



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΔΙΔΥΜΩΝ
ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕΣΩ ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ**

ΜΑΚΑΤΟΥΝΑΚΗ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΚΑΒΒΑΔΑΣ ΜΙΧΑΗΛ
ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2017**

Ευχαριστίες

Για την ανάθεση και επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τη συνεισφορά του στην εκπόνηση της, καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να εμβαθύνω στο γνωστικό αντικείμενο του σχεδιασμού των σηράγγων θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Μ. Καββαδά, Αν. Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η εποπτεία του και η καθοδήγησή του κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσαν σημαντική συμβολή στην ολοκλήρωσή της.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω τον κ. Φ. Χόρτη, Υποψήφιο Διδάκτορα του Ε.Μ.Π., MSc, για την πολύτιμη συνεισφορά του και την συνεχή βοήθεια που μου παρείχε τόσο σε επιστημονικό όσο και σε οργανωτικό επίπεδο. Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για τον απεριόριστο χρόνο που μου διέθεσε, την αμέριστη συμπαράστασή του, την αρωγή που παρείχε στην επίλυση αποριών και προβλημάτων που προέκυπταν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αλλά και τις πολύτιμες γνώσεις που αποκόμισα κατά την συνεργασία μας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ αξίζει στην οικογένεια μου η οποία με στηρίζει σε κάθε προσπάθειά μου, και στους φίλους μου για τη συνεχή ενθάρρυνση.

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή	1
1.1.	Αντικείμενο και Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας	1
1.2.	Θεωρητικά στοιχεία	2
1.2.1.	Συστήματα Ταξινόμησης της Βραχώμαζας	2
1.2.2.	Κριτήρια Αστοχίας της Βραχώμαζας	5
1.2.3.	Βαθμός Αποτόνωσης λ και Καμπύλες Σύγκλισης - Αποτόνωσης	8
1.2.4.	Δομή της Διπλωματικής Εργασίας	10
2.	Βιβλιογραφική Επισκόπηση	11
2.1.	Εισαγωγή	11
2.2.	Βιβλιογραφικές Αναφορές	11
2.2.1.	Soliman E., Duddeck H., Ahrens H. (1993)	11
2.2.2.	Adachi T., Kimura M., Osada H. (1993)	14
2.2.3.	Addenbrooke T.I., Potts D.M. (1996)	17
2.2.4.	Sang-Hwan Kim (2004)	18
2.2.5.	Koungelis D.K., Augarde C.E. (2004)	20
2.2.6.	Karakus M., Ozsan A., Basarir H. (2007)	23
2.2.7.	Chen S.L, Lee S.C., Gui M.W. (2008)	27
2.2.8.	Carranza C. – Torres, Diederichs M. (2009)	29
2.2.9.	Μπεκρή Ε. (2012)	35
2.2.10.	Chortis F., Kavvadas M. (2015)	46
2.2.11.	Ψυχάρη Ε. (2016)	56
3.	Αριθμητικές Αναλύσεις	67
3.1.	Εισαγωγικά στοιχεία	67
3.2.	Κώδικας πεπερασμένων αναλύσεων Abaqus	68
3.3.	Γεωμετρική Απεικόνιση	69
3.4.	Διακριτοποίηση καννάβου	70
3.5.	Βήματα Εκκαθής	71
3.6.	Παράμετροι Αριθμητικών Αναλύσεων	74
3.6.1.	Γεωμετρικές παράμετροι	74
3.6.2.	Γεωτεχνικές παράμετροι	74
3.6.3.	Παράμετροι της άμεσης υποστήριξης	78
3.7.	Παραδοχές αριθμητικών αναλύσεων	80
4.	Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων	81
4.1.	Εισαγωγή	81
4.1.1.	Επίδραση γεωτεχνικών συνθηκών	81
4.1.2.	Επίδραση του πλάτους του πυλώνα	89
4.1.3.	Επίδραση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0	96
4.1.4.	Επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης λ	105
4.2.	Συγκεντρωτικά Γραφήματα	109
5.	Συμπεράσματα και Προτάσεις	123
5.1.	Συμπεράσματα	123
5.2.	Προτάσεις	125

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1:Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI (Hoek&Marinos, 2000)----- 3

Σχήμα 1-2: Περιβάλλουσα κριτηρίου Mohr-Coulomb ----- 6

Σχήμα 1-3: Διάγραμμα κύριων τάσεων για τα κριτήρια Hoek-Brown καιMohr-Coulomb.----- 7

Σχήμα 1-4: Κατανομές πιέσεων γύρω από κυκλική σήραγγα. ----- 8

Σχήμα 1-5: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης κυκλικής σήραγγας με ακτίνα R (αριστερά) και Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης για διάφορους τύπους συμπεριφοράς τάσεων-παραμορφώσεων της βραχώμαζας (δεξιά). Στην περίπτωση έντονης χαλάρωσης προκαλείται κατάρρευση της οροφής της σήραγγας. (Μ.Καββαδάς,2012) ----- 8

Σχήμα 1-6: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα (Μ.Καββαδάς,2007) ----- 9

Σχήμα 2-1: Ακτινικές μετατοπίσεις της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει της ακαμψίας του εδάφους (αριστερά) για πλάτος πυλώνα R και (δεξιά) για πλάτος πυλώνα 0.5R.-----13

Σχήμα 2-2: Αξονικές δυνάμεις της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει της ακαμψίας του εδάφους (αριστερά) για πλάτος πυλώνα R και (δεξιά) για πλάτος πυλώνα 0.5R. -----13

Σχήμα 2-3: Καμπτικές ροπές της άμεσης υποστήριξης εδάφους για πλάτος πυλώνα R (αριστερά) και για πλάτος πυλώνα 0.5R (δεξιά). -----14

Σχήμα 2-4:Θέση σηράγγων για τις δοκιμές 2 και 3, όπου H το υπερκείμενο πάχος γαιών και W το πλάτος πυλώνα. -----14

Σχήμα 2-5:Θέση σηράγγων για την δοκιμή 4,όπου H το υπερκείμενο πάχος γαιών, h η κατακόρυφη απόσταση των σηράγγων και W το πλάτος πυλώνα. -----15

Σχήμα 2-6: Κανονικοποιημένη ανακατανομή εδαφικών πιέσεων στην υπάρχουσα σήραγγα, όπου H το υπερκείμενο πάχος γαιών και W το πλάτος πυλώνα. -----16

Σχήμα 2-7: Γεωμετρία δίδυμων σηράγγων. -----17

Σχήμα 2-8: Διάταξη των παράλληλων σηράγγων στο επιπεδο.-----19

Σχήμα 2-9:Μετατοπίσεις του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος γιαπλάτος πυλώνα W=2D (αριστερά) και για πλάτος πυλώνα W=1.4D (δεξιά). -----20

Σχήμα 2-10: Παρουσίαση των τριών διαφορετικων θέσεων της δεύτερης σήραγγας (αριστερά) και στρωματογραφία του εδάφους (δεξιά).-----21

Σχήμα 2-11: Διάγραμμα της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης του εδάφους κανονικοποιημένη με την αποσταση ανάμεσα στα κεντρα των σηράγγων συναρτήσει του πλάτους πυλώνα κανονικοποιημένο με την διάμετρο της σήραγγας για σήραγγες παράλληλες στον οριζόντιο άξονα. -22

Σχήμα 2-12:Διάγραμμα της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης του εδάφους κανονικοποιημένη με την απόσταση ανάμεσα στα κεντρα των σηράγγων συναρτήσει του πλάτους πυλώνα κανονικοποιημένο με την διάμετρο της σήραγγας για σήραγγες των οποίων τα κέντρα είναι στον κατακόρυφο άξονα. -----23

Σχήμα 2-13: Γεωμετρία της κατασκευασμένης σήραγγας.-----24

Σχήμα 2-14: Φάσεις της εκσκαφής από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. -----25

Σχήμα 2-15:Κατακόρυφες μετατοπίσεις γύρω από τις δίδυμες σήραγγες. -----25

Σχήμα 2-16:Οριζόντιες μετατοπίσεις γύρω από τις δίδυμες σήραγγες. -----26

Σχήμα 2-17: Διάταξη των διατομών των σηράγγων Xueshan. -----28

Σχήμα 2-18: Φόρτιση εδάφους της ημικυκλικής διατομής της σήραγγας σύμφωνα με την προσέγγιση αλληλεπίδρασης εδάφους-υποστήριξης (αριστερά) και σύμβαση προσήμανσης δυνάμεων ,ροπών και μετακινήσεων (δεξιά).-----29

Σχήμα 2-19: Γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων για τις τάσεις q_v, q_h, q_{xy} με την προσέγγιση αλληλεπίδρασης εδάφους-υποστήριξης. ----30

Σχήμα 2-20: Συντελεστής ασφαλείας ορισμένος από την μέγιστη και ελάχιστη τάση στην διατομή του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (αριστερά) και γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - καμπτικών ροπών (δεξιά). --31

Σχήμα 2-21:Γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων για την ροπή κάμψης, την αξονική δύναμη και την τέμνουσα δύναμη με την προσέγγιση αλληλεπίδρασης εδάφους-υποστήριξης.-----32

Σχήμα 2-22:Συντελεστής ασφαλείας ορισμένος από την μέγιστη και ελάχιστη τάση από την αξονική και τέμνουσα δύναμη στην διατομή του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (αριστερά) και γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων- τέμνουσών δυνάμεων (δεξιά). -----34

Σχήμα 2-23: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων-καμπτικών ροπών και αξονικών δυνάμεων-τέμνουσών δυνάμεων στην περίπτωση της σύνθετης υποστήριξης για το εκτοξευόμενο σκυροδέμα, στην περίπτωση της σύνθετης υποστήριξης για μεταλλικά πλαίσια και στην περίπτωση που συμμετέχει μόνο το εκτοξευόμενο σκυροδέμα στην επένδυση του κελύφους.-----35

Σχήμα 2-24:Εγκάρσια όψη του αριθμητικού προσομοιώματος, για W=D=10m, όπου διακρίνονται οι περιοχές διαφορετικής πυκνότητας των πεπερασμένων στοιχείων (Λογισμικό ANSYS) (Μπεκρή Ε., 2012)-----36

Σχήμα 2-25:Σύγκριση, περί τη χαρακτηριστική διατομή, των πιέσεων που αναπτύσσονται επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου της δίδυμης σήραγγας (W=0.5D=5m), του δεύτερου κλάδου αυτής, καθώς και της σήραγγας μονού κλάδου.(Μπεκρή Ε.,2012) -----39

Σχήμα 2-26:Σύγκριση, περί τη χαρακτηριστική διατομή, των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων, για τον πρώτο κλάδο της δίδυμης σήραγγας (W=0.5D=5m), το δεύτερο κλάδο αυτής, καθώς και τη σήραγγα μονού κλάδου. (Μπεκρή Ε.,2012)-----39

Σχήμα 2-27:Εξέλιξη των αναπτυσσόμενων μέσων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, κατά τη συνολική διάρκεια της εκσκαφής, για διατομές των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας που βρίσκονται σε απόσταση 40m από την είσοδο της σήραγγας και για-----40

Σχήμα 2-28:Κατανομή, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, για W=0.5D=5m και για δυο διαφορετικές ποιότητες βραχώμαζας (GSI=10 και GSI=40). (Μπεκρή Ε.,2012) -----41

Σχήμα 2-29:Κατανομή ανηγμένης μέσης πίεσης επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $\overline{p_{average}}$, $(f/s)\overline{p_{average}}$, single,ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_0 , για----42

Σχήμα 2-30:Κατανομή ανηγμένης πίεσης της οροφής της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $\overline{p_{roof}}$, $(f/s)\overline{p_{roof}}$, single, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_0 , για W=0.5D=5m, W=D=10m,W=2D=20m. (Μπεκρή Ε.,2012)-----42

Σχήμα 2-31:Κατανομή ανηγμένης πίεσης της δεξιάς παρειάς ($\theta=90^\circ$) της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $\overline{p_{90}}$, $(f/s)\overline{p_{90}}$,single, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_0 , γιαW=0.5D=5m, W=D=10m, W=2D=20m. (Μπεκρή Ε.,2012) -----43

Σχήμα 2-32:Κατανομή ανηγμένης πίεσης της αριστερής παρειάς της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $\overline{p_{270}}$, $(f/s)\overline{p_{270}}$,single, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_0 , για -----43

Σχήμα 2-33: Κατανομή ανηγμένης μέσης μετακίνησης των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουντη χαρακτηριστική διατομή του πρώτου κλάδου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχημετακίνηση του μονού κλάδου $\overline{u_{average}}$, $(f/s)\overline{u_{average}}$,single, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης τωνγεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_0 , για W=0.5D=5m, W=D=10m, W=2D=20m. (Μπεκρή Ε.,2012)-----44

Σχήμα 2-34:Κατανομή ανηγμένης μετακίνησης των εδαφικών στοιχείων που βρίσκονται στην οροφή της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου κλάδου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη μετακίνηση του μονού κλάδου $u_{roof}(f,s)/u_{roof, single}$, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_0 , για $W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$. (Μπεκρή Ε.,2012)-----	44
Σχήμα 2-35:Σύγκριση των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του δεύτερου κλάδου διάνοιξης, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, για $W=5m$, ίδιες γεωτεχνικές συνθήκες και διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας. (Μπεκρή Ε.,2012)-----	45
Σχήμα 2-36: Αριθμητικό μοντέλο για πλάτος πυλώνα $W = 2D$ (Chortis F. & Kanvadas M., 2015) -----	46
Σχήμα 2-37:Ωρολογιακός προσανατολισμός της γωνίας στην αριστερή και τη δεξιά σήραγγα (Chortis F.&Kanvadas M., 2015). -----	47
Σχήμα 2-38:Κατανομή των φορτίων: (αριστερά) στην τυπική διατομή, (πάνω δεξιά) στη διαμήκη διεύθυνση, στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων & χρονοϊστορία των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων (κάτω δεξιά), για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) , για πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για λόγους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ (Chortis F. & Kanvadas M., 2015) -----	49
Σχήμα 2-39:Κατανομή των φορτίων, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=1.0$ (αριστερά) και $K_0=1.5$ (δεξιά) στην τυπική διατομή, για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) και για λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D=10$ (Chortis F. & Kanvadas M.,2015) ---	50
Σχήμα 2-40:Λόγος φορτίων (πρώτης/μονής) στην εσωτερική παρειά της "πρώτης σήραγγας"($\Theta=90^\circ$),ως συνάρτηση του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0), για διάφορες τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_0) και λόγου ύψους υπερκειμένων γαιών (H/D)(Chortis F. & Kanvadas M., 2015)-----	51
Σχήμα 2-41:Λόγος φορτίων (πρώτης/μονής) στην οροφή της «πρώτης σήραγγας» (first tunnel)($\Theta=360^\circ$), ως συνάρτηση του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0), για διάφορες τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_0) και λόγου ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D=10$ (Chortis F. & Kanvadas M., 2015)-----	52
Σχήμα 2-42: Χρονοϊστορία των φορτίων (μέγιστη τιμή), για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0), συντελεστή γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ και λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D=10$, για την «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) στα αριστερά και για τη «δευτέρα σήραγγα»(second tunnel) στα δεξιά (Chortis F. & Kanvadas M., 2015)-----	53
Σχήμα 2-43: Κατανομή της αξονικής δύναμης, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ (αριστερά) και $K_0=1.5$ (δεξιά) στην τυπική διατομή, για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0), πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D=10$ (Chortis F. & Kanvadas M., 2015)-----	54
Σχήμα 2-44: Κατανομή της ροπής κάμψης, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ (αριστερά) και $K_0=1.5$ (δεξιά) στην τυπική διατομή, για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) που εξετάστηκε, πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D=10$ (Chortis F. & Kanvadas M., 2015)-----	54
Σχήμα 2-45: Εκτίμηση του πλάτους του πυλώνα (W/D) για το οποίο η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο σηράγγων είναι αμελητέα σε όρους λόγου φορτίων (πρώτης/μονής), ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0), για διάφορες τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0 (Chortis F. & Kanvadas M., 2015)-----	55
Σχήμα 2-46: Εγκάρσια όψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 2D$ (επίπεδο $Z - X$). Στο σχήμα φαίνονται η (αριστερή) «μονή/πρώτη» σήραγγα (single/first tunnel), η (δεξιά) «δευτέρα» σήραγγα (second tunnel) και οι διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου. Η διάμετρος κάθε σήραγγας είναι ίση με $D = 8m$. (Ψυχάρη Ε.,2015)-----	57
Σχήμα 2-47: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου p/ρ_0 , m συναρτήσει της γωνίας Θ ($^\circ$) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$). (Ψυχάρη Ε.,2015)-----	59
Σχήμα 2-48: Κατανομή της κανονικοποιημένης αξονικής δύναμης ($N_{abs}/\rho_0, mD$) συναρτήσει της γωνίας Θ ($^\circ$) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$). (Ψυχάρη Ε.,2015)-----	60
Σχήμα 2-49: Κατανομή της κανονικοποιημένης ροπής κάμψης ($M/\rho_0, mD^2$) συναρτήσει της γωνίας Θ ($^\circ$) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά) συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$). (Ψυχάρη Ε.,2015)-----	61
Σχήμα 2-50: Λόγος μέσων φορτίων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first, avg}/p_{single, avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$. (Ψυχάρη Ε.,2015)-----	62
Σχήμα 2-51: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first, avg}/N_{single, avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$. -----	62
Σχήμα 2-52: Λόγος μέσων ροπών κάμψης της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($M_{first, max}/M_{single, max}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$. (Ψυχάρη Ε.,2015)-----	63
Σχήμα 2-53: Κατανομή του ανηγμένου φορτίου p/ρ_0 συναρτήσει της γωνίας Θ ($^\circ$) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ (αριστερά) και $K_0=1.0$ (δεξιά) και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$). (Ψυχάρη Ε.,2015) -----	64
Σχήμα 2-54: Λόγος μέσων φορτίων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first, avg}/p_{single, avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$. -----	64
Σχήμα 2-55: Λόγος μέσων φορτίων ($p_{first, avg}/p_{single, avg}$) (αριστερά) και φορτίων στην εσωτερική παρειά ($p_{first, side}$ ($\Theta = 90 \text{ deg}$)/ $p_{single, side}$ ($\Theta = 90 \text{ deg}$)) (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ως συνάρτησης της κανονικοποιημένης απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο ($Stunnel \text{ face}/D$) της «δευτέρας» σήραγγας (second tunnel) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$. (Ψυχάρη Ε.,2015) -----	65
Σχήμα 2-56: Λόγος μέσων φορτίων ($p_{second, avg}/p_{single, avg}$) (αριστερά) και φορτίων στην εσωτερική παρειά (p_{second} ($\Theta = 270^\circ$)/ p_{single} ($\Theta = 90^\circ$)) (δεξιά) της «δευτέρας» προς της «μονής» σήραγγας ως συνάρτηση της κανονικοποιημένης απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο ($Stunnel \text{ face}/D$) της «δευτέρας» σήραγγας (second tunnel) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$. (Ψυχάρη Ε.,2015) -----	66
Σχήμα 3-1: Περιβάλλον εργασίας του Abaqus 6.14.-----	69
Σχήμα 3-2: Εγκάρσια όψη του προσομοιώματος με διάμετρο $D=8m$, ύψους υπερκειμένων $H=10D$ και πλάτος πυλώνα $W=0.5D$. Στο σχήμα διακρίνονται οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων του αριθμητικού μοντέλου και οι διατομές των σηράγγων. -----	70
Σχήμα 3-3:Καθορισμός της περιοχής αλληλεπίδρασης των σηράγγων. -----	70
Σχήμα 3-4: Εγκάρσια όψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D=4m$. Στο σχήμα η περιοχή αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων. 71	
Σχήμα 3-5: Βήμα 1-Υπολογισμός των αρχικών γεωστατικών τάσεων, πριν από την κατασκευή των σηράγγων. Στο βήμα αυτό αφαιρείται το υλικό της υποστήριξης, καθώς δεν έχει ξεκινήσει ακόμα η εκσκαφή. -----	72

Σχήμα 3-6: Βήμα 2-Αποτόνωση στην «μονή σήραγγα» ,πολλαπλασιάζοντας τις αρχικές δυνάμεις που είχε το προσομοίωμα στην γεωστατική κατάσταση με τον όρο (1-λ) ,όπου λ ο βαθμός αποτόνωσης. -----73

Σχήμα 3-7: Βήμα 3-Εκσκαφή της αριστερής «μονής» σήραγγας, αφαιρώντας τα πεπερασμένα στοιχεία της εκσκαφής του εδάφους (excavation elements), και τοποθέτησης άμεσης υποστήριξης από εκτοξευμένο σκυρόδεμα σε αυτήν ,προσθέτοντας τα πεπερασμένα στοιχεία της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (support elements). -----73

Σχήμα 3-8: Βήμα 4-Αποτόνωση στην «δεύτερη σήραγγα» ,πολλαπλασιάζοντας τις αρχικές δυνάμεις που είχε το προσομοίωμα στην γεωστατική κατάσταση με τον όρο (1-λ) ,όπου λ ο βαθμός αποτόνωσης. -----73

Σχήμα 3-9: Βήμα 5-Εκσκαφή της δεξιάς «δεύτερης» σήραγγας , αφαιρώντας τα πεπερασμένα στοιχεία της εκσκαφής του εδάφους (excavation elements), και τοποθέτησης άμεσης υποστήριξης από εκτοξευμένο σκυρόδεμα σε αυτήν, προσθέτοντας τα πεπερασμένα στοιχεία της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (support elements). Μετά από αυτό το βήμα η αριστερή σήραγγα μετονομάζεται σε «πρώτη». --73

Σχήμα 3-10: Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI (Hoek&Marinos, 2000). Στην παρούσα έρευνα ο δείκτης κυμαίνεται από GSI=10 έως GSI=50 -----75

Σχήμα 3-11: Προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (single/first tunnel) και της δεξιάς σήραγγας (second tunnel), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού. -----80

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Χαρακτηρισμός βραχόμαζας ανάλογα με τον δείκτη RMR (βιβλίο Βραχομηχανικής-Γ.Τσιαμπάος) -----	2
Πίνακας 1.2: Χαρακτηρισμός βραχόμαζας ανάλογα με τον δείκτη Q (βιβλίο Βραχομηχανικής-Γ.Τσιαμπάος) -----	4
Πίνακας 3.1: Πίνακας γεωμετρικών, γεωτεχνικών και παραμέτρων της άμεσης υποστήριξης. -----	79
Πίνακας 4.1: Πίνακας γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχόμαζας πολύ πτωχής ποιότητας. -----	81
Πίνακας 4.2: Πίνακας γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχόμαζας πτωχής ποιότητας. -----	81
Πίνακας 4.3: Πίνακας ποιότητας και πάχους εκτοξευόμενου σκυροδέματος για διάφορες συνθήκες σ_{cm}/ρ_o . -----	88
Πίνακας 4.4: Πίνακας ποιότητας και πάχους σκυροδέματος για διάφορες τιμές του πλάτους πυλώνα. -----	94
Πίνακας 4.5: Πίνακας ποιότητας και πάχους σκυροδέματος για διάφορες τιμές του συντελεστή οριζόντιων τάσεων K_o . -----	100

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια μεγάλη αύξηση του πλήθους των υπόγειων κατασκευών, ειδικότερα των σηράγγων αποτελώντας πλέον μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες έργων Πολιτικού Μηχανικού. Οι οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες κατασκευάζονται με δυο κλάδους, έναν για κάθε κατεύθυνση, κυρίως για λόγους ασφαλείας αλλά και για κατασκευαστικούς λόγους. Η αλληλεπίδραση λοιπόν των δύο κλάδων κατά την διάνοιξη αποτελεί ένα σύνθετο φαινόμενο, το οποίο καλείται να αντιμετωπίσει ο μελετητής μηχανικός κατά τον σχεδιασμό του έργου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η οποία έχει τίτλο «Αριθμητική διερεύνηση της αλληλεπίδρασης δίδυμων σηράγγων μέσω διδιάστατων αναλύσεων», πραγματοποιήθηκαν διδιάστατες αναλύσεις με την βοήθεια του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Έπειτα ακολούθησε η διερεύνηση των μεγεθών των φορτίων και των εντατικών μεγεθών που ασκούνται στην άμεση υποστήριξη δίδυμων σηράγγων, εξετάζοντας ένα μεγάλο εύρος γεωλογικών συνθηκών της περιοχής, του πάχους πυλώνα (εγκάρσια απόσταση μεταξύ των παρειών των παράλληλων σηράγγων), του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και του συντελεστή αποτόνωσης.

Πιο συγκεκριμένα εξετάζονται τρεις εγκάρσιες αποστάσεις μεταξύ των σηράγγων ($W/D=4m$, $W/D=8m$, και $W/D=16m$) και για κάθε μία από τις παραπάνω εξετάζονται τριάντα (30) βραχόμαζες με διαφορετικές γεωτεχνικές συνθήκες. Έπειτα, το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης και ειδικά ο βαθμός που επιδρά στα φορτία και το σχήμα της κατανομής είναι εξαρτώμενο και υπολογίζεται από τον συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0 . Ο μηχανισμός της ανακατανομής των τάσεων και παραμορφώσεων είναι διαφορετικός και αυτό απορρέει από το διαφορετικό μέγεθος της κατακόρυφης και οριζόντιας συνιστώσας της τάσης του αρχικού εντατικού πεδίου. Επιπρόσθετα, ο βαθμός αποτόνωσης λ δηλαδή η μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική της τιμή p_0 σε μια μικρότερη τιμή p , είναι ακόμα ένας παράγοντας που επηρεάζει το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι τιμές $\lambda=0.5$, $\lambda=0.6$ και $\lambda=0.7$.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων μελετώνται ξεχωριστά για την «αριστερή-πρώτη» σήραγγα και για την «δεξιά-δεύτερη» σήραγγα. Οι αναλύσεις έδειξαν λοιπόν ότι τη μεγαλύτερη επίπτωση από τη διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας την έχει η προπορεύουσα και κυρίως η πλευρά που γειτνιάζει με τη δεύτερη ($\Theta=90^\circ$). Αυτή η διαφοροποίηση στο βαθμό επιρροής πηγάζει από το γεγονός ότι η «πρώτη» σήραγγα έχει ήδη εκσκαφθεί και υποστηριχτεί όταν η «δεύτερη» σήραγγα εκσκάπτεται.

Abstract

In recent years a significant increase in underground constructions has been observed, especially in tunnels, which constitute one of the most important categories of civil engineer's constructions. Road tunnels and railways are constructed with two branches, one for each direction. This is so mainly for safety but also constructing reasons. The interaction of the two parallel tunnels is a complex phenomenon, with which a civil engineer is expected to deal.

In the current thesis entitled "Numerical investigation of the interaction between twin tunnels using 2-D analyses", 2-D analyses were carried out with the finite element code Abaqus. The analyses focus on the primary support loads and internal forces (normal forces and bending moments), examining a wide range of pillar width values (transversal distance between the sides of the adjacent parallel tunnels), geotechnical conditions, geostatic stress ratio and coefficient of deconfinement.

More specifically, three values of pillar width are examined ($W/D=4m$, $W/D=8m$, and $W/D=16m$) and ,for each of them, thirty (30) rock masses are examined with different geotechnical conditions. In addition, the phenomenon of the interaction between twin tunnels is dependent on the geostatic stress ratio K_0 . The mechanism of the redistribution of stresses and displacements is different because of the different value of vertical and horizontal component stress of the initial intensive field. Furthermore, the value of deconfinement, namely the decrease in the internal pressure of the initial value p_0 to a lower value p , is an additional factor affecting the phenomenon of interaction between twin tunnels. The present study examines the values of deconfinement $\lambda=0.5$, $\lambda=0.6$ and $\lambda=0.7$.

The results of the current thesis are investigated separately for the 'left-first' tunnel and for the 'right-second tunnel'. The results thus indicated that the preexisting tunnel, and mainly the right side of 'first' tunnel ($\Theta=90^\circ$), is the most affected by the second tunnel's excavation. This differentiation comes from the fact that the 'first' tunnel has already been excavated and supported when the second one is being excavated.

1. Εισαγωγή

1.1. Αντικείμενο και σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Τα υπόγεια έργα αποτελούν πλέον μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες έργων Πολιτικού Μηχανικού. Η αύξηση του πληθυσμού και η έλλειψη χώρου κυρίως στα αστικά κέντρα δημιουργούν την ανάγκη για κατασκευή υποδομών, όπως οι σήραγγες. Σήραγγες κατασκευάζονται σε οδικά και σιδηροδρομικά συγκοινωνιακά δίκτυα για την σύνδεση ορεινών δυσπρόσιτων περιοχών ή την παράκαμψη δυσμενών γεωλογικών συνθηκών όπως είναι οι κατολισθήσεις. Επίσης κατασκευάζονται σε αστικά συστήματα μαζικής μεταφοράς, σε υδραυλικά έργα για αποχετεύσεις και αποστραγγίσεις ή ακόμα σε έργα αποστράγγισης για τη βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας πρανών. Σκοπός αυτών των έργων είναι η μείωση του χρόνου μεταφοράς, η μείωση της απόστασης, και γενικότερα η αύξηση της ασφάλειας και της ποιότητας της ζωής του ανθρώπου. Έτσι η κατασκευή σηράγγων και ειδικά δίδυμων σηράγγων για οικονομικούς, κατασκευαστικούς λόγους και για λόγους ασφαλείας, είναι απαραίτητη κυρίως στις αστικές περιοχές. Αναφορικά με τους κατασκευαστικούς λόγους, είναι πιο εύκολη η κατασκευή δύο διατομών μικρότερων διαστάσεων σε σχέση με μία διατομή μεγαλύτερης διαμέτρου. Σχετικά με τους λόγους ασφαλείας, επιλέγεται σήραγγα με δύο κλάδους ώστε να αποφευχθούν τα ατυχήματα μεταξύ των δύο κατευθύνσεων αλλά και στην περίπτωση ατυχήματος στον έναν κλάδο, να είναι δυνατή η διαφυγή στον δεύτερο μέσω συνδετήριας σήραγγας.

Οι έρευνες που μελετούν την αλληλεπίδραση δίδυμων σηράγγων αποτελούνται από εμπειρικές αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους. Στις αριθμητικές χρησιμοποιείται η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση των επαγόμενων μετακινήσεων του εδάφους λόγω της διάνοιξης της σήραγγας καθώς έχει την ιδιότητα να λαμβάνει υπόψη την ετερογένεια του γεωυλικού, τη μη γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά των εδαφών, την πολύπλοκη γεωμετρία των σηράγγων κλπ. Η μοντελοποίηση της διάνοιξης των σηράγγων επιλέγεται συνήθως να χρησιμοποιηθεί με διδιάστατο τρόπο.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας, πραγματοποιήθηκαν διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με στόχο την περιγραφή του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων. Συγκεκριμένα μελετάται η επιρροή της εκσκαφής της νέας σήραγγας στην υποστήριξη της ήδη υπάρχουσας γειτονικής της, σε όρους φορτίων και εντατικών μεγεθών (αξονικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών). Για την πλήρη κατανόηση του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας συγκεντρώθηκαν βιβλιογραφικά δεδομένα όσον αφορά την αλληλεπίδραση δίδυμων σηράγγων και έπειτα πραγματοποιήθηκε η μεταβολή γεωμετρικών και γεωτεχνικών παραμέτρων, όπως είναι το πλάτος του πυλώνα, οι γεωτεχνικές συνθήκες, ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και ο συντελεστής αποτόνωσης, για την ανάλυση και εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Παρατηρείται τόσο από την βιβλιογραφία όσο και από τα αποτελέσματα ότι η επιρροή της εκσκαφής της νέας σήραγγας στην υποστήριξη της ήδη υπάρχουσας γειτονικής της είναι σημαντική και η μείωση αυτής της αλληλεπίδρασης μπορεί να

επιτευχθεί με την αύξηση του πλάτους πυλώνα, την βελτίωση της ποιότητας του γεωυλικού, την αύξηση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων ή την μείωση του συντελεστή αποτόνωσης.

1.2. Θεωρητικά στοιχεία

Παρακάτω παρατίθενται και επεξηγούνται όλες οι βασικές έννοιες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Πιο συγκεκριμένα ακολουθούν τα συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας, τα κριτήρια αστοχίας της βραχώμαζας και οι καμπύλες σύγκλισης – αποτόνωσης που παράγονται.

1.2.1. Συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας

Η ταξινόμηση της βραχώμαζας σε κατηγορίες είναι απαραίτητη τόσο κατά τον σχεδιασμό, όσο κατά την κατασκευή των υπογείων έργων. Τυπικά ο σχεδιασμός των υπόγειων έργων μεγάλου μήκους όπως οι σήραγγες γίνεται για περισσότερες της μίας κατηγορίας βραχώμαζας, οι οποίες έχουν διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά.

1.2.1.1. Σύστημα RMR (Bieniawski)

Το σύστημα RMR (Rock Mass Rating) προτάθηκε από τον Bieniawski το 1976 και τροποποιήθηκε το 1979. Κατά το σύστημα αυτό, η ταξινόμηση γίνεται με βάση έξι (6) παραμέτρους, η κάθε μία λαμβάνει μία τιμή και το άθροισμα αυτών αποτελεί την τιμή του δείκτη RMR.

Οι παράμετροι είναι οι εξής:

- Η Αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη σ_{ci}
- Ο Δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας RQD
- Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών
- Η κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών
- Η παρουσία υπόγειου νερού
- Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με την φορά διάνοιξης του έργου

Με βάση τον δείκτη RMR, η βραχώμαζα κατατάσσεται:

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ RMR
Πολύ Καλή	81-100
Καλή	61-80
Μέτρια	41-60
Πτωχή	21-40
Πολύ Πτωχή	0-20

Πίνακας 1.1:Χαρακτηρισμός βραχώμαζας ανάλογα με τον δείκτη RMR (βιβλίο Βραχομηχανικής-Γ.Τσιαμπάος)

1.2.1.2. Σύστημα GSI

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

Το σύστημα GSI σχεδιάσθηκε ώστε να είναι συμβατό με το σύστημα RMR για βραχώμαζες με RMR>40, δηλαδή οι τιμές του δείκτη GSI είναι περίπου ίσες με τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη RMR.

Το σύστημα GSI βασίζεται στη συναξιολόγηση δυο παραμέτρων:

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

Οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη GSI φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΟΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζονται στην εμφάνιση της βραχώμαζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφανείας ασυνεχειών) εκτιμάται τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κλιμακωτά ελεγχόμενες αστάθεις. Στην περίπτωση που οι ασθενείς επιπέδες επιφανείας έχουν μη ομοιόμορφο προσανατολισμό σε σχέση με το πρανές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η διατμητική αντοχή επηρεάζεται ως βράχος που υπόκειται σε ελασθική λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περισσότερο μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχώμαζες σήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μειώνουμε τις τιμές προς τα κάτω. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση εντερικών τάσεων.	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ				
	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραγές, μη αποσπασθείσες επιφανείες	ΚΑΛΗ Τραγές, ελαφρά αποσπασθείσες και οξείδωτες επιφανείες	ΜΕΤΡΙΑ Ρυτιές, μετρίου αποσπασθείσες και οξείδωτες επιφανείες	ΠΤΩΧΗ Επιφανείες ολίσθησης, πολύ αποσπασθείσες με σημαντική επικάλυψη ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη δοκίμια	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφανείες ολίσθησης, πολύ αποσπασθείσες με μέτριο οριζικό υλικό πλήρωσης
ΔΟΜΗ	ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ				
INTACT OR MASSIVE - Αφρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άσπρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	90			N/A	N/A
BLOCKY - Αδιάρακτη βραχώμαζα με παύλο καλό αλληλοκλειδώμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών	80	70			
VERY BLOCKY - Μερκώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολυπλευρά γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών		60	50		
BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμεσή στρώση ή σχιστότητα			40		
DISINTEGRATED - Ισχυρά εκρημασμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλειδώμα και με ταυτάχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστραγγυλωμένων τεμαχών				30	
LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατημένη ασθενής βραχώμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι αποσπασθείσας άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμπόδιζοντας					20
	N/A	N/A			10

Σχήμα 1-1:Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI (Hoek&Marinos, 2000)

1.2.1.3. Σύστημα Q (NGI)

Το σύστημα Q αναπτύχθηκε στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI) από τους Barton, Lien και Lunde (1974) με σκοπό τον εμπειρικό σχεδιασμό των μέτρων άμεσης υποστήριξης σηράγγων που διανοίγονται με τη "μέθοδο NATM". Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό του δείκτη Q από τη σχέση:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_r}{j_\alpha} \right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$$

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- Ο δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας RQD
- Ο δείκτης του αριθμού των συστημάτων των ασυνεχειών J_n
- Ο βαθμός τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών J_r
- Ο βαθμός εξαλλοίωσης των επιφανειών των ασυνεχειών J_α
- Ο συντελεστής επιρροής του υπόγειου νερού J_w
- Ο συντελεστής απομείωσης λόγω υψηλών τάσεων SRF

Με βάση τον δείκτη Q, η βραχόμαζα κατατάσσεται:

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	ΤΙΜΕΣ ΔΕΙΚΤΗ Q
Εξαιρετικά Καλή	>400
Πάρα Πολύ Καλή	100-400
Πολύ Καλή	40-100
Καλή	10-40
Μέτρια	4-10
Πτωχή	1-4
Πολύ Πτωχή	0.1-1
Πάρα Πολύ Πτωχή	0.01-0.1
Εξαιρετικά Πτωχή	<0.01

Πίνακας 1.2:Χαρακτηρισμός βραχόμαζας ανάλογα με τον δείκτη Q (βιβλίο Βραχομηχανικής-Γ.Τσιαμπάος)

1.2.2. Κριτήρια αστοχίας της βραχώμαζας

Υπάρχει πάντα ένας συνδυασμός των κύριων τάσεων (σ_1 και σ_3) που επιβάλλονται στο βραχώδες υλικό, ο οποίος μπορεί να προκαλέσει την θραύση του, δηλαδή να ξεπεραστεί η αντοχή του κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Ο συνδυασμός αυτός αποτελεί στην ουσία και το κριτήριο θραύσης ή αστοχίας. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα κριτήρια αστοχίας Hoek-Brown και Mohr-Coulomb, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

1.2.2.1. Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown

Το εμπειρικό κριτήριο εισήχθη από τους Hoek&Brown (1980) προκειμένου να ενισχυθούν τα δεδομένα για τις αναλύσεις που απαιτούνται σχετικά με την εκσκαφή των υπόγειων έργων και τροποποιήθηκε (2002) παίρνοντας την γενικευμένη του μορφή:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha$$

Όπου:

- σ_1, σ_3 : Η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια τάση στην κατάσταση αστοχίας
- σ_{ci} : Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του πετρώματος
- m_b, s, α : Σταθερές που υπολογίζουν την ποιότητα της βραχώμαζας

Οι σταθερές m_b, s, α υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις.

$$m_b = m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}$$

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

Όπου:

- m_i : Σταθερά ανάλογα το είδος του πετρώματος
- D : Παράγοντας που εξαρτάται από τον βαθμό διατάραξης, ($D=0$ για αδιατάρακτες και $D=1$ για πολύ διαταραγμένες βραχώμαζες)
- GSI : Τιμή ταξινόμησης της βραχώμαζας από το σύστημα GSI

Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του πετρώματος εκτιμάται από το κριτήριο Hoek-Brown θέτοντας $\sigma_3=0$. Επομένως:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^\alpha$$

Η εφελκυστική αντοχή εκτιμάται από το κριτήριο Hoek-Brown θέτοντας $\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_t$. Επομένως:

$$\sigma_t = -\frac{s \cdot \sigma_{ci}}{m_b}$$

1.2.2.2. Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb προτάθηκε το 1776, είναι το απλούστερο γραμμικό κριτήριο θραύσης και εφαρμόζεται σε εδαφικούς και βραχώδεις σχηματισμούς. Θεωρείται ότι η αστοχία του πετρώματος εκδηλώνεται όταν η διατμητική τάση σε κάποιο επίπεδο του σώματος ξεπεράσει τη διατμητική αντοχή, η οποία είναι γραμμική συνάρτηση της ορθής τάσης που επιβάλλεται στο επίπεδο αυτό.

Η αριθμητική έκφραση του κριτηρίου δίνεται από την σχέση:

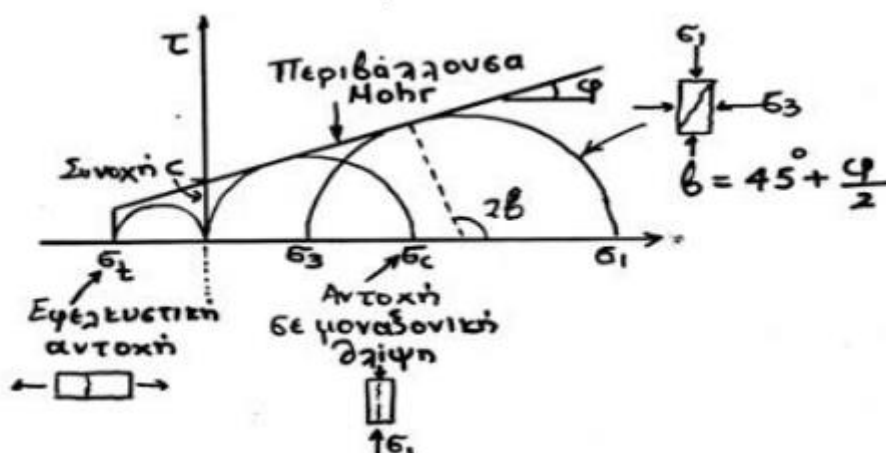
$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi$$

Όπου:

- τ : Διατμητική τάση κατά την αστοχία
- σ : Ορθή τάση κατά την αστοχία
- c : Συνοχή του πετρώματος
- ϕ : Γωνία τριβής

Το κριτήριο αυτό μπορεί να εκφραστεί και με την αναλυτική μορφή:

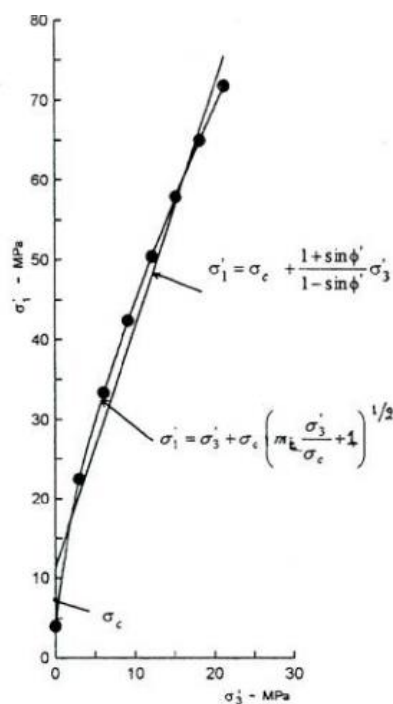
$$\sigma_1' = 2 \cdot c \cdot \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) + \sigma_3' \cdot \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$



Σχήμα 1-2: Περιβάλλουσα κριτηρίου Mohr-Coulomb

1.2.2.3. Συσχέτιση των κριτηρίων Mohr-Coulomb και Hoek-Brown

Γενικά για την προσομοίωση της βραχώμαζας προτιμάται η χρήση του κριτηρίου Hoek-Brown επειδή διαθέτει καμπύλη περιβάλλουσα αστοχίας η οποία είναι πλησιέστερη στην καμπύλη περιβάλλουσα των κύκλων Mohr που συνήθως διαθέτει η ρωγματωμένη βραχώμαζα κατά την αστοχία. Αντίθετα η καμπύλη που διαθέτει το κριτήριο Mohr-Coulomb είναι ευθύγραμμη. Αρκετά προγράμματα, όμως, μη-γραμμικής ανάλυσης της συμπεριφοράς της βραχώμαζας γύρω από υπόγειες εκσκαφές δεν περιλαμβάνουν το κριτήριο Hoek-Brown αλλά το κριτήριο Mohr-Coulomb. Στις περιπτώσεις αυτές είναι χρήσιμη η συσχέτιση των δύο κριτηρίων. Οπότε πραγματοποιείται υπολογισμός των παραμέτρων αντοχής c και ϕ του κριτηρίου Mohr-Coulomb που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων του κριτηρίου Hoek-Brown.



Σχήμα 1-3: Διάγραμμα κύριων τάσεων για τα κριτήρια Hoek-Brown και Mohr-Coulomb.

Η σχέση της ισοδύναμης γωνίας τριβής:

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

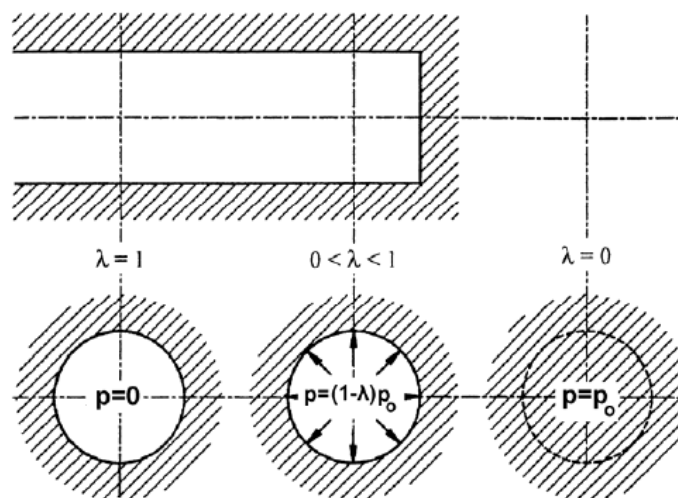
Η σχέση της ισοδύναμης συνοχής:

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

1.2.3. Βαθμός αποτόνωσης λ και καμπύλες σύγκλισης - αποτόνωσης

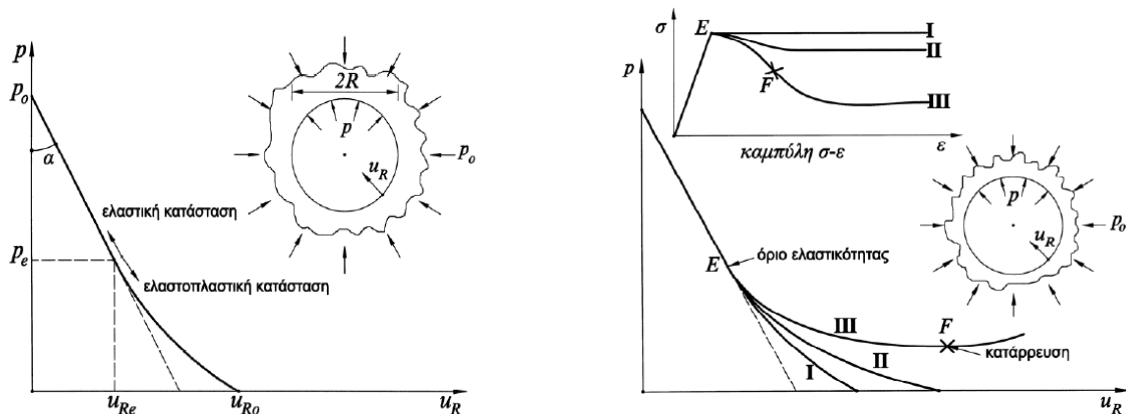
Ο βαθμός αποτόνωσης λ, δηλαδή η μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική της τιμή p₀ σε μια μικρότερη p, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της χρονικής υστέρησης στην τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης σηράγγων. Αυτή η μείωση της εσωτερικής πίεσης μέχρι μηδενισμού αντιστοιχεί σε βαθμιαία αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης από την αρχική τιμή λ=0 σε λ=1.

$$\lambda = 1 - \frac{p}{p_0} \rightarrow p = p_0 \cdot (1 - \lambda)$$



Σχήμα 1-4: Κατανομές πιέσεων γύρω από κυκλική σήραγγα.

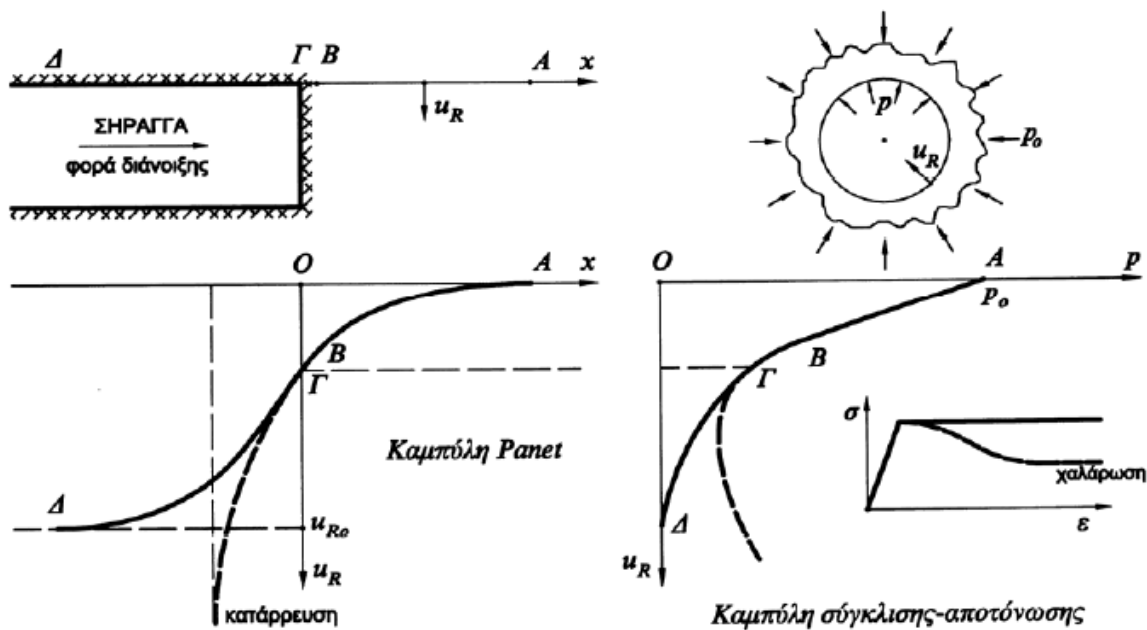
Με την βαθμιαία αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης η αρχικώς ελαστική συμπεριφορά της βραχόμαζας (αφού οι αρχικές τάσεις είναι ισότροπες : σ_{ν0}=σ_{h0}=p₀) κάποια στιγμή γίνεται πλαστική κοντά στο τοίχωμα της σήραγγας. Ο συντελεστής αποτόνωσης που αντιστοιχεί στην έναρξη της πλαστικοποίησης (δηλαδή πλαστική συμπεριφορά στο τοίχωμα της σήραγγας) ονομάζεται «κρίσιμος».



Σχήμα 1-5: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης κυκλικής σήραγγας με ακτίνα R (αριστερά) και Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης για διάφορους τύπους συμπεριφοράς τάσεων-παραμορφώσεων της βραχόμαζας (δεξιά). Στην περίπτωση έντονης χαλάρωσης προκαλείται κατάρρευση της οροφής της σήραγγας. (Μ.Καββαδάς,2012)

Η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης του πρώτου σχήματος αντιστοιχεί σε βραχόμαζα με συμπεριφορά ελαστική-απολύτως πλαστική. Στην περίπτωση βραχόμαζας με συμπεριφορά τύπου χαλάρωσης, η καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης φαίνεται στο δεύτερο σχήμα. Σε περιπτώσεις έντονης χαλάρωσης, προκαλείται κατάρρευση της οροφής της σήραγγας όταν η εσωτερική πίεση μειωθεί πέραν κάποιας τιμής. (Σχήμα 1-5)

Σύμφωνα με τον Καββαδά Μ. (2015), κατά τη διάνοιξη σηράγγων οι μετακινήσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά εμπρός από το μέτωπο διάνοιξης, δηλαδή πριν το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας φθάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Το Σχήμα 1-6 παρουσιάζει μια τέτοια καμπύλη (ΑΒΓΔ) εξέλιξης της σύγκλισης για ανυποστήρικτη σήραγγα, σε διάγραμμα ($x - u_R$) όπου u_R είναι η σύγκλιση της οροφής της σήραγγας και x είναι η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής. Από το σχήμα φαίνεται ότι ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής σύγκλισης u_{R0} , της τάξεως του 30-35%, συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο της σήραγγας. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η αντίστοιχη καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης. Συνεπώς, σε κάθε θέση x κατά μήκος του άξονα της σήραγγας αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης ($x-u_R$) μια τιμή της σύγκλισης του τοιχώματος u_R . Για τη συγκεκριμένη τιμή u_R αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης μια τιμή της πίεσης p , η οποία είναι μικρότερη από την αρχική γεωστατική πίεση p_0 .



Σχήμα 1-6: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα (Μ.Καββαδάς,2007)

1.2.4. Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η δομή της διπλωματικής εργασίας αποτελείται πλέον της εισαγωγής, από τέσσερα κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται ενδεικτικά έρευνες και μελέτες σχετικά με την αλληλεπίδραση δίδυμων σηράγγων, καθώς επίσης επισημαίνονται και οι παράγοντες που συμμετέχουν στην αύξηση της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης. Παρουσιάζονται παραδείγματα κατασκευής σηράγγων με παράλληλους κοντινούς κλάδους, προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την διάνοιξή τους και τρόποι αντιμετώπισης αυτών. Επίσης αναφέρεται ο τρόπος ελέγχου αστοχίας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης μέσω κατάλληλων διαγραμμάτων. Εκτός από την βιβλιογραφική επισκόπηση, περιεχόμενο αυτού του κεφαλαίου είναι και θεωρητικά στοιχεία και ορισμοί παραμέτρων και κριτηρίων που θα χρησιμοποιηθούν στην εργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία προσομοίωσης του μοντέλου των δίδυμων σηράγγων, με την χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Αναλύονται δηλαδή οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο, η διακριτοποίηση του καννάβου, και τα βήματα κατά την διαδικασία της εκσκαφής.

Στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθούν τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, των οποίων η παρουσίαση γίνεται μέσω κατάλληλων γραφημάτων. Επίσης σημειώνονται σημαντικές παρατηρήσεις σχετικά με τις παραμέτρους που μεταβάλλονται.

Το πέμπτο κεφάλαιο αποτελείται από συμπεράσματα που διεξάγονται από την μελέτη και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, καθώς επίσης εμπεριέχει προτάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης.

2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1. Εισαγωγή

Η αλληλεπίδραση δίδυμων σηράγγων, και πιο συγκεκριμένα η επιρροή που ασκεί η μία σήραγγα στην άλλη της οποίας η εκσκαφή έχει ολοκληρωθεί, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη τόσο κατά τον σχεδιασμό και μελέτη τους όσο και κατά την διάρκεια της κατασκευής τους. Παράγοντες που επηρεάζουν την αλληλεπίδραση τους λοιπόν είναι κυρίως η μεταξύ τους απόσταση, ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0 , ο συντελεστής αποτόνωσης λ , καθώς και οι παράμετροι της βραχώμαζας. Τα παραπάνω έχουν γίνει αντικείμενο μελέτης από πολλούς επιστήμονες ανά τον κόσμο με κύριο πεδίο έρευνας τις συγκλίσεις, παραμορφώσεις και επιφανειακές καθιζήσεις των εδαφών.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιες έρευνες που μελετούν το συγκεκριμένο φαινόμενο, καθώς επίσης και παραδείγματα πραγματικών περιστατικών διάνοξης δίδυμων σηράγγων, τα προβλήματα που εμφανίστηκαν κατά την εκσκαφή αλλά και τα μέτρα που λήφθηκαν για την αντιμετώπισή των προβλημάτων.

Παρακάτω ακολουθεί ενιαίος συμβολισμός των μεγεθών, έτσι ώστε να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Έτσι το πλάτος πυλώνα συμβολίζεται με W , η διάμετρος της σήραγγας με D και το υπερκείμενο βάθος με H .

2.2. Βιβλιογραφικές αναφορές

2.2.1. Soliman E., Duddeck H., Ahrens H., 1993

Σύμφωνα με την έρευνα των Soliman E., Duddeck H., Ahrens H. (1993) προέκυψαν συμπεράσματα σχετικά με την διδιάστατη και τριδιάστατη ανάλυση κοντινών δίδυμων σηράγγων. Έτσι αν και μία τρισδιάστατη ανάλυση αποδίδει τις πραγματικές τάσεις και παραμορφώσεις, μπορεί να πραγματοποιηθεί μια προσέγγιση διδιάστατης ανάλυσης εάν το έδαφος είναι μαλακό και η υποστήριξη της επένδυσης δρα κοντά στο μέτωπο. Για δίδυμες σήραγγες με μικρό πάχος πυλώνα όπως είναι οι περισσότεροι υπόγειοι σιδηρόδρομοι, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι επιρροές από την διαδικασία της εκσκαφής. Όταν ξεκινάει η εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας, αφού έχει πραγματοποιηθεί η εκσκαφή της πρώτης, ισχύουν διαφορετικές συνθήκες όπως ότι οι κύριες τάσεις έχουν αλλάξει σε σχέση με αυτές στην πρώτη σήραγγα, και η αλληλεπίδραση εδάφους-επένδυσης για την δεύτερη είναι διαφορετική. Για την εκτίμηση των τάσεων και των παραμορφώσεων δυο διαφορετικές προσεγγίσεις μπορούν να γίνουν, η πρώτη αφορά ένα επίπεδο μοντέλο στο οποίο η εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας προσομοιώνεται με διαγραφή των εσωτερικών, ως προς την κυκλική διατομή, πεπερασμένων στοιχείων και τοποθέτηση της επένδυσης μετά από την εκσκαφή της πρώτης σήραγγας (τέτοιο μοντέλο είναι επαρκές σε περιπτώσεις μαλακού εδάφους και άκαμπτης τοξωτής επένδυσης). Η δεύτερη προσέγγιση που μπορεί να γίνει είναι μια τριδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων όπου η επένδυση θα εφαρμόζεται μόνο σε μια συγκεκριμένη απόσταση πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Αυτό το

μοντέλο μπορεί να πραγματοποιηθεί σε περιπτώσεις με εκσκαφή μέσω TBM ή όταν εφαρμόζεται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για την υποστήριξη.

2.2.1.1. Διδιάστατη ανάλυση δίδυμων σήραγγων

Η διαδικασία της ανάλυσης πραγματοποιείται σε δύο βήματα:

- Το πρώτο βήμα προσομοιάζεται με την τοποθέτηση της επένδυσης γύρω από το αριστερό κυκλικό τμήμα.
- Η κατανομή των τάσεων που προέρχεται από το πρώτο βήμα λαμβάνονται σαν κύριες τάσεις για την εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας.

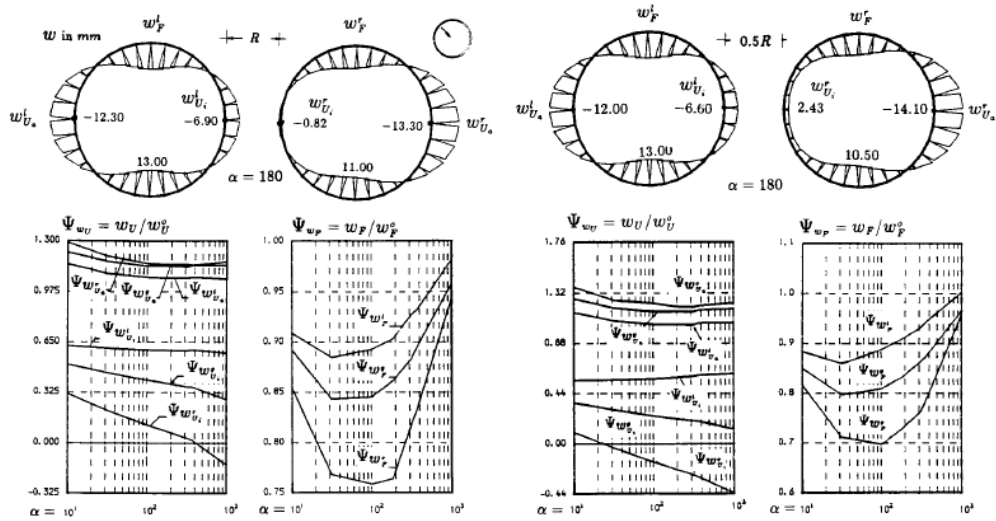
2.2.1.2. Τριδιάστατη ανάλυση δίδυμων σήραγγων

Λύση μονής σήραγγας

Σε αυτή την περίπτωση οι τάσεις και οι παραμορφώσεις της μονής σήραγγας καθορίζονται από τις κύριες γεωστατικές τάσεις. Ακόμα, υπάρχει ένα μήκος L από το μέτωπο της σήραγγας στην οποία δεν υπάρχει υποστήριξη και λόγω της καθυστέρησης της εφαρμογής της, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στην επένδυση και στο έδαφος διαφέρουν αρκετά. Ειδικά για μια μονή σήραγγα, η λύση της τριδιάστατης ανάλυσης είναι ακριβή προσέγγιση αλλά οι λύσεις από το διδιάστατο μοντέλο είναι εύκολα διαθέσιμες. Το διδιάστατο μοντέλο θεωρεί μια σήραγγα όπου ταυτόχρονα, και η επένδυση και το έδαφος, παραλαμβάνουν τις τάσεις.

