρχή της επαλληλίας για το προφίλ των εδαφικών καθιζήσεων.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτει επίσης ότι για πλάτος πυλώνα μικρότερου της μιας διαμέτρου η εκκεντρότητα της καμπύλης των καθιζήσεων (απόσταση της κορυφής της καμπύλης των καθιζήσεων από τον άξονα συμμετρίας των δίδυμων σηράγγων) είναι ίση με το διπλάσιο του πλάτους του πυλώνα. Για αύξηση του πλάτους του πυλώνα και για τιμές μεγαλύτερες από πολλές διαμέτρους ($W \gg D$), παρατηρείται ότι η εκκεντρότητα μειώνεται κάτω από το 25% του πλάτους του πυλώνα.

Παράλληλα, οι Addenbrooke και Potts αναφέρουν ότι κατά τη διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας το σχήμα της επένδυσης της υπάρχουσας τείνει να μεταβληθεί. Συγκεκριμένα, σημειώνεται αύξηση του μήκους της οριζόντιας διαμέτρου και μείωση της κατακόρυφης διαμέτρου.

Οι μέθοδοι υπολογισμού των φορτίων στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας διακρίνονται σε εμπειρικές μεθόδους, αναλυτικές μεθόδους φορτίζοντος στερεού, αναλυτικές μεθόδους αλληλεπίδρασης γεωϋλικού - υποστήριξης και αριθμητικές μεθόδους.

2.3 Adachi T., Kimura M. & Osada H. (from Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W.)

Η έρευνα των [Adachi T., Kimura M. & Osada H. \(1993\)](#) περιλαμβάνει μια σειρά εργαστηριακών πειραμάτων μικρής κλίμακας, προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά των αβαθών σηράγγων που διανοίγονται σε αμμώδη εδάφη. Αναφέρουν ότι ο λόγος του ύψους των υπερκείμενων γαιών προς την απόσταση μεταξύ των σηράγγων (H/W , όπου H το βάθος της σήραγγας το οποίο μετρείται από την επιφάνεια του εδάφους έως την οροφή της σήραγγας και W η απόσταση μεταξύ των δυο σηράγγων), αποτελεί μια χρήσιμη παράμετρος προκειμένου να εκτιμηθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ των πολλαπλών παράλληλων σηράγγων. Διαπιστώνεται πως εάν το ύψος των υπερκείμενων γαιών παραμένει σταθερό, ο βαθμός αλληλεπίδρασης μεταξύ των σηράγγων αυξάνει με μείωση του πλάτους του πυλώνα. Αντίθετα, αν το πλάτος διατηρείται σταθερό, η αλληλεπίδραση μεταξύ των παράλληλων σηράγγων εντείνεται με την αύξηση του πάχους των υπερκείμενων γαιών.

2.4 Koungelis D.K. & Augarde C.E

Σκοπός της έρευνάς των [Koungelis & Augarde \(2004\)](#)

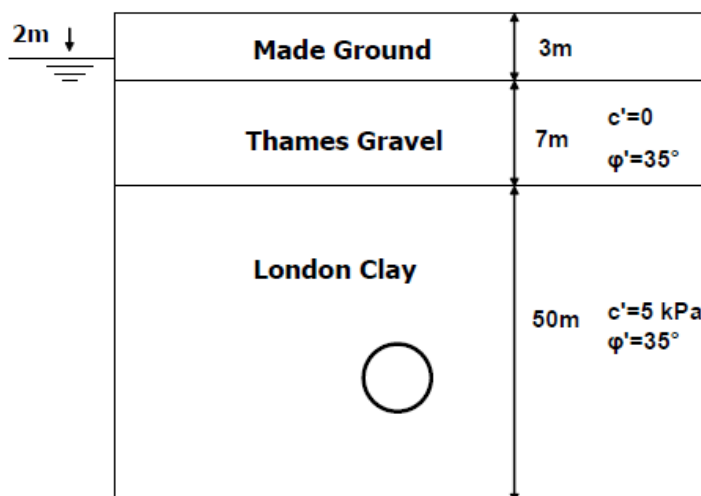
είναι η βελτίωση της πρόβλεψης σχετικά με την ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση μεταξύ πολλαπλών, αβαθών σηράγγων που διανοίγονται σε μαλακά εδάφη, ώστε να διασφαλίζεται η ευστάθεια κατά το στάδιο της διάνοιξης αλλά και της

λειτουργίας της κατασκευής. Για τη διερεύνηση του προβλήματος πραγματοποιούνται δισδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος Plaxis. Αναλυτικότερα, εκτελούνται παραμετρικές αναλύσεις κατά τη διάρκεια των οποίων η στρωματογραφία και η διάμετρος D των σηράγγων ($D=4.174\text{m}$) διατηρούνται σταθερές. Επίσης, σε όλες τις περιπτώσεις, πρώτα ολοκληρώνεται η διάνοιξη της πρώτης σήραγγας και στη συνέχεια ακολουθεί η διάνοιξη της δεύτερης. Εξετάστηκαν λοιπόν, τρεις ομάδες αριθμητικών αναλύσεων, όπου σε κάθε περίπτωση μεταβάλλεται η γεωμετρία του μοντέλου. Παρακάτω περιγράφονται οι τρεις διαφορετικές γεωμετρίες και παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε κάθε περίπτωση.

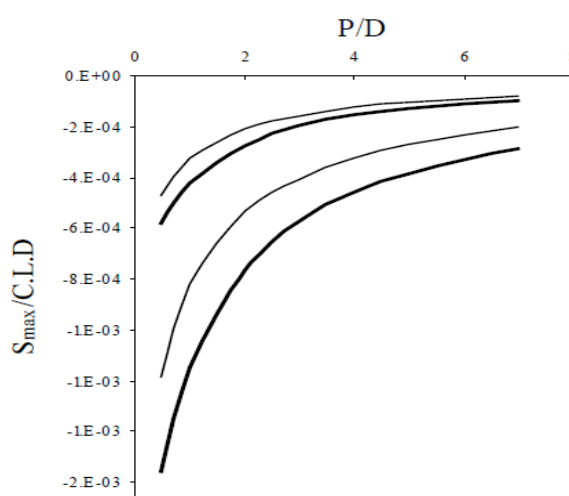
➤ Παράλληλοι άξονες της σήραγγας κατά την οριζόντια διεύθυνση

Στην περίπτωση αυτή οι αναλύσεις πραγματοποιούνται για δυο διαφορετικά πάχη υπερκείμενων γαιών H ($H=14\text{m}$ και $H=34\text{m}$), ενώ το πλάτος W του πυλώνα μεταξύ των δυο σηράγγων κυμαίνεται από $0.5D$ έως $7D$ ($W=0.5D \div 7D$).

Στη μελέτη αυτή εξετάζονται οι καθιζήσεις που οφείλονται μόνο στη διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας, καθώς οι καθιζήσεις που



Εικόνα 2-1: Στρωματογραφία του εδάφους.

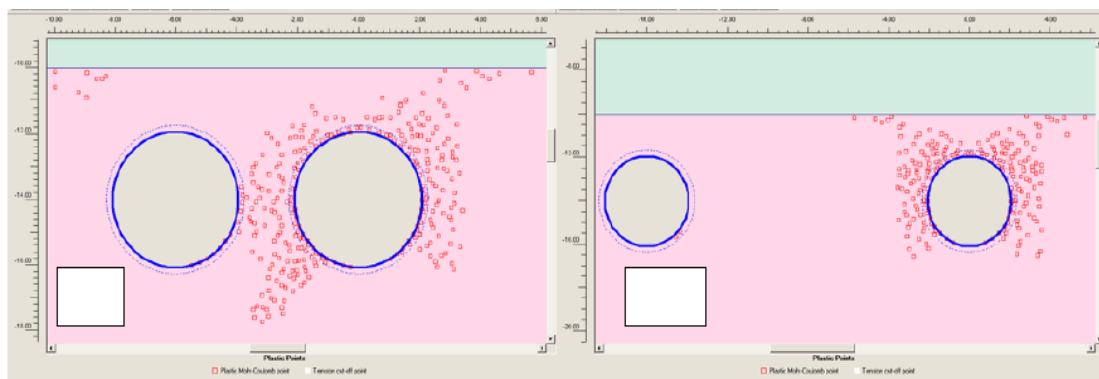


Εικόνα 2-2: Οι καθιζήσεις συναρτήσει του πλάτους πυλώνα.

δημιουργούνται από τη διάνοιξη της πρώτης λαμβάνονται ως μηδενικό σημείο αναφοράς.

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι επιφανειακές καθιζήσεις (S_{max}) κανονικοποιημένες προς την απόσταση των αξόνων των δυο σηράγγων (C.L.D.: centre-line to centre-line distance) σε συνάρτηση με το πλάτος του πυλώνα κανονικοποιημένο προς τη διάμετρο της σήραγγας, για δυο διαφορετικά πάχη υπερκείμενων γαιών ($H=14m$ και $H=34m$) καθώς και για δυο διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας εδάφους ($E=1000$ kPa/m και $E=6000$ kPa/m). Παρατηρείται ότι και για τα δυο διαφορετικά ύψη υπερκείμενων γαιών οι καμπύλες είναι παρόμοιας μορφής. Καθώς το πλάτος του πυλώνα αυξάνει, οι καθιζήσεις που σημειώνονται τείνουν να ταυτιστούν και για τις δυο διαφορετικές δυσκαμψίες εδάφους. Επιπρόσθετα, η κλίση κάθε καμπύλης μειώνεται αισθητά για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο από 3 έως 4 διαμέτρους. Το γεγονός αυτό πιθανότατα υποδεικνύει μειωμένη αλληλεπίδραση των δυο σηράγγων για αυτά τα πλάτη του πυλώνα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται για τις δυο ακραίες τιμές του πλάτους του πυλώνα ($P=0.5D$ και $P=7D$) η πλαστική ζώνη που δημιουργείται γύρω από τη δεύτερη σήραγγα.



Εικόνα 2-3: Πλαστική ζώνη γύρω από τη διανοιγόμενη σήραγγα, για πλάτος πυλώνα $0.5D$ (αριστερή) και $7D$ (δεξιά).

Είναι φανερό πως όσο η απόσταση μεταξύ των σηράγγων αυξάνει, η πλαστική ζώνη παύει να επικαλύπτει την πρώτη σήραγγα, συνεπώς δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο κατασκευών.

➤ Παράλληλοι άξονες της σήραγγας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση

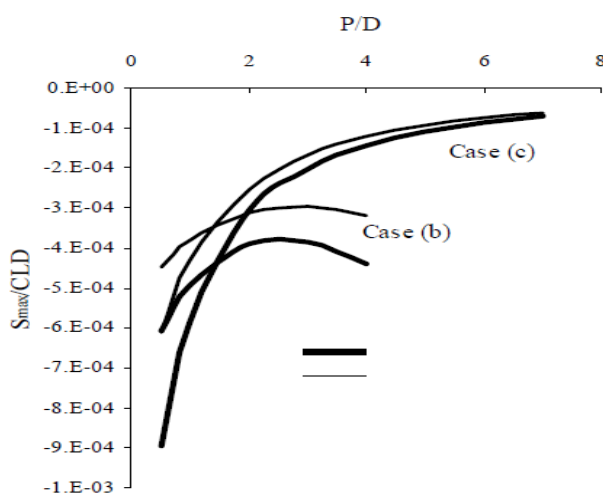
- Η δεύτερη σήραγγα διανοίγεται πάνω από την ήδη υπάρχουσα

Η πρώτη σήραγγα διανοίγεται σε βάθος 14m ενώ το βάθος της δεύτερης είναι μεταβλητό. Η κάθετη απόσταση L μεταξύ των αξόνων των σηράγγων κυμαίνεται από $0.5D$ έως $4D$ ($L=0.5D \div 4D$).

- Η δεύτερη σήραγγα διανοίγεται κάτω από την ήδη υπάρχουσα

Η πρώτη σήραγγα διανοίγεται σε βάθος 14m ενώ το βάθος της δεύτερης είναι μεταβλητό. Η κάθετη απόσταση L μεταξύ των αξόνων των σηράγγων κυμαίνεται από $0.5D$ έως $7D$ ($L=0.5D \div 7D$).

Το διπλανό διάγραμμα είναι ανάλογο του διαγράμματος της πρώτης γεωμετρίας και παρουσιάζει ενδεικτικά αποτελέσματα για τις περιπτώσεις όπου οι άξονες της σήραγγας είναι παράλληλοι κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.



Εικόνα 2-4: Καθιζήσεις συναρτήσεσι πλάτους πυλώνα για διάφορες δυσκαμψίες.

Και στις περιπτώσεις αυτές, όσο σκληρότερο είναι το εδαφικό υλικό, τόσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος των καθιζήσεων. Όταν η δεύτερη εκσκάπτεται κάτω από την πρώτη παρατηρείται ότι οι καθιζήσεις τείνουν να μειωθούν με την αύξηση του πλάτους του πυλώνα, αναλογικά με την περίπτωση της παράλληλης διάταξης. Ένα άλλο χαρακτηριστικό που αξίζει να επισημανθεί είναι ότι για μικρό πλάτος πυλώνα οι καθιζήσεις για την περίπτωση που η δεύτερη εκσκάπτεται κάτω από την ήδη υπάρχουσα είναι αρκετά μεγάλες σε σχέση με την περίπτωση που εκσκάπτεται από πάνω. Καθώς, όμως, το πλάτος του πυλώνα αυξάνει οι καθιζήσεις για την περίπτωση 'από πάνω σήραγγα' είναι εντονότερες σε σχέση με αυτές για την περίπτωση 'από κάτω σήραγγα'.

Ανακεφαλαιώνοντας, από την έρευνα αυτή προκύπτει ότι:

- Δυο σήραγγες που εκσκάπτονται διαδοχικά μέσα στο χώρο και οι άξονες τους είναι παράλληλοι κατά την οριζόντια διεύθυνση παύουν να αλληλεπιδρούν για μεταξύ τους απόσταση μεγαλύτερη από τρείς η τέσσερεις διαμέτρους.

- Δυο σήραγγες που εκσκάπτονται διαδοχικά μέσα στο χώρο, οι άξονες τους είναι παράλληλοι κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και η δεύτερη σήραγγα εκσκάπτεται πάνω από την ήδη υπάρχουσα, παρουσιάζουν μικρή αλληλεπίδραση όταν η απόσταση των αξόνων είναι ίση με μια διάμετρο. Για απόσταση μεγαλύτερη των τριών διαμέτρων η αλληλεπίδραση φαίνεται να είναι αμελητέα.

- Δυο σήραγγες που εκσκάπτονται διαδοχικά μέσα στο χώρο, οι άξονες τους είναι παράλληλοι κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και η δεύτερη σήραγγα εκσκάπτεται κάτω από την ήδη υπάρχουσα, συνεχίζουν να αλληλεπιδρούν ακόμα και όταν η απόσταση των αξόνων είναι αρκετά μεγάλη

2.5 Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W.

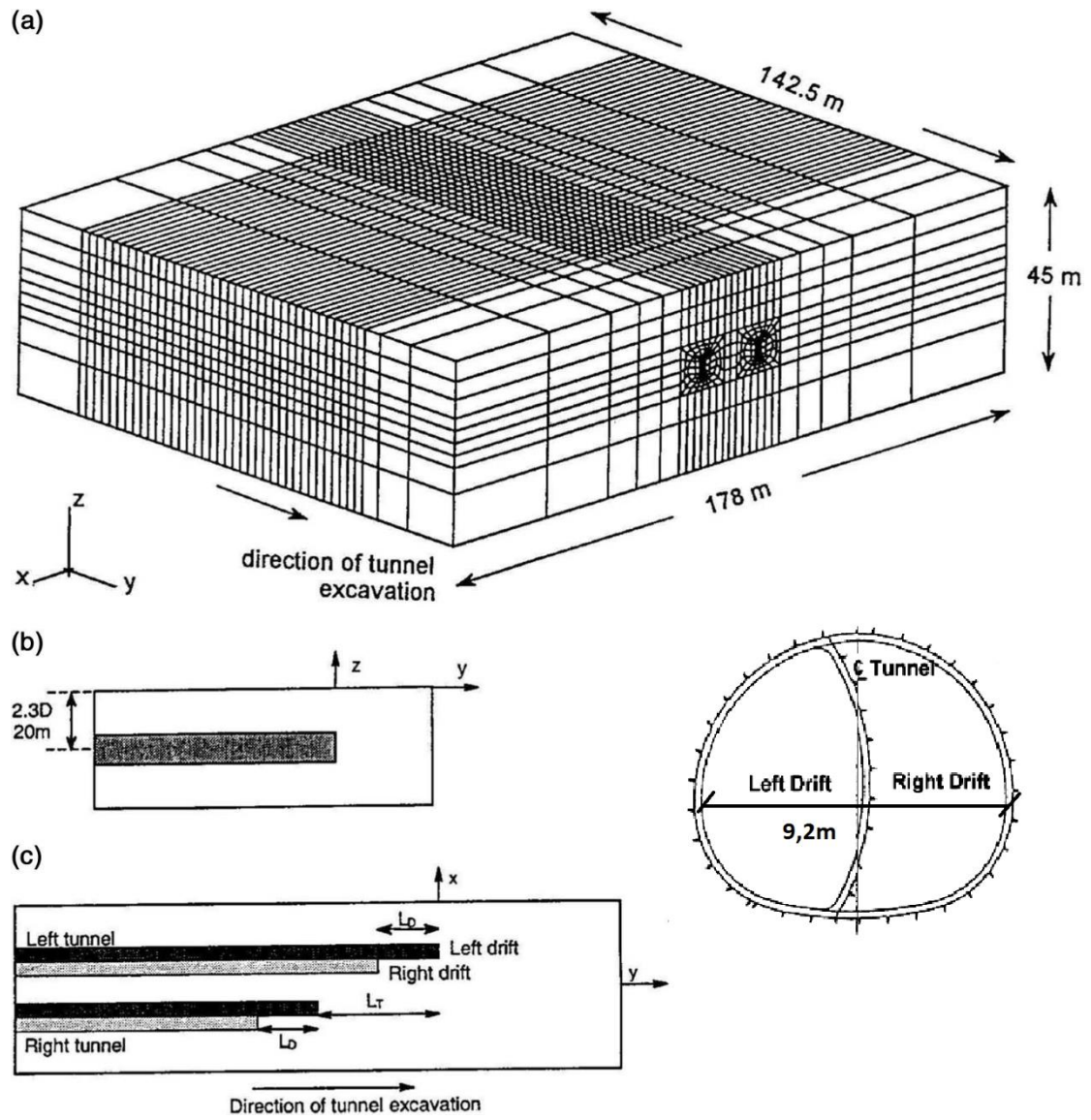
Οι [Ng et al. \(2004\)](#) πραγματοποίησαν μια σειρά τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων σε δίδυμες σήραγγες με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Οι σήραγγες εκσκάπτονται με τη χρήση της Νέας Αυστριακής Μεθόδου (NATM). Στόχος τους ήταν η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των δύο σηράγγων μεταβάλλοντας την απόσταση μεταξύ των δύο μετώπων. Έγιναν 5 διαφορετικές στις οποίες εκσκάπτεται πρώτα η αριστερή σήραγγα κι έπειτα η δεξιά σε απόσταση: $L_T = 0D, 0.6D, 1.2D, 2.3D$ και $3.5D$. Η προσομοίωση που έκαναν στηρίχθηκε στην πρώτη αστική σήραγγα που κατασκευάστηκε στην Βρετανία με NATM, η Heathrow train tunnel.

Παρατήρησαν ότι αναπτύσσονται μεγαλύτερα εντατικά μεγέθη στην αριστερή σήραγγα και μικρότερα στην δεξιά καθώς και ότι όσο μεγαλύτερη απόσταση έχουν τα δύο μέτωπα τόσο μεγαλύτερα είναι αυτά τα εντατικά μεγέθη στην αριστερή, με κρισιμότερες περιοχές το invert και την εσωτερική παρειά της σήραγγας. Συγκεκριμένα, για $L_T = 3.5D = 30m$, παρατήρησαν ότι οι καμπτικές ροπές για τις δύο σήραγγες έχουν παρόμοια μορφή με μεγαλύτερες αυτές στην αριστερή σε σχέση με την δεξιά ενώ, οι μέγιστες και ελάχιστες εμφανίζονται στην αριστερή 'γωνία' και στο invert της σήραγγας αντίστοιχα. Γεγονός που αποδίδεται στο ότι η αριστερή σήραγγα καλείται να παραλάβει μεγαλύτερο φορτίο από ότι η δεξιά λόγω μεγάλης απόστασης των δύο μετώπων. Όταν οι δύο σήραγγες εκσκάπτονται ταυτόχρονα οι μέγιστες καμπτικές ροπές είναι ίδιες και για τις δύο κάτι που υποδεικνύει ότι κάθε μία αναλαμβάνει ίσο φορτίο. Όσο η απόσταση μεγαλώνει (δηλαδή όσο καθυστερεί η εκσκαφή της δεύτερης) τόσο μεγαλύτερο μερίδιο από το φορτίο καλείται να αναλάβει η αριστερή σήραγγα και τόσο μικρότερο κατ' αντιστοιχία η δεξιά.

Όσον αφορά στις δυνάμεις, παρατηρήθηκε ότι οι μεγαλύτερες εμφανίζονται στην εσωτερική παρειά κι όχι στο invert, και όπως αναμενόταν, όσο αυξάνεται η απόσταση των μετώπων αυξάνονται και οι αξονικές δυνάμεις στην αριστερή σήραγγα ενώ μειώνονται στην δεξιά, κάτι που αποδίδεται στην μεταφορά φορτίου από τη δεύτερη στην πρώτη.

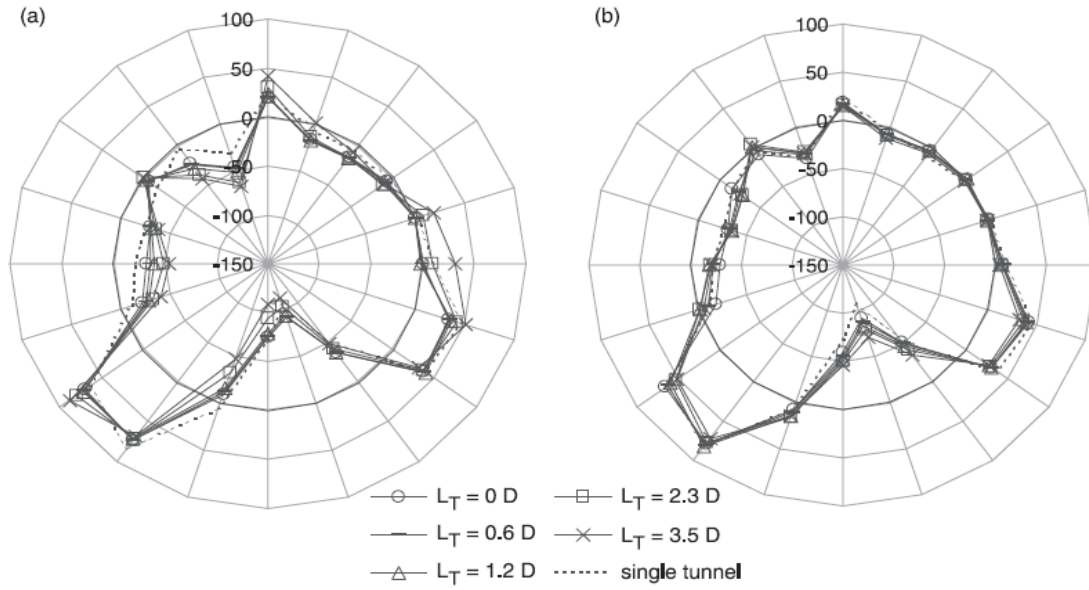
Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο που χρησιμοποίησαν και τα αποτελέσματα των αναλύσεων τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

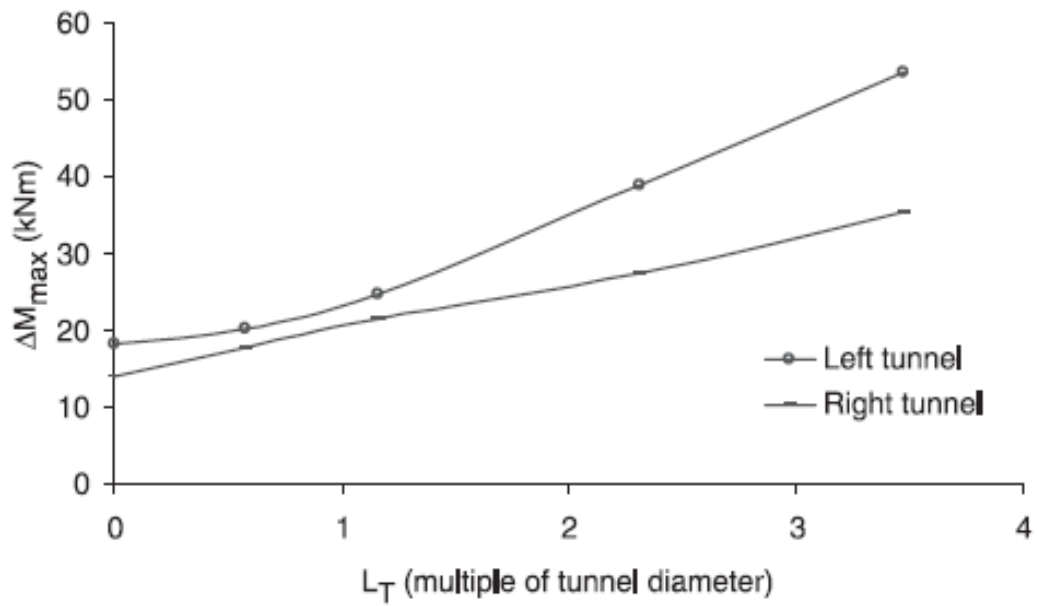


Εικόνα 2-5: Άποψη της διατομής και του καννάβου που δημιουργήθηκε για την ανάλυση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

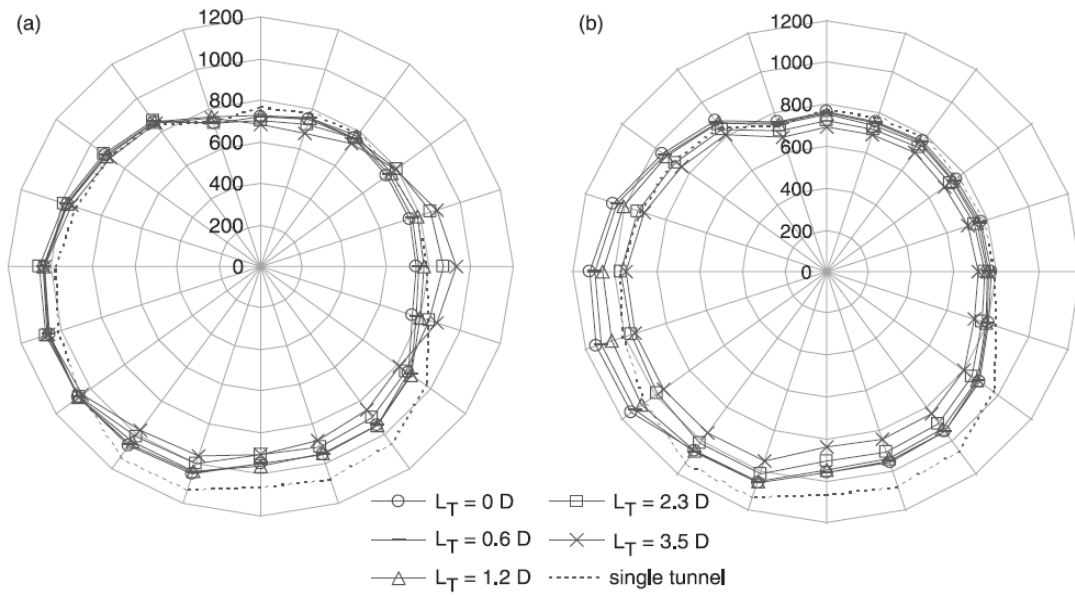


Εικόνα 2-6: Οι καμπτικές ροπές (kNm) για τις 5 διαφορετικές αναλύσεις (a) της αριστερής σήραγγας και (b) της δεξιάς.



Εικόνα 2-7: Οι μέγιστες καμπτικές ροπές για τις διάφορες αποστάσεις μετώπων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ



Εικόνα 2-8: Οι αξονικές δυνάμεις (kN) για τις 5 διαφορετικές αναλύσεις (α) της αριστερής και (β) της δεξιάς σήραγγας.

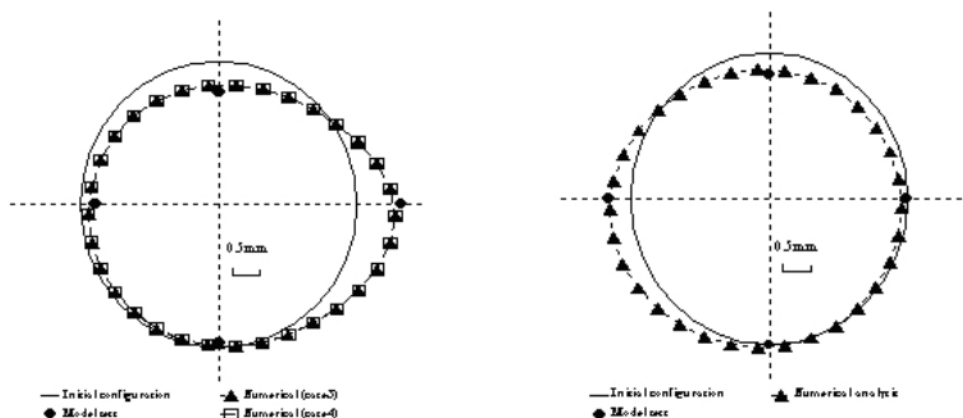
2.6 Kim S.H.

Σκοπός της έρευνάς του [Kim S.H. \(2004\)](#) είναι να μελετηθούν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στην επένδυση μιας υπάρχουσας σήραγγας μονού κλάδου εξαιτίας της διάνοιξης μια νέας, γειτονικής. Για το σκοπό αυτό κατασκευάζεται μια πειραματική διάταξη και πραγματοποιούνται εργαστηριακές δοκιμές μικρής κλίμακας ώστε να προσδιοριστεί το βέλτιστο πλάτος του πυλώνα για το οποίο οι δυο κατασκευές δεν αλληλεπιδρούν. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται δισδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτών με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές. Με τον τρόπο αυτό διερευνάται εάν οι παράμετροι που υιοθετούνται για τις αριθμητικές αναλύσεις παράγουν αξιόπιστα αποτελέσματα.

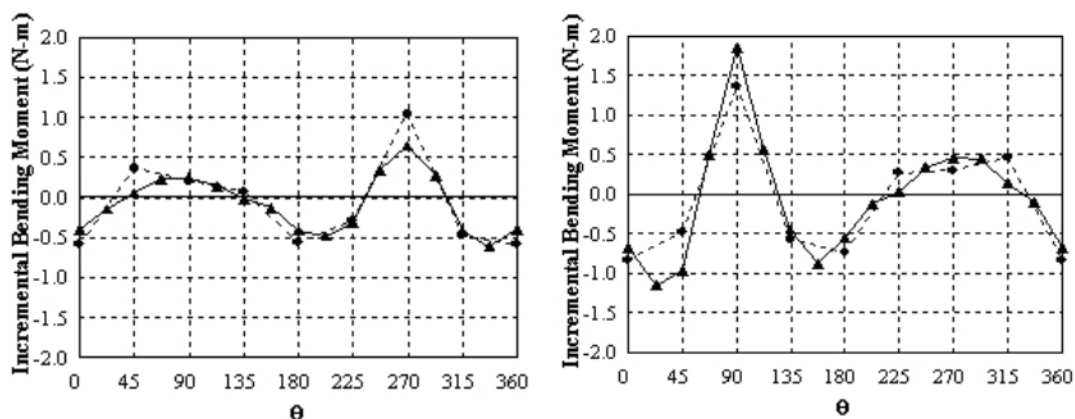
Σε κατάλληλη συσκευή εγκιβωτίζεται αργλικό υλικό και διανοίγεται η πρώτη σήραγγα διαμέτρου 70mm. Στη συνέχεια διανοίγεται η δεύτερη σήραγγα σε μεγάλη απόσταση, ίση με 2D, και η τρίτη σε μικρή απόσταση ίση με 1.4D. Με τη χρήση κατάλληλου εξοπλισμού μετριοούνται οι ροπές κάμψης που αναπτύσσονται στη πρώτη σήραγγα εξαιτίας της διάνοιξης της δεύτερης και της τρίτης καθώς και οι ολικές τάσεις και οι πιέσεις πόρων.

Η αλληλεπίδραση των δυο σηράγγων αποτελεί σύνθετο μηχανισμό, συνεπώς η προσομοίωση του φαινομένου με πειραματικές διατάξεις δεν είναι απόλυτα ρεαλιστική. Για το λόγο αυτό εκτελούνται αριθμητικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας τις διαστάσεις του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν και παραπάνω. Πραγματοποιούνται αναλύσεις για δυο διαφορετικά πλάτη πυλώνα. Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα των μετακινήσεων της επένδυσης της υφιστάμενης σήραγγας εξαιτίας της διάνοιξης της γειτονικής σήραγγας αφενός σε απόσταση ίση με δυο διαμέτρους ($W=2D$) και αφετέρου σε απόσταση ίση με 1.4D ($W=1.4D$), τόσο για τις εργαστηριακές δοκιμές όσο και για τις αριθμητικές αναλύσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ



Εικόνα 2-9: Μετακινήσεις στην επένδυση της υφιστάμενης σήραγγας (α) Λόγω της διάνοιξης σήραγγας σε απόσταση $W=2D$, στα αριστερά της υφιστάμενης (β) Λόγω της διάνοιξης σήραγγας σε απόσταση $W=1.4D$, στα δεξιά της υφιστάμενης.



Εικόνα 2-10: Καμπτικές ροπές στην επένδυση της υφιστάμενης σήραγγας (α) Λόγω της διάνοιξης σήραγγας σε απόσταση $W=2D$, στα αριστερά της υφιστάμενης (β) Λόγω της διάνοιξης σήραγγας σε απόσταση $W=1.4D$, στα δεξιά της υφιστάμενης.

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις εργαστηριακές δοκιμές βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Σε κάθε περίπτωση, η στέψη της σήραγγας μετατοπίζεται προς τα κάτω ενώ αντίθετα ο πυθμένας δε μετατοπίζεται σχεδόν καθόλου. Παράλληλα, ενώ το προφίλ των μετακινήσεων και για τις δυο περιπτώσεις είναι σχεδόν ίδιο, οι τιμές αυτών είναι μεγαλύτερες για την περίπτωση που η δεύτερη σήραγγα διανοίγεται σε μικρή απόσταση ($W=1.4D$).

Συνοψίζοντας, ύστερα από την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών και των δισδιάστατων αναλύσεων διαπιστώθηκε ότι η διάνοιξη μιας σήραγγας σε πολύ μικρή απόσταση από μια ήδη υπάρχουσα μπορεί να προκαλέσει σημαντική αύξηση των παραμορφώσεων και των καμπτικών ροπών στην επένδυση της υφιστάμενης. Γενικά, η αλληλεπίδραση δυο σηράγγων φαίνεται να είναι αμελητέα, όταν η απόσταση των αξόνων τους είναι μεγαλύτερη από δύο διαμέτρους.

2.7 Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P.

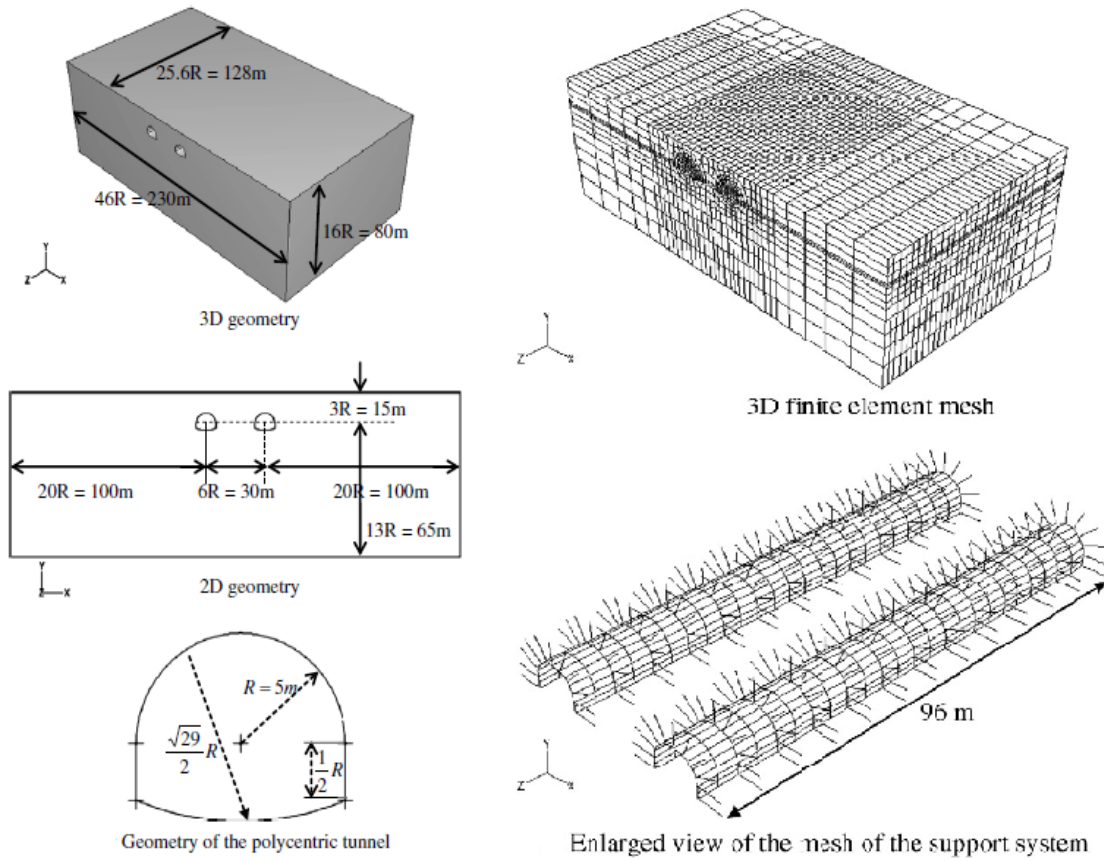
Οι [Liu et al. \(2008\)](#) πραγματοποίησαν μια σειρά τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων σε δίδυμες σήραγγες με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS και το πρόγραμμα TUNNEL3D, το οποίο ανέπτυξαν οι ίδιοι για τη συγκεκριμένη έρευνα. Οι αναλύσεις αφορούν σε υποθετικές σήραγγες οι οποίες εκσκάπτονται στο Σύδνεϋ της Αυστραλίας, περιοχή με την εξής ιδιαιτερότητα: οι οριζόντιες τάσεις είναι πολύ υψηλές. Στόχος τους ήταν η διερεύνηση της επιρροής που έχει η εκσκαφή δεύτερης σήραγγας στα μέτρα υποστήριξης προ υπάρχουσας. Οι σήραγγες υποστηρίζονται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου.

Διαπίστωσαν ότι η μεγαλύτερη επιρροή εμφανίζεται όταν το μέτωπο της διανοιγόμενης σήραγγας διέρχεται από την εξεταζόμενη διατομή και σταθεροποιείται σταδιακά καθώς αυτό απομακρύνεται. Επίσης, διερεύνησαν και την απόσταση πυλώνα και την σχετική θέση μεταξύ των δύο σηράγγων και παρατήρησαν ότι η μικρότερη επιρροή υπάρχει όταν διανοίγεται νέα σήραγγα παράλληλη στην προ υπάρχουσα σε απόσταση 30m και την μεγαλύτερη όταν η νέα είναι διαγώνια τοποθετημένη σε απόσταση 20m (σε όρους μέγιστης εφελκυστικής τάσης) Τέλος, πραγματοποίησαν έρευνα η οποία αφορούσε στην επιρροή των συνοριακών συνθηκών στο μοντέλο με σκοπό να καταλήξουν στο βέλτιστο.

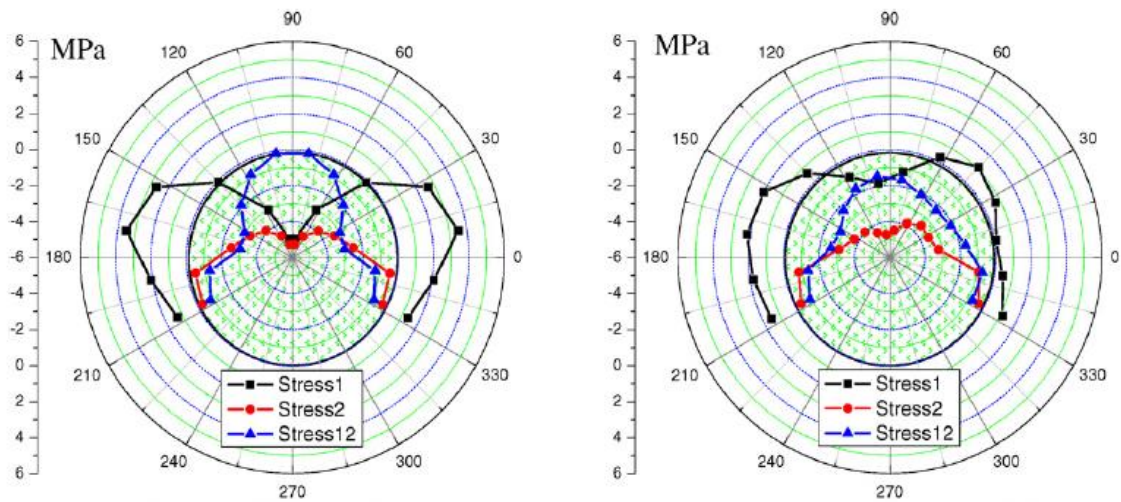
Να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν είναι αντίστροφα από αυτά σε εφελκυστικά καθεστώτα (η έρευνα διεξάχθηκε σε έδαφος υπό έντονο θλιπτικό καθεστώς). Έτσι, παρατηρήθηκε ότι όταν διανοιγόταν η νέα παράλληλη σήραγγα οι εφελκυστικές τάσεις στις παρειές μειώνονταν όπως συνέβαινε και με τις θλιπτικές στην στέψη. Για την ακρίβεια η εξήγηση που δόθηκε είναι ότι λόγω του έντονου εφελκυστικού καθεστώτος που υπάρχει στην περιοχή οι τάσεις γύρω από την σήραγγα αντιστρέφονται και γίνονται, στην στέψη από εφελκυστικές, θλιπτικές και στις παρειές από θλιπτικές, εφελκυστικές. Ωστόσο, παρόλο που το φαινόμενο είναι ακριβώς αντίθετο από τις περισσότερες έρευνες και σε αυτήν την περίπτωση η μεγαλύτερη επιρροή υπάρχει στην εσωτερική παρειά της προ υπάρχουσας σήραγγας.

Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο που χρησιμοποίησαν και τα αποτελέσματα των αναλύσεων τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

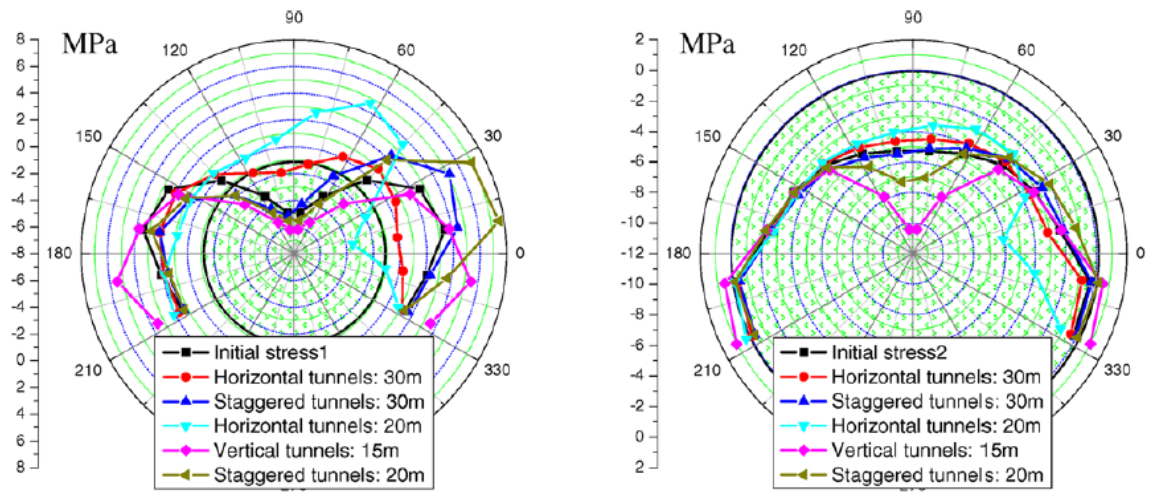


Εικόνα 2-11: Άποψη της διατομής των σηράγγων, των μέτρων υποστήριξης και του κανάβου που δημιουργήθηκε.



Εικόνα 2-12: Τάσεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, στις εξεταζόμενες διατομές, πριν (αριστερό διάγραμμα) και μετά την διάνοιξη της νέας σήραγγας (δεξιό διάγραμμα).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ



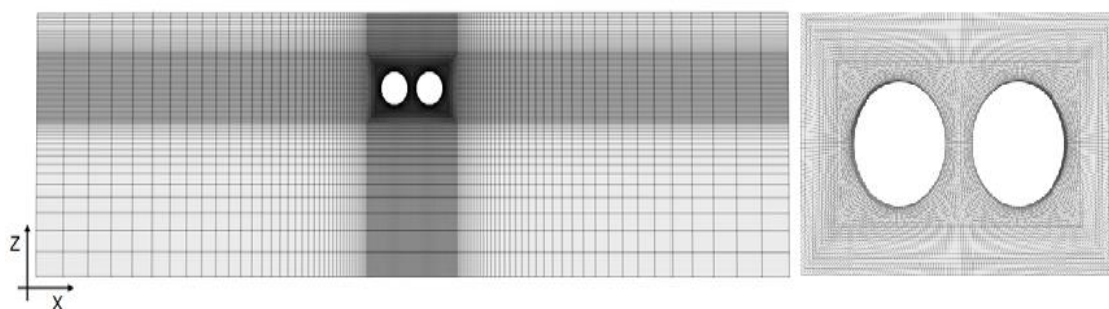
Εικόνα 2-13: Μέγιστη (αριστερό διάγραμμα) και ελάχιστη (δεξί διάγραμμα) τάση για τις διάφορες σχετικές θέσεις που έγινε ανάλυση.

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

Οι [Do et al. \(2014\)](#) πραγματοποίησαν και μια σειρά δισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων σε δίδυμες σήραγγες με τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών $FLAC^{3D}$ με χρήση της μεθόδου σύγκλισης αποτόνωσης. Σκοπός τους ήταν και πάλι η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των δύο σηράγγων μεταβάλλοντας, ωστόσο, την μεταξύ τους απόσταση (πυλώνα) και την σύγκριση μεταξύ των εντατικών μεγεθών συνεχούς υποστήριξης και προκατασκευασμένων δακτυλίων. Επιλέχθηκε βαθμός αποτόνωσης $\lambda_D=0.3$ και έγιναν αναλύσεις για πλάτος πυλώνα $B=0.25D \div 3D$.

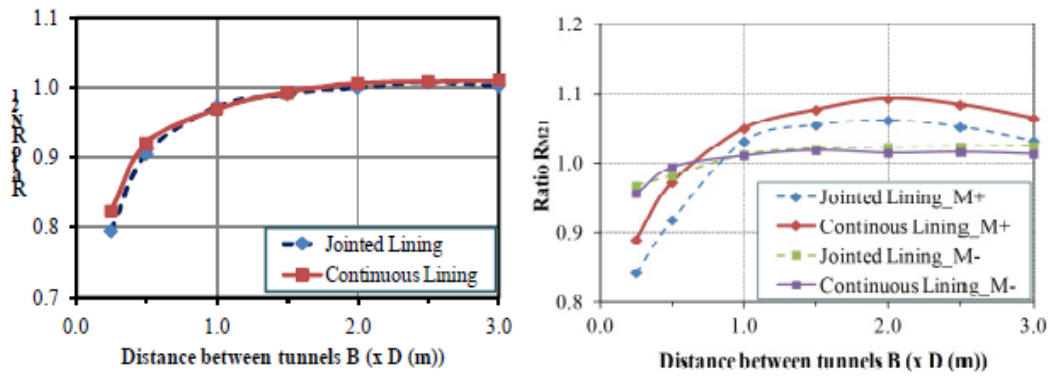
Παρατήρησαν ότι η εκσκαφή της δεύτερης (δεξιάς) σήραγγας έχει μεγαλύτερη επίπτωση στην πρώτη (αριστερή) και κατέληξαν, στο ότι η κρίσιμη απόσταση μεταξύ των σηράγγων, η οποία αντιστοιχεί σε αμελητέα αλληλεπίδραση και για τις δύο μεθόδους υποστήριξης, είναι περίπου $2D$ και τα εντατικά μεγέθη των προκατασκευασμένων δακτυλίων είναι πάντα μικρότερα από αυτά που αναπτύσσονται στη συνεχή υποστήριξη. Συγκεκριμένα, οι αναπτυσσόμενες καμπτικές ροπές στην δεύτερη (second) σήραγγα είναι μεγαλύτερες από αυτές στην πρώτη (first) για πλάτος πυλώνα από $0.75D$ και πάνω, ενώ αντίθετα, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στην δεύτερη (second) σήραγγα είναι πάντα μικρότερες από αυτές που αναπτύσσονται στην πρώτη (first). Αξίζει να σημειωθεί και η παρατήρηση τους όσον αφορά στα αποτελέσματα των καμπτικών ροπών για αναλύσεις με πλάτος πυλώνα μικρότερο του $1D$. Παρατήρησαν, λοιπόν, ότι όσο αυξάνει η μεταξύ τους απόσταση (πάντα μικρότερη αυτή η απόσταση από $1D$) ο λόγος των καμπτικών ροπών της δεύτερης (second) σήραγγας προς αυτές της πρώτης (first), αυξάνει σημαντικά ενώ πέραν του $B=1D$ υπάρχει μια σταθεροποίηση του φαινομένου, καθώς επίσης και ότι ο λόγος αυτός για τις αρνητικές ροπές στις παρειές της σήραγγας δεν εμφανίζει καμία ευαισθησία στις αλλαγές του πλάτους πυλώνα κάτι που αποδίδεται στη θεώρηση συντελεστή $k_o=0.5$.

Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο που χρησιμοποίησαν και τα αποτελέσματα των αναλύσεων τους.



Εικόνα 2-14: Μοντέλο 2D για την περίπτωση πλάτους πυλώνα $B=0.25D$.

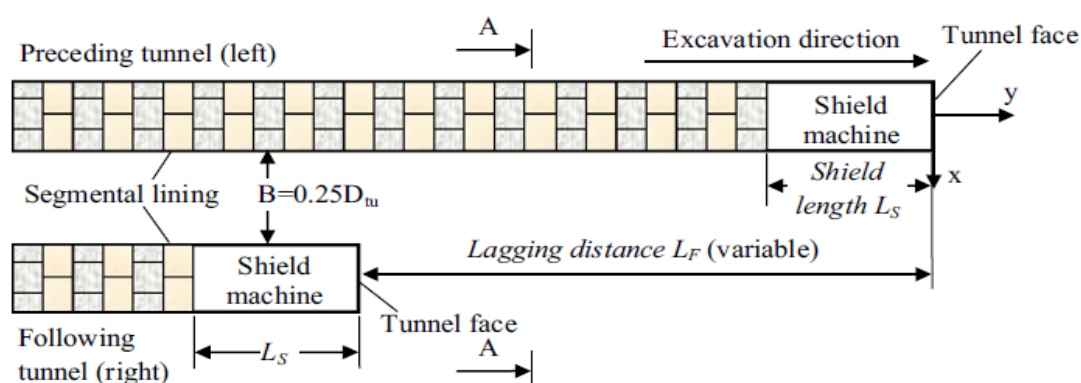
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ



Εικόνα 2-15:Επιρροή του πλάτους πυλώνα στους λόγους δυνάμεων και ροπών μεταξύ *second* και *first*.

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

Οι [Do et al. \(2014\)](#) πραγματοποίησαν μια σειρά τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων σε δίδυμες σήραγγες με τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών $FLAC^{3D}$, οι οποίες εκσκάπτονται με τη χρήση της μηχανοποιημένης μεθόδου. Σκοπός τους ήταν η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των δύο σηράγγων μεταβάλλοντας την σχετική απόσταση των δύο μετώπων και η εξαγωγή των εντατικών μεγεθών του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Παρατήρησαν ότι η εκσκαφή της δεύτερης (δεξιάς) σήραγγας έχει μεγαλύτερη επίπτωση στην πρώτη (αριστερή) και κυρίως στην πλευρά που γειτνιάζει με την δεξιά. Επίσης, διαπίστωσαν ότι η μεγαλύτερη επιρροή εμφανίζεται όταν το TBM διέρχεται από την εξεταζόμενη διατομή και ότι αυτή η επιρροή είναι πλέον αμελητέα όταν η απόσταση των δύο μετώπων γίνει $5.3D$. Η ταυτόχρονη εκσκαφή των δύο σηράγγων οδηγεί σε μικρότερα εντατικά μεγέθη σε σχέση με την εκσκαφή με μεγάλη απόσταση μεταξύ των μετώπων, ωστόσο, με αυτή την μέθοδο ελλοχεύει ο κίνδυνος μεγάλων καθιζήσεων (η έρευνα αφορούσε σε αβαθείς σήραγγες). Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο που χρησιμοποίησαν και τα αποτελέσματα των αναλύσεων τους.

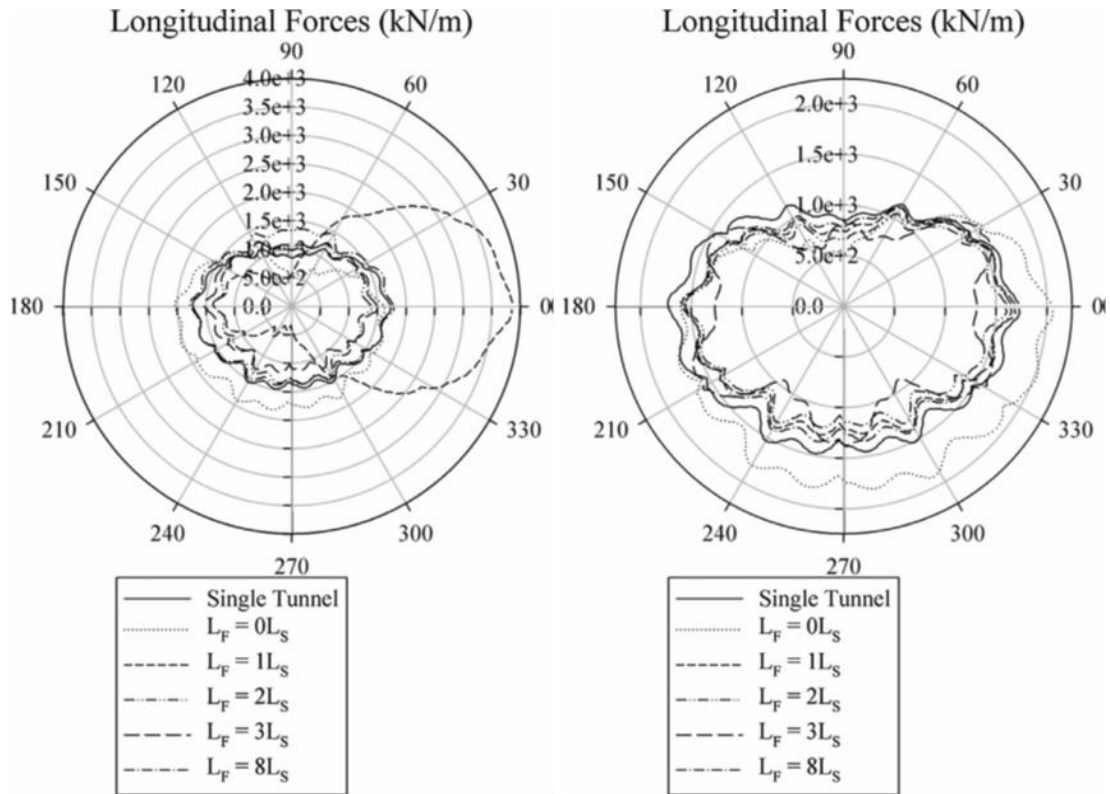


Εικόνα 2-16: Άποψη των εξεταζόμενων σηράγγων (το σχήμα δεν είναι υπό κλίμακα).

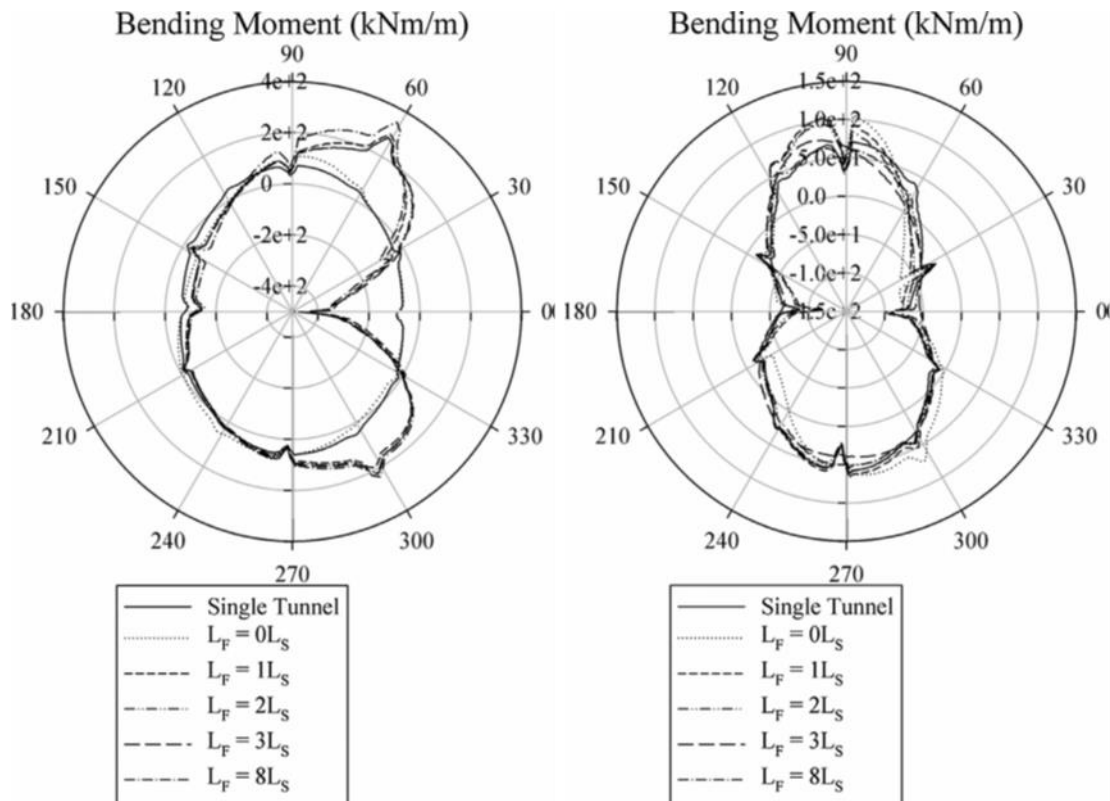
Parameters	Single tunnel	$L_F = 0D$ (A)	$L_F = 10D$ (B)	B/A (%)
Max. pos. bending moment (kN m/m)	71.9	109.9	348.1	316.7
R_M (%)	100.0	152.7	483.8	
Min. neg. bending moment (kN m/m)	-93.8	-97.4	-480.6	493.4
R_{M-} (%)	100.0	103.8	512.0	
Max. normal force (kN/m)	1490	1730	1927	111.4
R_N (%)	100.0	116.1	129.3	
Max. longitudinal force (kN/m)	1745	2057	1798	87.4
R_{LN} (%)	100.0	117.8	103.0	

Εικόνα 2-17: Σύγκριση των εντατικών μεγεθών για τις δύο περιπτώσεις σχετικής απόστασης μετώπων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ



Εικόνα 2-18: Αξονικές δυνάμεις στη διατομή των σηράγγων, αριστερά η αριστερή σήραγγα και δεξιά η αντίστοιχη.



Εικόνα 2-19: Καμπτικές ροπές στη διατομή των σηράγγων, αριστερά η αριστερή σήραγγα και δεξιά η αντίστοιχη

2.10 Σύνοψη

Συνοψίζοντας, παρατηρούμε πως το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των κλάδων μιας δίδυμης σήραγγας είναι αρκετά περίπλοκο και καθορίζεται από πολλές παραμέτρους, η βασικότερη των οποίων είναι η εγκάρσια απόσταση των δύο κλάδων, ωστόσο τα τελευταία χρόνια εντάχθηκε στις βασικές παραμέτρους και η σχετική απόσταση των δύο μετώπων. Από όσα γράφηκαν σε αυτό το κεφάλαιο αντιλαμβανόμαστε ότι δεν υπάρχει μια ενιαία θεώρηση για αυτές τις δύο παραμέτρους, καθώς απαιτείται να ληφθούν υπόψη κάθε φορά οι διάφορες παράμετροι που διαφοροποιούνται όπως η κατάσταση της βραχόμαζας, η θέση διάνοιξης της σήραγγας, η γεωμετρία της διατομής. Συνεπώς απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος.

3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Κατά το στάδιο του σχεδιασμού δίδυμων σηράγγων, οι τρεις βασικές παράμετροι που απαιτείται να λαμβάνονται υπόψη προκειμένου να καθορίζεται ο βαθμός αλληλεπίδρασης των δύο κλάδων είναι η κατασκευαστική αλληλουχία, η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των δύο αυτών κλάδων και το σύστημα άμεσης υποστήριξης που θα επιλεγεί. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής μεταπτυχιακής εργασίας είναι να ασχοληθεί με τη διερεύνηση, κατά το δυνατό, αυτών των τριών παραμέτρων. Βασική επιδίωξη είναι η εξαγωγή ποσοτικών και ποιοτικών συμπερασμάτων σχετικά με την ανάπτυξη των πιέσεων, των αξονικών δυνάμεων και των ροπών κάμψης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συναρτήσει αυτών των τριών παραμέτρων.

Για την εξέταση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δίδυμων σηράγγων όταν μεταβάλλονται: (i) το πλάτος του πυλώνα, (ii) η απόσταση των δύο μετώπων και (iii) το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης πραγματοποιήθηκαν τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τη χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων – ABAQUS v6.13. Επιλέχθηκε η προσομοίωση των μοντέλων μέσω τριδιάστατων αναλύσεων, καθώς αυτές πλεονεκτούν/υπερτερούν σε σχέση με τις διδιάστατες. Η διδιάστατη μέθοδος πραγματοποιεί ανάλυση σε μία συγκεκριμένη διατομή σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, αγνοώντας την επίδραση των τάσεων στις γειτονικές διατομές της σήραγγας και την εν γένει τριαξονική διάσταση του φαινομένου λόγω της επιρροής του μετώπου εκσκαφής στην ανακατανεμημένη τασική και παραμορφωσιακή κατάσταση. Συνεπώς, με αναλύσεις στις δύο διαστάσεις δεν μπορούμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τις συγκλίσεις αφού δεν μετέχει στις αναλύσεις η εξώθηση του μετώπου και οι προσυγκλίσεις. Εν αντιθέσει, με αναλύσεις στις τρεις διαστάσεις προσομοιώνονται οι πραγματικές διαστάσεις της υπό μελέτη σήραγγας και εξάγονται συμπεράσματα για κάθε σημείο της αλληλουχίας της εκσκαφής, καθώς υπάρχει μια ρεαλιστική απεικόνιση των προσυγκλίσεων και της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα της προσομοίωσης του πραγματικού γεωτεχνικού προφίλ στο οποίο θα εκσκαφθεί η σήραγγα, της εξέτασης ευστάθειας μετώπου και διαστασιολόγησης αυτού.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού θα παρουσιαστεί ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS v6.13, οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την πραγματοποίηση των αναλύσεων, καθώς και θα γίνει πλήρης περιγραφή του αριθμητικού προσομοιώματος.

3.1 Κώδικας Πεπερασμένων Στοιχείων Abaqus v6.13

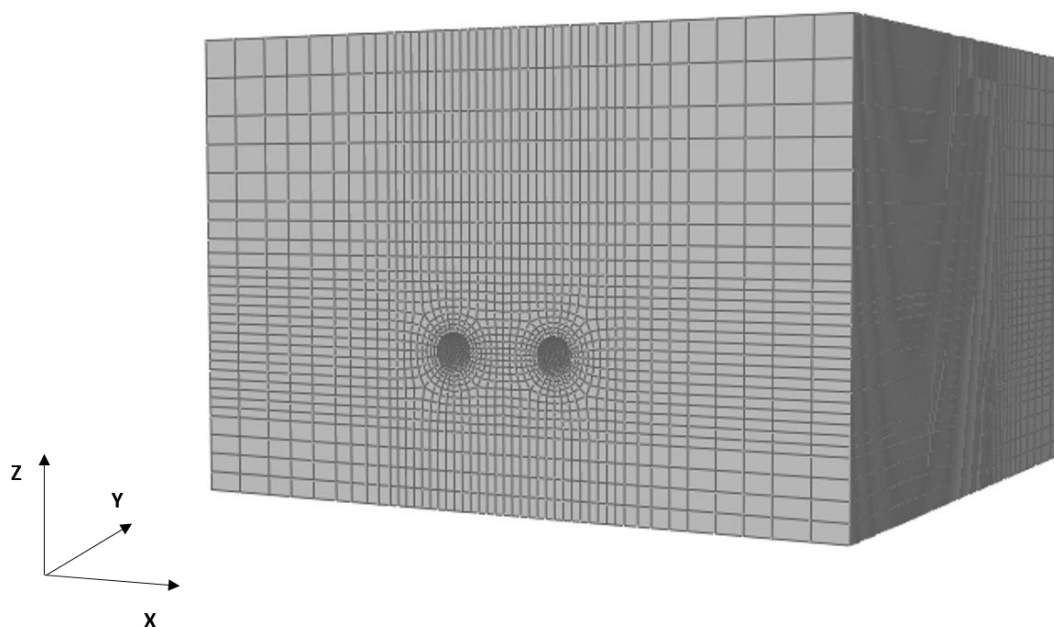
Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS v6.13 χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να εκτελεστούν οι τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις. Θεωρείται ένα από τα πιο εξελιγμένα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων με δυνατότητες πραγματοποίησης απαιτητικών αναλύσεων και προσομοίωσης πολύπλοκων γραμμικών και μη προβλημάτων που αφορούν στα προβλήματα της επιστήμης του μηχανικού.

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

Για την εκτέλεση των αριθμητικών αναλύσεων πραγματοποιήθηκε η εξής διαδικασία: δημιουργήθηκε το αρχείο δεδομένων (input file) το οποίο συγκροτήθηκε με συγκεκριμένη μεθοδολογία, με χρήση του προγράμματος Microsoft Excel, λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος. Στο αρχείο δεδομένων (input file) πραγματοποιήθηκε εισαγωγή των κόμβων (nodes), των πεπερασμένων στοιχείων εδάφους, κελύφους (solid elements, shell elements αντίστοιχα), των ιδιοτήτων των γεωυλικών και των άλλων υλικών (material properties), του αρχικού (γεωστατικού) εντατικού πεδίου (initial conditions), των συνοριακών συνθηκών (boundary conditions) και των στοιχείων για τον προσδιορισμό των ζητούμενων (output) και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Τα ζητούμενα (output) είναι τα εξής: οι πιέσεις επαφής (τα φορτία) (CPRESS), οι αξονικές δυνάμεις (SF1) και οι καμπτικές ροπές (SM1) που αναπτύσσονται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Επίσης, για τα τρία αυτά μεγέθη εξάχθηκαν τα αποτελέσματα για όλους τους χρόνους και τα στάδια εκσκαφής ούτως ώστε να παρατηρηθεί η εξέλιξη τους καθώς εκσκάπτεται η σήραγγα.

3.2 Περιγραφή Αριθμητικού Προσομοιώματος

Στην ενότητα αυτή θα περιγραφεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να μορφωθούν τα αριθμητικά μοντέλα, μέσω των οποίων γίνεται προσπάθεια να αποτυπωθεί το πρόβλημα όσο πιο ρεαλιστικά γίνεται. Παρακάτω λεπτομερώς θα δοθούν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες που αφορούν στην γεωμετρία του αριθμητικού προσομοιώματος, στη διακριτοποίηση του σε πεπερασμένα στοιχεία, στις συνοριακές συνθήκες και στα βήματα εκσκαφής. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εικόνες που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια αφορούν σε ένα συγκεκριμένο τυπικό προσομοίωμα για πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$. Η επιλογή αυτή έγινε καθαρά για λόγους ευκρίνειας του μοντέλου και τονίζεται πως η διαδικασία προσομοίωσης και για τα υπόλοιπα μοντέλα ήταν ανάλογη με αυτή που θα περιγραφεί.

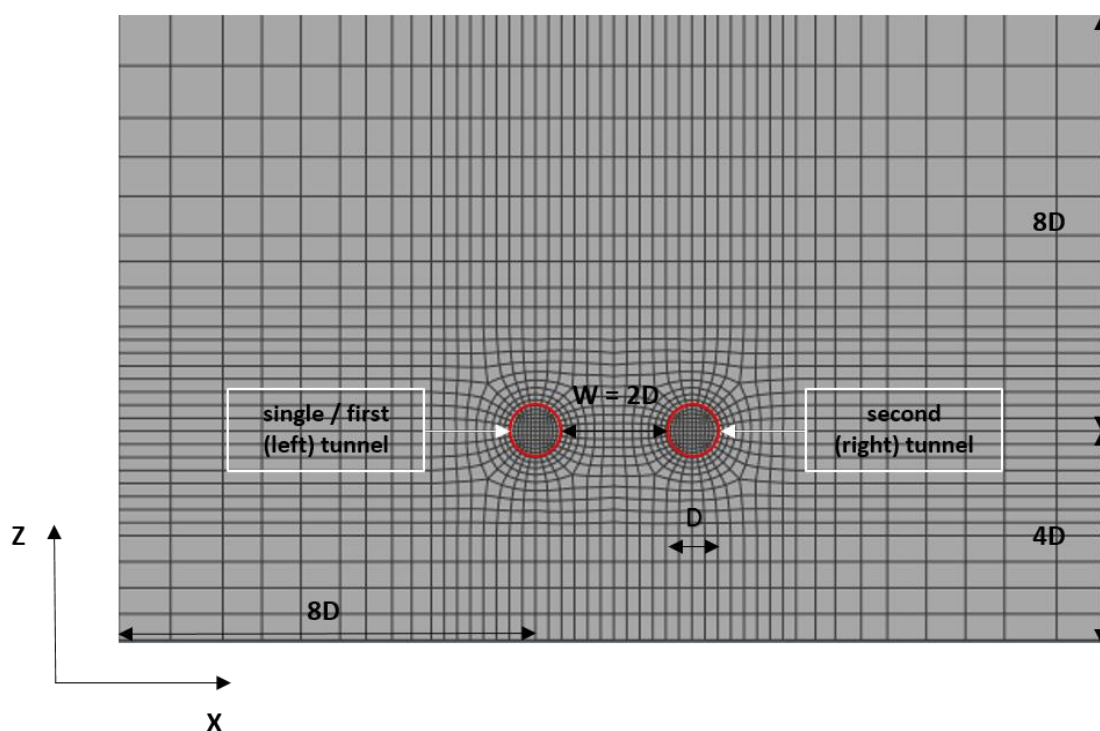


Εικόνα 3-1: Προοπτική άποψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$.

3.2.1 Γεωμετρία των Αριθμητικών Προσομοιωμάτων

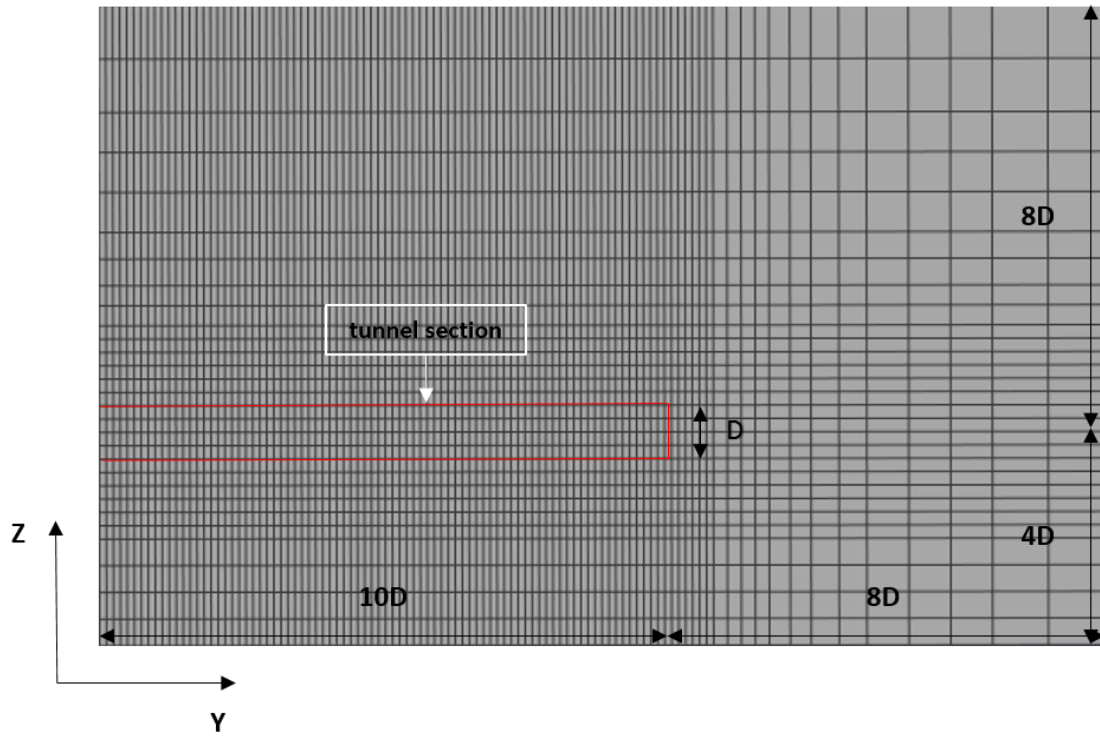
Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν τέσσερις κατηγορίες αναλύσεων. Κάθε κατηγορία εξετάζει μία διαφορετική παράμετρο που αφορά στην διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων. Από άποψη γεωμετρίας όλα τα μοντέλα και για τις τέσσερις κατηγορίες αναλύσεων είναι ίδια πλην του πλάτους πυλώνα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

Παρακάτω παρουσιάζεται το προσομοίωμα με πλάτος πυλώνα $W=2D=16\text{m}$, Εικόνες 3-2, 3-3 και 3-4. Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε μοντέλο δίδυμων κυκλικών σηράγγων με διάμετρο $D=8\text{m}$ και μήκος $L=10D=80\text{m}$, και ύψος υπερκειμένων γαιών $8D=64\text{m}$. Η απόσταση από το κατώτερο όριο του προσομοιώματος (πάντα ως βάση αναφοράς λαμβάνεται ο άξονας της σήραγγας) επιλέχθηκε $4D=32\text{m}$, ενώ οι αποστάσεις από τα πλευρικά όρια κατά τον άξονα XX' , $8D=64\text{m}$. Τέλος, η απόσταση κατά τον διαμήκη άξονα της σήραγγας, δηλαδή κατά τον YY' επιλέχθηκε επίσης, $8D=64\text{m}$. Να σημειωθεί ότι οι αποστάσεις των ορίων προέκυψαν έπειτα από αρκετές αναλύσεις ευαισθησίας και είναι τέτοιες, έτσι ώστε να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα από τις συνοριακές συνθήκες.

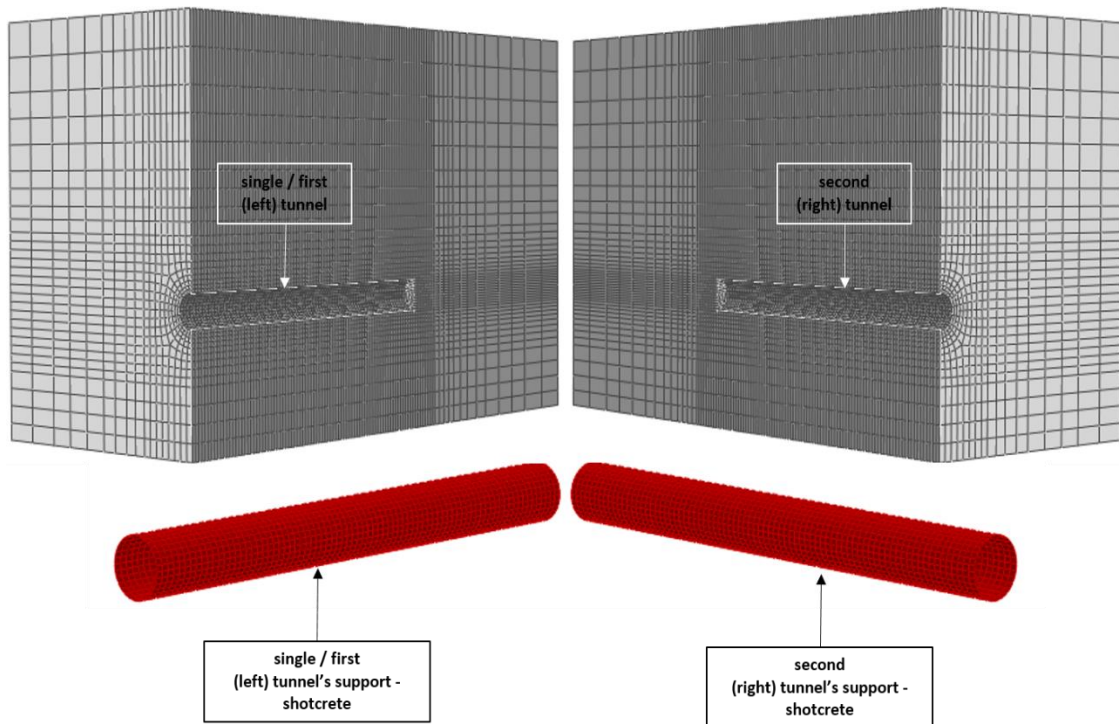


Εικόνα 3-2: Όψη και διαστάσεις του προσομοιώματος για πλάτος πυλώνα $W=2D=16\text{m}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ



Εικόνα 3-3: Μηκοτομική όψη και διαστάσεις του ίδιου προσομοιώματος.



Εικόνα 3-4: Προοπτική τομή του προσομοιώματος και άποψη των μέτρων προσωρινής υποστήριξης,

3.2.2 Διαμόρφωση και Διακριτοποίηση των Αριθμητικών Προσομοιωμάτων

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

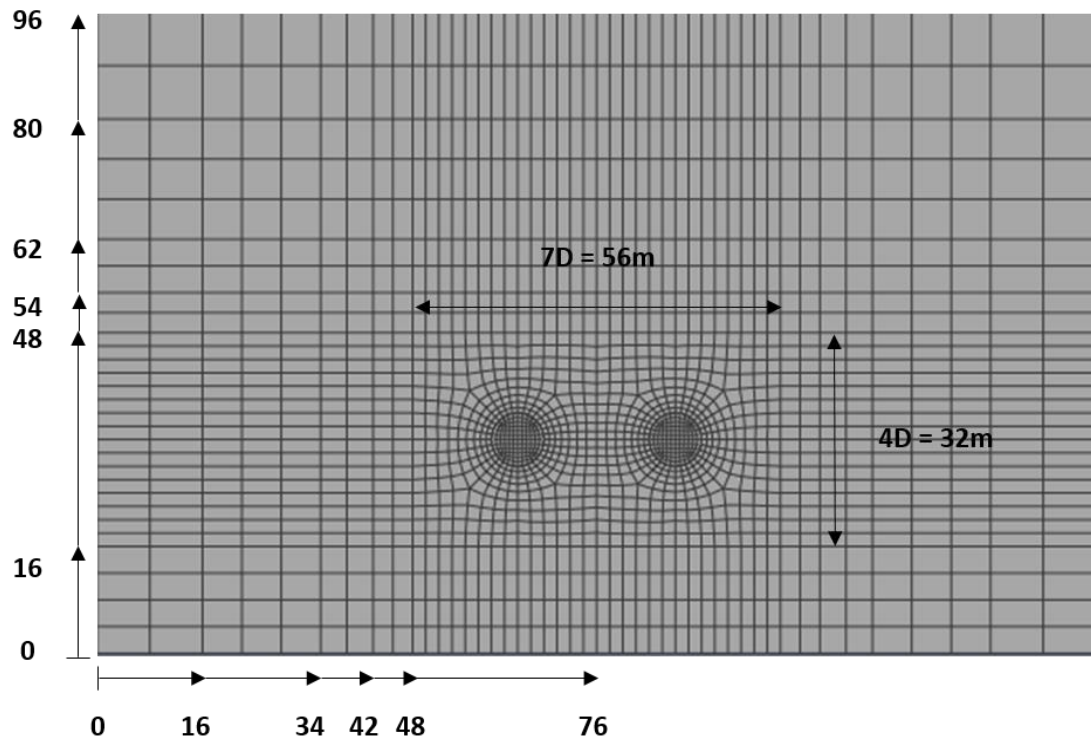
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας για την επιλογή των διαστάσεων των μοντέλων, το ίδιο συνέβη και για την διαμόρφωση του καννάβου. Πραγματοποιήθηκαν αρκετές αναλύσεις έως ότου καταλήξουμε στην τελική μορφή του καννάβου, η οποία θα συνδυάζει αξιοπιστία αποτελεσμάτων χωρίς να απαιτούνται πολλές ώρες αναλύσεων.

Η βασική ιδέα που ακολουθήθηκε δε, ήταν πύκνωση του καννάβου στις περιοχές ενδιαφέροντος και σταδιακή αραίωση καθώς απομακρυνόμαστε από αυτές. Συγκεκριμένα, μέσα στις σήραγγες, ανάμεσα τους και σε μια περιοχή γύρω από αυτές. Με αυτόν τον τρόπο επιτεύχθηκε η αύξηση της λεπτομέρειας και της ακρίβειας της προσομοίωσης στις περιοχές εξαγωγής των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων και κατ' επέκταση η αύξηση της ορθότητας και της αξιοπιστίας αυτών. Παρακάτω παρουσιάζονται ο πίνακας που δείχνει κατά τις τρεις διευθύνσεις πως μορφώθηκε ο κάνναβος και έπειτα επεξηγηματικές εικόνες.

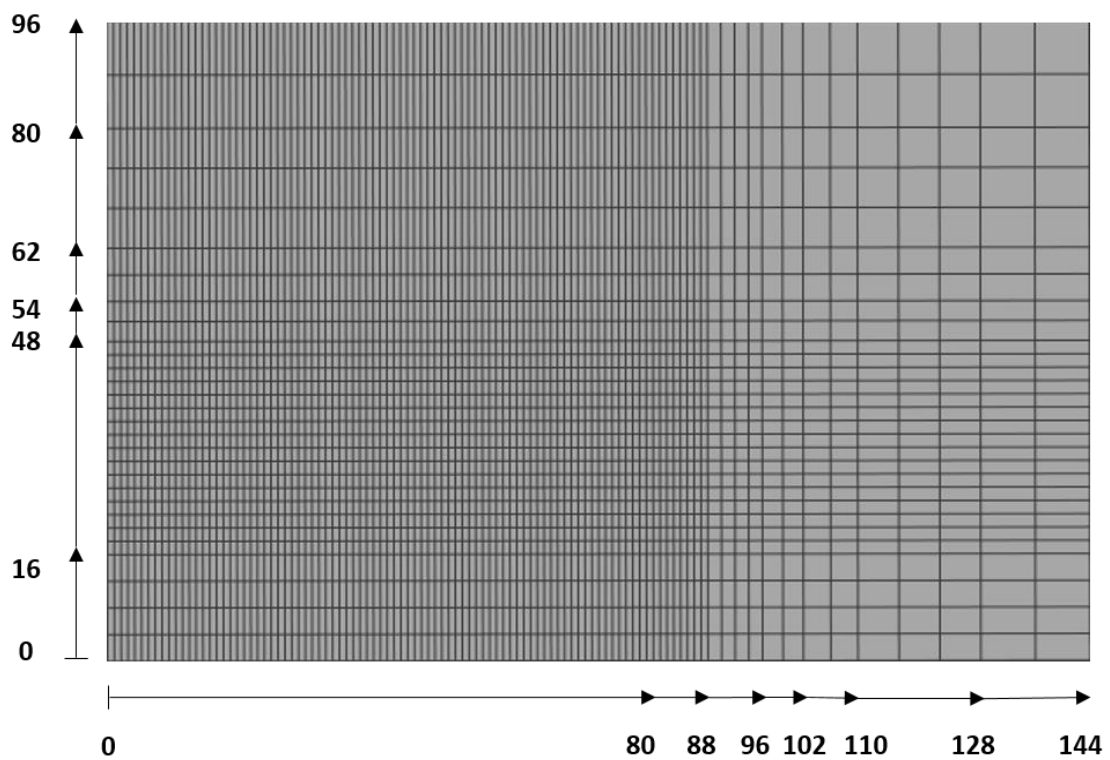
Κατά τον YY'	Απόσταση	Κατά τον ZZ'	Απόσταση	Κατά τον XX'	Απόσταση
0 - 80m	1m	0 - 16m	4m	0 - 16m	8m
80m - 88m	1m	16m - 48m	2m	16m - 34m	6m
88m - 96m	2m	48m - 54m	3m	34m - 42m	4m
96m - 102m	3m	54m - 62m	4m	42m - 48m	3m
102m - 110m	4m	62m - 80m	6m	48m - 76m	2m
110m - 128m	6m	80m - 96m	8m	-	-
128m - 144m	8m	-	-	-	-

Πίνακας 1: Οι περιοχές και οι αποστάσεις βάσει των οποίων μορφώθηκε ο κάνναβος στις τρεις διαστάσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ



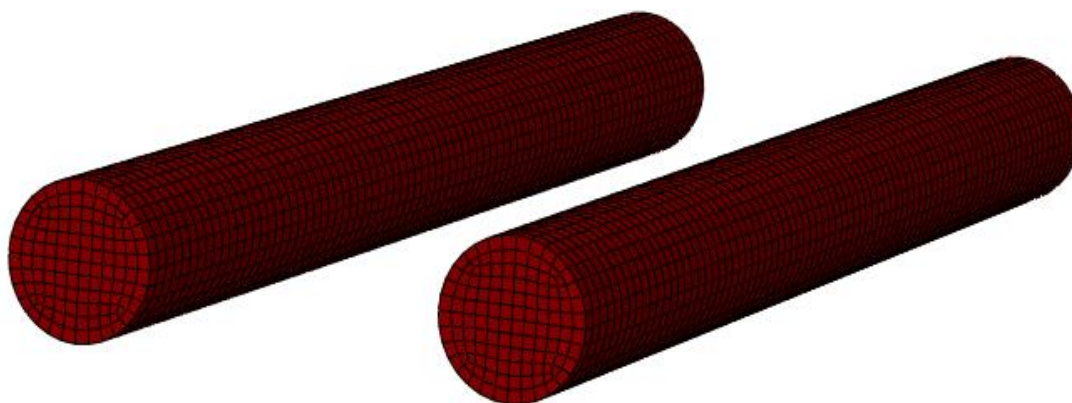
Εικόνα 3-5: Εγκάρσια όψη και διαμόρφωση καννάβου πεπερασμένων στοιχείων.