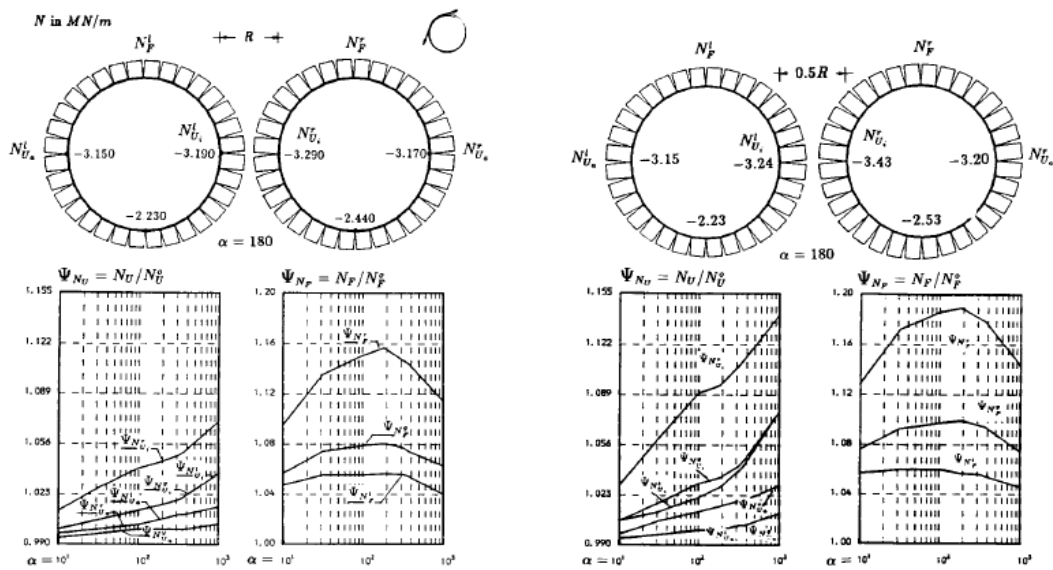
Λύση για δίδυμες σήραγγες

Μετά από την εκσκαφή της πρώτης σήραγγας, η κατανομή των τάσεων στο έδαφος αλλάζει και οι τάσεις αυτές λαμβάνονται ως κύριες για την δεύτερη σήραγγα. Τα αποτελέσματα εκτιμώνται στα διαγράμματα, σε σχέση με την λύση της μονής σήραγγας. Οι πλευρικές παραμορφώσεις της πρώτης σήραγγας που προκαλούνται από την εκσκαφή της δεύτερης είναι πολύ μεγαλύτερες από την περίπτωση της μονής σήραγγας. Παρακάτω, φαίνονται οι ακτινικές μετακινήσεις της επένδυσης για δυο διαφορετικά πάχη πυλώνα, για R και για $0.5R$ αντίστοιχα, όπου R η ακτίνα της κυκλικής διατομής της σήραγγας. (Σχήμα 2-1)

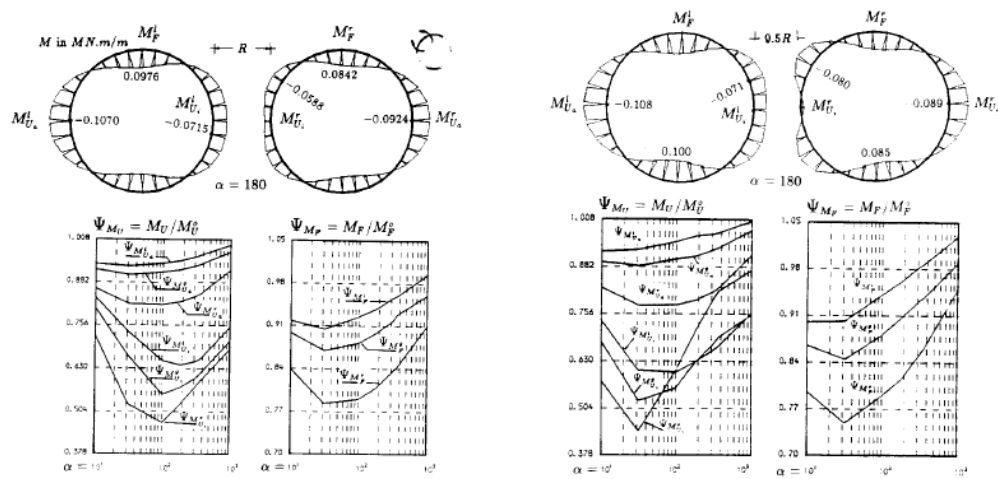


Σχήμα 2-1: Ακτινικές ματατοπίσεις της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει της ακαμψίας του εδάφους (αριστερά) για πλάτος πυλώνα R και (δεξιά) για πλάτος πυλώνα $0.5R$.

Οι αξονικές δυνάμεις N και οι ροπές M καθορίζονται στο Σχήμα 2-2 και στο Σχήμα 2-3 αντίστοιχα, για δύο διαφορετικά πλάτη πυλώνα. Οι τιμές των δυνάμεων είναι μεγαλύτερες ενώ οι τιμές των ροπών μικρότερες από εκείνες που θα ίσχυαν αν η σήραγγα ήταν μονή.



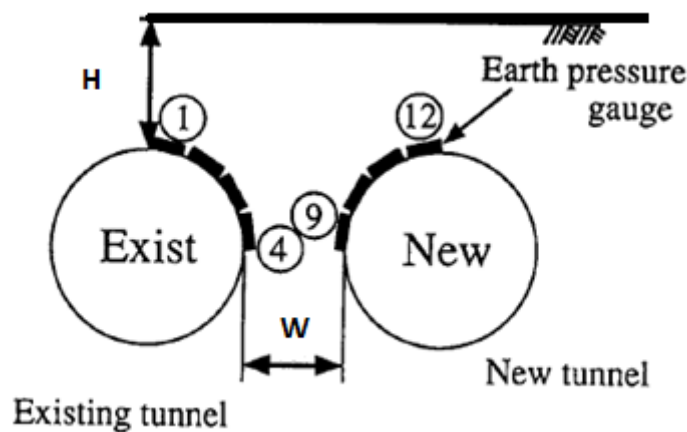
Σχήμα 2-2: Αξονικές δυνάμεις της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει της ακαμψίας του εδάφους (αριστερά) για πλάτος πυλώνα R και (δεξιά) για πλάτος πυλώνα $0.5R$.



Σχήμα 2-3: Καμπτικές ροπές της άμεσης υποστήριξης εδάφους για πλάτος πυλώνα R (αριστερά) και για πλάτος πυλώνα 0.5R (δεξιά).

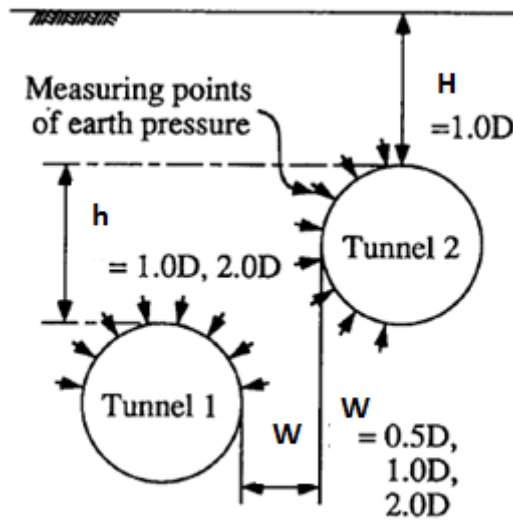
2.2.2. Adachi T., Kimura M., Osada H., 1993

Προκειμένου να διερευνηθεί η μηχανική συμπεριφορά δίδυμων σηράγγων με μικρό πάχος υπερκείμενων γαιών, πραγματοποιήθηκε μία σειρά διδιάστατων αναλύσεων. Η διατομή των σηράγγων που εξετάστηκε είναι κυκλική και η διάμετρος ίση με $D=1.3\text{m}$. Οι μετατοπίσεις γαιών και τα εντατικά μεγέθη λήφθηκαν υπόψη για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Μεγάλη προσοχή δόθηκε στις γεωτεχνικές συνθήκες της περιοχής, την θέση της κάθε σήραγγας, τα εντατικά μεγέθη που προκλήθηκαν από την εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας στην ήδη υπάρχουσα, το υπερκείμενο πάχος γαιών (εξετάζονται οι τιμές 0.5D, 1D, 2D, και 4D) και το πλάτος πυλώνα (εξετάζονται οι τιμές 0.5D, 1D και 2D). Οι αναλύσεις έδειξαν ότι η αλληλεπίδραση ανάμεσα στις σήραγγες δεν εξαρτάται μόνο από το πλάτος του πυλώνα, αλλά και από το υπερκείμενο πάχος γαιών.



Σχήμα 2-4:Θέση σηράγγων για τις δοκιμές 2 και 3, όπου H το υπερκείμενο πάχος γαιών και W το πλάτος πυλώνα.

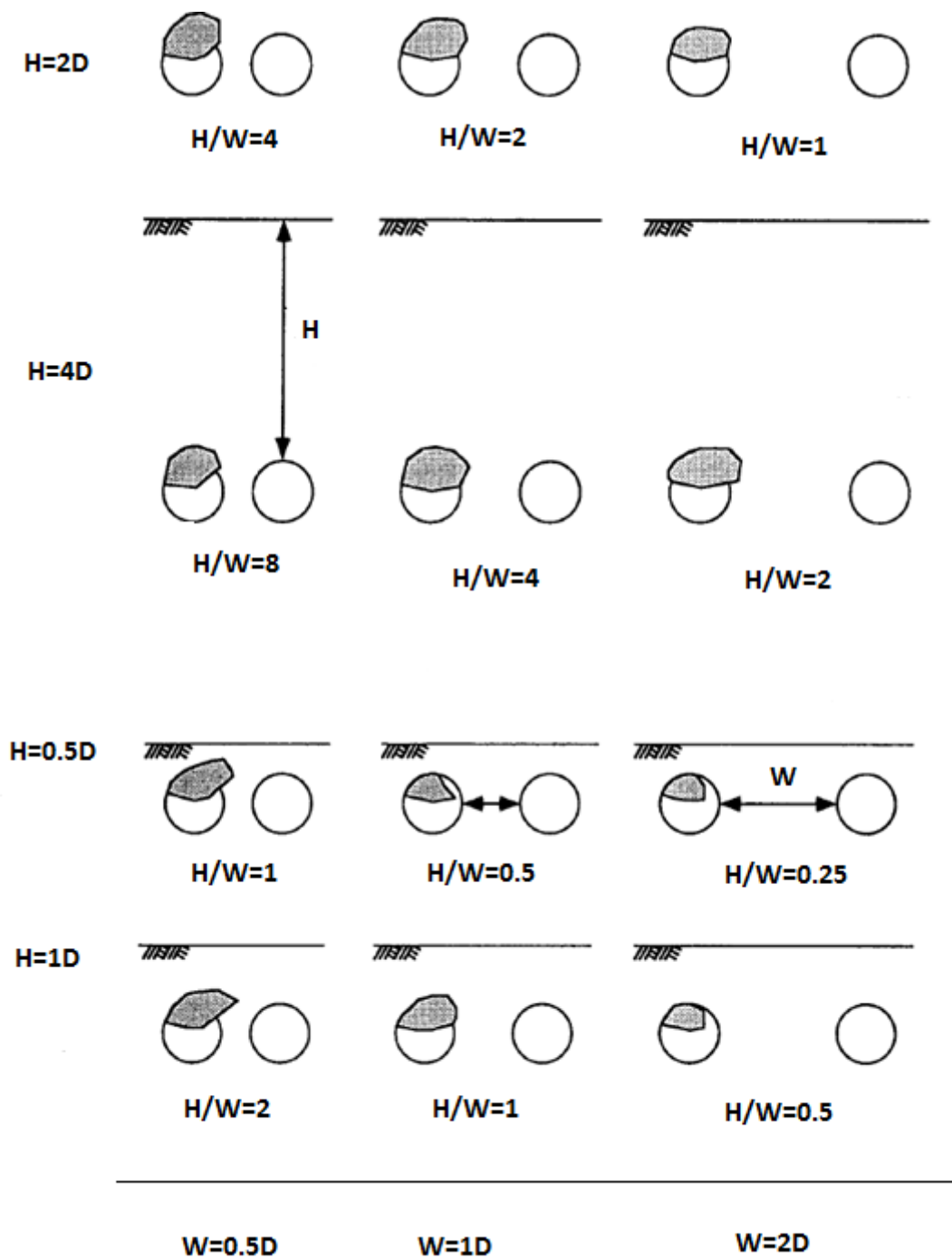
Τέσσερα είδη αναλύσεων διεξήχθησαν, το πρώτο είναι για μονή σήραγγα και τα επόμενα τρία είναι για δίδυμες σήραγγες. Η θέση της δεύτερης σήραγγας είναι σε διαφορετικά επίπεδα κάθε φορά αλλά πάντα παράλληλα στην πρώτη, όπως φαίνεται και στο σχήμα.



Σχήμα 2-5:Θέση σηράγγων για την δοκιμή 4,όπου H το υπερκείμενο πάχος γαιών, h η κατακόρυφη απόσταση των σηράγγων και W το πλάτος πυλώνα.

2.2.2.1. Αποτελέσματα

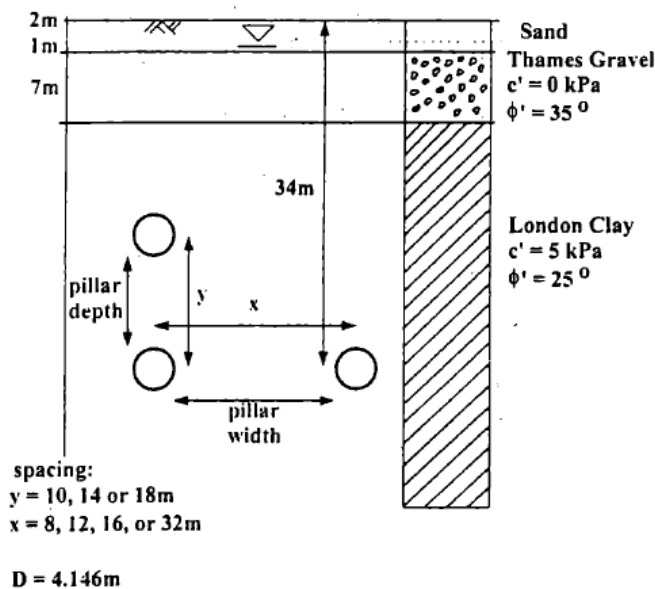
- Τα αποτελέσματα των αναλύσεων έδειξαν ότι η αύξηση των εντατικών μεγεθών και των μετατοπίσεων που προκλήθηκε από την εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας επηρεάζεται όχι μόνο από το ύψος των υπερκείμενων γαιών, αλλά και από το πλάτος πυλώνα, δηλαδή την εγκάρσια απόσταση μεταξύ των σηράγγων.
- Ο λόγος των υπερκείμενων γαιών προς το πλάτος πυλώνα είναι μια ασφαλής παράμετρος για να εκτιμηθεί η αλληλεπίδραση των σηράγγων.
- Περισσότερη προσοχή απαιτείται όταν η εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας είναι χαμηλότερη από αυτήν της πρώτης.



Σχήμα 2-6: Κανονικοποιημένη ανακατανομή εδαφικών πιέσεων στην υπάρχουσα σήραγγα, όπου H το υπερκείμενο πάχος γαιών και W το πλάτος πυλώνα.

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

Δέκα αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκαν για διδιάστατο μοντέλο προκειμένου να ερευνηθεί η συμπεριφορά δίδυμων σηράγγων από τους Addenbrooke T.I. και Potts D.M. (1996). Εξετάστηκαν δύο διαφορετικές γεωμετρίες, μία όπου τα κέντρα των σηράγγων είναι στον οριζόντιο άξονα x και το υπερκείμενο ύψος είναι 34m, και μία δεύτερη όπου τα κέντρα τους είναι στον κατακόρυφο άξονα y . Οι αποστάσεις μεταξύ από τα κέντρα τους ποικίλουν. Για την πρώτη κατηγορία λαμβάνονται αποστάσεις από τα κέντρα τους ίσες με 8m, 12m, 16m και 32m. Για την δεύτερη κατηγορία γεωμετρίας, το υπερκείμενο βάθος της βαθύτερης σήραγγας, της οποίας η εκσκαφή γίνεται πρώτη, είναι 34m και οι αποστάσεις από τα κέντρα τους λαμβάνονται ίσες με 10m, 14m και 18m. Σε αυτές τις επτά αναλύσεις η διάμετρος της κάθε σήραγγας είναι $D=4,146m$ και η εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας μετά την πρώτη γίνεται σε 22 ημέρες. Ακόμα έγιναν τρεις αναλύσεις για μονή σήραग्ga, προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά των δίδυμων σηράγγων.



Σχήμα 2-7: Γεωμετρία δίδυμων σηράγγων.

2.2.3.1. Συμπεράσματα

Αυτή η έρευνα παρουσιάζει την επιρροή της θέσης αλλά και της απόστασης των κέντρων των σηράγγων στην αλληλεπίδραση τους, όταν το χρονικό διάστημα από την ολοκλήρωση της εκσκαφής της πρώτης έως την αρχή της εκσκαφής της δεύτερης είναι λιγότερο από έναν μήνα.

Για δίδυμες σήραγγες των οποίων τα κέντρα είναι στον οριζόντιο άξονα

Οι καθιζήσεις πάνω από την δεύτερη σήραग्ga είναι παρόμοιας μορφής με αυτή της μονής σήραγγας αλλά η οριζόντια θέση της μέγιστης καθίζησης είναι μετατοπισμένη προς την υπάρχουσα σήραग्ga. Το μέγεθος της μέγιστης καθίζησης εξαρτάται από τον όγκο εκσκαφής της

δεύτερης σήραγγας και από το πλάτος του πυλώνα. Για παράδειγμα η μέγιστη καθίζηση πάνω από την δεύτερη σήραγγα με πλάτος πυλώνα 8m είναι 5.6mm, ενώ με πλάτος πυλώνα 16m είναι 5.05m. Επίσης για πλάτος πυλώνα μικρότερο της μιας διαμέτρου, η διάμετρος κατά την οριζόντια διεύθυνση μειώνεται κατά 0,2%. Όσο μειώνεται λοιπόν το πλάτος πυλώνα, αυξάνεται η διάμετρος κατά τον οριζόντιο άξονα και μειώνεται κατά τον κατακόρυφο. Επίσης τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο από επτά διαμέτρους για παράλληλες σήραγγες στον οριζόντιο άξονα, μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν επηρεάζεται η ήδη υπάρχουσα σήραγγα αν και κατασκευάστηκε λίγες εβδομάδες πριν την εκσκαφή της δεύτερης.

Για δίδυμες σήραγγες των οποίων τα κέντρα είναι στον κατακόρυφο άξονα

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, συμπεραίνεται ότι η διάμετρος της πρώτης σήραγγας κατά τον οριζόντιο άξονα μειώνεται ενώ η διάμετρος κατά τον κατακόρυφο άξονα αυξάνεται. Τέλος, το μέγεθος της αλληλεπίδρασης μειώνεται με την αύξηση της μεταξύ τους απόστασης και είναι αμελητέα για απόσταση μεγαλύτερη από τρεις διαμέτρους.

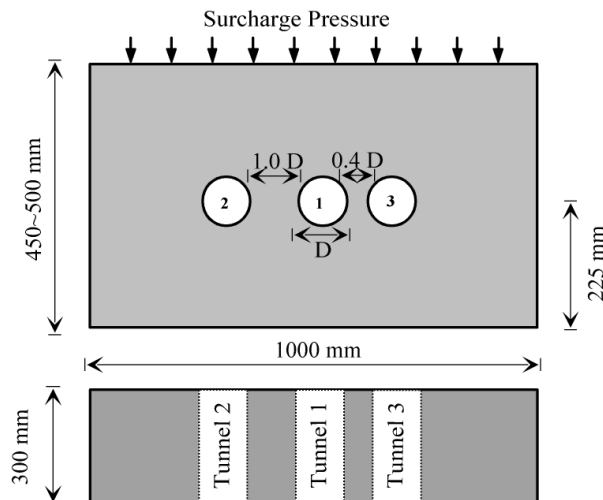
2.2.4. Sang-Hwan Kim, 2004

Αυτή η έρευνα περιγράφει την συμπεριφορά της αλληλεπίδρασης μεταξύ παράλληλων σηράγγων σε μαλακά εδάφη και πιο συγκεκριμένα την επιρροή της εκσκαφής της σήραγγας στις μετακινήσεις και στις τάσεις της υποστήριξης των ήδη υπάρχοντων κοντινών παράλληλων σηράγγων. Η επιρροή της κατασκευής της σήραγγας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το μέγεθος των γεωστατικών τάσεων, το πλάτος του πυλώνα και τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την εκσκαφή της σήραγγας.

Υπάρχει μεγάλη πληροφορία από μετρήσεις πεδίου και αναλυτικές μελέτες σχετικά με την αλληλεπίδραση κοντινών παράλληλων σηράγγων. Για παράδειγμα οι Terzaghi (1942), Ward, και Thomas (1965) ανέφεραν μετρήσεις πεδίου σε κατασκευασμένες σήραγγες με απόσταση 1,425D και 1,6D, όπου D η διάμετρος σε άργιλο Σικάγου και σε άργιλο Λονδίνου αντίστοιχα. Έτσι οι μέγιστες ακτινικές μετατοπίσεις υπολογίστηκαν σε 0,10% R και 0,12% R αντίστοιχα. Επίσης τυπικές αναλύσεις περιγράφηκαν από τους Ghaboussi και Ranken (1977), και Leca (1989). Σε αυτές τις περιπτώσεις το πρόβλημα προσδιορίστηκε ως διδιάστατο και το εδαφικό μοντέλο ελαστικό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο παράλληλων σηράγγων ήταν μικρή όταν η απόσταση τους ήταν μεγαλύτερη από περίπου δύο διαμέτρους. Οι Addenbrooke και Potts (1996) δημοσίευσαν αριθμητικές αναλύσεις της αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο σηράγγων που κατασκευάστηκαν μέσα σε ένα μήνα η μία με την άλλη. Κατέληξαν ότι η αλληλεπίδραση δυο γειτονικών σηράγγων εξαρτάται από την σχετική θέση της σήραγγας (δηλαδή σήραγγες των οποίων τα κέντρα είναι στον κατακόρυφο άξονα και σήραγγες των οποίων τα κέντρα είναι στον οριζόντιο άξονα), όσο και από την μεταξύ τους απόσταση.

2.2.4.1. Δοκιμές

Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν πέντε δοκιμές από δείγματα αργίλου. Σε κάθε τεστ εγκαταστάθηκαν τρία μοντέλα σηράγγων για να διεξαχθούν δύο πειράματα αλληλεπίδρασης σε ένα δείγμα αργίλου. Ένα από τα πειράματα αφορούσε «απομακρυσμένες» σήραγγες με πλάτος πυλώνα 2D και το άλλο «κοντινές» με πλάτος πυλώνα 1.4D. Τα εργαστηριακά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 2-8: Διάταξη των παράλληλων σηράγγων στο επίπεδο.

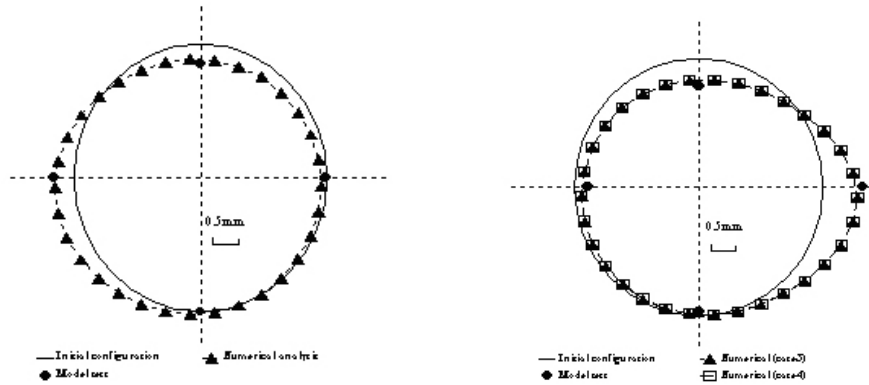
Τα δείγματα ήταν κανονικά στερεοποιημένα ή υπερστερεοποιημένα με δείκτη OCR=3 περίπου, για συνθήκες σε άργιλο Λονδίνου. Όλα τα δείγματα είχαν διατμητική αντοχή περίπου 20 kPa. Το πάνω όριο του δείγματος ήταν τασικά ελεγχόμενο για να προσομοιωθεί η συμπεριφορά μιας σήραγγας που είναι σε απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους.

2.2.4.2. Αριθμητικές αναλύσεις

Ο μηχανισμός της αλληλεπίδρασης μεταξύ γειτονικών σηράγγων είναι περίπλοκος και δεν μπορεί να μελετηθεί πλήρως χρησιμοποιώντας φυσικές δοκιμές δειγμάτων λόγω του μεγάλου αριθμού των παραμέτρων που περιλαμβάνονται. Γι'αυτό διεξάγονται αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, αφού πρώτα πραγματοποιηθεί η διαδικασία ανάπτυξης ρεαλιστικών μοντέλων. Έτσι, σε όλες τις αναλύσεις υιοθετήθηκε γραμμικό ελαστικό εδαφικό μοντέλο, χρησιμοποιήθηκαν εξάκομβα στοιχεία για την αναπαράσταση του εδάφους και στοιχεία δοκού με τρεις κόμβους για την αναπαράσταση της υποστήριξης της σήραγγας αντίστοιχα.

2.2.4.3. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της δοκιμής των δειγμάτων αποδεικνύουν ότι οι συνέπειες της αλληλεπίδρασης είναι μεγαλύτερες στον πυλώνα και στην στέψη της σήραγγας. Φαίνεται ότι οι μεγάλες μετατοπίσεις του πυλώνα συνέβησαν όταν κατασκευάστηκε η καινούρια σήραγγα. Σε κάθε περίπτωση η στέψη της σήραγγας μετακινήθηκε προς τα κάτω, ενώ η κίνηση του πυθμένα ήταν αμελητέα. Η γενική κατανομή των μετακινήσεων της σήραγγας που διαχωρίστηκε σε 2D και 1.4D είναι παρόμοια αν και τα μεγέθη είναι πολύ μεγαλύτερα στην δεύτερη περίπτωση.



Σχήμα 2-9: Μετατοπίσεις του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για πλάτος πυλώνα $W=2D$ (αριστερά) και για πλάτος πυλώνα $W=1.4D$ (δεξιά).

2.2.4.4. Συμπεράσματα

- Οι εργαστηριακές δοκιμές έδειξαν ότι για τις πιο κοντινές σήραγγες οι παραμορφώσεις της διατομής της σήραγγας και οι ροπές στην υποστήριξη μπορεί να είναι σημαντικές. Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων δίνει αποτελέσματα που φαίνεται να συμφωνούν με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών.
- Η αλληλεπίδραση μεταξύ των σηράγγων δεν είναι σημαντική αν το πλάτος του πυλώνα είναι μεγαλύτερο από $2D$, όπου D η διάμετρος της σήραγγας.
- Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων, η διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στις εργαστηριακές δοκιμές, χρησιμοποιώντας ένα δείγμα αργίλου για την διεξαγωγή δύο πειραμάτων αλληλεπίδρασης, είναι λογική.

2.2.5. Koungelis D.K., Augarde C.E., 2004

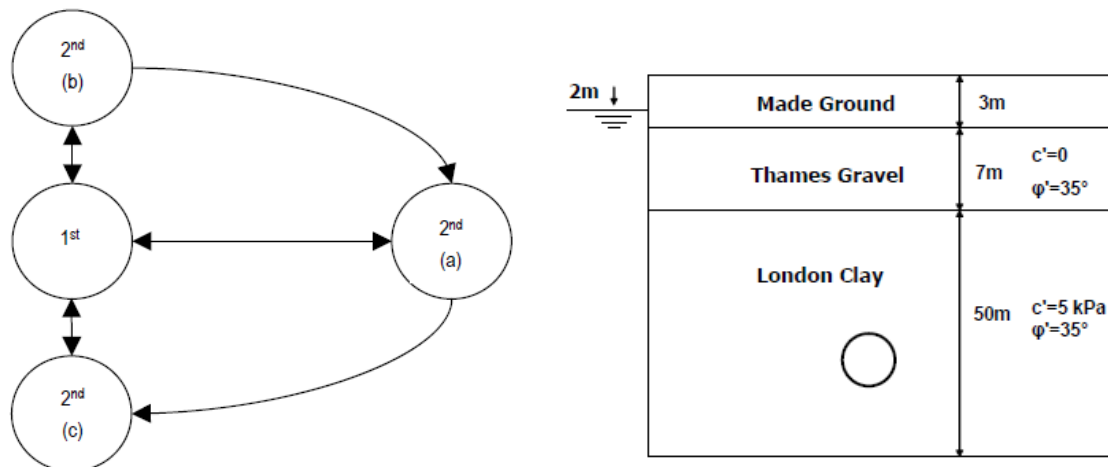
Οι Koungelis D.K. και Augarde C.E. (2004) μελέτησαν τον σχεδιασμό αβαθών παράλληλων σηράγγων σε μαλακό έδαφος, και πιο συγκεκριμένα την μεταξύ τους αλληλεπίδραση και τις επιφανειακές μετακινήσεις του εδάφους που προκαλούνται κατά την εκσκαφή. Σκοπός αυτής της έρευνας είναι να εξετάσει την ελάχιστη απόσταση αλληλεπίδρασης μεταξύ των παράλληλων σηράγγων σε μαλακό έδαφος με μικρό πάχος υπερκείμενων γαιών.

Μελετώνται τρεις περιπτώσεις γεωμετρίας των παράλληλων σηράγγων:

- Σήραγγες παράλληλες στον οριζόντιο άξονα
- Σήραγγες των οποίων τα κέντρα είναι στον κατακόρυφο άξονα και η δεύτερη σήραγγα εκσκάπτεται πάνω από την πρώτη
- Σήραγγες των οποίων τα κέντρα είναι στον κατακόρυφο άξονα και η δεύτερη σήραγγα εκσκάπτεται κάτω από την πρώτη

2.2.5.1. Γεωμετρία μοντέλων και στρωματογραφία περιοχής

Η διάμετρος της κάθε σήραγγας είναι ίση με $D=4,174\text{m}$. Η πρώτη περίπτωση εξετάζει δύο διαφορετικά πάχη υπερκείμενων γαιών ($H=34\text{m}$ και $H=14\text{m}$) και η απόσταση μεταξύ των παράλληλων σηράγγων κυμαίνονται από $0,5D$ έως $7D$. Στην δεύτερη περίπτωση το πλάτος πυλώνα (σε κατακόρυφη διεύθυνση) κυμαίνεται από $0,5D$ έως $4D$ και στην τρίτη περίπτωση από $0.5D$ έως $7D$.



Σχήμα 2-10: Παρουσίαση των τριών διαφορετικών θέσεων της δεύτερης σήραγγας (αριστερά) και στρωματογραφία του εδάφους (δεξιά).

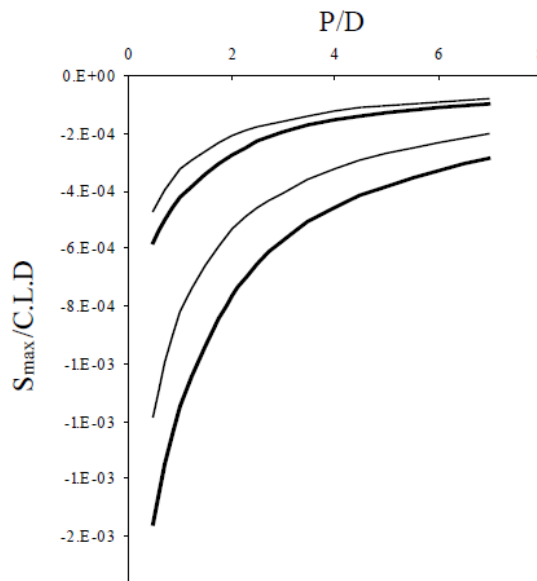
Όσον αφορά την στρωματογραφία του εδάφους, το πρώτο εδαφικό στρώμα (Made Ground) προσομοιάζεται ως γραμμικά ελαστικό ενώ η δεύτερη και τρίτη στρώση (Thames Gravel και London Clay αντίστοιχα) θεωρείται ελαστική-απολύτως πλαστική χρησιμοποιώντας το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

2.2.5.2. Αποτελέσματα μελέτης

Οι αναλύσεις έγιναν με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα Plaxis και ξεκίνησαν με την παραδοχή ότι πριν την κατασκευή της σήραγγας για τον υπολογισμό των γεωστατικών τάσεων, ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων λαμβάνεται $K_0=0.5$ για την πρώτη και δεύτερη στρώση και $K_0=1.5$ για την τρίτη. Σχετικά με την αλληλουχία των εκσκαφών, πρώτα ολοκληρώνεται η διάνοιξη της πρώτης σήραγγας και μετά ακολουθεί η διάνοιξη της δεύτερης.

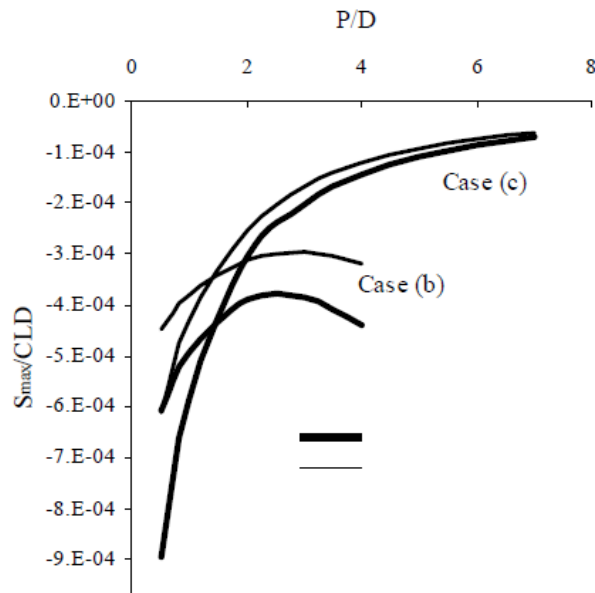
Στην πρώτη περίπτωση λαμβάνονται υπόψη μόνο οι καθιζήσεις της δεύτερης σήραγγας, καθώς οι καθιζήσεις της πρώτης λαμβάνονται ως μηδενικό σημείο αναφοράς. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της μελέτης, η οποία εξετάζει την επιρροή του εκσκαπτικού βάθους και την ακαμψία του ελαστικού εδάφους στην αλληλεπίδραση των σηράγγων. Φαίνεται λοιπόν η μέγιστη καθίζηση κανονικοποιημένη με την απόσταση των κέντρων των σηράγγων σε συνάρτηση με το βάθος κανονικοποιημένο με την διάμετρο της σήραγγας. Οι δύο καμπύλες για το κάθε βάθος ($H=14\text{m}$ και $H=34\text{m}$) είναι παρόμοιες. Όσο αυξάνεται το πλάτος πυλώνα, η αλληλεπίδραση

μειώνεται αξιοσημείωτα, μέχρι το πλάτος να φτάσει τις τρεις με τέσσερις διαμέτρους όπου η αλληλεπίδραση παύει να υπάρχει. Για σήραγγες με μεγάλο πάχος υπερκείμενων γαιών, οι καθιζήσεις είναι σχεδόν ίδιες.



Σχήμα 2-11: Διάγραμμα της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης του εδάφους κανονικοποιημένη με την απόσταση ανάμεσα στα κέντρα των σηράγγων συναρτήσει του πλάτους πυλώνα κανονικοποιημένο με την διάμετρο της σήραγγας για σήραγγες παράλληλες στον οριζόντιο άξονα.

Συγκρίνοντας τις επόμενες δύο περιπτώσεις, όταν το πλάτος πυλώνα είναι το μικρότερο, φαίνεται ότι οι καθιζήσεις είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση όπου η υψηλότερη σήραγγα εκσκάπτεται πρώτη (τρίτη περίπτωση γεωμετρίας). Στην δεύτερη περίπτωση, όλο και μειώνεται η αλληλεπίδραση ανάμεσα στις σήραγγες με την αύξηση του πλάτους πυλώνα, ειδικά για πλάτος πυλώνα ίσο με τρεις διαμέτρους η αλληλεπίδραση είναι αμελητέα. Ακόμα, για βάθος ίσο με τρεις φορές την διάμετρο της σήραγγας, η δεύτερη σήραγγα φαίνεται να εμφανίζει τιμές καθιζήσεων ίσες με αυτές της μονής σήραγγας. Μετά από μια ορισμένη τιμή του βάθους, οι τιμές των καθιζήσεων στις δύο τελευταίες περιπτώσεις είναι αρκετά διαφορετικές. Στην τρίτη περίπτωση φαίνεται να μην υπάρχει κάποια ασφαλή απόσταση ανάμεσα στις παράλληλες σήραγγες όπου η αλληλεπίδραση να σταματάει να υπάρχει. Αυτό συμβαίνει γιατί η συμπεριφορά της επηρεάζεται από την παρουσία της πρώτης σήραγγας η οποία βρίσκεται στην υψηλότερη θέση, ανεξάρτητα από το βάθος της δεύτερης σήραγγας.



Σχήμα 2-12: Διάγραμμα της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης του εδάφους κανονικοποιημένη με την απόσταση ανάμεσα στα κέντρα των σηράγγων συναρτήσει του πλάτους πυλώνα κανονικοποιημένο με την διάμετρο της σήραγγας για σήραγγες των οποίων τα κέντρα είναι στον κατακόρυφο άξονα.

2.2.6. Karakus M., Ozsan A., Basarir H., 2007

Για την σύγκλιση των μετρήσεων των δίδυμων σηράγγων του μετρό της Άγκυρας στην Τουρκία, μήκους 9.3m, έγιναν αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων κάνοντας την παραδοχή ότι το πρόβλημα είναι διδιάστατο. Τα αποτελέσματα από τις παραπάνω αναλύσεις συγκρίθηκαν με τις μετρήσεις υπαίθρου. Οι γεωλογικές συνθήκες γύρω από τις σήραγγες, οι μετακινήσεις του εδάφους λόγω της εκσκαφής και η αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο παράλληλων σηράγγων μελετώνται στη συνέχεια.

Κάθε σήραγγα έχει διάμετρο $D=7\text{m}$ και η μέγιστη απόσταση των κέντρων τους είναι 15m. Το υπερκείμενο βάθος είναι μικρό, και συντίθεται κυρίως από άργιλο όπου τα αποτελέσματα του συμπίεσομέτρου έδειξαν ότι είναι ελαφρώς υπερστερεοποιημένη. Το έδαφος της αργίλου της Άγκυρας διαμορφώθηκε χρησιμοποιώντας το κριτήριο αστοχίας Drucker-Prager, κατά το οποίο η αστοχία εξαρτάται από τις κύριες τάσεις.

Η εκσκαφή των σηράγγων χωρίζεται σε δύο στάδια. Πρώτα το πάνω μέρος εκσκάπτεται και αμέσως τοποθετείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 30mm, μετά πραγματοποιείται η τοποθέτηση του χάλυβα, των δοκών και ενός επιπλέον πάχους 170mm εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Έπειτα το χαμηλότερο μέρος της σήραγγας εκσκάπτεται και τα στοιχεία υποστήριξης εφαρμόζονται με τον ίδιο τρόπο. Αριθμητικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της αλληλεπίδρασης της υποστήριξης, των παραμορφώσεων και της κατανομής των τάσεων γύρω από το μέτωπο. Οι βραχυχρόνιες μετρήσεις έδειξαν ότι οι μέγιστες παραμορφώσεις συναντώνται στην στέψη της δεξιάς σήραγγας.

2.2.6.1. Γεωλογία και γεωτεχνικές ιδιότητες της περιοχής

Το εδαφικό προφίλ αποτελείται από επίχωση και άργιλο της Άγκυρας. Το επίχωμα είναι καστανού χρώματος και η σύνθεση του αποτελείται από σκύρα, χαλίκια και αμμώδη άργιλο. Το πάχος της στρώσης κυμαίνεται από 0.8 έως 7.5 m. Η στρώση της αργίλου είναι καστανού έως ερυθρού χρώματος και η σύνθεση της αποτελείται από ιλύ κυρίως και αμμώδη άργιλο με αργιλώδη ιλύ. Σημειώνεται ακόμα ότι επειδή η άργιλος της Άγκυρας είναι χαμηλής διαπερατότητας, δεν είναι ξεκάθαρο το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα.

2.2.6.2. Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων

Οι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων βασίστηκαν στα αποτελέσματα των δοκιμών του συμπιεσομέτρου. Προκειμένου να διεξαχθεί ανάλυση υπό αστράγγιστες συνθήκες για την άργιλο, το μέτρο συμπιεστότητας K_w υπολογίστηκε από την σχέση:

$$K' = \frac{(1 + e) * p'}{κ} ,$$

Όπου:

K' : το μέτρο συμπιεστότητας από το νερό

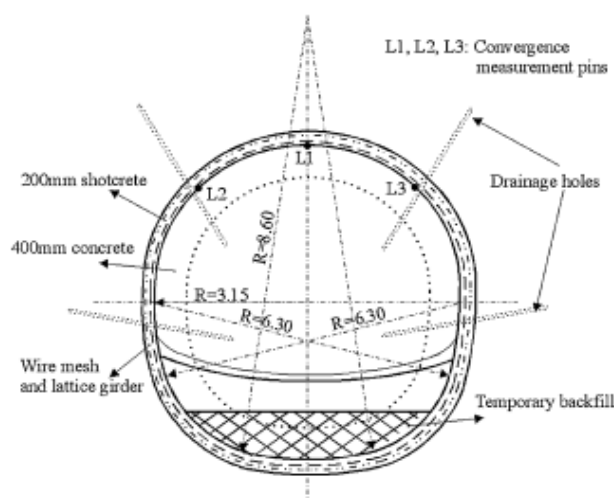
p' : μέση κανονική τάση

e : ο δείκτης κενών

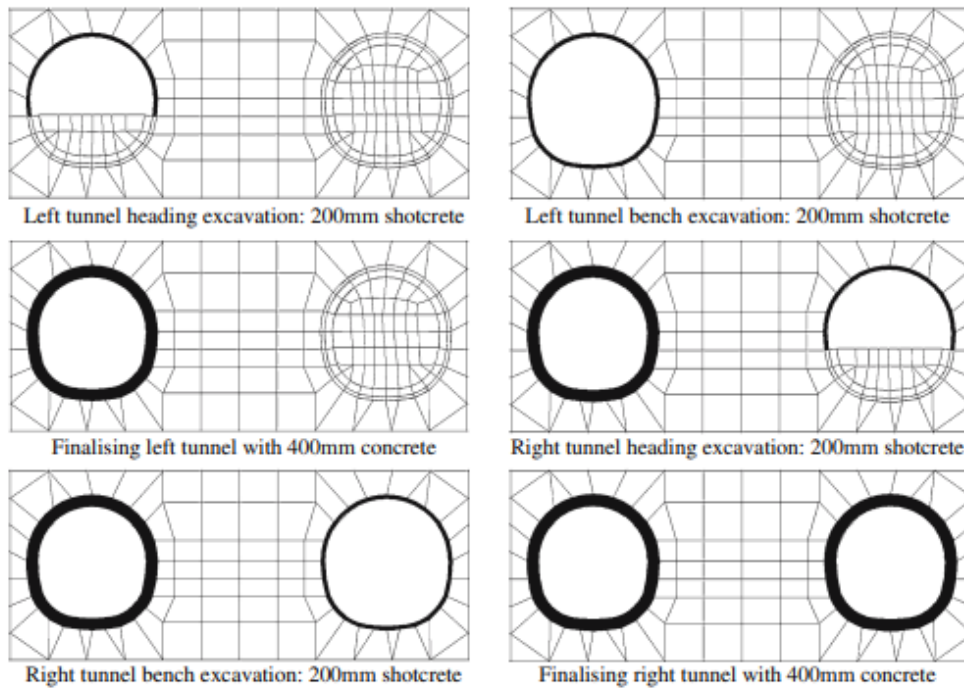
$κ$: λογαριθμικό ελαστικό μέτρο ελαστικότητας

Σε αστράγγιστες συνθήκες το K_w λαμβάνεται ίσο με $100 * K'$.

Ο κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων είναι 90m x 53.5m και η γεωμετρία της σήραγγας και τα κατασκευαστικά στοιχεία ακολουθούν στο επόμενο σχήμα.

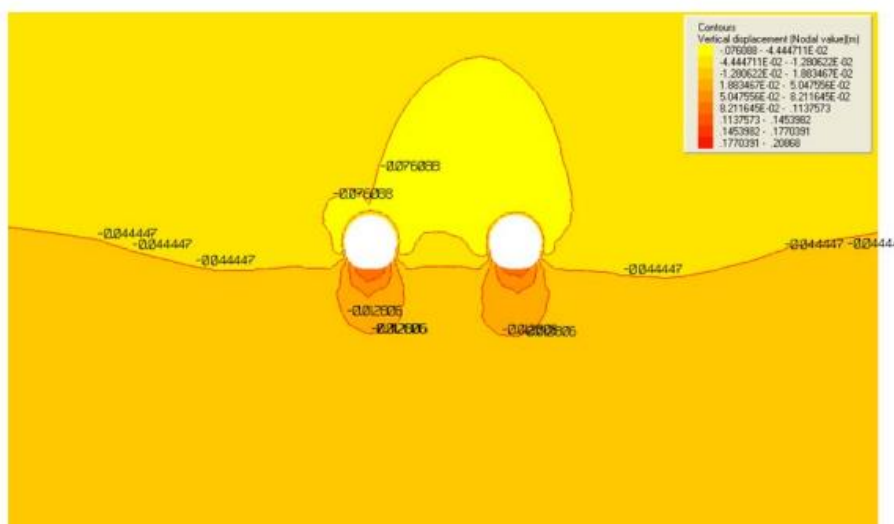


Σχήμα 2-13: Γεωμετρία της κατασκευασμένης σήραγγας.

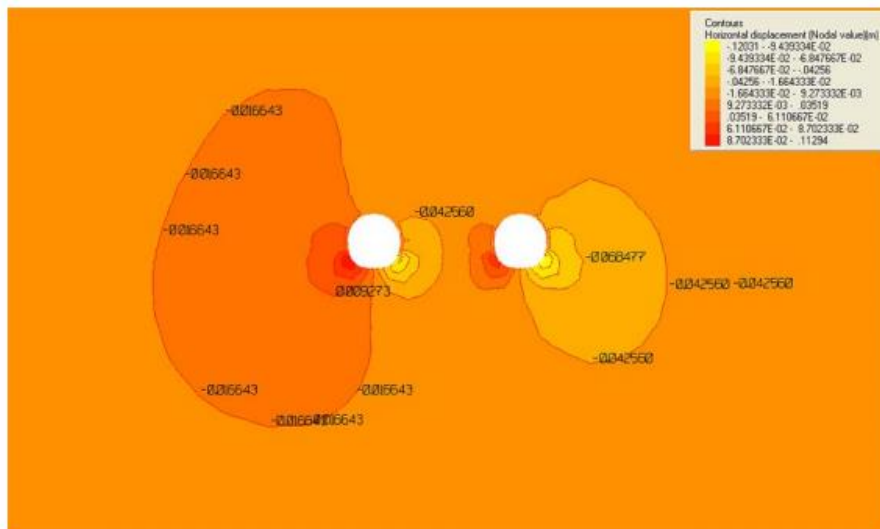


Σχήμα 2-14: Φάσεις της εκσκαφής από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων.

Το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος λήφθηκε ίσο με 200mm και το μέτρο ελαστικότητας του ίσο με 8GPa. Το σκυρόδεμα που εφαρμόστηκε πάνω από το εκτοξευόμενο έχει πάχος 400mm και μέτρο ελαστικότητας 20GPa. Η εκσκαφή της κάθε σήραγγας πραγματοποιήθηκε σε πέντε στάδια. Παρακάτω παρουσιάζονται αποτελέσματα των κατακόρυφων και οριζόντιων μετατοπίσεων από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 2-15:Κατακόρυφες μετατοπίσεις γύρω από τις δίδυμες σήραγγες.



Σχήμα 2-16:Οριζόντιες μετατοπίσεις γύρω από τις δίδυμες σήραγγες.

2.2.6.3. Εκτίμηση αποτελεσμάτων – συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων έδειξαν ότι:

- Οι κατακόρυφες μετακινήσεις στα τοιχώματα των σηράγγων είναι σε πλήρη συμφωνία με τις μετρήσεις υπαίθρου, αλλά οι οριζόντιες μετακινήσεις έχουν απόκλιση από αυτές. Όμως, αφού οι μετρήσεις συγκλίσεων έγιναν με τοπογραφικές μεθόδους, η σύγκλιση που παρατηρήθηκε μπορεί να είναι λανθασμένη. Έτσι θεωρείται ότι μια πιο αξιόπιστη τεχνική πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τις μετρήσεις σε μαλακό έδαφος.
- Η δεξιά σήραγγα κατασκευάστηκε μετά από το τέλος κατασκευής της αριστερής σήραγγας και, όχι μόνο οι οριζόντιες αλλά και οι κατακόρυφες μετακινήσεις παρατηρήθηκαν 2-3 φορές μεγαλύτερες από την αριστερή σήραγγα. Θεωρείται ότι η νωρίτερη κατασκευή της αριστερής σήραγγας προκάλεσε και αύξησε την σύγκλιση. Αυτό μπορεί να συνέβη λόγω του μικρού πλάτους του πυλώνα ανάμεσα στις σήραγγες το οποίο δημιούργησε μια μεγαλύτερη πλαστική περιοχή γύρω από την αριστερή σήραγγα.
- Το επιλεγμένο πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι επαρκές για να σταματήσει τις υπερβολικές συγκλίσεις.

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

Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας αποτελεί η αριθμητική διερεύνηση της αλληλεπίδρασης τριών ή τεσσάρων παράλληλων σηράγγων. Σύμφωνα με τους Chen S.L., Lee S.C., Gui M.W., η αλληλεπίδραση των σηράγγων επηρεάζεται από τις γεωλογικές συνθήκες, την διατομή της σήραγγας αλλά και το πλάτος του πυλώνα. Συγκεκριμένα όταν το πλάτος του πυλώνα μειώνεται, τότε απαιτείται βελτίωση ευστάθειας της σήραγγας, διαφορετικά όταν είναι πολύ μεγάλο δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των σηράγγων που να προκαλείται από την εκσκαφή. Για την διερεύνηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μελετήθηκε η διάνοιξη της σήραγγας XueShan στην Ταιβάν. Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεωμετρικά και γεωλογικά στοιχεία του έργου, καθώς και τα συμπεράσματα της σχετικής έρευνας.

2.2.7.1. Πραγματικό περιστατικό

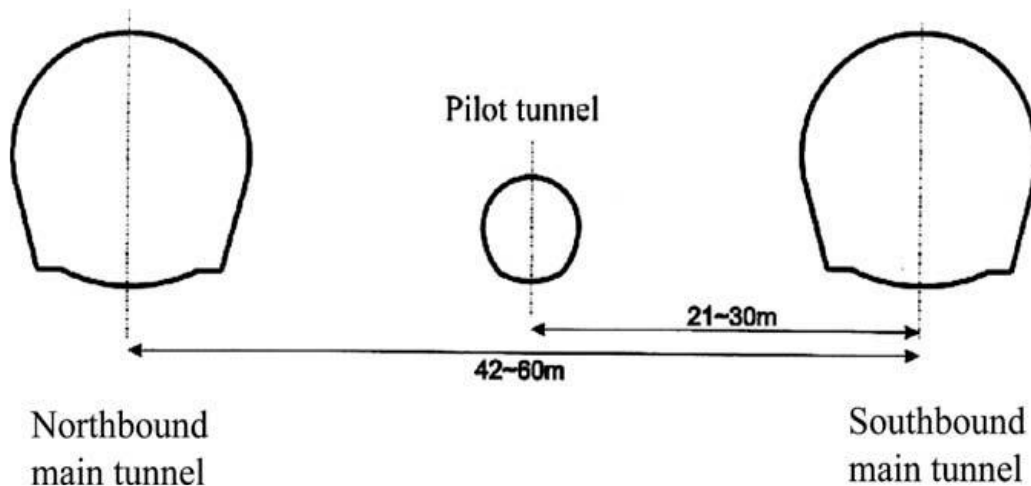
Λόγω του ορεινού αναγλύφου της Ταιβάν και των απαιτήσεων μεταφοράς υπάρχουν πολλές δίδυμες παράλληλες σήραγγες, αλλά και τρίδυμες όπως στο συγκεκριμένο παράδειγμα, των οποίων η συμπεριφορά κατά την εκσκαφή είναι πολύ περίπλοκη. Η μεσαία κατασκευάζεται για λόγους έκτακτης ανάγκης ή συντήρησης των άλλων δυο. Συγκεκριμένο παράδειγμα αποτελεί η σήραγγα XueShan στην Ταιβάν η οποία είναι η 5^η μεγαλύτερη στον κόσμο και η 1^η στην νότια Ασία. Το μήκος της είναι 12.9 km και η κατασκευή της μείωσε την απόσταση του τρένου από την δυτική πλευρά έως την ανατολική από δύο ώρες σε μισή. Στα περισσότερα τμήματα της έγινε εκσκαφή με TBM, ενώ στο μέτωπο με την μέθοδο της διάτρησης και της ανατίναξης. Κατά την διάρκεια της εκσκαφής λόγω αστοχίας της σήραγγας κατασκευάστηκε τέταρτη σήραγγα μεταξύ της μίας εκ των κυρίων και της πιλοτικής για την αντιμετώπιση του συμβάντος.

Η διατομή η οποία ανοίχθηκε με συμβατικά μέσα είχε πεταλοειδές σχήμα, ενώ αυτή που διανοίχθηκε με μηχανικά μέσα (TBM) είχε κυκλικό σχήμα, διαμέτρου $D=12\text{m}$ και $D=5\text{m}$ για την κύρια και πιλοτική σήραγγα αντίστοιχα. Η απόσταση των δύο κύριων σηράγγων ήταν αρχικά 60 m αλλά αυτή η απόσταση μειώθηκε σταδιακά στα 42 m προς το τμήμα του μετώπου λόγω περιορισμών της οδοποιίας.

Οι γεωλογικές συνθήκες της περιοχής χαρακτηρίζονται περίπλοκες με πολλές ασυνέχειες και ρωγματωμένο πέτρωμα. Επίσης το υπερκείμενο ύψος είναι 300 m και ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων σημειώνεται $K_0=1$. Ακόμα, συναντήθηκαν υψηλές πιέσεις υπόγειων υδάτων, όπου σε συνδυασμό με τις περίπλοκες γεωλογικές συνθήκες έχουν προκαλέσει πολλές αστοχίες στις σήραγγες κατά την διάρκεια της εκσκαφής τους. Η μέγιστη μετατόπιση στην πιλοτική σήραγγα στο πρώτο στάδιο εκσκαφής σημειώθηκε 82 mm αλλά υπολογίζεται ότι θα ήταν πολύ μεγαλύτερη, δηλαδή 230 mm, αν δεν γινόταν βελτίωση του εδάφους με τσιμεντενέσεις σταθεροποίησης. Έτσι σταμάτησε η εισροή του νερού πριν ξεκινήσει η εκσκαφή ξανά και κατ'επέκταση ελέγχθηκε η παραμόρφωση της σήραγγας.

Η αριθμητική ανάλυση έγινε κυρίως με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS και με το πρόγραμμα FLAC και έγιναν οι εξής βασικές υποθέσεις:

- Το πρόβλημα είναι διδιάστατο.
- Χρησιμοποιείται το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.
- Η υποστήριξη γίνεται με επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
- Οι παραμορφώσεις προέρχονται από την εκσκαφή και την υποστήριξη.
- Το σχήμα της διατομής των σηράγγων λαμβάνεται ως κυκλικό ή πεταλοειδές.



Σχήμα 2-17: Διάταξη των διατομών των σηράγγων Xueshan.

2.2.7.2. Συμπεράσματα

Οι Chen S.L., Lee S.C., Gui M.W. (2008) μέσω της έρευνας τους καταλήγουν στα εξής συμπεράσματα:

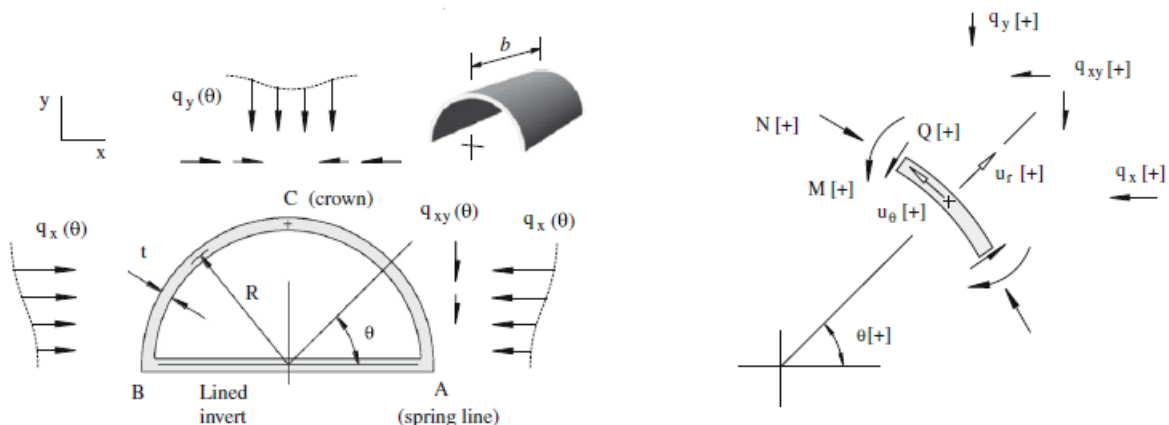
- Όταν το πλάτος πυλώνα είναι μικρότερο από $2D$, όπου D είναι η διάμετρος της κυκλικής διατομής της σήραγγας, τότε απαιτείται βελτίωση ευστάθειας της σήραγγας, διαφορετικά για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο από $2D$ δεν υπάρχει επιρροή της αλληλεπίδρασης από την εκσκαφή των σηράγγων.
- Ενώ το μέγεθος της μετατόπισης είναι μικρότερο στο κυκλικό σχήμα διατομής απ'ότι στο πεταλοειδές, η επιρροή της αλληλεπίδρασης μεταξύ γειτονικών σηράγγων είναι πιο σημαντική στις κυκλικές διατομές απ'ότι στις πεταλοειδείς. Ειδικά όταν το πλάτος πυλώνα είναι μικρότερο από $2D$.
- Εάν απαιτείται η κατασκευή μιας βοηθητικής σήραγγας ανάμεσα στην μία κύρια και στην πιλοτική, τότε οδηγούμαστε στην μείωση του πλάτους του πυλώνα.

2.2.8. Carranza C. – Torres, Diederichs M., 2009

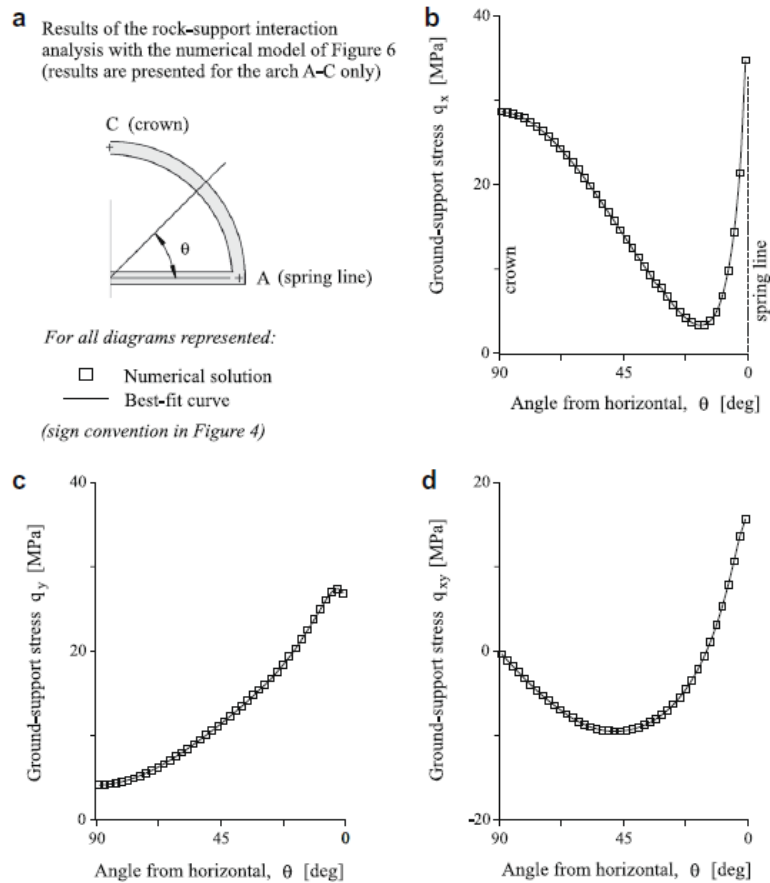
2.2.8.1. Εισαγωγή

Η σχετική έρευνα περιγράφει την μεθοδολογία της μηχανικής ανάλυσης των σύνθετων υποστηρίξεων, όπως επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και μεταλλικά πλαίσια. Αυτή η μεθοδολογία βασίζεται σε μια τεχνική στατικών αναλύσεων και οι εξισώσεις που ακολουθούν προέρχονται από την θεωρία ελαστικής επένδυσης και έτσι είναι οι πλέον κατάλληλες εξισώσεις για την άμεση υποστήριξη σηράγγων κυκλικής διατομής. Η προτεινόμενη μεθοδολογία για τον σχεδιασμό της υποστήριξης είναι βασισμένη στην κατασκευή των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης.