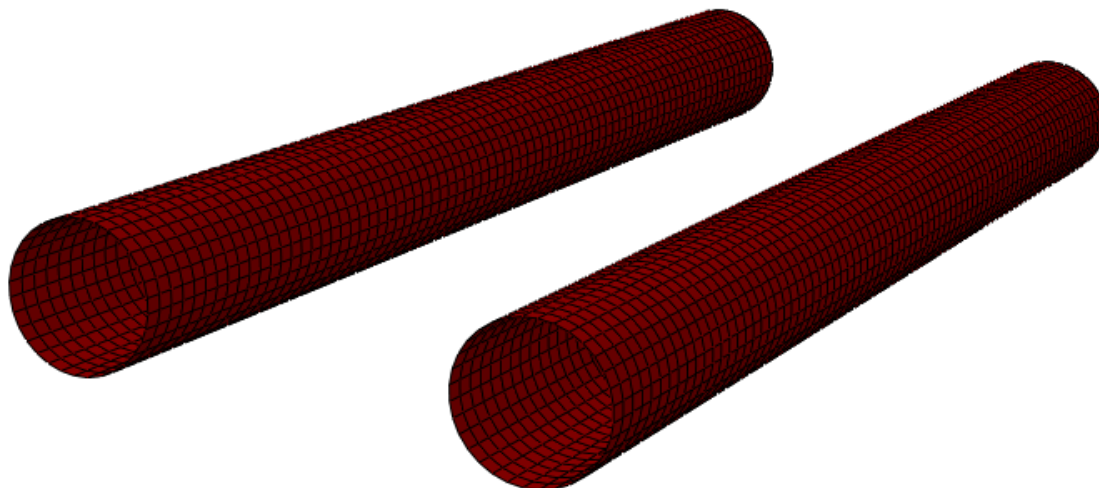
Εικόνα 3-6: Διαμήκης όψη και διαμόρφωση καννάβου πεπερασμένων στοιχείων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Στις παραπάνω εικόνες φαίνονται οι περιοχές που διαμορφώθηκαν με σκοπό να δημιουργηθεί ένας δομημένος κάρναβος καθώς και τις περιοχές πύκνωσης γύρω από τις σήραγγες. Να σημειωθεί ότι το προσομοίωμα αποτελείται από 169116 κόμβους (nodes), 160388 πεπερασμένα στοιχεία εδάφους (solid elements) και 5120 πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell elements). (Ενδεικτική παρουσίαση των κόμβων και πεπερασμένων στοιχείων της ανάλυσης για πλάτος πυλώνα $W/D = 0,5$ της ανάλυσης σύγκρισης).



Εικόνα 3-7: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (οκτακομβικά εξαπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία εδάφους C3D8) της εκσκαφής της σήραγγας.



Εικόνα 3-8: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους S4) της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας.

3.3 Βήματα Αριθμητικών Αναλύσεων

Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω αφορούν στη γεωμετρία του μοντέλου και στη διακριτοποίηση του σε πεπερασμένα στοιχεία, σε αυτήν την ενότητα θα αναφερθούν τα βήματα εκσκαφής που προσομοιώθηκαν. Να σημειωθεί, ωστόσο, ότι δεν είχαν όλες οι κατηγορίες αναλύσεων τα ίδια βήματα εκσκαφής.

Για όλες τις αναλύσεις επιλέχθηκε βήμα εκσκαφής 1m, παραδοχή σύμφωνη με την συνήθη κατασκευαστική πρακτική. Επίσης, οι αναλύσεις εκτελέστηκαν θεωρώντας ολομέτωπη διάνοιξη σε ομογενές, ισότροπο, ελαστικό – απολύτως πλαστικό γεωυλικό.

Εδώ θα πρέπει να γίνει πλέον αναφορά στις τέσσερις κατηγορίες αναλύσεων και στις διαφορές τους στα βήματα. Οι αναλύσεις που έγιναν για την παρούσα εργασία έχουν σαν σκοπό να διερευνηθεί η αλληλεπίδραση της διάνοιξης δίδυμων σήραγγων. Στην πρώτη ανάλυση, η οποία θα αποτελέσει και τη βάση αναφοράς για τις υπόλοιπες αναλύσεις, πραγματοποιείται διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας αφότου ολοκληρωθεί η διάνοιξη και η υποστήριξη της πρώτης, ήτοι 161 βήματα. Στην δεύτερη ανάλυση πραγματοποιείται διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας όταν στην πρώτη έχουν διανοιχθεί και υποστηριχθεί τα πρώτα 40m (το μέσον της σήραγγας) και άρα έχουμε 121 βήματα και τέλος στην τρίτη ανάλυση οι δύο σήραγγες ξεκινούν να διανοίγονται ταυτόχρονα, δηλαδή έχουμε 81 βήματα. Η τέταρτη ανάλυση όσον αφορά στα βήματα είναι ίδια με την πρώτη καθώς σε αυτήν η παράμετρος που εξετάζεται έχει να κάνει με τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης.

1^η ΑΝΑΛΥΣΗ

➤ Βήμα 1^ο

Υπολογισμός του αρχικού (γεωστατικού) εντατικού πεδίου τάσεων.

➤ Βήμα 2^ο

Εκσκαφή του πρώτου μέτρου της πρώτης - αριστερής σήραγγας.

➤ Βήμα 3^ο

Εκσκαφή του δεύτερου μέτρου της πρώτης – αριστερής σήραγγας και υποστήριξη του πρώτου μέτρου που εκσκαφθήκε στο προηγούμενο βήμα. Η προχώρηση είναι 1m, η εκσκαφή θα προηγείται πάντα κατά ένα βήμα της ενεργοποίησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

➤ Βήμα 4° ÷ Βήμα 80°

Εκσκαφή του επόμενου μέτρου της σήραγγας, τοποθέτηση και ενεργοποίηση του προηγούμενου μέτρου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης. Ολοκλήρωση της εκσκαφής της πρώτης σήραγγας.

➤ Βήμα 81°

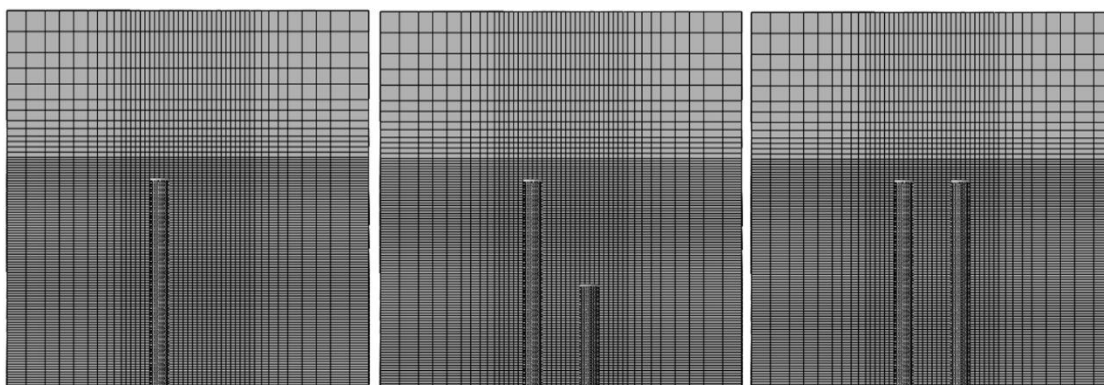
Εκσκαφή του πρώτου μέτρου της δεύτερης - δεξιάς σήραγγας.

➤ Βήμα 82°

Εκσκαφή του δεύτερου μέτρου της δεύτερης - δεξιάς σήραγγας και υποστήριξη του πρώτου μέτρου που εκσκάφθηκε στο προηγούμενο βήμα. Η προχώρηση είναι 1m, η εκσκαφή θα προηγείται πάντα κατά ένα βήμα της ενεργοποίησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

➤ Βήμα 83° ÷ Βήμα 161°

Εκσκαφή του επόμενου μέτρου της σήραγγας, τοποθέτηση και ενεργοποίηση του προηγούμενου μέτρου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης. Ολοκλήρωση της εκσκαφής και της δεύτερης σήραγγας.



Εικόνα 3-9: Τομές στο επίπεδο XY, στα βήματα 81, 121 και 161.

2^η ΑΝΑΛΥΣΗ

➤ Βήμα 1^ο

Υπολογισμός του αρχικού (γεωστατικού) εντατικού πεδίου τάσεων.

➤ Βήμα 2^ο

Εκσκαφή του πρώτου μέτρου της πρώτης - αριστερής σήραγγας.

➤ Βήμα 3^ο

Εκσκαφή του δεύτερου μέτρου της πρώτης – αριστερής σήραγγας και υποστήριξη του πρώτου μέτρου που εκσκάφθηκε στο προηγούμενο βήμα. Η προχώρηση είναι 1m, η εκσκαφή θα προηγείται πάντα κατά ένα βήμα της ενεργοποίησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

➤ Βήμα 4^ο ÷ Βήμα 40^ο

Εκσκαφή του επόμενου μέτρου της πρώτης σήραγγας, τοποθέτηση και ενεργοποίηση του προηγούμενου μέτρου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης.

➤ Βήμα 41^ο

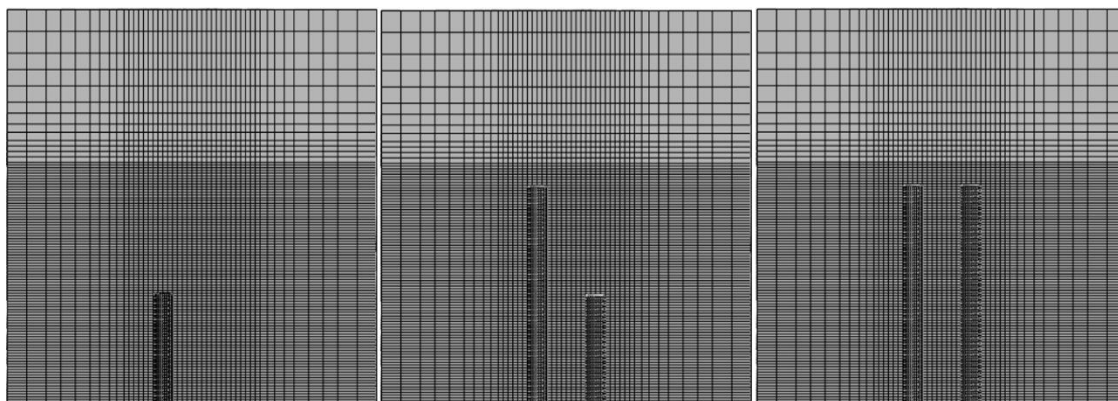
Εκσκαφή του επόμενου μέτρου της πρώτης σήραγγας, τοποθέτηση και ενεργοποίηση του προηγούμενου μέτρου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης. Εκκίνηση διάνοιξης της δεύτερης σήραγγας, εκσκαφή του πρώτου μέτρου.

➤ Βήμα 42^ο ÷ Βήμα 80^ο

Εκσκαφή των επόμενων μέτρων των σηράγγων και τοποθέτηση και ενεργοποίηση του προηγούμενων μέτρων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης. Ολοκλήρωση της εκσκαφής της πρώτης σήραγγας.

➤ Βήμα 80^ο ÷ Βήμα 121^ο

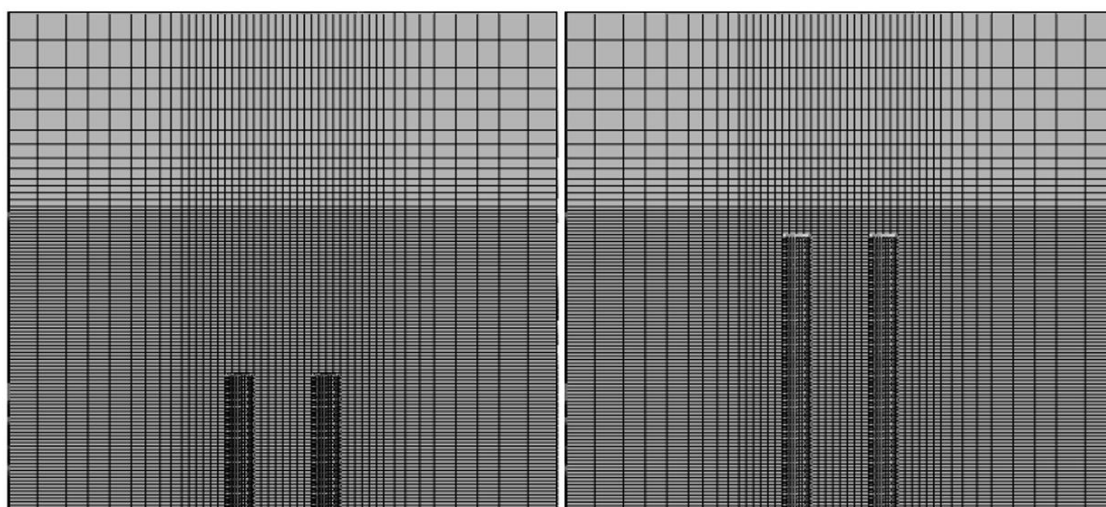
Εκσκαφή του επόμενου μέτρου της σήραγγας, τοποθέτηση και ενεργοποίηση του προηγούμενου μέτρου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης. Ολοκλήρωση της εκσκαφής και της δεύτερης σήραγγας.



Εικόνα 3-10: Τομές στο επίπεδο XY στα βήματα 41, 81 και 121.

3^η ΑΝΑΛΥΣΗ

- Βήμα 1^ο
Υπολογισμός του αρχικού (γεωστατικού) εντατικού πεδίου τάσεων.
- Βήμα 2^ο
Εκσκαφή του πρώτου μέτρου της πρώτης - αριστερής καθώς και της δεύτερης – δεξιάς σήραγγας.
- Βήμα 3^ο ÷ Βήμα 81^ο
Εκσκαφή των επόμενων μέτρων των σηράγγων και τοποθέτηση και ενεργοποίηση του προηγούμενων μέτρων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης. Ολοκλήρωση της εκσκαφής και των δύο σηράγγων.



Εικόνα 3-11: Τομές στο επίπεδο XY στα βήματα 41 και 81.

3.4 Παράμετροι Αριθμητικών Αναλύσεων

Στην ενότητα αυτή θα περιγραφούν όλες οι παραδοχές που έγιναν κατά το σχεδιασμό των μοντέλων, καθώς και όλες οι βασικές παράμετροι που υπεισέρχονται στις τρισδιάστατες αναλύσεις.

3.4.1 Γεωμετρικές και Κατασκευαστικές Παράμετροι

➤ Διάμετρος Σήραγγας

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

➤ Ύψος Υπερκειμένων

Το ύψος των υπερκειμένων διατηρήθηκε επίσης σταθερό σε όλες τις αναλύσεις $H=10D=80\text{m}$. Το ύψος των υπερκειμένων σχεδιάστηκε εν μέρει στο μοντέλο και το υπόλοιπο προστέθηκε μέσω ομοιόμορφου κατανεμημένου φορτίου στην επιφάνεια του προσομοιώματος στο input file, έτσι ώστε να μειωθεί κατά το δυνατό το μέγεθος του μοντέλου και εν συνεχεία του χρόνου ανάλυσης.

➤ Πλάτος Πυλώνα

Πλάτος πυλώνα W ορίζεται η οριζόντια απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων μιας δίδυμης σήραγγας, η απόσταση αυτή, μετρείται από τις εσωτερικές παρειές των δύο σηράγγων. Αποτελεί δε, έναν από τους πιο σημαντικούς παράγοντες αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων και ενός εκ των αντικειμένων μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Διερευνήθηκαν, για όλες τις κατηγορίες αναλύσεων, τρία πλάτη πυλώνα, $W=0.5D=4\text{m}$, $W=1D=8\text{m}$ και $W=2D=16\text{m}$.

➤ Απόσταση Μετώπων

Από τις τέσσερις κατηγορίες αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν οι τρεις αφορούν στη διερεύνηση της επιρροής της σχετικής απόστασης εκσκαφής των δύο μετώπων (lagging distance). Έτσι, πραγματοποιήθηκε μία ανάλυση κατά την οποία η δεύτερη – δεξιά σήραγγα ξεκινά να διανοίγεται μετά το πέρας της διάνοιξης και υποστήριξης της πρώτης – αριστερής σήραγγας, μία ακόμη ανάλυση που η δεύτερη – δεξιά σήραγγα ξεκινά όταν το μέτωπο της πρώτης – αριστερής βρίσκεται στο μέσον, ήτοι $Y=40\text{m}$. Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση για ταυτόχρονη έναρξη της διάνοιξης και στις δύο σήραγγες.

3.4.2 Γεωτεχνικές Παράμετροι

Τα όσα αναφερθούν σε αυτήν την ενότητα αφορούν και στις τέσσερις κατηγορίες αναλύσεων. Σε κάθε κατηγορία εκτός από την κύρια παράμετρο που είχε σαν σκοπό την διερεύνηση της, πραγματοποιούνταν διερεύνηση για δύο ακόμη παραμέτρους, το πλάτος πυλώνα, το οποίο αναλύθηκε προηγουμένως και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της περιβάλλουσας βραχώμαζας.

Διατηρήθηκαν σταθερά κάποια βασικά μεγέθη όπως το ειδικό βάρος του γεωυλικού το οποίο λήφθηκε ίσο με $\gamma=0,025\text{MN/m}^3$ και ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων K_0 , η διερεύνηση του οποίου δεν αποτέλεσε αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας και έλαβε την τιμή $K_0=0,5$.

Για την ακρίβεια σε κάθε κατηγορία και σε κάθε πλάτος πυλώνα ελέγχονται πέντε περιπτώσεις διαφορετικών γεωτεχνικών χαρακτηριστικών βραχώμαζας. Το μεταβαλλόμενο μέγεθος είναι ο γεωλογικός δείκτης αντοχής (GSI) και μέσω του κριτηρίου Hoek-Brown αρκετών ακόμη γεωτεχνικών παραμέτρων που υπολογίσθηκαν με τη χρήση του GSI και θα αναλυθούν παρακάτω.

➤ Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI)

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας αποφασίσθηκε να προσομοιωθούν βραχώμαζες που συναντώνται στον ελλαδικό χώρο, δηλαδή πτωχής ποιότητας γεωυλικά. Για τον λόγο αυτό ο γεωλογικός δείκτης αντοχής (GSI) κυμαίνεται από 10 έως 30.

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

Αποφασίσθηκε να διερευνηθεί μία τιμή αντοχής άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη, προσομοιώνοντας υλικό χαμηλής αντοχής, έτσι $\sigma_{ci}=10\text{MPa}$.

➤ Σταθερά υλικού για άρρηκτο βράχο m_i

Η σταθερά m_i , η οποία εξαρτάται από τύπο του πετρώματος έλαβε σε όλες τις αναλύσεις την τιμή 7. Η τιμή αυτή δηλώνει μέτριο αλληλοκλείδωμα και μέτρια χαρακτηριστικά τριβής μεταξύ των τεμαχών.

➤ Λόγος Poisson ν

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

- Μέτρο Ελαστικότητας Άρρηκτου Βράχου E_i και Βραχόμαζας E_m

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

$$E_i = \sigma_{ci} \cdot MR = 10MPa \cdot 350 = 3500MPa$$

$$E_m = E_i \cdot \left[0,02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{\left(\frac{60+15D-GSI}{11}\right)}} \right] = 106,8MPa \div 284,8MPa$$

Ο συντελεστής διατάραξης της βραχόμαζας D λήφθηκε $D=0$ και η σταθερά $MR=350$, για όλες τις αναλύσεις.

- Αντοχή Βραχόμαζας σ_{cm}

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

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \cdot \frac{\left[(m_b + 4s - a(m_b - 8s)) \left(\frac{m_b}{4} + s \right)^{a-1} \right]}{[2(1+a)(2+a)]} = 0,43MPa \div 0,91MPa$$

όπου,

$$m_b = m_i \frac{GSI-100}{28} = 0,281 \div 0,575$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9}} = 0,0000 \div 0,0004$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[e^{\left(\frac{-GSI}{15}\right)} - e^{\left(\frac{-20}{3}\right)} \right] = 0,522 \div 0,585$$

- Ισοδύναμες Παράμετροι Διατμητικής Αντοχής c και ϕ

Συνδυάζοντας το κριτήριο των Hoek & Brown με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb προκύπτουν οι ισοδύναμες παράμετροι διατμητικής αντοχής c και ϕ .

$$c = 0,08MPa \div 0,16MPa \text{ και } \phi = 21,1^\circ \div 29,4^\circ$$

- Γωνία Διαστολικότητας δ

Η διαστολικότητα της περιβάλλουσας βραχόμαζας ελήφθη ίση με $\phi/4$, άρα

$$\delta = 5,3^\circ \div 7,3^\circ$$

3.4.3 Παράμετροι Άμεσης Υποστήριξης

Η υποστήριξη που επιλέχθηκε να εξεταστεί στην παρούσα εργασία είναι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, η τοποθέτηση – ενεργοποίηση του οποίου θεωρείται ότι συμβαίνει 1m πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε και η διερεύνηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, για την ακρίβεια η δυσκαμψία του. Έτσι, πραγματοποιήθηκε μία ακόμη ανάλυση με διαφοροποιημένο το πάχος του εκτοξευόμενου.

➤ Ειδικό Βάρος γ_{sup}

Το ειδικό βάρος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης θεωρήθηκε ίσο με $\gamma_{sup}=0.025 \text{ MN/m}^3$.

➤ Μέτρο Ελαστικότητας E_{sup}

Το μέτρο ελαστικότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης θεωρήθηκε ίσο με $E_{sup}=20\text{GPa}$.

➤ Λόγος Poisson ν_{sup}

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

➤ Πάχος d_{sup}

Ελέγχθηκαν δύο πάχη εκτοξευόμενου σκυροδέματος $d_{sup} = 0.2\text{m}$ και 0.4m .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

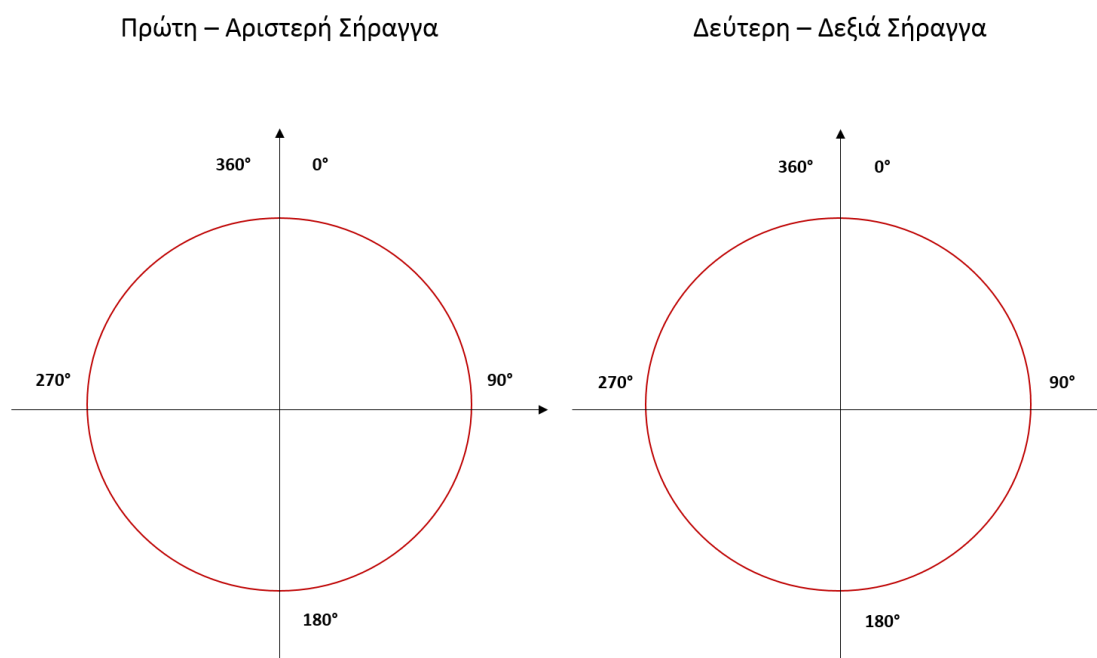
	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΜΟΝΑΔΕΣ	ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ
Γεωμετρικές και Κατασκευαστικές Παράμετροι	Διάμετρος Σήραγγας	D	m	8
	Ύψος Υπερκείμενων Γαιών	H	m	80
	Πλάτος Πυλώνα	W	m	4, 8, 16
	Απόσταση Μετώπων	Y	m	80, 40, 0
Γεωτεχνικές Παράμετροι	Συντελεστής Οριζόντιων Τάσεων	k_0	-	0,5
	Ειδικό Βάρος Γεωυλικού	γ	MN/m ³	0,025
	Λόγος Poisson	ν	-	0,3
	Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής	GSI	-	10, 15, 20, 25, 30
	Μέτρο Ελαστικότητας Άρρηκτου Βράχου	E_i	MPa	3500
	Μέτρο Παραμορφωσιμότητας Βραχώμαζας	E_m	MPa	106.8, 127.6, 159.9, 209.5, 284.8
	Αντοχή Άρρηκτου Βράχου σε Μονοαξονική Θλίψη	σ_{ci}	MPa	10
	Σταθερά Γεωυλικού	m_i	-	7
	Συντελεστής Διατάραξης	D	-	0
	Σταθερά MR	MR	-	350
	Αντοχή Βραχώμαζας	σ_{cm}	MPa	0.43, 0.55, 0.67, 0.79, 0.91
	Συνοχή	c	MPa	0.08, 0.10, 0.12, 0.14, 0.16
	Γωνία Τριβής	ϕ	(^o)	21.1, 23.6, 25.7, 27.6, 29.4
	Διαστολικότητα	δ	(^o)	5.3, 5.9, 6.4, 6.9, 7.3
Παράμετροι Άμεσης Υποστήριξης	Ειδικό Βάρος	γ_{sup}	MN/m ³	0.025
	Μέτρο Ελαστικότητας	E_{sup}	GPa	20
	Λόγος Poisson	ν_{sup}	-	0.2
	Πάχος	d_{sup}	m	0.2, 0.4

3.5 Βασικές Έννοιες και Παραδοχές των Αριθμητικών Αναλύσεων

Σκοπός της ενότητας αυτής είναι η επεξήγηση των βασικών εννοιών και παραδοχών που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Αρχικά, να σημειωθεί ότι οι τιμές της πίεσης επαφής και των αξονικών δυνάμεων που χρησιμοποιήθηκαν για την ποσοτικοποίηση του φαινομένου ελήφθησαν από τις διατομές που είχαν ισορροπήσει. Ως διατομή με ισορροπία θεωρήθηκε η δέκατη στη σειρά διατομή που παρατηρήθηκε συνεχής ποσοστιαία μεταβολή μικρότερη του 0.5%. Στη θέση αυτή θεωρείται ότι η βραχόμαζα, λόγω της προχώρησης του μετώπου, έχει ισορροπήσει. Στις καμπτικές ροπές τα πράγματα ήταν λίγο πιο πολύπλοκα και χρειάστηκε να αυξηθεί το ποσοστό αυτό ούτως ώστε να επέλθει σύγκλιση.

Για την μελέτη της κατανομής των μεγεθών στη χαρακτηριστική διατομή ορίζεται η γωνία θ , η οποία έχει θετική φορά την ωρολογιακή. Αξίζει να τονισθεί ότι στις δύο σήραγγες, προφανώς, οι γωνίες αυτές δεν είναι οι ίδιες αλλά ακριβώς συμμετρικές ως προς το κέντρο του πλάτους πυλώνα. Θα παρουσιασθεί σχηματικά αυτή η ιδιομορφία, η οποία φυσικά λήφθηκε υπόψη κατά την μελέτη ούτως ώστε να είναι απολύτως συγκρίσιμα τα εκάστοτε μεγέθη, δηλαδή να αναφερόμαστε στις εσωτερικές παρειές, για παράδειγμα, των δύο σηράγγων και όχι στην εσωτερική παρειά της πρώτης και στην εξωτερική της δεύτερης.



Εικόνα 3-12: Γραφική απεικόνιση της γωνίας θ και στις δύο σήραγγες.

Τα βασικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων είναι τα ακόλουθα:

- **p_o** : Κατακόρυφη γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας, $p_o = \gamma H$
- **p_{ho}** : Οριζόντια γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας, $p_{ho} = K_o \gamma H$
- **$p_{o,m}$** : Ο μέσος όρος των δύο παραπάνω μεγεθών, $p_{o,m} = \frac{p_o + p_{ho}}{2}$
- **S**: Η απόσταση της χαρακτηριστικής διατομής από το μέτωπο
- **p**: Πίεση επαφής (φορτίο) στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- **N**: Αξονική δύναμη στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- **M**: Καμπτική ροπή στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- **Single**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει τα μεγέθη της πρώτης - αριστερής σήραγγας, πριν ξεκινήσει η εκσκαφή της δεύτερης – δεξιάς σήραγγας. Στις περιπτώσεις των αναλύσεων που η δεύτερη ξεκινά να διανοίγεται χωρίς να έχει τελειώσει η διάνοιξη της πρώτης σήραγγας, το μέγεθος αυτό λαμβάνεται από την βασική ανάλυση, αυτήν που αποτέλεσε τη βάση σύγκρισης, δηλαδή αυτή κατά την οποία η δεύτερη σήραγγα ξεκινά να διανοίγεται μετά το πέρας της πρώτης
- **First**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει τα μεγέθη της πρώτης – αριστερής σήραγγας, αφότου έχει ξεκινήσει η εκσκαφή της δεύτερης – δεξιάς σήραγγας
- **Second**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει τα μεγέθη της δεύτερης – δεξιάς σήραγγας
- **Min**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει την ελάχιστη τιμή και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη
- **Max**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει την μέγιστη τιμή και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη
- **Average**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει την μέση τιμή και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη
- **Roof**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει το μέγεθος στην στέψη της σήραγγας, δηλαδή για $\theta=0^\circ$ ή 360° και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη
- **Bottom**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει το μέγεθος για $\theta=180^\circ$ και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη
- **Side**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει τα μεγέθη στις παρειές της σήραγγας, δηλαδή για $\theta=90^\circ$ ή 270° και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

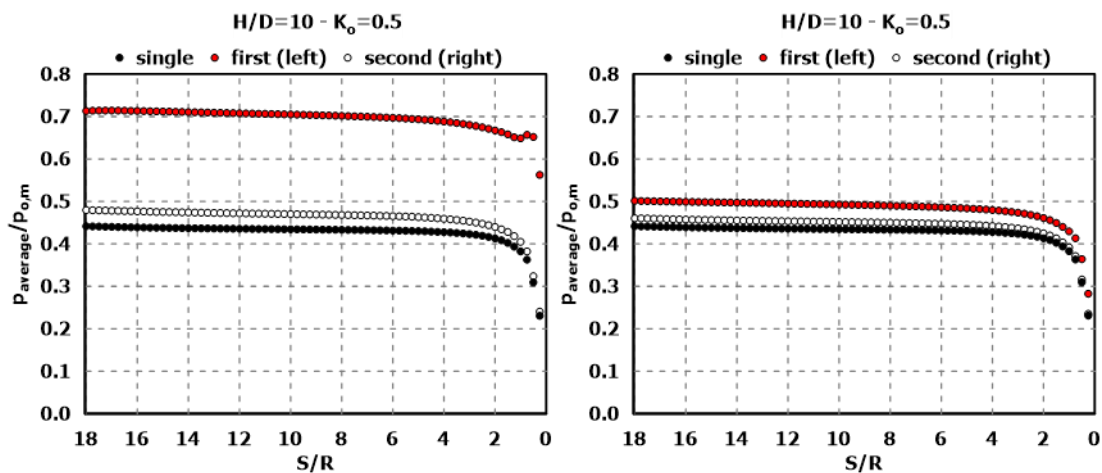
Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των τεσσάρων κατηγοριών αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν είναι τα εξής: 1) το φορτίο, 2) οι αξονικές δυνάμεις και 3) οι καμπτικές ροπές, που αναπτύσσονται επάνω στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Για κάθε κατηγορία αναλύσεων δημιουργήθηκαν δεκαπέντε επιμέρους αναλύσεις με βάση το πλάτος πυλώνα και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά. Θα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τα μοντέλα με τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά. Επίσης, θα παρουσιασθεί και η χρονική εξέλιξη των φορτίων στην προσωρινή υποστήριξη.

4.1 Διερεύνηση της Σχετικής Απόστασης Μεταξύ των Δύο Μετώπων

4.1.1 Διάνοιξη της Δεξιάς Σήραγγας Όταν Έχει Διανοιχθεί Πλήρως η Αριστερή

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα της κατηγορίας αναλύσεων που αποτέλεσε την βάση σύγκρισης και για τις υπόλοιπες κατηγορίες. Υπενθυμίζεται ότι σε αυτή την κατηγορία, διανοίχθηκε πλήρως πρώτα η αριστερή σήραγγα κι έπειτα ξεκίνησε η διάνοιξη της δεξιάς σήραγγας.

➤ Φορτίο στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



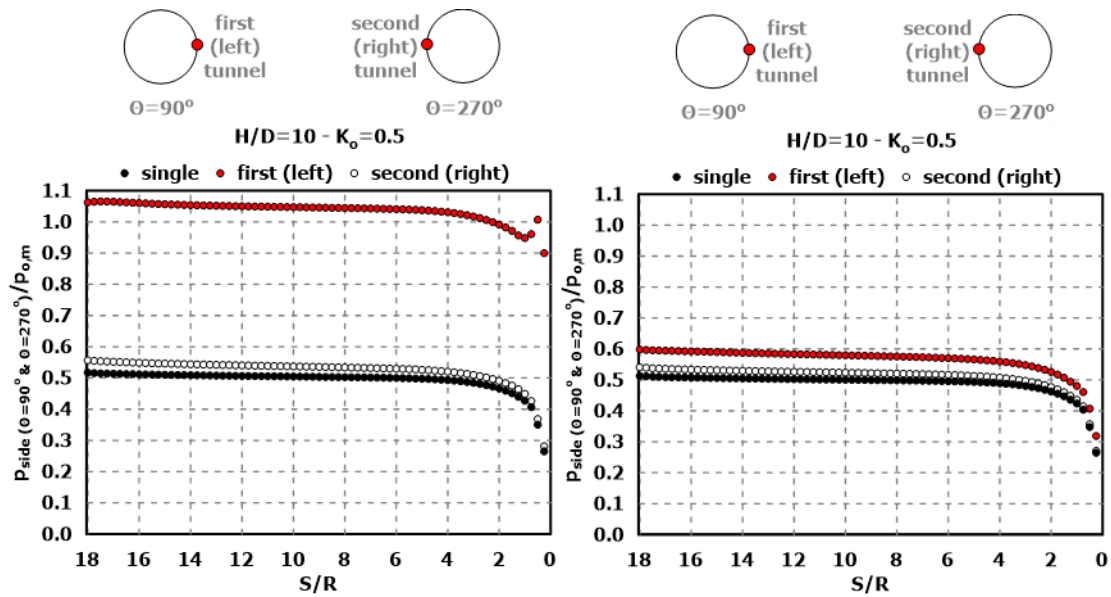
Εικόνα 4-1: Μηκτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.

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

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

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι η διάνοιξη μιας δεύτερης σήραγγας, ειδικά σε κοντινή απόσταση, προκαλεί σημαντική αύξηση στα φορτία της προσωρινής υποστήριξης της "first". Ο μηχανισμός ανάπτυξης του φαινομένου είναι ο εξής, η πρώτη σήραγγα διανοίγεται προκαλώντας ανακατανομή και μεταβολή στο τασικό και παραμορφωσιακό πεδίο του περιβάλλοντος γεωυλικού (ανάπτυξη πλαστικής ζώνης, δημιουργία ακτινικών μετατοπίσεων κλπ) και στη συνέχεια επιτυγχάνεται η ισορροπία του συστήματος περιβάλλον γεωυλικό - άμεση υποστήριξη με βάση την εξέλιξη του φαινομένου της σύγκλισης - αποτόνωσης. Η δεξιά - δεύτερη σήραγγα διανοίγεται σε ενδεχομένως ήδη ανακαταναμημένο πεδίο τάσεων και παραμορφώσεων, εντός δυνητικής πλαστικής ζώνης, ισορροπώντας όμως με βάση την απόκριση κατά την εξέλιξη της σύγκλισης - αποτόνωσης προσεγγίζοντας τη συμπεριφοράς μεμονωμένης σήραγγας. Η ήδη διανοιχθείσα αριστερή - πρώτη σήραγγα λόγω της δυσκαμψίας της υποστήριξής της δε μπορεί να παραλάβει τη μεταβολή τάσεων και παραμορφώσεων, που συντελείται στον πυλώνα (στην περιοχή ανάμεσα στις παρειές των δύο σηράγγων) λόγω της ανάπτυξης του «φαινομένου θόλου» - «τοξωτής λειτουργίας» του γεωυλικού κατά την εκσκαφή και υποστήριξη της δεξιάς - δεύτερης σήραγγας, ως επιπρόσθετη ακτινική μετατόπιση/σύγκλιση. Η δυσκαμψία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος παρεμποδίζει την εξέλιξη πλεονάζουσας σύγκλισης οδηγώντας στην επιπρόσθετη φόρτιση του κελύφους της υποστήριξης της αριστερής - πρώτης σήραγγας.

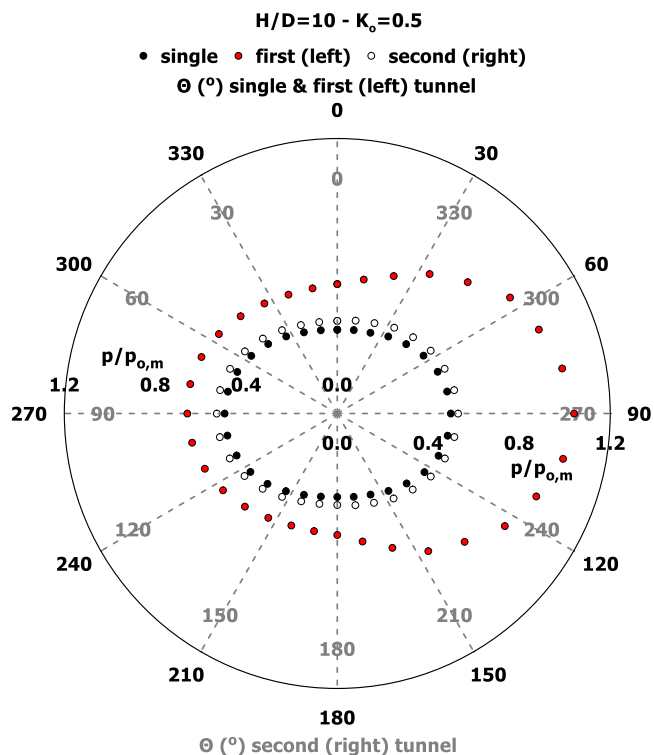
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



Εικόνα 4-2: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.

Στα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζονται οι μηκοτομικές κατανομές των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των δύο σηράγγων για πλάτη πυλώνα 4m και 16m. Είναι εμφανής και πάλι η αύξηση που έχει επέλθει στο φορτίο της “first” σήραγγας, βέβαια εδώ τα αποτελέσματα είναι κατά πολύ αυξημένα σε σχέση με τα προηγούμενα, κι αυτό είναι λογικό αφού την μεγαλύτερη επιρροή του φαινομένου την υφίστανται οι εσωτερικές παρειές των σηράγγων. Έτσι, για πλάτος πυλώνα 4m η αύξηση της “first” σε σχέση με την “single” είναι 112% ενώ για πλάτος πυλώνα 16m είναι 20%. Όσον αφορά στην “second” σήραγγα η αύξηση που παρατηρείται για πλάτος πυλώνα 4m είναι 12% ενώ για πλάτος πυλώνα 16m είναι 6%. Είναι εμφανής όπως και πριν η επιρροή του πλάτους πυλώνα, ωστόσο εδώ παρατηρούμε και αυξημένα ποσοστά σε σχέση με πριν. Αυτό είναι πολύ λογικό αφού την μεγαλύτερη επιρροή την δέχονται οι εσωτερικές παρειές των σηράγγων και θα εξηγηθεί παρακάτω γιατί προκύπτει η συγκεκριμένη απόκριση.

Στο δίπλα διάγραμμα βλέπουμε πως κατανέμεται το φορτίο στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην τυπική διατομή των σήραγγων για πλάτος πυλώνα 4m. Εδώ γίνεται πλέον σαφές ότι η διάνοιξη της δεξιάς σήραγγας προκαλεί αύξηση στο φορτίο στην ήδη διανοιχθείσα σήραγγα σε όλη της την περιφέρεια και ειδικά στην εσωτερική παρειά. Παρατηρείται επίσης, ότι η "single" και η "second" έχουν ίδια κατανομή των φορτίων γύρω από την σήραγγα (η "second" φυσικά μεγαλύτερα μεγέθη, ωστόσο, χωρίς να επηρεάζεται από την ύπαρξη της αριστερής σήραγγας).



Εικόνα 4-3: Κατανομή του φορτίου στην τυπική διατομή των σήραγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.

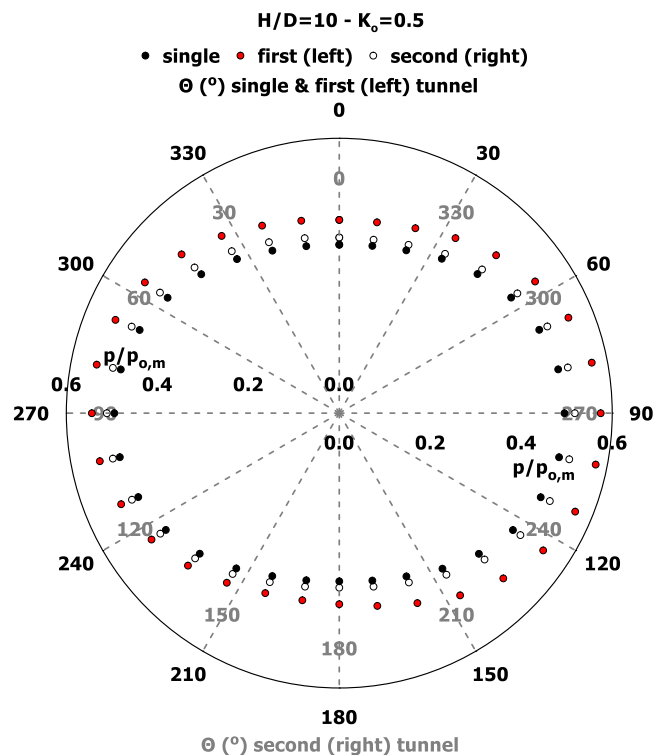
Τέλος, παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις, στην στέψη και στον πυθμένα τα μεγέθη είναι μικρότερα από ότι στις παρειές κάτι το οποίο εξηγείται από την τιμή του $K_o = 0.5$. Συγκεκριμένα, για $K_o = 0.5$ οι αρχικές κατακόρυφες τάσεις είναι μεγαλύτερες από τις αρχικές οριζόντιες. Στην περιοχή της στέψης και του πυθμένα οι κατακόρυφες τάσεις που είναι ακτινικές μειώνονται λόγω της εκσκαφής της σήραγγας, ενώ οι οριζόντιες τάσεις που είναι εφαπτομενικές αυξάνονται αντίστοιχα. Κατά συνέπεια, το εύρος της διαφοράς ακτινικής και εφαπτομενικής τάσης, από το οποίο καθορίζεται το μέγεθος της διεκτροπικής τάσης που ελέγχει την ανάπτυξη των ακτινικών μετατοπίσεων και των πλαστικών παραμορφώσεων, μειώνεται. Αντίθετα, στην περιοχή των παρειών η απόκριση αντιστρέφεται: το εύρος της διαφοράς ακτινικής και εφαπτομενικής τάσης αυξάνεται. Ως εκ τούτου, στις παρειές παρατηρείται η μεγιστοποίηση της ανάπτυξης των πλαστικών παραμορφώσεων στο περιβάλλον γεωυλικό και των πιέσεων επαφής (φορτίων) στην άμεση υποστήριξη (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα). Η συγκεκριμένη απόκριση ενισχύεται και από το προφίλ των ακτινικών μετατοπίσεων (συγκλίσεων) στην εκσκαφή. Οι μέγιστες συγκλίσεις εκδηλώνονται στη στέψη και τον πυθμένα, ενώ οι ελάχιστες στις παρειές.