Το πρόβλημα που λαμβάνεται υπόψη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (2-18). Μία ημικυκλική διατομή ακτίνας R , πάχους σκυροδέματος t και πάχος έκτος επιπέδου b εκσκάπτεται σε έδαφος που για λόγους απλότητας θεωρείται ομογενές, ισότροπο και ελαστικό με μέτρο ελαστικότητας E και λόγο Poisson ν . Πριν την εκσκαφή το έδαφος χαρακτηρίζεται από μια κατακόρυφη τάση σ_1 και μια οριζόντια τάση σ_3 , με μέση τάση $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ και συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0 = \sigma_3/\sigma_1$. Σαν αποτέλεσμα της εκσκαφής της σήραγγας και της εφαρμογής της άμεσης υποστήριξης, υπολογίζονται τα φορτία που μεταφέρονται από το έδαφος στην υποστήριξη μέσω πεπερασμένων στοιχείων με την βοήθεια του προγράμματος FLAC-3D και παρουσιάζονται από τις τάσεις q_x , q_y του σχήματος έχοντας ως αναφορά το καρτεσιανό σύστημα αξόνων. Τα φορτία που μεταφέρονται από το έδαφος στην υποστήριξη μπορούν να προκαλέσουν καμπτικές ροπές, αξονικές και τέμνουσες δυνάμεις, μετακινήσεις της υποστήριξης και όλα αυτά σαν συνάρτηση της γωνίας θ . Αυτά εξαρτώνται από τις γεωτεχνικές συνθήκες του εδάφους, την γεωμετρία και τα μηχανικά χαρακτηριστικά της υποστήριξης.



Σχήμα 2-18: Φόρτιση εδάφους της ημικυκλικής διατομής της σήραγγας σύμφωνα με την προσέγγιση αλληλεπίδρασης εδάφους-υποστήριξης (αριστερά) και σύμβαση προσήμανσης δυνάμεων, ροπών και μετακινήσεων (δεξιά).



Σχήμα 2-19: Γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων για τις τάσεις q_x, q_y, q_{xy} με την προσέγγιση αλληλεπίδρασης εδάφους-υποστήριξης.

Η επαλήθευση της φόρτισης που προκαλείται στην επένδυση (δηλαδή η αξιολόγηση του κατά πόσον οι κατανομές της αξονικής δύναμης, της ροπής κάμψης και της διατμητικής δύναμης που προκαλούν τις τάσεις στην επένδυση είναι εντός των αποδεκτών ορίων) θα γίνει μέσω των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης, των οποίων η περιγραφή ακολουθεί παρακάτω.

2.2.8.2. Διαγράμματα αλληλεπίδρασης

Η γραφική αναπαράσταση των αξονικών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών με την αντίστοιχη περιβάλλουσα αστοχίας (για παράδειγμα οι μέγιστες αξονικές δυνάμεις και οι μέγιστες ροπές κάμψης που επιτρέπουν στην υποστήριξη να μην αστοχεί) αναφέρεται ως διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων-καμπτικών ροπών. Αντίστοιχα η αναπαράσταση των αξονικών και τεμνουσών δυνάμεων μαζί με την περιβάλλουσα αστοχίας αναφέρεται ως διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών-τεμνουσών δυνάμεων. Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης της υποστήριξης είναι χρήσιμα στον σχεδιασμό της υποστήριξης των σηράγγων αφού επιτρέπει τον εύκολο έλεγχο, αν δηλαδή για δεδομένες συνθήκες του προβλήματος οι τάσεις επί της υποστήριξης είναι πάνω ή κάτω από το επιτρεπόμενο όριο. Η κατασκευή αυτών των διαγραμμάτων βασίζεται στην παραδοχή ότι η υποστήριξη συμπεριφέρεται ελαστικά.

Το Σχήμα 2-20 (αριστερά) προβάλλει την τομή της διατομής της σήραγγας, στην οποία ασκείται η αξονική δύναμη N και η καμπτική ροπή M , μέσω των οποίων δημιουργούνται η μέγιστη τάση σ_{\max} και η ελάχιστη σ_{\min} .

Όπου:

A : η επιφάνεια της τομής που ασκούνται οι τάσεις

I : η ροπή αδρανείας

t : το πάχος της υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Ακολουθεί ο ορισμός του συντελεστή ασφαλείας για την αστοχία σε θλίψη και την αστοχία σε εφελκυσμό:

$$FS = \frac{\sigma_c}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_t}{\sigma_{\min}}$$

Η οριακή τιμή της αξονικής δύναμης που σχετίζεται με την αστοχία στην θλίψη:

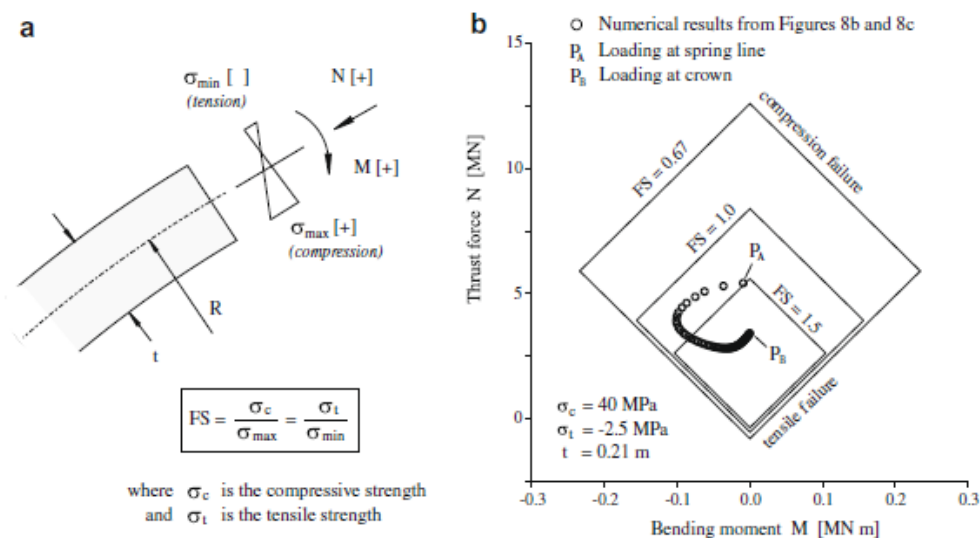
$$N = -\frac{|M|At}{2I} + \frac{\sigma_c A}{FS}$$

Η οριακή τιμή της αξονικής δύναμης που σχετίζεται με την αστοχία στον εφελκυσμό:

$$N = \frac{|M|At}{2I} + \frac{\sigma_t A}{FS}$$

Για συγκεκριμένη τιμή του συντελεστή ασφαλείας FS για την αστοχία σε θλίψη και αστοχία στον εφελκυσμό ταυτόχρονα λαμβάνονται οι κρίσιμες τιμές των ροπών κάμψης από την ακόλουθη εξίσωση:

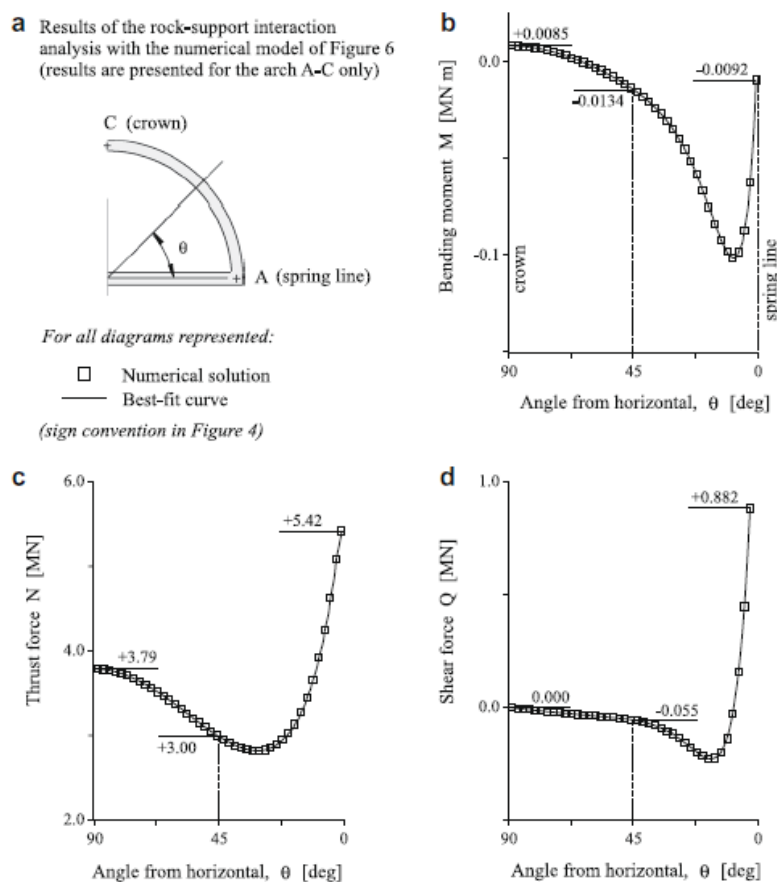
$$M = \pm \frac{I}{t} \cdot \frac{\sigma_c - \sigma_t}{FS}$$



Σχήμα 2-20: Συντελεστής ασφαλείας ορισμένος από την μέγιστη και ελάχιστη τάση στην διατομή του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (αριστερά) και γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - καμπτικών ροπών (δεξιά).

Τα σημεία (M , N) αποτελούν το διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών, έχοντας στον οριζόντιο άξονα τις ροπές κάμψης και στον κατακόρυφο τις αξονικές δυνάμεις. Το σχήμα «διαμαντιού» δικαιολογείται από τα όρια των μεγεθών N και M. Για παράδειγμα για συντελεστή ασφαλείας $FS=1.5$, αν ένα σημείο βρίσκεται στο πάνω όριο (αστοχία σε θλίψη) σημαίνει ότι η αξονική δύναμη και η καμπτική ροπή δρουν σε ένα συγκεκριμένο σημείο της διατομής του κελύφους και παράγουν μια μέγιστη τάση, στο εσωτερικό ή εξωτερικό μέρος του κελύφους ανάλογα με την φορά της φόρτισης, η οποία είναι 1.5 φορές μικρότερη από την αντοχή σε θλίψη του υλικού σύμφωνα με την σχέση. Ομοίως και για ένα σημείο που βρίσκεται στο κάτω όριο (αστοχία σε εφελκυσμό). Για τα αριστερά και δεξιά όρια του σχήματος διαμαντιού χρησιμοποιείται η σχέση, όπου σ_c και σ_t οι τιμές τάσεων στα όρια.

Για τα σημεία του διαγράμματος αλληλεπίδρασης, λαμβάνονται οι τιμές της αξονικής δύναμης και της καμπτικής ροπής από τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης εδάφους-υποστήριξης για συγκεκριμένη τιμή της γωνίας θ . Σημειώνεται ότι το σημείο ρ_A αντιστοιχεί στον πυθμένα της διατομής και το σημείο ρ_B στην στέψη της διατομής της σήραγγας. Τα σημεία του σχήματος περικλείονται στην καμπύλη $FS=1$, δηλαδή η υποστήριξη δεν αστοχεί αλλά αντέχει την αξονική δύναμη και την ροπή που προκαλούνται από την εκσκαφή της σήραγγας. Αν γινόταν υπόθεση με συντελεστή ασφαλείας $FS=1.5$, σημαίνει ότι ο σχεδιασμός της υποστήριξης της σήραγγας είναι μη αποδεκτός και θα έπρεπε να πραγματοποιηθεί αύξηση του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή αύξηση της αντοχής του.



Σχήμα 2-21: Γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων για την ροπή κάμψης, την αξονική δύναμη και την τέμνουσα δύναμη με την προσέγγιση αλληλεπίδρασης εδάφους-υποστήριξης.

Το σχήμα προβάλλει την τομή της διατομής της σήραγγας, στην οποία ασκείται η αξονική δύναμη N και η τέμνουσα δύναμη Q , με την παραβολική κατανομή των διατμητικών τάσεων τ οι οποίες παράγονται από την τέμνουσα δύναμη.

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{Q}{A}$$

Η αξονική δύναμη παράγει μια κάθετη τάση:

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{A}$$

Η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια τάση υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_{\max}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\max}}{2}\right)^2 + \tau_{\max}^2}$$

Οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας:

$$FS = \frac{\sigma_c}{\sigma_1} = \frac{\sigma_t}{\sigma_3}$$

Η οριακή τιμή της αξονικής δύναμης που σχετίζεται με την αστοχία στην θλίψη και αποτελεί το πάνω όριο του διαγράμματος:

$$N = \frac{\sigma_c A}{FS} - \frac{9}{4} \cdot \frac{Q^2 \cdot FS}{\sigma_c \cdot A}$$

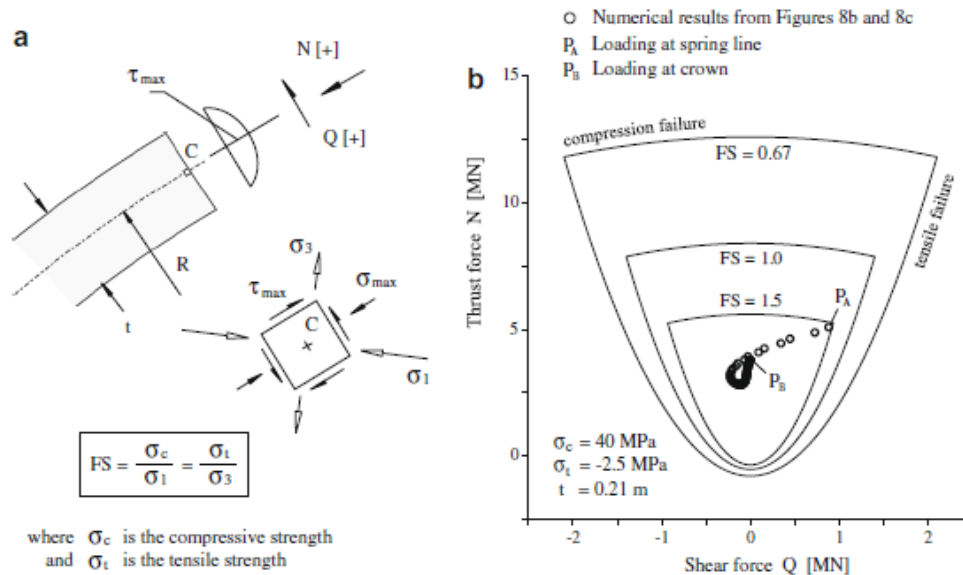
Η οριακή τιμή της αξονικής δύναμης που σχετίζεται με την αστοχία στον εφελκυσμό και αποτελεί το κάτω όριο του διαγράμματος:

$$N = \frac{\sigma_t A}{FS} - \frac{9}{4} \cdot \frac{Q^2 \cdot FS}{\sigma_t \cdot A}$$

Για συγκεκριμένη τιμή του συντελεστή ασφαλείας FS για την αστοχία σε θλίψη και αστοχία στον εφελκυσμό ταυτόχρονα λαμβάνονται οι κρίσιμες τιμές των τεμνουσών δυνάμεων από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q = \pm \frac{A}{FS} \cdot \sqrt{-\frac{4}{9} \cdot \sigma_c \cdot \sigma_t}$$

,όπου η αντοχή σε εφελκυσμό σ_t είναι με αρνητικό πρόσημο.

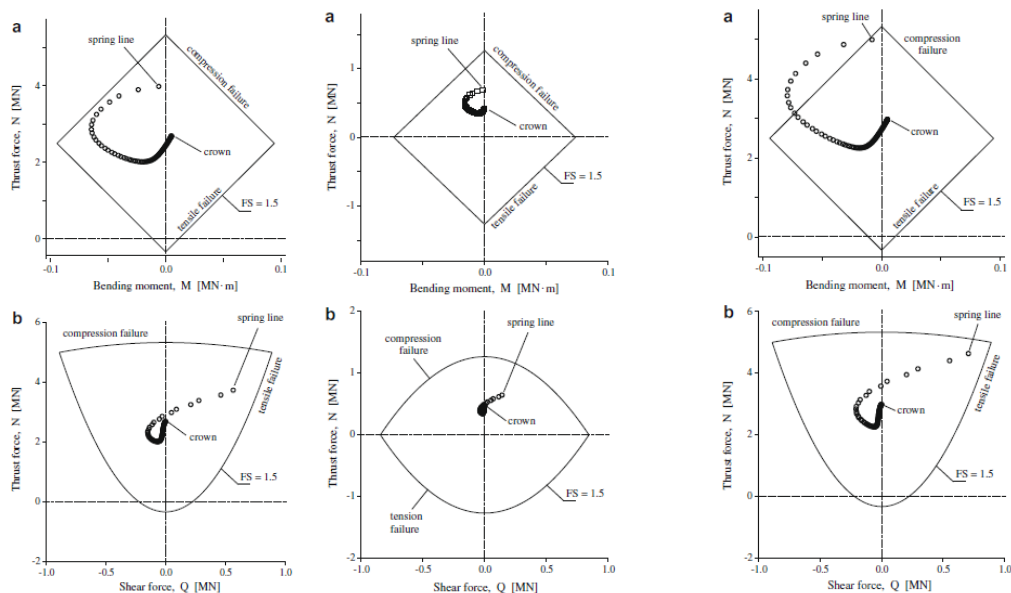


Σχήμα 2-22: Συντελεστής ασφαλείας ορισμένος από την μέγιστη και ελάχιστη τάση από την αξονική και τέμνουσα δύναμη στην διατομή του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (αριστερά) και γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων- τεμνουσών δυνάμεων (δεξιά).

Τα σημεία (Q , N) αποτελούν το διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων και τεμνουσών δυνάμεων, έχοντας στον οριζόντιο άξονα τις τέμνουσες και στον κατακόρυφο τις αξονικές δυνάμεις. Τα όρια του παραπάνω διαγράμματος δικαιολογούνται έχοντας επιλέξει για παράδειγμα μια τιμή του συντελεστή ασφαλείας FS=1.5. Αν ένα σημείο βρίσκεται στο πάνω όριο (αστοχία σε θλίψη) σημαίνει ότι η αξονική δύναμη και η ροπή ασκούνται σε ένα συγκεκριμένο σημείο της διατομής του κελύφους και παράγουν μια μέγιστη τάση στο σημείο C η οποία είναι 1.5 φορές μικρότερη από την αντοχή σε θλίψη του υλικού σύμφωνα με την σχέση. Ομοίως και για ένα σημείο που βρίσκεται στο κάτω όριο (αστοχία σε εφελκυσμό). Για τα αριστερά και δεξιά όρια του σχήματος διαμαντιού χρησιμοποιείται η σχέση ,όπου σ_c και σ_t οι τιμές τάσεων στα όρια.

Για τα σημεία τους διαγράμματος δυναμικότητας, λαμβάνονται οι τιμές της τέμνουσας και αξονικής δύναμης από τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης εδάφους-υποστήριξης για συγκεκριμένη τιμή της γωνίας θ . Σημειώνεται ότι το σημείο p_A αντιστοιχεί στον πυθμένα της διατομής και το σημείο p_B στην στέψη της διατομής της σήραγγας. Τα σημεία του σχήματος περικλείονται στην καμπύλη FS=1.5, δηλαδή η υποστήριξη αντιστοιχεί σε αποδεκτό σχεδιασμό από άποψη αστοχίας σε διάτμηση.

Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα δυναμικότητας αξονικών δυνάμεων -καμπτικών ροπών και αξονικών δυνάμεων-τεμνουσών δυνάμεων σε τρεις περιπτώσεις. Η πρώτη στήλη διαγραμμάτων παρουσιάζει στοιχεία για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην περίπτωση της σύνθετης υποστήριξης, η δεύτερη στήλη παρουσιάζει στοιχεία για τα μεταλλικά πλαίσια στην περίπτωση σύνθετης επίσης υποστήριξης και η τρίτη παρουσιάζει στοιχεία για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα όταν είναι το μόνο που συμμετέχει στην επένδυση του κελύφους. Προφανώς η περίπτωση του συνδυασμού των δύο μέτρων έχει καλύτερα αποτελέσματα, αφού η υποστήριξη δεν αστοχεί όπως στην τελευταία περίπτωση.



Σχήμα 2-23: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων-καμπτικών ροπών και αξονικών δυνάμεων-τεμνουσών δυνάμεων στην περίπτωση της σύνθετης υποστήριξης για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, στην περίπτωση της σύνθετης υποστήριξης για μεταλλικά πλαίσια και στην περίπτωση που συμμετέχει μόνο το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην επένδυση του κελύφους.

2.2.8.3. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της υποστήριξης των κυκλικών ή ημικυκλικών διατομών που προκύπτουν με αριθμητικά μοντέλα δείχνουν ότι προσεγγίζουν καλύτερα τα αποτελέσματα της διατομής με μεγαλύτερο πάχος. Γι'αυτό είναι καλύτερο να χρησιμοποιείται διατομή με μεγαλύτερο πάχος για να διανεμηθούν οι αξονικές δυνάμεις και οι καμπτικές ροπές στην διατομή. Παρατηρείται επίσης ότι στο παράδειγμα του σχήματος, και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τα μεταλλικά πλαίσια παραμένουν υπό ελαστικό καθεστώς κατά την διάρκεια της φόρτισης. Περαιτέρω εργασία θα απαιτηθεί στις περιπτώσεις όπου ένα από τα δύο υλικά αστοχήσει πλαστικά κατά την διάρκεια της φόρτισης.

2.2.9. Μπεκρή Ε., 2012

Η Μπεκρή Ε. (2012) διερεύνησε τη μελέτη της αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων των δίδυμων σηράγγων κατά τη διάνοιξη, δίνοντας έμφαση στον προσδιορισμό του κατάλληλου πλάτους πυλώνα το οποίο εξασφαλίζει την ασφάλεια και τη λειτουργικότητα της κατασκευής. Η αριθμητική προσέγγιση του προβλήματος, περιλαμβάνει την πραγματοποίηση αριθμητικών αναλύσεων με τριδιάστατα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων. Η προσομοίωση του προβλήματος πραγματοποιείται με τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS και ANSYS. Το δεύτερο χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό της γεωμετρίας των μοντέλων προσομοίωσης καθώς και για τη διακριτοποίηση του καννάβου σε πεπερασμένα στοιχεία. Στη συνέχεια, οι κόμβοι και τα στοιχεία που προέκυψαν από τη δημιουργία του μοντέλου στο ANSYS εισήχθησαν μέσω ενός φακέλου δεδομένων στο λογισμικό ABAQUS.

Η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων ποσοτικοποιείται σε όρους πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης και σε όρους μετακινήσεων στην περίμετρο της εκσκαφής. Στο πλαίσιο των

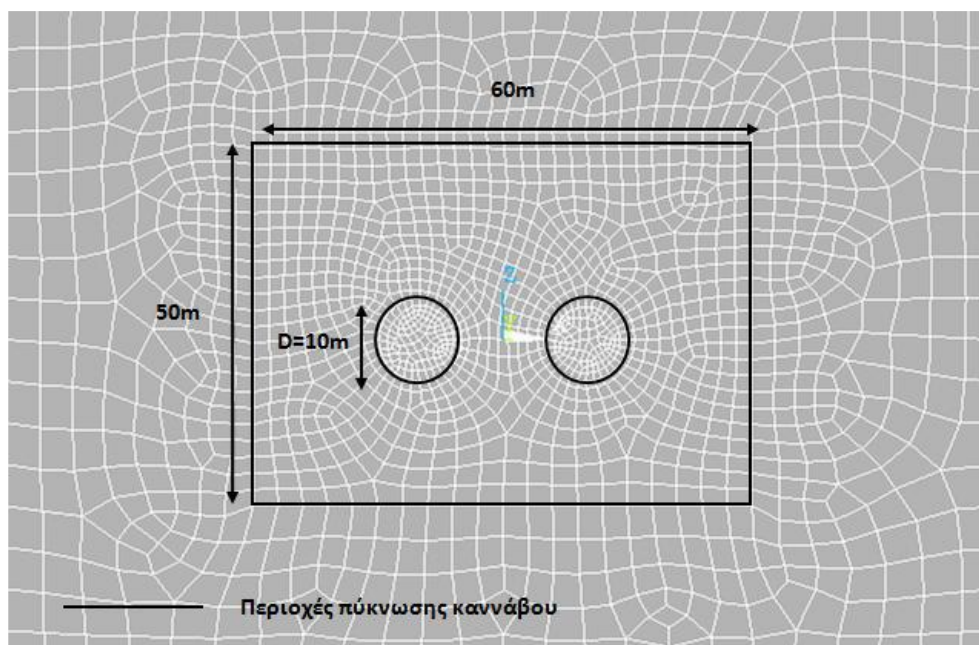
παραμετρικών αναλύσεων μελετάται ο ρόλος των γεωτεχνικών συνθηκών, της εγκάρσιας απόστασης των δυο κλάδων, καθώς και του μέτρου ελαστικότητας.

2.2.9.1. Προσομοίωση του προβλήματος

Όσον αφορά την γεωμετρική απεικόνιση, επιλέχθηκαν για όλα τα προσομοιώματα σήραγγες κυκλικής διατομής και διαμέτρου $D=10\text{m}$, ενώ η διάνοιξη πραγματοποιείται με ολομέτωπη εκσκαφή σε ομοιογενή σχηματισμό. Η άμεση υποστήριξη αποτελείται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η βασική παράμετρος διαφοροποίησης των προσομοιωμάτων είναι η απόσταση W μεταξύ των δυο κλάδων, η οποία μετράται από παρειά σε παρειά. Η απόσταση αυτή λαμβάνει τιμές $W=0.5D=5\text{m}$, $W=D=10\text{m}$ και $W=2D=20\text{m}$, ενώ το ύψος των υπερκειμένων γαιών είναι $H=40\text{m}$. Το βήμα εκσκαφής λαμβάνεται ίσο με $\beta=1\text{m}$ και η διάνοιξη πραγματοποιείται και για τους δύο κλάδους με φορά από $\gamma=0\text{m}$ έως $\gamma=50\text{m}$.

Η απόσταση του κάτω ορίου της εκσκαφής από το επίπεδο που ορίζει η ευθεία που ενώνει τα κέντρα των δυο κυκλικών σηράγγων (άξονας $z-z$) θεωρήθηκε ίση με $4D=40\text{m}$. Το αριστερό πλευρικό όριο (άξονας $x-x$) σχεδιάστηκε σε απόσταση $5D=50\text{m}$ από το κέντρο της κυκλικής διατομής του αριστερού κλάδου. Το μήκος κατά τη διεύθυνση εκσκαφής (άξονας $y-y$) λήφθηκε ίσο με $90\text{m}(=9D)$, ενώ η εκσκαφή πραγματοποιήθηκε για τα πρώτα $50\text{m}(=5D)$.

Στη συνέχεια, διαμορφώθηκε η γεωμετρία του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων. Η διαμόρφωσή του πραγματοποιήθηκε με βασικό γνώμονα την πύκνωσή του στα σημεία λήψης των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε πύκνωση του καννάβου στις περιοχές γύρω από τους δύο κλάδους καθώς και στο μέτωπο της εκσκαφής. Με φορά από το κέντρο προς τα όρια του καννάβου, τα στοιχεία ήταν πιο αραιά.



Σχήμα 2-24: Εγκάρσια όψη του αριθμητικού προσομοιώματος, για $W=D=10\text{m}$, όπου διακρίνονται οι περιοχές διαφορετικής πυκνότητας των πεπερασμένων στοιχείων (Λογισμικό ANSYS) (Μπεκρή Ε., 2012)

Μεταξύ των πεπερασμένων στοιχείων κελύφους των δυο κλάδων και των γειτονικών πεπερασμένων στοιχείων του περιβάλλοντος γεωυλικού διαμορφώθηκε διεπιφάνεια, έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης των ορθών και διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτήν. Οι ορθές αυτές τάσεις αποτελούν το φορτίο που καταπονεί την υποστήριξη. Οι δυο εκατέρωθεν πλευρές της διεπιφάνειας θεωρήθηκαν δεσμευμένες μεταξύ τους, χωρίς τη δυνατότητα ολίσθησης ή αποκόλλησης.

Αναφορικά με τις συνοριακές συνθήκες, επιλέχθηκε η παρεμπόδιση των οριζόντιων μετακινήσεων στα πλευρικά όρια του προσομοιώματος και η παρεμπόδιση των οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων στο κάτω όριο. Τα άνω όριο παρέμεινε ελεύθερο στις μετακινήσεις. Για το λόγο αυτό στο δεξί, στο αριστερό, στο εμπρός και στο πίσω όριο του μοντέλου τοποθετήθηκαν κυλίσσεις, ώστε να επιτρέπονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις χωρίς την ανάπτυξη διατμητικών τάσεων. Στο κάτω όριο του προσομοιώματος χρησιμοποιήθηκαν χωρικές αρθρώσεις, οι οποίες δεσμεύουν τις μετακινήσεις προς οποιαδήποτε κατεύθυνση

2.2.9.2. Παράμετροι και παραδοχές αριθμητικών αναλύσεων

Παράμετροι

Εκτός από το πλάτος πυλώνα W δηλαδή την οριζόντια απόσταση μεταξύ των δυο κλάδων μιας δίδυμης σήραγγας, χρησιμοποιήθηκαν και γεωτεχνικές παράμετροι και παράμετροι της άμεσης υποστήριξης.

- Γεωτεχνικές παράμετροι

Ο δείκτης ταξινόμησης της βραχόμαζας GSI κυμαίνεται από 10 έως 40, για την αντοχή του άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη επιλέγεται ένα εύρος τιμών, από 8 MPa έως 20MPa και η σταθερά m λαμβάνει την τιμή 6 για όλες τις αναλύσεις. Ο συντελεστής διατάραξης της βραχόμαζας D είναι ίσος με $D=0$ και η τιμή του λόγου Poisson της βραχόμαζας διατηρείται σταθερή και ίση με $\nu=0.3$ σε όλες τις αναλύσεις. Ακόμα οι τιμές της ισοδύναμης συνοχής της βραχόμαζας κυμαίνεται από 0.039 MPa έως 0.170 MPa, ενώ το εύρος της ισοδύναμης γωνίας τριβής από 23° έως 42° . Η διαστολικότητα του περιβάλλοντος γεωυλικού λαμβάνεται σε κάθε ανάλυση ίση με $\phi/6$.

- Παράμετροι άμεσης υποστήριξης

Η άμεση υποστήριξη αποτελείται από κέλυφος εκτοξευμένου σκυροδέματος. Το πάχος του εκτοξευμένου σκυροδέματος λαμβάνεται ίσο με $d_{sh}=0.20m$. Το σκυροδέμα θεωρείται ότι παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά, με μέτρο ελαστικότητας $E=20000$ MPa και λόγο Poisson $\nu=0.2$. Τέλος, το ειδικό βάρος του είναι ίσο με $\gamma_{sh}=0.025$ MN/m³.

Παραδοχές

Αρχικά, λαμβάνονται οι τιμές των πιέσεων που ασκούνται σε όλη την παράπλευρη επιφάνεια του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Στη συνέχεια υπολογίζεται η ελάχιστη, η μέση και η μέγιστη τιμή για κάθε διατομή και κατόπιν η μηκοτομική κατανομή αυτών. Ως χαρακτηριστική λαμβάνεται η τρίτη διατομή στην οποία παρατηρείται συνεχής ποσοστιαία μεταβολή τόσο της μέσης όσο και της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής μικρότερη από 0.5%. Στη θέση αυτή πρακτικά θεωρείται ότι το σύστημα γεωυλικού-υποστήριξης έχει ισορροπήσει λόγω της προχώρησης του μετώπου. Για τη μελέτη της κατανομής των πιέσεων στη χαρακτηριστική διατομή ορίζεται εντός του επιπέδου η γωνία Θ , η οποία έχει θετική φορά την ωρολογιακή και το μηδέν αντιστοιχεί στην κλείδα. Στη συνέχεια λαμβάνονται οι μετακινήσεις που ασκούνται σε όλη την παράπλευρη επιφάνεια του εκτοξευμένου σκυροδέματος. Στη περίπτωση αυτή λαμβάνονται οι τρεις συνιστώσες u_1 , u_2 , u_3 οι οποίες είναι η οριζόντια κάθετη στον άξονα συνιστώσα, η οριζόντια παράλληλα στον άξονα συνιστώσα και η κατακόρυφη συνιστώσα αντίστοιχα. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η σύγκλιση της διατομής, λαμβάνεται από τις παραπάνω συνιστώσες η συνισταμένη των u_1 και u_3 .

2.2.9.3. Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

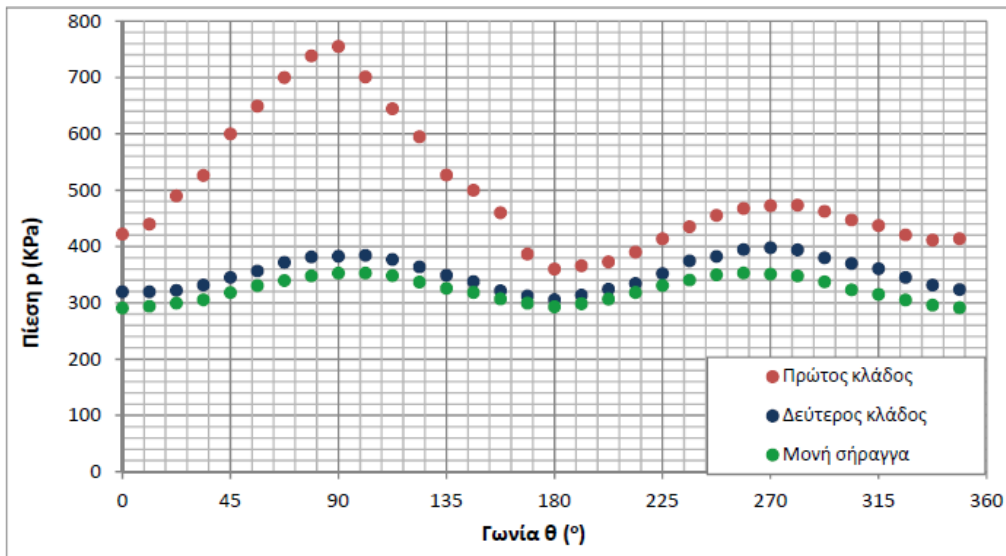
Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας αναφέρονται στις πιέσεις που αναπτύσσονται επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, καθώς και οι μετακινήσεις των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τις εκσκαφές, κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της δίδυμης σήραγγας. Πραγματοποιήθηκαν πολλές αναλύσεις αλλά προτιμήθηκε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=5m$, της οποίας οι γεωτεχνικές συνθήκες ήταν δυσμενείς. Οι υπόλοιπες αναλύσεις έδωσαν αντίστοιχα ή ευμενέστερα αποτελέσματα. Οι χαρακτηριστικές τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων ακολουθούν παρακάτω:

Γεωλογικός δείκτης αντοχής $GSI=10$	Ισοδύναμη συνοχή $c=39\text{ KPa}$
Μέτρο ελαστικότητας $E=85\text{ MPa}$	Ισοδύναμη γωνία τριβής $\phi=23^\circ$

Μελέτη των κατανομών των μεγεθών και σύγκριση αυτών με τις αντίστοιχες της μονής σήραγγας

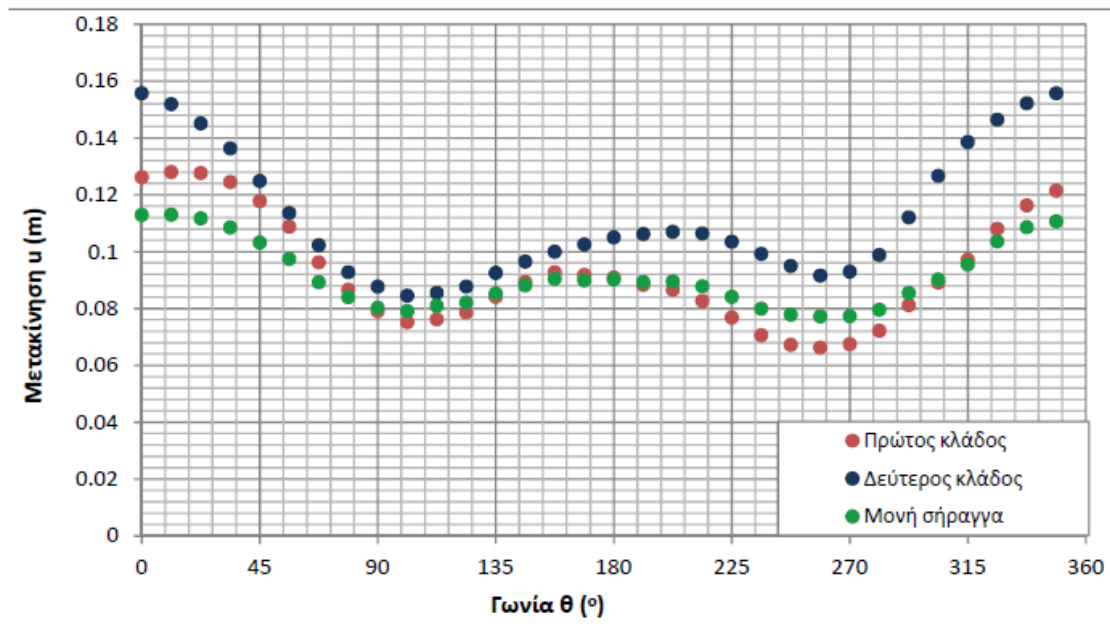
Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζονται οι κατανομές των πιέσεων περί τη χαρακτηριστική διατομή του κάθε κλάδου. Στην περίπτωση διάνοιξης μονής σήραγγας παρατηρείται ότι η κατανομή της φόρτισης είναι απολύτως συμμετρική. Αντίθετα, στην περίπτωση διάνοιξης δίδυμης σήραγγας διαπιστώνεται ασυμμετρία στη φόρτιση των δυο κλάδων. Συγκεκριμένα, στον αριστερό κλάδο, ο οποίος εκσκάπτεται πρώτος, η μέγιστη τιμή παρατηρείται στην παρειά των 90° ενώ στον δεξιό, που εκσκάπτεται δεύτερος, η μέγιστη τιμή παρατηρείται στην παρειά των 270° . Ουσιαστικά οι «εσωτερικές» παρειές των δυο κλάδων καταπονούνται περισσότερο σε σχέση με τις «εξωτερικές» παρειές. Το φαινόμενο αυτό είναι λογικό, καθώς η βραχόμαζα που παρεμβάλλεται μεταξύ των δυο κλάδων είναι πτωχότερης ποιότητας σε σχέση με την υπόλοιπη περιβάλλουσα βραχόμαζα, αφού αυτή έχει υποστεί διατάραξη εξαιτίας της διάνοιξης και των δυο κλάδων.

Μεγαλύτερη ασυμμετρία εμφανίζει η κατανομή της πίεσης του πρώτου κλάδου εκσκαφής, καθώς, όπως αναφέρθηκε, στο κέλυφος αυτού ασκούνται αυξημένες πιέσεις. (Μπεκρή Ε., 2012)



Σχήμα 2-25: Σύγκριση, περί τη χαρακτηριστική διατομή, των πιέσεων που αναπτύσσονται επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου της δίδυμης σήραγγας (W=0.5D=5m), του δεύτερου κλάδου αυτής, καθώς και της σήραγγας μονού κλάδου. (Μπεκρή Ε., 2012)

Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή των μετακινήσεων. Παρατηρείται ότι η φόρτιση είναι συμμετρική για την περίπτωση της εκσκαφής της μονής σήραγγας, ενώ η συμμετρία της κατανομής διαταράσσεται στην περίπτωση της εκσκαφής της δεύτερης σήραγγας. Είναι εμφανές ότι η μεγαλύτερη επίδραση παρατηρείται στην οροφή της σήραγγας, δηλαδή στις θέσεις όπου η γωνία θ λαμβάνει τιμές από 0° έως 30° και από 300° έως 360°, αφού έχει θεωρηθεί $K=0.7 < 1$. (Μπεκρή Ε. , 2012)

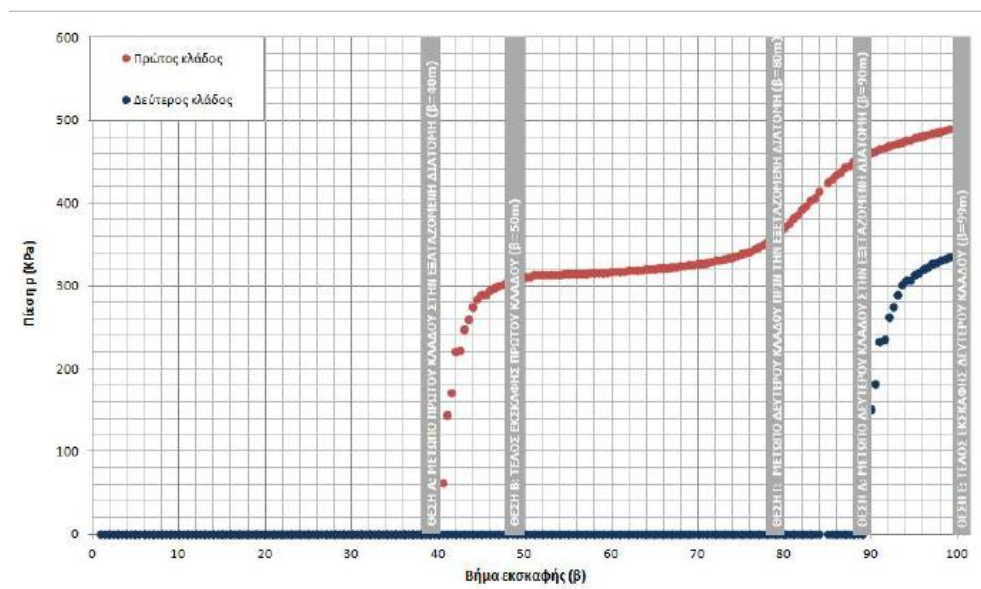


Σχήμα 2-26: Σύγκριση, περί τη χαρακτηριστική διατομή, των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων, για τον πρώτο κλάδο της δίδυμης σήραγγας (W=0.5D=5m), το δεύτερο κλάδο αυτής, καθώς και τη σήραγγα μονού κλάδου. (Μπεκρή Ε., 2012)

Εξέλιξη των πιέσεων και των μετακινήσεων κατά τη διάρκεια της εκσκαφής σε μια διατομή

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η εξέλιξη των μέσων αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης κατά τη διάρκεια της εκσκαφής των δυο κλάδων, για τις διατομές A και B. Μελετώντας την καμπύλη που αντιστοιχεί στον πρώτο κλάδο, παρατηρούμε ότι το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης αρχικά αναλαμβάνει τις αναπτυσσόμενες πιέσεις αμέσως μετά τη τοποθέτηση του (Θέση A). Μέχρι το πέρας της εκσκαφής του πρώτου κλάδου (Θέση B), παρατηρείται αύξηση των αναπτυσσόμενων πιέσεων, καθώς η υποστήριξη περιορίζει την ανάπτυξη των μετακινήσεων των γύρω κόμβων που προκαλεί η προχώρηση του μετώπου. Στα επόμενα βήματα, όπου το μέτωπο της δεύτερης εκσκαφής βρίσκεται μακριά από την εξεταζόμενη διατομή του πρώτου κλάδου, οι τιμές της μέσης πίεσης είναι πρακτικά σταθερή. Καθώς, όμως, η δεύτερη εκσκαφή πλησιάζει σημειώνεται αύξηση της πίεσης, γεγονός που μαρτυρά την επίδραση της δεύτερης εκσκαφής στη πρώτη. Η επίδραση αυτή εκδηλώνεται ήδη από τη στιγμή που το δεύτερο μέτωπο βρίσκεται $20m=2D$ πίσω από τη διατομή A. Αξιοσημείωτη είναι η επίδραση του δεύτερου κλάδου στον πρώτο από τη στιγμή που το δεύτερο μέτωπο βρίσκεται $10m=D$ πριν τη διατομή (Θέση Γ) μέχρι τη στιγμή που περνάει δίπλα από τη διατομή (Θέση Δ). Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι στην περιοχή αυτή η έντονη μεταβολή του μεγέθους προκαλεί διπλή μεταβολή της καμπυλότητας του διαγράμματος. Από τη στιγμή που το μέτωπο προσπερνά τη διατομή A και για τα επόμενα 10βήματα (Τέλος της εκσκαφής - Θέση Δ) ο ρυθμός μεταβολής του μεγέθους μειώνεται και τείνει να λάβει την τελική του τιμή. Η μέση πίεση που αντιστοιχεί στην εξεταζόμενη διατομή του δεύτερου κλάδου ξεκινά να αυξάνεται αμέσως μετά τη διέλευση του μετώπου και την τοποθέτηση του κελύφους της υποστήριξης.

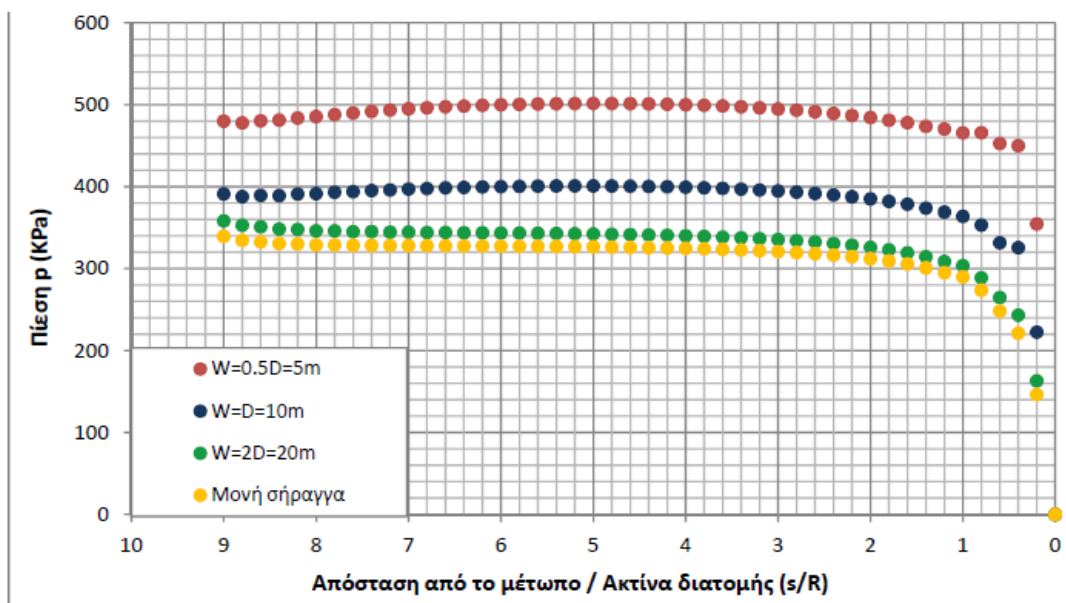
(Μπεκρή Ε., 2012)



Σχήμα 2-27: Εξέλιξη των αναπτυσσόμενων μέσων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, κατά τη συνολική διάρκεια της εκσκαφής, για διατομές των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας που βρίσκονται σε απόσταση 40m από την είσοδο της σήραγγας και για $W=0.5D=5m$. (Μπεκρή Ε., 2012)

Αναλύσεις με διαφορετικό πλάτος πυλώνα και ίδιες γεωτεχνικές συνθήκες

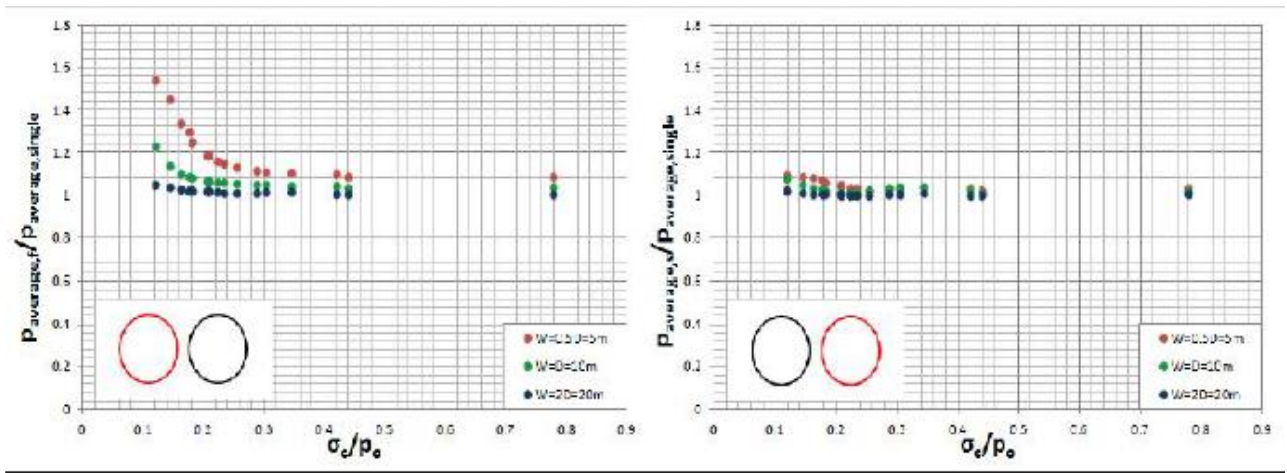
Παρατηρούμε ότι για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=5\text{m}$ οι τιμές των αναπτυσσόμενων πιέσεων είναι αυξημένες σε σχέση με τις υπόλοιπες δυο περιπτώσεις. Το γεγονός αυτό είναι λογικό, καθώς το πλάτος του πυλώνα που διατίθεται είναι αρκετά μικρό και η βραχόμαζα που παρεμβάλλεται μεταξύ των κλάδων είναι αρκετά καταπονημένη. Συνεπώς, η διάνοιξη του δεύτερου κλάδου επιδρά έντονα στην ανάπτυξη των πιέσεων του πρώτου. Στη συνέχεια διαπιστώνεται ότι αύξηση της εγκάρσιας απόστασης των δυο κλάδων οδηγεί σε μείωση των τιμών των αναπτυσσόμενων πιέσεων. Επομένως, αύξηση της τιμής του πλάτους του πυλώνα συνεπάγεται σαφή μείωση της αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων. Για πλάτος πυλώνα ίσο με $2D$ η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων τείνει να ελαχιστοποιηθεί, καθώς οι τιμές των πιέσεων τείνουν να προσεγγίσουν εκείνες της μονής σήραγγας, παρόλα αυτά όμως δε μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. (Μπεκρή Ε., 2012)



Σχήμα 2-28:Κατανομή, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, για $W=0.5D=5\text{m}$ και για δυο διαφορετικές ποιότητες βραχόμαζας ($GSI=10$ και $GSI=40$). (Μπεκρή Ε.,2012)

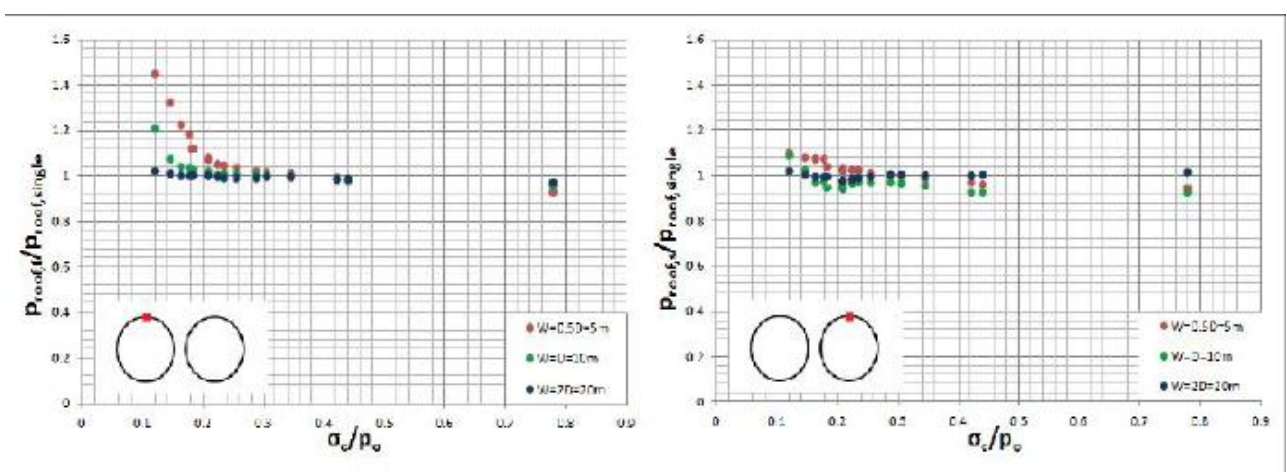
Είναι προφανές ότι η μείωση του πλάτους της βραχόμαζας που παρεμβάλλεται μεταξύ των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας προκαλεί αύξηση των τιμών των πιέσεων που αναπτύσσονται περί των κελυφών της άμεσης υποστήριξης. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή του λόγου των πιέσεων για $W=2D$ είναι περίπου ίση με 1.05 (η τιμή αυτή δηλώνει πολύ μικρή αλληλεπίδραση), ενώ η αντίστοιχη τιμή για την περίπτωση όπου ισχύει $W=0.5D$ είναι περίπου ίση με 1.6 (τιμή που δηλώνει σημαντική αλληλεπίδραση των δυο κλάδων). Παρατηρείται, επιπρόσθετα, ότι οι λόγοι των μέσων πιέσεων για τα τρία διαφορετικά πλάτη διαφοροποιούνται λιγότερο έντονα και τείνουν να λάβουν την τιμή της μονάδας, καθώς η ποιότητα της περιβάλλουσας βραχόμαζας βελτιώνεται. Το φαινόμενο αυτό είναι φυσιολογικό, καθώς βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών συνεπάγεται μείωση της διατάραξης της βραχόμαζας κατά τη διάνοιξη. Συνοψίζοντας, διαπιστώνεται ότι η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων γίνεται λιγότερο έντονη καθώς αυξάνεται η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των δυο κλάδων και καθώς βελτιώνεται η ποιότητα της βραχόμαζας στην οποία πραγματοποιείται η διάνοιξη. Σε όλα τα διαγράμματα αυτής της κατηγορίας, παρατηρείται ότι το εύρος του λόγου των πιέσεων του πρώτου κλάδου είναι πιο διευρυμένο σε

σχέση με το αντίστοιχο του δεύτερου, γεγονός που επιβεβαιώνει για ακόμα μια φορά την εντονότερη καταπόνηση του κελύφους του πρώτου κλάδου, από άποψη πιέσεων.



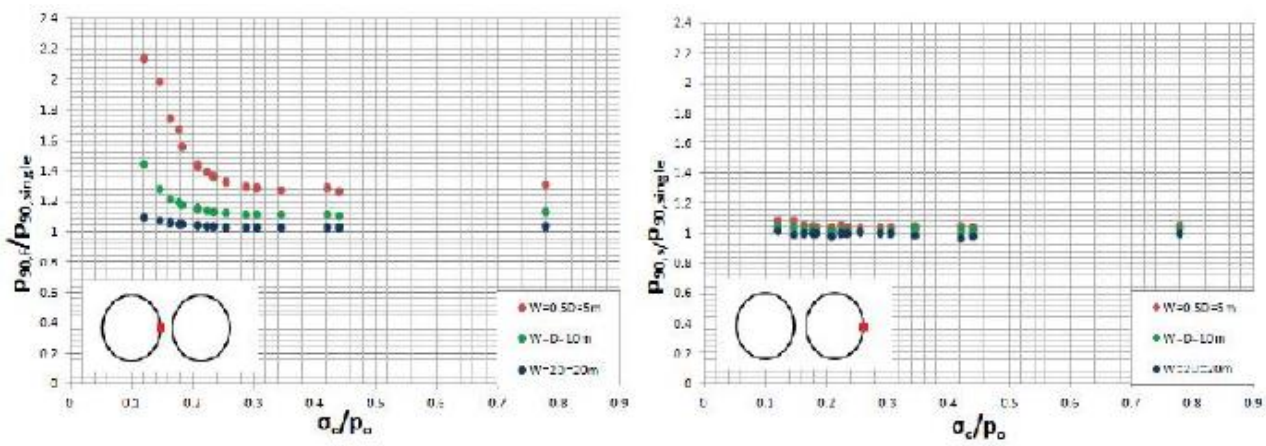
Σχήμα 2-29:Κατανομή ανηγμένης μέσης πίεσης επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $P_{average, single}$, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c / ρ_0 , για $W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$. (Μπεκρή Ε.,2012)

Ανάλογες με τις κατανομές των μέσων πιέσεων παρουσιάζονται και οι κατανομές των πιέσεων που αναπτύσσονται στην οροφή των διατομών.

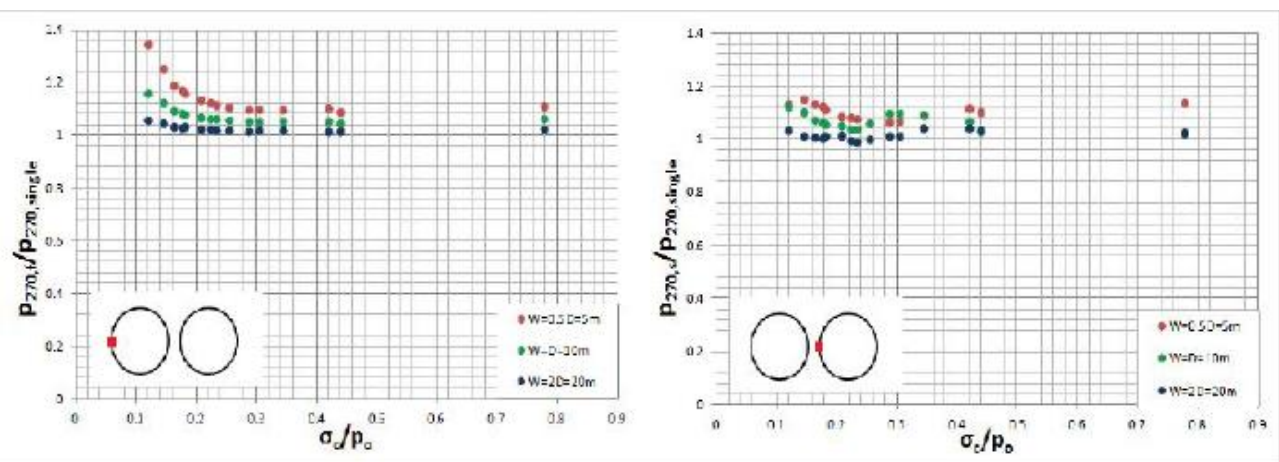


Σχήμα 2-30:Κατανομή ανηγμένης πίεσης της οροφής της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $P_{roof, single}$, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c / ρ_0 , για $W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$. (Μπεκρή Ε.,2012)

Εξετάζοντας τώρα τις κατανομές των πιέσεων στην δεξιά παρειά των κλάδων, είναι αξιοσημείωτο να αναφερθεί ότι ο λόγος των πιέσεων στη παρειά των 90° του πρώτου κλάδου λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με τους αντίστοιχους λόγους της μέσης πίεσης, της οροφής και της παρειάς των 270°. Το φαινόμενο αυτό είναι εύλογο, αφού η παρειά αυτή είναι η εσωτερική του πρώτου κλάδου, συνεπώς καταπονείται περισσότερο κατά τη διάνοιξη του δεύτερου. Το ανάλογο φαινόμενο σε μικρότερη όμως κλίμακα παρατηρείται για την παρειά των 270° της διατομής του δεύτερου κλάδου.(Μπεκρή Ε.,2012)

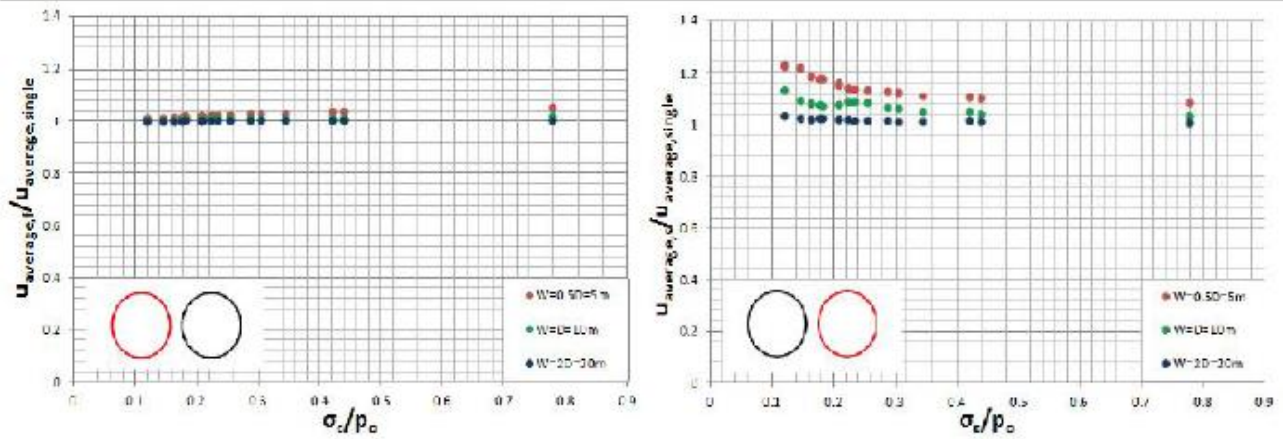


Σχήμα 2-31:Κατανομή ανηγμένης πίεσης της δεξιάς παρειάς ($\theta=90\circ$) της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $p_{90,(f/s)}p_{90, \text{single}}$, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_0 , για $W=0.5D=5\text{m}$, $W=D=10\text{m}$, $W=2D=20\text{m}$. (Μπεκρή Ε.,2012)

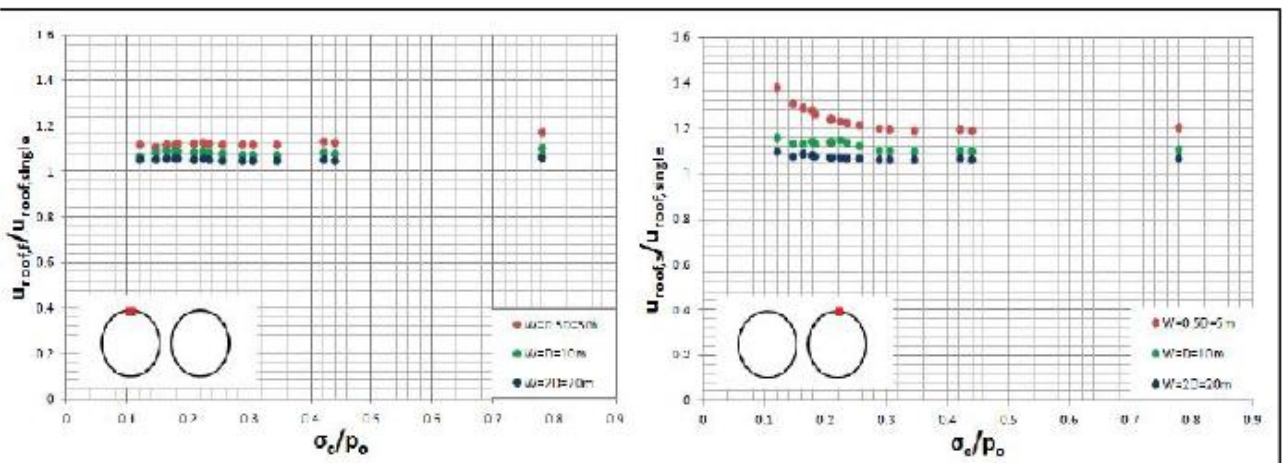


Σχήμα 2-32:Κατανομή ανηγμένης πίεσης της αριστερής παρειάς της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $p_{270,(f/s)}p_{270, \text{single}}$, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_0 , για $W=0.5D=5\text{m}$, $W=D=10\text{m}$, $W=2D=20\text{m}$. (Μπεκρή Ε.,2012)

Σχετικά με την επίδραση της τιμής του πλάτους του πυλώνα στην ανάπτυξη των μετακινήσεων δεν μπορούμε να εξάγουμε σαφή συμπεράσματα, καθώς όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνουμε από το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων τα αποτελέσματα των μετακινήσεων για τον ένα κλάδο δε μας βοηθά να διαχωρίσουμε τις μετακινήσεις που δημιουργούνται εξαιτίας της εκσκαφής του ίδιου και του γειτονικού του. Παρόλα αυτά επικρατεί η τάση της μείωσης των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων με αύξηση της εγκάρσιας απόστασης των δυο κλάδων. Στη συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικά τα διαγράμματα της ανοιγμένης μέσης μετατόπισης και της ανηγμένης μετατόπισης στην οροφή των χαρακτηριστικών διατομών σε συνάρτηση με το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών για τα τρία πλάτη πυλώνα. Σημειώνεται ότι το πλάτος του πυλώνα επιδρά μόνο στην εξέλιξη των μετακινήσεων του δεύτερου κλάδου.