Σε αυτό το φαινόμενο συμβάλλει το φαινόμενο της τοξωτής λειτουργίας του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, για $K_o = 0.5$ το περιβάλλον γεωυλικό γύρω από τη σήραγγα μέσω του λεγομένου "φαινομένου θόλου", δημιουργεί ένα τόξο ανάληψης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

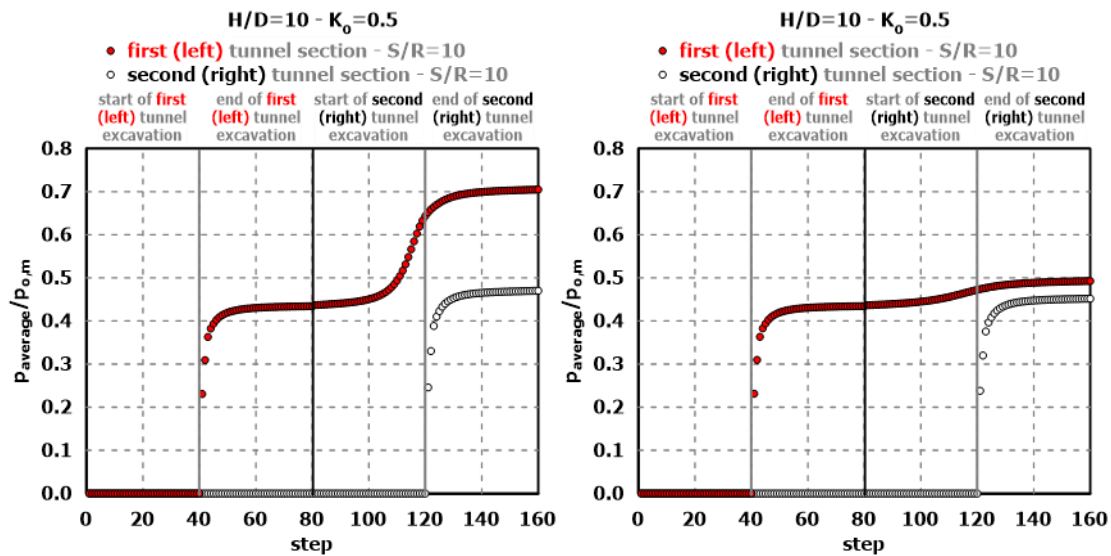
των ανακατανεμημένων τάσεων στο άνω μέρος της διατομής της σήραγγας το οποίο μεταφέρει μέρος των φορτίων του υπερκείμενου εδάφους στους εκατέρωθεν της σήραγγας πόδες του τόξου που εντοπίζονται στις παρειές της σήραγγας. Δεδομένης αυτής της τοξωτής λειτουργίας που εκτρέπει τη μεγιστοποίηση των τάσεων 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 είναι η κατακόρυφη και η ανάπτυξη των εντονότερων μεταβολών στο παραμορφωσιακό κι εντατικό πεδίο γίνεται στην περιοχή του πυλώνα που γειτνιάζει με τις σήραγγες.

Στο διάγραμμα της εικόνας 4-4 βλέπουμε πως κατανέμεται το φορτίο στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην τυπική διατομή των σηράγγων για πλάτος πυλώνα 16m. Παρατηρούμε ότι το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης έχει σχεδόν εξαλειφθεί και ότι και η κατανομή του φορτίου της "first" είναι σχεδόν όπως της "single" και της "second" με μία μικρή διαφοροποίηση στην εσωτερική παρειά (αύξηση του μεγέθους)



Εικόνα 4-4: Κατανομή του φορτίου στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση

➤ Χρονοϊστορίες των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

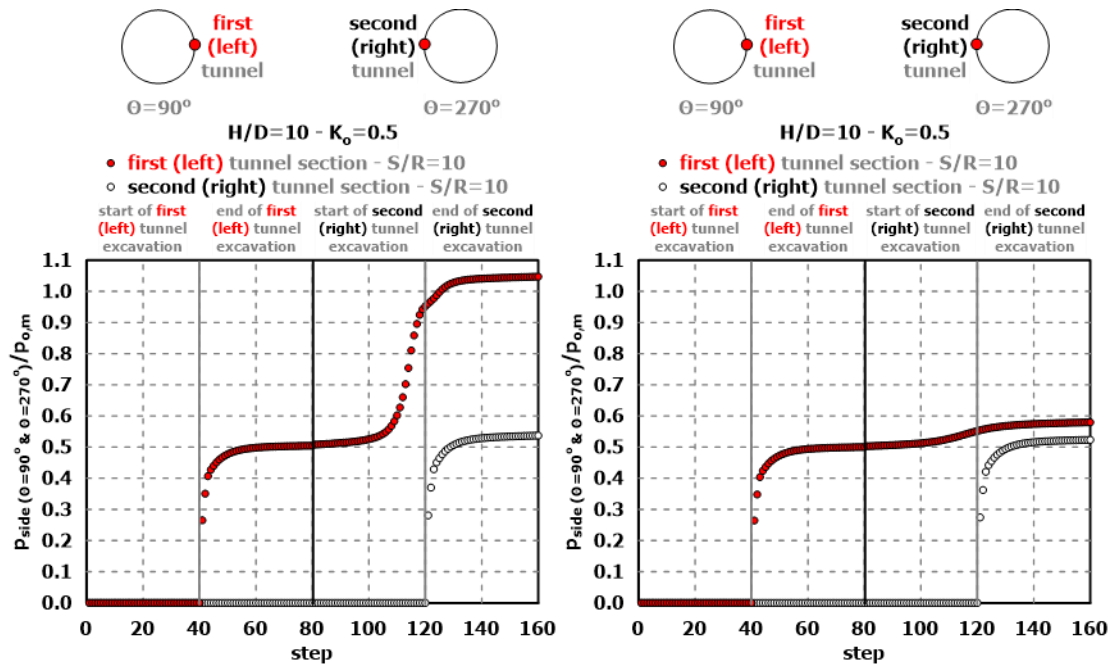


Εικόνα 4-5: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.

Στα διαγράμματα της εικόνας 4-5 παρατηρούμε την χρονική εξέλιξη των φορτίων που καλείται να παραλάβει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$ για τις δύο περιπτώσεις, τη "first" και τη "second" σήραγγα. Βλέπουμε λοιπόν, ότι στη "first" σήραγγα μέχρι το βήμα 41 δεν έχουν αναπτυχθεί φορτία, αυτό είναι λογικό αφού η διατομή που εξετάζουμε είναι στο $Y=40m$, που σημαίνει ότι στο βήμα 40 εκσκάπτεται και στο βήμα 41 τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη. Από εκείνο το σημείο και μέχρι το βήμα 80, που είναι και το πέρας της εκσκαφής της αριστερής σήραγγας, η σήραγγα ξεκινάει να αναπτύσσει φορτία, ωστόσο συμπεριφέρεται ακόμη σαν "single". Στο βήμα 80 ξεκινά η διάνοιξη της "second", η επιρροή όμως της "second" στην εξεταζόμενη διατομή θα ξεκινήσει στο βήμα 121. Η συμπεριφορά της θα είναι ανάλογη της "single", με ελαφρώς υψηλότερες τιμές. Η "first" από την άλλη από το βήμα 80 ξεκινά να επηρεάζεται από την εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας. Στην αρχή η επιρροή είναι πολύ μικρή και όσο η εκσκαφή πλησιάζει στην εξεταζόμενη διατομή (ειδικά από το βήμα 100 κι έπειτα), παρατηρείται απότομη αύξηση των φορτίων η οποία όταν η εκσκαφή περάσει τη διατομή $Y=40m$ σιγά σιγά αρχίζει και ισορροπεί λαμβάνοντας την τελική τιμή της στο βήμα 160.

Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα για διαφορετικά πλάτη πυλώνα, παρατηρούμε ότι η μορφή των καμπυλών είναι ακριβώς ίδια, ωστόσο, οι τιμές, όσο το πλάτος πυλώνα αυξάνεται, μικραίνουν, με αποτέλεσμα οι τελικές τιμές για πλάτος πυλώνα 4m να είναι κατά 40% μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για πλάτος πυλώνα 16m για την "first". Ενώ, για την "second" η διαφορά είναι σχεδόν αμελητέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



Εικόνα 4-6: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.

Τα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 4-6, δείχνουν την χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις δύο περιπτώσεις. Ο λόγος που γενικά παρουσιάζονται τα συγκεκριμένα διαγράμματα είναι γιατί εκεί αναμένονται τα μέγιστα μεγέθη στις σήραγγες.

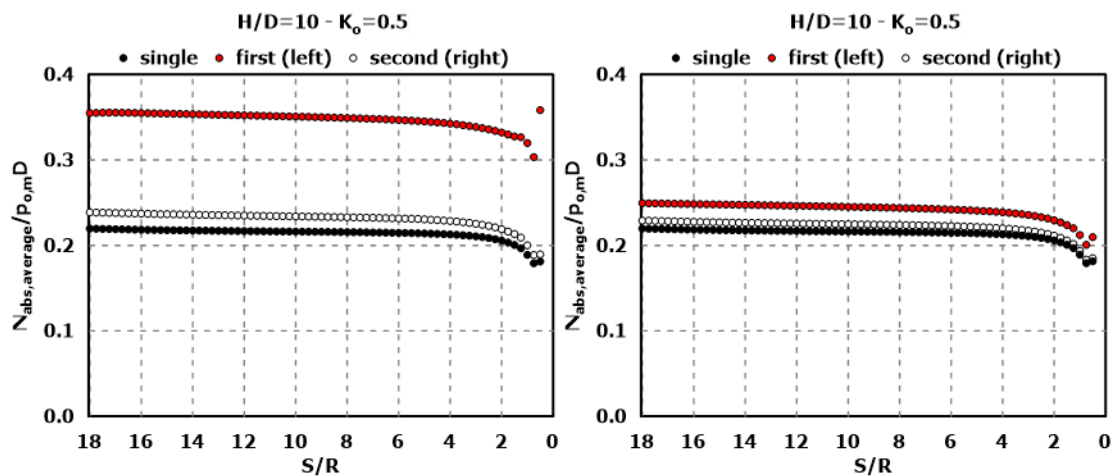
Η κατανομή έχει την ίδια μορφή ως πριν, ωστόσο οι τιμές είναι σημαντικά αυξημένες. Παρατηρούμε για ακόμη μία φορά την επιρροή του πλάτους πυλώνα στην διάνοιξη δίδυμων σηράγγων. Η διαφορά εδώ μεταξύ των δύο αναλύσεων είναι της τάξης του 75% για την "first".

➤ Αξονικές δυνάμεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Στα παρακάτω διαγράμματα παρατηρείται αύξηση της αξονικής δύναμης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της "first" σήραγγας σε σχέση με την "single" λόγω της διάνοιξης της "second". Όταν δε το πλάτος πυλώνα είναι 4m τα μεγέθη στην "first" σήραγγα είναι αυξημένα κατά 59% σε σχέση με την "single". Εν αντιθέσει, όσο το πλάτος πυλώνα αυξάνεται η αλληλεπίδραση εξαλείφεται. Αυτό παρατηρείται στο δεξί διάγραμμα, με πλάτος πυλώνα 16m, που η αντίστοιχη ποσοστιαία αύξηση της αξονικής δύναμης στο εκτοξευόμενο είναι 14%.

Αξίζει να σημειωθεί επίσης, ότι αύξηση των τιμών της δύναμης υπάρχει και στη "second" σήραγγα, φυσικά πολύ μικρότερη σε σχέση με την αύξηση της "first". Για την περίπτωση του πλάτους πυλώνα 4m η αύξηση στην αξονική είναι 9%, ενώ στην περίπτωση του πλάτους πυλώνα 16m είναι 4%. Είναι φανερό ότι η αύξηση στη "second" υπάρχει μεν, ωστόσο είναι πολύ μικρή.

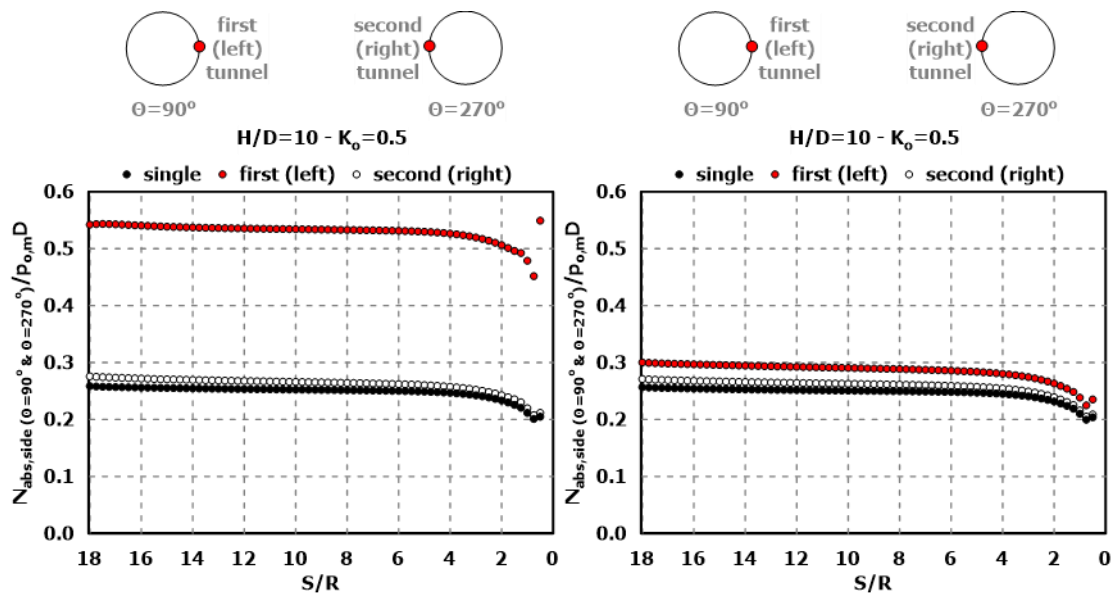
Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι η διάνοιξη μιας δεύτερης σήραγγας, ειδικά σε κοντινή απόσταση, προκαλεί σημαντική αύξηση και στις αξονικές δυνάμεις της προσωρινής υποστήριξης.



Εικόνα 4-7: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων.

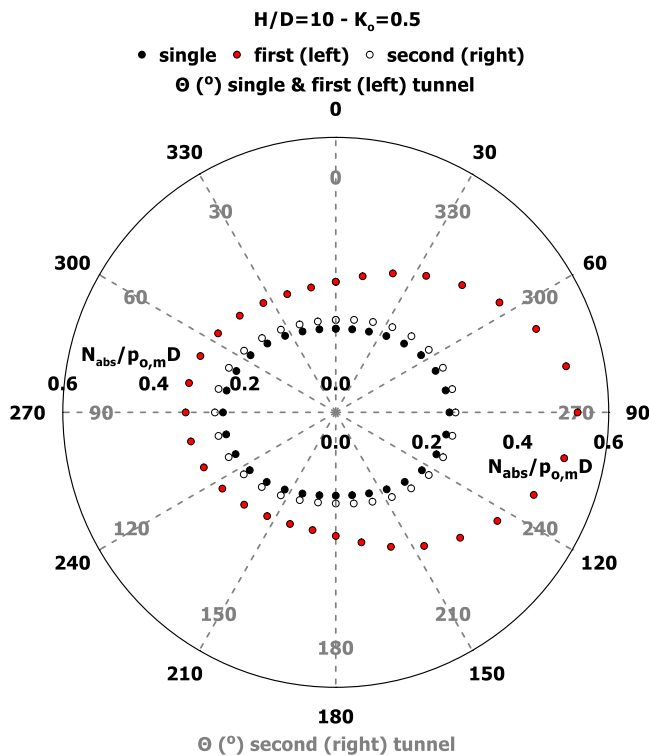
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι μηκοτομικές κατανομές των αξονικών δυνάμεων στις εσωτερικές παρειές των δύο σηράγγων για πλάτη πυλώνα 4m και 16m. Είναι εμφανής και πάλι η αύξηση που έχει επέλθει στις δυνάμεις της “first” σήραγγας, βέβαια εδώ τα αποτελέσματα είναι κατά πολύ αυξημένα σε σχέση με τα προηγούμενα, κι αυτό είναι λογικό αφού την μεγαλύτερη επιρροή του φαινομένου την έχουν οι εσωτερικές παρειές των σηράγγων. Έτσι, για πλάτος πυλώνα 4m η αύξηση της “first” σε σχέση με την “single” είναι 111% ενώ για πλάτος πυλώνα 16m είναι 15%. Όσον αφορά στην “second” σήραγγα η αύξηση που παρατηρείται για πλάτος πυλώνα 4m είναι 8% ενώ για πλάτος πυλώνα 16m είναι 4%. Είναι εμφανής όπως και πριν η επιρροή του πλάτους πυλώνα, ωστόσο εδώ παρατηρούμε και αυξημένα ποσοστά σε σχέση με πριν.



Εικόνα 4-8: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

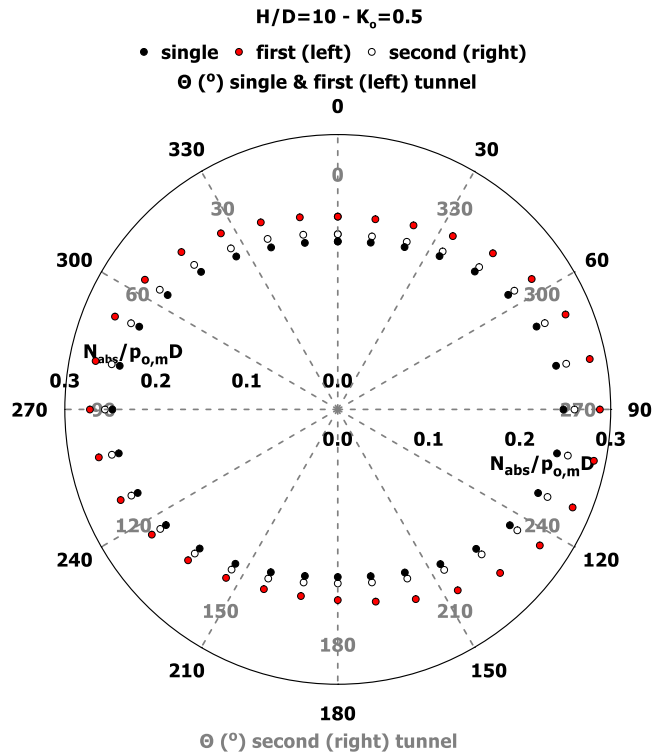


Εικόνα 4-9: Κατανομή της αξονικής δύναμης στην τυπική διατομή των σήραγγων για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.

Στο δίπλα διάγραμμα της εικόνας 4-9, βλέπουμε την κατανομή των αξονικών δυνάμεων, όπως αυτή καταλήγει, στην τυπική διατομή των σήραγγων για πλάτος πυλώνα 4m. Παρατηρείται ξανά ότι η διάνοιξη της δεξιάς σήραγγας προκαλεί αύξηση στις αξονικές δυνάμεις στην ήδη διανοιχθείσα σήραγγα σε όλη της την περιφέρεια και ειδικά στην εσωτερική παρειά, κάτι που κάνει την κατανομή ανισότροπη. Εν αντιθέσει, παρατηρείται ότι η "single" και η "second" έχουν ίδια κατανομή αξονικών δυνάμεων γύρω από την σήραγγα (η "second" φυσικά μεγαλύτερα μεγέθη, ωστόσο, χωρίς να επηρεάζεται από την ύπαρξη της αριστερής σήραγγας). Τέλος, παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις, στην στέψη και

στον πυθμένα τα μεγέθη είναι μικρότερα από ότι στις παρείες κάτι το οποίο εξηγείται λόγω της τιμής του $K_o = 0.5$

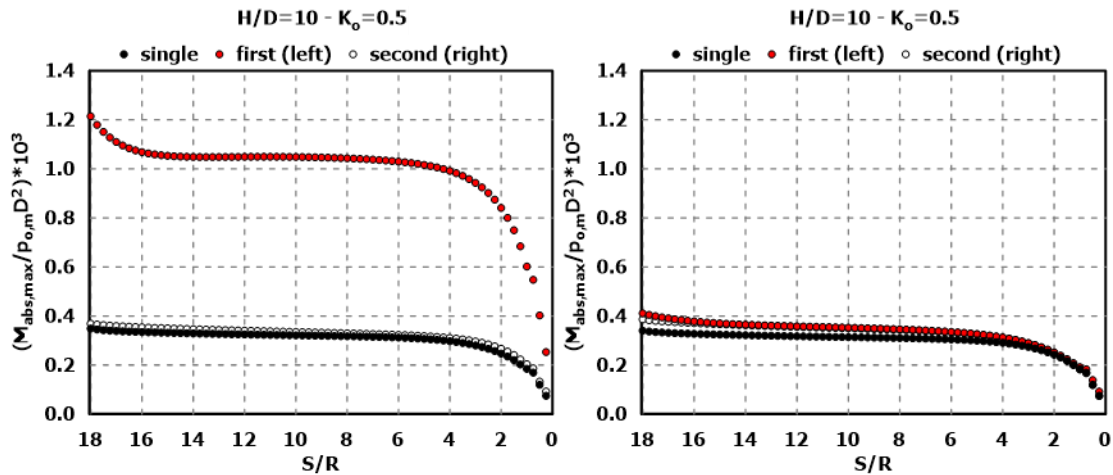
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



Εικόνα 4-10: Κατανομή της αξονικής δύναμης στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.

Στο διάγραμμα της εικόνας 4-10 βλέπουμε πως κατανέμονται οι αξονικές δυνάμεις στην προσωρινή υποστήριξη, στην τυπική διατομή των σηράγγων για πλάτος πυλώνα 16m. Παρατηρούμε ότι το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης έχει σχεδόν εξαλειφθεί και ότι και η κατανομή του φορτίου της "first" είναι σχεδόν όπως της "single" και της "second" με μία μικρή διαφοροποίηση στην εσωτερική παρειά (αύξηση του μεγέθους). Τα μεγέθη της "first" και της "second" είναι και πάλι μεγαλύτερα σε σχέση με της "single", ωστόσο η διαφορά που έχουν είναι σχεδόν αμελητέα.

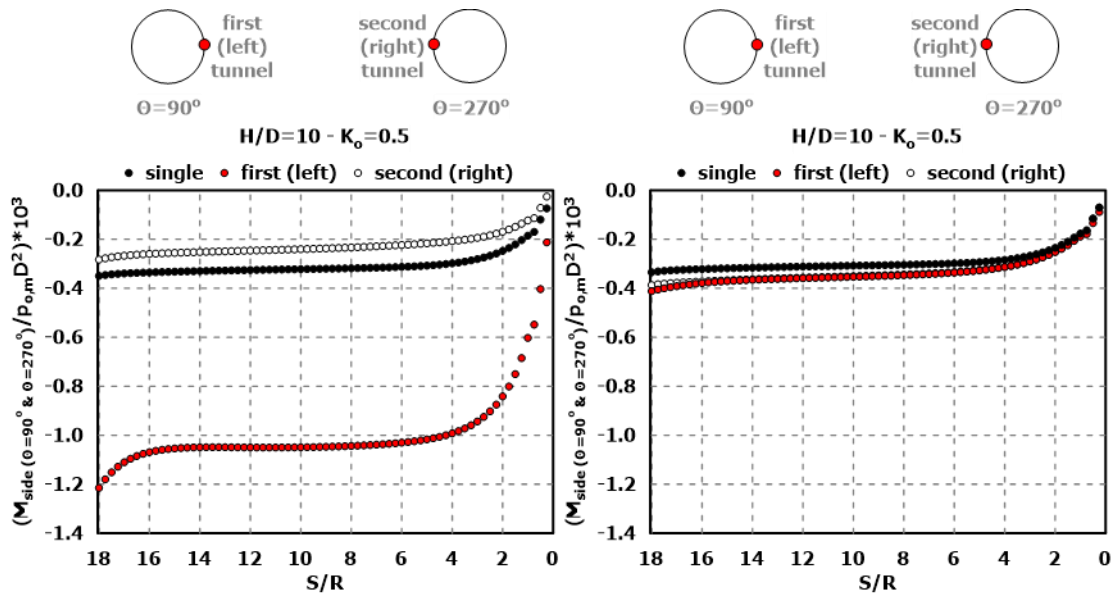
➤ Καμπτικές ροπές στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



Εικόνα 4-11: Μηκτομική απεικόνιση των καμπτικών ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας. Έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί η απόλυτη τιμή της μέγιστης καμπτικής ροπής.

Στα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 4-11 βλέπουμε την εξέλιξη των καμπτικών ροπών κατά μήκος της σήραγγας. Παρατηρείται και σε αυτό το μέγεθος αύξηση των τιμών της "first" σήραγγας σε σχέση με την "single" λόγω της διάνοιξης της "second". Όταν δε το πλάτος πυλώνα είναι 4m τα μεγέθη στην "first" σήραγγα είναι αυξημένα κατά 168% σε σχέση με την "single". Εν αντιθέσει, όσο το πλάτος πυλώνα αυξάνεται η αλληλεπίδραση εξαλείφεται, με αποτέλεσμα για πλάτος πυλώνα 16m, η αντίστοιχη ποσοστιαία αύξηση των καμπτικών ροπών στο εκτοξευόμενο να είναι 43%. Όσον αφορά στη "second" σήραγγα, η αύξηση των τιμών των καμπτικών ροπών είναι σχεδόν αμελητέα και ίδια για τις δύο περιπτώσεις πλάτους πυλώνα.

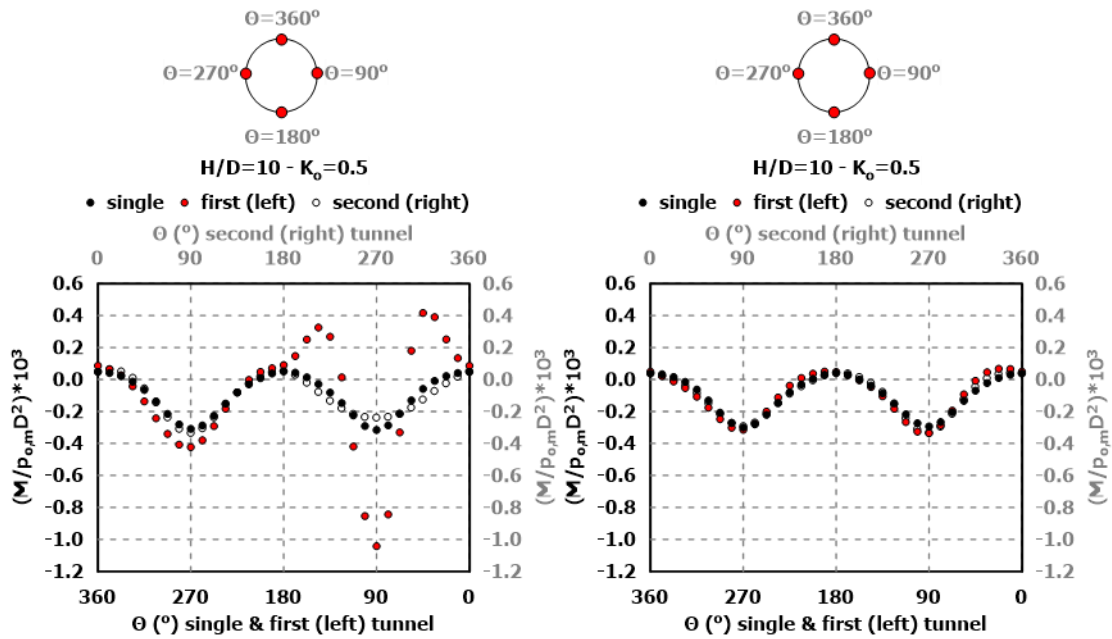
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



Εικόνα 4-12: Μηκοτομική απεικόνιση των καμπτικών ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας.

Στα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 4-12 βλέπουμε την εξέλιξη των καμπτικών ροπών στις παρειές των σηράγγων κατά μήκος της σήραγγας. Λόγω του ότι προηγουμένως (Εικόνα 4-11) παρουσιάσθηκαν οι απόλυτες μέγιστες τιμές των καμπτικών ροπών, είναι σαφές πως οι διαφορές με τα διαγράμματα της εικόνας 4-10, θα είναι μικρές, ίσως και ίδιες, όσον αφορά στις ποσοστιαίες μεταβολές μεταξύ των “*first*” και “*single*” και “*second*” και “*single*”. Έτσι, όταν το πλάτος πυλώνα είναι 4m τα μεγέθη στην “*first*” σήραγγα είναι αυξημένα κατά 168% (όπως και προηγουμένως δηλαδή) σε σχέση με την “*single*”. Εν αντιθέσει, όσο το πλάτος πυλώνα αυξάνεται η αλληλεπίδραση εξαλείφεται, με αποτέλεσμα για πλάτος πυλώνα 16m, η αντίστοιχη ποσοστιαία αύξηση των καμπτικών ροπών στο εκτοξευόμενο να είναι 43% (επίσης, ως προηγουμένως). Ωστόσο, όσον αφορά στη “*second*” σήραγγα, παρατηρείται διαφοροποίηση της καμπτικής ροπής για πλάτος πυλώνα 4m, κάτι που σημαίνει ότι την μέγιστη τιμή τους για την “*second*”, οι καμπτικές ροπές δεν την εμφανίζουν στην εσωτερική παρειά. Επίσης, κατ’ απόλυτη τιμή έχει μικρότερο μέγεθος, με αποτέλεσμα να υπάρχει ποσοστιαία μείωση των ροπών κατά 21%. Τέλος, για πλάτος πυλώνα 16m η μεταβολή (αυξητική) των τιμών των καμπτικών ροπών της “*second*” είναι σχεδόν αμελητέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



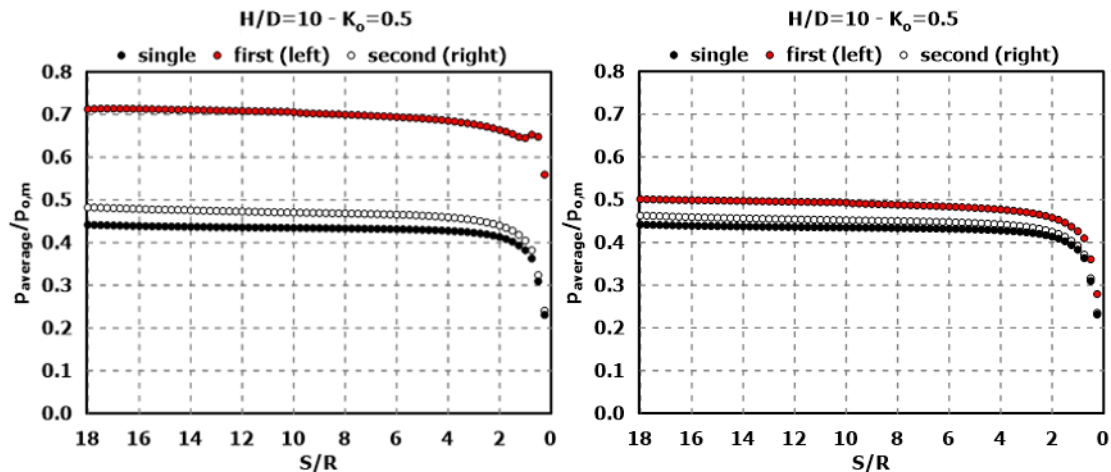
Εικόνα 4-13: Κατανομή των καμπτικών ροπών στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας.

Στο παραπάνω διάγραμμα της εικόνας 4-13 βλέπουμε την κατανομή των καμπτικών ροπών, όπως αυτή καταλήγει, στην τυπική διατομή των σηράγγων, δηλαδή όταν έχει επέλθει ισορροπία στη σήραγγα, για πλάτη πυλώνα 4m και 16m. Υπάρχουν τέσσερις άξονες τοποθετημένοι στα διαγράμματα αυτού του τύπου, κι ο λόγος είναι όπως έχει ήδη εξηγηθεί είναι η φορά μέτρησης των γωνιών στις δύο σήραγγες. Παρατηρούμε ότι η μορφή της κατανομής της "first", στο εσωτερικό ημικύκλιο της διατομής της σήραγγας, είναι διαφορετική από των "single" και "second", δηλαδή, περίπου στις 200° και 300° η "first" εμφανίζει θετικές ροπές αρκετά μεγαλύτερες απ' ότι στις "single" και "second". Παρατηρείται ξανά ότι η διάνοιξη της δεξιάς σήραγγας προκαλεί αύξηση στις καμπτικές ροπές στην ήδη διανοιχθείσα σήραγγα, ωστόσο για αυτό το μέγεθος η αύξηση είναι πολύ μικρή στην υπόλοιπη περιφέρεια και έχει μεγάλη διαφορά στην εσωτερική παρειά της "first", λαμβάνοντας την μέγιστη κατ' απόλυτη τιμή (με πρόσημο ελάχιστη τιμή) ακριβώς και πάλι για γωνία 90°. Εν αντιθέσει, με τα φορτία και τις αξονικές δυνάμεις, οι καμπτικές ροπές της "second" εμφανίζουν ελάχιστες διαφορές σε σχέση με της "single" κυρίως στην εσωτερική παρειά της σήραγγας. Όσον αφορά στο πλάτος πυλώνα 16m οι καμπτικές ροπές εμφανίζονται σχεδόν ίδιες και στις τρεις περιπτώσεις σηράγγων με μικρή διαφοροποίηση για την "first" στην εσωτερική παρειά της σήραγγας.

4.1.2 Διάνοιξη της Δεξιάς Σήραγγας Όταν η Αριστερή Βρίσκεται στη Μέση

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα της κατηγορίας αναλύσεων κατά την οποία, η δεξιά σήραγγα ξεκίνησε να διανοίγεται όταν η αριστερή βρισκόταν στην μέση, ήτοι $Y/R=10$. Θα πραγματοποιηθεί σύγκριση της ανάλυσης της ενότητας αυτής με την σειρά αναλύσεων της ενότητας 4.1.1 με σκοπό να διερευνηθεί η σχετική απόσταση μεταξύ των δύο μετώπων. Αξίζει να υπενθυμιστεί ότι ως "single" σε αυτήν την ανάλυση θεωρήθηκε η "single" της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1.

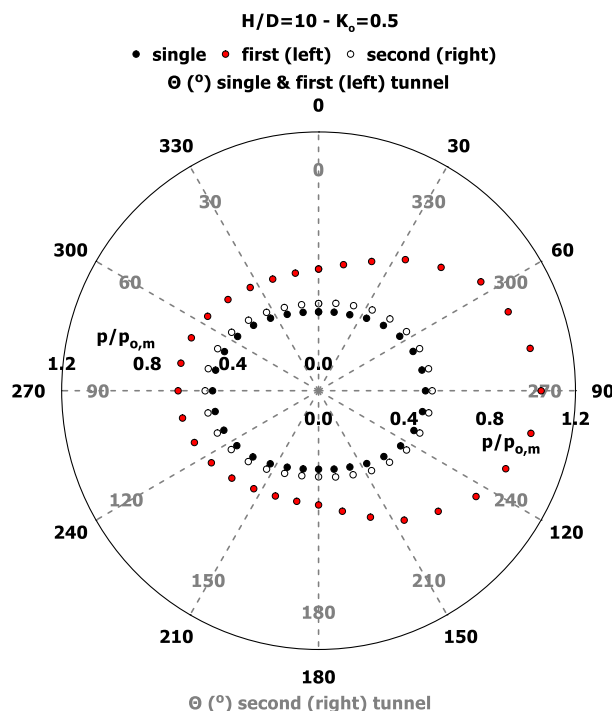
➤ Φορτίο στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



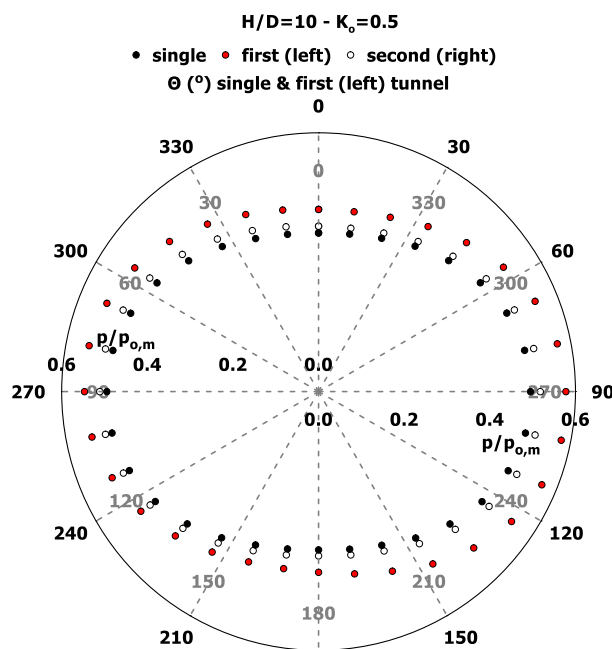
Εικόνα 4-14: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.

Στα διαγράμματα της εικόνας 4-14 παρουσιάζονται οι μηκοτομικές κατανομές του μέσου όρου των φορτίων στην προσωρινή υποστήριξη και για τις τρεις περιπτώσεις. Γίνεται σαφές και σε αυτήν την ανάλυση πόσο σημαντικός παράμετρος είναι το πλάτος πυλώνα. Έτσι, για πλάτος πυλώνα 4m η "first" έχει αυξημένα φορτία στο εκτοξευόμενο κατά 69% σε σχέση με τη "single" και η "second" 17%, εν αντιθέσει για πλάτος πυλώνα 16m το αντίστοιχο ποσοστό για τη "first" είναι 8% και για τη "second" 7%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



Εικόνα 4-15: Κατανομή του φορτίου στην τυπική διατομή των σπράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.

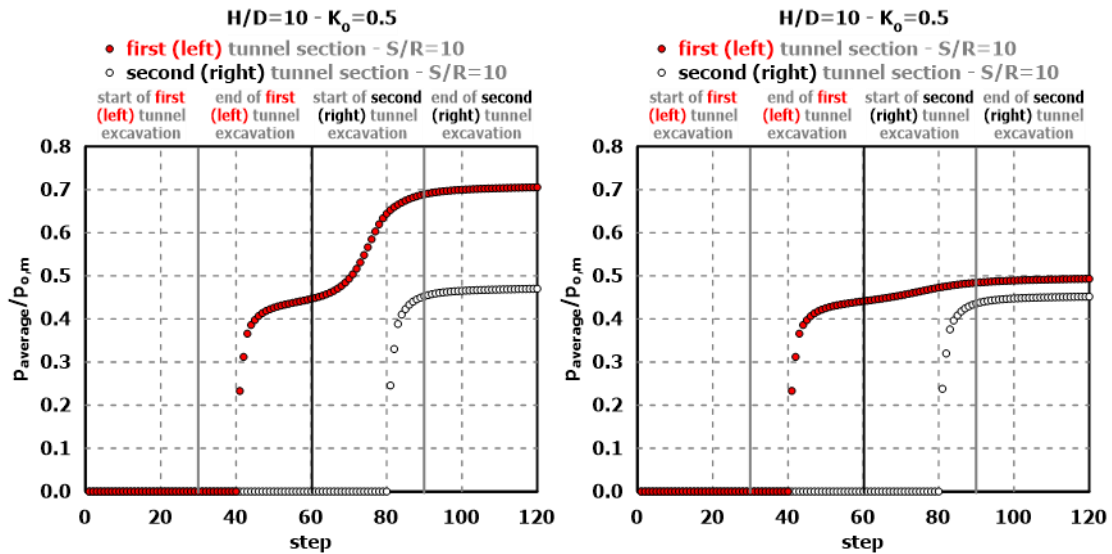


Εικόνα 4-16: Κατανομή του φορτίου στην τυπική διατομή των σπράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.

Στο διάγραμμα της εικόνας 4-15 βλέπουμε πως κατανέμεται το φορτίο στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην τυπική διατομή των σπράγγων για πλάτος πυλώνα 4m, ενώ στο διάγραμμα της εικόνας 4-16 για πλάτος πυλώνα 16m. Με τη χρήση αυτών των διαγραμμάτων και των αντίστοιχων της ενότητας 4.1.1, [Εικόνα 4-3](#) και [Εικόνα 4-4](#) θα διερευνηθεί η παράμετρος της σχετικής απόστασης των μετώπων. Με μία πρώτη ματιά αξίζει να σημειωθεί, ότι η “*first*” και η “*second*” ακολουθούν τις κατανομές της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1, ειδικά για $W/D=0.5$ και για την “*first*”, στην εσωτερική παρειά το φαινόμενο είναι εντονότερο και φυσικά όσο το πλάτος πυλώνα αυξάνεται τόσο η κατανομή τείνει γίνει όπως αυτή της “*single*” και της “*second*”.

Συγκριτικά με τα διαγράμματα λοιπόν, της [Εικόνας 4-3](#) και της [Εικόνας 4-4](#), η διάνοιξη της δεξιάς σπράγγας όταν η αριστερή είναι στη μέση και όχι στο τέλος, δεν επέφερε ουδεμία μεταβολή στα μεγέθη των φορτίων που καλείται να παραλάβει η προσωρινή υποστήριξη.

➤ Χρονοϊστορίες των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

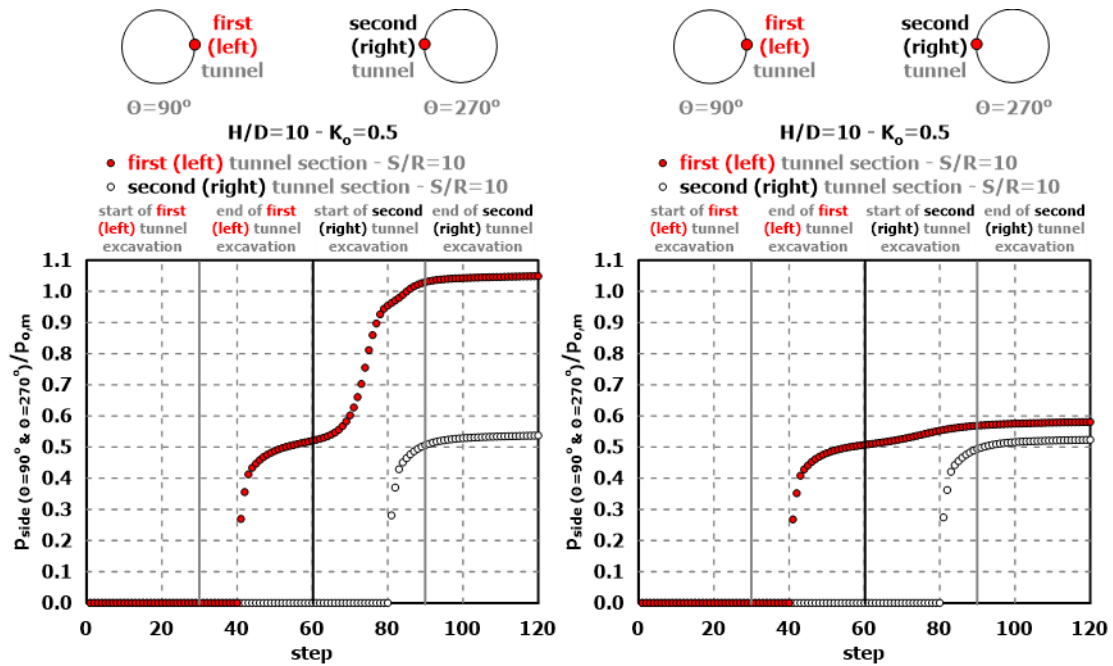


Εικόνα 4-17: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0,5$ και δεξιά $W/D=2$, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.

Στην διαγράμματα της εικόνας 4-17 παρατηρούμε την χρονική εξέλιξη των φορτίων που καλείται να παραλάβει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$ για τις δύο περιπτώσεις, τη “first” και τη “second” σήραγγα. Με τη βοήθεια των αντίστοιχων διαγραμμάτων της [Εικόνας 4-5](#), της ενότητας 4.1.1, θα εξάγουμε συμπεράσματα αναφορικά με την επιρροή της σχετικής απόστασης των σηράγγων.

Η μορφή των καμπυλών είναι ακριβώς ίδια με την ανάλυση της ενότητας 4.1.1 και μάλιστα παρατηρούμε και εδώ ότι οι τιμές στα φορτία δεν έχουν ουδεμία μεταβολή σε σχέση με τη βάση αναλύσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

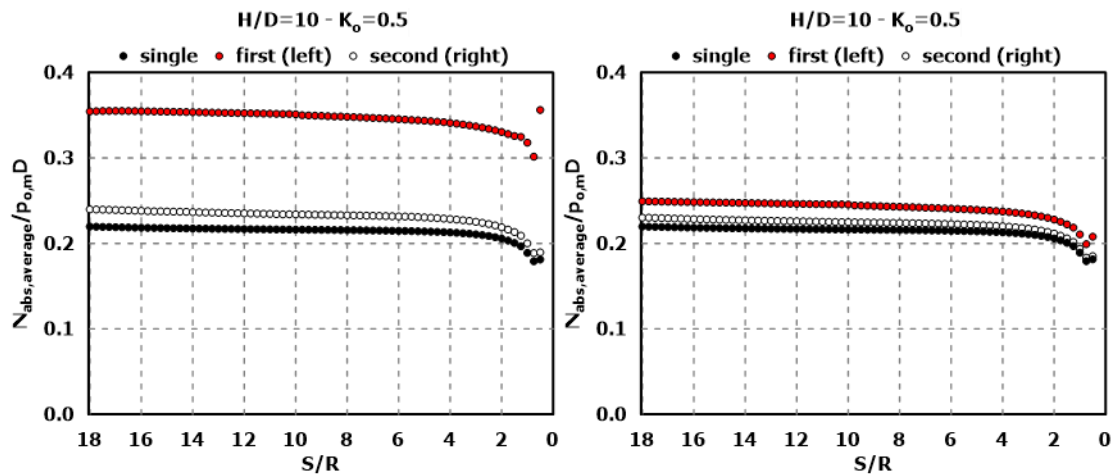


Εικόνα 4-18: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0,5$ και δεξιά $W/D=2$, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.

Στην διαγράμματα της εικόνας 4-18 παρατηρούμε την χρονική εξέλιξη των φορτίων που καλείται να παραλάβει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$ για τις δύο περιπτώσεις, τη "first" και τη "second" σήραγγα. Με τη βοήθεια των αντίστοιχων διαγραμμάτων της [Εικόνας 4-6](#), της ενότητας 4.1.1, θα σχολιαστεί η επιρροή της σχετικής απόστασης των μετώπων των δύο σηράγγων. Επιβεβαιώνεται και εδώ ότι στην παρούσα ανάλυση δεν έχει επέλθει ουδεμία μεταβολή στα φορτία που καλείται να παραλάβει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε σχέση με την ανάλυση κατά την οποία η δεξιά σήραγγα ξεκινά να εκσκάπτεται μετά το πέρας της αριστερής.

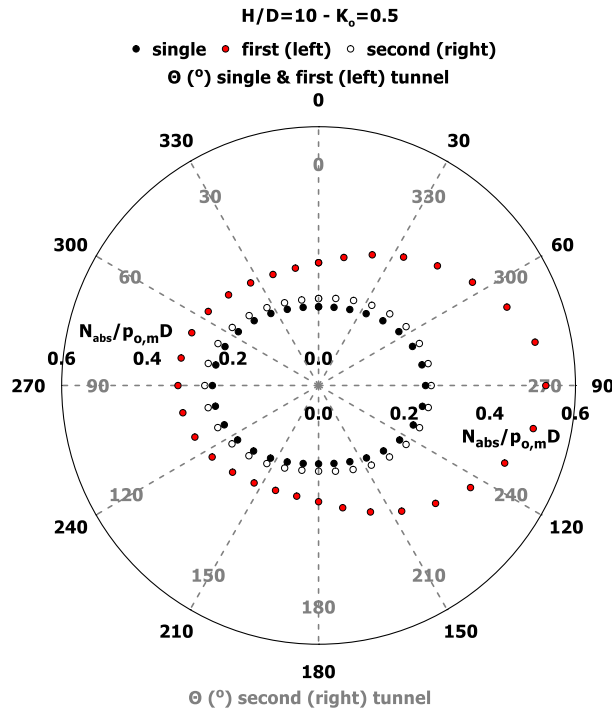
➤ Αξονικές δυνάμεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι κατανομές των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην προσωρινή υποστήριξη κατά μήκος των σηράγγων και για τις τρεις περιπτώσεις. Παρατηρείται αύξηση της αξονικής δύναμης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της "first" σήραγγας σε σχέση με την "single" λόγω της διάνοιξης της "second" και πιο συγκεκριμένα για πλάτος πυλώνα 4m τα μεγέθη στην "first" σήραγγα είναι αυξημένα κατά 59% σε σχέση με την "single" και η "second" 9%, ενώ για πλάτος πυλώνα 16m η "first" κατά 14% και η "second" 4%.

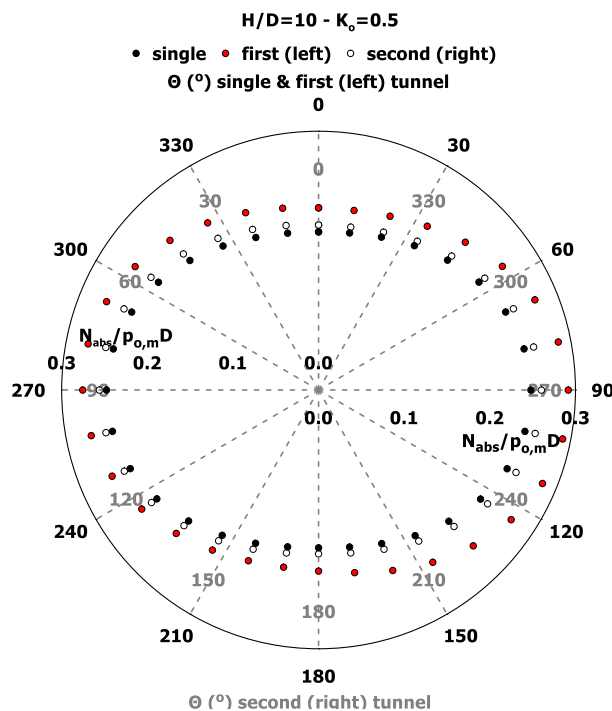


Εικόνα 4-19: Μηκτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



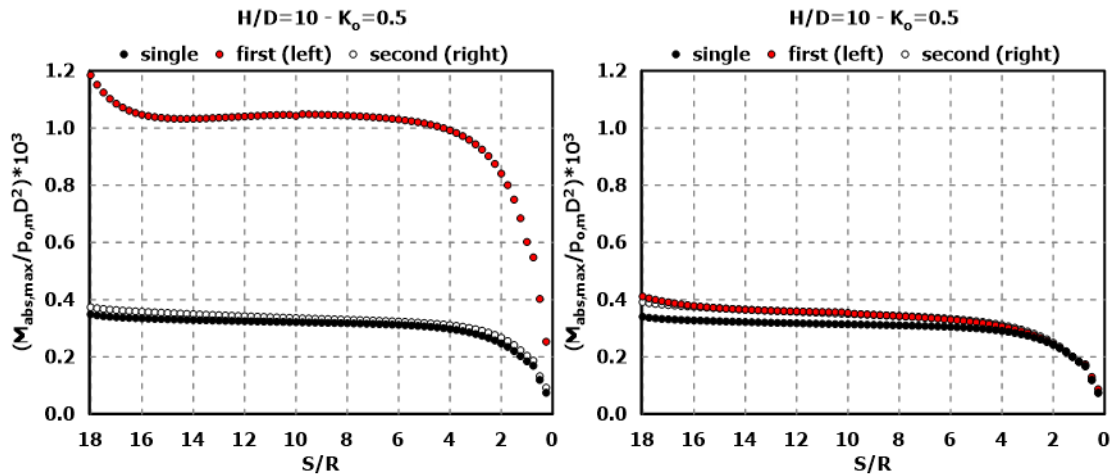
Εικόνα 4-20: Κατανομή της αξονικής δύναμης στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 4-21: Κατανομή της αξονικής δύναμης στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.

Στο διάγραμμα της εικόνας 4-20 βλέπουμε πως κατανέμονται οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην τυπική διατομή των σηράγγων για πλάτος πυλώνα 4m, ενώ στο διάγραμμα της εικόνας 4-21 για πλάτος πυλώνα 16m. Με τη χρήση αυτών των διαγραμμάτων και των αντίστοιχων της ενότητας 4.1.1, [Εικόνα 4-9](#) και [Εικόνα 4-10](#) θα διερευνηθεί η επιρροή της σχετικής απόστασης των μετώπων στις αξονικές δυνάμεις. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι η διάνοιξη της δεξιάς σήραγγας όταν η αριστερή είναι στη μέση και όχι στο τέλος, δεν επέφερε ουδεμία μεταβολή ούτε στις αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην προσωρινή υποστήριξη.

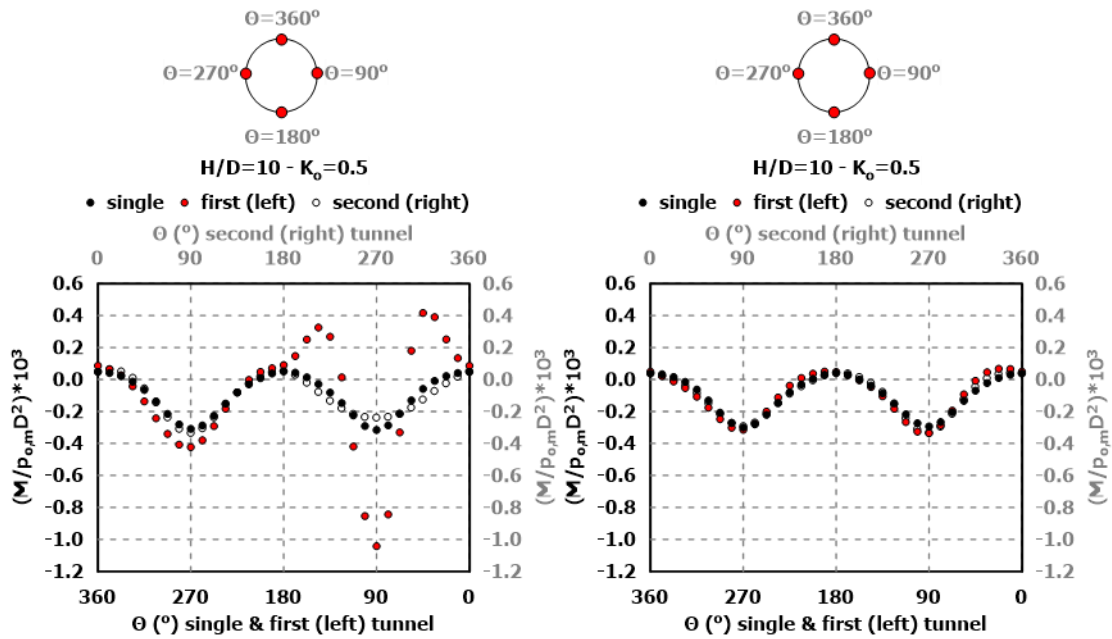
➤ Καμπτικές ροπές στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



Εικόνα 4-22: Μηκοτομική απεικόνιση των καμπτικών ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας. Έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί η απόλυτη τιμή της μέγιστης καμπτικής ροπής.

Στα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 4-22 παρατηρούμε την μηκοτομική απεικόνιση των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται στην προσωρινή υποστήριξη και για τις τρεις περιπτώσεις. Παρατηρείται αύξηση της καμπτικής ροπής που αναπτύσσεται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της "first" σήραγγας σε σχέση με την "single" λόγω της διάνοιξης της "second" και πιο συγκεκριμένα για πλάτος πυλώνα 4m τα μεγέθη στην "first" σήραγγα είναι αυξημένα κατά 168% σε σχέση με την "single", ενώ για πλάτος πυλώνα 16m η "first" κατά 43%. Όσον αφορά στη "second" σήραγγα, η αύξηση των τιμών των καμπτικών ροπών είναι σχεδόν αμελητέα και περίπου ίδια για τις δύο περιπτώσεις πλάτους πυλώνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



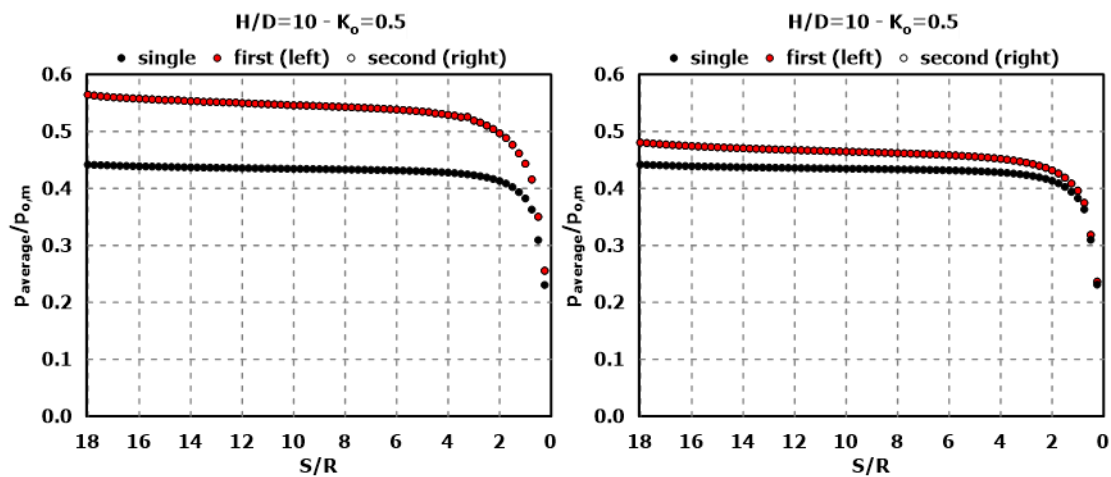
Εικόνα 4-23: Κατανομή των καμπτικών ροπών στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας.

Στα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 4-23 βλέπουμε τις κατανομές των καμπτικών ροπών στην τυπική διατομή για τις τρεις περιπτώσεις των σηράγγων για πλάτη πυλώνα 4m και 16m. Με τη βοήθεια των αντίστοιχων διαγραμμάτων της [Εικόνας 4-13](#) της ενότητας 4.1.1, θα σχολιαστεί η επιρροή της σχετικής απόστασης των μετώπων. Παρατηρούμε και εδώ, ότι η διάνοιξη της δεξιάς σήραγγας όταν η αριστερή είναι στη μέση και όχι στο τέλος, όπως δεν επέφερε ουδεμία μεταβολή ούτε στα φορτία αλλά ούτε και στις αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην προσωρινή υποστήριξη, έτσι, δεν άλλαξε τίποτα και στις καμπτικές ροπές.

4.1.3 Ταυτόχρονη Διάνοιξη των Δύο Σηράγγων

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα της κατηγορίας αναλύσεων κατά την οποία, οι δύο σήραγγες διανοίχθηκαν ταυτόχρονα, δηλαδή $Y/R=0$. Θα πραγματοποιηθεί σύγκριση της ανάλυσης της ενότητας αυτής με την σειρά αναλύσεων της ενότητας 4.1.1 με σκοπό να διερευνηθεί η σχετική απόσταση μεταξύ των δύο μετώπων. Αξίζει να υπενθυμιστεί ότι ως “single” σε αυτήν την ανάλυση θεωρήθηκε η “single” της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1.

➤ Φορτίο στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



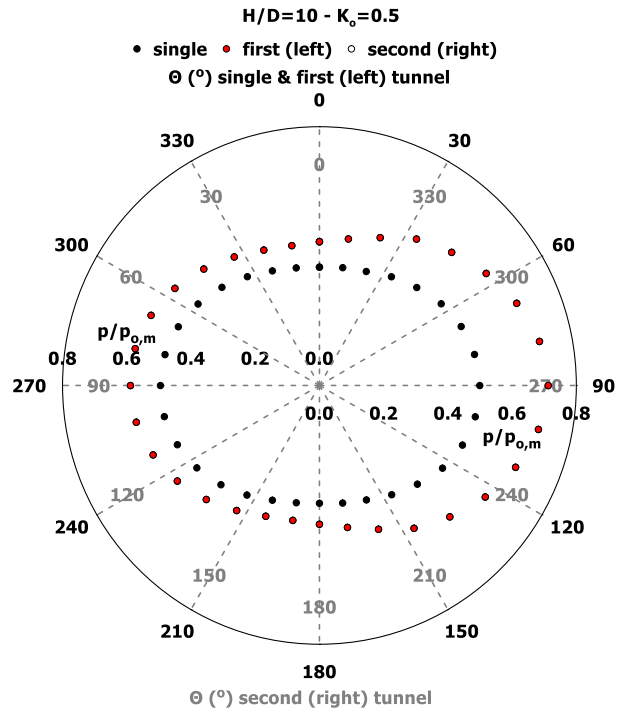
Εικόνα 4-24: Μηκομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.

Στα διαγράμματα της εικόνας 4-24 παρουσιάζονται οι κατανομές του μέσου όρου των φορτίων στην προσωρινή υποστήριξη κατά μήκος των σηράγγων και για τις τρεις περιπτώσεις. Προφανώς, τα μεγέθη της “first” και της “second” ταυτίζονται. Παρατηρείται για μία ακόμη φορά η επιρροή του πλάτους πυλώνα στη διάνοιξη δίδυμων σηράγγων καθώς όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ των δύο σηράγγων τόσο μικρότερο φορτίο καλείται να παραλάβει η προσωρινή υποστήριξη. Έτσι, για πλάτος πυλώνα 4m η “first” και η “second” έχουν αυξημένα τα φορτία στο εκτοξευόμενο κατά 32%, εν αντιθέσει για πλάτος πυλώνα 16m το αντίστοιχο ποσοστό είναι 11%.

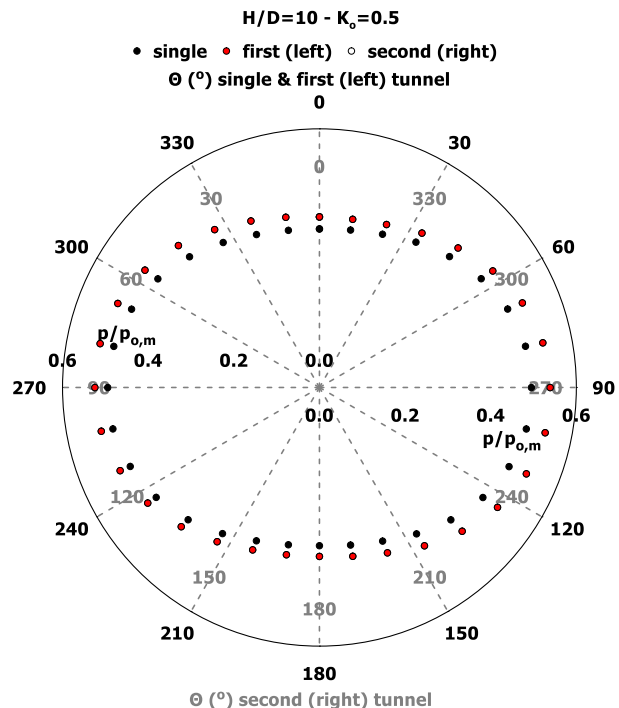
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Στα διαγράμματα της εικόνας 4-25 και της εικόνας 4-26 βλέπουμε πως κατανέμεται το φορτίο στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην τυπική διατομή (αφότου έχει επέλθει ισορροπία) των σηράγγων για πλάτος πυλώνα 4m και 16m αντίστοιχα. Με τη χρήση αυτών των διαγραμμάτων και των αντίστοιχων της ενότητας 4.1.1, [Εικόνα 4-3](#) και [Εικόνα 4-4](#), θα διερευνηθεί η παράμετρος της σχετικής απόστασης των μετώπων.

Η ταυτόχρονη διάνοιξη, λοιπόν, προκαλεί μικρότερα φορτία στην προσωρινή υποστήριξη σε σχέση με τη διάνοιξη πρώτα της αριστερής σήραγγας κι έπειτα της δεξιάς. Για την ακρίβεια, στην παρούσα ανάλυση η μέγιστη τιμή που εμφανίζει η "first" στην τυπική διατομή (δηλαδή στην εσωτερική παρειά) για πλάτος πυλώνα 4m είναι $p/p_{0,m} = 0.72$, ενώ η αντίστοιχη για την ανάλυση της ενότητας 4.1.1 είναι $p/p_{0,m} = 0.92$. Αντίθετα, η "second" εμφανίζει αυξημένα φορτία σε σχέση με την ανάλυση της ενότητας 4.1.1, δηλαδή, από το διάγραμμα της εικόνας 4-21 λαμβάνουμε πάλι για την εσωτερική παρειά $p/p_{0,m} = 0.72$, ενώ από το διάγραμμα της εικόνας 4-3 $p/p_{0,m} = 0.47$. Αντίθετα, για πλάτος πυλώνα 16m τα μεγέθη είναι σχεδόν ίδια με ελαφρώς μικρότερα, προφανώς για την παρούσα ανάλυση. Η διαφορά είναι της τάξης των $0.03 p/p_{0,m}$.

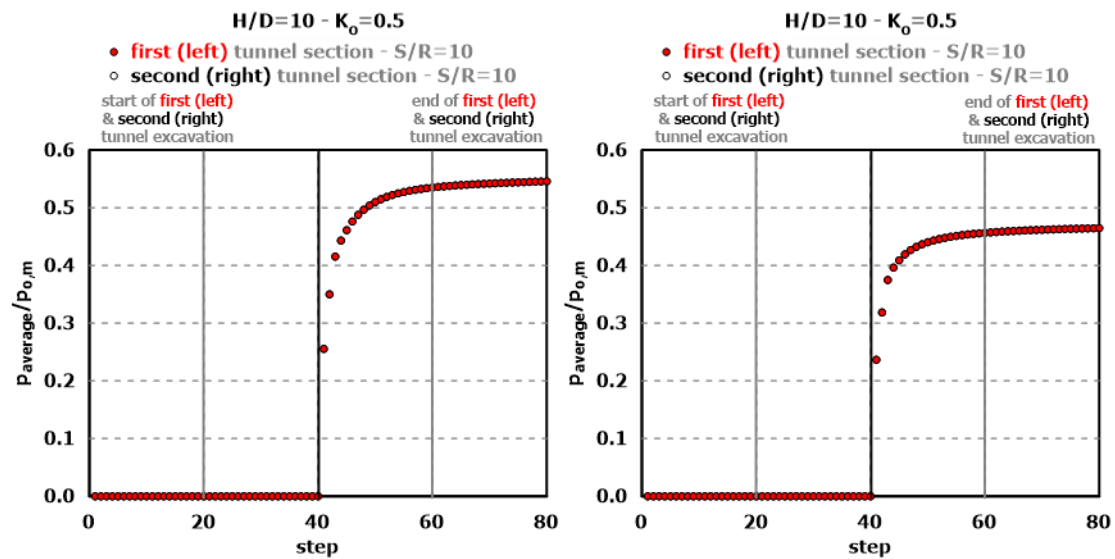


Εικόνα 4-25: Κατανομή του φορτίου στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.



Εικόνα 4-26: Κατανομή του φορτίου στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.

➤ Χρονοϊστορίες των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

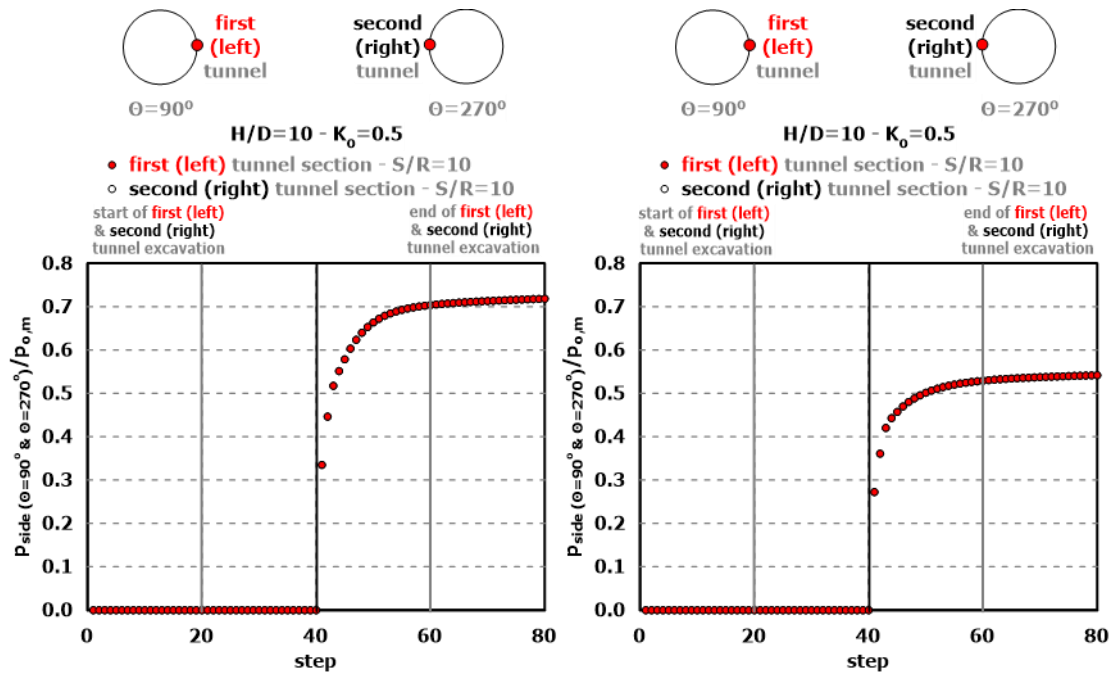


Εικόνα 4-27: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.

Στην διαγράμματα της εικόνας 4-27 παρατηρούμε την χρονική εξέλιξη των φορτίων που καλείται να παραλάβει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$ για τις δύο περιπτώσεις, τη "first" και τη "second" σήραγγα. Με τη βοήθεια των αντίστοιχων διαγραμμάτων της [Εικόνας 4-5](#), της ενότητας 4.1.1, θα εξάγουμε συμπεράσματα αναφορικά με την επιρροή της σχετικής απόστασης των σηράγγων.

Αρχικά, παρατηρούμε ότι η μορφή των καμπυλών είναι παρόμοια με την αντίστοιχη της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1. Η διαφορά της έχει να κάνει ότι εδώ οι δύο σήραγγες εκσκάπτονται ταυτόχρονα, έτσι μέχρι το βήμα 41, που τοποθετείται το εκτοξευόμενο στην υπό εξέταση διατομή, δεν υπάρχουν φορτία, ενώ, από το 41 έως το 80, που τελειώνει η εκσκαφή των δύο σηράγγων, παρατηρείται ομαλή ανάπτυξη των φορτίων έως την τελική ισορροπία της διατομής. Ωστόσο, εδώ τα μεγέθη για την "first" είναι σημαντικά μειωμένα σε σχέση με της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1 και για τα δύο πλάτη πυλώνα. Για την ακρίβεια η τελική τιμή που λαμβάνει η "first" για πλάτος πυλώνα 4m εδώ, είναι $p_{average}/p_{0,m} = 0.55$, δηλαδή μειωμένη κατά 21% σε σχέση με την αντίστοιχη "first" της ενότητας 4.1.1 που έλαβε την τιμή $p_{average}/p_{0,m} = 0.70$. Για πλάτος πυλώνα 16m το ποσοστό αυτό ανέρχεται μόλις στο 6%. Αντίθετα, η "second" λόγω της ισοκατανομής πλέον των φορτίων στις δύο σήραγγες, εμφανίζει αυξημένα μεγέθη σε σχέση με πριν αλλά μόνο για τις αναλύσεις που επηρεάζει το πλάτος πυλώνα. Έτσι, για πλάτος πυλώνα 4m η αύξηση στην παρούσα ανάλυση είναι περίπου 15% ενώ, για πλάτος πυλώνα 16m δεν υπάρχει καμία ουσιαστική μεταβολή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

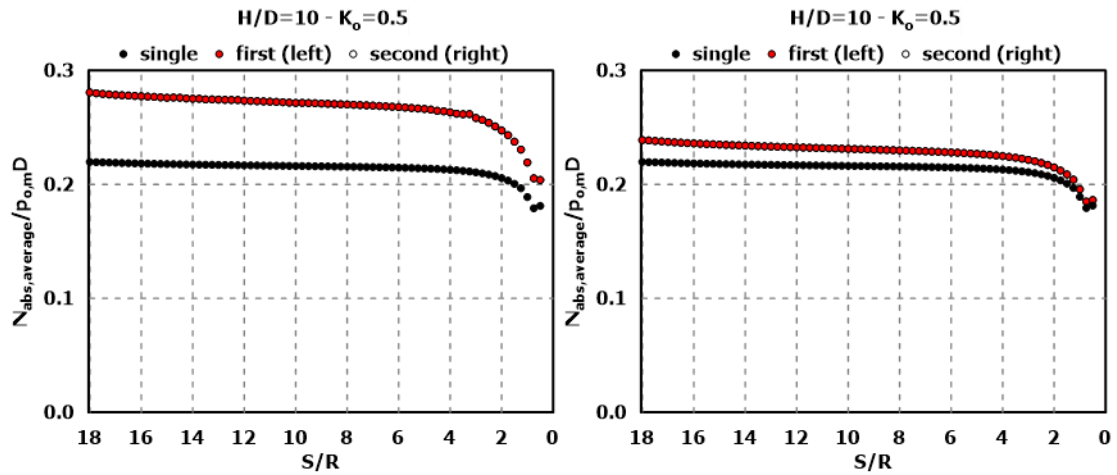


Εικόνα 4-28: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.

Στην διαγράμματα της εικόνας 4-28 παρατηρούμε την χρονική εξέλιξη των φορτίων που καλείται να παραλάβει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$ για τις δύο περιπτώσεις, τη "first" και τη "second" σήραγγα. Με τη βοήθεια των αντίστοιχων διαγραμμάτων της [Εικόνας 4-6](#), της ενότητας 4.1.1, θα σχολιαστεί η επιρροή της σχετικής απόστασης των μετώπων των δύο σηράγγων. Όσον αφορά στην μορφή των καμπυλών και το μέγεθος των τιμών ισχύουν όσα αναφέρθηκαν στην εικόνα 4-27. Οι τιμές εδώ είναι σαφώς αυξημένες σε σχέση με τις τιμές της εικόνας 4-27 κι ο λόγος έχει ήδη αναφερθεί.

Η ποσοστιαία μεταβολή που υπάρχει στη "single" στην παρούσα ανάλυση για πλάτος πυλώνα 4m, σε σχέση με την αντίστοιχη της ενότητας 4.1.1, είναι 32%, ενώ για πλάτος πυλώνα 16m 10%. Αντίθετα, η "second" παρουσιάζει αύξηση 34% για πλάτος πυλώνα 4m ενώ, για πλάτος πυλώνα 16m είναι αμελητέα.

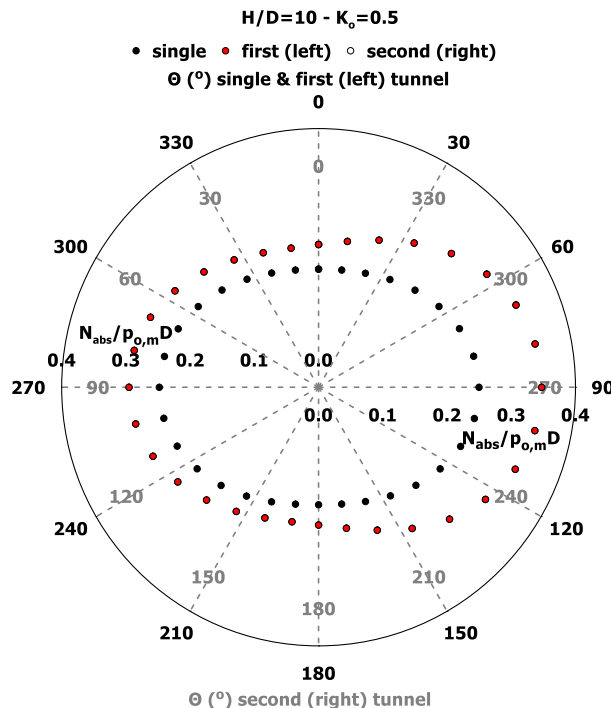
➤ Αξονικές δυνάμεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



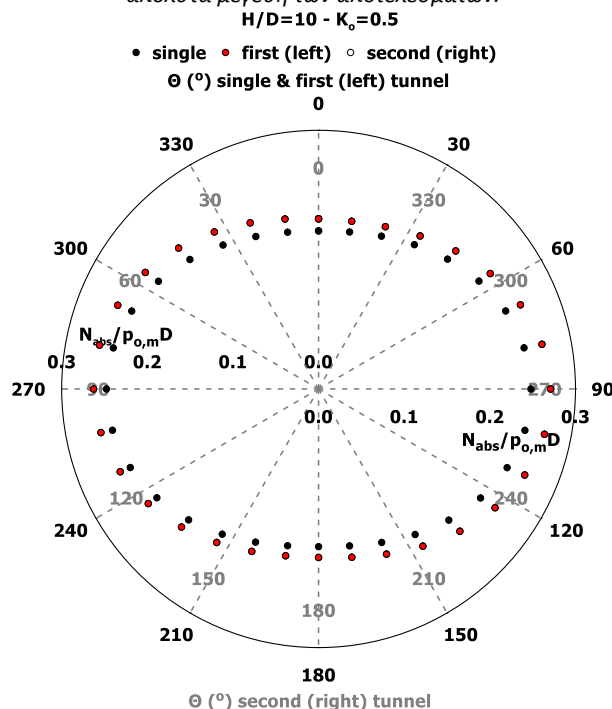
Εικόνα 4-29: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων.

Στα διαγράμματα της εικόνας 4-29 παρουσιάζονται οι αξονικές δυνάμεις όπως αυτές διαμορφώνονται κατά μήκος της σήραγγας. Επιβεβαιώνεται για μία ακόμη φορά η επιρροή του πλάτους πυλώνα στη διάνοιξη δίδυμων σηράγγων. Δηλαδή, για πλάτος πυλώνα 4m η αύξηση των αξονικών δυνάμεων των “*first*” και “*second*” σε σχέση με την “*single*” είναι 27% ενώ για πλάτος πυλώνα 16m είναι μόλις 9%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



Εικόνα 4-30: Κατανομή της αξονικής δύναμης στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.



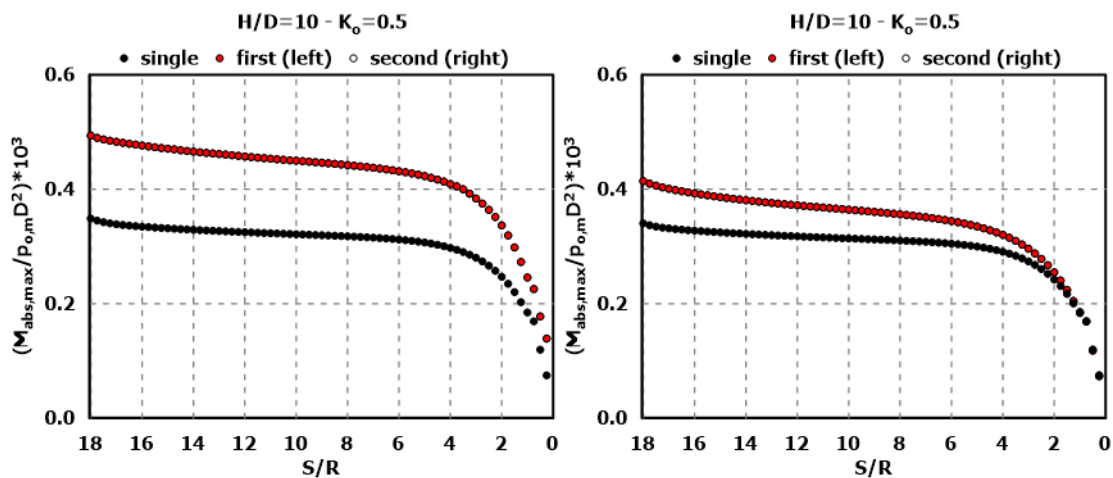
Εικόνα 4-31: Κατανομή της αξονικής δύναμης στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα $W/D=2$. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.

Στα διαγράμματα της εικόνας 4-30 και εικόνας 4-31 αποτυπώνεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων στην τυπική διατομή για τις τρεις περιπτώσεις των σηράγγων για πλάτη πυλώνα 4m και 16m. Για να σχολιαστεί η επιρροή της σχετικής απόστασης των μετώπων θα χρησιμοποιηθούν τα διαγράμματα της ενότητας 4.1.1, [Εικόνα 4-9](#) και [Εικόνα 4-10](#).

Παρατηρούμε ότι, η ταυτόχρονη διάνοιξη προκαλεί και μικρότερες αξονικές δυνάμεις στην προσωρινή υποστήριξη σε σχέση με τη διάνοιξη με ετεροχρονισμένη διάνοιξη. Για την ακρίβεια, στην παρούσα ανάλυση η μέγιστη τιμή που εμφανίζει η "first" στην τυπική διατομή (δηλαδή στην εσωτερική παρειά) είναι $N_{abs}/\rho_{0,m}D = 0.35$, ενώ η αντίστοιχη για την ανάλυση της ενότητας 4.1.1 είναι $N_{abs}/\rho_{0,m}D = 0.55$. Αντίθετα, η "second" εμφανίζει αυξημένα φορτία σε σχέση με την ανάλυση της ενότητας 4.1.1, δηλαδή, από το διάγραμμα της εικόνας 4-24 λαμβάνουμε πάλι για την εσωτερική παρειά $N_{abs}/\rho_{0,m}D = 0.35$, ενώ από το διάγραμμα της εικόνας 4-7 $N_{abs}/\rho_{0,m}D = 0.25$. Αντίθετα, για πλάτος πυλώνα 16m τα μεγέθη είναι σχεδόν ίδια με ελαφρώς μικρότερα, προφανώς για την παρούσα ανάλυση. Η διαφορά είναι της τάξης των $0.02 N_{abs}/\rho_{0,m}D$.

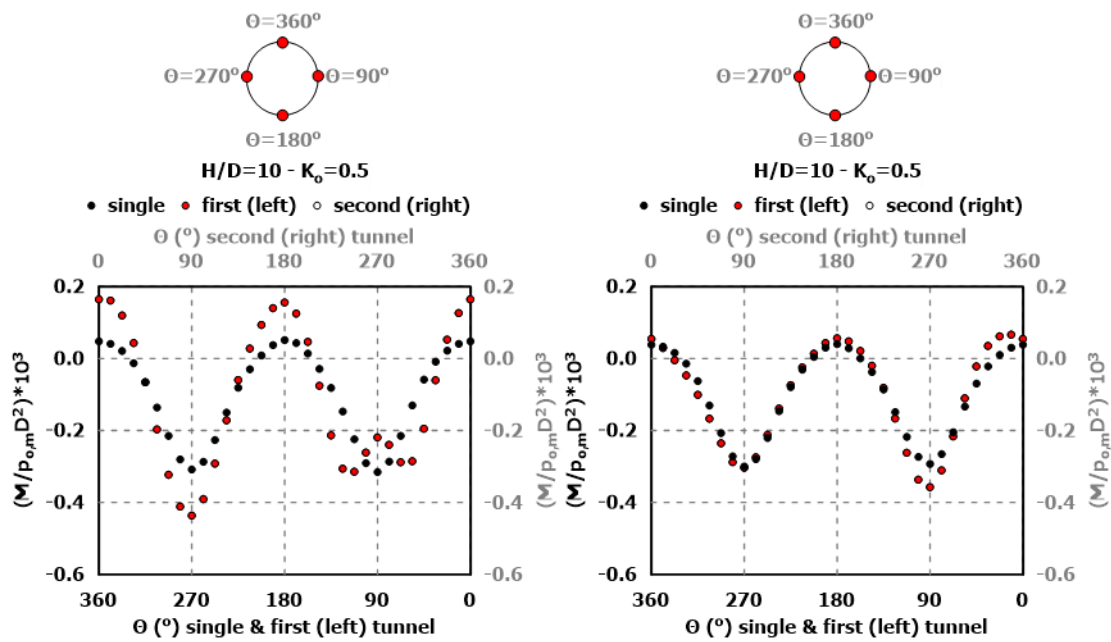
➤ Καμπτικές ροπές στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Στα παρακάτω διαγράμματα της εικόνας 4-32 απεικονίζονται οι καμπτικές ροπές κατά μήκος της σήραγγας. Παρόλο που το μέγεθος αυτό έχει ιδιάζουσα συμπεριφορά συγκλίνει ωστόσο, στα όσα συζητήθηκαν για τα φορτία και τις αξονικές δυνάμεις. Για την ακρίβεια εδώ τα ποσοστά διαμορφώνονται ως εξής, για πλάτος πυλώνα 4m η αύξηση των αξονικών δυνάμεων των "first" και "second" σε σχέση με την "single" είναι 50% ενώ για πλάτος πυλώνα 16m είναι μόλις 19%. Παρατηρούμε ότι οι ροπές εμφανίζουν μεγαλύτερα ποσοστά σε σχέση με τα φορτία και τις αξονικές δυνάμεις.



Εικόνα 4-32: Μηκτομική απεικόνιση των καμπτικών ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας. Έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί η απόλυτη τιμή της μέγιστης καμπτικής ροπής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

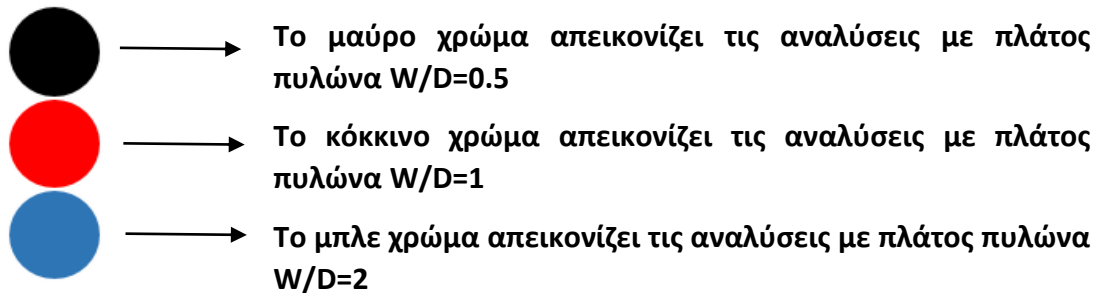


Εικόνα 4-33: Κατανομή των καμπτικών ροπών στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0,5$ και δεξιά $W/D=2$. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας.

Στα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 4-33 βλέπουμε τις κατανομές των καμπτικών ροπών στην τυπική διατομή για τις τρεις περιπτώσεις των σηράγγων για πλάτη πυλώνα 4m και 16m. Με τη βοήθεια των αντίστοιχων διαγραμμάτων της [Εικόνας 4-13](#) της ενότητας 4.1.1, θα σχολιαστεί η επιρροή της σχετικής απόστασης των μετώπων. Για πλάτος πυλώνα 4m οι “*first*” και “*second*” στην εσωτερική παρειά δεν ακολουθούν την συνηθισμένη κατανομή όπως στις προηγούμενες αναλύσεις και μάλιστα ακριβώς στις 90° για την αριστερή και 270° για την δεξιά αντί να εμφανίζει την μέγιστη τιμή εκείνη μειώνεται, εμφανίζοντας μέγιστη τιμή στις 270° της αριστερής και 90° της δεξιάς. Εν αντιθέσει, για πλάτος πυλώνα 16m, που η αλληλεπίδραση των δύο σηράγγων θεωρείται αμελητέα, η κατανομή ακολουθεί την κλασική της μορφή και για την ακρίβεια τα αποτελέσματα είναι σχεδόν ίδια με τα αντίστοιχα της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1.

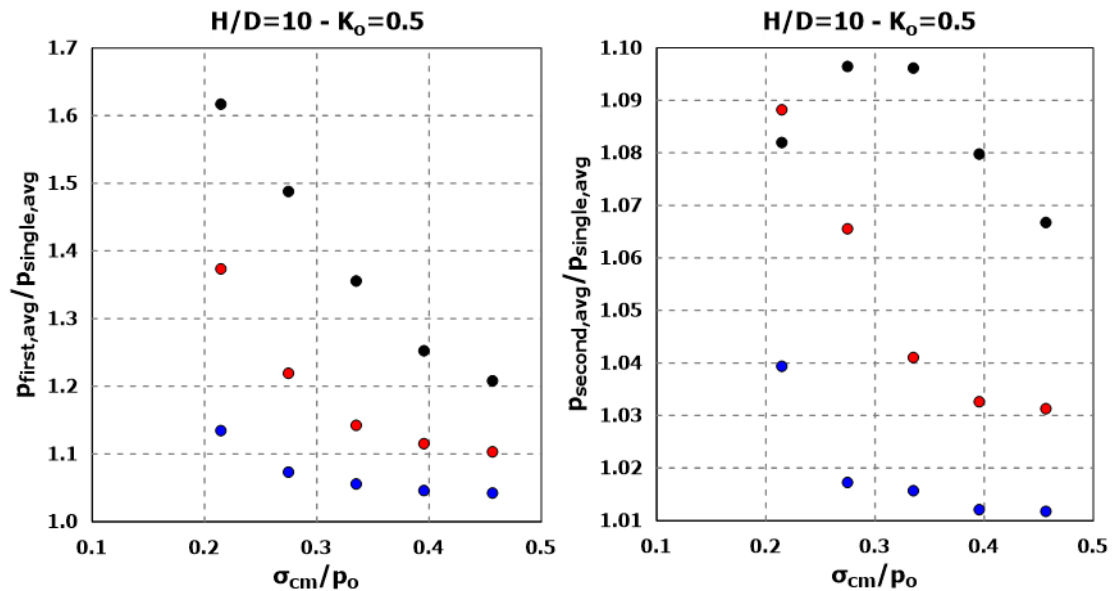
Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι με την ταυτόχρονη διάνοιξη των δύο σηράγγων το φορτίο που δέχονται από τη μετακίνηση της βραχόμαζας πλέον ισομοιράζεται, με αποτέλεσμα την μείωση του φορτίου στη “*first*” αλλά την αύξηση στη “*second*”.