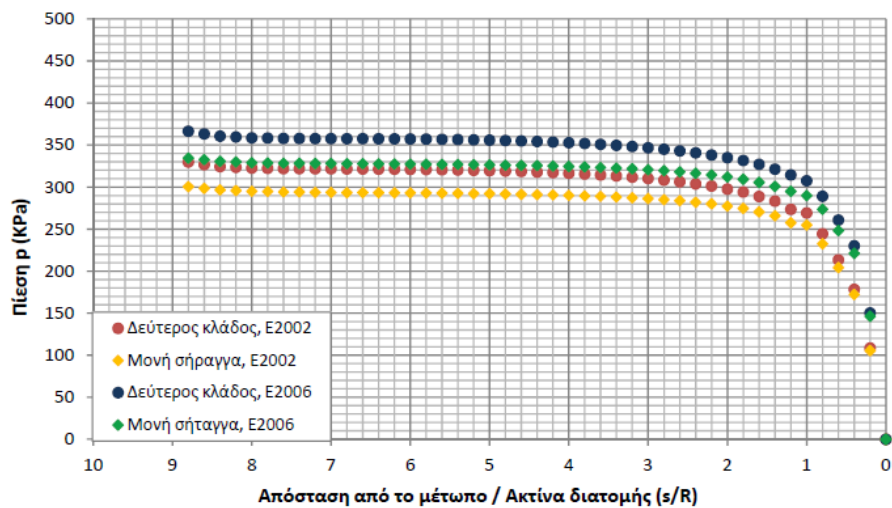
Σχήμα 2-33: Κατανομή ανηγμένης μέσης μετακίνησης των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τη χαρακτηριστική διατομή του πρώτου κλάδου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη μετακίνηση του μονού κλάδου $u_{average}(f,s)/u_{average,single}$, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_0 , για $W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$. (Μπεκρή Ε.,2012)



Σχήμα 2-34: Κατανομή ανηγμένης μετακίνησης των εδαφικών στοιχείων που βρίσκονται στην οροφή της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου κλάδου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη μετακίνηση του μονού κλάδου $u_{roof}(f,s)/u_{roof,single}$, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_0 , για $W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$. (Μπεκρή Ε.,2012)

Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας

Καθώς βελτιώνονται οι γεωτεχνικές συνθήκες (μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας), μικραίνει ο βαθμός αλληλεπίδρασης μέχρι οι δυο κλάδοι να αντιμετωπίζονται ως δυο ανεξάρτητες κατασκευές. Επιπρόσθετα, διαπιστώνεται ότι η καμπύλη του μέτρου ελαστικότητας κατά Hoek (2002) βρίσκεται υψηλότερα από την αντίστοιχη κατά Hoek and Diederichs (2006), παρόλο που ο δεύτερος τύπος παράγει μικρότερες τιμές. Το γεγονός αυτό μαρτυρά την περιπλοκότητα του φαινομένου και χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.



Σχήμα 2-35: Σύγκριση των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του δεύτερου κλάδου διάνοιξης, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, για $W=5m$, ίδιες γεωτεχνικές συνθήκες και διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας. (Μπεκρή Ε., 2012)

2.2.9.4. Συμπεράσματα

Η έρευνα της Μπεκρή Ε. (2012) καταλήγει στα εξής συμπεράσματα:

- Το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου της εκσκαφής καταπονείται εντονότερα σε σχέση με το κέλυφος του δεύτερου κλάδου.
- Οι μετακινήσεις των εδαφικών στοιχείων του πρώτου κλάδου διάνοιξης είναι αμελητέες, σε αντίθεση με τις αντίστοιχες του δεύτερου κλάδου.
- Η βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών συντελεί στην μείωση της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων.
- Για την εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας, οι μετακινήσεις των εδαφικών στοιχείων αυξάνονται καθώς αυξάνεται η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων (μείωση γεωτεχνικών συνθηκών).
- Αναφορικά με το μέγεθος των πιέσεων, παρατηρούμε ότι για μικρό πλάτος πυλώνα η αλληλεπίδραση των δίδυμων σηράγγων είναι έντονη αλλά όσο αυξάνεται το πλάτος του πυλώνα μειώνεται η αλληλεπίδραση. Για αύξηση της εγκάρσιας απόστασης ίση με δύο διαμέτρους, οι δυο σήραγγες πρακτικά λαμβάνονται ως δύο ανεξάρτητες κατασκευές.
- Εξαιτίας όμως της περιπλοκότητας του φαινομένου, καθώς υπεισέρχονται πολλά μεταβαλλόμενα μεγέθη, δεν είναι δυνατή η εξαγωγή σαφών συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση του μέτρου ελαστικότητας και χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.

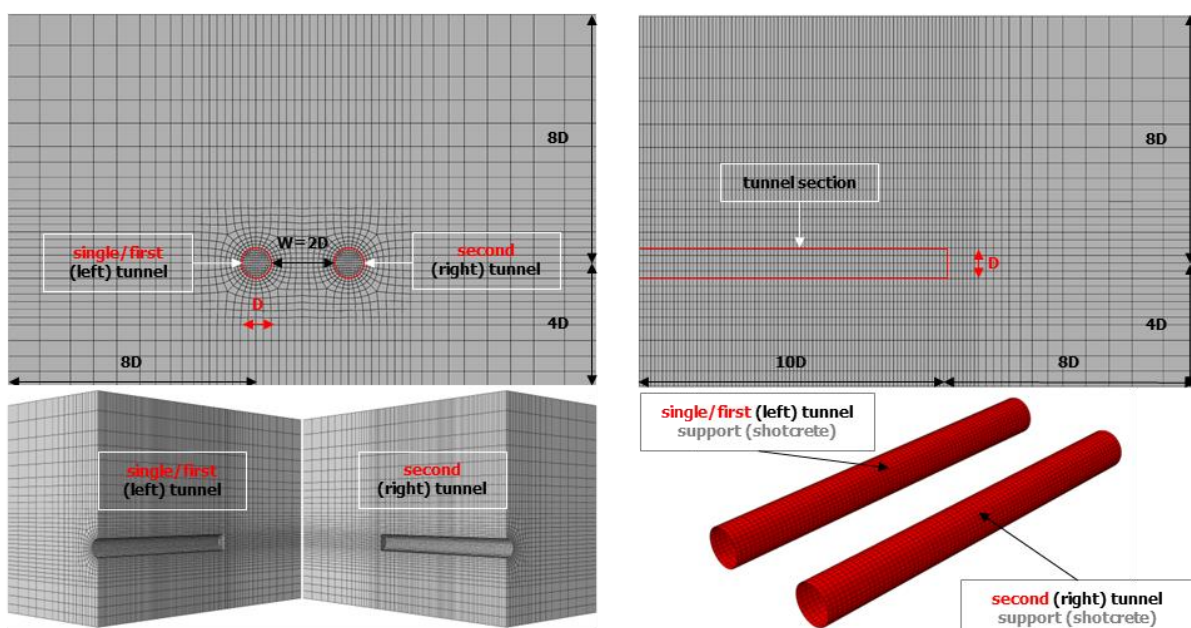
2.2.10. Chortis F., Kavvadas M., 2015

Η έρευνα των Chortis F. & Kavvadas M. (2015) μελετά την αλληλεπίδραση δίδυμων σηράγγων κυκλικής διατομής μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Οι αναλύσεις εστιάζουν στα φορτία της επένδυσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και στα εντατικά μεγέθη, δηλαδή αξονικές δυνάμεις και καμπτικές ροπές, εξετάζοντας ένα μεγάλο εύρος από τιμές του πλάτους πυλώνα, γεωτεχνικές συνθήκες και τιμές του πάχους υπερκείμενων γαιών. Η πιο κρίσιμη παράμετρος από τις παραπάνω, δηλαδή αυτή που προκαλεί την μεγαλύτερη επιρροή στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι το πλάτος του πυλώνα.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε κανονικοποιημένα διαγράμματα, τα οποία καταδεικνύουν την επιρροή των παραμέτρων αλληλεπίδρασης που εξετάστηκαν. Η αλληλεπίδραση επηρεάζεται σε ένα σημαντικό βαθμό από τις ακόλουθες παραμέτρους: το πλάτος του πυλώνα, το συντελεστή των οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και τις γεωτεχνικές συνθήκες.

2.2.10.1. Αριθμητικές αναλύσεις

Το πρόβλημα διερευνάται μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων, με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Η διατομή των σηράγγων είναι κυκλική με διάμετρο $D=8\text{m}$ και το μήκος εκσκαφής είναι $L=80\text{m}=10D$ για κάθε σήραγγα αντίστοιχα. Δημιουργούνται πέντε αριθμητικά μοντέλα με σκοπό να εξεταστεί το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των σηράγγων, λαμβάνοντας τις τιμές του πλάτους του πυλώνα $W=4\text{m}=0.5D$, $W=8\text{m}=1D$, $W=16\text{m}=2D$, $W=24\text{m}=3D$ και $W=32\text{m}=4D$, ενώ οι τιμές του ύψους υπερκείμενων είναι $H=80\text{m}=10D$ και $H=160\text{m}=20D$ μετρούμενα από το επίπεδο του άξονα της σήραγγας. Το αριθμητικό μοντέλο για πλάτος πυλώνα $W = 2D$ παρουσιάζεται παρακάτω



Σχήμα 2-36: Αριθμητικό μοντέλο για πλάτος πυλώνα $W = 2D$ (Chortis F. & Kavvadas M., 2015)

Οι βασικές διαστάσεις των αριθμητικών μοντέλων, εκτός από το πλάτος του πυλώνα, έχουν σχεδιαστεί σταθερές. Πιο συγκεκριμένα, το μήκος εκσκαφής κάθε σήραγγας, η απόσταση του διαμήκους ορίου μπροστά από κάθε σήραγγα, η απόσταση των άνω/κάτω καθέτων ορίων και η απόσταση των εγκάρσιων ορίων από τον άξονα κάθε σήραγγας, έχουν σχεδιαστεί σταθερές σε κάθε αριθμητικό μοντέλο. Η προσομοίωση του ύψους υπερκειμένων επιτυγχάνεται, εκτός από το ύψος του άνω ορίου, επιβάλλοντας ακόμη επιπρόσθετο, ομοιόμορφα καταμεμημένο, κατακόρυφο φορτίο στην επιφάνεια του αριθμητικού μοντέλου.

Η διαδικασία της εκσκαφής που υιοθετείται στο πλαίσιο της αριθμητικής ανάλυσης και είναι απολύτως κοινή για κάθε σήραγγα, δηλαδή, η εκσκαφή κάθε σήραγγας προσομοιώνεται ως ολομέτωπη προχώρηση, με βήμα εκσκαφής ίσο με 1m. Η υποστήριξη (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) εφαρμόζεται σε απόσταση από το μέτωπο της σήραγγας ίση με 1m. Αυτή είναι μια τυπική διαδικασία εκσκαφής σύμφωνα με τις αρχές της Νέας Αυστριακής Μεθόδου (NATM). Η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας πραγματοποιείται ύστερα από την πλήρη εκσκαφή της αριστερής σήραγγας.

Για τις αναλύσεις έχουν υιοθετηθεί οι ακόλουθες υποθέσεις:

- Η βάση σύγκρισης είναι η αριστερή σήραγγα πριν ξεκινήσει η εκσκαφή της δεξιάς και ονομασθεί «μονή σήραγγα».
- Μετά την εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας, η αριστερή ονομάζεται «πρώτη σήραγγα».
- Μετά την εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας, η δεξιά σήραγγα ονομάζεται «δεύτερη σήραγγα».

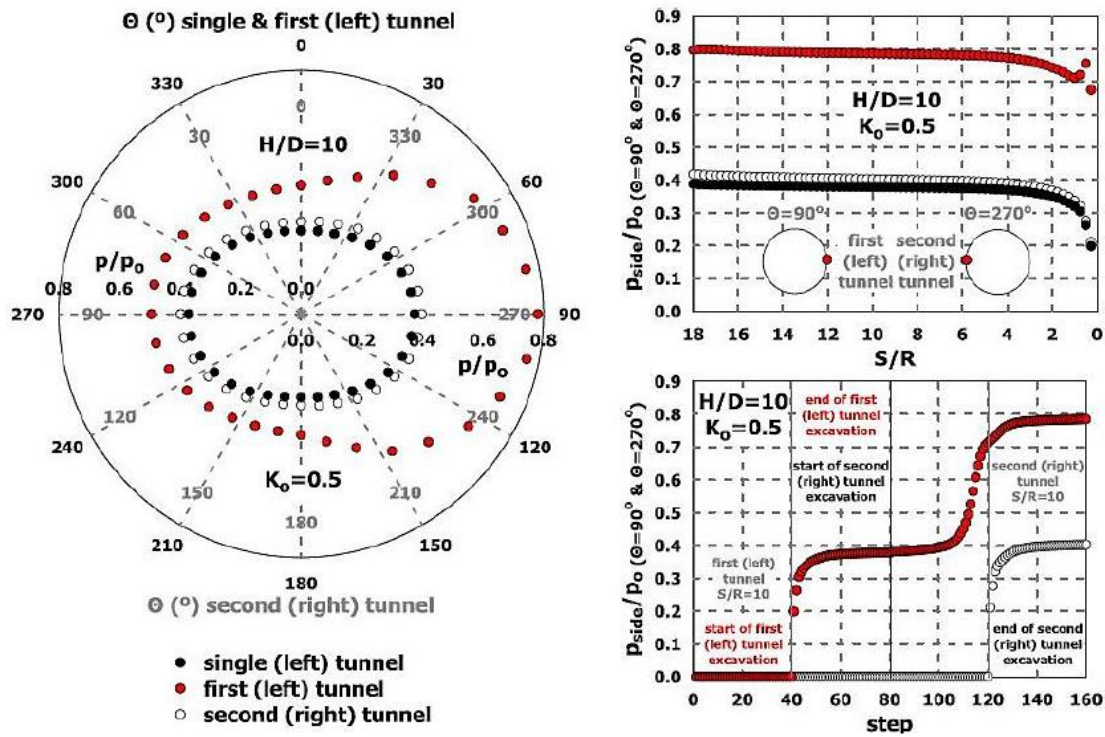
Η βραχώμαζα προσομοιώνεται ως ισότροπο γραμμικώς ελαστικό–απολύτως πλαστικό υλικό το οποίο ακολουθεί το κριτήριο αστοχίας Mohr–Coulomb. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι αντοχής (c , ϕ) της βραχώμαζας έχουν προσδιοριστεί ως ισοδύναμες παράμετροι με παραμέτρους προέλευσης αυτές του άρρηκτου βράχου, μέσω του συνδυασμού του κριτηρίου Mohr–Coulomb και του γενικευμένου κριτηρίου αστοχίας Hoek–Brown. Επιπροσθέτως, η παράμετρος παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας έχει προσδιοριστεί όπως προτείνεται από τους Hoek and Diederichs (2006). Ο προσανατολισμός της γωνίας στην αριστερή και τη δεξιά σήραγγα έχει οριστεί να είναι σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού.



Σχήμα 2-37: Ωρολογιακός προσανατολισμός της γωνίας στην αριστερή και τη δεξιά σήραγγα (Chortis F. & Kavvadas M., 2015).

2.2.10.2. Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

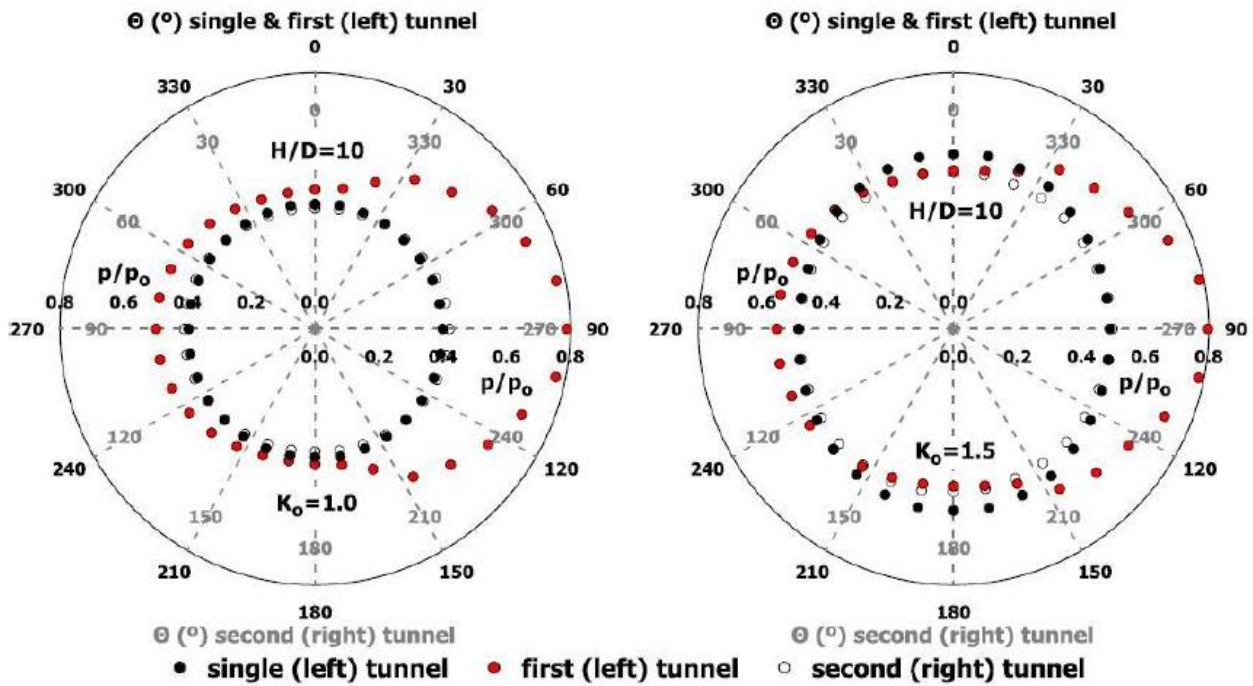
Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που παρουσιάζουν οι Chortis & Kanvadas (2015), αφορούν αρχικά σε μια συγκεκριμένη αριθμητική ανάλυση, η οποία ανταποκρίνεται στη δυσμενέστερη τιμή του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o και στην ελάχιστη τιμή πλάτους του πυλώνα $W/D=0.5$, ο συνδυασμός των οποίων, κατά συνέπεια, οδηγεί στη μεγιστοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των σηράγγων. Συγκεκριμένα, παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή των φορτίων για τη «μονή σήραγγα», την «πρώτη σήραγγα» και τη «δεύτερη σήραγγα» στην τυπική διατομή όπου τα φορτία κατά τη διαμήκη κατεύθυνση έχουν συγκλίνει στην τελική τιμή. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν μια σημαντική αύξηση των φορτίων στην «πρώτη σήραγγα», με την μέγιστη επιρροή να παρατηρείται στην εσωτερική παρειά ($\Theta = 90^\circ$). Σχετικά με τη «δεύτερη σήραγγα» τα φορτία αποκλίνουν από το αρχικό μέγεθος όπως αποτυπώνονται για τη «μονή σήραγγα», σε χαμηλό βαθμό συγκριτικά με την αντίστοιχη αλλαγή που παρατηρείται για την «πρώτη σήραγγα». Αυτή η διαφοροποίηση στο βαθμό επιρροής πηγάζει από το γεγονός ότι η «πρώτη σήραγγα» έχει ήδη εκσκαφθεί και υποστηριχθεί όταν η «δεύτερη σήραγγα» εκσκάπτεται. Ως εκ τούτου, η δυναμική ανακατανομή των τάσεων που προκαλείται λόγω της εκσκαφής της «δεύτερης σήραγγας», δεν αναλαμβάνεται μέσω περαιτέρω σύγκλισης, λόγω της άκαμπτης υποστήριξης της «πρώτης σήραγγας», που κατά συνέπεια, οδηγεί σε σημαντική αύξηση των επιβαλλόμενων φορτίων. Ωστόσο, η «δεύτερη σήραγγα» εκσκάπτεται σε ένα ήδη ανακατανομημένο πεδίο τάσεων με μια προϋπάρχουσα πλαστική ζώνη, στην περίπτωση πτωχών γεωτεχνικών συνθηκών, η οποία οδηγεί σε σχετικά χαμηλή αύξηση των φορτίων. Αυτή η απόκριση στην κατανομή των φορτίων επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα στη διαμήκη διεύθυνση των εσωτερικών παρειών ($\Theta=90^\circ$ και $\Theta=270^\circ$) των σηράγγων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-38 (πάνω δεξιά). Επιπροσθέτως, η επιρροή της εκσκαφής της «δεύτερης σήραγγας» στην «πρώτη σήραγγα» απεικονίζεται στη χρονοϊστορία των φορτίων για τη διατομή με κανονικοποιημένη απόσταση από το μέτωπο και για τις δύο σήραγγες $S/R=10$, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-38 (κάτω δεξιά) (Chortis F. & Kanvadas M., 2015).



Σχήμα 2-38: Κατανομή των φορτίων: (αριστερά) στην τυπική διατομή, (πάνω δεξιά) στη διαμήκη διεύθυνση, στις εσωτερικές παρειές των σήραγγων & χρονιοίστερα των φορτίων στις εσωτερικές παρειές των σήραγγων (κάτω δεξιά), για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_0), για πλάτος πυλώνα $W/D = 0.5$, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ και για λόγους υπερκεμένων γαιών $H/D = 10$ (Chortis F. & Kavnadas M., 2015)

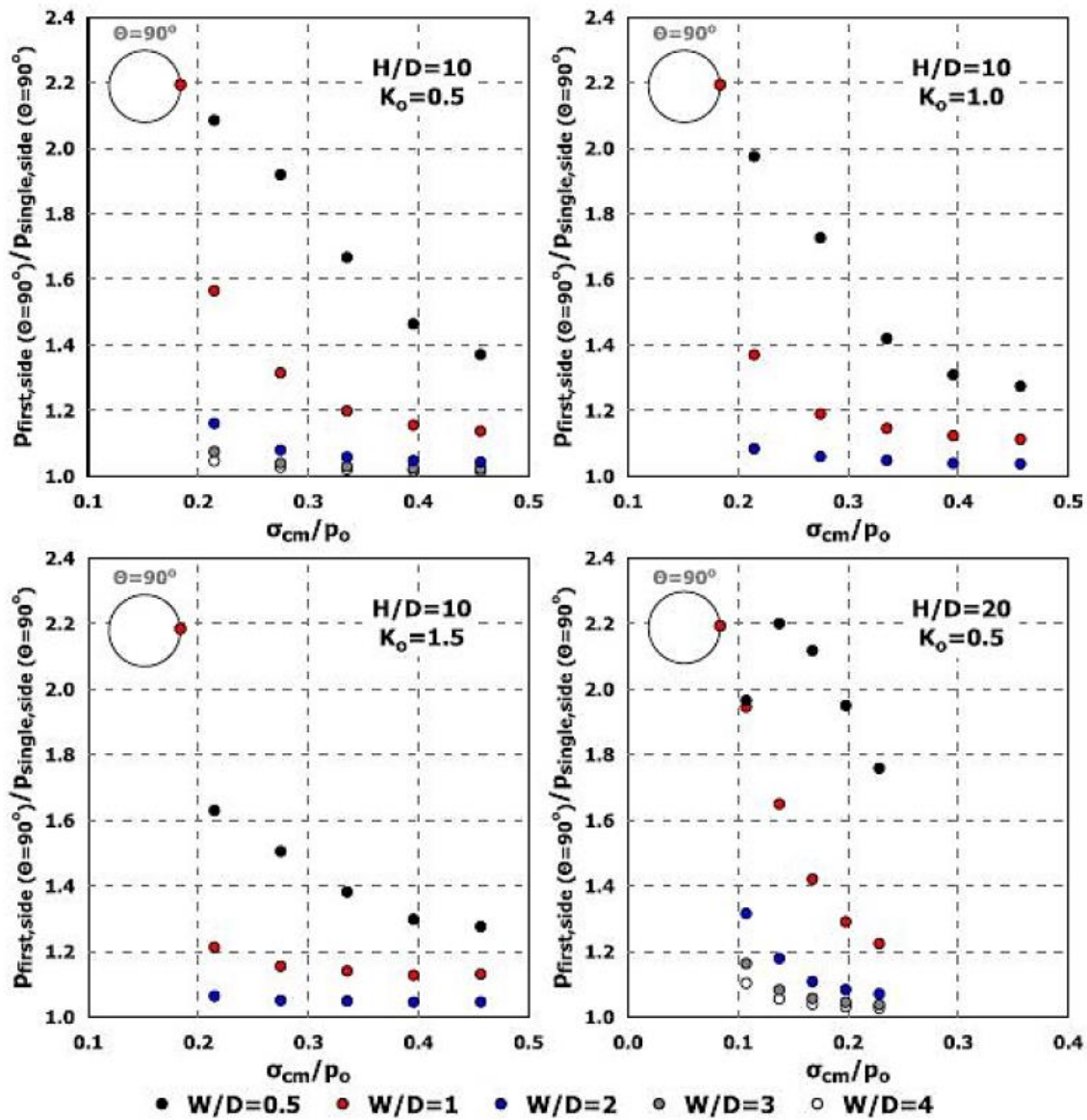
Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης και ειδικά ο βαθμός που επιδρά στα φορτία και στο σχήμα της κατανομής είναι εξαρτώμενο και προσδιορίζεται από το συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0 όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-39. Ο μηχανισμός της ανακατανομής των τάσεων και παραμορφώσεων που αναπτύσσεται είναι διαφορετικός και αυτό απορρέει από το διαφορετικό μέγεθος της κατακόρυφης και οριζόντιας συνιστώσας της τάσης του αρχικού εντατικού πεδίου. Συγκεκριμένα, η αρχική κατανομή των φορτίων της «μονής σήραγγας» είναι διαφοροποιημένη λόγω της τιμής του λόγου γεωστατικών τάσεων K_0 και ειδικότερα, για $K_0=0.5$ οι υψηλότερες τιμές των φορτίων είναι ανεπτυγμένες στις παρειές ($\theta=90^\circ$ και $\theta=270^\circ$), για $K_0=1.5$ οι υψηλότερες τιμές είναι ανεπτυγμένες στην οροφή και το δάπεδο ($\theta=180^\circ$ και $\theta=360^\circ$), ενώ για $K_0=1$ η κατανομή των φορτίων της σήραγγας είναι ομοιόμορφη.

Ως προς το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, για την «πρώτη σήραγγα» η εκσκαφή της «δεύτερης σήραγγας» οδηγεί στην αύξηση των φορτίων στην εσωτερική παρειά ($\theta=90^\circ$), ανεξαρτήτως της τιμής του K_0 . Σχετικά με τις άλλες περιοχές της διατομής της σήραγγας, παρατηρείται ότι, για $K_0=1$, τα φορτία αυξάνουν σε κάθε περιοχή, ενώ για $K_0=1.5$, τα φορτία της σήραγγας μειώνονται στην οροφή και στο δάπεδο ($\theta=180^\circ$ και $\theta=360^\circ$) συγκρίνοντας είτε σε σχέση με τη «μονή» είτε με τη «δεύτερη» σήραγγα. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση όπου το $K_0=1.5$ η εκσκαφή της «δεύτερης σήραγγας» λειτουργεί «ευεργετικά» μειώνοντας τις τιμές των φορτίων στις περιοχές της διατομής της σήραγγας όπου αναπτύσσονται οι αρχικές μέγιστες τιμές των φορτίων για τη «μονή σήραγγα» (Chortis F. & Kavnadas M., 2015).



Σχήμα 2-39: Κατανομή των φορτίων, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=1.0$ (αριστερά) και $K_o=1.5$ (δεξιά) στην τυπική διατομή, για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_0) και για λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D=10$ (Chortis F. & Kanvadas M., 2015)

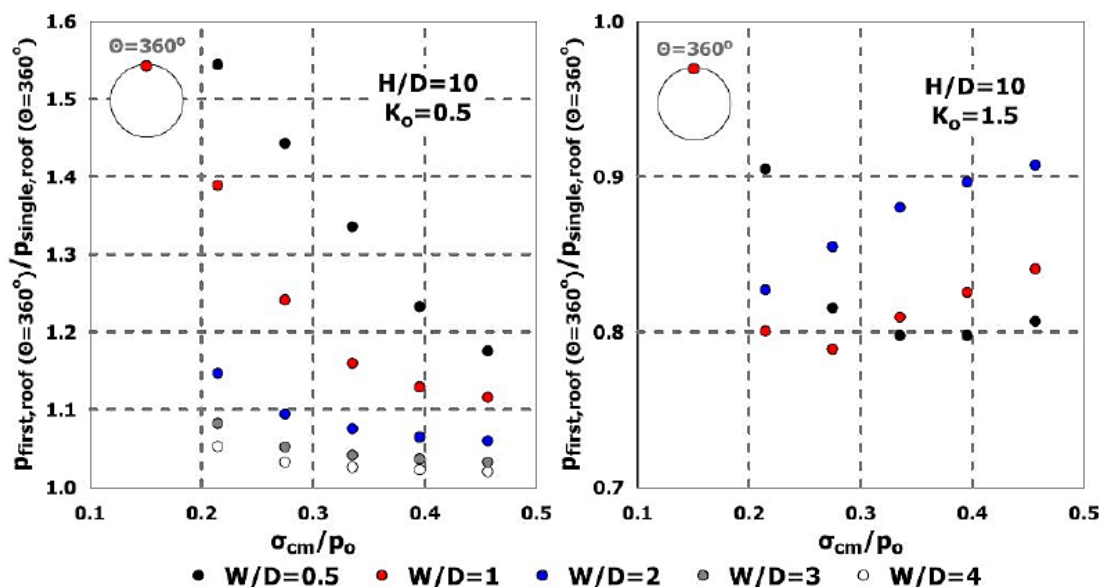
Παρακάτω η ποσοτικοποίηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μεταξύ των σηράγγων πραγματοποιείται μέσω του λόγου των φορτίων (πρώτης/μονής) στην εσωτερική παρειά της «πρώτης σήραγγας» ($\theta = 90^\circ$), όπου η επιρροή σε όρους φορτίων μεγιστοποιείται λόγω της εκσκαφής της «δεύτερης σήραγγας» και αυτή η απόκριση επιβεβαιώνεται ότι είναι η επικρατούσα τάση και ότι αναπτύσσεται στον υψηλότερο βαθμό, ανεξαρτήτως της τιμής του λόγου γεωστατικών τάσεων K_o , όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-40.



Σχήμα 2-40: Λόγος φορτίων (πρώτης/μονής) στην εσωτερική παρειά της "πρώτης σήραγγας" ($\theta=90^\circ$), ως συνάρτηση του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o), για διάφορες τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_o) και λόγου ύψους υπερκεκλιμένων γαιών (H/D) (Chortis F. & Kavvas M., 2015)

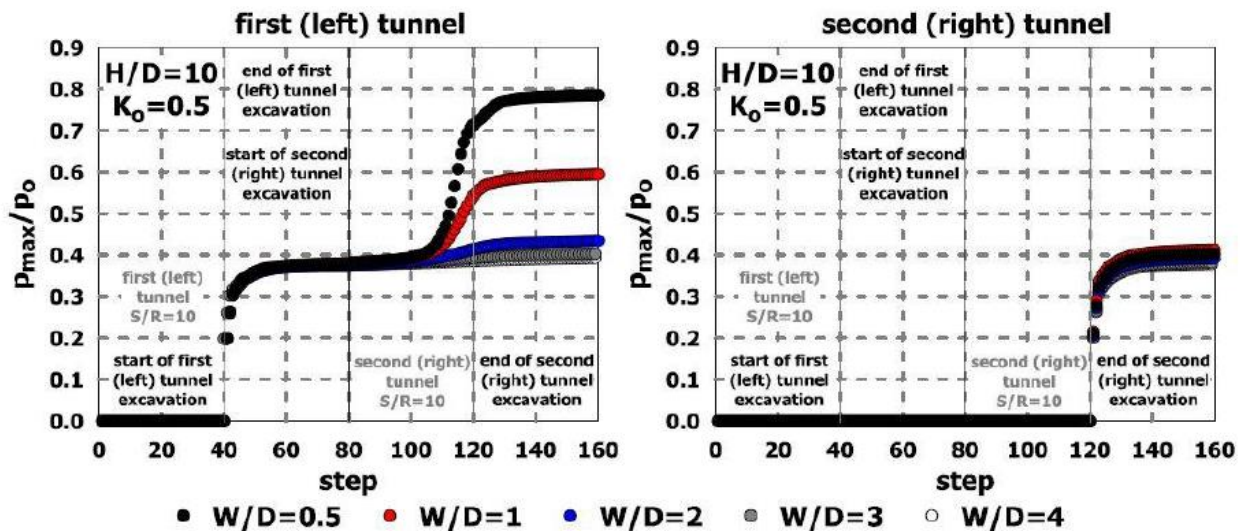
Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης σε όρους ποσοστιαίας αύξησης φορτίων είναι υψηλότερο για $K_o=0.5$ και χαμηλότερο για $K_o=1.5$. Ο βαθμός της αύξησης καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το πλάτος του πυλώνα W/D . Είναι προφανές ότι η κρίσιμη τιμή του πλάτους του πυλώνα θα μπορούσε να προσανατολιστεί περίπου στην τιμή $(W/D)_{crit}=2$, με την έννοια ότι για υψηλότερες τιμές του πλάτους του πυλώνα το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι περίπου στο ίδιο επίπεδο. Ειδικότερα, η οριακή τιμή είναι προσανατολισμένη με υποτιθέμενο κριτήριο τη σχετική διαφοροποίηση της παραμέτρου που εξετάστηκε να είναι έως 10%. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο για $K_o=1$ και $K_o=1.5$, τιμές πλάτους του πυλώνα μεγαλύτερες από $W/D=2$ δεν εξετάστηκαν. Σχετικά με την επίδραση του λόγου ύψους υπερκεκλιμένων H/D παρατηρείται ότι αύξηση αυτής της παραμέτρου οδηγεί στην ενίσχυση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Η απόκριση της «πρώτης σήραγγας» (first tunnel) για $K_o=0.5$ είναι η αύξηση των φορτίων σε κάθε περιοχή της διατομής της σήραγγας, ανεξαρτήτως της τιμής του πλάτους του πυλώνα. Για $K_o=1$ στην οροφή

και την παρειά της σήραγγας ($\Theta = 180^\circ$ και $\Theta = 360^\circ$) τα φορτία της «πρώτης σήραγγας» τείνουν να μειώνονται συγκριτικά με τα φορτία της «μονής σήραγγας». Το επίπεδο αυτής της μείωσης προσδιορίζεται από την τιμή του πλάτους του πυλώνα W/D και το λόγο των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o (Chortis F. & Kavvadas M., 2015). Αυτή η τάση επιβεβαιώνεται και ενισχύεται στην περίπτωση όπου $K_o=1.5$. Η πρώτη σημαντική όψη αυτής της απόκρισης είναι το γεγονός ότι το ποσό της μείωσης είναι μεγαλύτερο για δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες, ενώ ο δεύτερος κρίσιμος παράγοντας του φαινομένου είναι ότι η βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών σε συνδυασμό με την αύξηση του πλάτους του πυλώνα W/D οδηγεί στον περιορισμό αυτής της μείωσης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-41 (δεξιά). Η διαφοροποίηση αυτής της απόκρισης απεικονίζεται στο Σχήμα 2-41 με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ $K_o=0.5$ και $K_o=1.5$ για την οροφή της «πρώτης σήραγγας». Ανάλογα είναι τα αποτελέσματα για τον πυθμένα της «πρώτης σήραγγας» (Chortis F. & Kavvadas M., 2015).



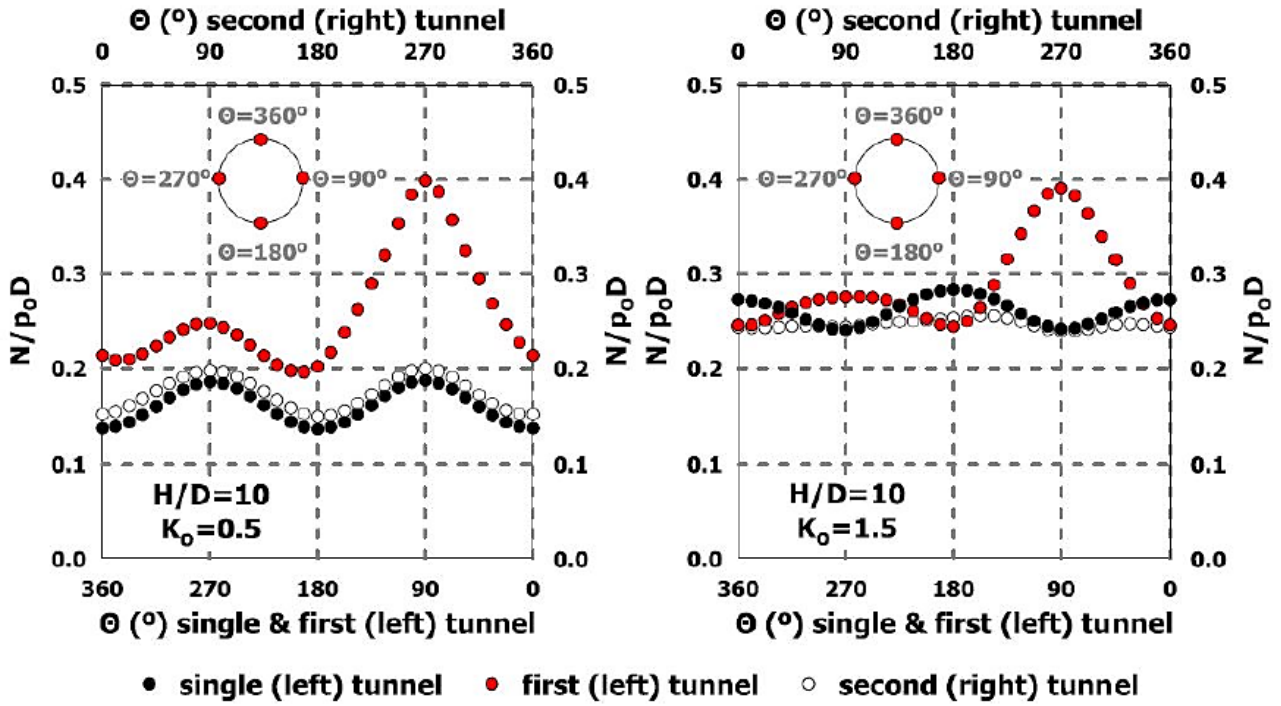
Σχήμα 2-41: Λόγος φορτίων (πρώτης/μονής) στην οροφή της «πρώτης σήραγγας» (first tunnel)($\Theta=360^\circ$), ως συνάρτηση του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o), για διάφορες τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_o) και λόγου ύψους υπερκεκλιμένων γωνιών $H/D=10$ (Chortis F. & Kavvadas M., 2015)

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

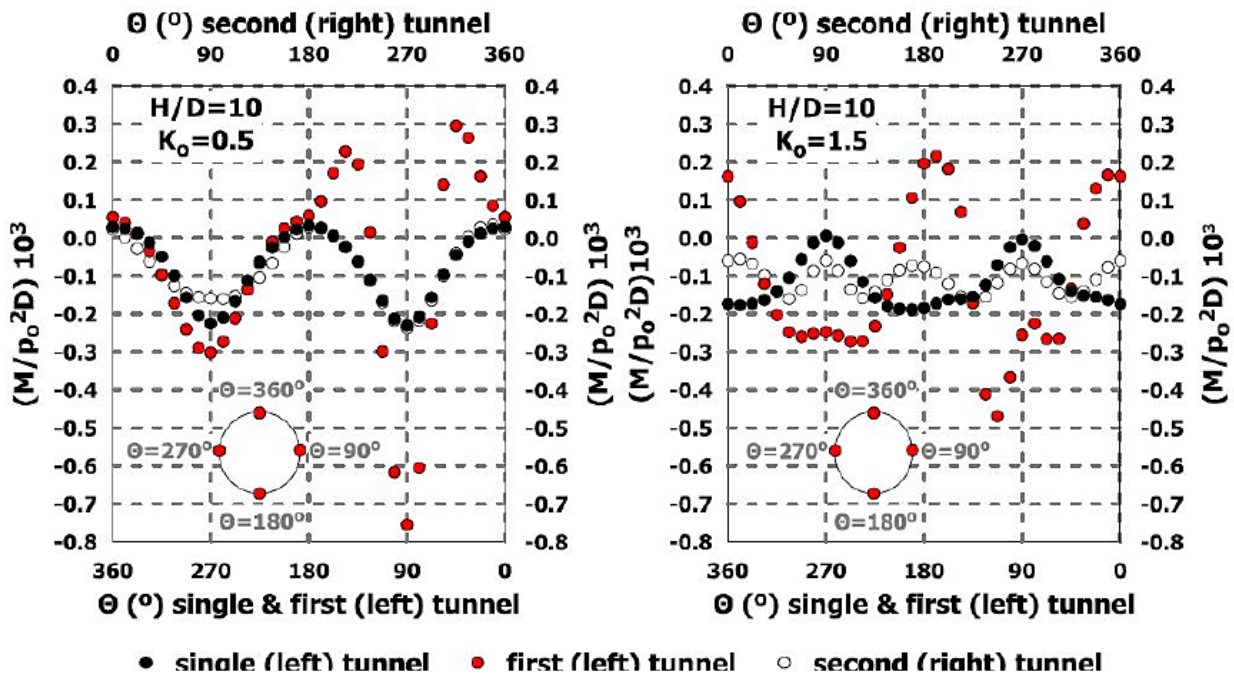


Σχήμα 2-42: Χρονοϊστορία των φορτίων (μέγιστη τιμή), για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o), συντελεστή γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D=10$, για την «πρώτη σήραγγα» (first tunnel) στα αριστερά και για τη «δεύτερη σήραγγα» (second tunnel) στα δεξιά (Chortis F. & Kavvadas M., 2015)

Εκτός από το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης στα φορτία, η εκσκαφή δίδυμων σηράγγων οδηγεί στη διαφοροποίηση των εσωτερικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην υποστήριξη της σήραγγας (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα). Συγκεκριμένα, στο σχήμα 2-43 παρουσιάζεται η επίδραση, στην αξονική δύναμη, της εκσκαφής της «δεύτερης» σήραγγας, στην «πρώτη» σήραγγα, ενώ η επίδραση αυτή στην καμπτική ροπή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-44. Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης προκαλεί υψηλή και κατ' επέκταση σημαντική αύξηση της αξονικής δύναμης για την «πρώτη» σήραγγα και η μεγιστοποίηση αυτής της απόκρισης τοποθετείται στην εσωτερική παρειά της σήραγγας ($\theta=90^\circ$). Η επιρροή στη «δεύτερη» σήραγγα είναι σχετικά χαμηλότερη αντίστοιχα. Το εύρος της αύξησης και το σχήμα της ανακατανομής της αξονικής δύναμης είναι προσδιορισμένα από την τιμή λόγου γεωστατικών τάσεων K_o και την τιμή του πλάτους του πυλώνα W/D , όπως παρουσιάζεται για τα φορτία. Στο σχήμα παρουσιάζεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης για τη ροπή κάμψης και τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ανάλογη τάση. (Chortis F. & Kavvadas M., 2015).

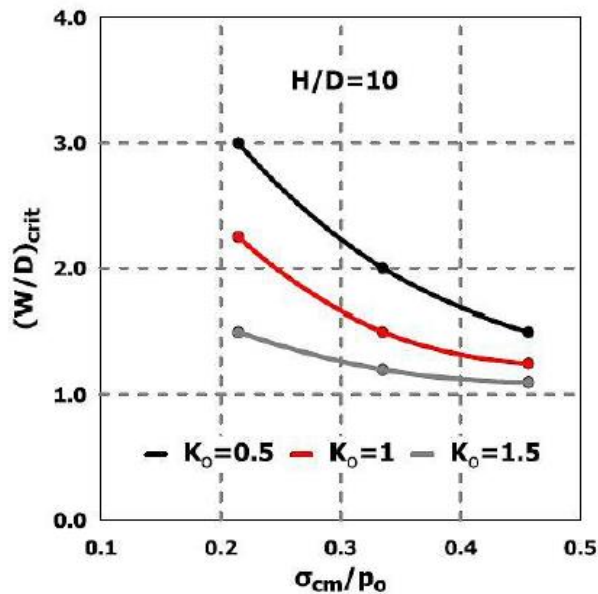


Σχήμα 2-43: Κατανομή της αξονικής δύναμης, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ (αριστερά) και $K_0=1.5$ (δεξιά) στην τυπική διατομή, για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0), πλάτους πυλώνα $W/D=0.5$ και λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D=10$ (Chortis F. & Kavvadas M., 2015)



Σχήμα 2-44: Κατανομή της ροπής κάμψης, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ (αριστερά) και $K_0=1.5$ (δεξιά) στην τυπική διατομή, για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_0) που εξετάστηκε, πλάτους πυλώνα $W/D=0.5$ και λόγο ύψους υπερκειμένων γαιών $H/D=10$ (Chortis F. & Kavvadas M., 2015)

Από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, παράγεται η κρίσιμη τιμή του πλάτους του πυλώνα $(W/D)_{crit}$. Οι καμπύλες που συνδυάζουν τον λόγο των γεωτεχνικών παραμέτρων και την κρίσιμη τιμή του πλάτους του πυλώνα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-45.



Σχήμα 2-45: Εκτίμηση του πλάτους του πυλώνα (W/D) για το οποίο η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο σηράγγων είναι αμελητέα σε όρους λόγου φορτίων (πρώτης/μονής), ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) , για διάφορες τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_o (Chortis F. & Kavnadas M., 2015)

2.2.10.3. Συμπεράσματα

Η σχετική έρευνα, αποδεικνύει ότι το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο παράλληλων γειτονικών σηράγγων είναι αισθητά σημαντικό, ειδικά αν η απόσταση μεταξύ τους είναι μικρή. Τα αποτελέσματα των τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων με την βοήθεια του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, δείχνουν ότι η αλληλεπίδραση οδηγεί στη διαφοροποίηση του μεγέθους, σχήματος και κατανομής των φορτίων και των εντατικών μεγεθών (αξονικές δυνάμεις και ροπές κάμψης) της άμεσης υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα).

Τα αποτελέσματα επίσης παρουσίασαν μια υψηλή και κατά συνέπεια σημαντική αύξηση των φορτίων στην «πρώτη» σήραγγα η οποία αναπτύσσεται μη συμμετρικά και ειδικότερα, η μεγιστοποίηση της επιρροής παρατηρείται στην εσωτερική παρειά ($\Theta=90^\circ$), ανεξαρτήτως της τιμής του λόγου γεωστατικών τάσεων K_o . Αναφορικά στη «δεύτερη» σήραγγα, τα φορτία αποκλίνουν από το αρχικό μέγεθος όπως φαίνεται για τη «μονή» σήραγγα σε χαμηλό βαθμό σε σχέση με την αντίστοιχη αλλαγή που παρατηρείται για την «πρώτη». Ανάλογη τάση παρουσιάζεται για τα μεγέθη στην άμεση υποστήριξη (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα).

Η αύξηση των φορτίων μπορεί να εκτιμηθεί μέσω των προτεινόμενων κανονικοποιημένων διαγραμμάτων, ως συνάρτηση του λόγου γεωστατικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o και του πλάτους του πυλώνα W/D . Ο βαθμός της αύξησης καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το πλάτος του πυλώνα, ειδικά για την τιμή του πλάτους του πυλώνα $(W/D)_{crit}=2$ αλλά και μεγαλύτερες τιμές το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι περίπου στο ίδιο επίπεδο. Από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, η εκτίμηση της κρίσιμης τιμής του πλάτους του πυλώνα $(W/D)_{crit}$, επιτυγχάνεται, ως συνάρτηση του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o , μέσω προτεινόμενων καμπύλων οι οποίες είναι κατηγοριοποιημένες σύμφωνα με τις διαφορετικές τιμές του λόγου γεωστατικών τάσεων K_o . (Chortis F. & Kavnadas M., 2015).

Τέλος, ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0 είναι ένας κρίσιμος παράγοντας, ο οποίος επηρεάζει το εύρος της αλληλεπίδρασης λόγω του διαφορετικού μηχανισμού ανακατανομής που αναπτύσσεται, ο οποίος εξαρτάται από την τιμή αυτού του παράγοντα, στην εκσκαφή δίδυμων σηράγγων. Πιο συγκεκριμένα, το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης σε όρους ποσοστιαίας αύξησης φορτίων είναι υψηλότερο για $K_0=0.5$ και χαμηλότερο για $K_0=1.5$.

2.2.11. Ψυχάρη Ε., 2016

Η Ψυχάρη Ε. (2016) διερεύνησε το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων. Συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση που έχει η διάνοιξη μιας νέας σήραγγας στην υφιστάμενη υποστήριξη μιας γειτονικής, προϋπάρχουσας σήραγγας, σε όρους φορτίων και εντατικών μεγεθών. Για το σκοπό της έρευνας συγκεντρώθηκαν βιβλιογραφικά δεδομένα που αναφέρονται στο συγκεκριμένο ζήτημα, ενώ πραγματοποιήθηκαν τριδιάστατες αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Για τη λεπτομερή εξαγωγή αποτελεσμάτων σε ένα ευρύτερο φάσμα μεταβάλλονται ορισμένες παράμετροι. Αναλυτικότερα, εξετάζεται ένα μεγάλο εύρος από μεγέθη πλατών πυλώνα, γεωτεχνικών συνθηκών, συντελεστών οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και συντελεστών αποτόνωσης. Τα αποτελέσματα των εν λόγω αναλύσεων υποδεικνύουν ότι η κατασκευή της νέας σήραγγας ασκεί σημαντική επιρροή στα φορτία και στα εντατικά μεγέθη της υφιστάμενης. Στην εξάλειψη του φαινομένου της αλληλεπίδρασης συμβάλλει η αύξηση του πλάτους του πυλώνα, η βελτίωση της ποιότητας του γεωυλικού, η αύξηση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και η μείωση του συντελεστή αποτόνωσης.

2.2.11.1. Αριθμητική ανάλυση

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης έρευνας σχεδιάστηκαν πέντε αριθμητικά μοντέλα, για κάθε πλάτος πυλώνα που διερευνήθηκε. Το πλάτος πυλώνα αποτελεί την εγκάρσια απόσταση μεταξύ των παρειών των γειτονικών σηράγγων. Πιο συγκεκριμένα, σχεδιάστηκαν μοντέλα με πλάτος πυλώνα $W=0.5D = 4m$, $W = 1D = 8m$, $W = 2D = 16m$, $W = 3D = 24m$ και $W = 4D = 32m$.

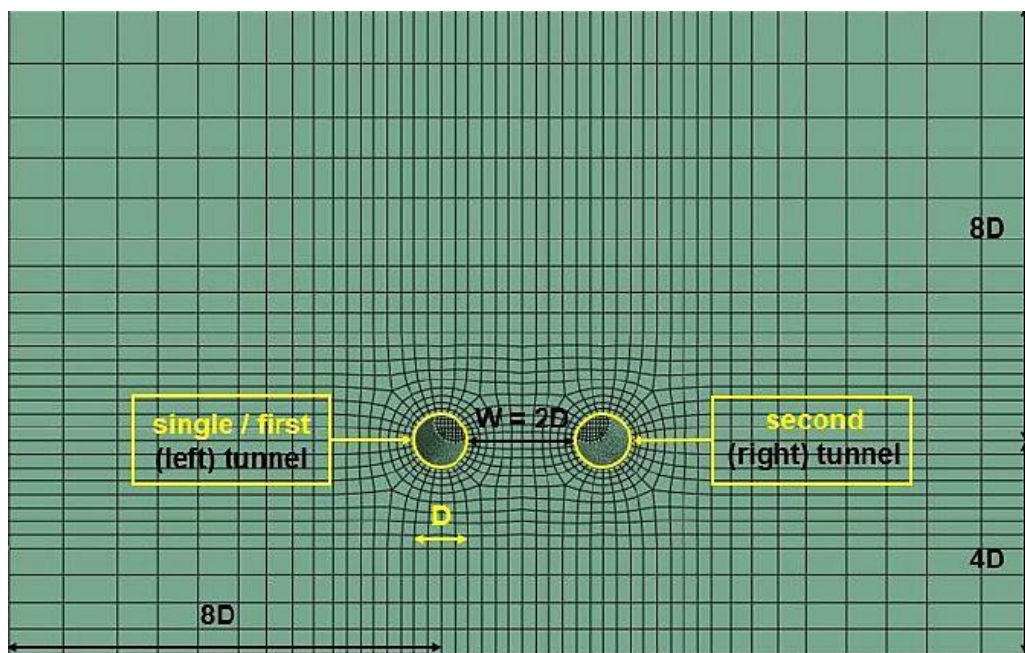
Ο σχεδιασμός έγινε λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένα κριτήρια, δηλαδή:

- Η απόσταση του γεωυλικού από τον άξονα κάθε σήραγγας έως τα όρια του αριθμητικού μοντέλου θα πρέπει να είναι επαρκής, ούτως ώστε οι συνοριακές συνθήκες να μη συντελούν στη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων.
- Το μήκος της σήραγγας κατά τη διαμήκη διεύθυνση θα πρέπει να είναι επαρκές, ούτως ώστε τα αποτελέσματα που εξάγονται στην περιοχή ενδιαφέροντος να μην επηρεάζονται από τα όρια του αριθμητικού μοντέλου.
- Η κατανομή των τάσεων ύστερα από την εκσκαφή θα πρέπει να είναι ομοιόμορφη ως προς το οριζόντιο επίπεδο και σε αυτό δύναται να συμβάλλει το κάτω όριο του μοντέλου. Κατά συνέπεια, το κατώτερο αυτό όριο του αριθμητικού προσομοιώματος θα πρέπει να

εκτείνεται σε τέτοιο βαθμό από τον άξονα κάθε σήραγγας, ώστε να μην επιδρά στην κατανομή των τάσεων.

- Η κατανομή των τάσεων ακόμη, επηρεάζεται και από τα πλευρικά όρια του προσομοιώματος.

Τονίζεται ότι με την ολοκλήρωση της εκσκαφής της «μονής» σήραγγας, ξεκινά η εκσκαφή της δεξιάς, «δεύτερης» σήραγγας. Με την εκκίνηση της εκσκαφής της δεύτερης, η «μονή» σήραγγα μετονομάζεται σε «πρώτη». Η διάμετρος λαμβάνεται ίση με $D=8\text{m}$ και το μήκος εκσκαφής της διατομής της σήραγγας είναι $L_{exc}=10D=80\text{m}$, ενώ το συνολικό μήκος του μοντέλου κατά τη διεύθυνση Y είναι ίσο με $18D=144\text{m}$.



Σχήμα 2-46: Εγκάρσια όψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 2D$ (επίπεδο $Z - X$). Στο σχήμα φαίνονται η (αριστερή) «μονή/πρώτη» σήραγγα (single/first tunnel), η (δεξιά) «δεύτερη» σήραγγα (second tunnel) και οι διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου. Η διάμετρος κάθε σήραγγας είναι ίση με $D = 8\text{m}$. (Ψυχάκη Ε., 2016)

Για την διακριτοποίηση του καννάβου επιλέχθηκε η πύκνωση να γίνει στις περιοχές ελαστοπλαστικής απόκρισης του γεωυλικού, δηλαδή γύρω από τους δύο κλάδους, όπου συντελείται ανακατανομή των τάσεων, πλαστικές παραμορφώσεις και σημαντικές μετακινήσεις. Απομακρυνόμενοι από αυτή την περιοχή, όπου υπάρχει ελαστική απόκριση, πραγματοποιήθηκε σταδιακή αραιώση του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων.

Σχετικά με την αλληλουχία, η εκσκαφή της δεξιάς, «δεύτερης» σήραγγας πραγματοποιείται ύστερα από την ολοκλήρωση της εκσκαφής και υποστήριξης της αριστερής, «μονής/πρώτης» σήραγγας, προκειμένου να μελετηθεί η επιρροή της εκσκαφής της «δεύτερης» σήραγγας στην «πρώτη». Το βήμα εκσκαφής, το οποίο αναφέρεται τόσο στη «μονή/πρώτη» σήραγγα, όσο και στη «δεύτερη» σήραγγα, ισούται με 1m σε όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιούνται, ενώ η εκσκαφή αυτών πραγματοποιείται με 80 στατικά βήματα, κατά τη διεύθυνση Y . Η διαφοροποίηση σε κάποιες ομάδες αναλύσεων έγκειται στην «καθυστέρηση» της εφαρμογής της

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

2.2.11.2. Παράμετροι και παραδοχές αναλύσεων

Παράμετροι

- Γεωμετρικές παράμετροι

Για όλες τις αναλύσεις των προσομοιωμάτων λαμβάνεται σταθερή τιμή διαμέτρου $D=8m$ και μήκους της εκσκαφής $L_{exc}=80m$ για κάθε σήραγγα και πάχος υπερκείμενων γαιών ίσο με $H=80m$. Ακόμα το πλάτος πυλώνα, δηλαδή η εγκάρσια απόσταση των σηράγγων παίρνει τις τιμές: $W=0.5D=4m$, $W=D=8m$, $W=2D=16m$, $W=3D=24m$ και $W=4D=32m$. Η απόσταση της εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο στη «δεύτερη» σήραγγα εξετάστηκε για τις τιμές: $Stunnel\ face=0.125D=1m$, $Stunnel\ face=0.24D=1m$, $Stunnel\ face=0.5D=4m$, $Stunnel\ face=0.75D=6m$ και $Stunnel\ face=1D=8m$.