4.1.4 Συγκεντρωτικά Διαγράμματα

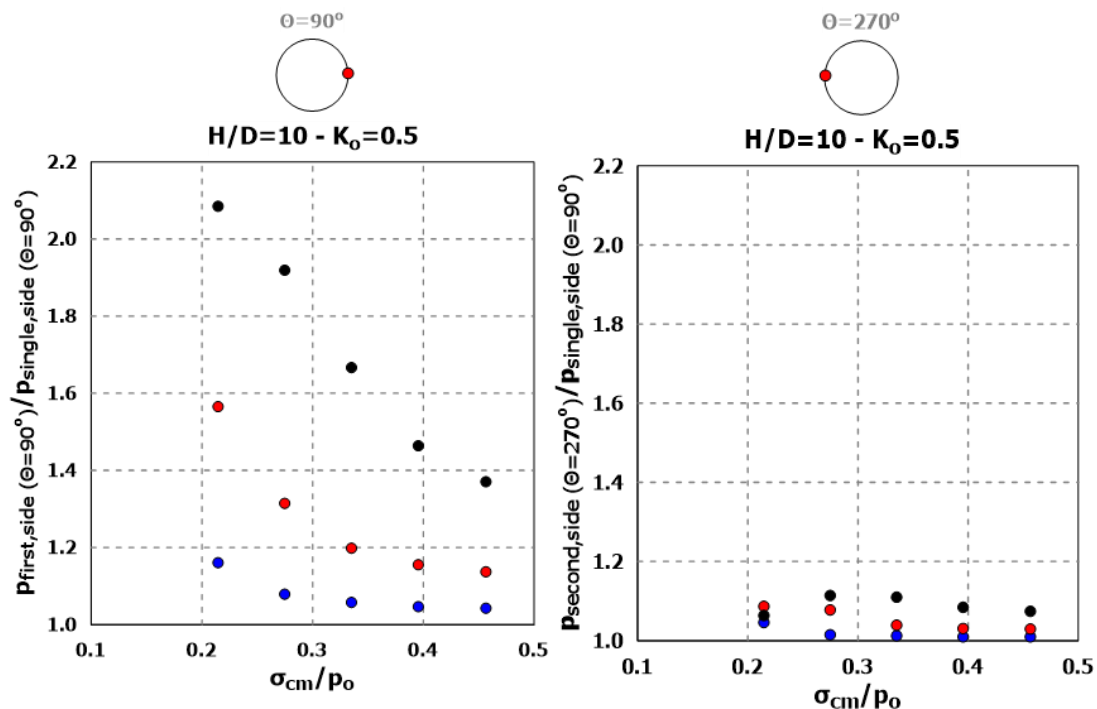


➤ Φορτίο στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Διάνοιξη της Δεξιάς Σήραγγας όταν η Αριστερή έχει Ολοκληρωθεί



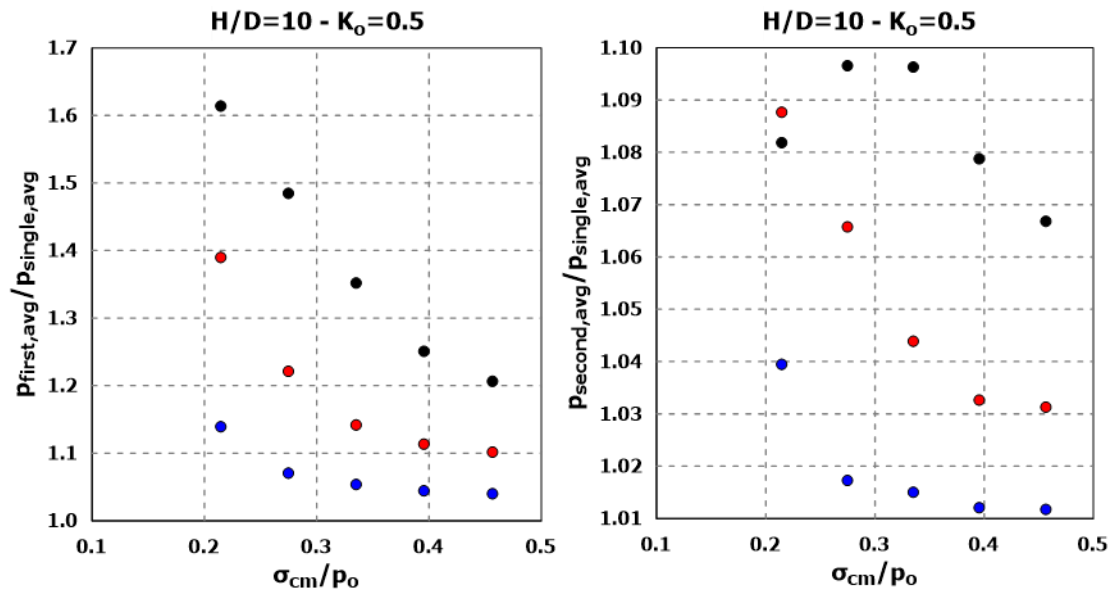
Εικόνα 4-34: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο του μέσου όρου των φορτίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.1, για όλα τα πλάτη πυλώνα και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".



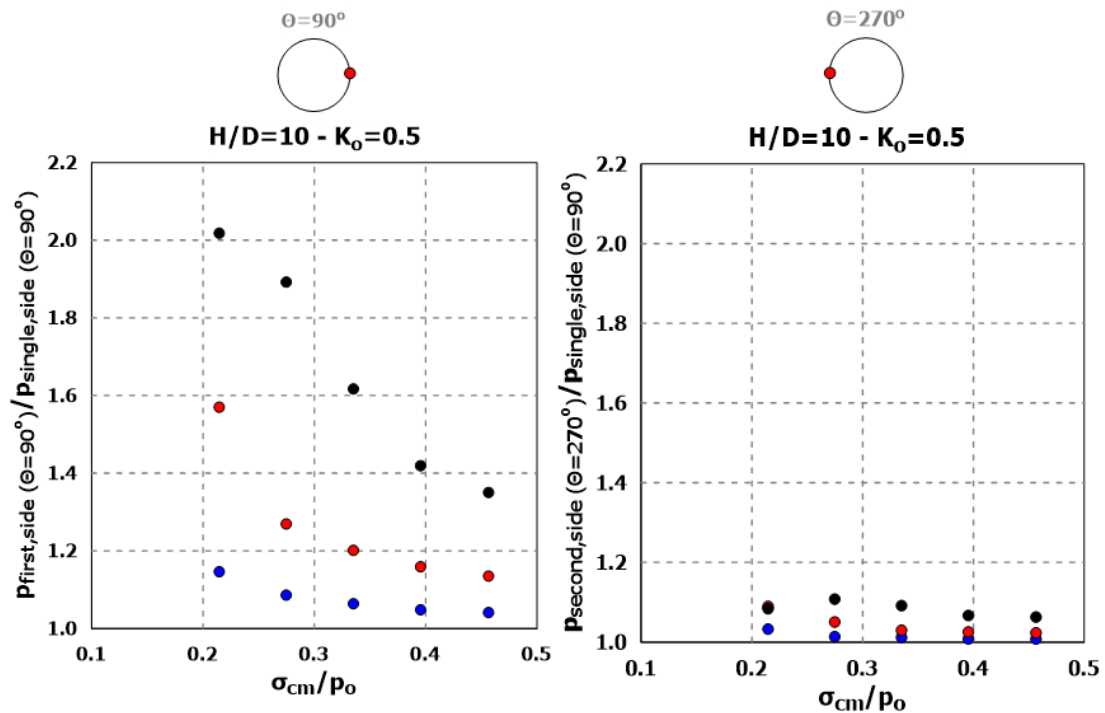
Εικόνα 4-35: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη ανοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.1, για όλα τα πλάτη πυλώνα και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

Στα διαγράμματα των εικόνων 4-34 και 4-35 απεικονίζονται οι λόγοι της "first"/"single" και της "second"/"single", για τον μέσο όρο των τιμών του φορτίου στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, δηλαδή για όλα τα πλάτη πυλώνα και όλες τις γεωτεχνικές συνθήκες, για την ανάλυση της ενότητας 4.1.1. Αρχικά, παρατηρούμε ότι όλοι οι λόγοι (και στα τέσσερα διαγράμματα) είναι μεγαλύτερα της μονάδας, κάτι που σημαίνει ότι η διάνοιξη της δεξιάς σήραγγας προκαλεί αύξηση φορτίου και στην αριστερή (ήδη υπάρχουσα) αλλά και στην ίδια συγκριτικά με τη διάνοιξη σήραγγας μονού κλάδου. Επίσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τη μεγαλύτερη επίπτωση (αρκετά μεγαλύτερη για την ακρίβεια) φαίνεται να την έχει η αριστερή σήραγγα ως "first" σε σχέση με τη δεξιά. Όσον αφορά στις γεωτεχνικές συνθήκες, παρατηρείται κάτι το οποίο φυσικά αναμενόταν, ότι δηλαδή όσο βελτιώνεται η ποιότητα της βραχόμαζας (σ_{cm}/ρ_o αυξάνεται) τόσο αμβλύνεται η αλληλεπίδραση και οι "first" και "second" τείνουν να προσομοιάσουν στη "single", κάθε μία εννοείται σε διαφορετικό βαθμό. Τέλος, βλέπουμε ότι το μεγάλο μέρος της αλληλεπίδρασης προκαλείται από το πλάτος πυλώνα μεταξύ των δύο σηράγγων, κατά κύριο λόγο, βέβαια, στη "first". Παρατηρούμε ότι, για τις τιμές στις εσωτερικές παρειές της "first" η διαφορά ανάμεσα στα αποτελέσματα του $W/D=0.5$ και του $W/D=2$ αγγίζει στα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά το 95%, ενώ στα ευμενέστερα το 30%. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα, ότι η ποιότητα της βραχόμαζας και η ανοχή που θα υποδείξει ο μελετητής θα αποτελέσουν σημαντικούς παραμέτρους στην επιλογή του πλάτους πυλώνα.

Διάνοιξη της Δεξιάς Σήραγγας όταν η Αριστερή Βρίσκεται στη Μέση



Εικόνα 4-36: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο του μέσου όρου των φορτίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.2, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

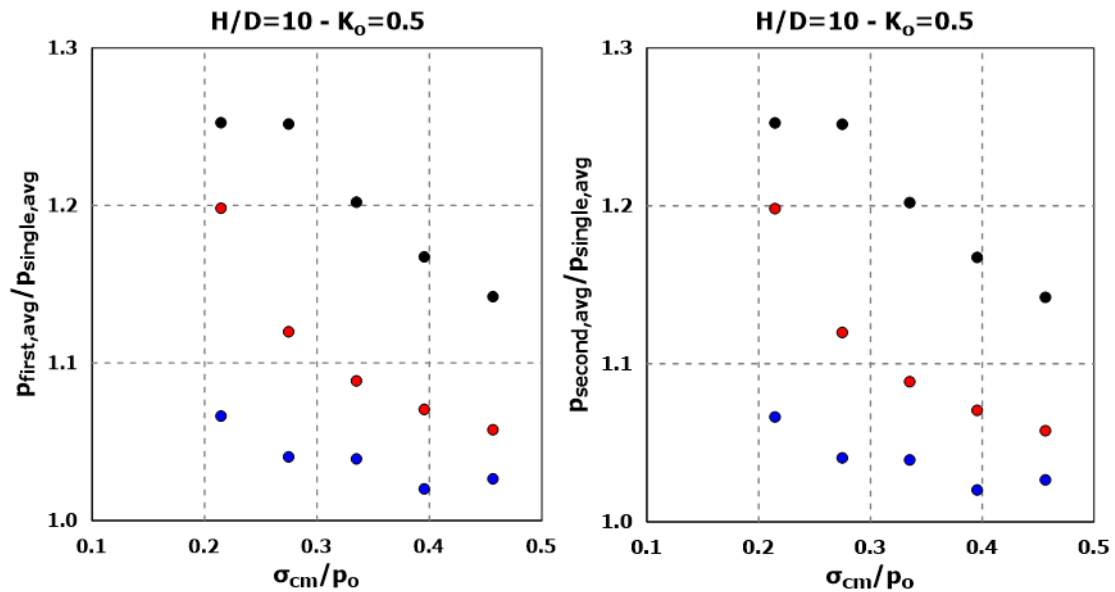


Εικόνα 4-37: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.2, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

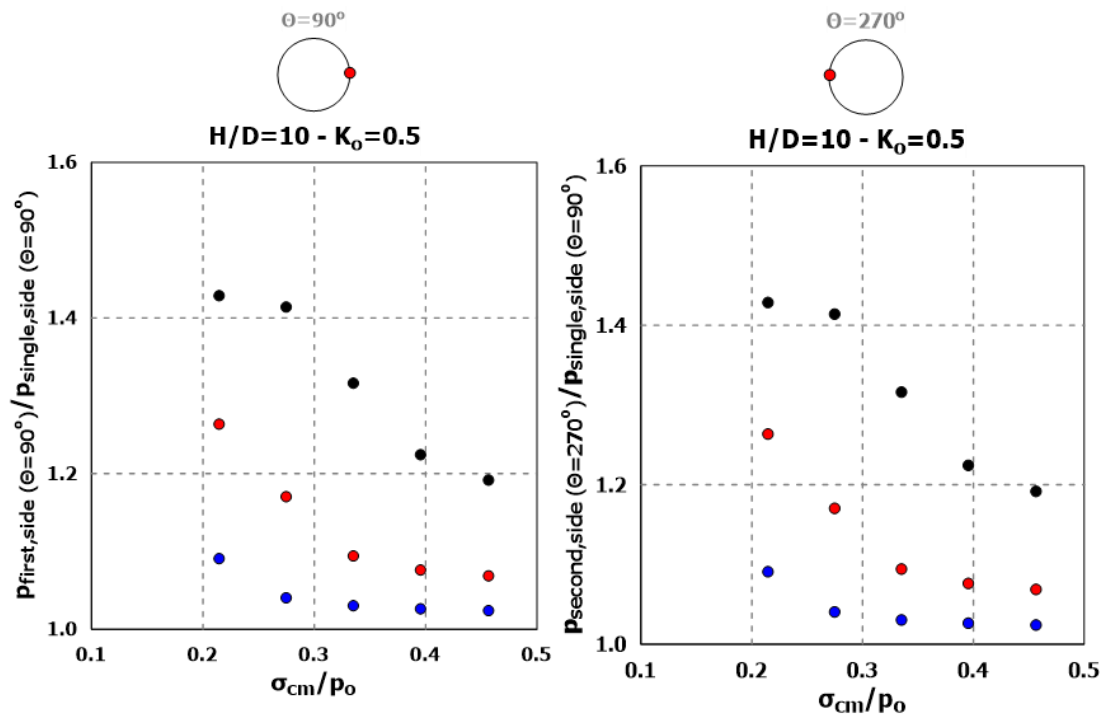
Στα διαγράμματα των εικόνων 4-36 και 4-37 απεικονίζονται οι λόγοι της "first"/"single" και της "second"/"single", για τον μέσο όρο των τιμών του φορτίου στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, δηλαδή για όλα τα πλάτη πυλώνα και όλες τις γεωτεχνικές συνθήκες, για την ανάλυση της ενότητας 4.1.2. Ισχύουν όσα ειπώθηκαν για τα συγκεντρωτικά διαγράμματα της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1, καθώς τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζουν σχεδόν καμία μεταβολή.

Το γεγονός ότι τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο αναλύσεων δεν παρουσιάζουν καμία μεταβολή αποτελεί ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα που προσδιορίζει τον επιτρεπόμενο βαθμό της μείωσης της σχετικής απόστασης των μετώπων εκσκαφής χωρίς να μεταβάλλεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο γειτονικών σηράγγων.

Ταυτόχρονη Διάνοιξη των Δύο Σηράγγων



Εικόνα 4-38: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο του μέσου όρου των φορτίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.3, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

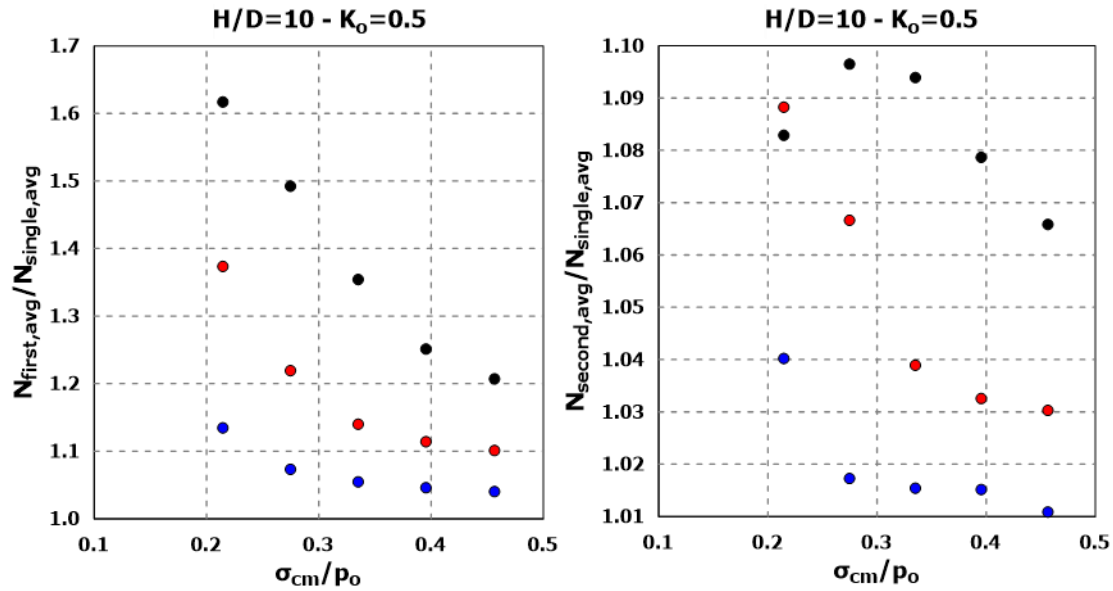


Εικόνα 4-39: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.3, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

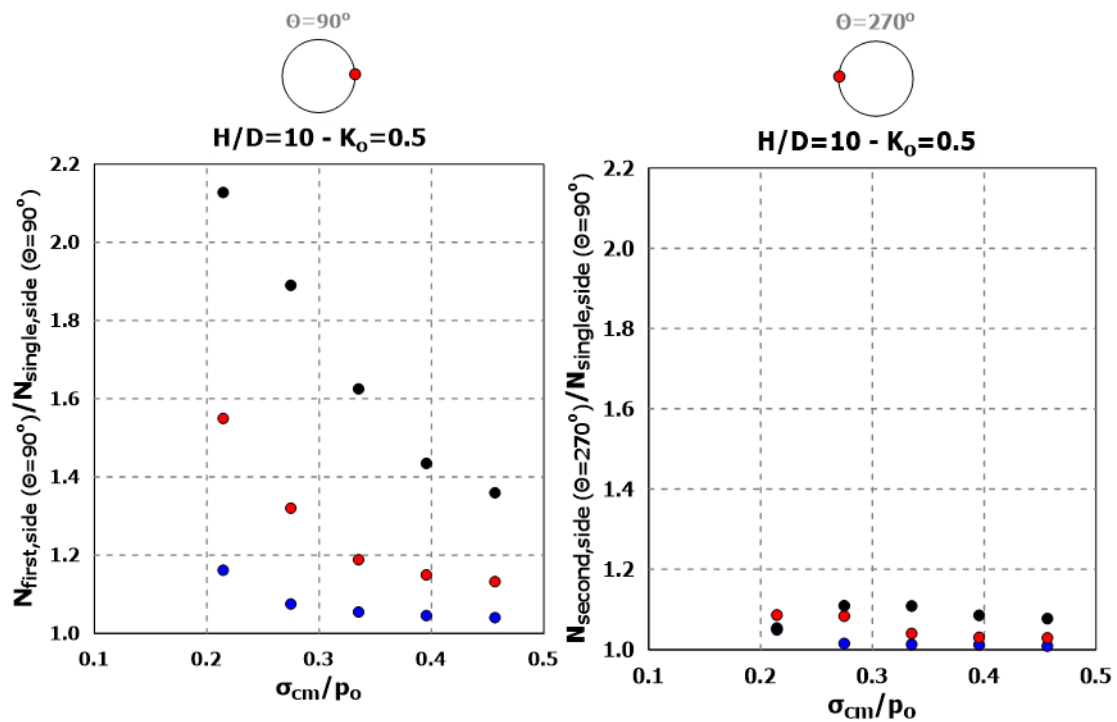
Στα διαγράμματα των εικόνων 4-38 και 4-39 απεικονίζονται οι λόγοι της "first"/"single" και της "second"/"single", για τον μέσο όρο των τιμών του φορτίου στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στις εσωτερικές παρειές των σήραγγων για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, δηλαδή για όλα τα πλάτη πυλώνων και όλες τις γεωτεχνικές συνθήκες, για την ανάλυση της ενότητας 4.1.3. Καταρχήν, παρατηρούμε και σε αυτή την ανάλυση ότι όλοι οι λόγοι είναι μεγαλύτερα της μονάδας, δηλαδή ότι, η διάνοιξη της δεξιάς σήραγγας προκαλεί αύξηση φορτίου και στην αριστερή (ήδη υπάρχουσα) αλλά και στην ίδια, πάντα σε σχέση με τη διάνοιξη μονής σήραγγας. Η μορφή των διαγραμμάτων είναι παρόμοια με της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1, ωστόσο εδώ, οι τιμές του φορτίου είναι μειωμένες για την "first" και αυξημένες της "second". Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι η διαφορά αυτή είναι σημαντική για μικρό πλάτος πυλώνων ενώ, όσο αυτό αυξάνεται η διαφορά μεταξύ των δύο αναλύσεων τείνει να εξαλειφθεί, κάτι το οποίο συμβαίνει μάλιστα, όταν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας βελτιώνονται.

➤ Αξονικές δυνάμεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Διάνοιξη της Δεξιάς Σήραγγας όταν η Αριστερή έχει Ολοκληρωθεί

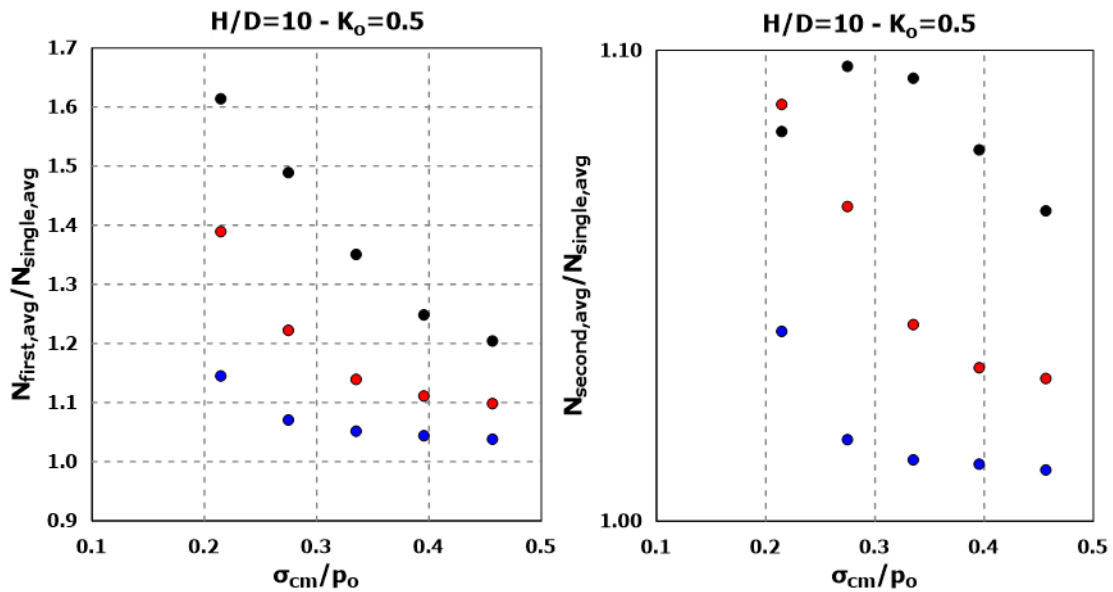


Εικόνα 4-40: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο του μέσου όρου των αξονικών δυνάμεων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

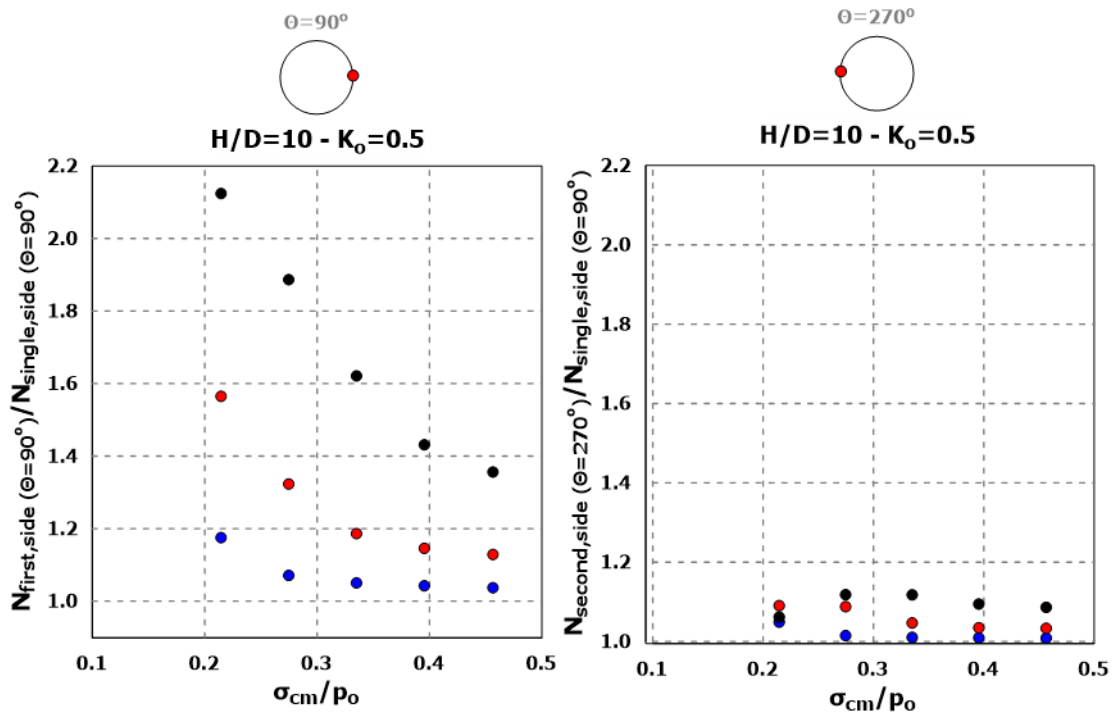


Εικόνα 4-41: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των αξονικών δυνάμεων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

Διάνοιξη της Δεξιάς Σήραγγας όταν η Αριστερή Βρίσκεται στη Μέση

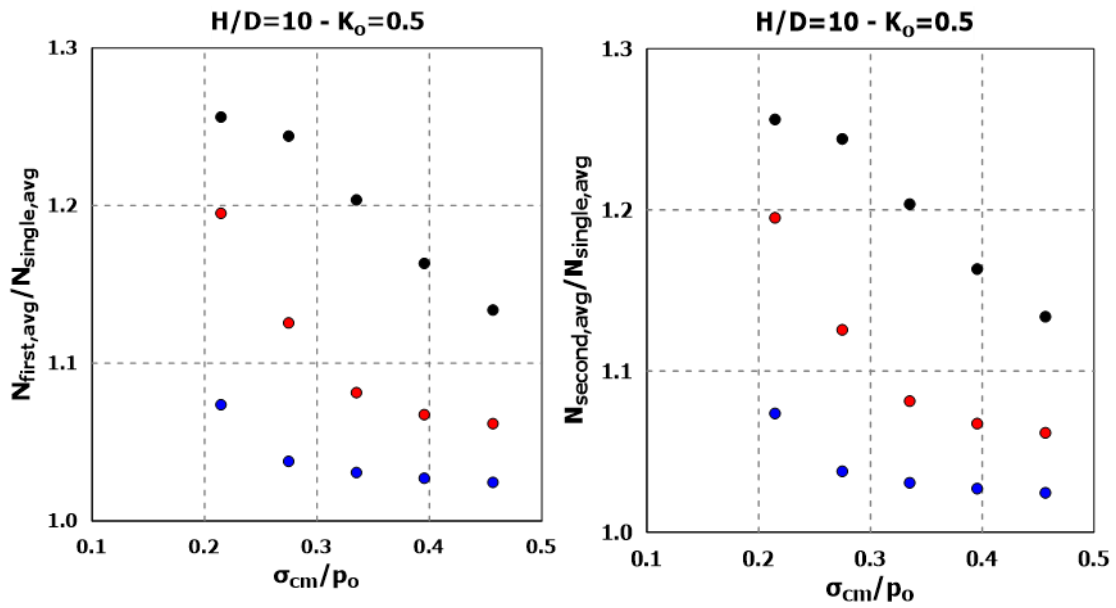


Εικόνα 4-42: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο του μέσου όρου των αξονικών δυνάμεων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.2, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

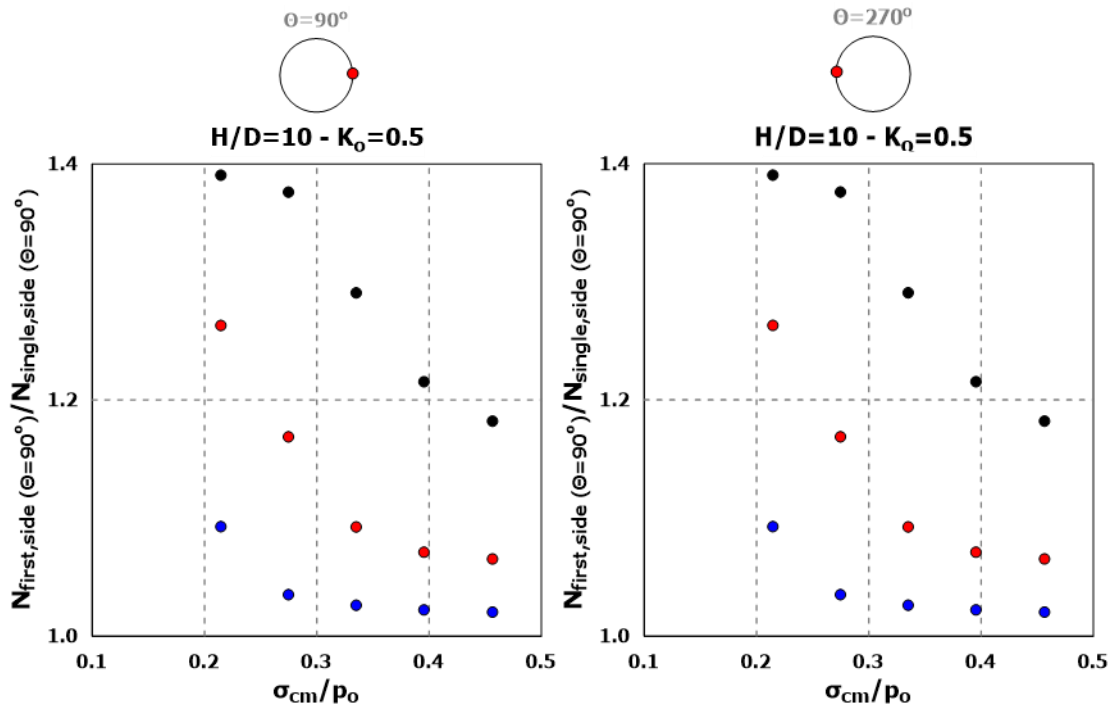


Εικόνα 4-43: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των αξονικών δυνάμεων στις εσωτερικές παρείς των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.2, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

Ταυτόχρονη Διάνοιξη των Δύο Σηράγγων



Εικόνα 4-44: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο του μέσου όρου των αξονικών δυνάμεων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχώμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.3, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

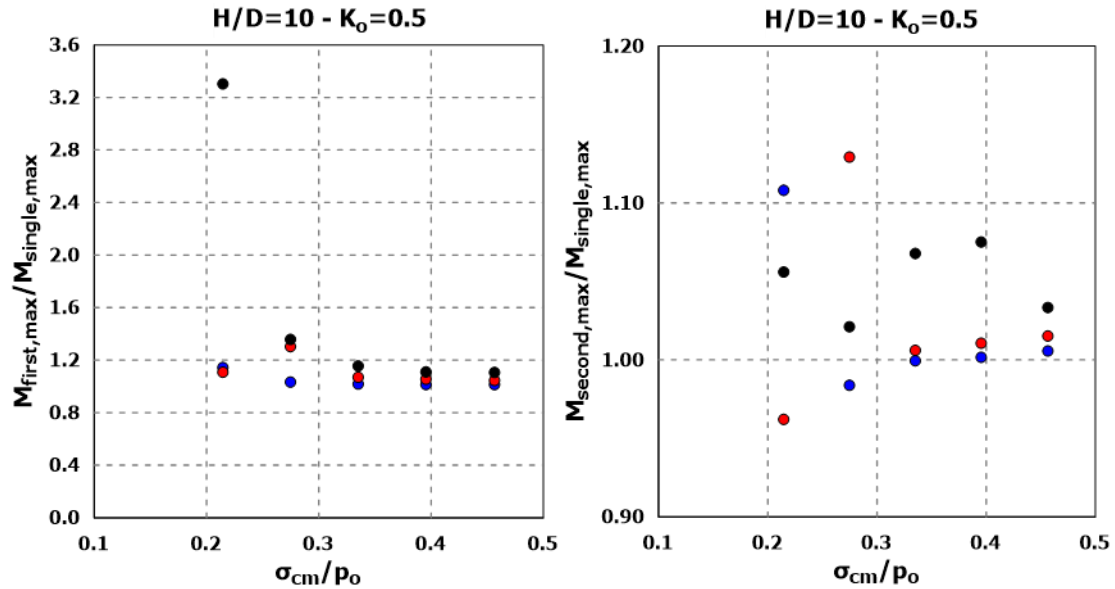


Εικόνα 4-45: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των αξονικών δυνάμεων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχώμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.3, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

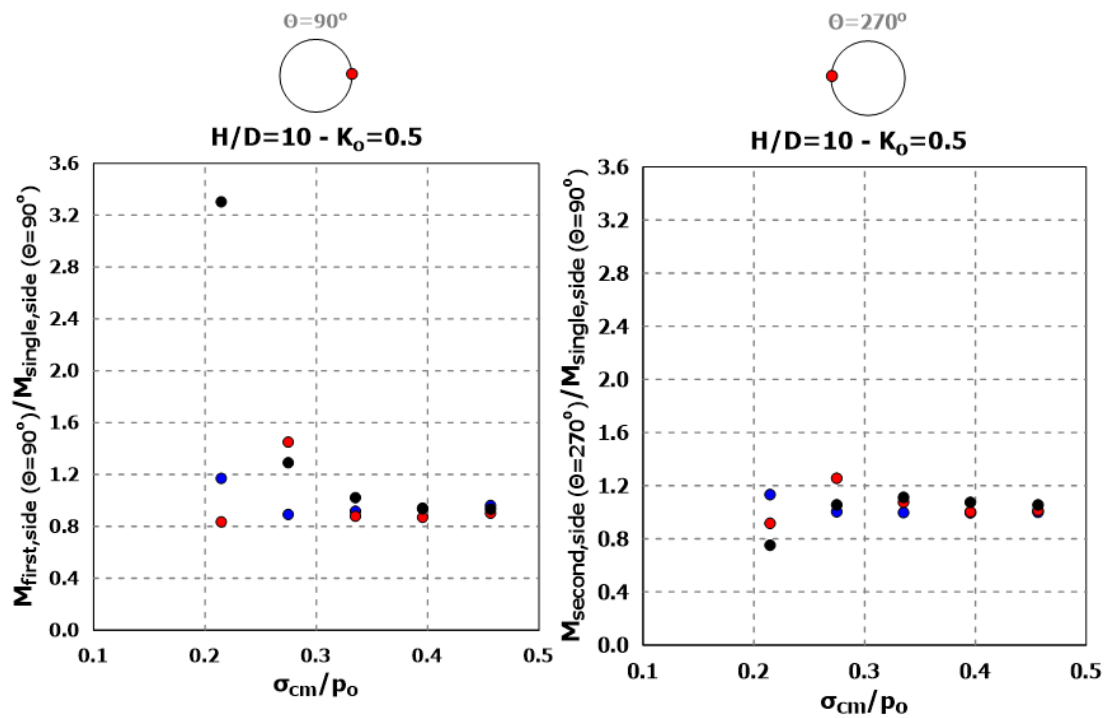
Στα διαγράμματα των εικόνων 4-40 έως 4-45 απεικονίζονται οι λόγοι της "first"/"single" και της "second"/"single", για τον μέσο όρο των τιμών των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στις εσωτερικές παρειές των σήραγγων για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, δηλαδή για όλα τα πλάτη πυλώνα και όλες τις γεωτεχνικές συνθήκες. Τα διαγράμματα των αξονικών ταυτίζονται με εκείνα των φορτίων σε μορφή. Όπως αναμενόταν τα διαγράμματα είναι ίδια για τη "first" και για τη "second", αφού όπως προαναφέρθηκε το φαινόμενο πλέον ισομοιράζεται στις δύο σήραγγες.

➤ Καμπτικές ροπές στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Διάνοιξη της Δεξιάς Σηράγγας όταν η Αριστερή έχει Ολοκληρωθεί

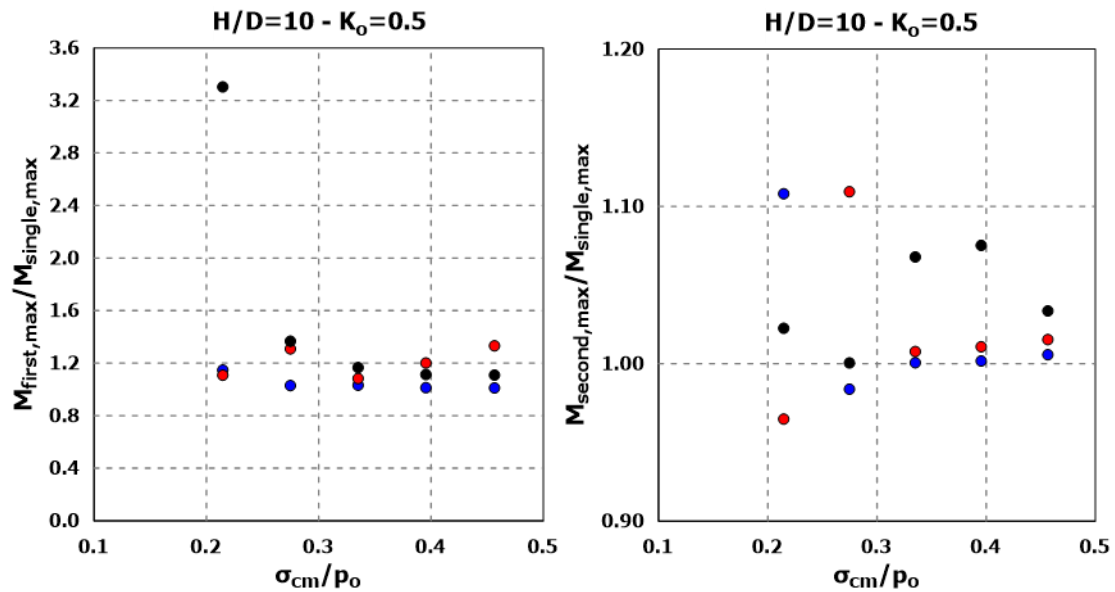


Εικόνα 4-46: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των μέγιστων καμπτικών ροπών σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

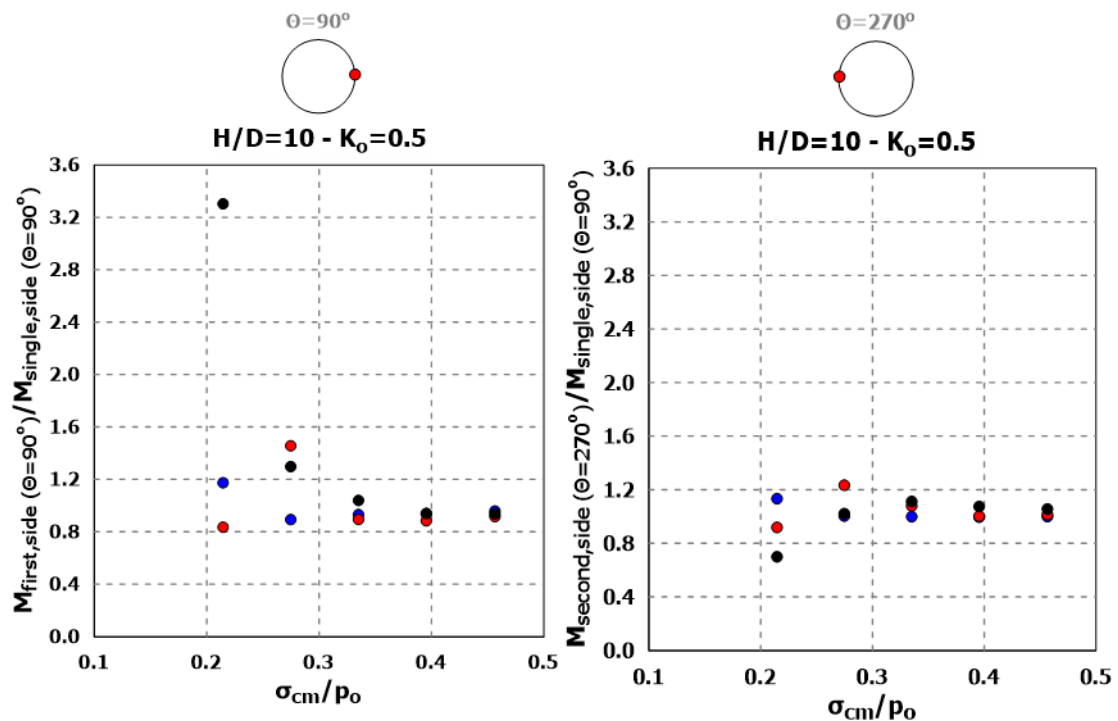


Εικόνα 4-47: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των καμπτικών ροπών στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

Διάνοιξη της Δεξιάς Σήραγγας όταν η Αριστερή Βρίσκεται στη Μέση

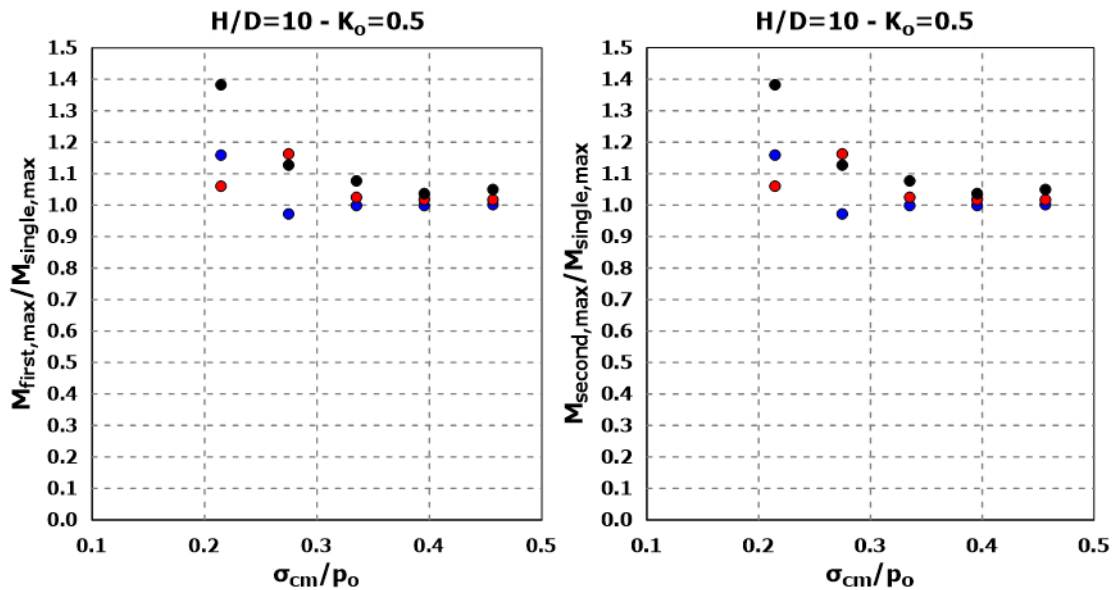


Εικόνα 4-48: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των μέγιστων καμπτικών ροπών σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.2, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

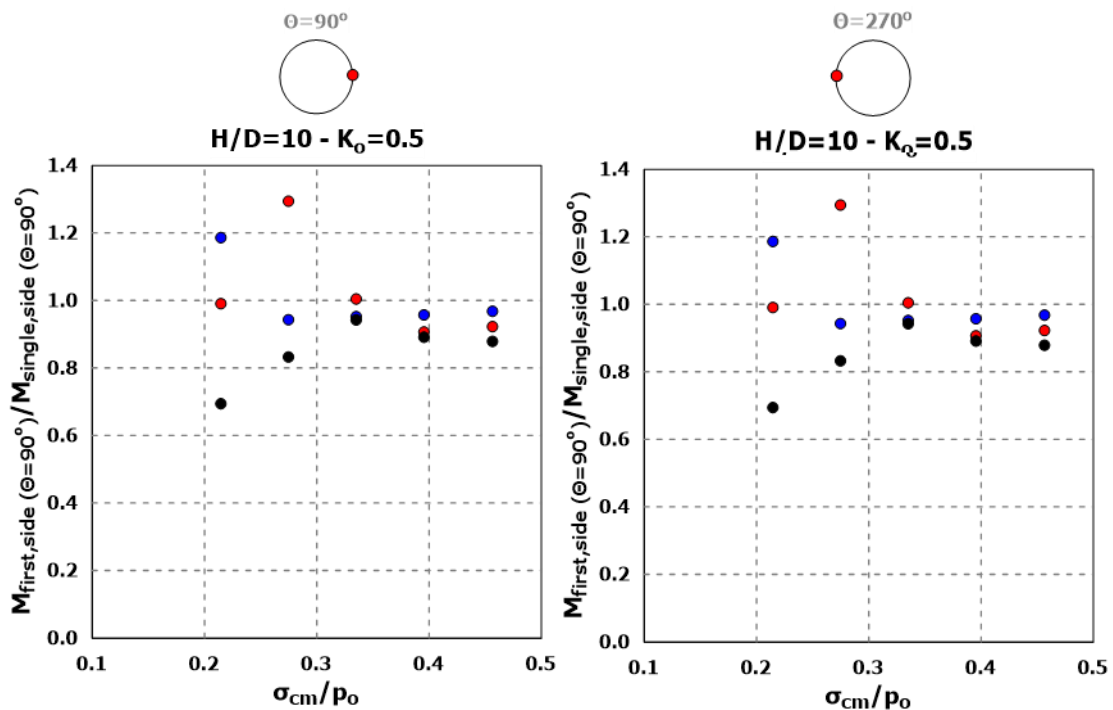


Εικόνα 4-49: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των καμπτικών ροπών στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.2, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

Ταυτόχρονη Διάνοιξη των Δύο Σηράγγων



Εικόνα 4-50: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των μέγιστων καμπτικών ροπών σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.3, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".



Εικόνα 4-51: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των καμπτικών ροπών στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.1.3, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

Στα διαγράμματα των εικόνων 4-46 έως 4-51 απεικονίζονται οι λόγοι της "first"/"single" και της "second"/"single", για τις μέγιστες τιμές των καμπτικών ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, δηλαδή για όλα τα πλάτη πυλώνα και όλες τις γεωτεχνικές συνθήκες. Τα διαγράμματα των καμπτικών ροπών διαφοροποιούνται πλέον από τα προηγούμενα μεγέθη. Παρατηρούμε αρχικά, ότι οι λόγοι δεν είναι πάντα μεγαλύτεροι της μονάδας, δηλαδή, η "single" φέρεται να εμφανίζει σε κάποιες περιπτώσεις μεγαλύτερες καμπτικές ροπές σε σχέση με τις "first" και "second". Κάτι που αξίζει επίσης, να σημειωθεί είναι για τα διαγράμματα "first"/"single" (μεγίστων τιμών και παρειών) των αναλύσεων των ενότητων 4.1.1 και 4.1.2, ότι ο λόγος για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και για τα χειρότερα γεωτεχνικά ($GSI = 10$) είναι πάντα πολύ μεγαλύτερος των υπολοίπων λόγων ενώ έπειτα, ήτοι για όλα τα υπόλοιπα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και πλάτη πυλώνα, οι λόγοι κυμαίνονται γύρω από τη μονάδα. Το ίδιο αλλά σε μικρότερο βαθμό παρατηρείται και στο διάγραμμα 4-50 αλλά όχι στο 4-51. Στο διάγραμμα 4-51 για τη "first" παρατηρούμε ότι και εδώ για καλύτερα γεωτεχνικά οι λόγοι πλησιάζουν τη μονάδα, ωστόσο εμφανίζεται το εξής παράδοξο (κάτι το οποίο έχει επισημανθεί και στην αντίστοιχη ενότητα), για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ οι λόγοι για όλα τα γεωτεχνικά είναι μικρότερη της μονάδας, ενώ για τα χειρότερα γεωτεχνικά μπορεί να θεωρηθεί και αρκετά μικρότερος.

Όσον αφορά στο λόγο "second"/"single" για τις αναλύσεις των ενότητων 4.1.1 και 4.1.2 παρατηρούμε πολύ μικρότερη διακύμανση (όπως και αναμενόταν), ενώ, οι λόγοι είναι πολύ κοντά στην μονάδα. Ενώ, προφανώς για την ανάλυση της ενότητας 4.1.3 τα διαγράμματα για το "second" είναι ίδια με εκείνων της "first".

		W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D
		0.5	1	2	0.5	1	2	0.5	1	2	0.5	1	2
σ_{cm}/ρ_0		$\rho_{first,ave} / \rho_{single,ave}$	$\rho_{first,aver} / \rho_{single,ave}$	$\rho_{first,ave} / \rho_{single,ave}$	$\rho_{first,side} (\theta=90^\circ) / \rho_{single,side} (\theta=90^\circ)$	$\rho_{first,side} (\theta=90^\circ) / \rho_{single,side} (\theta=90^\circ)$	$\rho_{first,side} (\theta=90^\circ) / \rho_{single,side} (\theta=90^\circ)$	$\rho_{second,ave} / \rho_{single,ave}$	$\rho_{second,ave} / \rho_{single,ave}$	$\rho_{second,ave} / \rho_{single,ave}$	$\rho_{second,side} (\theta=270^\circ) / \rho_{single,side} (\theta=90^\circ)$	$\rho_{second,side} (\theta=270^\circ) / \rho_{single,side} (\theta=90^\circ)$	$\rho_{second,side} (\theta=270^\circ) / \rho_{single,side} (\theta=90^\circ)$
Ανάλυση Ενότητας 4.1.1	0.21	1.62	1.37	1.13	2.09	1.57	1.16	1.08	1.09	1.04	1.06	1.09	1.05
	0.27	1.49	1.22	1.07	1.92	1.31	1.08	1.10	1.07	1.02	1.11	1.08	1.01
	0.34	1.36	1.14	1.06	1.67	1.20	1.06	1.10	1.04	1.02	1.11	1.04	1.01
	0.40	1.25	1.12	1.05	1.46	1.16	1.05	1.08	1.03	1.01	1.08	1.03	1.01
	0.46	1.21	1.10	1.04	1.37	1.14	1.04	1.07	1.03	1.01	1.07	1.03	1.01
Ανάλυση Ενότητας 4.1.2	0.21	1.61	1.39	1.14	2.08	1.58	1.17	1.08	1.09	1.04	1.06	1.09	1.05
	0.27	1.48	1.22	1.07	1.92	1.32	1.08	1.10	1.07	1.02	1.11	1.08	1.01
	0.34	1.35	1.14	1.05	1.66	1.20	1.05	1.10	1.04	1.02	1.11	1.04	1.01
	0.40	1.25	1.11	1.04	1.46	1.15	1.04	1.08	1.03	1.01	1.08	1.03	1.01
	0.46	1.21	1.10	1.04	1.37	1.14	1.04	1.07	1.03	1.01	1.07	1.03	1.01
Ανάλυση Ενότητας 4.1.3	0.21	1.25	1.20	1.07	1.43	1.26	1.09	1.25	1.20	1.07	1.43	1.26	1.09
	0.27	1.25	1.12	1.04	1.41	1.17	1.04	1.25	1.12	1.04	1.41	1.17	1.04
	0.34	1.20	1.09	1.04	1.32	1.09	1.03	1.20	1.09	1.04	1.32	1.09	1.03
	0.40	1.17	1.07	1.02	1.22	1.08	1.03	1.17	1.07	1.02	1.22	1.08	1.03
	0.46	1.14	1.06	1.03	1.19	1.07	1.02	1.14	1.06	1.03	1.19	1.07	1.02

Πίνακας 2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τα φορτία που καλείται να παραλάβει η προσωρινή υποστήριξη, για όλες τις αναλύσεις της παραγράφου 4.1

		W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D
		0.5	1	2	0.5	1	2	0.5	1	2	0.5	1	2
σ_{cm}/ρ_0		$N_{first,ave} / N_{single,ave}$	$N_{first,ave} / N_{single,ave}$	$N_{first,ave} / N_{single,ave}$	$N_{first,side}(\theta=90^\circ) / N_{single,side}(\theta=90^\circ)$	$N_{first,side}(\theta=90^\circ) / N_{single,side}(\theta=90^\circ)$	$N_{first,side}(\theta=90^\circ) / N_{single,side}(\theta=90^\circ)$	$N_{second,ave} / N_{single,ave}$	$N_{second,ave} / N_{single,ave}$	$N_{second,ave} / N_{single,ave}$	$N_{second,side}(\theta=270^\circ) / N_{single,side}(\theta=90^\circ)$	$N_{second,side}(\theta=270^\circ) / N_{single,side}(\theta=90^\circ)$	$N_{second,side}(\theta=270^\circ) / N_{single,side}(\theta=90^\circ)$
Ανάλυση Ενότητας 4.1.1	0.21	1.62	1.37	1.13	2.13	1.55	1.16	1.08	1.09	1.04	1.05	1.09	1.05
	0.27	1.49	1.22	1.07	1.89	1.32	1.08	1.10	1.07	1.02	1.11	1.08	1.02
	0.34	1.35	1.14	1.05	1.63	1.19	1.05	1.09	1.04	1.02	1.11	1.04	1.01
	0.40	1.25	1.11	1.05	1.44	1.15	1.05	1.08	1.03	1.02	1.09	1.03	1.01
	0.46	1.21	1.10	1.04	1.36	1.13	1.04	1.07	1.03	1.01	1.08	1.03	1.01
Ανάλυση Ενότητας 4.1.2	0.21	1.61	1.39	1.15	2.12	1.57	1.18	1.08	1.09	1.04	1.05	1.09	1.05
	0.27	1.49	1.22	1.07	1.89	1.32	1.07	1.10	1.07	1.02	1.11	1.08	1.02
	0.34	1.35	1.14	1.05	1.62	1.19	1.05	1.09	1.04	1.01	1.11	1.04	1.01
	0.40	1.25	1.11	1.04	1.43	1.15	1.04	1.08	1.03	1.01	1.09	1.03	1.01
	0.46	1.20	1.10	1.04	1.36	1.13	1.04	1.07	1.03	1.01	1.08	1.03	1.01
Ανάλυση Ενότητας 4.1.3	0.21	1.26	1.20	1.07	1.39	1.26	1.09	1.26	1.20	1.07	1.39	1.26	1.09
	0.27	1.24	1.13	1.04	1.38	1.17	1.04	1.24	1.13	1.04	1.38	1.17	1.04
	0.34	1.20	1.08	1.03	1.29	1.09	1.03	1.20	1.08	1.03	1.29	1.09	1.03
	0.40	1.16	1.07	1.03	1.22	1.07	1.02	1.16	1.07	1.03	1.22	1.07	1.02
	0.46	1.13	1.06	1.02	1.18	1.07	1.02	1.13	1.06	1.02	1.18	1.07	1.02

Πίνακας 3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην προσωρινή υποστήριξη, για όλες τις αναλύσεις της παραγράφου 4.1.

		W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D
		0.5	1	2	0.5	1	2	0.5	1	2	0.5	1	2
σ_{cm}/ρ_0		$M^{first, abs, max} / M^{single, abs, max}$	$M^{first, abs, max} / M^{single, abs, max}$	$M^{first, abs, max} / M^{single, abs, max}$	$M^{first, abs, (\theta=90^\circ)} / M^{single, abs, (\theta=90^\circ)}$	$M^{first, abs, (\theta=90^\circ)} / M^{single, abs, (\theta=90^\circ)}$	$M^{first, abs, (\theta=90^\circ)} / M^{single, abs, (\theta=90^\circ)}$	$M^{second, abs, max} / M^{single, abs, max}$	$M^{second, abs, max} / M^{single, abs, max}$	$M^{second, abs, max} / M^{single, abs, max}$	$M^{second, abs, (\theta=270^\circ)} / M^{single, abs, (\theta=270^\circ)}$	$M^{second, abs, (\theta=270^\circ)} / M^{single, abs, (\theta=270^\circ)}$	$M^{second, abs, (\theta=270^\circ)} / M^{single, abs, (\theta=270^\circ)}$
Ανάλυση Ενότητας 4.1.1	0.21	3.30	1.11	1.14	3.30	0.84	1.17	1.06	0.96	1.11	0.75	0.92	1.13
	0.27	1.36	1.30	1.03	1.29	1.45	0.89	1.02	1.13	0.98	1.06	1.26	1.00
	0.34	1.16	1.07	1.02	1.02	0.88	0.92	1.07	1.01	1.00	1.11	1.08	1.00
	0.40	1.11	1.06	1.02	0.94	0.87	0.94	1.08	1.01	1.00	1.08	1.00	1.00
	0.46	1.11	1.05	1.01	0.93	0.90	0.96	1.03	1.02	1.01	1.06	1.02	1.00
Ανάλυση Ενότητας 4.1.2	0.21	3.30	1.11	1.15	3.30	0.84	1.17	1.02	0.96	1.11	0.70	0.92	1.13
	0.27	1.37	1.31	1.03	1.30	1.46	0.89	1.00	1.11	0.98	1.02	1.23	1.00
	0.34	1.17	1.08	1.03	1.04	0.90	0.93	1.07	1.01	1.00	1.11	1.08	1.00
	0.40	1.11	1.20	1.01	0.94	0.88	0.94	1.08	1.01	1.00	1.08	1.00	1.00
	0.46	1.11	1.33	1.01	0.94	0.92	0.96	1.03	1.02	1.01	1.06	1.02	1.00
Ανάλυση Ενότητας 4.1.3	0.21	1.38	1.06	1.16	0.69	0.99	1.19	1.38	1.06	1.16	0.69	0.99	1.19
	0.27	1.13	1.16	0.97	0.83	1.29	0.94	1.13	1.16	0.97	0.83	1.29	0.94
	0.34	1.08	1.03	1.00	0.94	1.00	0.95	1.08	1.03	1.00	0.94	1.00	0.95
	0.40	1.04	1.02	1.00	0.89	0.91	0.96	1.04	1.02	1.00	0.89	0.91	0.96
	0.46	1.05	1.02	1.00	0.88	0.92	0.97	1.05	1.02	1.00	0.88	0.92	0.97

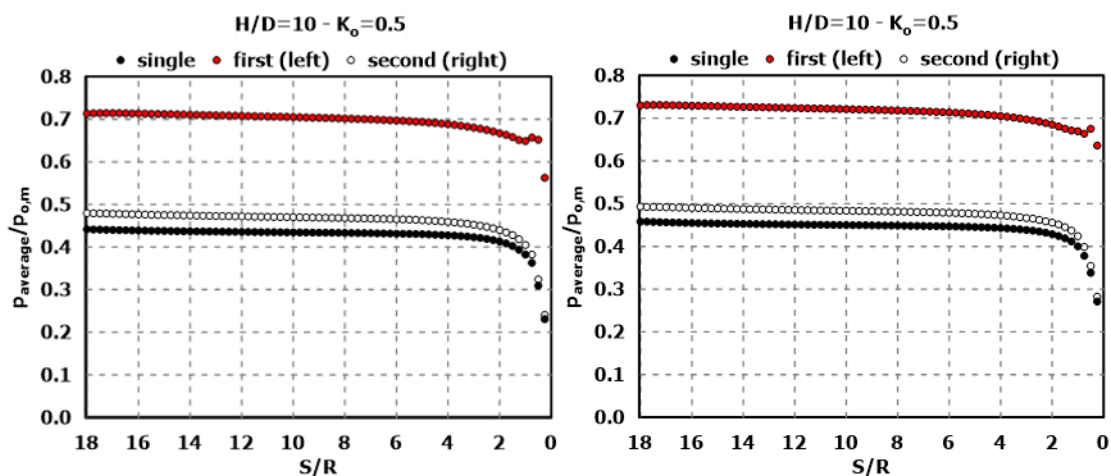
Πίνακας 4: Συγκεντρικά αποτελέσματα για τις καμπτικές ροπές που αναπτύσσονται στην προσωρινή υποστήριξη, για όλες τις αναλύσεις της παραγράφου 4.1.

4.2 Διερεύνηση της Δυσκαμψίας των Μέτρων Προσωρινής Υποστήριξης

4.2.1 Μέτρα Προσωρινής Υποστήριξης των Σηράγγων με Αυξημένη Δυσκαμψία

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα της κατηγορίας αναλύσεων κατά την οποία εφαρμόσθηκαν μέτρα προσωρινής υποστήριξης αυξημένης δυσκαμψίας. Ο τρόπος διάνοιξης των σηράγγων είναι παρόμοιος με αυτόν της ενότητας 4.1.1, δηλαδή η δεξιά σήραγγα ξεκινά να εκσκαπτεται όταν έχει ολοκληρωθεί πλήρως η εκσκαφή της αριστερής. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε έχει πάχος 40cm. Θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων από την παρούσα ανάλυση με εκείνα της ενότητας 4.1.1, δηλαδή με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm.

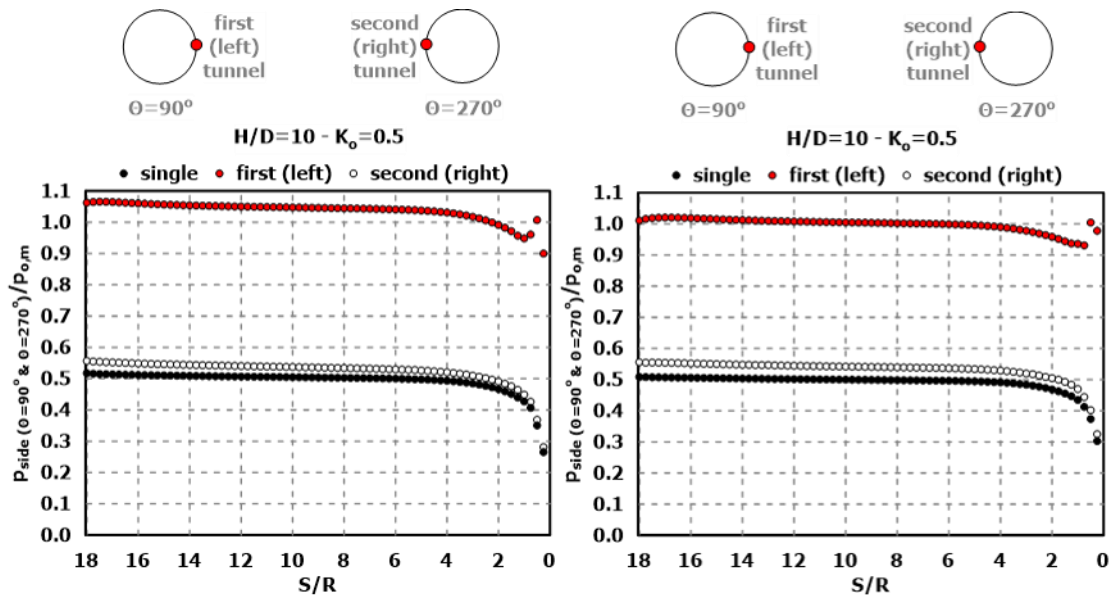
➤ Φορτίο στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



Εικόνα 4-52: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.

Στα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 4-52 παρουσιάζονται οι μηκοτομικές κατανομές του μέσου όρου των φορτίων στην προσωρινή υποστήριξη και για τις τρεις περιπτώσεις σηράγγων. Αριστερά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1 (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm) και δεξιά της παρούσας ανάλυσης (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 40cm). Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι τα αποτελέσματα και για τις τρεις περιπτώσεις σηράγγων είναι αυξημένα στην παρούσα ανάλυση (η διαφορά τους φυσικά δεν είναι μεγάλη αλλά είναι

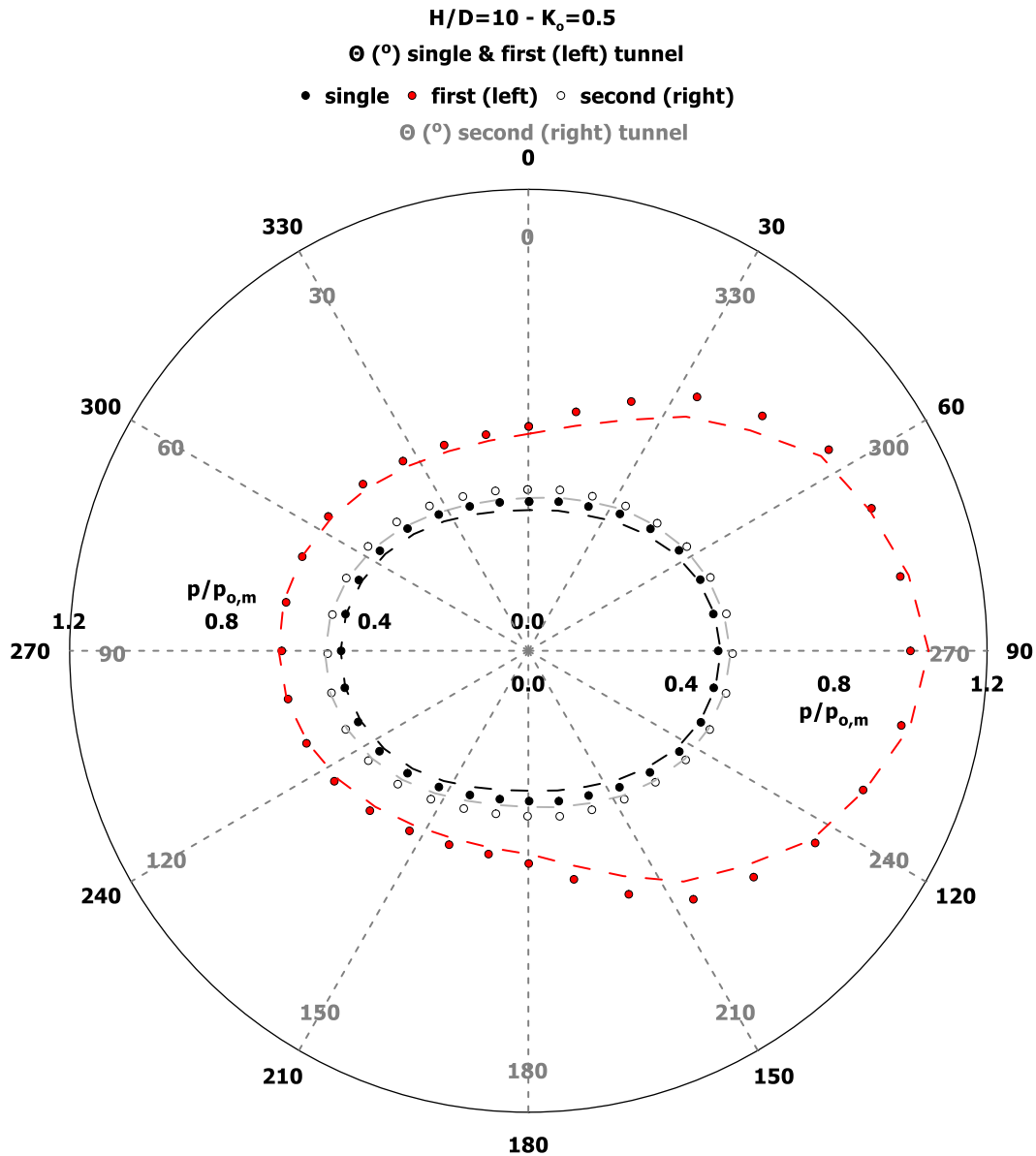
εμφανής) σε σχέση με την ανάλυση της ενότητας 4.1.1. Αυτό είναι λογικό και αναμενόμενο, καθώς η υποστήριξη τώρα είναι πιο δύσκαμπτη που σημαίνει ότι απαγορεύει ακόμη περισσότερο τις συγκλίσεις στη σήραγγα, κάτι το οποίο οδηγεί στην ανάπτυξη μεγαλύτερων φορτίων που καλείται να παραλάβει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Αντίθετα, στην περίπτωση της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1, η υποστήριξη είναι πιο ενδόσιμη.



Εικόνα 4-53: Μηκτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.

Στα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 4-53 παρουσιάζονται οι μηκτομικές κατανομές των φορτίων στην προσωρινή υποστήριξη και για τις τρεις περιπτώσεις σηράγγων στις εσωτερικές παρειές τους. Αριστερά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1 (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm) και δεξιά της παρούσας ανάλυσης (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 40cm). Εν αντιθέσει με τη [Εικόνα 4-52](#), εδώ παρατηρούμε ότι η εσωτερική παρειά της “first” ανακουφίζεται, σχετικά, από την τοποθέτηση πιο δύσκαμπτης προσωρινής υποστήριξης, ενώ οι “single” και “second” δεν παρουσιάζουν ουδεμία μεταβολή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



Εικόνα 4-54: Κατανομή του φορτίου στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$. Με κουκίδες απεικονίζονται οι τρεις περιπτώσεις για την παρούσα ανάλυση ενώ, με διακεκομμένη της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.

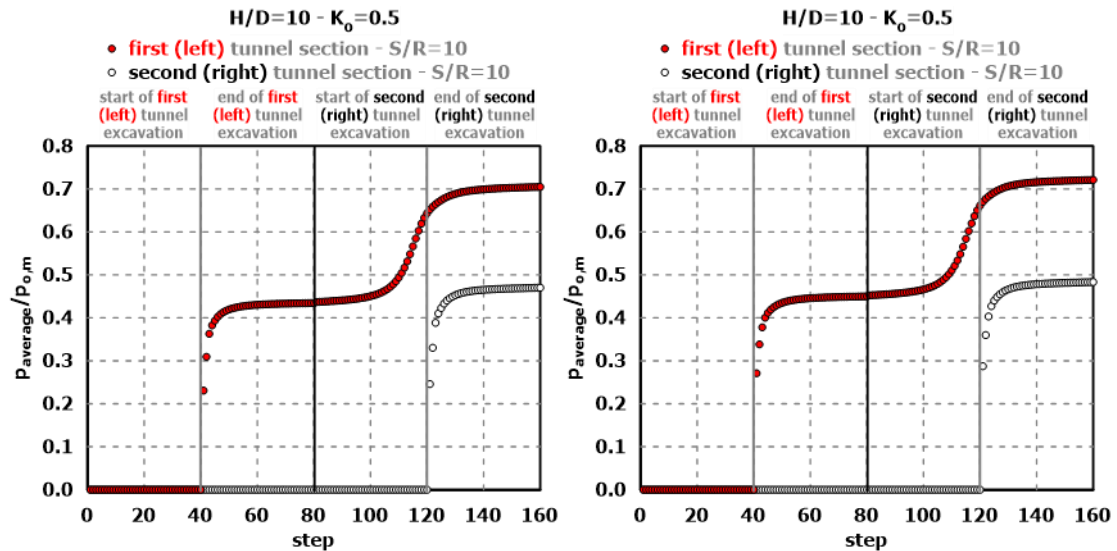
Στο παραπάνω διάγραμμα της εικόνας 4-54, απεικονίζονται οι υπό σύγκριση αναλύσεις στην τυπική διατομή, αφότου έχει επέλθει δηλαδή ισορροπία. Με κουκίδες απεικονίζεται η παρούσα ανάλυση, με μέτρα προσωρινής υποστήριξης με αυξημένη δυσκαμψία, ενώ, με διακεκομμένη γραμμή η ανάλυση της ενότητας 4.1.1. Σκοπός της ενοποίησης των δύο αναλύσεων σε ένα διάγραμμα είναι για να κατανοηθεί πλήρως η διαφορά στην κατανομή των τάσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για κάθε μία.

Αρχικά, παρατηρούμε ότι η κατανομή για όλες τις περιπτώσεις είναι παρόμοια. Στις εξωτερικές παρειές οι δύο αναλύσεις έχουν ταυτόσημα αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις, ενώ τα αποτελέσματα παραμένουν ταυτόσημα και σε μία ζώνη

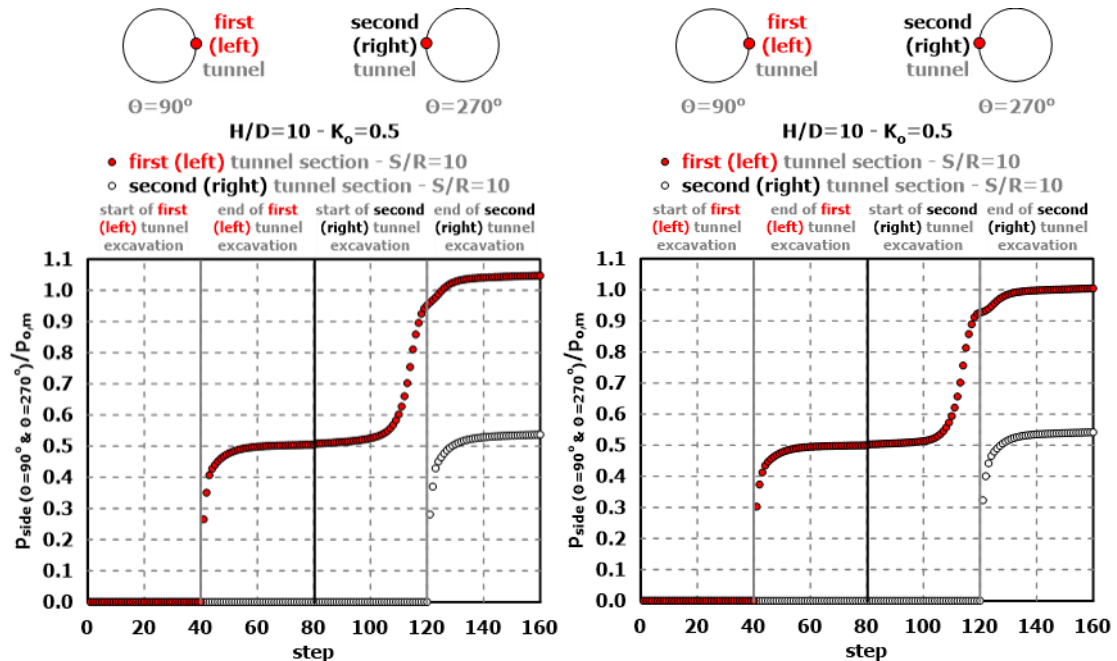
245°÷295° (η μέτρηση των μοιρών είναι σε γωνίες αριστερής σήραγγας). Για τις "single" και "second" των δύο αναλύσεων οι τιμές είναι ταυτόσημες και για την εσωτερική παρειά και σε μία περιοχή γύρω από αυτήν, περίπου, 65°÷115°. Στη στέψη και στον πυθμένα (και γύρω τους) η παρούσα ανάλυση εμφανίζει αυξημένες τιμές σε σχέση με την ανάλυση της ενότητας 4.1.1.

Τα όσα συμβαίνουν στις "first", ωστόσο, έχουν μεγάλο ενδιαφέρον. Βλέπουμε ότι στην παρούσα ανάλυση, κοντά στην στέψη και στον πυθμένα υπάρχει μία σχετικά απότομη αύξηση του φορτίου η οποία καταλήγει στην εσωτερική παρειά σε μικρότερη τελικά τιμή φορτίου σε σχέση με την ενότητας 4.1.1. Δίνει την αίσθηση, λοιπόν, ότι το φορτίο κατανέμεται πιο ομοιόμορφα σε ολόκληρη σχεδόν την εσωτερική παρειά της αριστερής σήραγγας (10°÷170°) στην παρούσα ανάλυση. Αντίθετα, στην ανάλυση της ενότητας 4.1.1, η μεγάλη επιρροή περιορίζεται σε μια μικρότερη περιοχή με αποτέλεσμα να καταλήγει σε μεγαλύτερη τελική τιμή φορτίου.

➤ Χρονοϊστορίες των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



Εικόνα 4-55: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση, ενώ έχει επιλεγεί να παρουσιασθεί ο μέσος όρος των φορτίων.



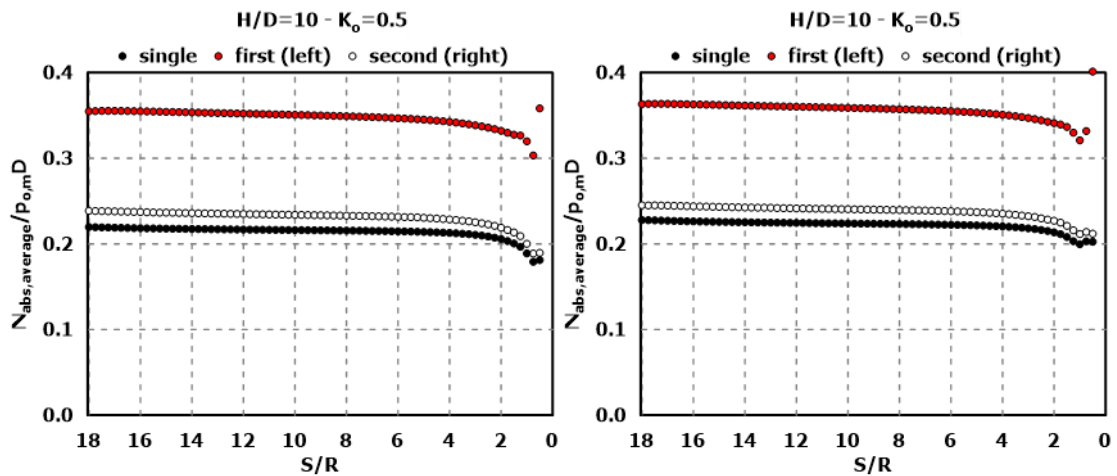
Εικόνα 4-56: Χρονική εξέλιξη των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις δύο περιπτώσεις, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm, στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση.

Στα διαγράμματα της εικόνας 4-55 και 4-56 παρατηρούμε την χρονική εξέλιξη των φορτίων που καλείται να παραλάβει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στη διατομή που βρίσκεται στο $Y=40m$ για τις δύο περιπτώσεις, τη "first" και τη "second" σήραγγα, για τις δυο υπό εξέταση αναλύσεις. Αριστερά απεικονίζονται τα αποτελέσματα της

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

ανάλυσης της ενότητας 4.1.1 (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm) και δεξιά της παρούσας ανάλυσης (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 40cm). Η εικόνα 4-55 παρουσιάζει τον μέσο όρο των φορτίων ενώ, η εικόνα 4-56 τις τιμές στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων. Σε αυτά τα διαγράμματα επιβεβαιώνονται όσα σχολιάστηκαν στο διάγραμμα της εικόνας 4-36, ότι, δηλαδή, στην παρούσα ανάλυση υπάρχει η τάση για μεγαλύτερες γενικά τιμές σε σχέση με την ανάλυση της ενότητας 4.1.1, ωστόσο στην εσωτερική παρειά εμφανίζει μικρότερες τιμές.

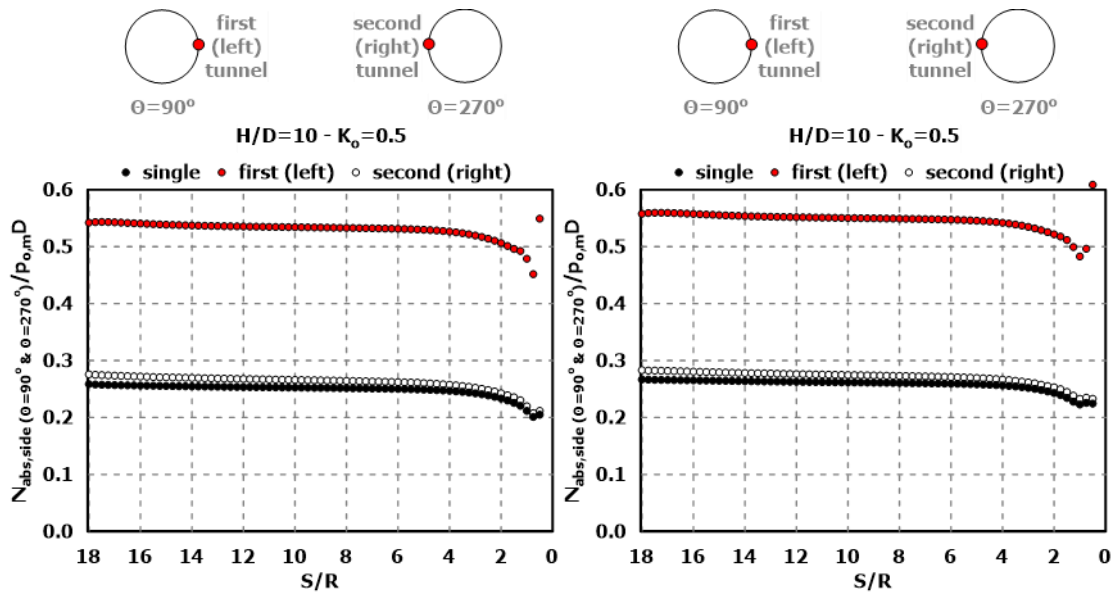
➤ Αξονικές δυνάμεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



Εικόνα 4-57: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη του μέσου όρου των δυνάμεων.

Στα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 4-57 παρουσιάζονται οι μηκοτομικές κατανομές του μέσου όρου των αξονικών δυνάμεων στην προσωρινή υποστήριξη και για τις τρεις περιπτώσεις σηράγγων. Αριστερά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1 (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm) και δεξιά της παρούσας ανάλυσης (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 40cm). Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι τα αποτελέσματα ομοιάζουν με αυτά των φορτίων, δηλαδή υπάρχει αύξηση των τιμών και για τις τρεις περιπτώσεις σηράγγων στην παρούσα ανάλυση σε σχέση με την ανάλυση της ενότητας 4.1.1 (μικρότερη ωστόσο απ' ότι στα φορτία). Οι λόγοι είναι οι ίδιοι που αναλύθηκαν και στην παράγραφο των φορτίων.

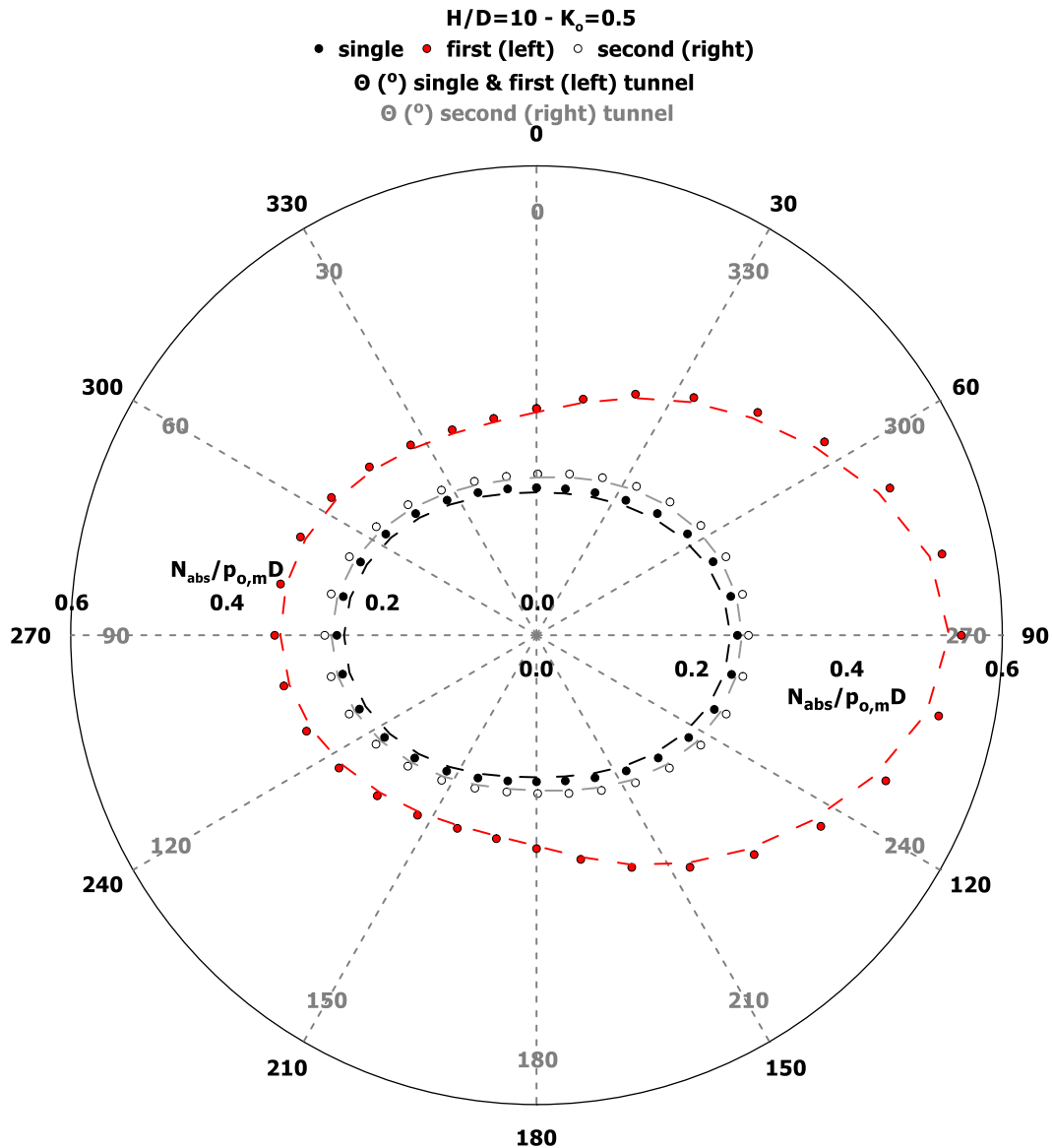
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



Εικόνα 4-58: Μηκοτομική απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας, ενώ έχουν ληφθεί τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων.

Στα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 4-58 παρουσιάζονται οι μηκοτομικές κατανομές των αξονικών δυνάμεων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, στην προσωρινή υποστήριξη και για τις τρεις περιπτώσεις σηράγγων. Αριστερά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1 (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm) και δεξιά της παρούσας ανάλυσης (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 40cm). Ισχύουν ακριβώς όσα ειπώθηκαν και για την [Εικόνα 4-53](#).