- Γεωτεχνικές παράμετροι

Η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη του άρρηκτου βράχου, στο φάσμα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, πήρε την τιμή 10 MPa. Η σταθερά m_i , του άρρηκτου βράχου είναι ίση με 7 σε όλες τις αναλύσεις και ο γεωλογικός δείκτης GSI έλαβε τις τιμές 10, 15, 20, 25 και 30. Ακόμα ο συντελεστής διατάραξης είναι ίσος με $D=0$, η συνοχή του πετρώματος κυμάνθηκε από 0.08 MPa έως 0.16 MPa και η γωνία τριβής από 21.1° έως 29.4° . Το εύρος των τιμών της γωνίας διαστολικότητας είναι από 5.3° έως 7.3° . Ο λόγος Poisson ήταν σταθερός με $\nu=0.3$ και ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων εξετάστηκε για τις τιμές $K_0=0.5$, $K_0=1$ και $K_0=1.5$.

- Παράμετροι άμεσης υποστήριξης

Η άμεση υποστήριξη αποτελείται από εκτοξευμένο σκυρόδεμα. Το πάχος του εκτοξευμένου σκυροδέματος λαμβάνεται ίσο με $d_{sh}=0.20m$, το μέτρο ελαστικότητας $E_{sh}=20000$ MPa και ο λόγος Poisson του εκτοξευόμενου σκυροδέματος $\nu_{sh}=0.2$. Τέλος, το ειδικό βάρος του είναι ίσο με $\gamma_{sh}=0.025MN/m^3$.

Παραδοχές

- Η βάση σύγκρισης των αποτελεσμάτων είναι η αριστερή σήραγγα πριν ξεκινήσει η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας, η οποία ονομάζεται «μονή» σήραγγα (single tunnel). Από

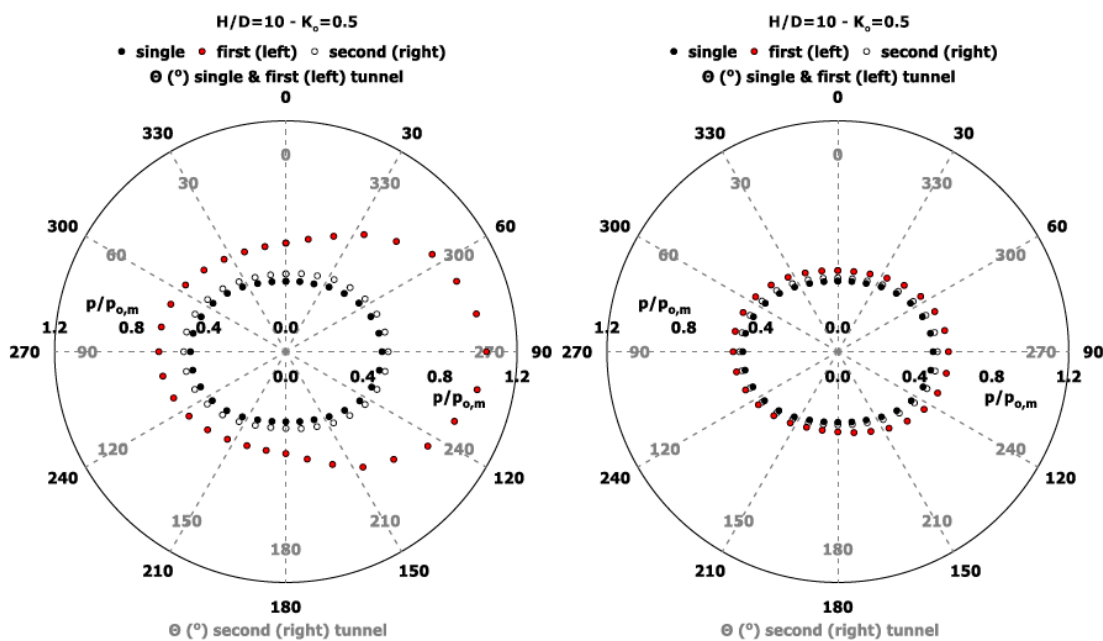
τη στιγμή που ξεκινά η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας, η αριστερή σήραγγα μετονομάζεται σε «πρώτη» σήραγγα (first tunnel) και η δεξιά «δεύτερη» σήραγγα (second tunnel).

- ο Στην σύγκριση των αποτελεσμάτων κρίσιμος παράγοντας είναι ο προσανατολισμός των γωνιών των σηράγγων, ο οποίος ορίζεται σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού.

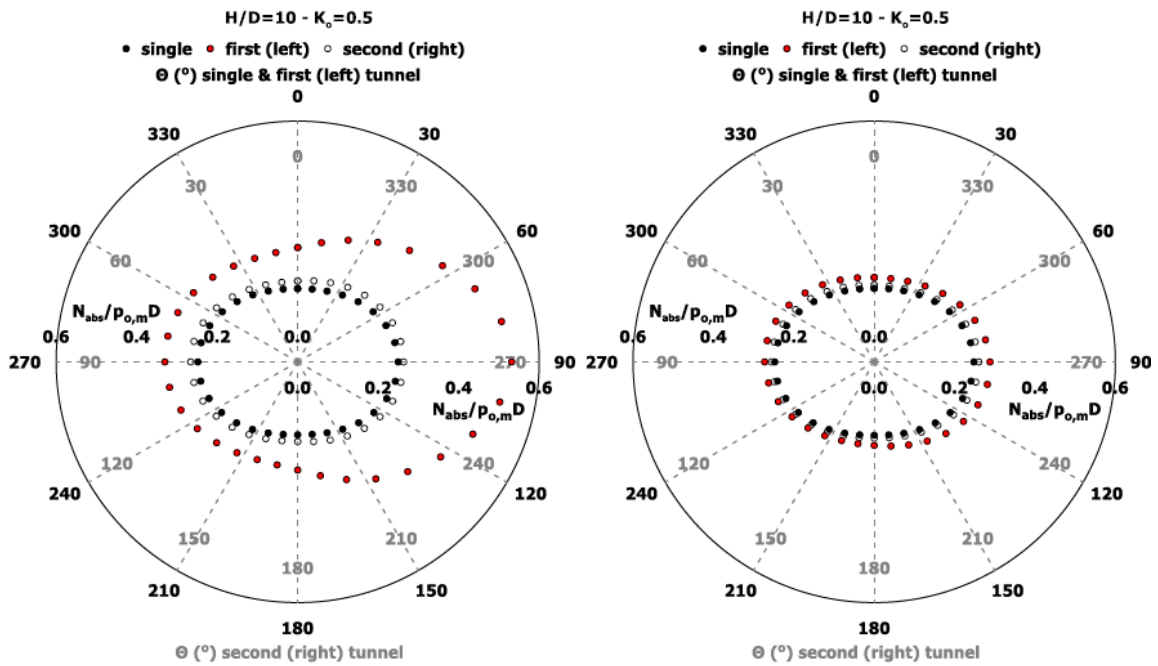
2.2.11.3. Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων, εξετάζεται η επιρροή του πλάτους του πυλώνα W/D και των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, μελετώντας την περίπτωση όπου επικρατούν οι δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες σε συνδυασμό με το μικρότερο πλάτος πυλώνα για την μεγιστοποίηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Επίσης, εξετάζεται η επίδραση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_o , και η επίδραση του βαθμού αποτόνωσης της δεξιάς σήραγγας στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.

Ανεξαρτήτως πλάτους πυλώνα, περισσότερο καταπονούνται οι εσωτερικές παρειές των σηράγγων ενώ αξιοσημείωτη είναι η ελαχιστοποίηση των φορτίων στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» σήραγγας όταν το πλάτος του πυλώνα αυξάνεται. Όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω, η εσωτερική παρειά ($\Theta=90^\circ$) της «πρώτης» σήραγγας για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ έχει αυξημένα φορτία σε ποσοστό 45% συγκριτικά με την αντίστοιχη παρειά ($\Theta=90^\circ$) της «πρώτης» σήραγγας όπου το πλάτος πυλώνα είναι $W/D=2$. Για πλάτος πυλώνα $W/D>2$ τα αναπτυσσόμενα φορτία στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας (first tunnel) τείνουν να εξισωθούν με αυτά που προκύπτουν για την εκσκαφή μεμονωμένης σήραγγας (single tunnel), ενώ η αντίστοιχη κατανομή κλίνει προς τη συμμετρία. Επίσης επιβεβαιώνεται η αύξηση των αξονικών δυνάμεων σε κάθε περιοχή της διατομής της «πρώτης» σήραγγας, ανεξαρτήτως πλάτους πυλώνα και η απομείωση αυτής με την αύξηση του λόγου W/D . (Ψυχάρη Ε., 2016).

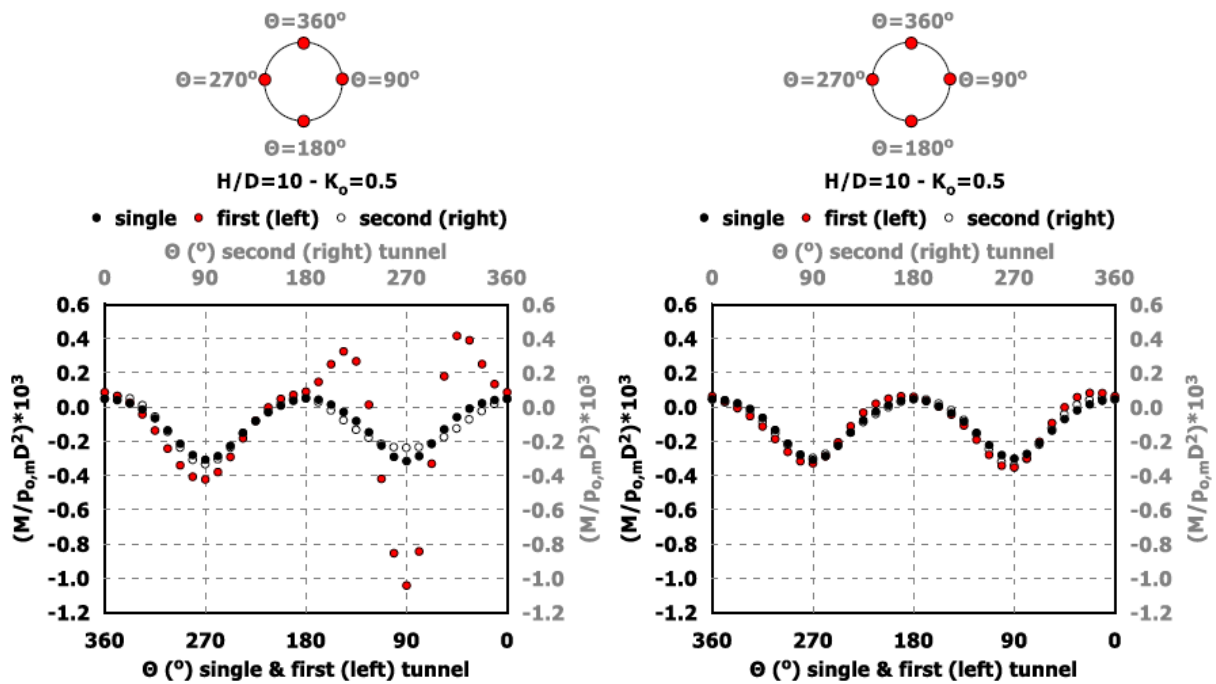


Σχήμα 2-47: Κατανομή του κανονικοποιημένου φορτίου $p/p_{o,m}$ συναρτήσει της γωνίας θ (°) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$ (αριστερά) & $W = 2D = 16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$). (Ψυχάρη Ε., 2016)



Σχήμα 2-48: Κατανομή της κανονικοποιημένης αξονικής δύναμης ($N_{abs}/\rho_{o,m}D$) συναρτήσει της γωνίας θ (°) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) & $W=2D=16m$ (δεξιά), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$). (Ψυχάρη Ε., 2016)

Παρατηρείται ότι η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας προκαλεί μια σημαντική αύξηση στην επαγόμενη ροπή κάμψης στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας, ιδιαιτέρως δε στην περιοχή της εσωτερικής παρειάς ($\theta=90^\circ$) όπου εντείνεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης. Με την αύξηση του εύρους του πυλώνα και την εξάλειψη του φαινομένου, η κατανομή γίνεται συμμετρική. Αναφορικά στην κατανομή και στο μέγεθος των επαγόμενων καμπτικών ροπών στην άμεση υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας, είναι παρόμοια με αυτά της «μονής». Τέλος, για πλάτος πυλώνα $W/D=2$ οι ροπές κάμψης της «μονής», «πρώτης» και «δεύτερης» σήραγγας είναι σχεδόν ίσες και οι κλάδοι σχεδόν δεν αλληλεπιδρούν. Κατά συνέπεια, υπό τις δεδομένες γεωτεχνικές συνθήκες και για πλάτος πυλώνα $W/D>2$ οι σήραγγες δύνανται να σχεδιαστούν ως ανεξάρτητες μεταξύ τους κατασκευές. (Ψυχάρη Ε., 2016)

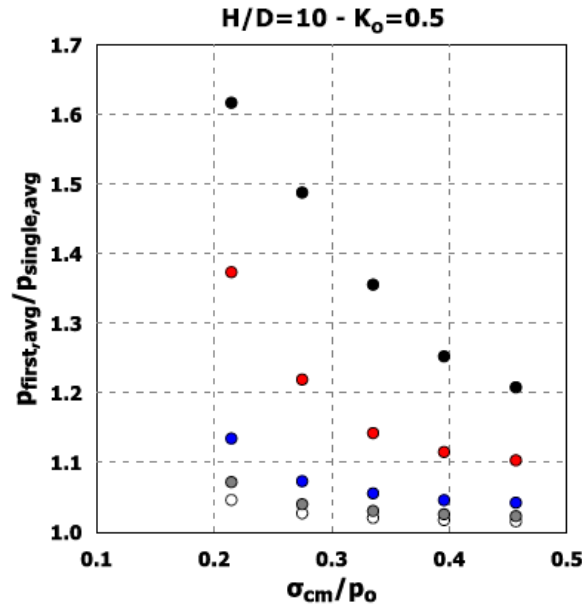


Σχήμα 2-49: Κατανομή της κανονικοποιημένης ροπής κάμψης ($M/p_o,m D^2$) συναρτήσει της γωνίας $\theta(^{\circ})$ στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτικές αναλύσεις με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ (αριστερά) & $W=2D=16m$ (δεξιά) συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_o=0.21$). (Ψυχάρη Ε., 2016)

Επίδραση του πλάτους του πυλώνα

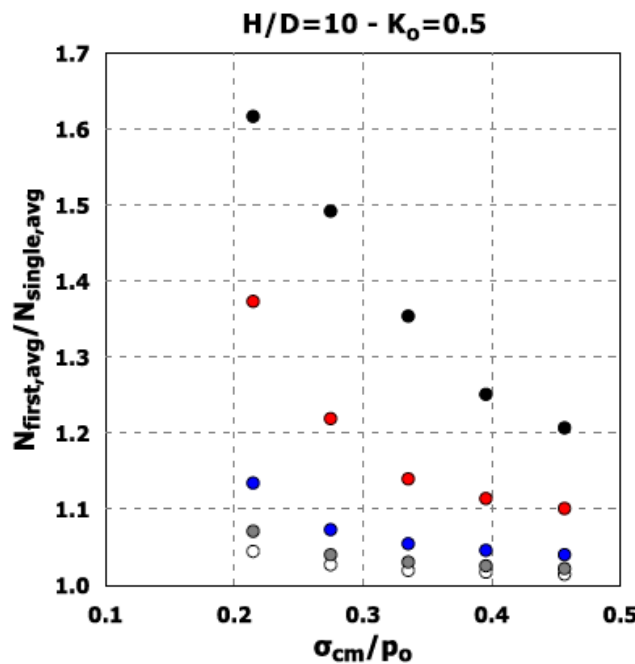
Η γενικότερη τάση που επικρατεί είναι η μείωση του λόγου των φορτίων πλησιάζοντας την τιμή ίση με μονάδα με τη βελτίωση της ποιότητας του γεωυλικού και τη διεύρυνση του πλάτους του πυλώνα. Με άλλα λόγια, η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας (first tunnel) λόγω της διάνοιξης της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) δέχεται μικρότερη καταπόνηση όσο οι δύο κλάδοι απομακρύνονται μεταξύ τους, ενώ στην εξάλειψη του φαινομένου της αλληλεπίδρασης συμβάλλει επίσης η βελτιστοποίηση των γεωτεχνικών συνθηκών. Τα αποτελέσματα που αναφέρονται στις αξονικές δυνάμεις ακολουθούν αντίστοιχη τάση με αυτή των φορτίων. Ο λόγος των αξονικών δυνάμεων («πρώτης»/«μονής») παρουσιάζεται μεγαλύτερος της μονάδας για $W/D \leq 2$, ενώ για $W/D > 2$ η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» και της «μονής» σήραγγας εμφανίζουν πρακτικά τα ίδια μεγέθη αξονικών δυνάμεων

● W/D=0.5 ● W/D=1 ● W/D=2 ● W/D=3 ○ W/D=4



Σχήμα 2-50: Λόγος μέσων φορτίων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,avg}/p_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$. (Ψυχάρη Ε., 2016)

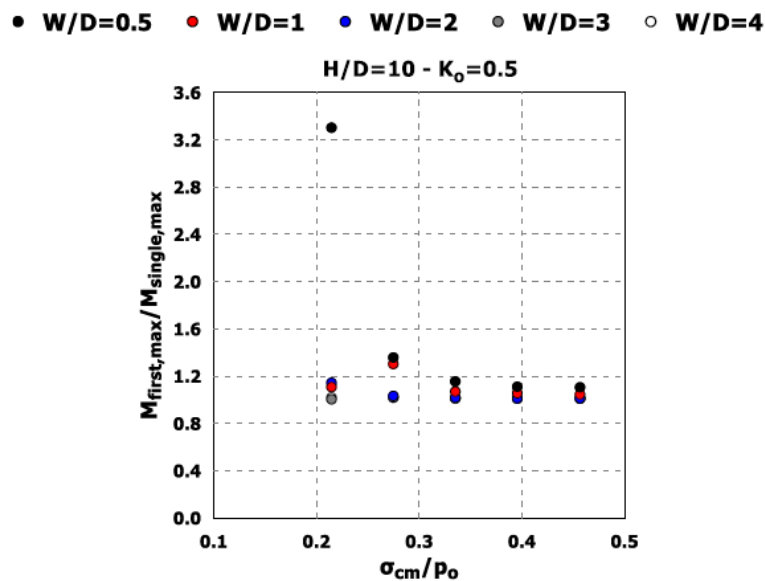
● W/D=0.5 ● W/D=1 ● W/D=2 ● W/D=3 ○ W/D=4



Σχήμα 2-51: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($N_{first,avg}/N_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$. (Ψυχάρη Ε., 2016)

Οι ροπές κάμψης αποτελούν περισσότερο ευαίσθητα μεγέθη συγκριτικά με αυτά των φορτίων ή των αξονικών δυνάμεων, καθότι δεν ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη τάση. Εν γένει παρατηρούνται αυξημένες ή περίπου ίσες οι καμπτικές ροπές στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας σε σχέση με αυτές στην άμεση υποστήριξη της «μονής», με τους περισσότερους λόγους ροπών («πρώτης»/«μονής») να παρουσιάζονται μεγαλύτεροι ή ίσοι της μονάδας. Αναφορικά στη στέψη της «πρώτης» σήραγγας και για πλάτη πυλώνα $W/D = 0.5, 1$ και

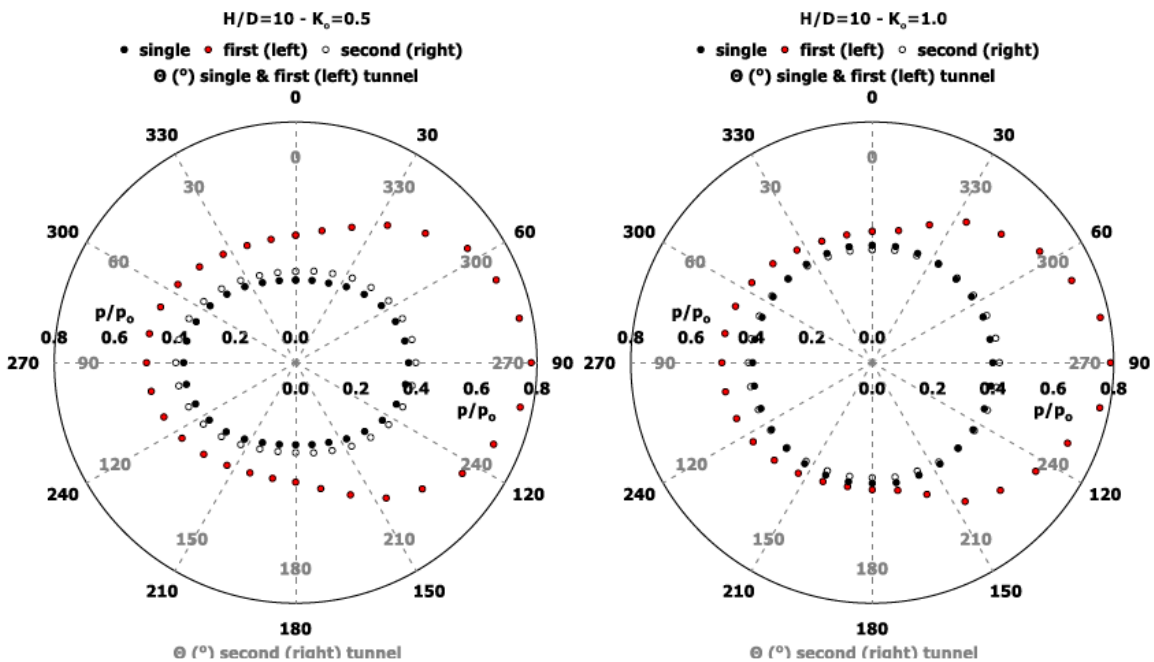
2 παρατηρείται μείωση των ροπών για τους δύο πρώτους λόγους γεωτεχνικών συνθηκών με ακόλουθη αυξητική τάση όσο βελτιώνονται οι γεωτεχνικές συνθήκες, με το διάγραμμα να παρουσιάζει ένα τοπικό ελάχιστο. Για τα πλάτη πυλώνα $W/D=3$ και $W/D=4$ εμφανίζεται αντίστοιχη αύξηση και στη συνέχεια σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων. (Ψυχάρη Ε., 2016)



Σχήμα 2-52: Λόγος μέγιστων ροπών κάμψης της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($M_{first,max}/M_{single,max}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$. (Ψυχάρη Ε., 2016)

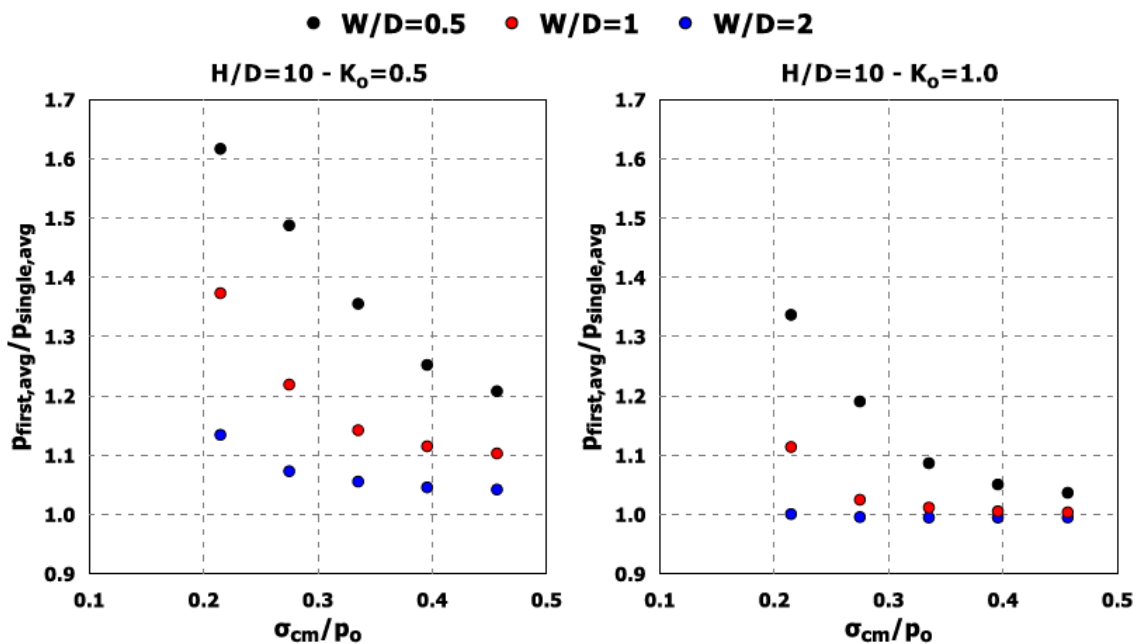
Επίδραση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0

Σχετικά με το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, από τα παρακάτω σχήματα διακρίνεται ότι η εκσκαφή της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) επιδρά στην ανάπτυξη των φορτίων που δέχεται η «πρώτη» σήραγγα (first tunnel) για οποιαδήποτε τιμή K_0 . Οι μέγιστες τιμές των φορτίων εντοπίζονται στην περιοχή του πυλώνα και πιο συγκεκριμένα στη γωνία $\Theta=90^\circ$. Παρατηρείται ακόμη ότι ανεξαρτήτως συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0 η εσωτερική παρειά ($\Theta=90^\circ$) της «πρώτης» σήραγγας παραλαμβάνει σχεδόν το ίδιο κατά μέγεθος φορτίο ρ/ρ_o . Αναφορικά στην εξωτερική παρειά ($\Theta=270^\circ$), στην οροφή και στο δάπεδο ($\Theta=360^\circ$ και $\Theta=180^\circ$ αντίστοιχα), για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ και $K_0=1.0$ τα φορτία της «πρώτης» σήραγγας αυξάνονται λόγω της εκσκαφής της «δεύτερης» σήραγγας, σε κάθε περιοχή. Για $K_0=1.5$, στα σημεία όπου η «μονή» σήραγγα (single tunnel) λαμβάνει τις μέγιστες τιμές των φορτίων, δηλαδή στη στέψη ($\Theta=360^\circ$) και στον πυθμένα ($\Theta=180^\circ$), για την «πρώτη» σήραγγα (first tunnel) σημειώνεται μείωση της τιμής των φορτίων. Κατά συνέπεια η διάνοιξη της «δεύτερης» σήραγγας δρα ανακουφιστικά/ευεργετικά στη στέψη και τον πυθμένα της «πρώτης» στην περίπτωση όπου $K_0=1.5$. (Ψυχάρη Ε., 2016)



Σχήμα 2-53: Κατανομή του ανηγμένου φορτίου p/p_0 συναρτήσει της γωνίας θ (°) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ (αριστερά) και $K_0=1.0$ (δεξιά) και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$). (Ψυχάρη Ε., 2016)

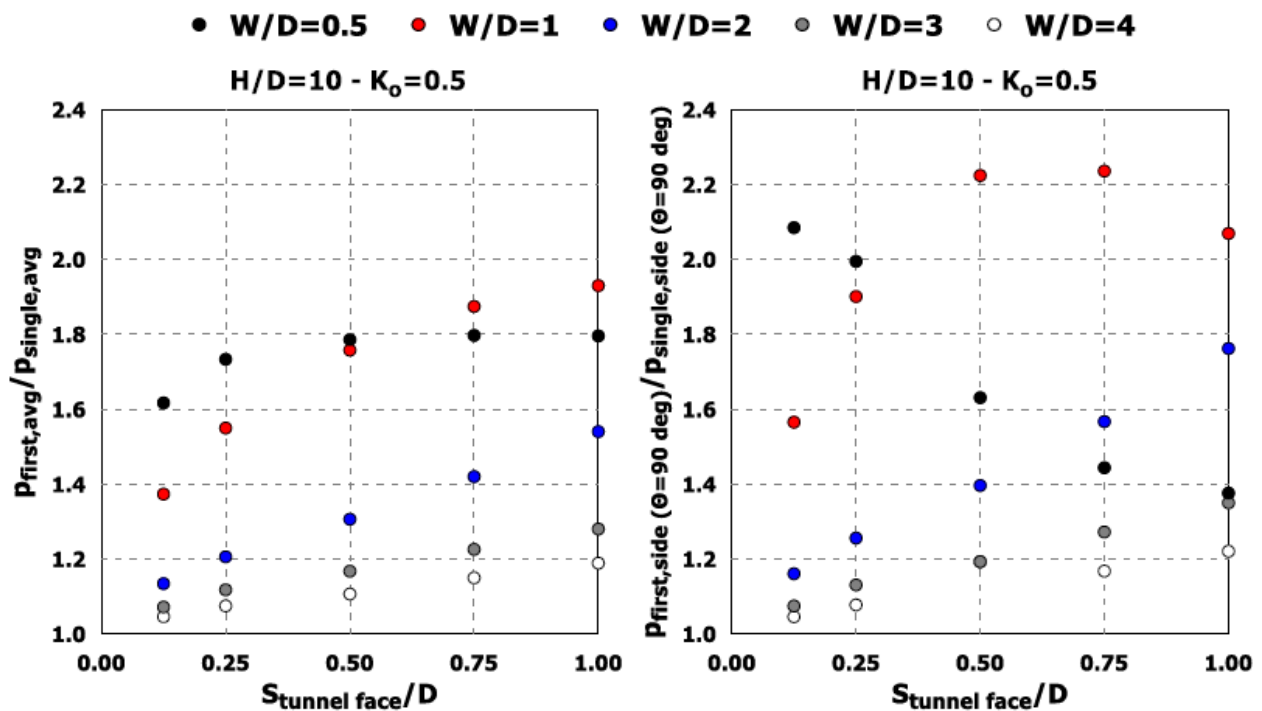
Αναφορικά στην εσωτερική παρειά ($\theta=90^\circ$) παρατηρείται αύξηση των φορτίων στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας ανεξαρτήτως τιμής K_0 , με το λόγο $p_{first,side}(\theta=90^\circ)/p_{single,side}(\theta=90^\circ)$ να παρουσιάζεται για όλο το φάσμα πλατών πυλώνα και γεωτεχνικών συνθηκών, μεγαλύτερος της μονάδας, λόγω του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Η αύξηση αυτή ακολουθεί μειωτική τάση με την βελτιστοποίηση των γεωτεχνικών συνθηκών και την αύξηση του πλάτους του πυλώνα, όπου το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης εξαλείφεται. (Ψυχάρη Ε., 2016)



Σχήμα 2-54: Λόγος μέσων φορτίων της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ($p_{first,avg}/p_{single,avg}$) ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_0) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκεκμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ (αριστερά) και $K_0 = 1.0$ (δεξιά). (Ψυχάρη Ε., 2016)

Επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης λ

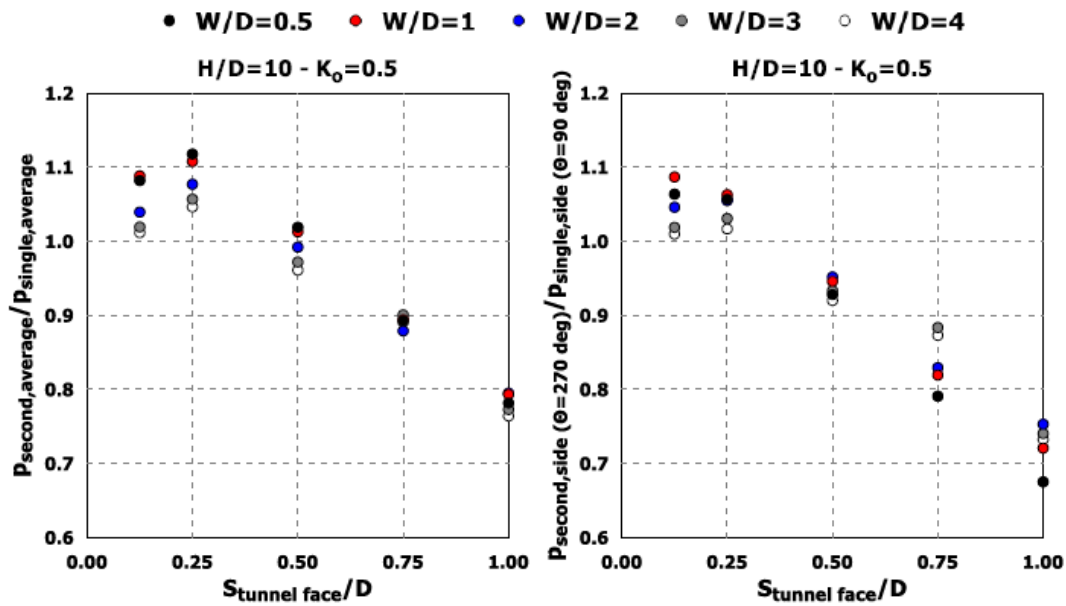
Για τη «δεύτερη» σήραγγα παρατηρείται γενικά μείωση των μέσων φορτίων $p_{second,avg}/p_{single,avg}$ με την αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης σε σχέση με τα φορτία της «μονής» σήραγγας (Σχήμα 2-55, αριστερά) στην οποία η άμεση υποστήριξη τοποθετείται πολύ κοντά στο μέτωπο εκσκαφής ($S_{tunnel\ face}/D=0.125$). Παρατηρείται ακόμη ότι η άμεση υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) για ορισμένους συνδυασμούς παραμέτρων (W/D και $S_{tunnel\ face}/D$) αναλαμβάνει μικρότερα φορτία συγκριτικά με τη «μονή» (single tunnel). Παρόμοια τάση (Σχήμα 2-55, δεξιά) επικρατεί και στα φορτία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην εσωτερική παρειά της «δεύτερης» σήραγγας ($p_{second,side}(\Theta=270^\circ)/p_{single,side}(\Theta=90^\circ)$). (Ψυχάρη Ε., 2016)



Σχήμα 2-55: Λόγος μέσων φορτίων ($p_{first,avg}/p_{single,avg}$) (αριστερά) και φορτίων στην εσωτερική παρειά ($p_{first,side}(\Theta=90^\circ)/p_{single,side}(\Theta=90^\circ)$) (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας ως συνάρτησης της κανονικοποιημένης απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο ($S_{tunnel\ face}/D$) της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψους υπερκευμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$. (Ψυχάρη Ε., 2016)

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

υποστήριξης από το μέτωπο της «δεύτερης» σήραγγας (Stunnel face/D), τόσο μεγαλύτερη είναι η μεγιστοποίηση των φορτίων στην «πρώτη» σήραγγα. (Ψυχάρη Ε., 2016)



Σχήμα 2-56: Λόγος μέσων φορτίων ($p_{second,avg}/p_{single,avg}$) (αριστερά) και φορτίων στην εσωτερική παρειά ($p_{second}(\theta=270^\circ)/p_{single}(\theta=90^\circ)$) (δεξιά) της «δεύτερης» προς της «μονής» σήραγγας ως συνάρτηση της κανονικοποιημένης απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο ($Stunnel\ face/D$) της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$. (Ψυχάρη Ε., 2016)

2.2.11.4. Συμπεράσματα

- Παρατηρείται μείωση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών και τη διεύρυνση του πλάτους του πυλώνα. Όμως, υπό οποιοδήποτε πλάτος πυλώνα και λόγο γεωτεχνικών συνθηκών, η εσωτερική παρειά δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση μέχρις ότου το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης εξαλειφθεί πλήρως.
- Στην περίπτωση όπου ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 \neq 1$ η μέγιστη καταπόνηση εντοπίζεται στις περιοχές όπου λαμβάνουν χώρα οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις σε συνδυασμό με τις ελάχιστες μετατοπίσεις. Πιο συγκεκριμένα για $K_0=0.5$ οι μεγαλύτερες ροπές κάμψης στη «μονή» και τη «δεύτερη» σήραγγα εμφανίζονται στις παρειές καθώς οι μεγαλύτερες πιέσεις από το περιβάλλον έδαφος επιβάλλονται στη στέψη και τον πυθμένα. Για $K_0=1.5$ παρατηρείται αντίστροφο φαινόμενο, με τις μέγιστες ροπές κάμψης να εμφανίζονται στην οροφή και το δάπεδο. Στην περίπτωση όπου $K_0=1$ παρατηρείται ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων στην άμεση υποστήριξη της «μονής» σήραγγας. Σχετικά με την «πρώτη» σήραγγα, η άμεση υποστήριξη δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση λόγω κάμψης στην εσωτερική παρειά, ανεξαρτήτως K_0 .
- Η αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης επηρεάζει σημαντικά το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων και μάλιστα λειτουργεί ευμενώς προκαλώντας αύξηση στα φορτία και τις αξονικές δυνάμεις της υφιστάμενης σήραγγας, ενώ δυσμενώς προκαλώντας μείωση στα αντίστοιχα μεγέθη της νέας σήραγγας.

3. Αριθμητικές Αναλύσεις

3.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια μεγάλη αύξηση του πλήθους των υπόγειων κατασκευών, ειδικότερα των σηράγγων αποτελώντας πλέον μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες έργων Πολιτικού Μηχανικού. Οι οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες κατασκευάζονται με δυο κλάδους, έναν για κάθε κατεύθυνση, κυρίως για λόγους ασφαλείας αλλά και για κατασκευαστικούς λόγους. Η αλληλεπίδραση λοιπόν των δύο κλάδων κατά την διάνοιξη αποτελεί ένα σύνθετο φαινόμενο, το οποίο καλείται να αντιμετωπίσει ο μελετητής μηχανικός κατά τον σχεδιασμό του έργου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση των μεγεθών των φορτίων και των εντατικών μεγεθών που ασκούνται στην άμεση υποστήριξη δίδυμων σηράγγων. Τα παραπάνω μεγέθη εξετάζονται συναρτήσει των γεωλογικών συνθηκών της περιοχής, του πλάτους πυλώνα μεταξύ των σηράγγων, του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και του συντελεστή αποτόνωσης.

Η χρησιμοποίηση αριθμητικών μεθόδων με τεχνικές όπως αυτή των πεπερασμένων στοιχείων, φαίνεται να είναι μία ακριβής μέθοδος για την επίλυση της μηχανικής συμπεριφοράς του εδαφικού σώματος κατά την διάνοιξη της σήραγγας. Στην εργασία λοιπόν πραγματοποιήθηκαν διδιάστατες αναλύσεις με την βοήθεια του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Δεδομένης της γεωμετρίας, των συνοριακών συνθηκών και των σχέσεων τάσης-παραμόρφωσης του σώματος, υπολογίζονται οι μετακινήσεις, οι παραμορφώσεις και οι τάσεις αυτού. Οι αριθμητικές αυτές αναλύσεις είναι διδιάστατες (2-D) με προσεγγίσεις επίπεδης παραμόρφωσης. Αν και οι τριδιάστατες αναλύσεις (3-D) προσομοιώνουν την πραγματική αλληλουχία της κατασκευής και το πραγματικό γεωτεχνικό προφίλ, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν διδιάστατες αναλύσεις, για τον λόγο ότι απαιτείται μικρότερος χρόνος αναλύσεων. Έτσι υπήρχε η δυνατότητα να εξεταστεί μεγαλύτερο εύρος παραμέτρων, όπως το πλάτος του πυλώνα και το πλήθος των βραχομαζών με διαφορετικές γεωτεχνικές συνθήκες. Επίσης σημειώνεται ότι και αυτή η μέθοδος μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Σε αυτό το κεφάλαιο λοιπόν, περιγράφεται η διαδικασία της μόρφωσης των αριθμητικών προσομοιωμάτων και η διαδικασία των αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα αναλύεται η γεωμετρία των γεωτεχνικών μοντέλων, ο τρόπος διαμόρφωσης και διακριτοποίησης του καννάβου, ο καθορισμός συνόρων και οριακών συνθηκών και η αλληλουχία της εκσκαφής. Ακόμα, προσδιορίζονται τα βασικά σύμβολα των παραμέτρων που υιοθετούνται στα πλαίσια της έρευνας.

3.2. Κώδικας πεπερασμένων αναλύσεων Abaqus

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Όμως, υπήρχε η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι. Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Ένας κώδικας ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων είναι ο κώδικας Abaqus. Έχει ευρεία εφαρμογή στην μηχανική, έχει την δυνατότητα να εξάγει μεγάλο πλήθος αποτελεσμάτων και αποτελείται από προϊόντα λογισμικού, από τα οποία, στη παρούσα εργασία, χρησιμοποιούνται τα παρακάτω:

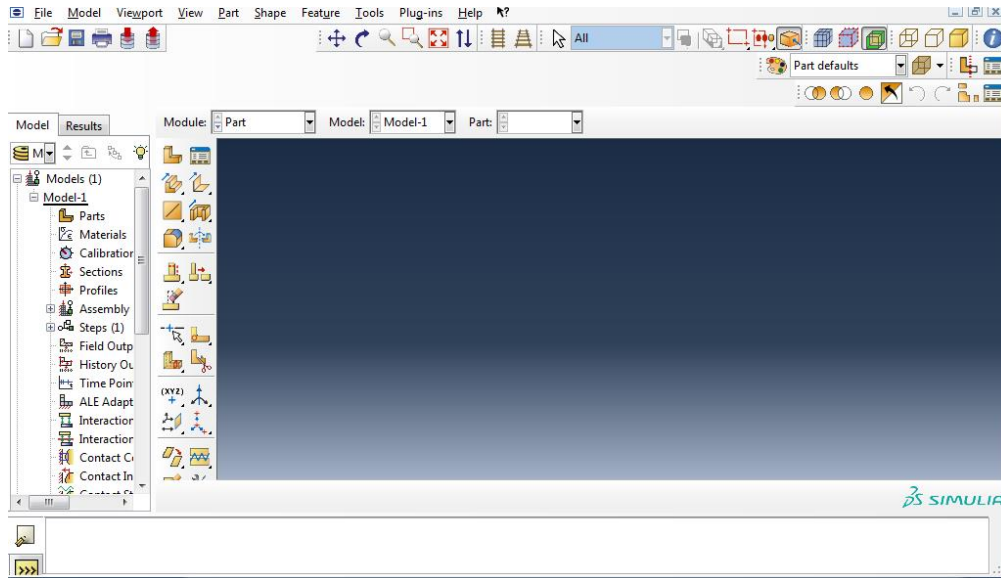
- Abaqus / CAE: Πρόκειται για μια εφαρμογή λογισμικού που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των προσομοιωμάτων.
- Abaqus / Viewer: Χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται στάδια όπως η εισαγωγή της γεωμετρίας της κατασκευής και των συνοριακών συνθηκών μέσω της μοντελοποίησης του προσομοιώματος, και η διακριτοποίηση του καννάβου. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, πραγματοποιείται η δημιουργία αρχείου εισαγωγής δεδομένων στο οποίο εισάγονται υπό μορφής κώδικα τα δεδομένα του μοντέλου που περιγράφουν τους κόμβους, τα πεπερασμένα στοιχεία του γεωυλικού και τα πεπερασμένα στοιχεία της άμεσης υποστήριξης της κάθε σήραγγας. Σε κάθε κόμβο των πεπερασμένων στοιχείων του γεωυλικού για διδιάστατες αναλύσεις υπάρχουν δύο βαθμοί ελευθερίας οι οποίοι περιγράφουν τις μετακινήσεις κατά διεύθυνση (X,Y). Στα πεπερασμένα στοιχεία του κελύφους κάθε στοιχείο κατέχει δύο κόμβους (beam element-B21) και στα πεπερασμένα στοιχεία του εδάφους κάθε στοιχείο κατέχει τέσσερις κόμβους (CPE4). Επίσης εισάγονται οι μηχανικές ιδιότητες του εδάφους (λόγος Poisson ν και μέτρο ελαστικότητας E), αλλά και οι ιδιότητες του σκυροδέματος και το αρχικό γεωστατικό πεδίο. Όταν ολοκληρωθεί η επίλυση των αναλύσεων, χρησιμοποιείται το προϊόν λογισμικού Abaqus/Viewer μέσω του οποίου απεικονίζονται και παράγονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Τα αρχεία που εξάγονται από το Abaqus/Viewer (output files), είναι:

- Οι μετακινήσεις των κόμβων (U)
- Οι πλαστικές παραμορφώσεις των πεπερασμένων στοιχείων (PEMAG)
- Οι αξονικές δυνάμεις στην υποστήριξη (SF)
- Οι καμπτικές ροπές στην υποστήριξη (SM)
- Οι τάσεις (S)

Για το επόμενο βήμα, λόγω της πολυπλοκότητας και της πληθώρας των παραμέτρων, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Excel της Microsoft για την εξαγωγή των γραφημάτων και την μελέτη των αποτελεσμάτων.



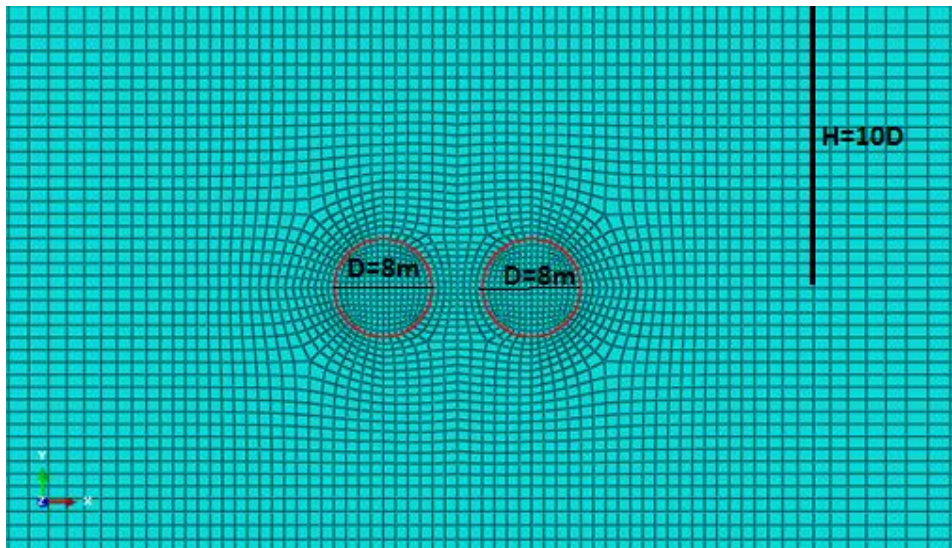
Σχήμα 3-1: Περιβάλλον εργασίας του Abaqus 6.14.

3.3. Γεωμετρική απεικόνιση

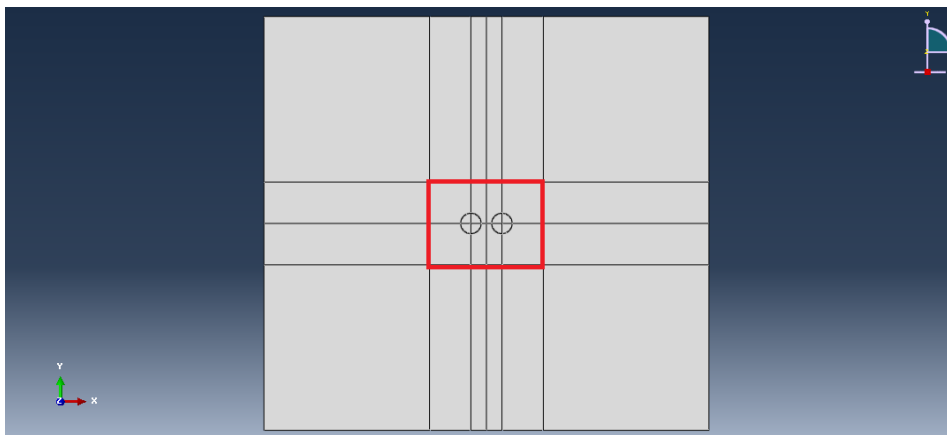
Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας, προκειμένου να διερευνηθεί ο βαθμός της αλληλεπίδρασης δύο παράλληλων σηράγγων εξετάζονται ορισμένες γεωμετρικές παράμετροι και η επιρροή που ασκούν αυτές στην αλληλεπίδραση. Αρχικά εξετάζονται τρεις εγκάρσιες αποστάσεις μεταξύ των σηράγγων ($W/D=4m$, $W/D = 8m$, και $W/D = 16m$). Για κάθε μία από τις παραπάνω αποστάσεις εξετάζονται τριάντα (30) βραχόμαζες με διαφορετικές γεωτεχνικές παραμέτρους, οι οποίες περιγράφονται σε επόμενη ενότητα. Η διάμετρος της κάθε σήραγγας λαμβάνεται ίση με $D=8m$ και το υπερκείμενο πάχος γαιών $H=10D=80m$. Παρακάτω απεικονίζεται η εγκάρσια όψη του προσομοιώματος στο επίπεδο. Φαίνονται λοιπόν οι δύο παράλληλες σήραγγες πριν την εκσκαφή τους. (Σχήμα 3-2)

Κατά την εκκίνηση του Abaqus/CAE, ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες του κατασκευαστικού μοντέλου. Οι κόμβοι του πυθμένα στο κάτω όριο του προσομοιώματος, της κορυφής στο πάνω όριο του προσομοιώματος και στο πλάι δεσμεύτηκαν κατά τις διευθύνσεις X, Y με την μορφή αρθρώσεων. Έπειτα φέρονται οριζόντια και κατακόρυφα ευθύγραμμα τμήματα, έτσι ώστε να τέμνονται στα κέντρα των σηράγγων και στο μέσο της εγκάρσιας μεταξύ τους απόσταση, διευκολύνεται ο σχεδιασμός των σηράγγων. Ακόμα ορίζονται ευθύγραμμα τμήματα για τον καθορισμό της περιοχής αλληλεπίδρασης των σηράγγων, η οποία σταματάει να υπάρχει για απόσταση μεγαλύτερη από δύο διαμέτρους σύμφωνα με τις έρευνες που διεξήχθησαν.

(Σχήμα 3-3)



Σχήμα 3-2: Εγκάρσια όψη του προσομοιώματος με διάμετρο $D=8m$, ύψος υπερκειμένων $H=10D$ και πλάτος πυλώνα $W=0.5D$. Στο σχήμα διακρίνονται οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων του αριθμητικού μοντέλου και οι διατομές των σηράγγων.

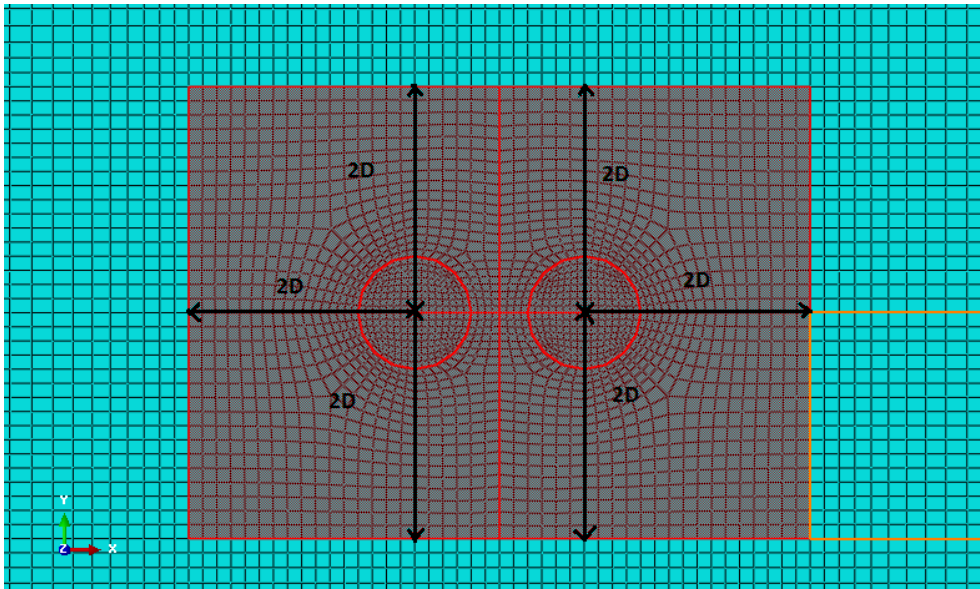


Σχήμα 3-3: Καθορισμός της περιοχής αλληλεπίδρασης των σηράγγων.

3.4. Διακριτοποίηση καννάβου

Στη συνέχεια γίνεται η διακριτοποίηση του καννάβου, η οποία πραγματοποιήθηκε με διδιάστατα τετράπλευρα τετράκομβα (CPE4) πεπερασμένα στοιχεία, εδάφους για την προσομοίωση του γεωλικού και κελύφους για την προσομοίωση της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Απαιτείται η πύκνωση του στις κρίσιμες περιοχές. Κρίσιμες θεωρούνται οι περιοχές συγκέντρωσης των τάσεων και οι περιοχές εμφάνισης των παραμορφώσεων και μετατοπίσεων του εδάφους. Δηλαδή κρίσιμη είναι η περιοχή του σχήματος, η οποία ορίζεται σε οριζόντια και κατακόρυφη απόσταση $2D$ από την κάθε σήραγγα και ιδιαίτερα στην περιοχή περιμετρικά των σηράγγων. Σε αυτήν την περιοχή γίνεται και η λήψη των αποτελεσμάτων. (Σχήμα 3-4)



Σχήμα 3-4: Εγκάρσια όψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$. Στο σχήμα η περιοχή αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων.

Έπειτα πραγματοποιείται ο ορισμός των σετ κόμβων και στοιχείων έτσι ώστε να μορφωθεί το αρχείο εισαγωγής (input file). Ορίζονται λοιπόν τα σετ των κόμβων εδάφους στον πυθμένα, στην κορυφή και στις πλευρές, των κόμβων της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, των κόμβων της διεπιφάνειας εδάφους-υποστήριξης και των κόμβων της εκσκαφής (δηλαδή μέσα από τα όρια της διατομής της σήραγγας). Ακολουθεί ο ορισμός των πεπερασμένων στοιχείων εδάφους, των στοιχείων της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και των στοιχείων της εκσκαφής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι υιοθετείται ο νόμος της διεπιφάνειας εδάφους-υποστήριξης, ο οποίος θεωρεί τις εκατέρωθεν πλευρές της διεπιφάνειας δεσμευμένες μεταξύ τους, χωρίς να επιτρέπει την δυνατότητα ολίσθησης ή αποκόλλησης.

3.5. Βήματα εκσκαφής

Αρχικά ξεκινάει η εκσκαφή της αριστερής σήραγγας και μόλις ολοκληρωθεί ακολουθεί η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας. Η κάθε ανάλυση αποτελείται από 5 βήματα τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια:

○ Βήμα 1

Υπολογισμός των αρχικών γεωστατικών τάσεων πριν από την κατασκευή των σηράγγων. Στο βήμα αυτό αφαιρείται το υλικό της υποστήριξης, καθώς δεν έχει ξεκινήσει ακόμα η εκσκαφή.

○ Βήμα 2

Αποτόνωση στην «μονή σήραγγα», πολλαπλασιάζοντας τις αρχικές δυνάμεις που είχε το προσομοίωμα στην γεωστατική κατάσταση με τον όρο $(1-\lambda)$, όπου λ ο βαθμός αποτόνωσης.

- **Βήμα 3**

Εκσκαφή της αριστερής «μονής» σήραγγας, αφαιρώντας τα πεπερασμένα στοιχεία της εκσκαφής του εδάφους (excavation elements), και τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης από εκτοξευμένο σκυρόδεμα σε αυτήν, προσθέτοντας τα πεπερασμένα στοιχεία της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (support elements).

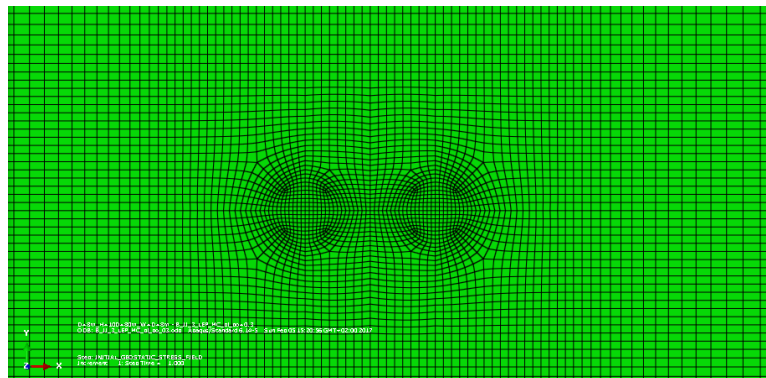
- **Βήμα 4**

Αποτόνωση στην «δεύτερη σήραγγα», πολλαπλασιάζοντας τις αρχικές δυνάμεις που είχε το προσομοίωμα στην γεωστατική κατάσταση με τον όρο (1-λ), όπου λ ο βαθμός αποτόνωσης.

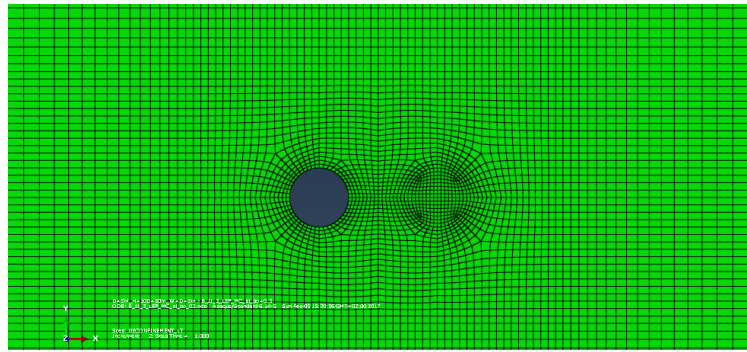
- **Βήμα 5**

Εκσκαφή της δεξιάς «δεύτερης» σήραγγας, αφαιρώντας τα πεπερασμένα στοιχεία της εκσκαφής του εδάφους (excavation elements), και τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης από εκτοξευμένο σκυρόδεμα σε αυτήν, προσθέτοντας τα πεπερασμένα στοιχεία της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (support elements). Μετά από αυτό το βήμα η αριστερή σήραγγα μετονομάζεται σε «πρώτη».

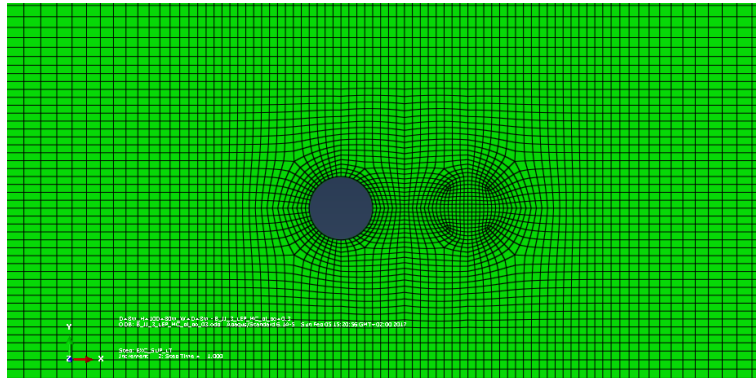
Σε καθένα από τα βήματα μπορούν να εξαχθούν αποτελέσματα για τις παραμορφώσεις και τις μετατοπίσεις του εδάφους. Παράλληλα, για το εκτοξευμένο σκυρόδεμα μπορούν να παρουσιαστούν τα αξονικά φορτία και οι καμπτικές ροπές που δέχεται κάθε στοιχείο της διεπιφάνειας εδάφους-υποστήριξης από την αλληλεπίδραση των σηράγγων. Παρακάτω παρουσιάζεται η σταδιακή πρόοδος της διάνοιξης των δυο σηράγγων, με την αφαίρεση των πεπερασμένων στοιχείων εντός της διατομής της εκσκαφής και την προσθήκη των πεπερασμένων στοιχείων της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος



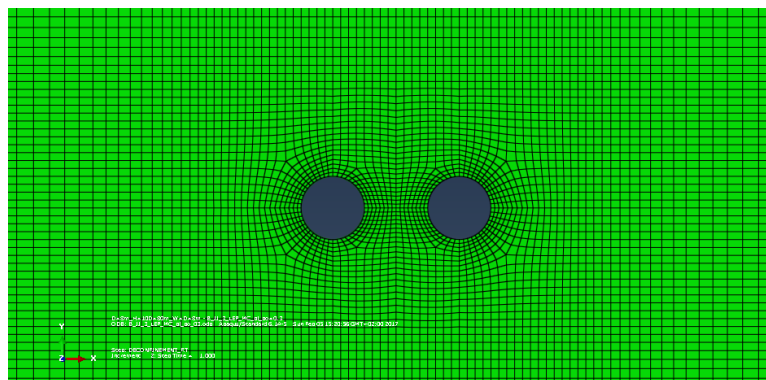
Σχήμα 3-5: Βήμα 1-Υπολογισμός των αρχικών γεωστατικών τάσεων, πριν από την κατασκευή των σηράγγων. Στο βήμα αυτό αφαιρείται το υλικό της υποστήριξης, καθώς δεν έχει ξεκινήσει ακόμα η εκσκαφή.



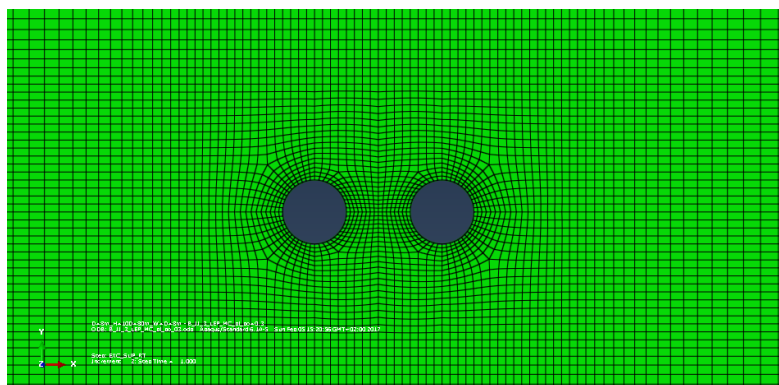
Σχήμα 3-6: Βήμα 2-Αποτόνωση στην «μονή σήραγγα», πολλαπλασιάζοντας τις αρχικές δυνάμεις που είχε το προσομοίωμα στην γεωστατική κατάσταση με τον όρο (1-λ), όπου λ ο βαθμός αποτόνωσης.