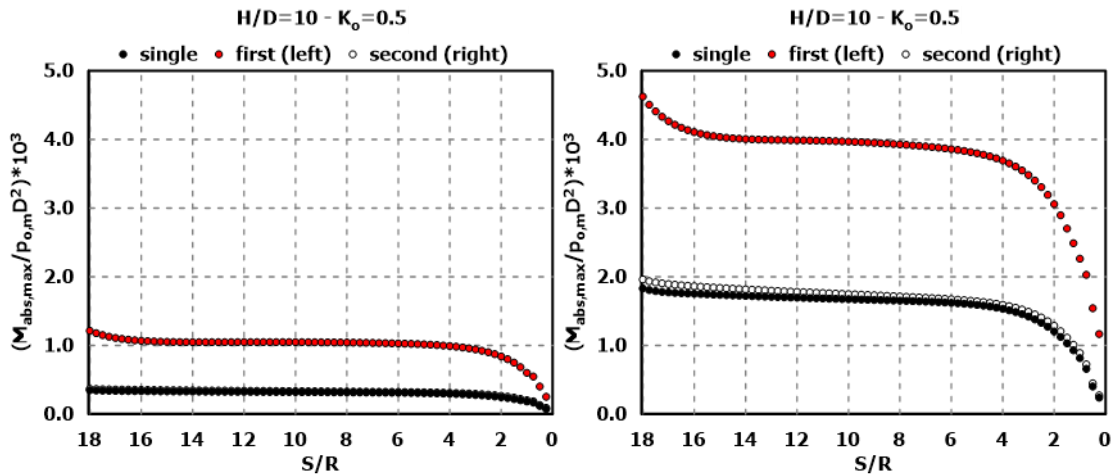
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



Εικόνα 4-59: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων στην τυπική διατομή των σηράγγων για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$. Με κουκίδες απεικονίζονται οι τρεις περιπτώσεις για την παρούσα ανάλυση ενώ, με διακεκομμένη της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1. Οι δυνάμεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί την διάμετρο της σήραγγας.

Στο παραπάνω διάγραμμα της εικόνας 4-59, απεικονίζονται οι κατανομές των αξονικών δυνάμεων στις υπό σύγκριση αναλύσεις, στην τυπική διατομή. Με κουκίδες απεικονίζεται η παρούσα ανάλυση, με μέτρα προσωρινής υποστήριξης με αυξημένη δυσκαμψία, ενώ, με διακεκομμένη γραμμή η ανάλυση της ενότητας 4.1.1. Σε αυτό το διάγραμμα επιβεβαιώνονται όσα παρατηρήθηκαν στην [Εικόνα 4-57](#) και στην [Εικόνα 4-58](#), δηλαδή ότι οι αξονικές δυνάμεις στην παρούσα ανάλυση έχουν την ίδια μορφή με της ενότητας 4.1.1, ωστόσο εν αντιθέσει, με τα φορτία είναι σε όλη τη διατομή αυξημένες.

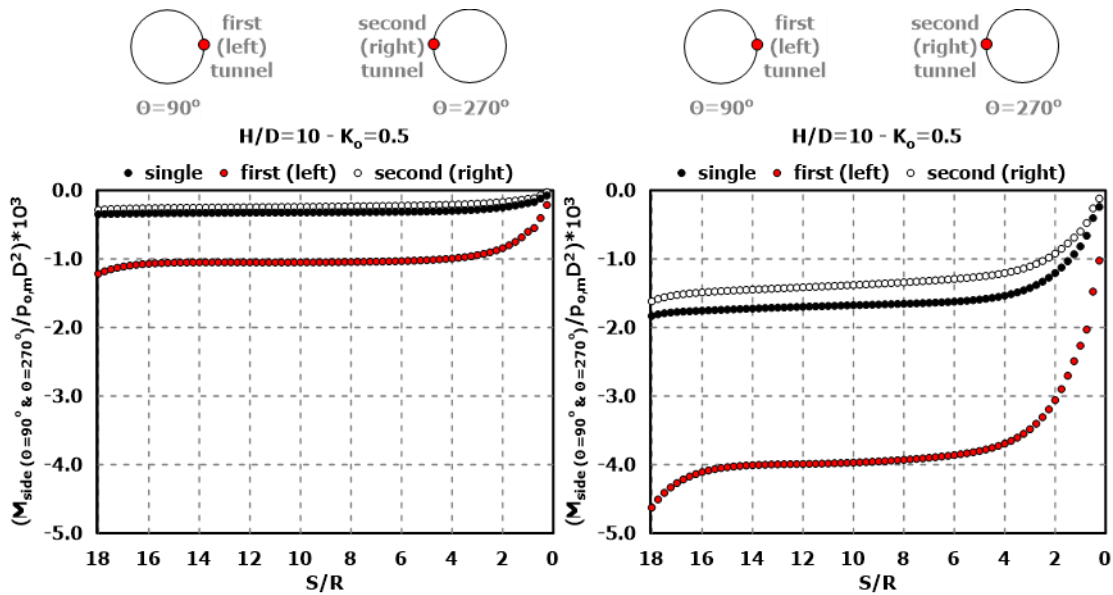
➤ Καμπτικές ροπές στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



Εικόνα 4-60: Μηκτομική απεικόνιση των καμπτικών ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας ενώ, έχει επιλεγεί να παρουσιασθούν τα απόλυτα μεγέθη της μέγιστης καμπτικής ροπής.

Στα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 4-60 παρουσιάζονται οι μηκτομικές κατανομές των μεγίστων καμπτικών ροπών στην προσωρινή υποστήριξη και για τις τρεις περιπτώσεις σηράγγων. Αριστερά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1 (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm) και δεξιά της παρούσας ανάλυσης (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 40cm). Εδώ τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται σε σχέση με πριν. Διότι ενώ, η τάση παραμένει ίδια, δηλαδή αυξητική για την παρούσα ανάλυση, η αύξηση που έχει επέλθει στις τιμές των καμπτικών ροπών σε σχέση με τις αντίστοιχες της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1 είναι πολύ μεγάλη. Για την ακρίβεια για τη "first" είναι αυξημένες κατά 300% στην παρούσα, ενώ για τις "single" και "second" είναι περίπου 370%. Ο λόγος παραμένει η δυσκαμψία των μέτρων υποστήριξης.

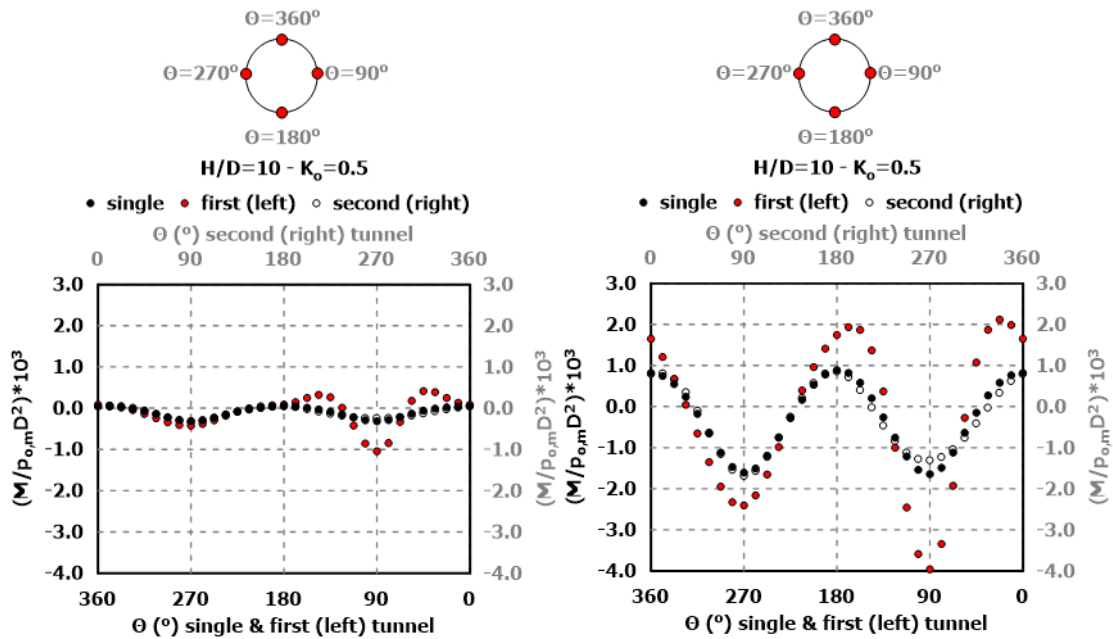
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



Εικόνα 4-61: Μηκοτομική απεικόνιση των καμπτικών ροπών στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σηράγγας.

Στα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 4-61 παρουσιάζονται οι μηκοτομικές κατανομές των καμπτικών ροπών, στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, στην προσωρινή υποστήριξη και για τις τρεις περιπτώσεις σηράγγων. Αριστερά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1 (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm) και δεξιά της παρούσας ανάλυσης (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 40cm). Δεν υπάρχει κάποια ουσιαστική διαφορά με τα μεγέθη της εικόνας 4-41 κι αυτό λόγω του ότι οι μέγιστες τιμές αναμένονται εκεί (αυτός είναι και ο λόγος που παρουσιάζονται αυτά τα διαγράμματα). Η μόνη διαφορά που παρατηρείται σε σχέση με τα διαγράμματα της [Εικόνας 4-58](#) είναι στη "second" η οποία εμφανίζει ελαφρώς μικρότερη τιμή και στις δύο αναλύσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

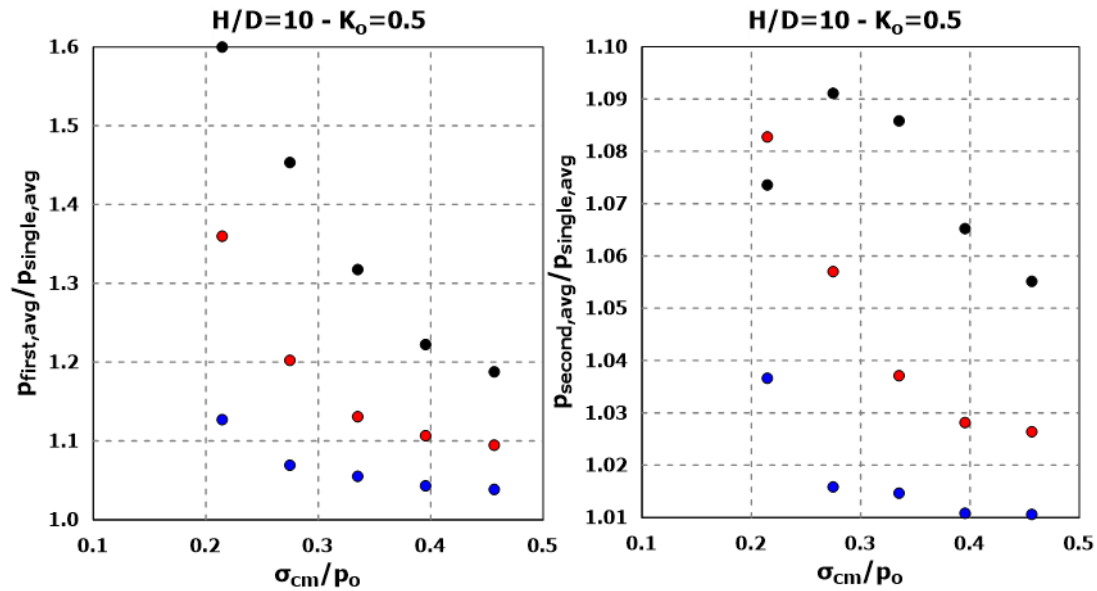


Εικόνα 4-62: Κατανομή των καμπτικών ροπών στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα στην τυπική διατομή των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, *single*, *first* και *second*, για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$, αριστερά για την ανάλυση με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και δεξιά για την ανάλυση με πάχος 40cm. Οι ροπές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου της σήραγγας.

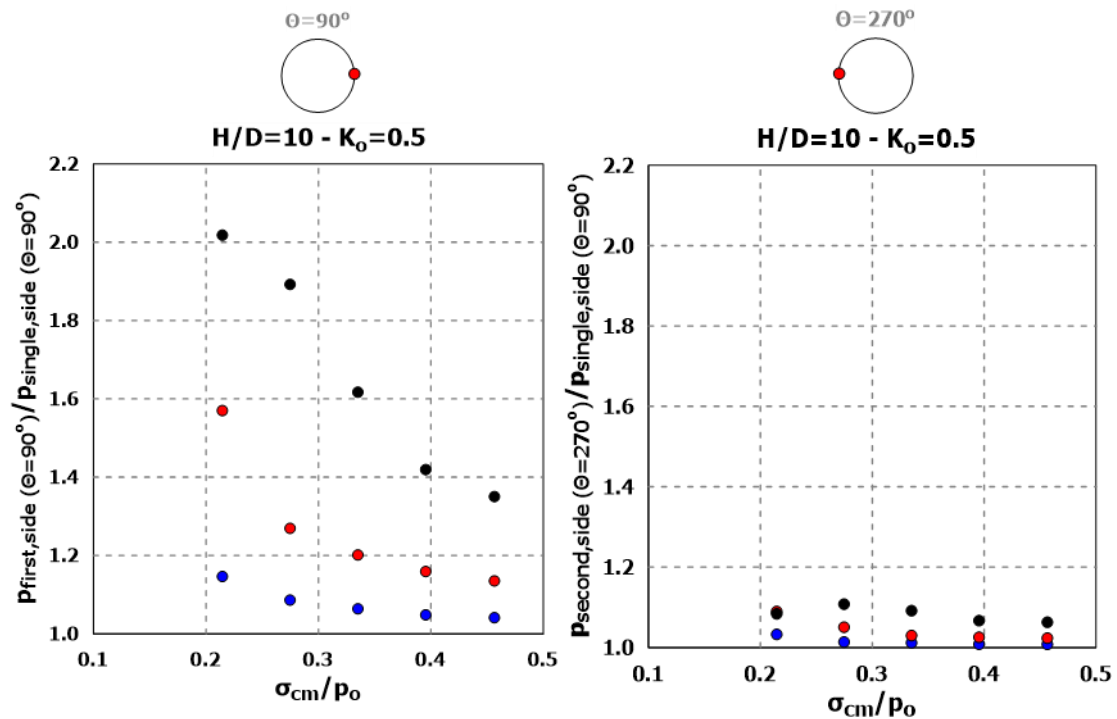
Στα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 4-62 παρουσιάζεται η κατανομή των καμπτικών ροπών στην τυπική διατομή των σηράγγων στην προσωρινή υποστήριξη και για τις τρεις περιπτώσεις σηράγγων. Αριστερά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1 (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm) και δεξιά της παρούσας ανάλυσης (πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 40cm). Ισχύουν όσα ήδη ειπώθηκαν για τις καμπτικές ροπές. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί εδώ είναι ότι στην παρούσα ανάλυση στην διατομή αναπτύσσονται σημαντικές εφελκυστικές ροπές σε τμήμα της εσωτερικής παρειάς, στη στέψη και στον πυθμένα. Επίσης, το φαινόμενο δημιουργείται σε μεγαλύτερο τμήμα της εσωτερικής παρειάς σε σχέση με την ανάλυση της ενότητας 4.1.1.

4.2.2 Συγκεντρωτικά Διαγράμματα

➤ **Φορτίο στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα**

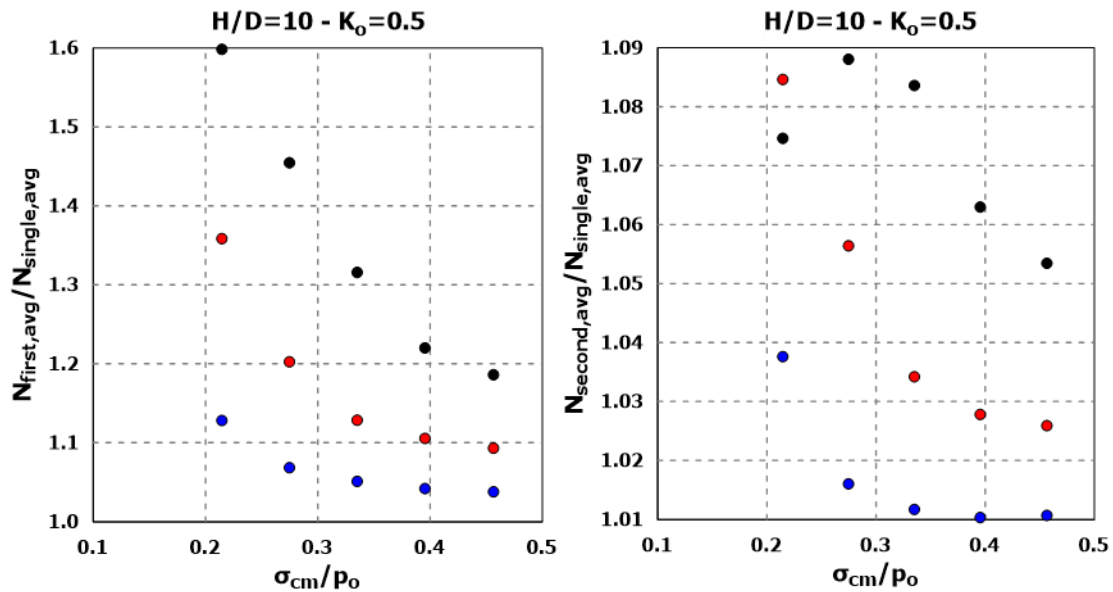


Εικόνα 4-63: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο του μέσου όρου των φορτίων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.2.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

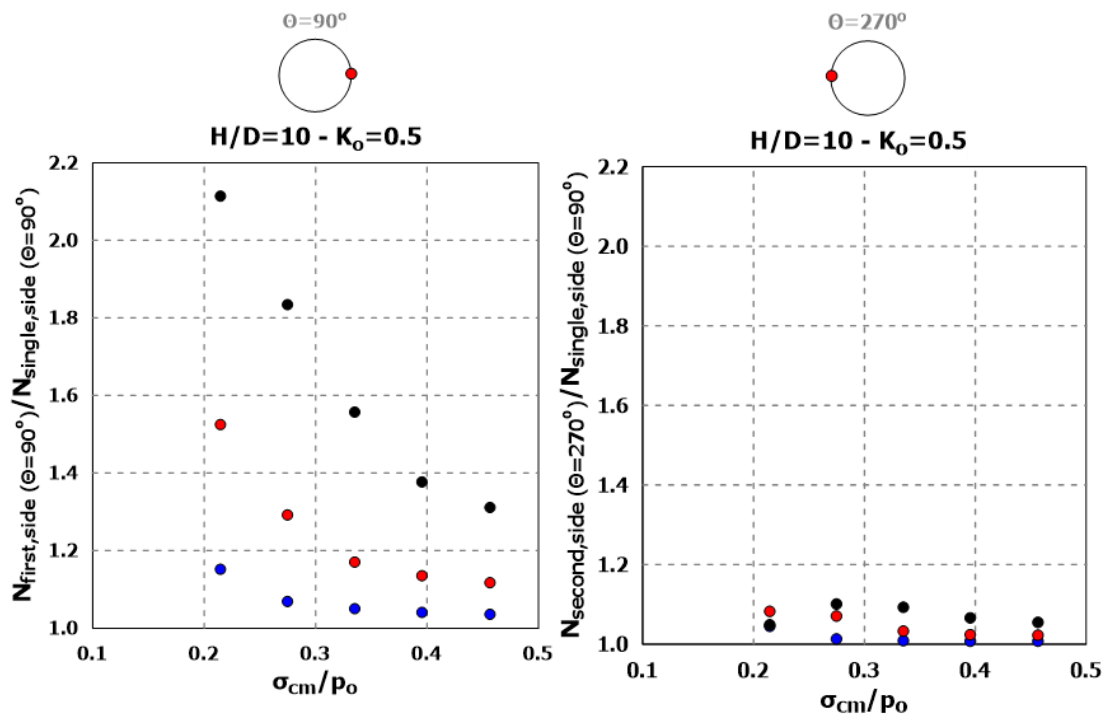


Εικόνα 4-64: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σπράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.2.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

➤ Αξονικές δυνάμεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

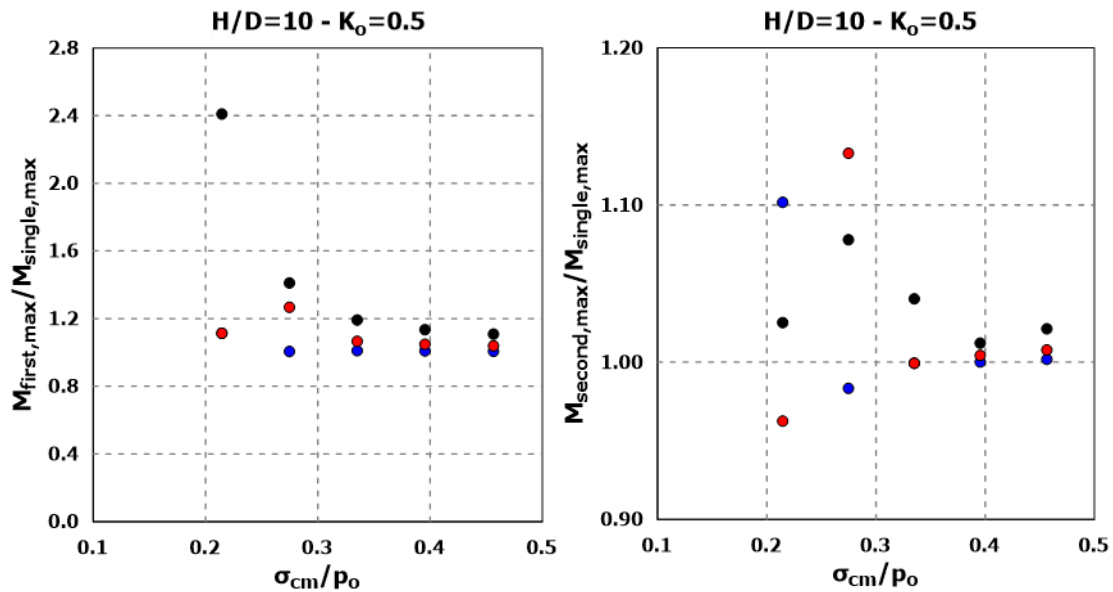


Εικόνα 4-65: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο του μέσου όρου των αξονικών δυνάμεων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.2.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

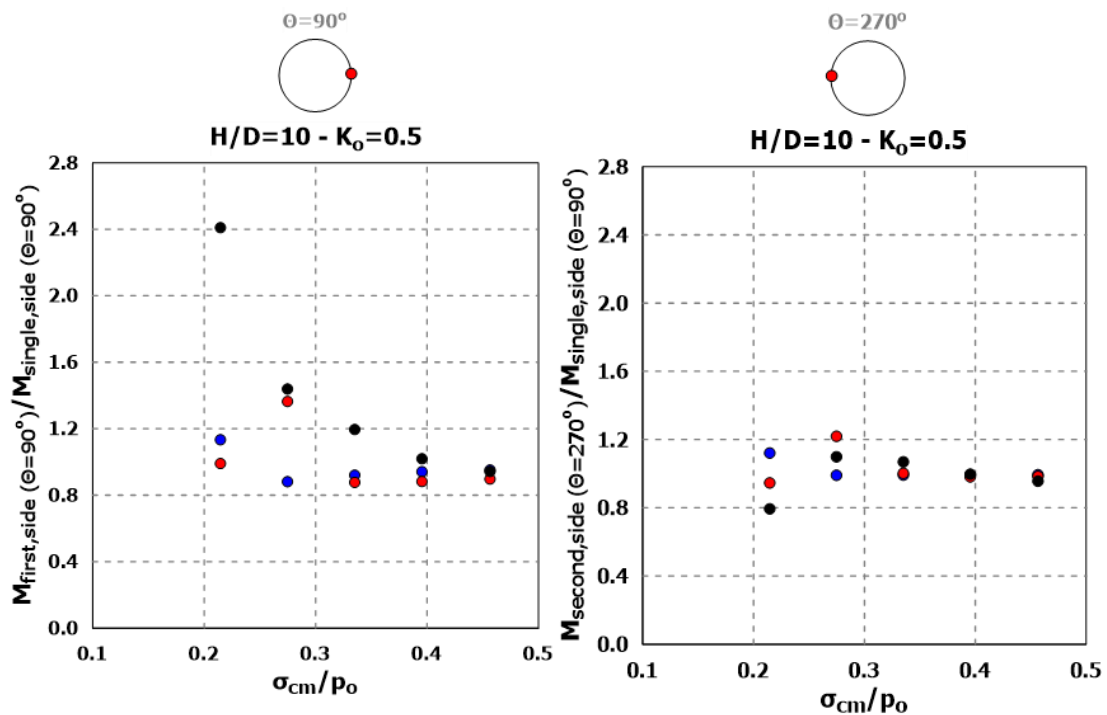


Εικόνα 4-66: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των αξονικών δυνάμεων στις εσωτερικές παρείσεις των σπράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.2.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

➤ Καμπτικές ροπές στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



Εικόνα 4-67: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των μέγιστων καμπτικών ροπών σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.2.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".



Εικόνα 4-68: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των καμπτικών ροπών στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχόμαζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για την ανάλυση της ενότητας 4.2.1, για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second".

Στα διαγράμματα των εικόνων 4-63 έως 4-68 απεικονίζονται οι λόγοι της "first"/"single" και της "second"/"single", για όλα τα υπό εξέταση μεγέθη, για όλα τα πλάτη πυλώνα και όλες τις γεωτεχνικές συνθήκες. Αρχικά, παρατηρούμε ότι η μορφή των διαγραμμάτων είναι πανομοιότυπη με τα αντίστοιχα διαγράμματα της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1. Οι διαφορές που παρατηρούνται είναι ότι οι τιμές του φορτίου και των αξονικών δυνάμεων στην παρούσα ανάλυση είναι κατά τι μειωμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες της ανάλυσης της ενότητας 4.1.1, ενώ στις καμπτικές ροπές αυτή η μείωση είναι σημαντική για την περίπτωση της "single". Η μείωση παρατηρείται κυρίως για πλάτος πυλώνα 4m, ενώ, όσο αυτό αυξάνεται τόσο οι τιμές τείνουν να γίνουν ίδιες με αυτές τις ανάλυσης 4.1.1.

		W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D
		0.5	1	2	0.5	1	2	0.5	1	2	0.5	1	2
σ_{cm}/ρ_o		$\rho_{first,ave} / \rho_{single,ave}$	$\rho_{first,ave} / \rho_{single,ave}$	$\rho_{first,ave} / \rho_{single,ave}$	$\rho_{first,side}(\theta=90^\circ) / \rho_{single,side}(\theta=90^\circ)$	$\rho_{first,side}(\theta=90^\circ) / \rho_{single,side}(\theta=90^\circ)$	$\rho_{first,side}(\theta=90^\circ) / \rho_{single,side}(\theta=90^\circ)$	$\rho_{second,ave} / \rho_{single,ave}$	$\rho_{second,ave} / \rho_{single,ave}$	$\rho_{second,ave} / \rho_{single,ave}$	$\rho_{second,side}(\theta=270^\circ) / \rho_{single,side}(\theta=90^\circ)$	$\rho_{second,side}(\theta=270^\circ) / \rho_{single,side}(\theta=90^\circ)$	$\rho_{second,side}(\theta=270^\circ) / \rho_{single,side}(\theta=90^\circ)$
Ανάλυση Ενότητας 4.1.1	0.21	1.62	1.37	1.13	2.09	1.57	1.16	1.08	1.09	1.04	1.06	1.09	1.05
	0.27	1.49	1.22	1.07	1.92	1.31	1.08	1.10	1.07	1.02	1.11	1.08	1.01
	0.34	1.36	1.14	1.06	1.67	1.20	1.06	1.10	1.04	1.02	1.11	1.04	1.01
	0.40	1.25	1.12	1.05	1.46	1.16	1.05	1.08	1.03	1.01	1.08	1.03	1.01
	0.46	1.21	1.10	1.04	1.37	1.14	1.04	1.07	1.03	1.01	1.07	1.03	1.01
Ανάλυση Ενότητας 4.2.1	0.21	1.60	1.36	1.13	2.02	1.57	1.15	1.07	1.08	1.04	1.08	1.09	1.03
	0.27	1.45	1.20	1.07	1.89	1.27	1.09	1.09	1.06	1.02	1.11	1.05	1.01
	0.34	1.32	1.13	1.06	1.62	1.20	1.06	1.09	1.04	1.01	1.09	1.03	1.01
	0.40	1.22	1.11	1.04	1.42	1.16	1.05	1.07	1.03	1.01	1.07	1.03	1.01
	0.46	1.19	1.09	1.04	1.35	1.14	1.04	1.06	1.03	1.01	1.06	1.02	1.01

Πίνακας 5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τα φορτία που καλείται να παραλάβει η προσωρινή υποστήριξη, για όλες τις αναλύσεις της παραγράφου 4.2.

		W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D
		0.5	1	2	0.5	1	2	0.5	1	2	0.5	1	2
σ_{cm}/ρ_0		$N_{first,ave} / N_{single,ave}$	$N_{first,ave} / N_{single,ave}$	$N_{first,ave} / N_{single,ave}$	$N_{first, (\theta=90^\circ)} / N_{single, (\theta=90^\circ)}$	$N_{first, (\theta=90^\circ)} / N_{single, (\theta=90^\circ)}$	$N_{first, (\theta=90^\circ)} / N_{single, (\theta=90^\circ)}$	$N_{second,ave} / N_{single,ave}$	$N_{second,ave} / N_{single,ave}$	$N_{second,ave} / N_{single,ave}$	$N_{second, (\theta=270^\circ)} / N_{single, (\theta=90^\circ)}$	$N_{second, (\theta=270^\circ)} / N_{single, (\theta=90^\circ)}$	$N_{second, (\theta=270^\circ)} / N_{single, (\theta=90^\circ)}$
Ανάλυση Ενότητας 4.1.1	0.21	1.62	1.37	1.13	2.13	1.55	1.16	1.08	1.09	1.04	1.05	1.09	1.05
	0.27	1.49	1.22	1.07	1.89	1.32	1.08	1.10	1.07	1.02	1.11	1.08	1.02
	0.34	1.35	1.14	1.05	1.63	1.19	1.05	1.09	1.04	1.02	1.11	1.04	1.01
	0.40	1.25	1.11	1.05	1.44	1.15	1.05	1.08	1.03	1.02	1.09	1.03	1.01
	0.46	1.21	1.10	1.04	1.36	1.13	1.04	1.07	1.03	1.01	1.08	1.03	1.01
Ανάλυση Ενότητας 4.2.1	0.21	1.60	1.36	1.13	2.11	1.53	1.15	1.07	1.08	1.04	1.05	1.08	1.05
	0.27	1.45	1.20	1.07	1.83	1.29	1.07	1.09	1.06	1.02	1.10	1.07	1.01
	0.34	1.32	1.13	1.05	1.56	1.17	1.05	1.08	1.03	1.01	1.09	1.03	1.01
	0.40	1.22	1.11	1.04	1.38	1.14	1.04	1.06	1.03	1.01	1.07	1.02	1.01
	0.46	1.19	1.09	1.04	1.31	1.12	1.04	1.05	1.03	1.01	1.06	1.02	1.01

Πίνακας 6: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην προσωρινή υποστήριξη, για όλες τις αναλύσεις της παραγράφου 4.2

		W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D	W/D
		0.5	1	2	0.5	1	2	0.5	1	2	0.5	1	2
σ_{cm}/ρ_0		$M_{first,abs,max} / M_{single,abs,max}$	$M_{first,abs,max} / M_{single,abs,max}$	$M_{first,abs,max} / M_{single,abs,max}$	$M_{first,abs,(\theta=90^\circ)} / M_{single,abs,(\theta=90^\circ)}$	$M_{first,abs,(\theta=90^\circ)} / M_{single,abs,(\theta=90^\circ)}$	$M_{first,abs,(\theta=90^\circ)} / M_{single,abs,(\theta=90^\circ)}$	$M_{second,abs,max} / M_{single,abs,max}$	$M_{second,abs,max} / M_{single,abs,max}$	$M_{second,abs,max} / M_{single,abs,max}$	$M_{second,abs,(\theta=270^\circ)} / M_{single,abs,(\theta=90^\circ)}$	$M_{second,abs,(\theta=270^\circ)} / M_{single,abs,(\theta=90^\circ)}$	$M_{second,abs,(\theta=270^\circ)} / M_{single,abs,(\theta=90^\circ)}$
Ανάλυση Ενότητας 4.1.1	0.21	3.30	1.11	1.14	3.30	0.84	1.17	1.06	0.96	1.11	0.75	0.92	1.13
	0.27	1.36	1.30	1.03	1.29	1.45	0.89	1.02	1.13	0.98	1.06	1.26	1.00
	0.34	1.16	1.07	1.02	1.02	0.88	0.92	1.07	1.01	1.00	1.11	1.08	1.00
	0.40	1.11	1.06	1.02	0.94	0.87	0.94	1.08	1.01	1.00	1.08	1.00	1.00
	0.46	1.11	1.05	1.01	0.93	0.90	0.96	1.03	1.02	1.01	1.06	1.02	1.00
Ανάλυση Ενότητας 4.2.1	0.21	2.41	1.11	1.11	2.41	0.99	1.13	1.03	0.96	1.10	0.79	0.95	1.12
	0.27	1.41	1.27	1.01	1.44	1.36	0.88	1.08	1.13	0.98	1.10	1.22	0.99
	0.34	1.19	1.07	1.01	1.20	0.88	0.92	1.04	1.00	1.00	1.07	1.00	0.99
	0.40	1.14	1.05	1.01	1.02	0.88	0.94	1.01	1.00	1.00	1.00	0.98	0.99
	0.46	1.11	1.04	1.01	0.94	0.90	0.95	1.02	1.01	1.00	0.96	0.98	0.99

Πίνακας 7: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις καμπτικές ροπές που αναπτύσσονται στην προσωρινή υποστήριξη, για όλες τις αναλύσεις της παραγράφου 4.2.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι σήραγγες αποτελούν τεχνικά έργα με αυξημένες απαιτήσεις ασφάλειας και λειτουργικότητας. Οι απαιτήσεις αυτές επιβάλλουν τη συνεχώς αυξανόμενη κατασκευή δίδυμων σηράγγων και κατ' επέκταση την κατανόηση του μηχανισμού εξέλιξης των φορτίσεων. Η μεταπτυχιακή εργασία, προκειμένου να συμβάλει στην κατανόηση του φαινομένου, πραγματοποιείται την αλληλεπίδραση των δυο γειτονικών κλάδων. Η προσομοίωση του προβλήματος πραγματοποιείται με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, μέσω τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων, ενώ η αλληλεπίδραση ποσοτικοποιείται σε όρους πιέσεων και εντατικών μεγεθών. Αναλυτικότερα, μελετάται η επίδραση των γεωτεχνικών συνθηκών, του πλάτους του ενδιάμεσου πυλώνα, της σχετικής απόστασης των μετώπων και της δυσκαμψίας των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Οι βασικές παραδοχές που υιοθετούνται στις αναλύσεις είναι ότι η διατομή της σήραγγας θεωρείται κυκλική με διάμετρο 8m, η εκσκαφή είναι ολομέτωπη και η άμεση υποστήριξη αποτελείται από εκτοξευμένο σκυρόδεμα με μέτρο ελαστικότητας $E_{sup}=20000$ MPa. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν ύστερα από τον πρωτογενή έλεγχο και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων, όπως αυτά λαμβάνονται μετά το πέρας της εκσκαφής.

- Η εκσκαφή σήραγγας που γειτνιάζει με προ υπάρχουσα προκαλεί πάντα αύξηση του φορτίου που καλείται να παραλάβει η άμεση υποστήριξη καθώς και των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται σε αυτή και στις δύο σήραγγες, με μεγαλύτερα σαφώς της πρώτης, συγκριτικά με τη διάνοιξη μονού κλάδου σήραγγας
- Όσο αυξάνεται το πλάτος πυλώνα, τόσο μειώνεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο σηράγγων και μπορεί να θεωρηθεί ότι το φαινόμενο περιορίζεται σε χαμηλό και αποδεκτό επίπεδο για τιμές του πλάτους πυλώνα μεγαλύτερες ή ίσες με 2D
- Όσο βελτιώνονται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας τόσο μικρότερα μεγέθη αναπτύσσονται στο κέλυφος της άμεσης υποστήριξης, τόσο αμβλύνεται και τείνει να εξαλείφεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης
- Όταν για την έναρξη της διάνοιξης της δεύτερης σήραγγας μεσολαβεί μεγάλη απόσταση από το πέρας της πρώτης, την μεγαλύτερη επιρροή την δέχεται η πρώτη σήραγγα και κυρίως η εσωτερική παρειά της (η παρειά που γειτνιάζει με τη δεύτερη σήραγγα). Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι ότι η πρώτη σήραγγα καλείται να παραλάβει το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου που προκαλείται από την εκ νέου χαλάρωση της βραχώμαζας λόγω τη διάνοιξης της δεύτερης σήραγγας. Η δυσκαμψία του συστήματος του γεωυλικού και της άμεσης

υποστήριξης της αριστερής - πρώτης σήραγγας παρεμποδίζει την ανάληψη της διαταραχής ως επιπρόσθετη σύγκλιση, αλλά οδηγεί στην ανάπτυξη πλεονάζουσας φόρτισης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

- Στην ταυτόχρονη διάνοιξη των δύο σηράγγων παρατηρείται μείωση του φορτίου και των εντατικών μεγεθών στην πρώτη σήραγγα αλλά αύξηση τους στη δεύτερη σήραγγα, καθώς πλέον το φαινόμενο ισομοιράζεται και στις δύο σήραγγες. Η ταυτόχρονη διάνοιξη των σηράγγων αποδεικνύεται ευμενέστερη σε όρους περιορισμού της αλληλεπίδρασης ως προς τη φόρτιση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης των σηράγγων τόσο ως προς τα μεγέθη και τη συμμετρία της μορφής των αναπτυσσόμενων μεγεθών. Η μοναδική παράμετρος η οποία ενδέχεται να ανατρέπει τη συγκεκριμένη θεώρηση είναι η δυναμική εκτεταμένη αλληλεπίδραση των μετώπων εκσκαφής σε ταυτόχρονη διάνοιξη που ίσως προκαλεί αστάθεια/αστοχία τους. Αν δεν κλονίζεται η ευστάθεια των μετώπων εκσκαφής και δεν εκδηλώνονται ανεξέλεγκτες μετακινήσεις στα μέτωπα εκσκαφής, η ταυτόχρονη διάνοιξη καταδεικνύεται ευμενέστερη.
- Η εφαρμογή ακόμη πιο δύσκαμπτων μέτρων άμεσης υποστήριξης (μεγαλύτερο πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος), προκαλεί μικρή αύξηση στα φορτία και στις αξονικές δυνάμεις και πολύ σημαντική αύξηση στις καμπτικές ροπές που αναπτύσσονται. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή πιο ενδόσιμων μέτρων προσωρινής υποστήριξης δρα ευεργετικά ως προς τον περιορισμό των εντατικών μεγεθών στην άμεση υποστήριξη και ενδείκνυται εφόσον δεν υπάρχουν συγκεκριμένοι περιορισμοί ως προς το μέγεθος των ακτινικών μετατοπίσεων (συγκλίσεων) που εκδηλώνονται.

Προτάσεις

Από την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας προκύπτουν θέματα προς εκτενέστερη μελέτη και διερεύνηση ως προς την αλληλεπίδραση μεταξύ δίδυμων σηράγγων . Ειδικότερα, προτείνονται να μελετηθούν τα παρακάτω:

- Η αλληλεπίδραση μεταξύ των μετώπων εκσκαφής ειδικά για την περίπτωση της ταυτόχρονης διάνοιξης που η ευστάθεια τους αποτελεί κρίσιμη παράμετρο
- Η αλληλεπίδραση μεταξύ ήδη υπάρχουσας σήραγγας και νέας η οποία διέρχεται κάθετα σε αυτήν ή ξεκινά από αυτήν (cross - passage)
- Πιο σύνθετες διατομές (πεταλοειδής διατομή) και η σύγκριση αυτών με τα αποτελέσματα των αναλύσεων από τις κυκλικές διατομές
- Χρήσιμο θα ήταν να εφαρμοσθούν πολλαπλές φάσεις εκσκαφής καθώς και άλλα μέτρα προσωρινής υποστήριξης, έτσι ώστε να είναι κατά το δυνατόν ρεαλιστικότερη η προσομοίωση
- Διαφορετικό καταστατικό προσομοίωμα, δηλαδή η προσομοίωση της βραχώμαζας να μην γίνεται μέσω των ισοδύναμων παραμέτρων διατμητικής αντοχής κατά Mohr-Coulomb αλλά κατ' ευθείαν μέσω των παραμέτρων κατά Hoek-Brown.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία

- 1) ABAQUS 6.13 Documentation. 2013. SIMULIA, United States of America
- 2) Adachi T., Kimura M. & Osada H. 1993. Interaction between multi-tunnels under construction. In Proceedings of the 11th Southeast Asian Geotechnical Conference, Singapore, May 1993. National University of Singapore and Nanyang Technological University, Singapore, pp. 51-60
- 3) 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. London, 15-17 April 1996. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp.441-446
- 4) Addenbrooke T.I., Potts D.M. & Puzrin A.M. 1997. The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of twin tunnel construction. *Geotéchnique*, 47 (3), pp. 693-712
- 5) Addenbrooke T.I. & Potts D.M. 2001. Twin tunnel interaction: Surface and Subsurface effects. *The International Journal of Geomechanics*, Vol. 1, No. 2, 2001, p.p. 249-271
- 6) Chaboussi J. & Ranken R.E. 1977. Interaction between two parallel tunnels. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, No. 1, pp. 75-103
- 7) Chortis F. & Kavvas M. 2015. Numerical Investigation of the Interaction between Twin Tunnels. ITA WTC 2015 Congress Center, Dubrovnik, Croatia
- 8) [Do N.A., Dias D., Oreste P & Djera – Maigre I.](#) 2014. 2D numerical investigations of twin tunnel interaction. *Geomechanics and Engineering* 6 (3) March 2014
- 9) [Do N.A., Dias D., Oreste P & Djera – Maigre I.](#) 2014. Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin tunnels in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 42, May 2014, pp.40-51
- 10) [Karakus M., Ozsan A., Basarir H.](#) 2007. Finite element analysis for the twin metro tunnel constructed in Ankara Clay, Turkey. *Bulleting of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 66, No. 1, 2007, pp. 71-79
- 11) Kim S.H., Burd H.J. & Miligan G.W.E. 1998. Model testing of closely spaced tunnels in clay. *Geotéchnique*, 48 (3), pp. 375-388

- 12) [Kim S.H., 2004](#). Interaction behaviors between parallel tunnels in soft ground. Tunneling and underground space technology, Vol. 19, pp. 448-454
- 13) [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, 1-3 December 2004
- 14) [Liu H., Small J.C. & Carter J.P. 2008](#). Full 3D modelling for effects of tunnelling on existing support systems in the Sydney region. Tunnelling and Underground Space Technology 23(4), pp. 399-420, July 2008
- 15) [Ng C.W.W., Lee K.M. & Tang D.K.W. 2002](#). Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunnelling method (NATM) twin tunnel interactions. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 41, 2004, pp. 523-539

Ελληνική Βιβλιογραφία

- 1) Καββαδάς Μ. (2005). Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα
- 2) Μαρίνος Π. (1993). Κεφάλαια Γεωλογίας Μηχανικού. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα
- 3) Μαρίνος Π. (1998). Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας Μηχανικού. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- 4) Παπαδόπουλος Β. (2004). Στοιχεία του μαθήματος: 'Βραχομηχανική-Σήραγγες'. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα
- 5) [Φορτσάκης Π.Ι. και Καββαδάς Μ.Ι.](#) 2010. Σύγκριση των μεθόδων εκτίμησης φορτίων της τελικής επένδυσης μέσω αριθμητικών αναλύσεων και στοιχείων από την Εγνατία Οδό. 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής. Βόλος, Ελλάδα, 29 Σεπτεμβρίου - 1 Οκτωβρίου, 2, 571-578. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας
- 6) [Φορτσάκης Π.Ι., Μαγκανάς Κ.Α., και Καββαδάς Μ.Ι.](#) 2006. Μεθοδολογίες και φορτίσεις σχεδιασμού της τελικής επένδυσης σηράγγων. Παρουσίαση στοιχείων από σήραγγες της Εγνατίας Οδού. 15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος. Αλεξανδρούπολη, Ελλάδα, 25-27 Οκτωβρίου, Δ, 117-128. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.