Σχήμα 3-7: Βήμα 3-Εκσκαφή της αριστερής «μονής» σήραγγας, αφαιρώντας τα πεπερασμένα στοιχεία της εκσκαφής του εδάφους (excavation elements), και τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης από εκτοξευμένο σκυρόδεμα σε αυτήν, προσθέτοντας τα πεπερασμένα στοιχεία της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (support elements).



Σχήμα 3-8: Βήμα 4-Αποτόνωση στην «δεύτερη σήραγγα», πολλαπλασιάζοντας τις αρχικές δυνάμεις που είχε το προσομοίωμα στην γεωστατική κατάσταση με τον όρο (1-λ), όπου λ ο βαθμός αποτόνωσης.



Σχήμα 3-9: Βήμα 5-Εκσκαφή της δεξιάς «δεύτερης» σήραγγας, αφαιρώντας τα πεπερασμένα στοιχεία της εκσκαφής του εδάφους (excavation elements), και τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης από εκτοξευμένο σκυρόδεμα σε αυτήν, προσθέτοντας τα πεπερασμένα στοιχεία της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (support elements). Μετά από αυτό το βήμα η αριστερή σήραγγα μετονομάζεται σε «πρώτη».

3.6. Παράμετροι αριθμητικών αναλύσεων

Παρακάτω παρουσιάζονται οι γεωμετρικές, οι γεωτεχνικές, καθώς και οι παράμετροι της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η μεταβολή των παραμέτρων στα αριθμητικά προσομοιώματα συντελεί στην διερεύνηση της επιρροής τους στην αλληλεπίδραση των δίδυμων σηράγγων.

3.6.1. Γεωμετρικές παράμετροι

3.6.1.1. Διάμετρος

Η διάμετρος είναι σταθερή και λαμβάνεται ίση με $D=8\text{m}$ για όλες τις αναλύσεις.

3.6.1.2. Πλάτος πυλώνα

Το πλάτος πυλώνα είναι η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των δύο σηράγγων, δηλαδή από την παρειά της μίας σήραγγας μέχρι την παρειά της άλλης. Προκειμένου να διερευνηθεί ο βαθμός της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων εξετάζονται τρία αριθμητικά προσομοιώματα με εγκάρσιες αποστάσεις μεταξύ των σηράγγων

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

3.6.1.3. Υπερκείμενο πάχος γαιών

Το υπερκείμενο πάχος γαιών είναι σταθερή παράμετρος και παίρνει τιμή ίση με $H=10D=80\text{ m}$.

3.6.2. Γεωτεχνικές παράμετροι

Για κάθε μία από τα τρία παραπάνω αριθμητικά προσομοιώματα εξετάζονται τριάντα (30) βραχόμαζες με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες και διαφορετικές παραμέτρους Mohr-Coulomb (ϕ , ψ) και Mohr-Coulomb Hardening (c). Παρακάτω ακολουθεί ο δείκτης ταξινόμησης της βραχόμαζας GSI, η μονοαξονική θλιπτική αντοχή η παράμετρος της βραχόμαζας m_i και ο δείκτης MR. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παράμετροι της βραχόμαζας (σ_{cm} , m_b , s , α) του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown, οι οποίες αναφέρονται στην συνέχεια αντιστοιχούνται σε ισοδύναμες παραμέτρους (c , ϕ) του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb.

3.6.2.1. Δείκτης GSI

Είναι δείκτης ταξινόμησης της βραχώμαζας και κυμαίνεται από GSI=10 έως GSI=50 ,προκειμένου να προσομοιωθούν βραχώμαζες πολύ πτωχής έως μέτριας-καλής ποιότητας.



Σχήμα 3-10: Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI (Hoek&Marinos, 2000). Στην παρούσα έρευνα ο δείκτης κυμαίνεται από GSI=10 έως GSI=50

3.6.2.2. Σταθερά υλικού για άρρηκτο βράχο m_i

Η σταθερά m_i , η οποία εξαρτάται από το είδος του πετρώματος, είναι ίση με $m_i=7$ σε όλες τις αναλύσεις.

3.6.2.3. Συντελεστής αναλογίας MR

Ο συντελεστής MR λαμβάνεται ίσος με MR=350 για όλες τις αναλύσεις.

3.6.2.4. Συντελεστής διατάραξης της βραχόμαζας D

Ο συντελεστής D είναι ένας προτεινόμενος παράγοντας για την διατάραξη της βραχόμαζας. Για βαθιές σήραγγες, συνήθως επιλέγεται τιμή ίση με $D=0$ (χωρίς διατάραξη), όπως και στην παρούσα εργασία με υπερκείμενο πάχος γαιών $H=80m$. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις (αβαθείς σήραγγες, πρηνή και θεμελιώσεις) απαιτείται να γίνεται εκτίμηση του D, ο οποίος κυμαίνεται από $D=0$ έως $D=1$.

3.6.2.5. Αντοχή άρρηκτου βράχου σε ανεμπόδιση θλίψη σ_{ci}

Είναι η αντοχή του άρρηκτου βράχου σε ανεμπόδιση θλίψη σ_{ci} και κυμαίνεται από $\sigma_{ci}=5$ έως $\sigma_{ci}=30$ MPa, προκειμένου να προσομοιωθούν βραχόμαζες που χαρακτηρίζονται ασθενή έως μέτρια ισχυρά πετρώματα.

3.6.2.6. Αντοχή βραχόμαζας σ_m

Η αντοχή της βραχόμαζας σε μονοαξονική θλίψη υπολογίζεται από την σχέση:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \cdot \frac{m_b + 4 \cdot s - a \cdot (m_b - 8 \cdot s) \cdot \left(\frac{m_b}{4} + s\right)^{a-1}}{2 \cdot (1+a) \cdot (2+a)} \quad \text{Hoek et al. (2002)}$$

Όπου:

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

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

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

3.6.2.7. Μέτρο ελαστικότητας E_i του άρρηκτου βράχου και μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας E_m

- ο Το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου υπολογίζεται από την σχέση:

$$E_i(GPa) = MR \cdot \sigma_{ci}$$

- ο Το μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας υπολογίζεται από την σχέση (για $\sigma_{ci} \leq 100 \text{MPa}$)

$$E_m(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad \text{Hoek et al. (2002)}$$

Και από την σχέση:

$$E_m(GPa) = E_i \cdot \left(0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{60+15D-GSI}{11}}}\right) \quad \text{Hoek \& Diederichs (2006)}$$

Η σταθερά MR λήφθηκε ίση με 350 σε όλες τις αναλύσεις.

3.6.2.8. Λόγος Poisson ν της βραχόμαζας

Η τιμή του λόγου Poisson της βραχόμαζας διατηρήθηκε σταθερή σε όλες τις αναλύσεις, και ίση με $\nu=0.3$.

3.6.2.9. Ειδικό Βάρος γ

Το ειδικό βάρος του πετρώματος θεωρείται ίσο με $\gamma=0.025 \text{ MN/m}^3$.

3.6.2.10. Ισοδύναμες παράμετροι διατμητικής αντοχής (c , ϕ)

Μετά από την συσχέτιση των κριτηρίων Hoek-Brown και Mohr-Coulomb προκύπτουν οι ισοδύναμες παράμετροι διατμητικής αντοχής. Η ισοδύναμη συνοχή της βραχόμαζας κυμαίνεται από 0.062 MPa έως 0.434 MPa, ενώ η γωνία τριβής από 17.5° έως 43.8°.

3.6.2.11. Γωνία διαστολικότητας

Η γωνία διαστολικότητας λαμβάνεται ίση με το $\frac{1}{4}$ της γωνίας διατμητικής τριβής, επομένως κυμαίνεται από 4.4° έως 11°.

3.6.2.12. Συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων

Σύμφωνα με τον Καββαδά (2012), ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0 συνήθως κυμαίνεται μεταξύ $K_0=0.4-1.0$ χωρίς να αποκλείονται και μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα, σε υγιείς βραχώμαζες χωρίς επιρροή από τεκτονικές πιέσεις, ο συντελεστής ισούται με $K_0=0.6-1$, ενώ σε αποσαθρωμένες βραχώμαζες με $K_0=0.4-0.7$.

Στην παρούσα εργασία λαμβάνονται οι εξής τιμές:

- $K_0=0.5$
- $K_0=1$

3.6.3. Παράμετροι της άμεσης υποστήριξης

3.6.3.1. Πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Το πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος λαμβάνει την τιμή $d_{sh}=0.2$ m για όλες τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας.

3.6.3.2. Μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος

Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος λαμβάνεται ίσο με $E_{sh}=20$ GPa.

3.6.3.3. Ειδικό βάρος εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Η τιμή του ειδικού βάρους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος θεωρείται ίση με $\gamma_{sh}=0.025$ MN/m³.

3.6.3.4. Λόγος Poisson

Ο λόγος Poisson του εκτοξευόμενου σκυροδέματος λαμβάνεται ίσος με $\nu_{sh}=0.2$.

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι γεωμετρικές, οι γεωτεχνικές παράμετροι και οι παράμετροι της άμεσης υποστήριξης.

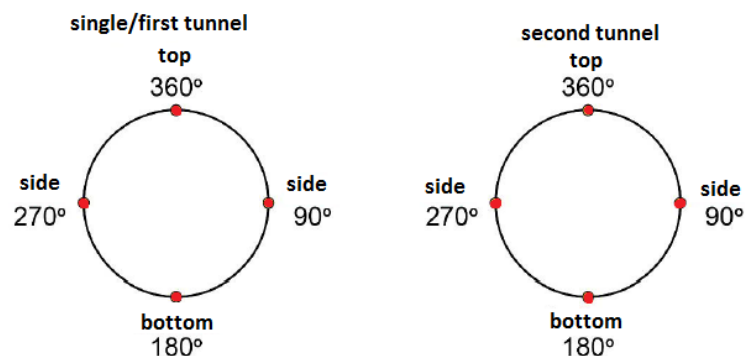
	<u>ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ</u>	<u>ΣΥΜΒΟΛΟ</u>	<u>ΤΙΜΕΣ</u>	<u>ΜΟΝΑΔΕΣ</u>
ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	Διάμετρος Σήραγγας	D	8	m
	Πλάτος Πυλώνα	W	4, 8,16	m
	Ύψος Υπερκείμενων Γαιών	H	80	m
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI	GSI	10-50	-
	Σταθερά Γεωυλικού	m_i	7	-
	Συντελεστής Αναλογίας	MR	350	-
	Συντελεστής Διατάραξης της Βραχόμαζας	D	0	-
	Αντοχή Άρρηκτου Βράχου σε Ανεμπόδιση Θλίψη	σ_{ci}	5-30	Mpa
	Αντοχή Βραχόμαζας σε Ανεμπόδιση Θλίψη	σ_{cm}	0.21 - 4.43	Mpa
	Μέτρο Ελαστικότητας Άρρηκτου Βράχου	$E_i=MR*\sigma_{ci}$	1750-10500	Mpa
	Μέτρο Παραμορφωσιμότητας της Βραχόμαζας	E_m	53.38-3225.45	Mpa
	Λόγος Poisson	ν	0.3	-
	Ειδικό Βάρος	γ	0.025	MN/m ³
	Συνοχή	c	0.062 - 0.434	Mpa
	Γωνία Τριβής	ϕ	17.5 - 43.8	(°)
	Γωνία Διαστολικότητας	$\psi=\phi/4$	4.4 - 11	(°)
	Συντελεστής Οριζόντιων Γεωστατικών Τάσεων	K_o	0.5 , 1	-
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ	Πάχος Σκυροδέματος	d_s	0.2	m
	Μέτρο Ελαστικότητας Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος	E_s	20	GPa
	Ειδικό βάρος	γ_s	0.025	MN/m ³
	Λόγος Poisson	ν_s	0.2	-

Πίνακας 3.1: Πίνακας γεωμετρικών, γεωτεχνικών και παραμέτρων της άμεσης υποστήριξης.

3.7. Παραδοχές αριθμητικών αναλύσεων

Στα πλαίσια της εργασίας, έχουν ληφθεί ορισμένες παραδοχές για την κατανόηση των αποτελεσμάτων που ακολουθούν στο επόμενο κεφάλαιο, οι οποίες παρουσιάζονται και επεξηγούνται σε αυτή την ενότητα. Αρχικά όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω οι αριθμητικές αναλύσεις του προσομοιώματος ακολουθούν τα παρακάτω βήματα. Αρχικά πραγματοποιείται η εκσκαφή της αριστερής «μονής» σήραγγας (single tunnel), και έπειτα εφαρμόζεται η υποστήριξη σε αυτήν. Μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής της αριστερής σήραγγας, πραγματοποιείται η εκσκαφή και η υποστήριξη της δεξιάς σήραγγας. Σε αυτό το σημείο η «μονή» σήραγγα μετονομάζεται σε «πρώτη» (first tunnel) και η δεξιά ονομάζεται «δεύτερη» (second tunnel). Ως βάση σύγκρισης κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων λαμβάνεται η «μονή» σήραγγα, της οποίας τα εξαγόμενα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά της «πρώτης» και της «δεύτερης» σήραγγας. Αναφορικά με τα αποτελέσματα, η «μονή» σήραγγα και η «δεύτερη» παρουσιάζουν ίδιο προφίλ κατανομής αξονικών δυνάμεων και τάσεων.

Επίσης ένας παράγοντας που συντελεί στην ορθότητα της σύγκρισης κατά τη διαδικασία της ανάλυσης των αποτελεσμάτων, είναι ο προσανατολισμός των γωνιών των σηράγγων και η ανάλογη σύγκριση αυτών. Ο προσανατολισμός των γωνιών λοιπόν (γωνία Θ) έχει προσδιοριστεί να είναι σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού και στις δύο σήραγγες. Πιο συγκεκριμένα, η γωνία 90° αντιστοιχεί στην δεξιά παρειά της διατομής της σήραγγας, η γωνία 180° αναφέρεται στον πυθμένα, η γωνία 270° στην αριστερή παρειά και η γωνία 360° στην στέψη της διατομής. Οι εσωτερικές και εξωτερικές, ως προς τον πυλώνα, παρειές των σηράγγων αναφέρονται στην γωνία 90° της αριστερής σήραγγας και τη γωνία 270° της δεξιάς σήραγγας αντίστοιχα.



Σχήμα 3-11: Προσανατολισμός των γωνιών της αριστερής (single/first tunnel) και της δεξιάς σήραγγας (second tunnel), σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού.

4. Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων

4.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα αντιπροσωπευτικών αναλύσεων, ώστε να ερευνηθεί η επίδραση του πλάτους του πυλώνα, δηλαδή η επίδραση της εγκάρσιας απόστασης των σηράγγων από παρειά σε παρειά W , η επιρροή των γεωτεχνικών συνθηκών, του συντελεστή των οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0 και του συντελεστή του βαθμού αποτόνωσης λ , στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων.

4.1.1. Επίδραση των γεωτεχνικών συνθηκών

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων αναφορικά με την επίδραση των γεωτεχνικών συνθηκών στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων, χρησιμοποιείται ενδεικτικά η δυσμενέστερη τιμή για το πλάτος πυλώνα, δηλαδή $W=0.5D=4m$ και λαμβάνονται οι τιμές για τον συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=1$ και για τον συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$. Παρακάτω λοιπόν παρουσιάζονται οι τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές παράμετροι των δύο αντιπροσωπευτικών βραχομαζών.

GSI	10
σ_{ci} (MPa)	10
σ_{cm} (MPa)	0.43
E_i (Mpa)	3500
E_m (MPa)	106.76
m_i	7
D	0
ν	0.3
c (MPa)	0.079
ϕ (°)	21.1
δ (°)	5.3
σ_{cm}/ρ_0	0.21

Πίνακας 4.1: Πίνακας γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχώμαζας πολύ πτωχής ποιότητας.

GSI	20
σ_{ci} (MPa)	10
σ_{cm} (MPa)	0.67
E_i (Mpa)	3500
E_m (MPa)	159.85
m_i	7
D	0
ν	0.3
c(MPa)	0.121
ϕ (°)	25.7
δ (°)	6.4
σ_{cm}/ρ_0	0.34

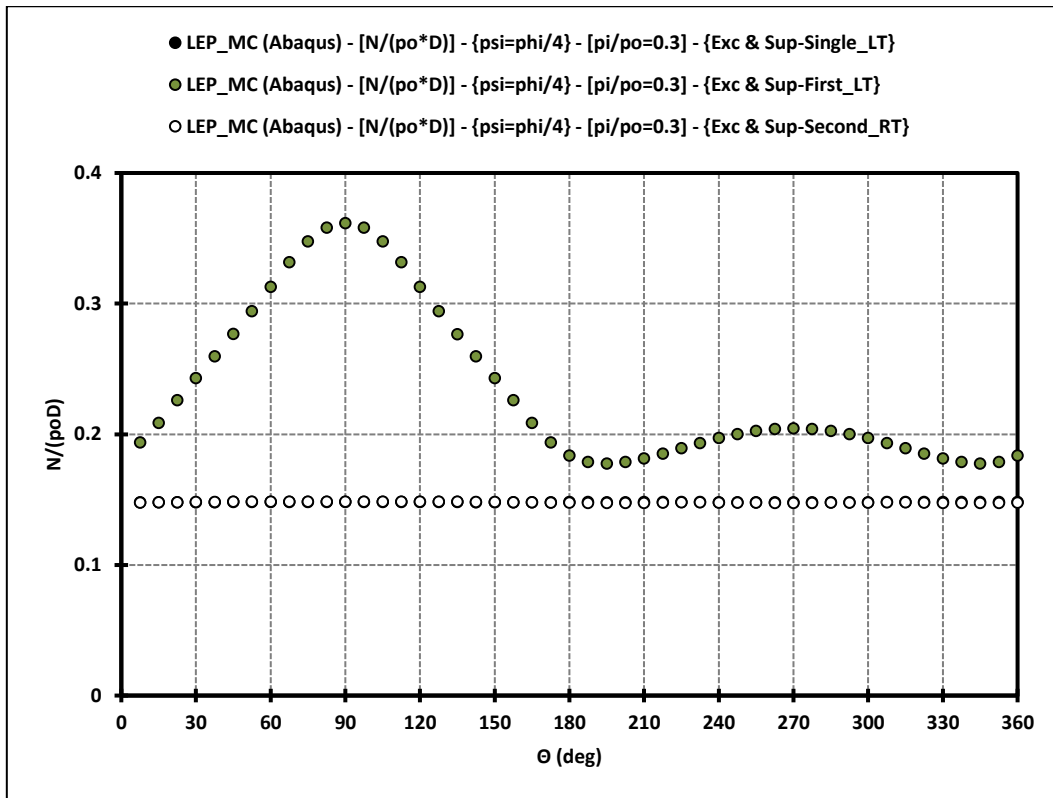
Πίνακας 4.2: Πίνακας γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχώμαζας πτωχής ποιότητας.

Παρακάτω ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων για τις δύο προαναφερθείσες βραχόμαζες υπό μορφή γραφημάτων που περιλαμβάνουν τα εντατικά μεγέθη, τις αξονικές, τέμνουσες δυνάμεις και τις ροπές κάμψης, και τις ορθές τάσεις που καταπονούν την άμεση υποστήριξη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα ακόμα περιλαμβάνουν τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων-καμπτικών ροπών και αξονικών-τέμνουσών δυνάμεων για τον έλεγχο αστοχίας της άμεσης υποστήριξης. Σε όλα τα γραφήματα παρατηρείται ότι η εκσκαφή της δεξιάς σήραγγας επηρεάζει σημαντικά το υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης της αριστερής και έτσι η «πρώτη» σήραγγα (first tunnel) δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση σε σχέση με τη «μονή» σήραγγα (single tunnel) ή τη «δεύτερη» σήραγγα (second tunnel). Η μεγιστοποίηση των μεγεθών εμφανίζεται στην εσωτερική παρειά ($\Theta=90^\circ$) της «πρώτης» σήραγγας που γειτνιάζει με την περιοχή του πυλώνα. Αυτό υποδεικνύει ότι λόγω της εκσκαφής της νέας σήραγγας, παρουσιάζεται μια «μεταφορά φορτίου» από τη «δεύτερη» στην «πρώτη» και στο σημείο αυτό ($\Theta=90^\circ$) παρουσιάζεται η μεγιστοποίηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης.

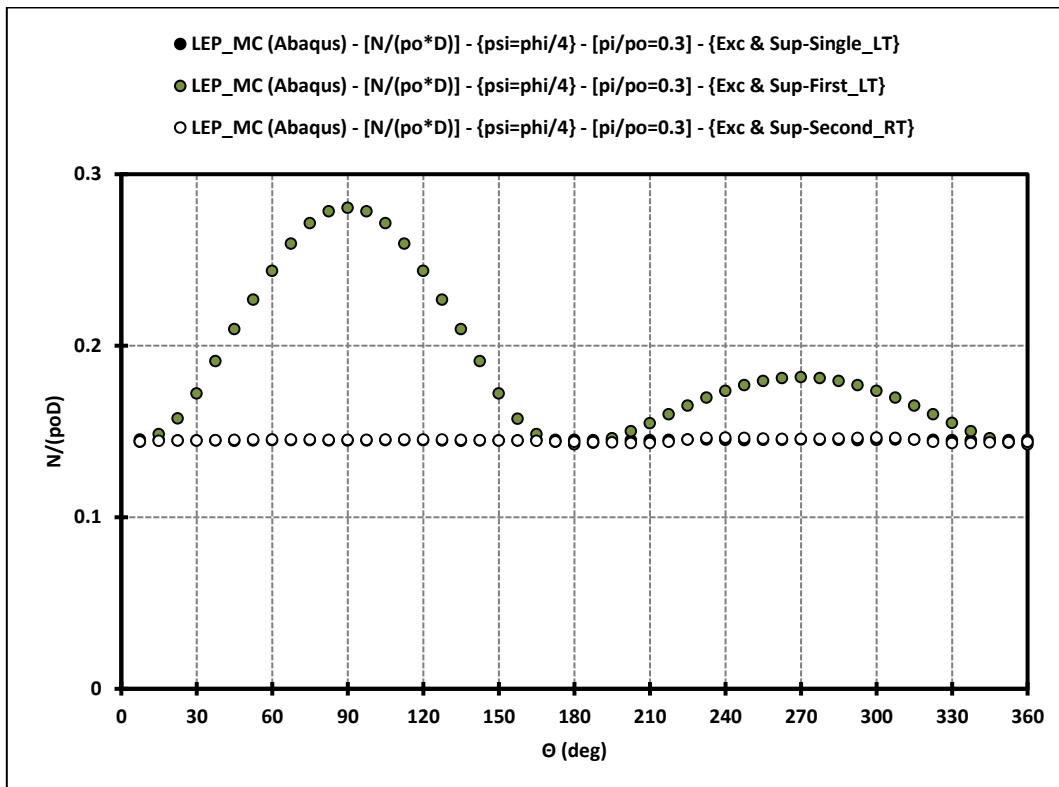
4.1.1.1. Αξονικές δυνάμεις N

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αξονικών δυνάμεων N που ασκούνται στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων για πολύ πτωχή βραχόμαζα και για πτωχή έως μέτρια βραχόμαζα. Στα επόμενα γραφήματα παρουσιάζεται η αξονική δύναμη N κανονικοποιημένη ως προς το γινόμενο της αρχικής γεωστατικής τάσης p_0 και της διαμέτρου της σήραγγας D, συναρτήσει της γωνίας Θ , δηλαδή του προσανατολισμού των γωνιών των σηράγγων. Για τις αξονικές δυνάμεις που καταπονούν το κέλυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης, παρατηρείται στα γραφήματα ότι η πιο ασθενής βραχόμαζα δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση από αυτή που δέχεται η μέτρια.

Ακόμα, ανεξαρτήτως των γεωτεχνικών συνθηκών, η «πρώτη» σήραγγα (first tunnel) δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση σε σχέση με τη «μονή» (single tunnel) ή τη «δεύτερη» (second tunnel). Η μεγιστοποίηση της αξονικής δύναμης εμφανίζεται στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» σήραγγας ($\Theta=90^\circ$). Επίσης, όπως φαίνεται στα παρακάτω γραφήματα, η «δεύτερη» σήραγγα παρουσιάζει ίδιο προφίλ με αυτό της «μονής» σήραγγας.



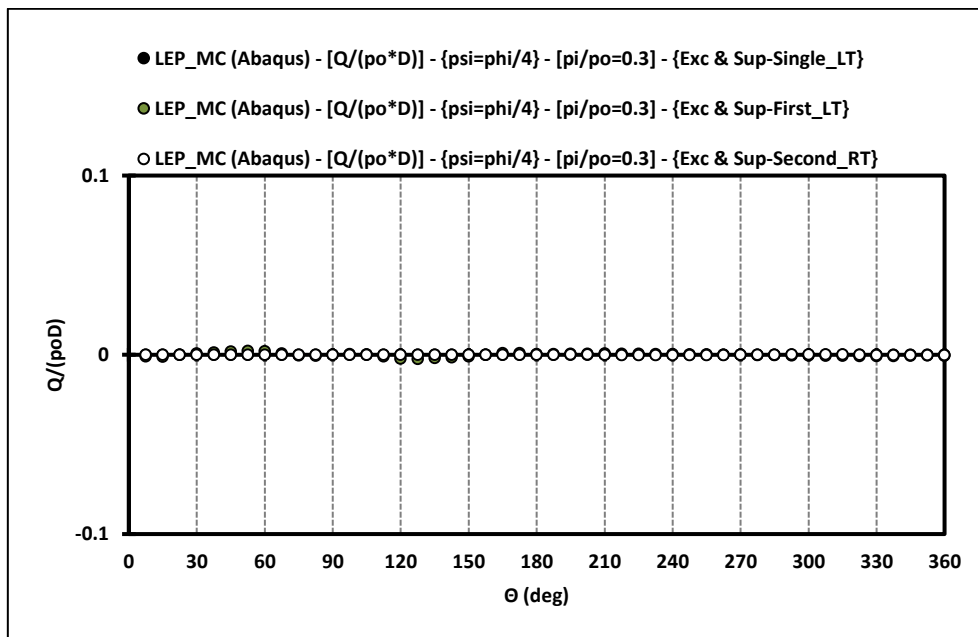
Γράφημα 4-1: Κατανομή της κανονικοποιημένης αξονικής δύναμης $N/\rho_o D$, επί της άμεσης υποστήριξης, συναρτήσει της γωνίας θ , για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_o=1$, συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$ και λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$).



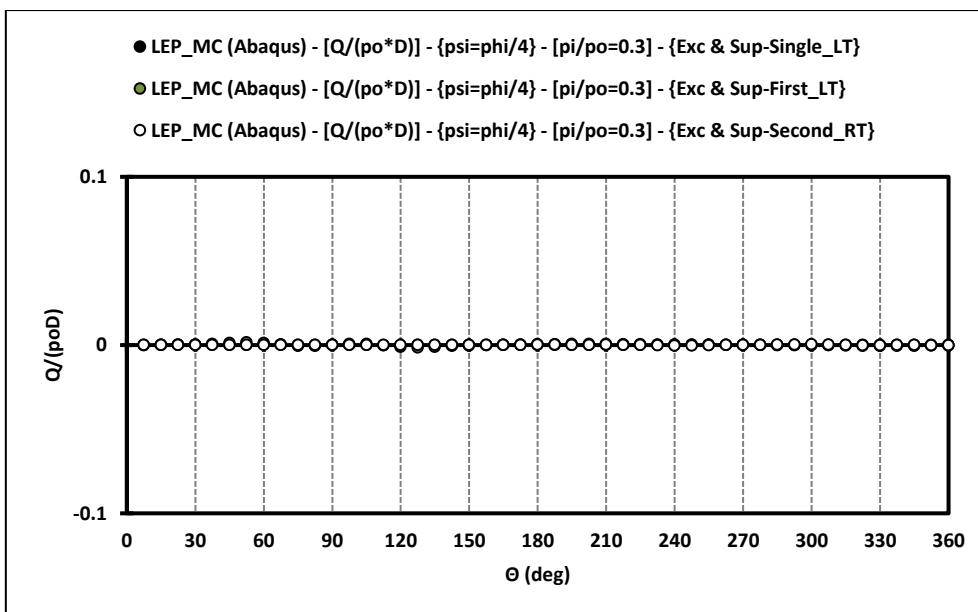
Γράφημα 4-2: Κατανομή της κανονικοποιημένης αξονικής δύναμης $N/\rho_o D$, επί της άμεσης υποστήριξης, συναρτήσει της γωνίας θ , για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_o=1$, συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$ και λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.34$).

4.1.1.2. Τέμνουσες δυνάμεις Q

Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται οι τέμνουσες δυνάμεις που ασκούνται στην άμεση υποστήριξη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος των σηράγγων κανονικοποιημένες ως προς το γινόμενο της αρχικής γεωστατικής τάσης p_0 και της διαμέτρου της σήραγγας D , συναρτήσει της γωνίας Θ και για τις δύο αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις γεωτεχνικών συνθηκών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι και στις δύο βραχόμαζες με διαφορετικές γεωτεχνικές συνθήκες η καταπόνηση του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος από την τέμνουσα δύναμη είναι περιορισμένη. Γι'αυτό, στη συνέχεια επιλέγεται να μην παρουσιάζεται το συγκεκριμένο μέγεθος στο συγκεκριμένο τύπο γραφημάτων (διατομή της σήραγγας), αλλά να αξιολογείται μέσω των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης για την επάρκεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



Γράφημα 4-3: Κατανομή της κανονικοποιημένης τέμνουσας δύναμης $Q/\rho_0 D$, επί της άμεσης υποστήριξης, συναρτήσει της γωνίας Θ , για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4\text{m}$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=1$, συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$ και λόγο γεωτεχνικών συνθηκών $(\sigma_{cm}/\rho_0=0.21)$.

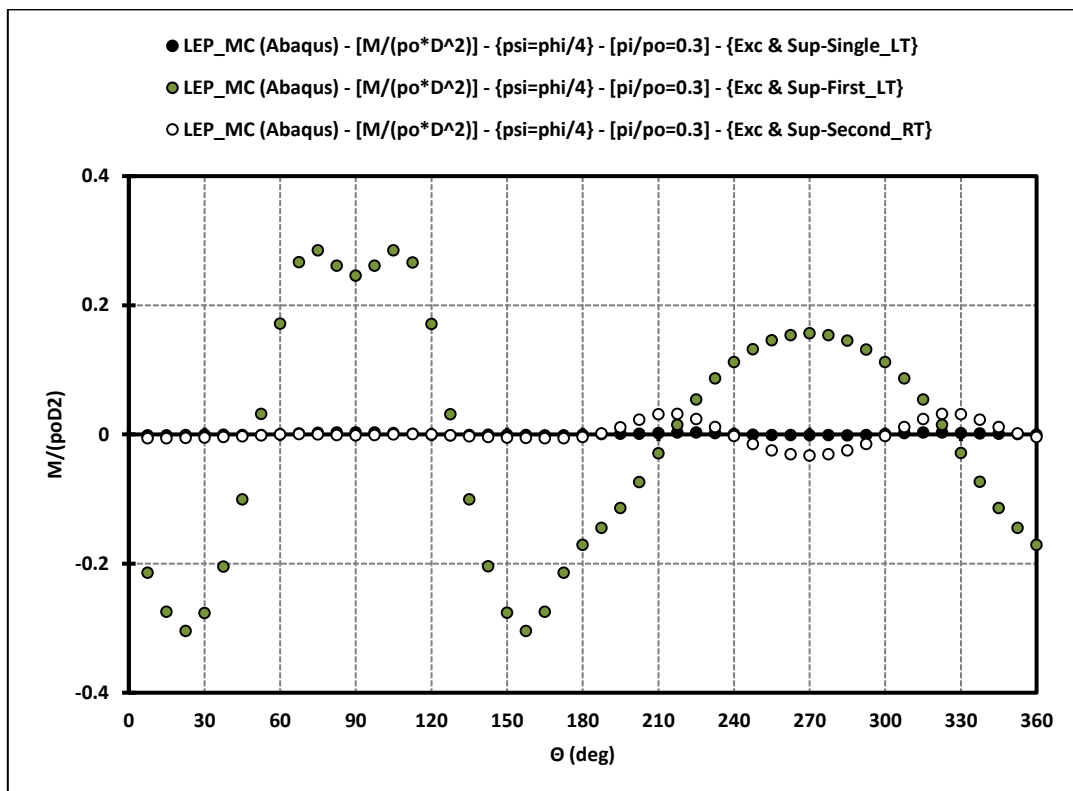


Γράφημα 4-4: Κατανομή της κανονικοποιημένης τέμνουσας δύναμης $Q/\rho_0 D$, επί της άμεσης υποστήριξης, συναρτήσει της γωνίας Θ , για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4\text{m}$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=1$, συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$ και λόγο γεωτεχνικών συνθηκών $(\sigma_{cm}/\rho_0=0.34)$.

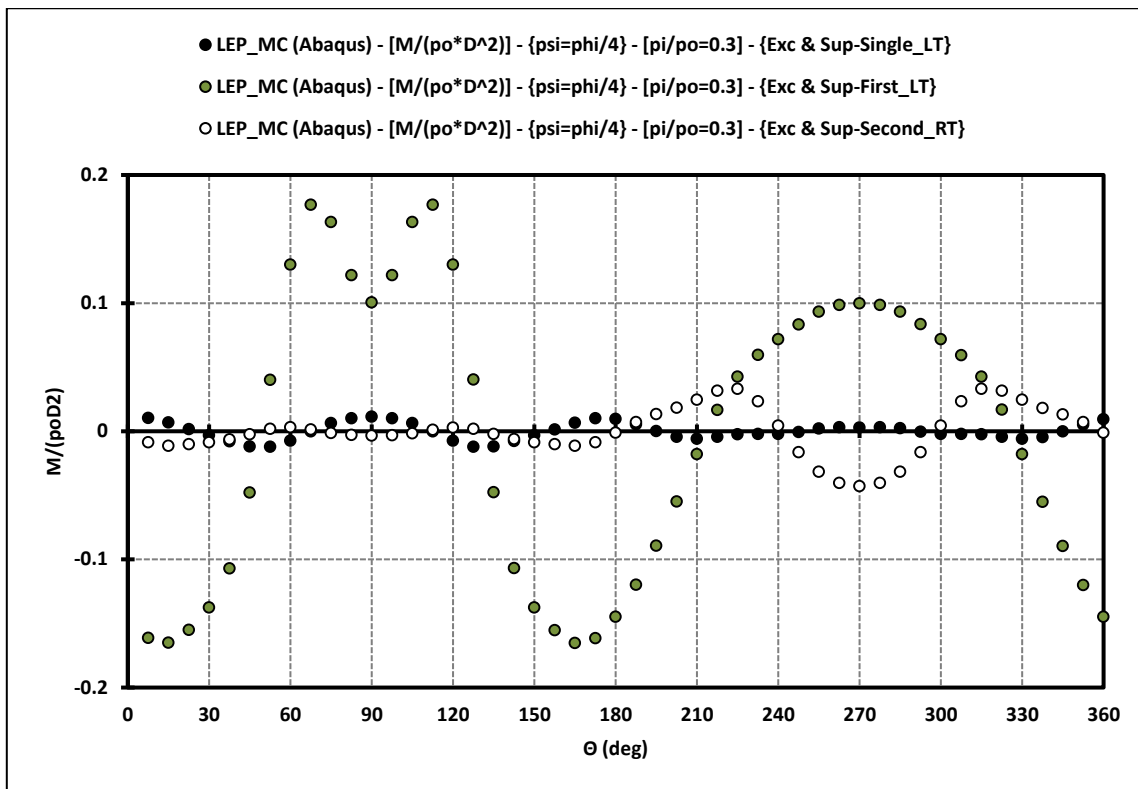
4.1.1.3. Καμπτικές ροπές M

Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται οι καμπτικές ροπές M που ασκούνται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα των σηράγγων κανονικοποιημένες ως προς το γινόμενο της αρχικής γεωστατικής τάσης p_0 και του τετραγώνου της διαμέτρου της σήραγγας D^2 , συναρτήσει της γωνίας Θ και για τις δύο αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις γεωτεχνικών συνθηκών. Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα με διαφορετικές γεωτεχνικές συνθήκες, φαίνεται ότι η πολύ πτωχή βραχόμαζα δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση από αυτήν που δέχεται η βραχόμαζα πτωχής έως μέτριας ποιότητας. Αυτό είναι λογικό, καθώς η πολύ πτωχή βραχόμαζα είναι ισχυρά κερματισμένη με πτωχό αλληλοκλείδωμα μεταξύ των τεμαχών της, οπότε παρουσιάζει μειωμένη αντοχή και αυξημένη παραμορφωσιμότητα.

Ακόμα για την πολύ πτωχή βραχόμαζα (Γράφημα 4-5) παρατηρείται ότι η «πρώτη» σήραγγα δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση σε σχέση με τη «μονή» ή τη «δεύτερη», ενώ η μεγιστοποίηση της αξονικής δύναμης εμφανίζεται στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» σήραγγας ($\Theta=90^\circ$). Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι η αριστερή σήραγγα παραλαμβάνει μεγαλύτερο μέρος φορτίου σε σχέση με τη δεξιά, και αυτή η διαφορά στην καταπόνηση μειώνεται με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών. Αναφορικά στην κατανομή και στο μέγεθος των επαγόμενων καμπτικών ροπών στην άμεση υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας, είναι παρόμοια με της «μονής».



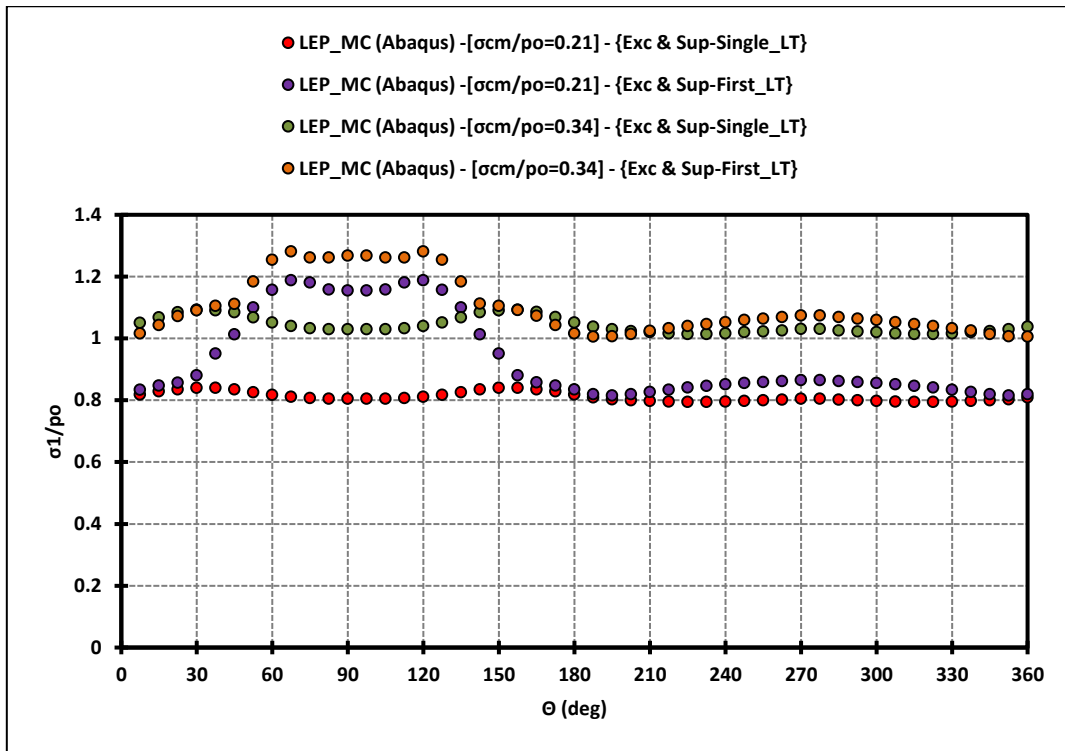
Γράφημα 4-5: Κατανομή της κανονικοποιημένης ροπής κάμψης ($M/p_0 D^2$), επί της άμεσης υποστήριξης, συναρτήσει της γωνίας Θ , για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=1$, συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$ και λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/p_0=0.21$).



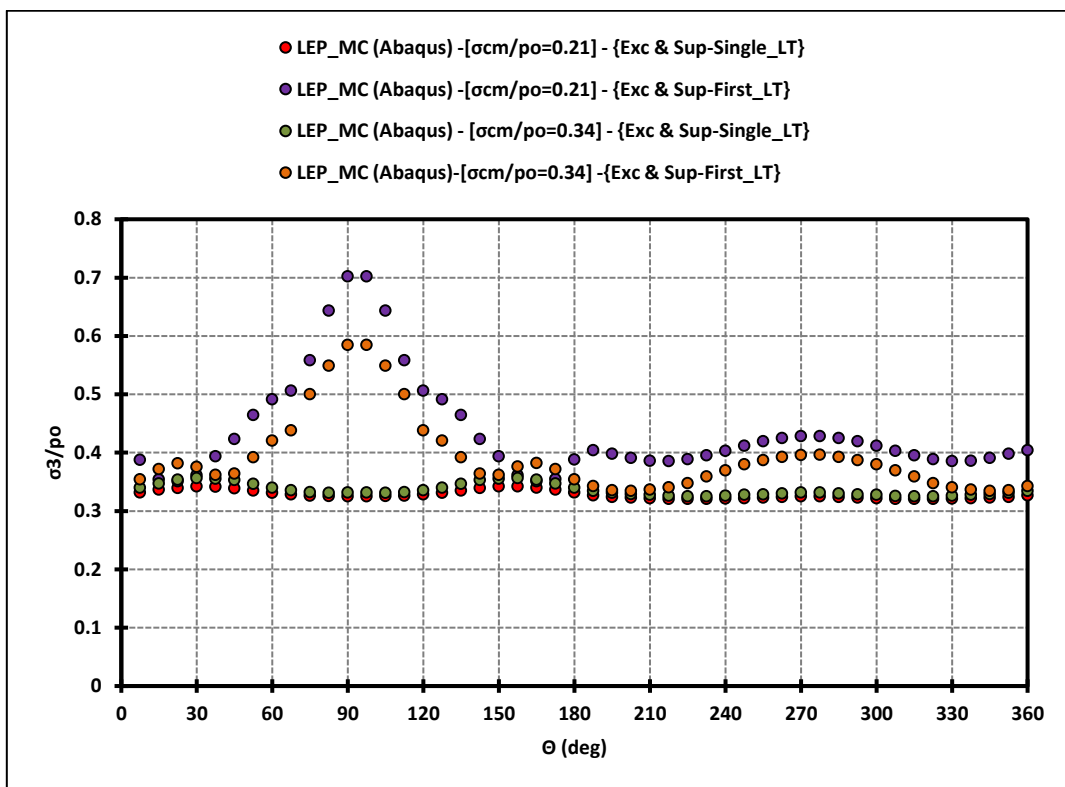
Γράφημα 4-6: Κατανομή της κανονικοποιημένης ροπής κάμψης ($M/\rho_o D^2$), επί της άμεσης υποστήριξης, συναρτήσει της γωνίας Θ , για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_o=1$, συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$ και λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.34$).

4.1.1.4. Κύριες τάσεις

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι κατανομές της κανονικοποιημένης μέγιστης κύριας τάσης ως προς την γεωστατική τάση (σ_1/ρ_o) και της κανονικοποιημένης ελάχιστης κύριας τάσης ως προς την γεωστατική τάση (σ_3/ρ_o) αντίστοιχα. Παρουσιάζονται για το ελάχιστο πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$, για τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=1$ και του συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$. Ανεξάρτητα, από τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των βραχομαζών, η «μονή» σήραγγα εμφανίζει ομοιόμορφη κατανομή τάσεων, ενώ η «πρώτη» παρουσιάζει μεγιστοποίηση τάσεων στην εσωτερική παρειά της ($\Theta=90^\circ$). Στην συγκεκριμένη περίπτωση του ομοιόμορφου αρχικού εντατικού πεδίου ($K_o=1$), για την εκσκαφή και υποστήριξη της «μονής» σήραγγας, η μέγιστη κύρια τάση ταυτίζεται με την εφαπτομενική τάση ($\sigma_1=\sigma_\theta$), η οποία αυξάνεται σε σχέση με την αρχική τάση ($\sigma_o=\gamma H$), ενώ η ελάχιστη κύρια τάση ταυτίζεται με την ακτινική τάση ($\sigma_3=\sigma_r$), η οποία μειώνεται σε σχέση με την αρχική τάση ($\sigma_o=\gamma H$).



Γράφημα 4-7: Κατανομή της κανονικοποιημένης μέγιστης κύριας τάσης (σ_1/ρ_0), συναρτήσει της γωνίας Θ , για διαφορετικές τιμές του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_0 , πλάτους πυλώνα $W=0.5D=4m$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=1$ και συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$.



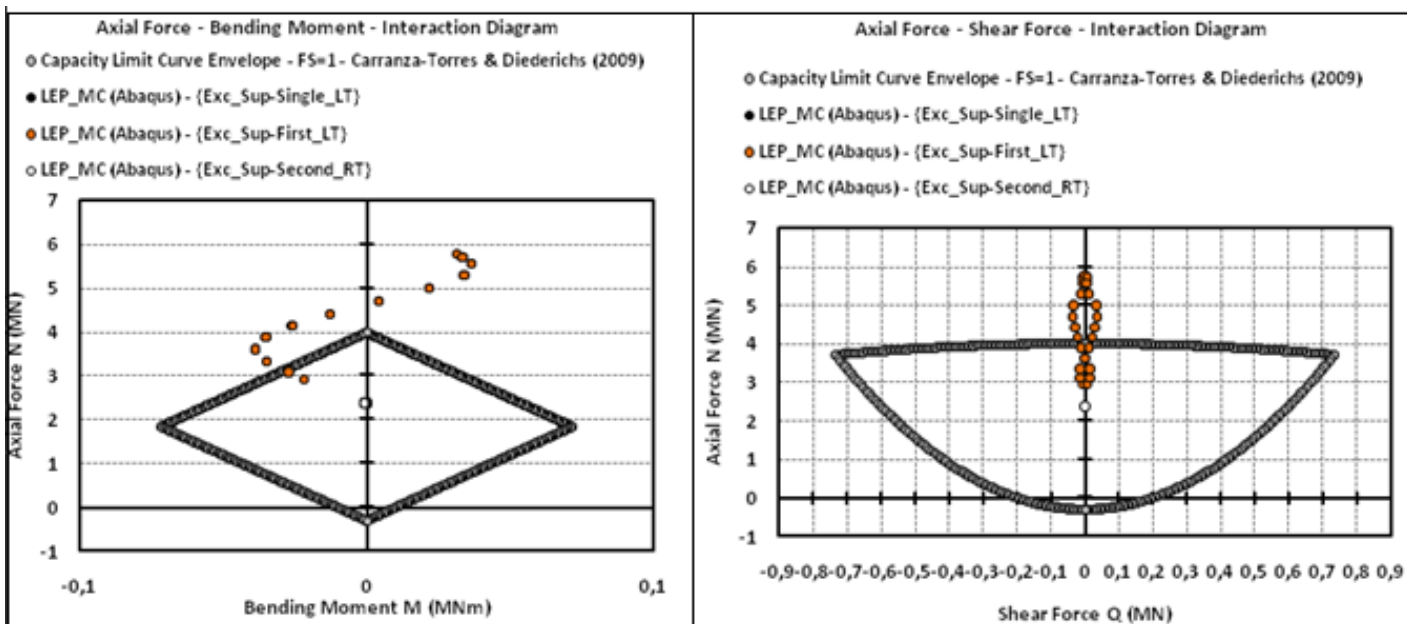
Γράφημα 4-8: Κατανομή της κανονικοποιημένης ελάχιστης κύριας τάσης (σ_3/ρ_0), συναρτήσει της γωνίας Θ , για διαφορετικές τιμές γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_0 , πλάτους πυλώνα $W=0.5D=4m$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=1$ και συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$.

4.1.1.5. Έλεγχος αστοχίας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος

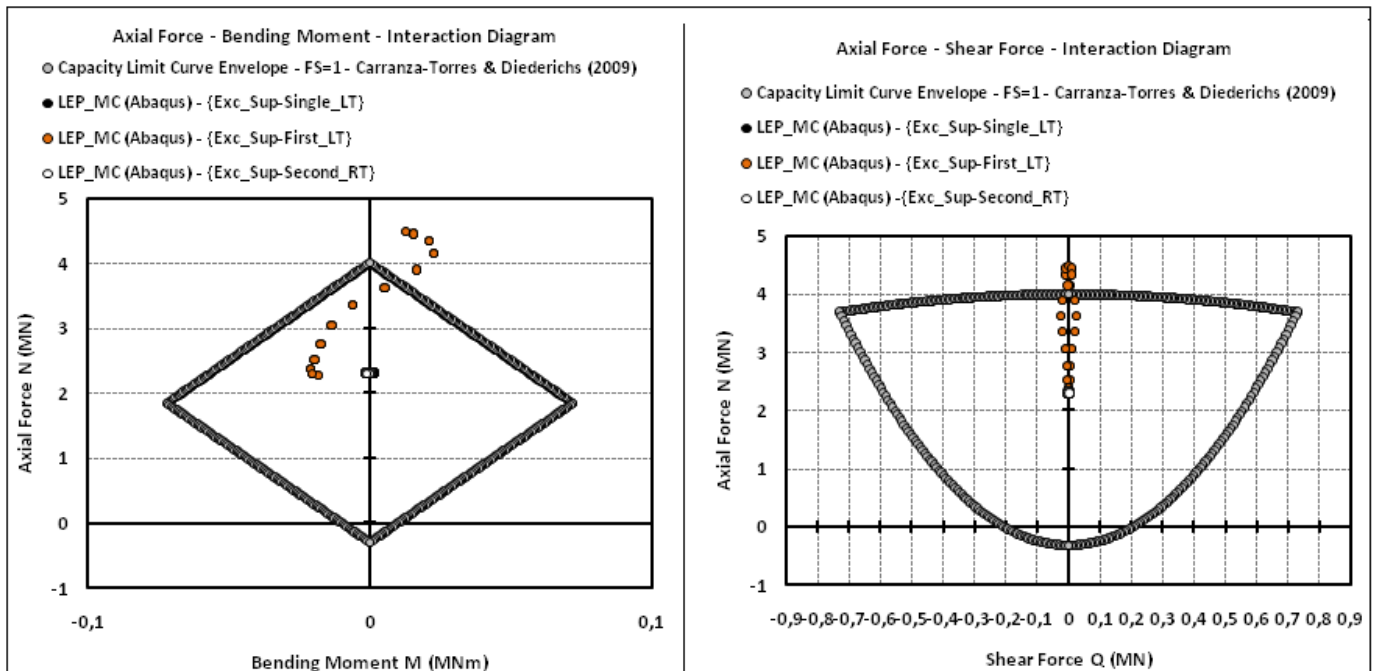
Στα διαγράμματα αλληλεπίδρασης που παρουσιάζονται παρακάτω, παρατηρείται ότι το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της «πρώτης» σήραγγας, μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής της «δεύτερης», για τιμή ίση με $d_{sh}=0.2m$ αστοχεί και στις δύο περιπτώσεις γεωτεχνικών συνθηκών. Από περεταίρω ελέγχους που έγιναν, αποδεικνύεται ότι για ποιότητα σκυροδέματος C20/25, για την βραχώμαζα με τις ασθενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες απαιτείται ελάχιστο πάχος $d_{sh}=0.35m$, ενώ για τις πιο βελτιωμένες γεωτεχνικές συνθήκες το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι $d_{sh}=0.25m$, έτσι ώστε να αποφευχθεί η αστοχία του. Διαφορετικά, εναλλακτική λύση θα ήταν η επιλογή καλύτερης ποιότητας σκυροδέματος με την διατήρηση του αρχικού του πάχους.

Ποιότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος		C20/25	C20/25
Γεωτεχνικές συνθήκες	σ_{cm}/ρ_o	0.21	0.34
Ελάχιστο απαιτούμενο πάχος σκυροδέματος	d_{sh}	0.35	0.25

Πίνακας 4.3: Πίνακας ποιότητας και πάχους εκτοξευόμενου σκυροδέματος για διάφορες γεωτεχνικές συνθήκες σ_{cm}/ρ_o .



Γράφημα 4-9: Εντατικά μεγέθη επί της άμεσης υποστήριξης για λόγο γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$ στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - καμπτικών ροπών (αριστερά) και στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - τεμνουσών δυνάμεων (δεξιά).



Γράφημα 4-10: Εντατικά μεγέθη επί της άμεσης υποστήριξης για λόγο γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_{cm}/\rho_o=0.34$ στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - καμπτικών ροπών (αριστερά) και στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - τεμνουσών δυνάμεων (δεξιά).

4.1.2. Επίδραση του πλάτους του πυλώνα

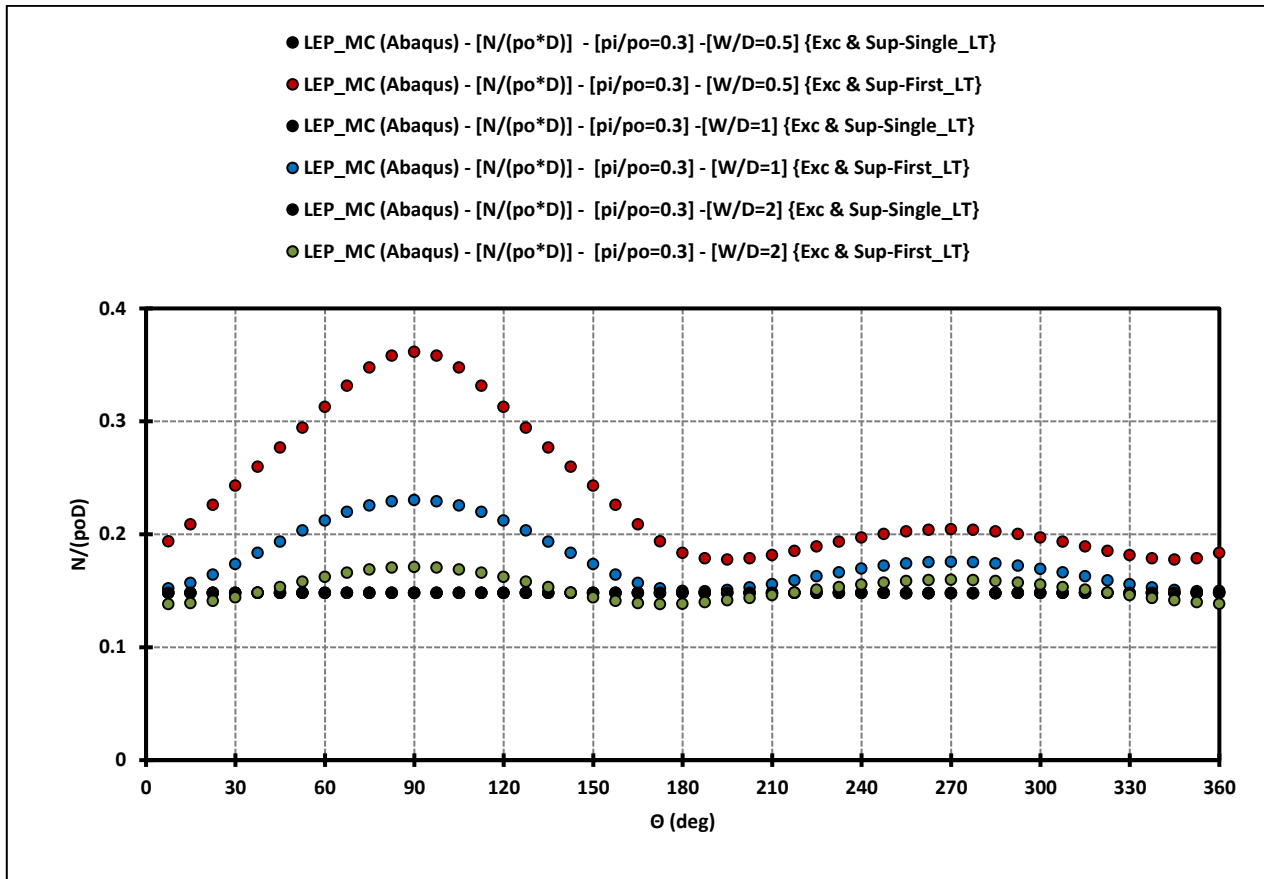
Έχουν επιλεγεί να παρουσιαστούν αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων με πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$, $W/D=1$ και $W/D=2$. Για πλάτος πυλώνα W μεγαλύτερο από την διπλάσια τιμή της διαμέτρου, παρατηρήθηκε ότι το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης παραμένει περίπου στο ίδιο επίπεδο. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν αναφέρονται στα εντατικά μεγέθη (αξονικές δυνάμεις και ροπές κάμψης), καθώς και στις ορθές τάσεις που δέχεται η άμεση υποστήριξη των σηράγγων. Τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν αναφέρονται για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$, με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=1$ και για την δυσμενέστερη βραχόμαζα, δηλαδή βραχόμαζα πολύ πτωχής ποιότητας.

4.1.2.1. Αξονικές δυνάμεις N

Παρουσιάζονται παρακάτω στο γράφημα οι αξονικές δυνάμεις κανονικοποιημένες ως προς το γινόμενο της αρχικής γεωστατικής τάσης ρ_o και της διαμέτρου της σήραγγας D , συναρτήσει της γωνίας θ , για την βραχόμαζα με τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες (Πίνακας 4.1) με σκοπό να επισημανθεί η μεγιστοποίηση του φαινομένου. Προκειμένου να παρουσιαστεί η επίδραση της εγκάρσιας απόστασης μεταξύ των παρειών των σηράγγων στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, ακολουθούν τα αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων με πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$, $W/D=1$ και $W/D=2$ και για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=1$.

Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης φαίνεται να επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις στο μέγεθος και την κατανομή των αξονικών δυνάμεων της άμεσης υποστήριξης. Η άμεση υποστήριξη της «δεύτερης» και της «μονής» σήραγγας εμφανίζουν πρακτικά ίδια μεγέθη και ίδια κατανομή αξονικών δυνάμεων, επομένως επιλέγεται να παρουσιαστεί μόνο αυτή της «μονής» σήραγγας έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι πιο ευδιάκριτα.

Για $W/D=0.5$ παρατηρείται ότι η εκκαφή της δεξιάς σήραγγας επηρεάζει σημαντικά το υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης της αριστερής με την εμφανή αύξηση των αξονικών δυνάμεων. Βέβαια όσο αυξάνεται το πλάτος πυλώνα W/D , ελαχιστοποιείται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δίδυμων σηράγγων, επομένως υπάρχει μείωση των αξονικών φορτίων, δηλαδή η κατανομή που αντιστοιχεί στην «πρώτη» σήραγγα πλησιάζει περισσότερο την κατανομή της «μονής».



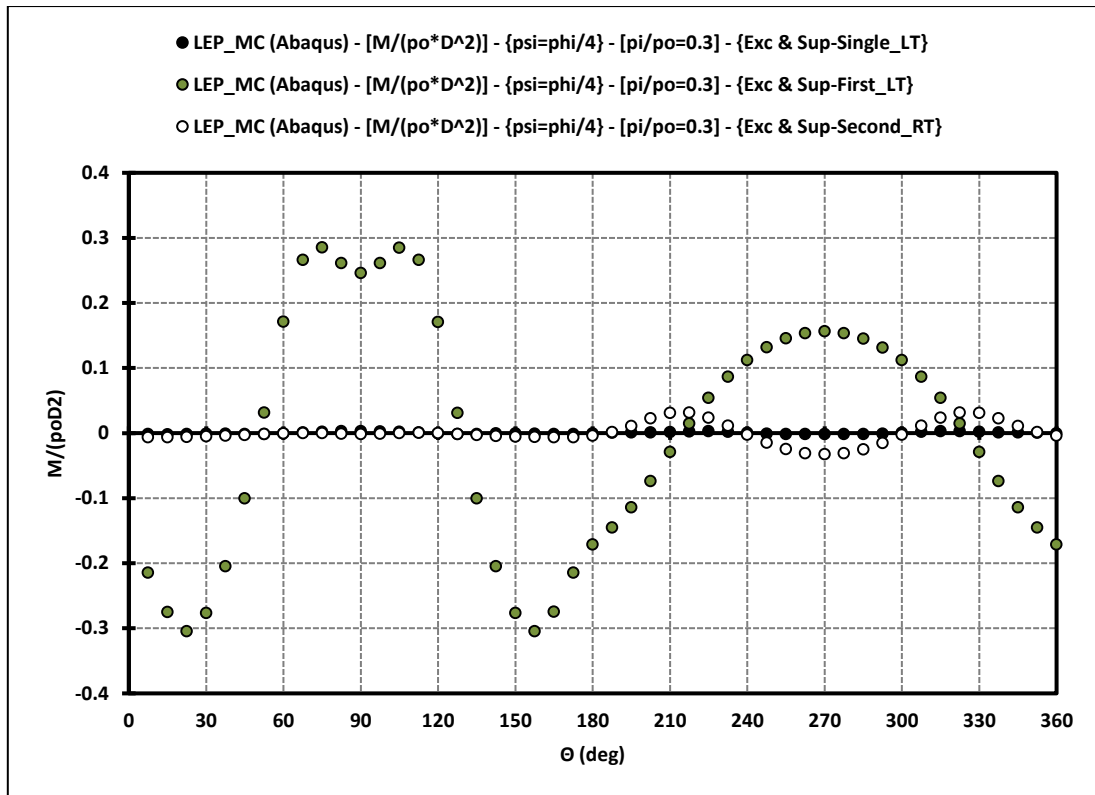
Γράφημα 4-11: Κατανομή της μέσης αξονικής δύναμης $N/\rho_0 D$, συναρτήσει της γωνίας Θ , για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=1$, συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$ και το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_0=0.21$).

4.1.2.2. Καμπτικές ροπές M

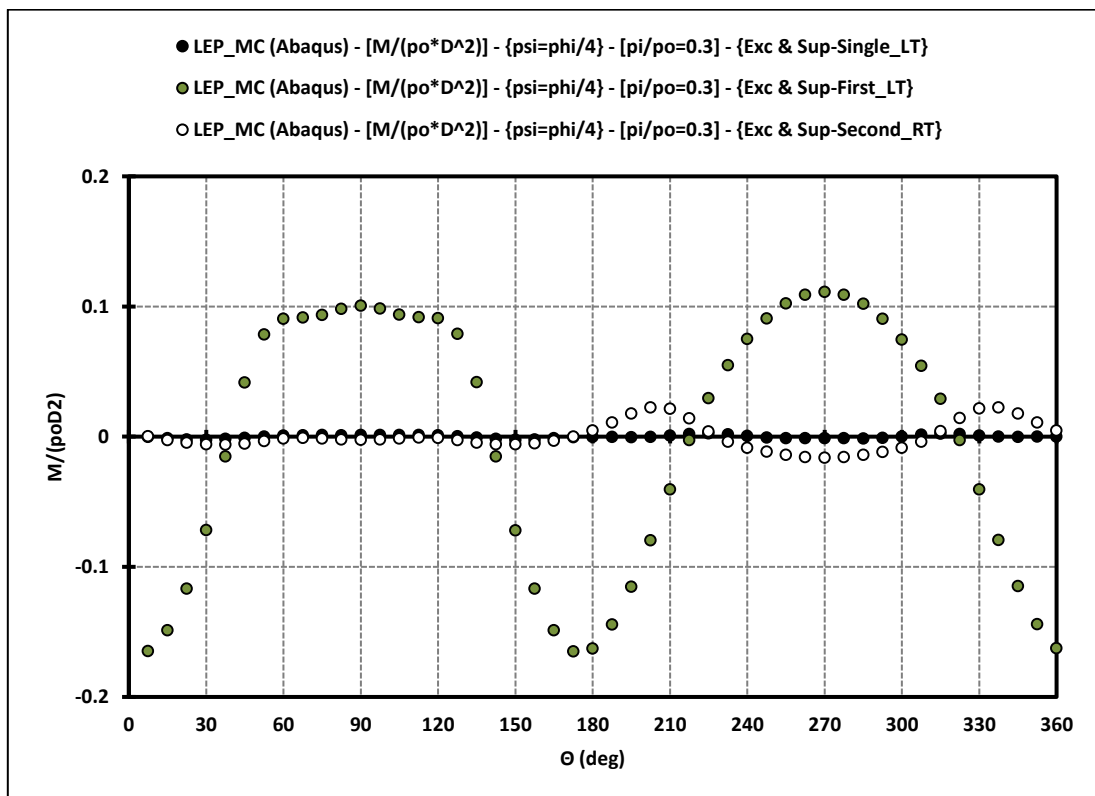
Για τις καμπτικές ροπές εμφανίζονται ανάλογα αποτελέσματα με αυτά των αξονικών δυνάμεων. Στα παρακάτω γραφήματα προβάλλονται οι μέγιστες καμπτικές ροπές, που εφαρμόζονται στο κέλυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος των σηράγγων, κανονικοποιημένες με το γινόμενο της αρχικής γεωστατικής τάσης ρ_0 και του τετραγώνου της διαμέτρου της σήραγγας D^2 , για πλάτη πυλώνα $W=4m, W=8m$ και $W=16m$ αντίστοιχα.

Συγκρίνοντας τα τρία διαγράμματα, τις μέγιστες τιμές τους και την κατανομή των καμπτικών ροπών για διαφορετικά πλάτη πυλώνα, παρατηρείται ότι η εκκαφή της «δεύτερης» συντελεί στην μεγαλύτερη καταπόνηση της «πρώτης» σήραγγας, με έμφαση την εσωτερική παρειά ($\Theta=90^\circ$) όπου εντείνεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, για μικρό πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$. Όμως για μεγάλο πλάτος πυλώνα $W/D=2$, η επίδραση καθίσταται αμελητέα. Αναφορικά στην

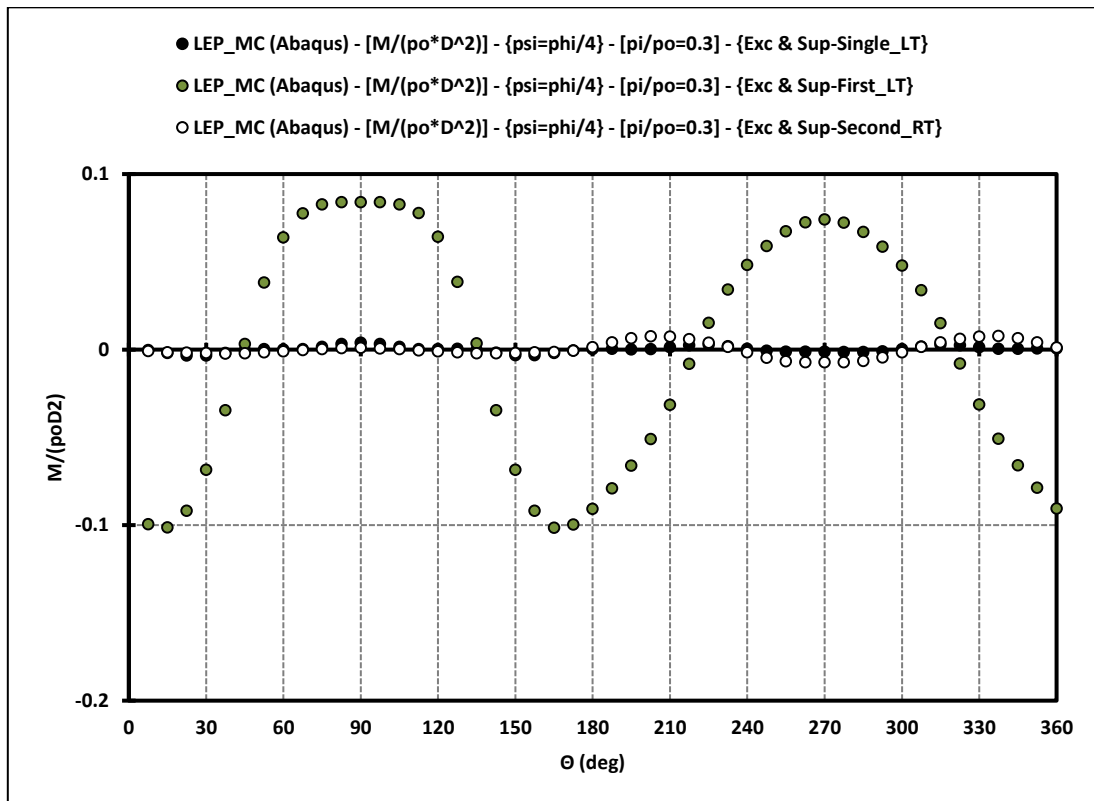
κατανομή και στο μέγεθος των καμπτικών ροπών στην άμεση υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας, είναι παρόμοια με αυτά της «μονής».



Γράφημα 4-12: Κατανομή της κανονικοποιημένης ροπής κάμψης ($M/\rho D^2$), επί της άμεσης υποστήριξης, συναρτήσει της γωνίας Θ , για συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=1$, συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$, για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_0=0.21$) και για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$.



Γράφημα 4-13: Κατανομή της κανονικοποιημένης ροπής κάμψης ($M/\rho D^2$), επί της άμεσης υποστήριξης, συναρτήσει της γωνίας Θ , για συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=1$, συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$, για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_0=0.21$) και για πλάτος πυλώνα $W=D=8m$.

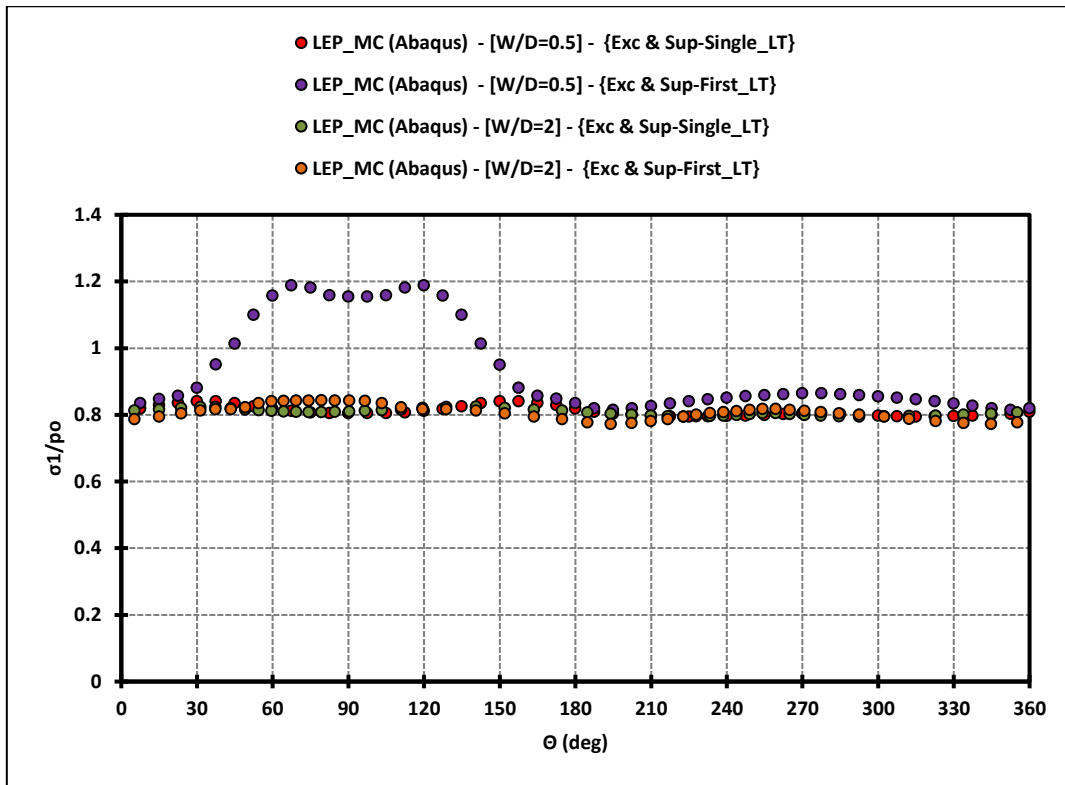


Γράφημα 4-14: Κατανομή της κανονικοποιημένης ροπής κάμψης ($M/\rho D^2$), επί της άμεσης υποστήριξης, συναρτήσει της γωνίας θ , για συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=1$, συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$, για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_0=0.21$) και για πλάτος πυλώνα $W=2D=16m$.

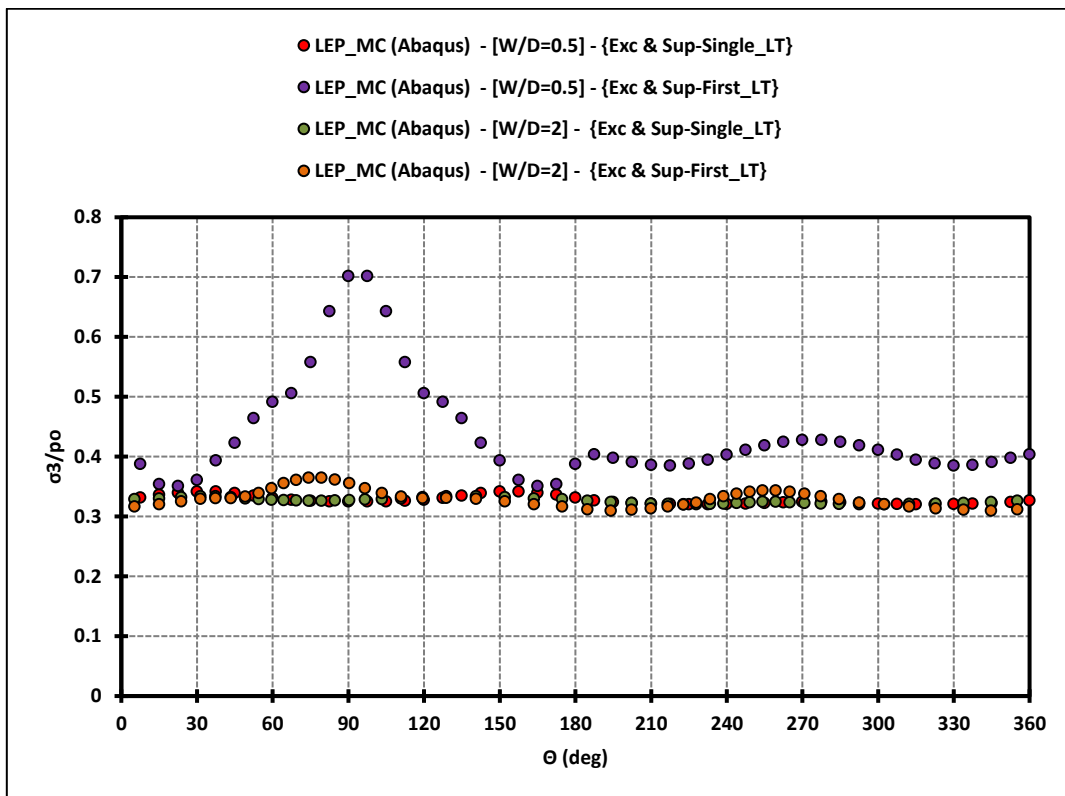
4.1.2.3. Κύριες τάσεις

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι κατανομές της κανονικοποιημένης μέγιστης κύριας τάσης ως προς την γεωστατική τάση (σ_1/ρ_0) και της κανονικοποιημένης ελάχιστης κύριας τάσης ως προς την γεωστατική τάση (σ_3/ρ_0) αντίστοιχα, για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες, για τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=1$ και του συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$. Ανεξάρτητα από την εγκάρσια απόσταση των σηράγγων (από παρειά σε παρειά), η «μονή» σήραγγα εμφανίζει ομοιόμορφη κατανομή τάσεων, ενώ η «πρώτη» σήραγγα παρουσιάζει μεγιστοποίηση των μέγιστων και ελάχιστων τάσεων στην εσωτερική παρειά της ($\theta=90^\circ$).



Γράφημα 4-15: Κατανομή της κανονικοποιημένης μέγιστης κύριας τάσης (σ_1/ρ_0), συναρτήσει της γωνίας θ , για διαφορετικά πλάτη πυλώνων, για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=1$ και συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$.



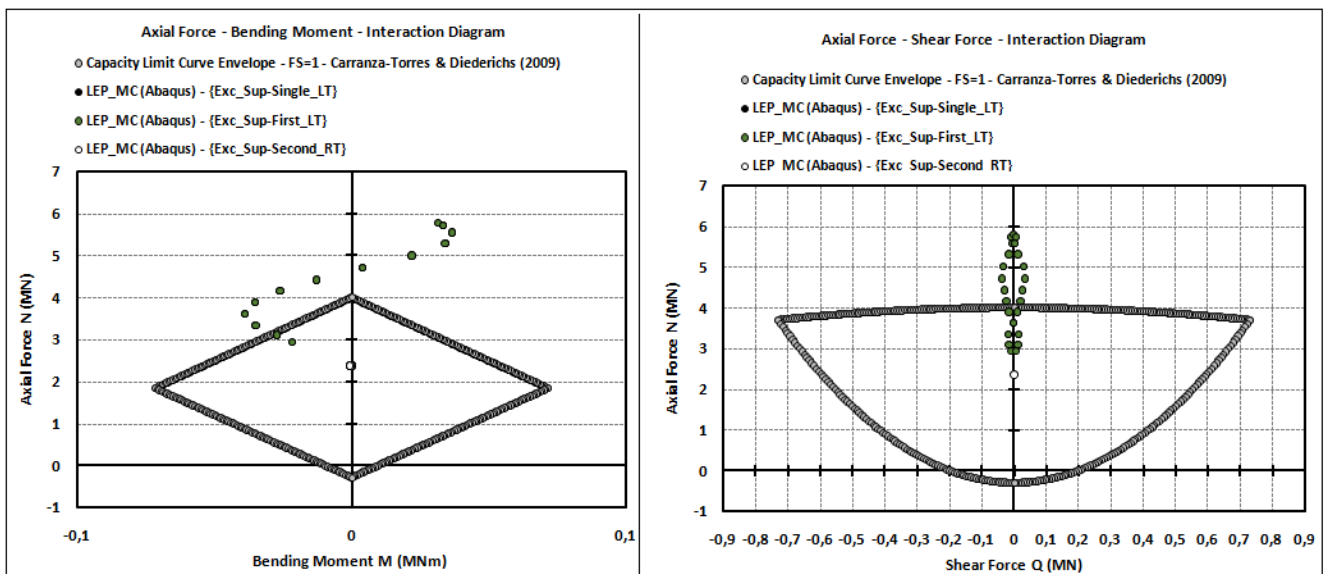
Γράφημα 4-16: Κατανομή της κανονικοποιημένης ελάχιστης κύριας τάσης (σ_3/ρ_0), συναρτήσει της γωνίας θ , για διαφορετικά πλάτη πυλώνων, για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=1$ και συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$.

4.1.2.4. Έλεγχος αστοχίας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος

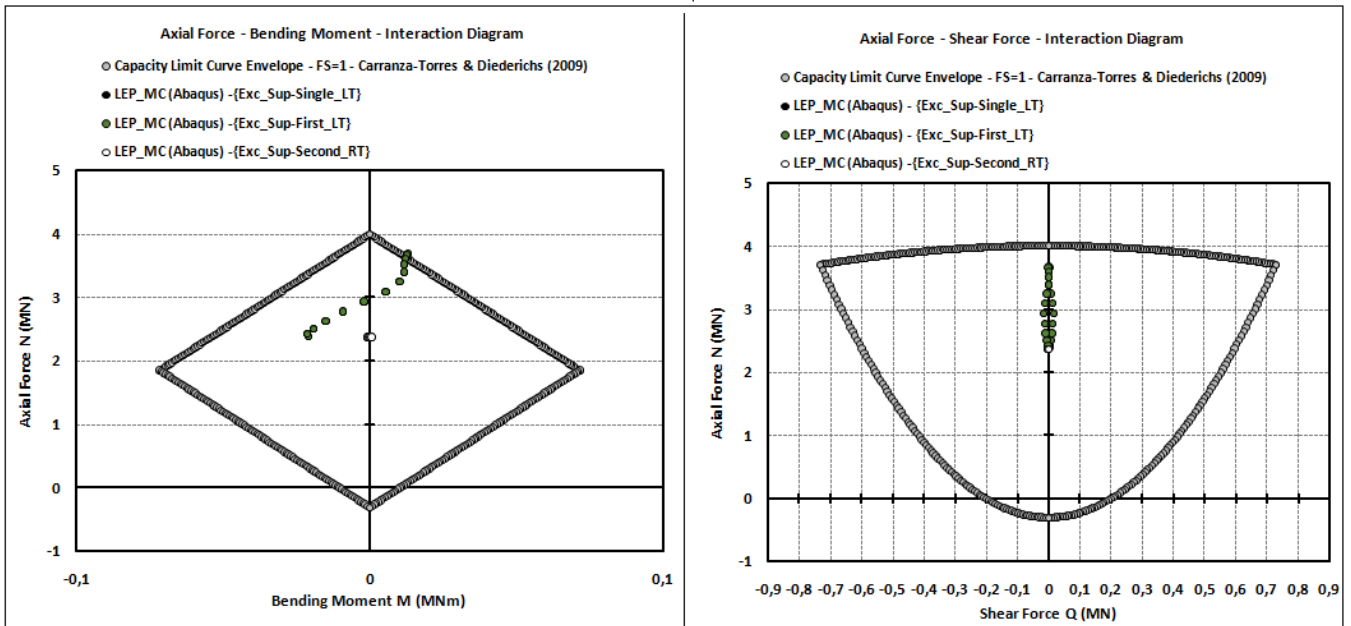
Παρακάτω, στα διαγράμματα αλληλεπίδρασης, παρατηρείται ότι το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της «πρώτης» σήραγγας, μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής της «δεύτερης», για τιμή ίση με $d_{sh}=0.2m$ αστοχεί στην περίπτωση του ελάχιστου πλάτους πυλώνα $W/D=0.5$, οριακά αστοχεί στην περίπτωση του πλάτους πυλώνα $W/D=1$ ενώ δεν αστοχεί όταν $W/D=2$. Από περαιτέρω ελέγχους που έγιναν, αποδεικνύεται ότι για ποιότητα σκυροδέματος C20/25, για το ελάχιστο πλάτος πυλώνα απαιτείται ελάχιστο πάχος $d_{sh}=0.35m$, ενώ για την δεύτερη περίπτωση το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι $d_{sh}=0.25m$, έτσι ώστε να αποφευχθεί η αστοχία του. Διαφορετικά, εναλλακτική λύση θα ήταν η επιλογή καλύτερης ποιότητας σκυροδέματος με την διατήρηση του αρχικού του πάχους.

Ποιότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος		C20/25	C20/25	C20/25
Πλάτος πυλώνα	W/D	0.5	1	2
Ελάχιστο απαιτούμενο πάχος σκυροδέματος	d_{sh}	0.35	0.25	0.2

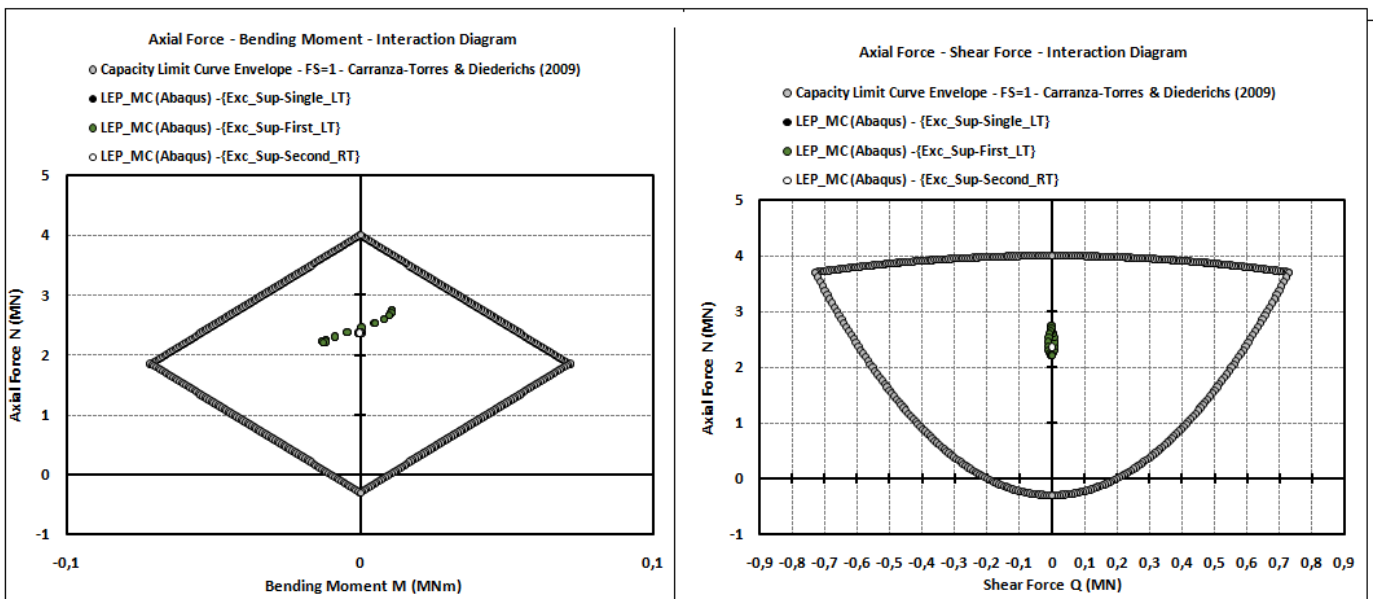
Πίνακας 4.4: Πίνακας ποιότητας και πάχους σκυροδέματος για διάφορες τιμές του πλάτους πυλώνα.



Γράφημα 4-17: Εντατικά μεγέθη επί της άμεσης υποστήριξης για λόγο γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_{cm}/\rho_s=0.21$ και πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - καμπτικών ροπών (αριστερά) και στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - τεμνουσών δυνάμεων (δεξιά).



Γράφημα 4-18: Εντατικά μεγέθη επί της άμεσης υποστήριξης για λόγο γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$ και πλάτος πυλώνα $W/D=1$ στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - καμπτικών ροπών (αριστερά) και στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - τεμνουσών δυνάμεων (δεξιά).



Γράφημα 4-19: Εντατικά μεγέθη επί της άμεσης υποστήριξης για λόγο γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$ και πλάτος πυλώνα $W/D=2$ στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - καμπτικών ροπών (αριστερά) και στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - τεμνουσών δυνάμεων (δεξιά).

4.1.3. Επίδραση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0

Ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων επηρεάζει σημαντικά την φόρτιση που δέχεται η άμεση υποστήριξη των σηράγγων, αφού από το μέγεθος αυτό υπολογίζεται η τιμή του μέσου αρχικού εντατικού πεδίου, από το οποίο εξαρτάται η αξονική δύναμη που ασκείται στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων. Επιπλέον, ο συντελεστής αυτός καθορίζοντας την κατανομή των τάσεων περιμετρικά των διατομών, επηρεάζει τις αναπτυσσόμενες πλαστικές παραμορφώσεις και μετακινήσεις του περιβάλλοντος γεωυλικού.

Για τιμή του συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=0.5$ πριν από την εκσκαφή η οριζόντια τάση είναι μικρότερη από την κατακόρυφη, άρα η οριζόντια είναι η ελάχιστη κύρια τάση και η κατακόρυφη η μέγιστη κύρια τάση. Στην παρειά, η οριζόντια τάση είναι για την διατομή της σήραγγας ακτινική και η κατακόρυφη εφαπτομενική. Επομένως, κατά τη διάνοιξη η οριζόντια/ακτινική τάση, η οποία αποτελεί τη μικρότερη από τις δύο, μειώνεται και η κατακόρυφη/εφαπτομενική τάση, η οποία αποτελεί τη μεγαλύτερη από τις δύο, αυξάνεται. Αντίθετη είναι η ανακατανομή που προκαλείται στη στέψη, με την οριζόντια/εφαπτομενική να αυξάνεται και την κατακόρυφη/ακτινική τάση να μειώνεται. Έτσι, στην παρειά παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές τάσεων και πλαστικών παραμορφώσεων και κατ' επέκταση εντατικών μεγεθών και φορτίων στην άμεση υποστήριξη της «μονής» σήραγγας.

Για τιμή του συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=1$, το εντατικό και παραμορφωσιακό πεδίο μεταβάλλονται ομοιόμορφα και κατά συνέπεια η πλαστική ζώνη της σήραγγας και τα εντατικά μεγέθη στην άμεση υποστήριξη παρουσιάζουν ομοιόμορφη και συμμετρική κατανομή για τη «μονή» σήραγγα.

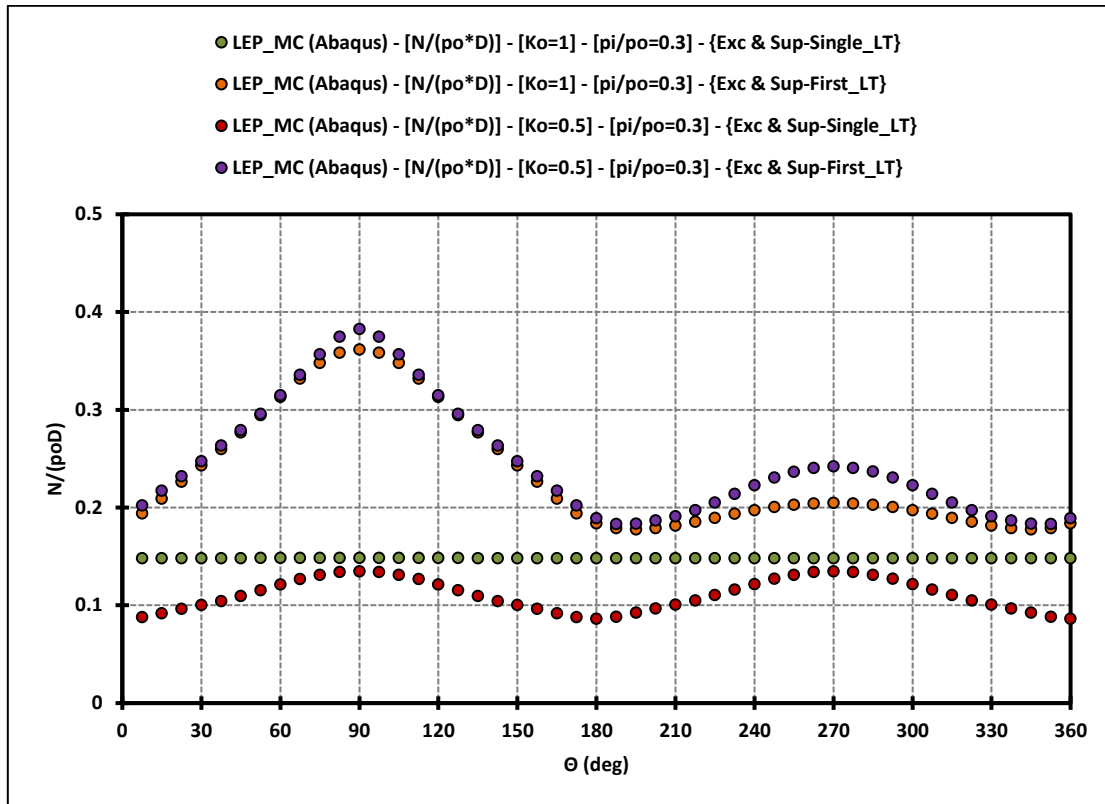
Τα ενδεικτικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν σε συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$, με τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες (Πίνακας 4.1) αλλά και με το ελάχιστο πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$, εξετάζοντας τις τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=1$ και $K_0=0.5$.

4.1.3.1. Αξονικές δυνάμεις N

Σχετικά με το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, από τα παρακάτω γράφημα διακρίνεται ότι η εκσκαφή της «δεύτερης» σήραγγας επιδρά στην ανάπτυξη των φορτίων που δέχεται η «πρώτη» σήραγγα για οποιαδήποτε τιμή K_0 . Η μεγιστοποίηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης συναντάται στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» σήραγγας που γειτνιάζει με τον πυλώνα ($\Theta=90^\circ$).

Παρατηρείται ότι για την «πρώτη» σήραγγα τα αξονικά φορτία εμφανίζουν υψηλότερες τιμές για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων ίσο με $K_0=0.5$, απ'ότι για $K_0=1$. Αυτό οφείλεται στο διαφορετικό μηχανισμό ανακατανομής των τάσεων, όπως προαναφέρθηκε, κατά την εκσκαφή και υποστήριξη της «μονής» σήραγγας για τις διαφορετικές τιμές του K_0 . Η περιοχή του πυλώνα

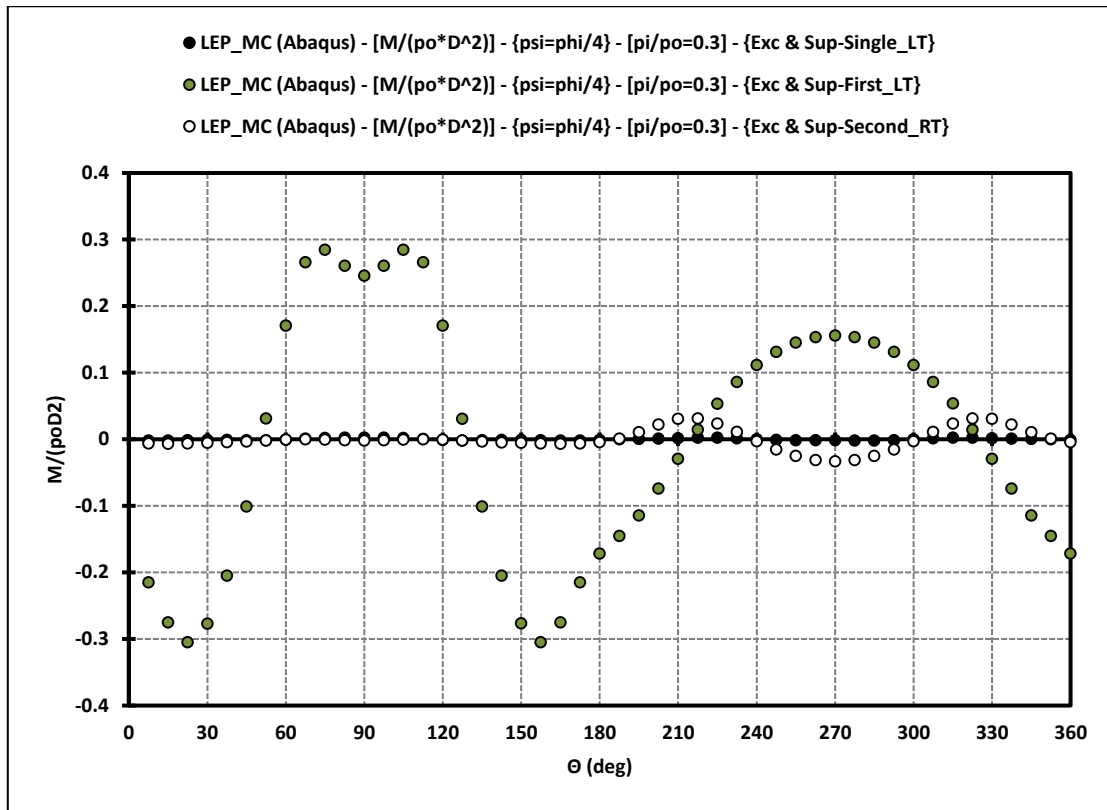
επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό για $K_0=0.5$ και η μεταβολή του εντατικού πεδίου λόγω της εκσκαφής και υποστήριξης της «δεύτερης» σήραγγας έχει ως αφετηρία ένα μη-συμμετρικό πεδίο τάσεων και παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα, επαληθεύεται ότι για $K_0=0.5$, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της «μονής» σήραγγας παραλαμβάνει μεγαλύτερα φορτία στις παρειές ($\Theta=90^\circ$ και $\Theta=270^\circ$), ενώ μικρότερα στη στέψη και στον πυθμένα ($\Theta=180^\circ$ και $\Theta=360^\circ$). Οι μέγιστες τιμές των φορτίων παρατηρούνται δηλαδή στις περιοχές όπου εμφανίζονται οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις.



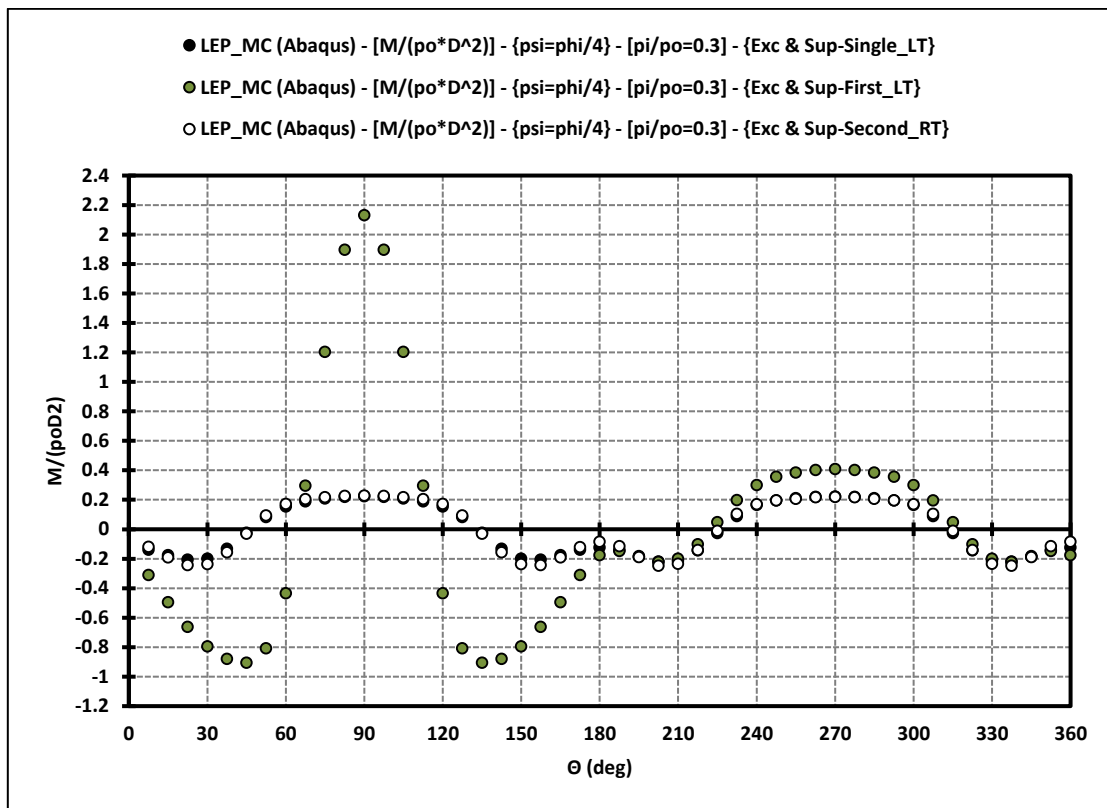
Γράφημα 4-20: Κατανομή της κανονικοποιημένης αξονικής δύναμης $N/\rho_0 D$, συναρτήσει της γωνίας Θ , για διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων τάσεων K_0 , για πλάτος πυλώνα ($W/D=0.5$), συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$ και για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_0=0.21$).

4.1.3.2. Καμπτικές ροπές M

Στα παρακάτω γραφήματα προβάλλονται οι μέγιστες καμπτικές ροπές, που εφαρμόζονται στο κέλυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος των σηράγγων, κανονικοποιημένες με το γινόμενο της μέσης αρχικής γεωστατικής τάσης ρ_0 και του τετραγώνου της διαμέτρου της σήραγγας D^2 . Παρατηρείται ότι οι ροπές κάμψης εμφανίζουν υψηλότερες τιμές για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων ίσο με $K_0=0.5$, απ'ότι για $K_0=1$.



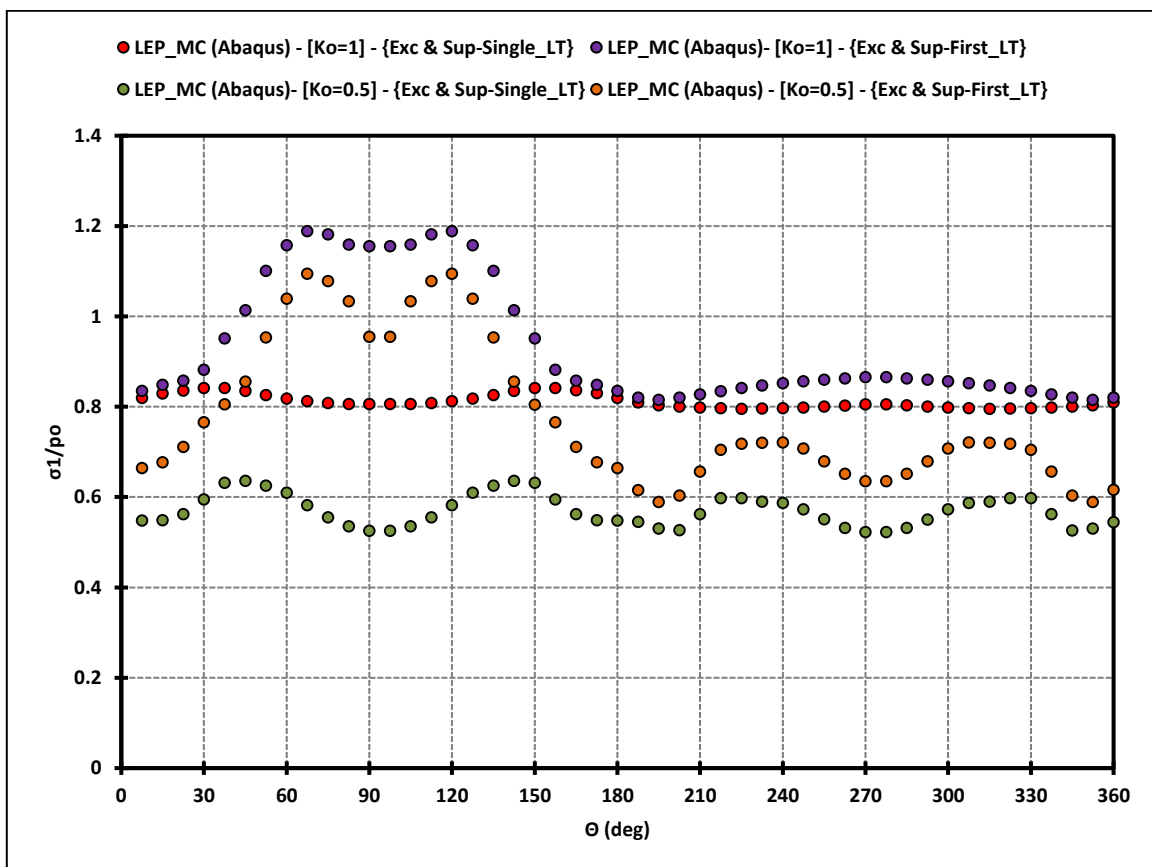
Γράφημα 4-21: Κατανομή της κανονικοποιημένης ροπής κάμψης $M/\rho_o D^2$, επί της άμεσης υποστήριξης, συναρτήσει της γωνίας θ , για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$, συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$, το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$) και για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=1$.



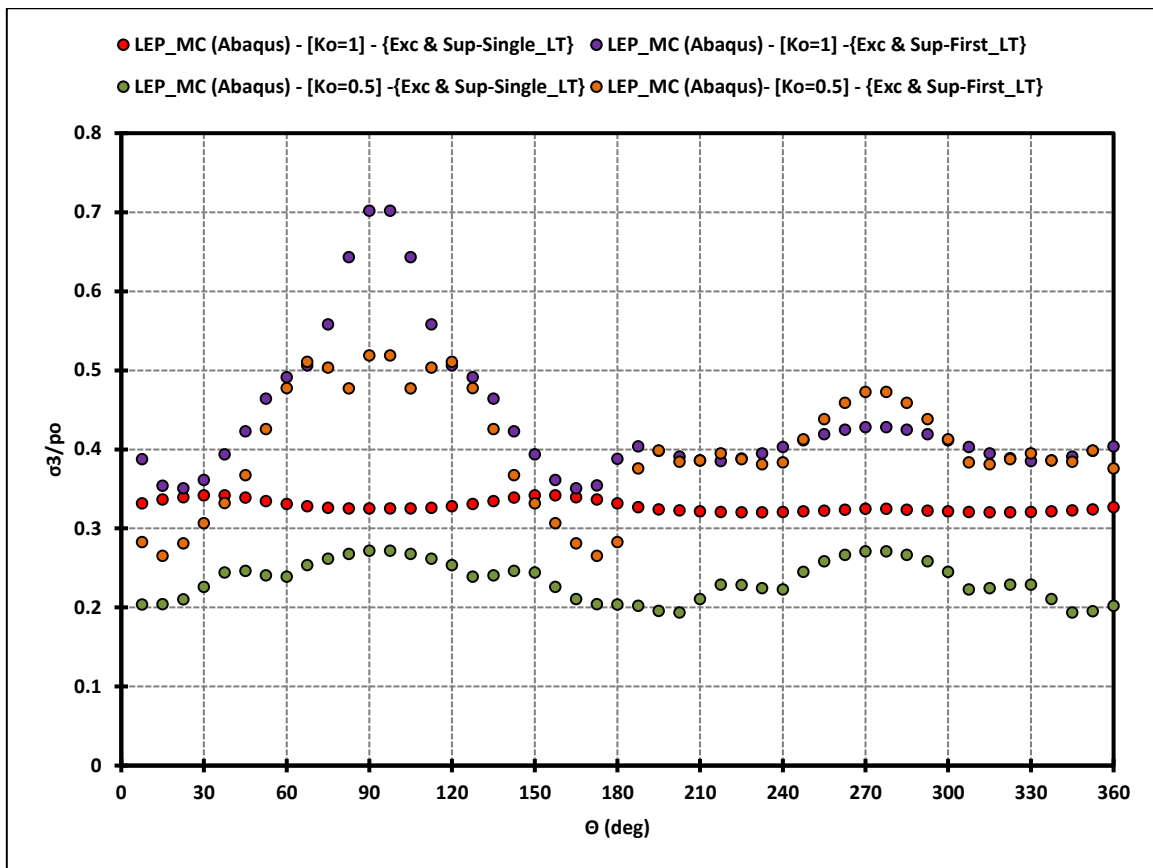
Γράφημα 4-22: Κατανομή της κανονικοποιημένης ροπής κάμψης $M/\rho_o D^2$, επί της άμεσης υποστήριξης, συναρτήσει της γωνίας θ , για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$, συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$, το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$) και για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0,5$.

4.1.3.3. Κύριες τάσεις

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι κατανομές της κανονικοποιημένης μέγιστης κύριας τάσης ως προς την μέση γεωστατική τάση (σ_1/ρ_0) και της κανονικοποιημένης ελάχιστης κύριας τάσης με την μέση γεωστατική τάση (σ_3/ρ_0) αντίστοιχα, για διαφορετικές τιμές του συντελεστή K_0 . Παρουσιάζεται το ελάχιστο πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4\text{m}$, οι δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες και ο συντελεστής αποτόνωσης $\lambda=0.7$. Αναφορικά με τα γραφήματα που ακολουθούν, για $K_0=1$ παρουσιάζονται μεγαλύτερες μέγιστες τάσεις σ_1 και μεγαλύτερες ελάχιστες κύριες τάσεις σ_3 στην διατομή της «πρώτης» και της «μονής» σήραγγας, σε σχέση με την περίπτωση του συντελεστή $K_0=0.5$. Αναφορικά με την κατανομή των τάσεων της «μονής» σήραγγας, για $K_0=1$ παρουσιάζεται ως μια οριζόντια ευθεία, ενώ στην περίπτωση με συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ η κατανομή είναι ανομοιόμορφη και μη-συμμετρική. Αυτό οφείλεται στην διαφορετική ανακατανομή των τάσεων που προκαλεί η μείωση του συντελεστή K_0 .



Γράφημα 4-23: Κατανομή της κανονικοποιημένης μέγιστης κύριας τάσης (σ_1/ρ_0), συναρτήσει της γωνίας Θ , για διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων τάσεων K_0 , για το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών, για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4\text{m}$ και συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$.



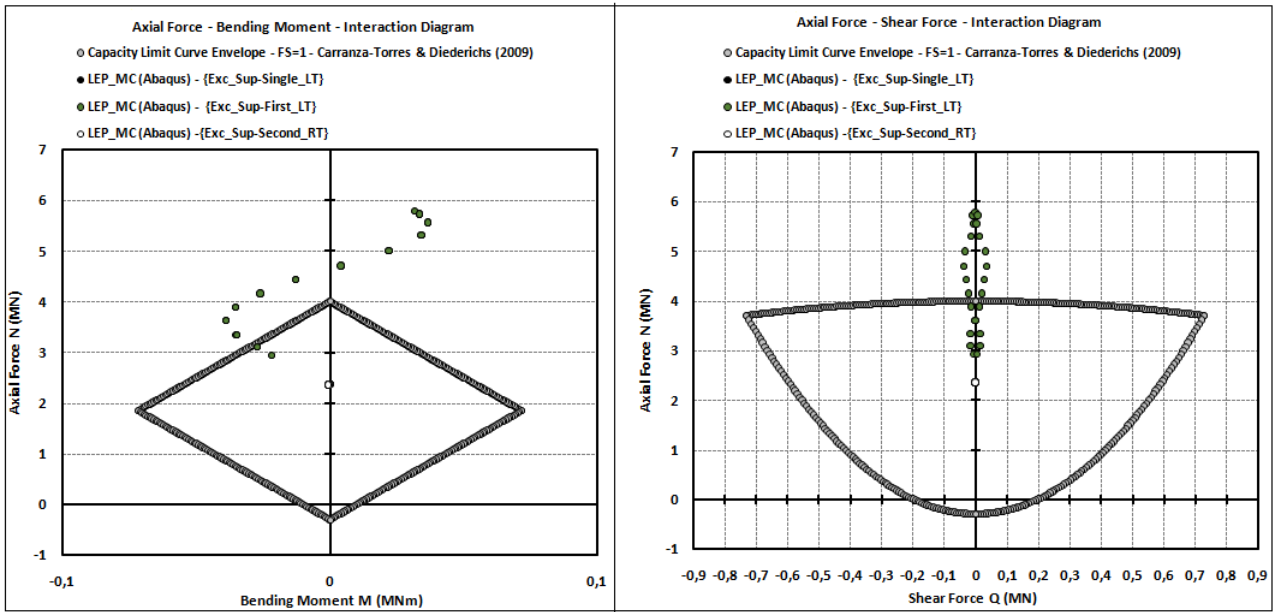
Γράφημα 4-24: Κατανομή της κανονικοποιημένης μέγιστης κύριας τάσης (σ_3/ρ_o), συναρτήσει της γωνίας Θ , για διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων τάσεων K_o , για το δυσμενέστερο λόγω γεωτεχνικών συνθηκών, για πλάτος πυλώνα $W=0.5D=4m$ και συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$.

4.1.3.4. Έλεγχος αστοχίας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος

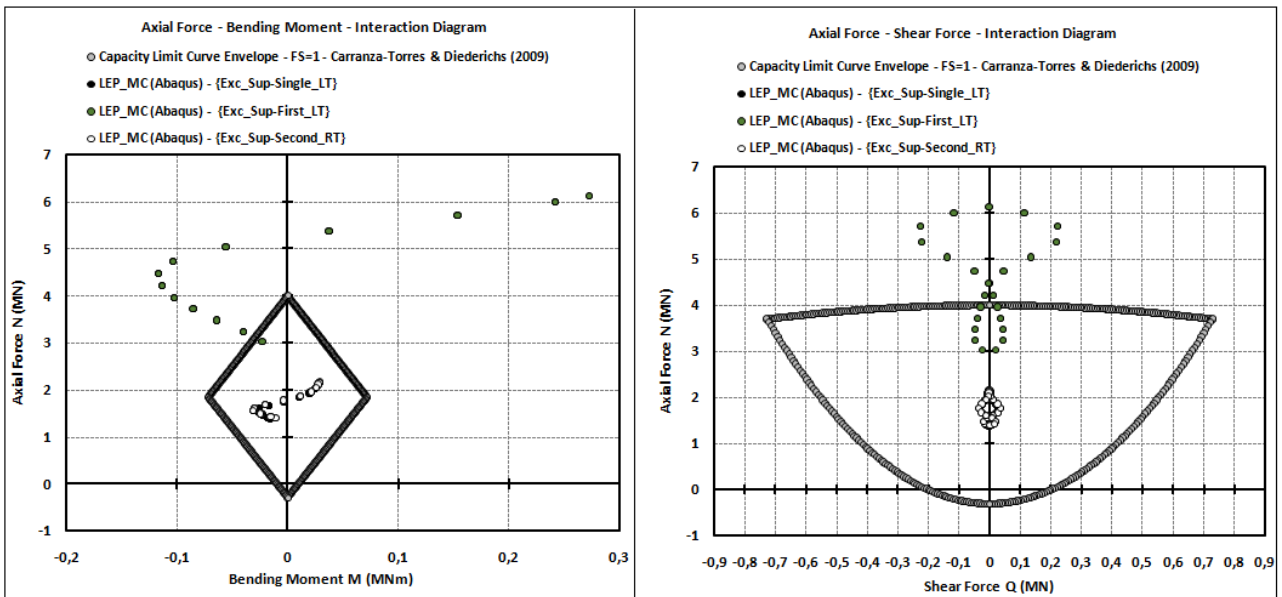
Παρακάτω στα διαγράμματα αλληλεπίδρασης παρατηρείται ότι το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της «πρώτης» σήραγγας, μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής της «δεύτερης», για τιμή ίση με $d_{sh}=0.2m$ αστοχεί και στις δύο περιπτώσεις του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_o . Από περεταίρω ελέγχους που έγιναν, αποδεικνύεται ότι για ποιότητα σκυροδέματος C20/25, για τιμή του συντελεστή $K_o=1$ απαιτείται ελάχιστο πάχος $d_{sh}=0.35m$, ενώ για $K_o=0.5$ το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι $d_{sh}=0.50m$, έτσι ώστε να αποφευχθεί η αστοχία του. Διαφορετικά, εναλλακτική λύση θα ήταν η επιλογή καλύτερης ποιότητας σκυροδέματος με την διατήρηση του αρχικού του πάχους.

Ποιότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος		C20/25	C20/25
Συντελεστής οριζόντιων τάσεων	K_o	1	0.5
Ελάχιστο απαιτούμενο πάχος σκυροδέματος	d_{sh}	0.35	0.50

Πίνακας 4.5: Πίνακας ποιότητας και πάχους σκυροδέματος για διάφορες τιμές του συντελεστή οριζόντιων τάσεων K_o .

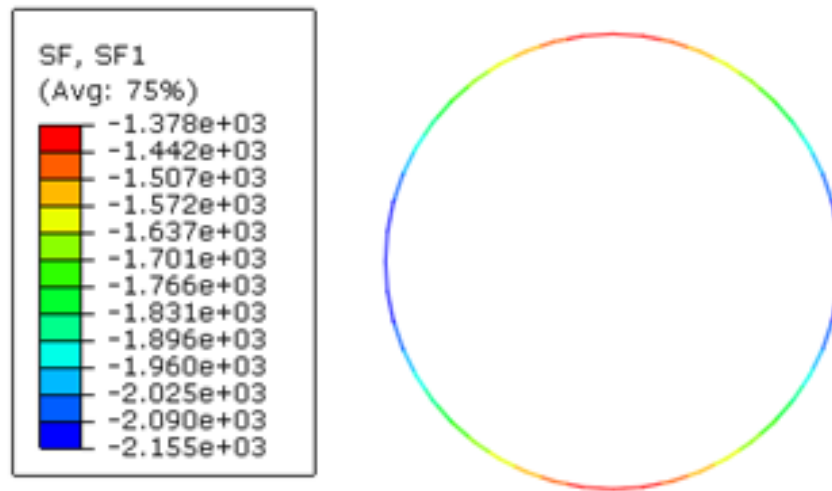


Γράφημα 4-25: Εντατικά μεγέθη επί της άμεσης υποστήριξης, για λόγο γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$, πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_o=1$, στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - καμπτικών ροπών (αριστερά) και στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - τεμνουσών δυνάμεων (δεξιά)

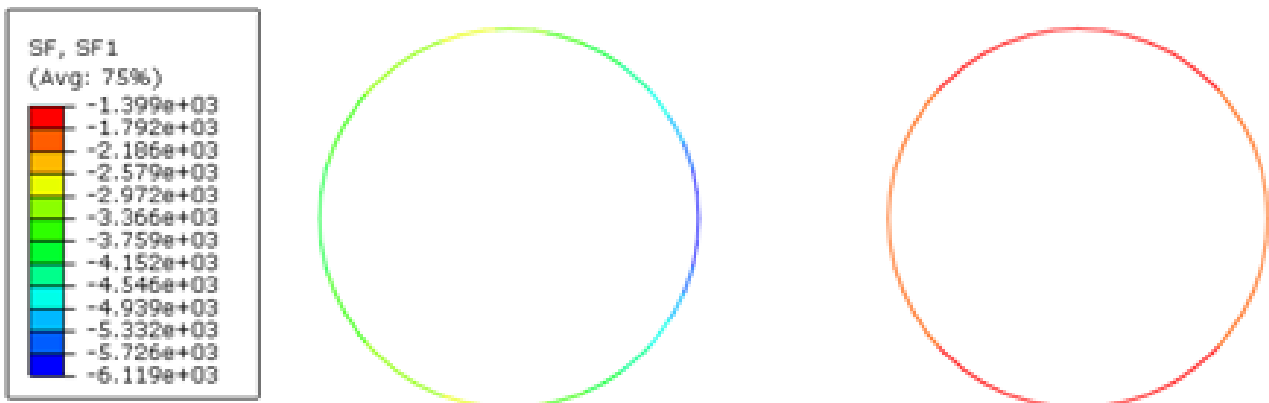


Γράφημα 4-26: Εντατικά μεγέθη επί της άμεσης υποστήριξης, για λόγο γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_{cm}/\rho_o=0.21$, πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_o=0.5$, στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - καμπτικών ροπών (αριστερά) και στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - τεμνουσών δυνάμεων (δεξιά)

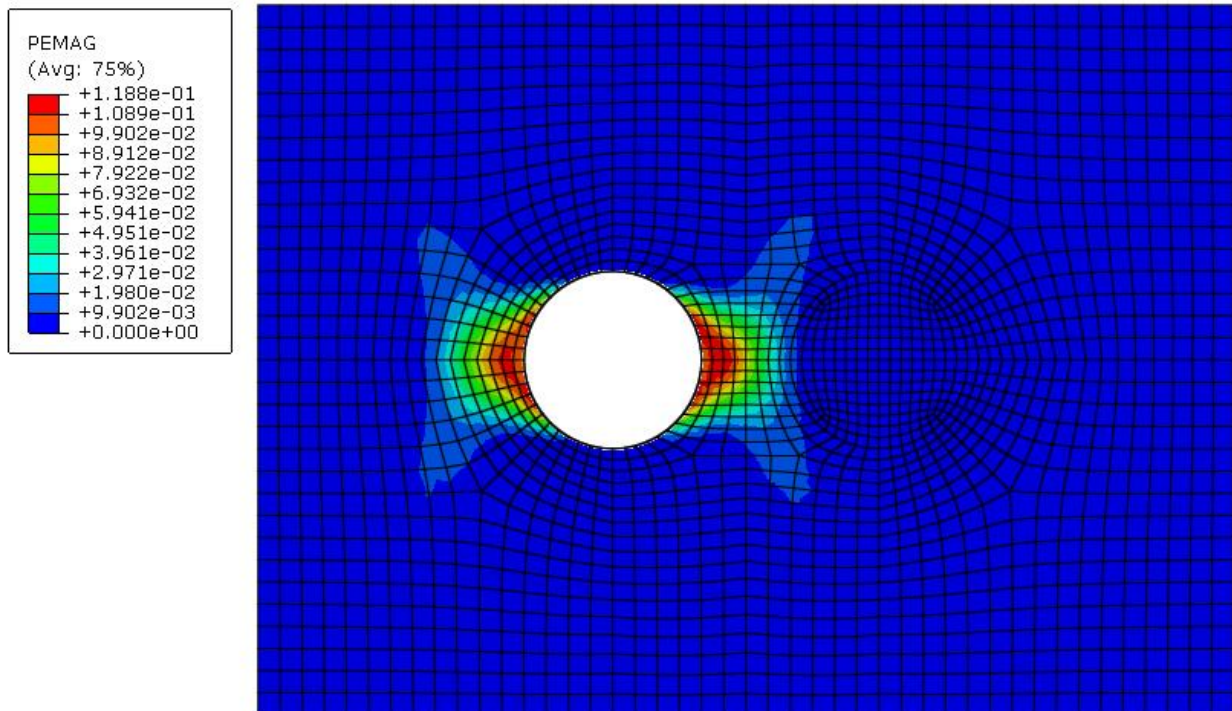
Στην συνέχεια ακολουθεί η αναπαράσταση των αξονικών δυνάμεων επί της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, οι πλαστικές παραμορφώσεις και οι μετακινήσεις στις διατομές των σηράγγων. Παρατηρείται ότι στις παρειές της διατομής, όπου οι μετακινήσεις είναι μικρότερες έχουμε τις μεγαλύτερες πλαστικές παραμορφώσεις.



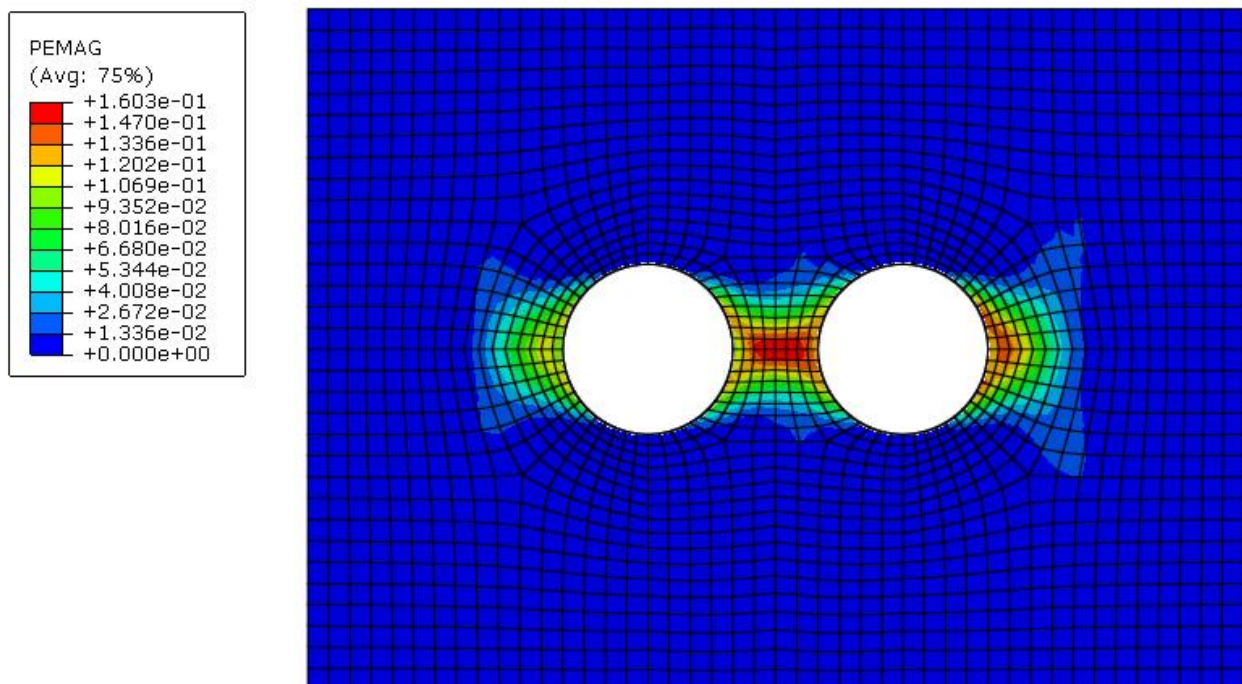
Γράφημα 4-27: Αξονικές δυνάμεις επί της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στη διατομή της «μονής» σήραγγας (single tunnel), για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=0.5$, πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



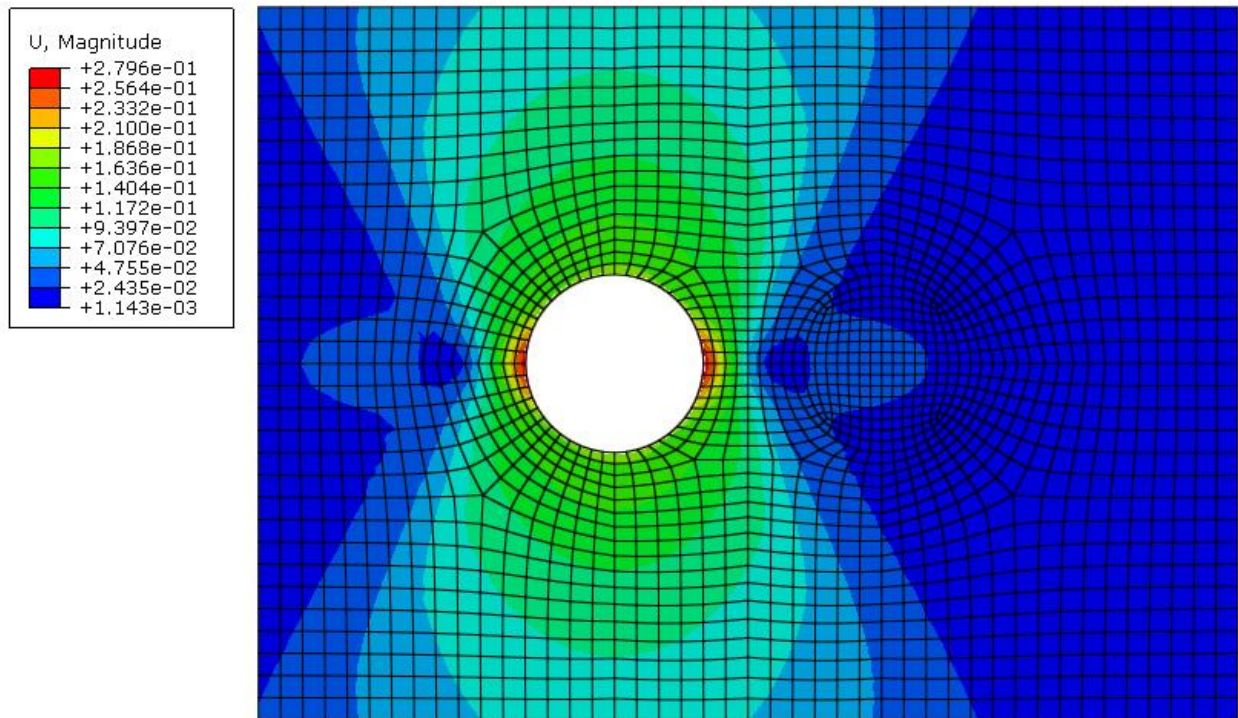
Γράφημα 4-28: Αξονικές δυνάμεις επί της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στη διατομή της «πρώτης» σήραγγας και της «δεύτερης» σήραγγας, για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=0.5$, πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$).



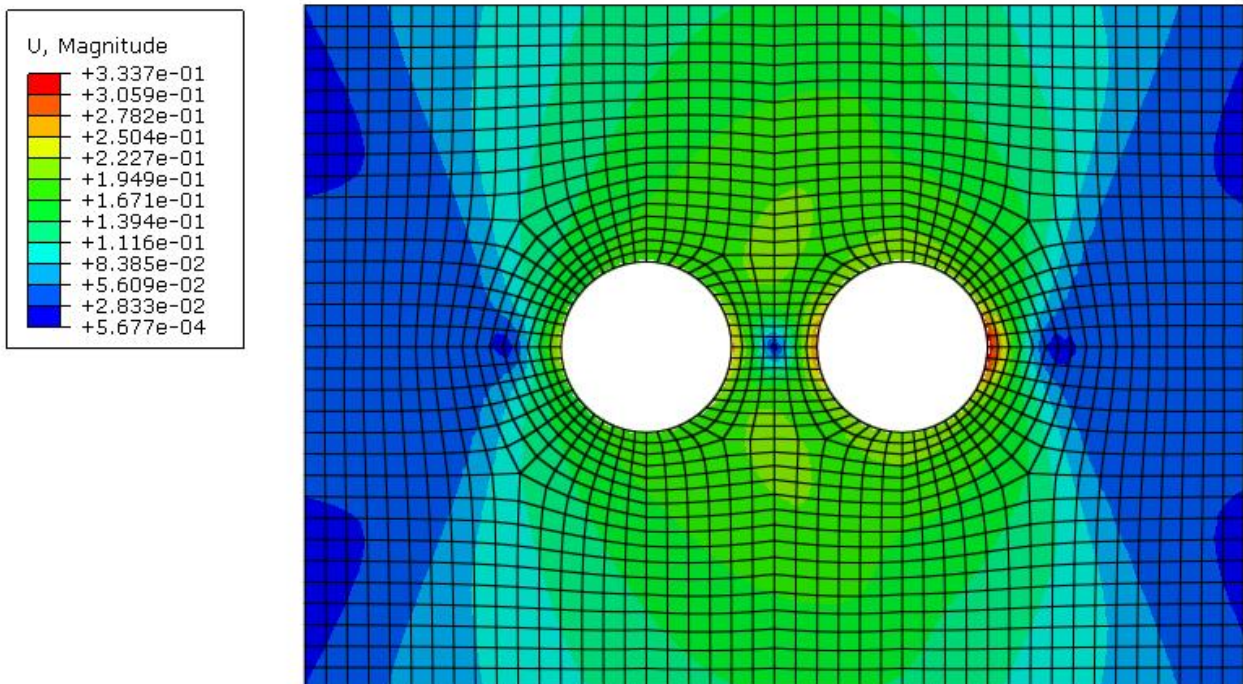
Γράφημα 4-29: Πλαστικές παραμορφώσεις στη διατομή της «μονής» σήραγγας, για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=0.5$, πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).



Γράφημα 4-30: Πλαστικές παραμορφώσεις στις διατομές της «πρώτης» σήραγγας και της «δεύτερης» σήραγγας, για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=0.5$, πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).



Γράφημα 4-31: Μετακινήσεις στη διατομή της «μονής» σήραγγας (single tunnel), για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=0.5$, πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).



Γράφημα 4-32: Μετακινήσεις στη διατομή της «πρώτης» σήραγγας και της «δεύτερης» σήραγγας, για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=0.5$, πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$).

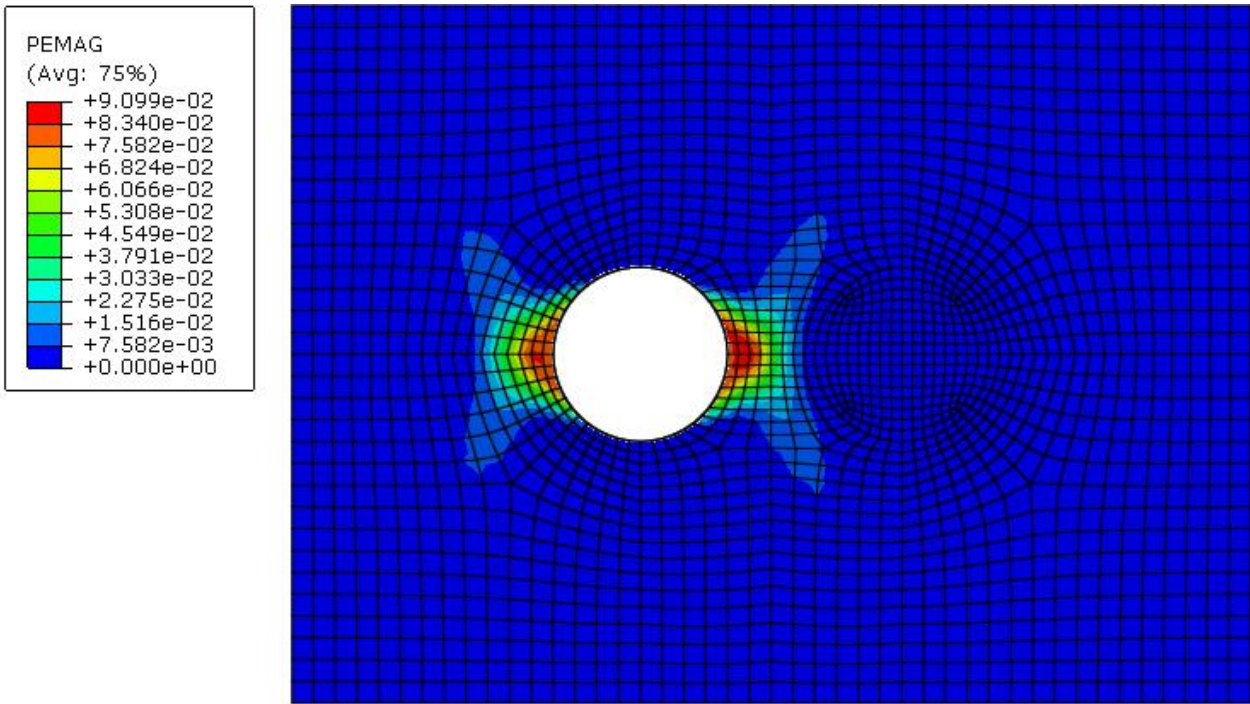
4.1.4. Επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης λ

Σύμφωνα με τον Καββαδά (2012) ο βαθμός αποτόνωσης λ , δηλαδή η μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική της τιμή p_0 σε μια μικρότερη τιμή p , μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της χρονικής υστέρησης στην τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης σηράγγων. Τυπικά, όσο πιο γρήγορα τοποθετείται η άμεση υποστήριξη και όσο πιο ανένδοτη είναι, τόσο μεγαλύτερα φορτία αναλαμβάνει. Αντιθέτως, όσο περισσότερο ενδόσιμη είναι η άμεση υποστήριξη και όσο αργότερα τοποθετείται τόσο μικρότερα φορτία αναλαμβάνει υπό την προϋπόθεση ότι η καθυστέρηση στην τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης δεν θα προκαλέσει υπερβολική χαλάρωση και αποδιοργάνωση της βραχώμαζας.

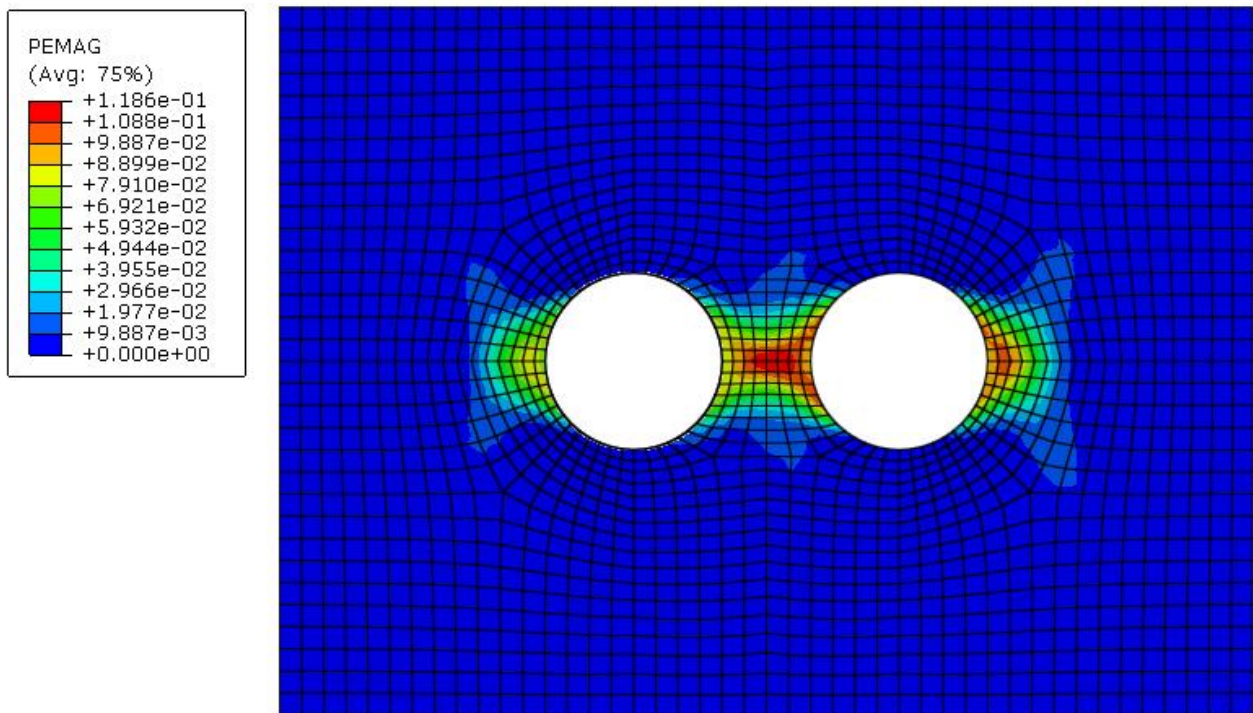
Στην συνέχεια ακολουθεί η επίδραση του βαθμού αποτόνωσης στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μέσω της μεταβολής της απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο της «δεύτερης» σήραγγας. Παρακάτω εξετάζονται οι συντελεστές του βαθμού αποτόνωσης $\lambda=0.7$, $\lambda=0.6$ και $\lambda=0.5$ στην περίπτωση με τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες, δηλαδή:

- ο με συντελεστή γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ για το ελάχιστο πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$
- ο με συντελεστή γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ για το μέγιστο πλάτος πυλώνα $W/D=2$
- ο με συντελεστή γεωστατικών τάσεων $K_0=1$ για το ελάχιστο πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$

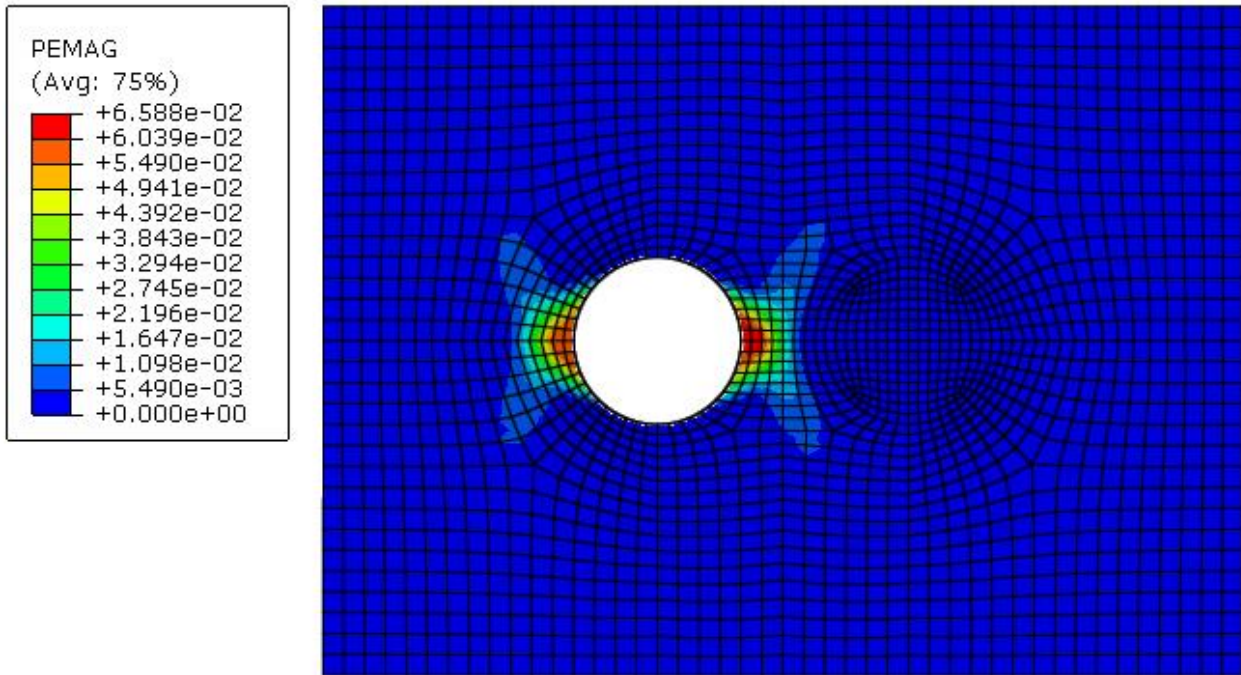
Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αναφέρονται στις αξονικές δυνάμεις της άμεσης υποστήριξης των δίδυμων σηράγγων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα και για τις δύο τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$ και $K_0=1$, η βαθμιαία αύξηση της απόστασης εφαρμογής της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο δηλαδή η αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης λ οδηγεί μείωση των αξονικών δυνάμεων της άμεσης υποστήριξης της «μονής» σήραγγας.



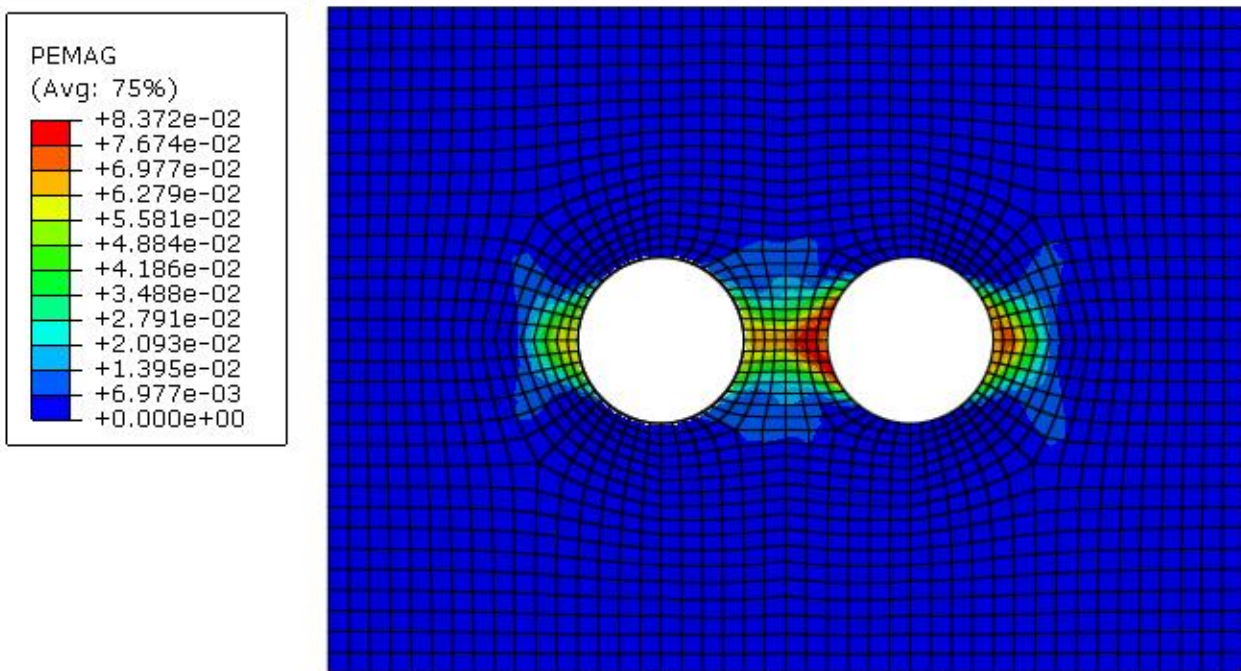
Γράφημα 4-33: Πλαστικές παραμορφώσεις στη διατομή της «μονής», για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.6$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=0.5$, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).



Γράφημα 4-34: Πλαστικές παραμορφώσεις στις διατομές της «πρώτης» σήραγγας και της «δεύτερης» σήραγγας, για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.6$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=0.5$, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).

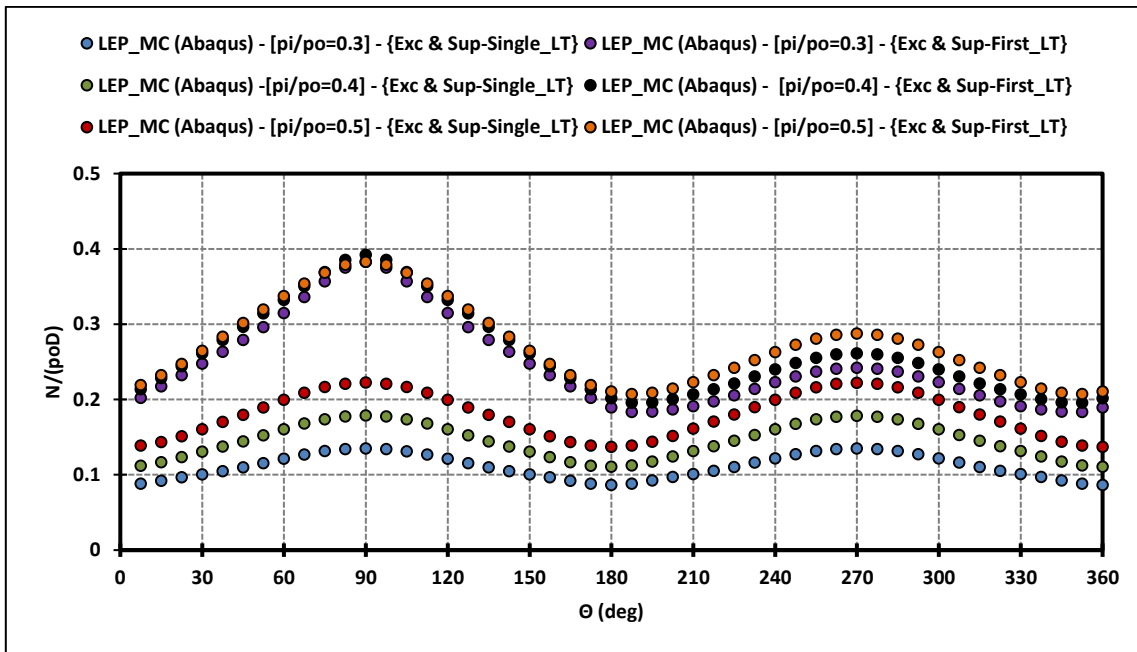


Γράφημα 4-35: Πλαστικές παραμορφώσεις στη διατομή της «μονής», για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.5$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=0.5$, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).

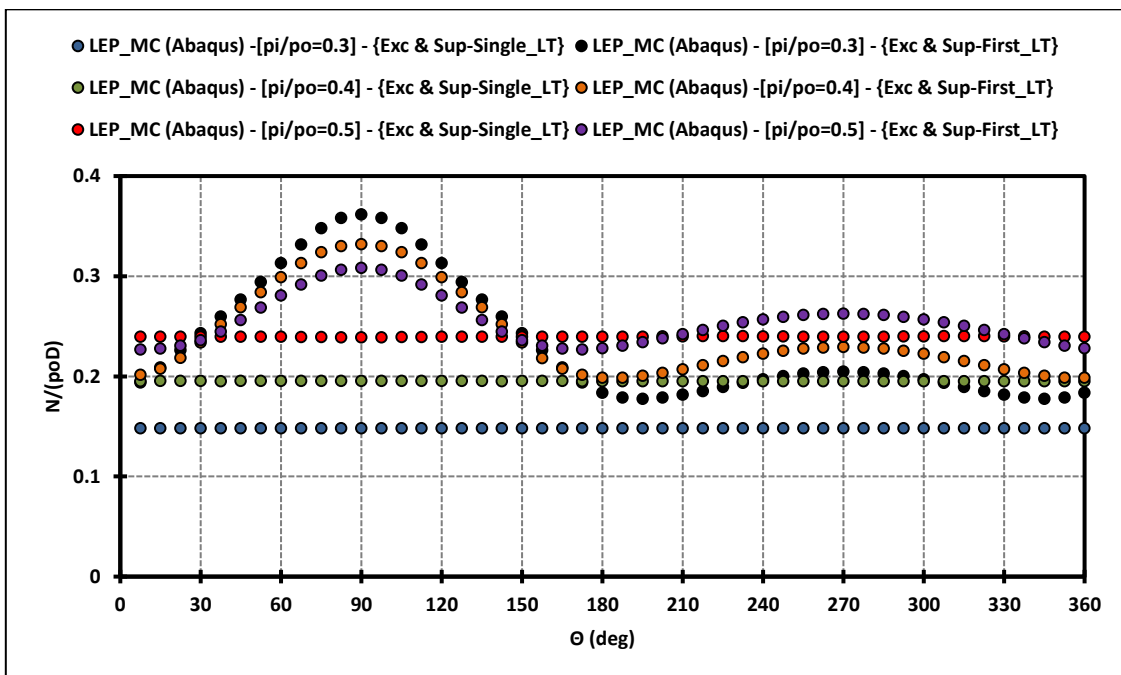


Γράφημα 4-36: Πλαστικές παραμορφώσεις στις διατομές της «πρώτης» σήραγγας και της «δεύτερης» σήραγγας, για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.6$, συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=0.5$, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\rho_0 = 0.21$).

Η αύξηση της απόστασης εφαρμογής της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο της εκσκαφής στη φυσική κλίμακα της συμβατικής όρυξης σηράγγων, η οποία στις διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις προσομοιώνεται με την αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης λ , μέσω της μείωσης της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης που εφαρμόζεται πριν το στάδιο της εκσκαφής και υποστήριξης, οδηγεί σε μείωση των αξονικών δυνάμεων της άμεσης υποστήριξης της «μονής» σήραγγας, καθώς η σύγκλιση της βραχώμαζας πριν από την εφαρμογή της άμεσης υποστήριξης συντελεί στην αποτόνωση του γεωυλικού και κατά συνέπεια στη μείωση των φορτίων και των ενταντικών μεγεθών που θα ασκηθούν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.



Γράφημα 4-37: Κατανομή της κανονικοποιημένης αξονικής δύναμης $N/\rho_0 D$ στην τυπική διατομή των σηράγγων συναρτήσει της γωνίας θ , για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ , συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=0.5$, το ελάχιστο πλάτος πυλώνα ($W/D=0.5$) και το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών ($\sigma_{cm}/\rho_0=0.21$).

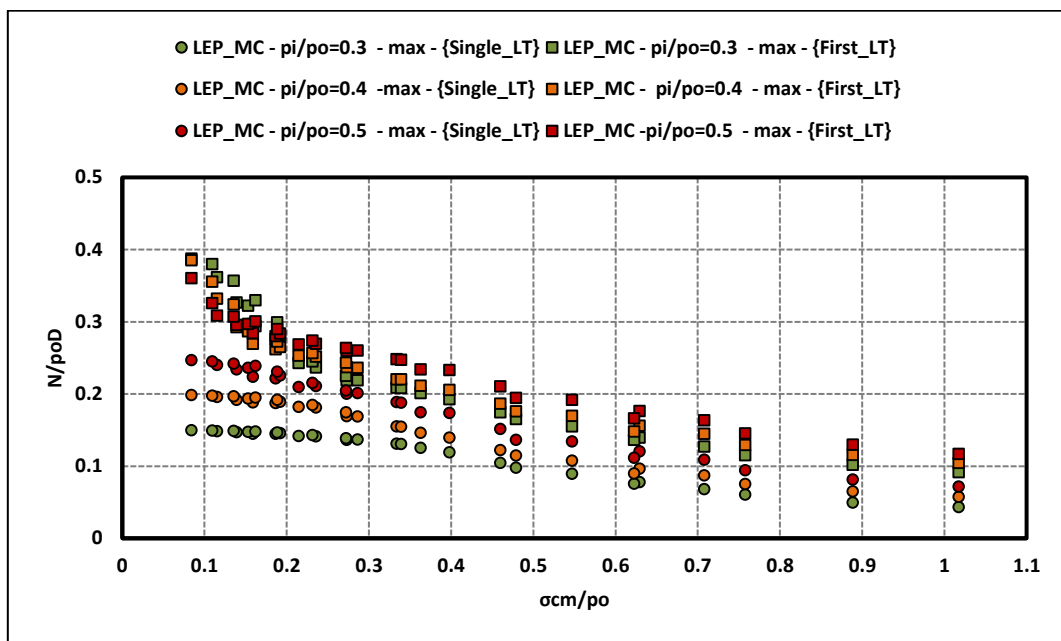


Γράφημα 4-38: Κατανομή της κανονικοποιημένης αξονικής δύναμης $N/\rho_0 D$ στην τυπική διατομή των σηράγγων συναρτήσει της γωνίας θ , για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ , συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0=1$, το ελάχιστο πλάτος πυλώνα ($W/D=0.5$) και το δυσμενέστερο λόγο γεωτεχνικών ($\sigma_{cm}/\rho_0=0.21$).

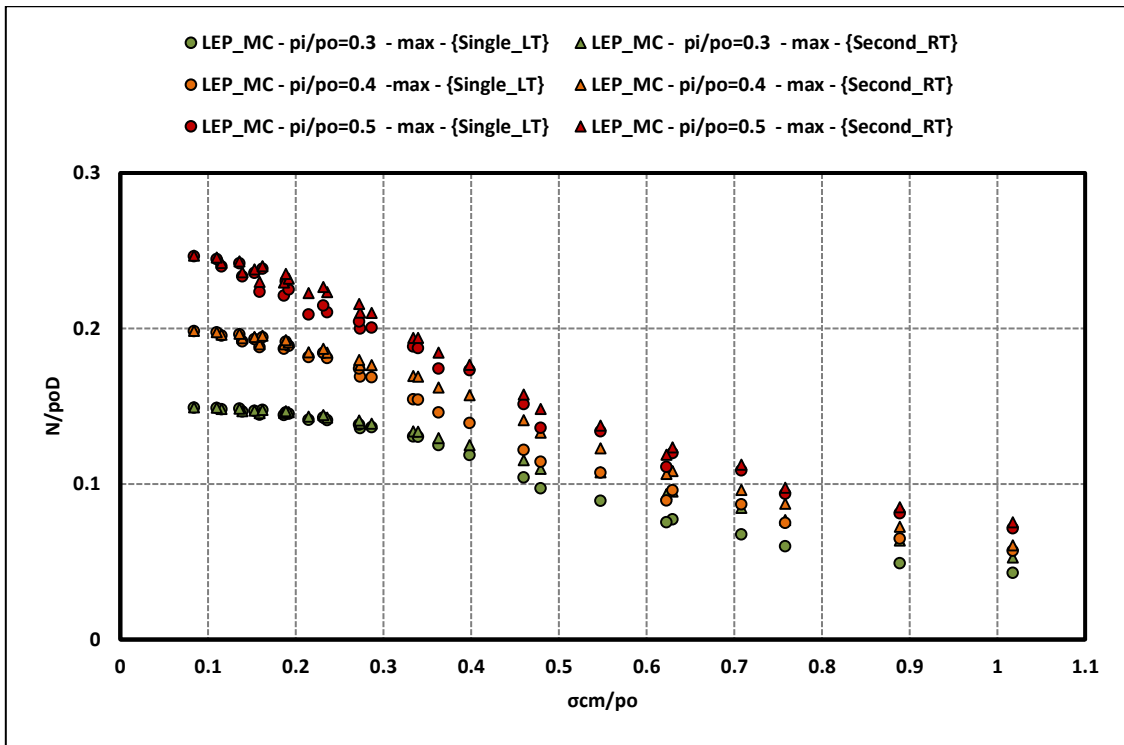
4.2. Συγκεντρωτικά γραφήματα

Στα παρακάτω γραφήματα προβάλλονται οι τιμές των μέγιστων κανονικοποιημένων αξονικών δυνάμεων N , συναρτήσει του λόγου ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o . Αρχικά παρατηρείται ότι η υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας δέχεται εντονότερη καταπόνηση από την «μονή» λόγω της εκσκαφής της «δεύτερης» σήραγγας. Ειδικά για βραχώμαζες πολύ πτωχής ποιότητας η διαφορά της «πρώτης» σήραγγας με την «μονή» είναι πολύ μεγαλύτερη, η οποία όμως μειώνεται με την βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών. Η «δεύτερη» σήραγγα παρουσιάζει αποτελέσματα αντίστοιχα με τα εξαγόμενα για «μονή» σήραγγα.

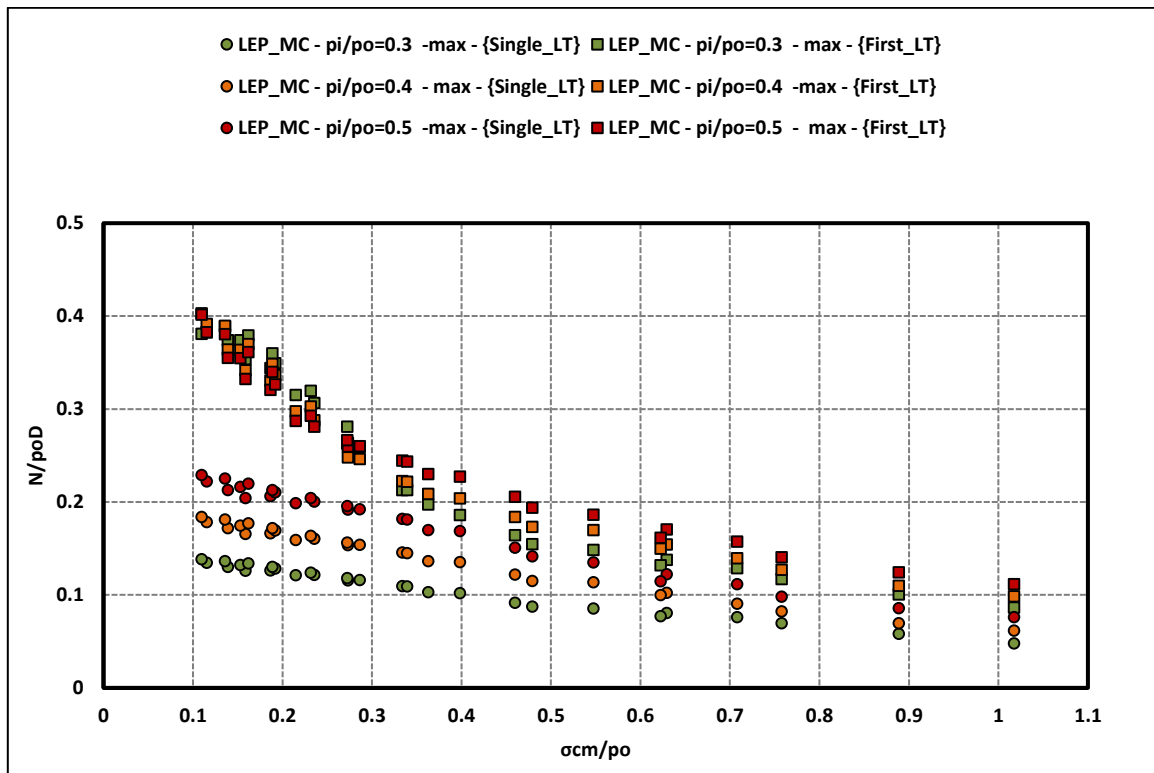
Ακόμα, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ παρατηρούνται μικρότερες μέγιστες τιμές της αξονικής δύναμης επί της υποστήριξης της «μονής» και «δεύτερης» σήραγγας σε σχέση με τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές για $K_o=1$. Ωστόσο, για την «πρώτη» σήραγγα οι μέγιστες τιμές όπως διαμορφώνεται λόγω του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο σηράγγων κυμαίνονται περίπου στο ίδιο επίπεδο και στις δύο περιπτώσεις του συντελεστή K_o .



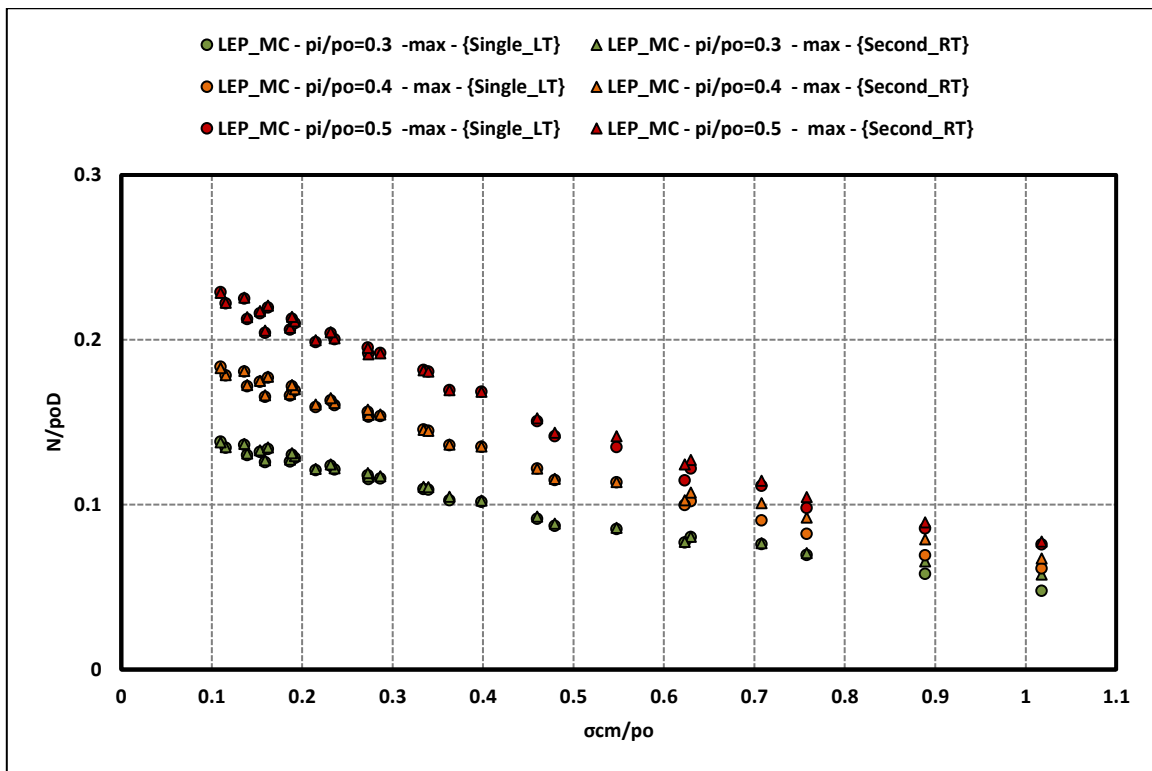
Γράφημα 4-39: Κατανομή της μέγιστης δύναμης $N/\rho_o D$, επί της υποστήριξης της «πρώτης» και της «μονής» σήραγγας, ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o , για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ , συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_o=1$ και πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$.



Γράφημα 4-40: Κατανομή της μέγιστης δύναμης $N/\rho_o D$, επί της υποστήριξης της «δεύτερης» και της «μονής» σήραγγας, ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o , για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ , συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_o=1$ και πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$



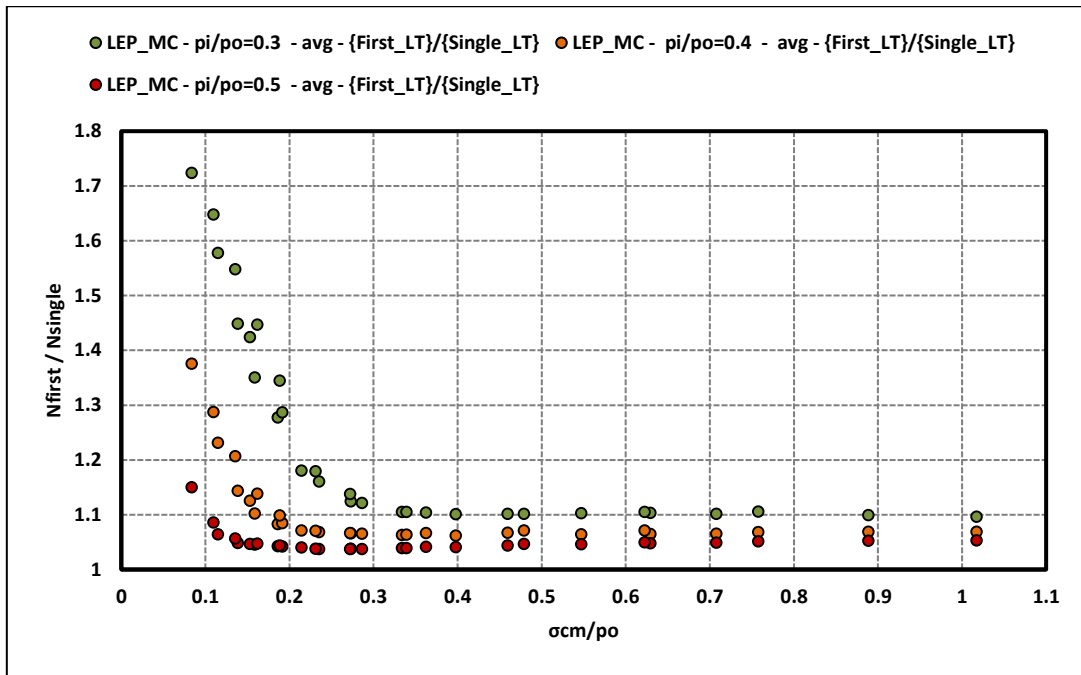
Γράφημα 4-41: Κατανομή της μέγιστης δύναμης $N/\rho_o D$, επί της υποστήριξης της «πρώτης» και της «μονής» σήραγγας, ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o , για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ , συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_o=0.5$ και πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$.



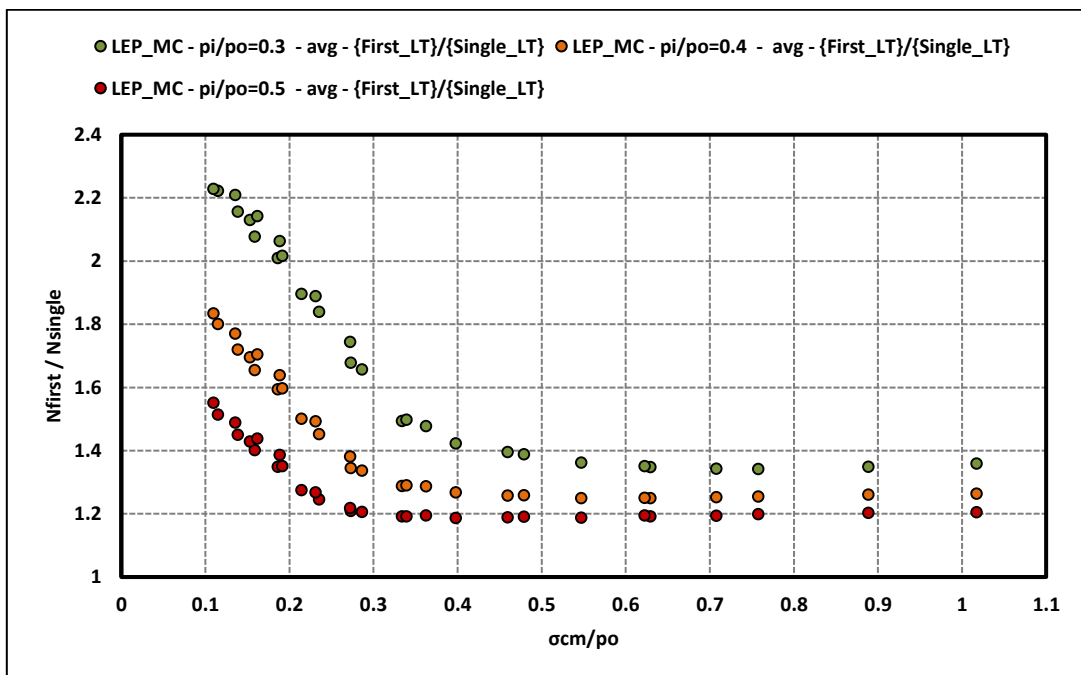
Γράφημα 4-42: Κατανομή της μέγιστης δύναμης $N/\rho_o D$, επί της υποστήριξης της «δεύτερης» και της «μονής» σήραγγας, ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o , για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ , συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_o=0.5$ και πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$

Τα επόμενα γραφήματα συνοψίζουν τα μεγέθη των αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» σήραγγας σε σχέση με τις αξονικές δυνάμεις στην άμεση υποστήριξη της «μονής» N_{first}/N_{single} , ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o και του βαθμού αποτόνωσης λ . Τα συγκεντρωτικά διαγράμματα αναφέρονται στους συντελεστές οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_o που διερευνήθηκαν, δηλαδή $K_o=1$ και $K_o=0.5$. Το Γράφημα 4-43 αναφέρεται στην περίπτωση συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=1$ και το Γράφημα 4-44 στην περίπτωση με $K_o=0.5$.

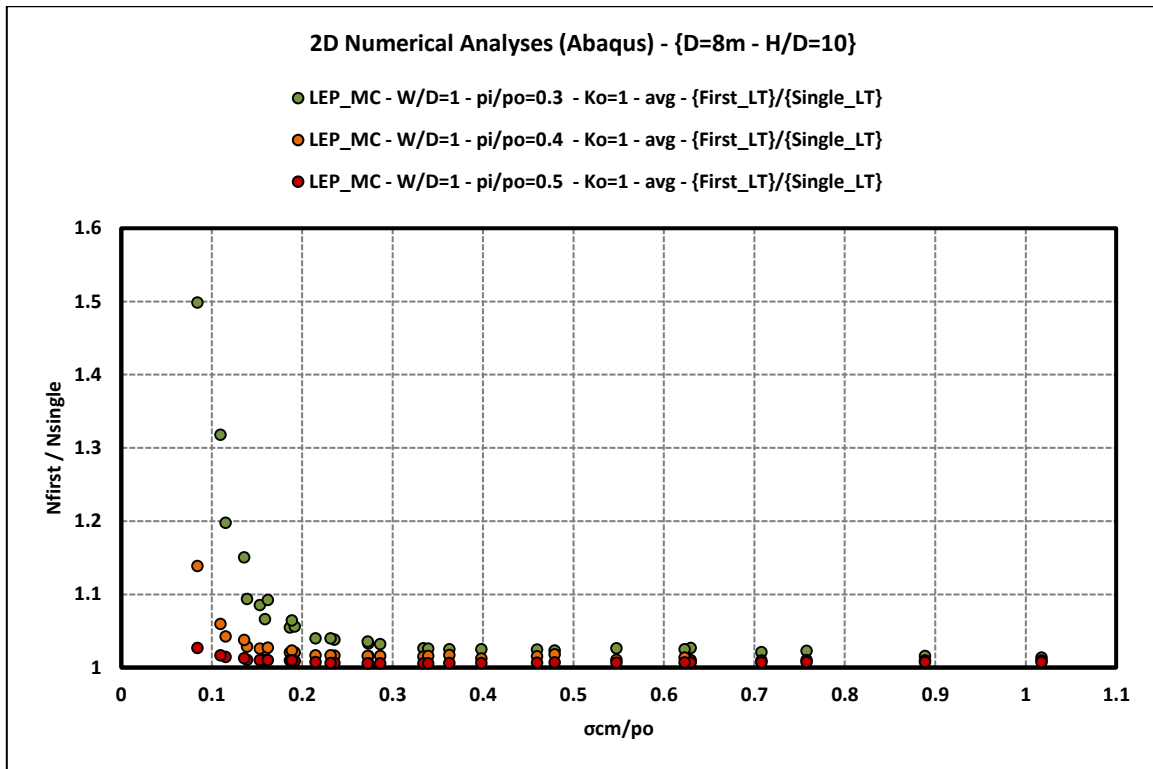
Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται μείωση του λόγου των αξονικών δυνάμεων σε σχέση με τη βελτίωση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών. Ανεξάρτητα του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων, σημειώνεται ότι με την αύξηση της απόστασης εφαρμογής της υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής (αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης λ), προκαλείται αύξηση της επιπρόσθετης αξονικής δύναμης στην υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας. Επομένως, η μείωση του βαθμού της αποτόνωσης (μείωση της απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο), επιδρά ευμενώς για την «πρώτη» σήραγγα, αμβλύνοντας το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης. Επίσης, όσο αυξάνεται το πλάτος του πυλώνα, τόσο περιορίζεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, ειδικά με τη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o . Ειδικότερα, από το Γράφημα 4-46, φαίνεται ότι για πλάτος πυλώνα $W/D=2$ το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης εξαλείφεται.



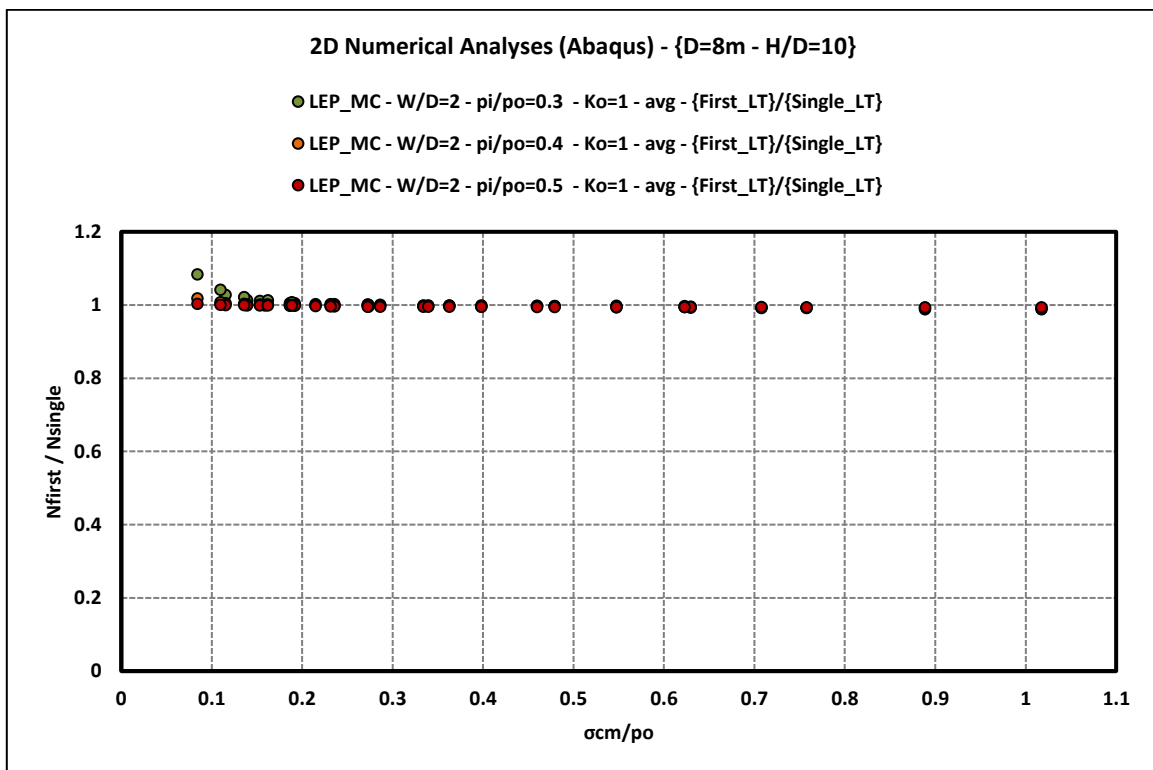
Γράφημα 4-43: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς της «μονή» σήραγγα N_{first}/N_{single} , ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_0 , για διαφορετικές τιμές του βαθμού αποτόνωσης λ , πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=1$.



Γράφημα 4-44: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς της «μονή» σήραγγα N_{first}/N_{single} , ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_0 , για διαφορετικές τιμές του βαθμού αποτόνωσης λ , πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ και συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=0.5$.



Γράφημα 4-45: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς της «μονή» σήραγγα N_{first}/N_{single} , ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o , για διαφορετικές τιμές του βαθμού αποτόνωσης λ , πλάτος πυλώνα $W/D=1$ και συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_o=1$

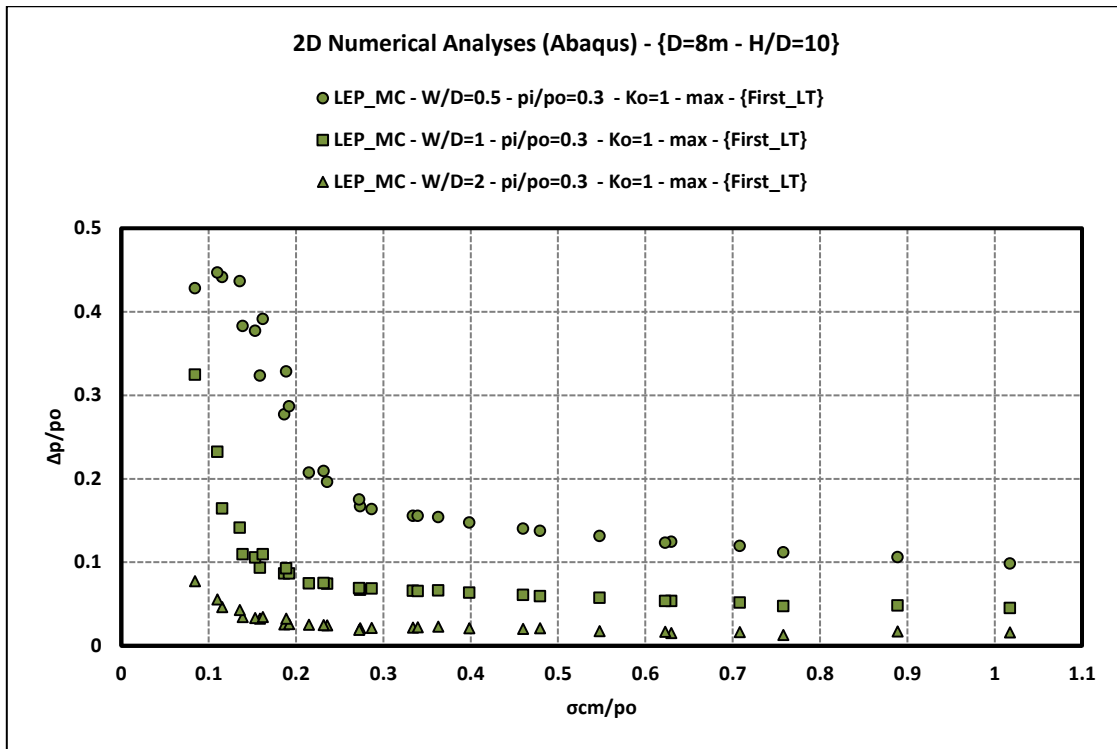


Γράφημα 4-46: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς της «μονή» σήραγγα N_{first}/N_{single} , ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o , για διαφορετικές τιμές του βαθμού αποτόνωσης λ , πλάτος πυλώνα $W/D=2$ και συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_o=1$

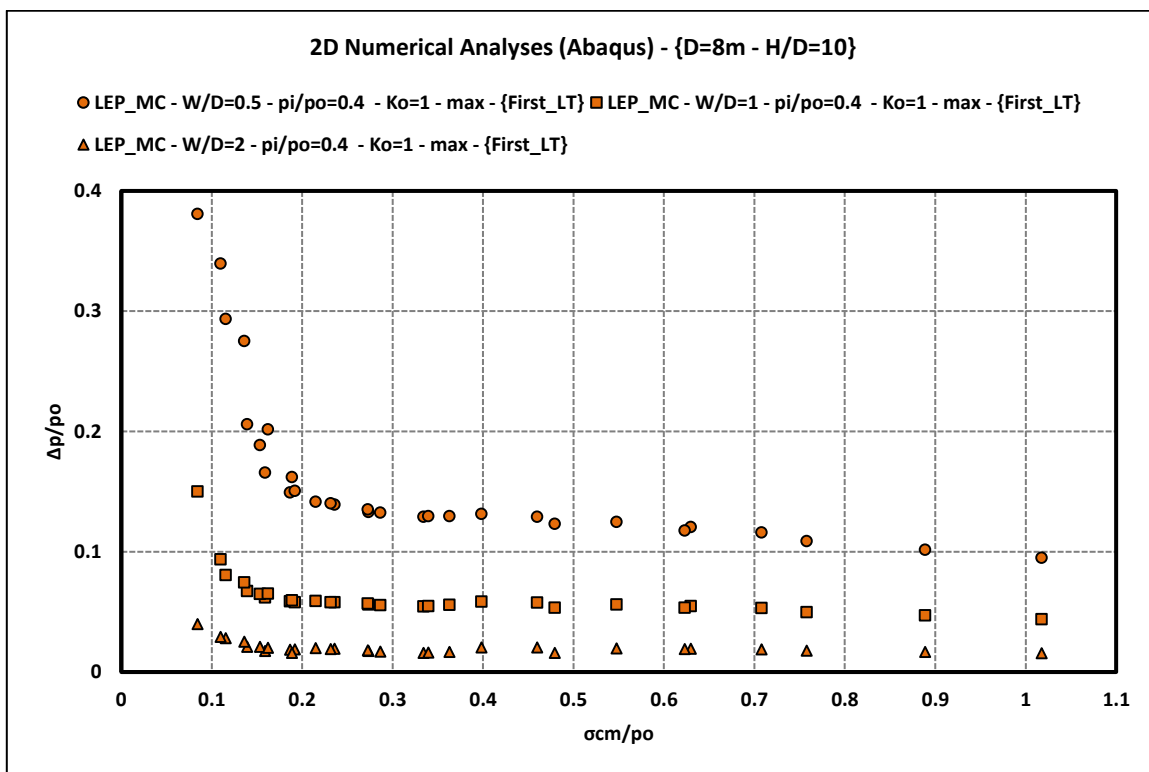
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαφοράς των φορτίων $\Delta p = p_{\text{first}} - p_{\text{single}}$ επί της άμεσης υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος κανονικοποιημένη με τη μέση αρχική γεωστατική πίεση p_0 , συναρτήσει του λόγου ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/p_0 για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα W/D . Ανεξάρτητα του βαθμού αποτόνωσης λ , του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0 και του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/p_0 , παρατηρείται ότι υπάρχει αύξηση της καταπόνησης στην υποστήριξη της διατομής με την μείωση του πλάτους του πυλώνα. Η αύξηση αυτή μειώνεται με την βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών, ειδικά για πολύ καλής ποιότητας βραχόμαζα οι διαφορές είναι πολύ μικρές. Αυτό είναι λογικό, καθώς με την βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών η βραχόμαζα έχει υψηλότερη αντοχή, ενώ όσο πιο διαταραγμένη είναι η βραχόμαζα τόσο μεγαλύτερα φορτία θα καταπονούν το κέλυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Ακόμα, η καμπύλη που αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο πλάτος πυλώνα τείνει στην τιμή μηδέν, το οποίο σημαίνει ότι οι σήραγγες δρουν ως ανεξάρτητες μεταξύ τους κατασκευές.

Συγκρίνοντας τα γραφήματα (4-47, 4-48, 4-49) μεταξύ τους ή τα γραφήματα (4-50, 4-51, 4-52) που αφορούν την διατομή της «πρώτης» σήραγγας, με την μείωση της απόστασης εφαρμογής της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής επέρχεται μείωση της διαφοράς των φορτίων $\Delta p = p_{\text{first}} - p_{\text{single}}$, που σημαίνει ότι αυτή η μείωση του λ λειτουργεί ευμενώς στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων. Επίσης συγκρίνοντας τα γραφήματα (4-47, 4-50), για ίδιο βαθμό αποτόνωσης με διαφορετικούς συντελεστές οριζόντιων γεωστατικών τάσεων παρατηρείται μία αύξηση της διαφοράς των φορτίων $\Delta p = p_{\text{first}} - p_{\text{single}}$ στην περίπτωση με συντελεστή $K_0 = 0.5$, η οποία μειώνεται με την βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών και με την αύξηση της εγκάρσιας απόστασης των σηράγγων από παρειά σε παρειά.

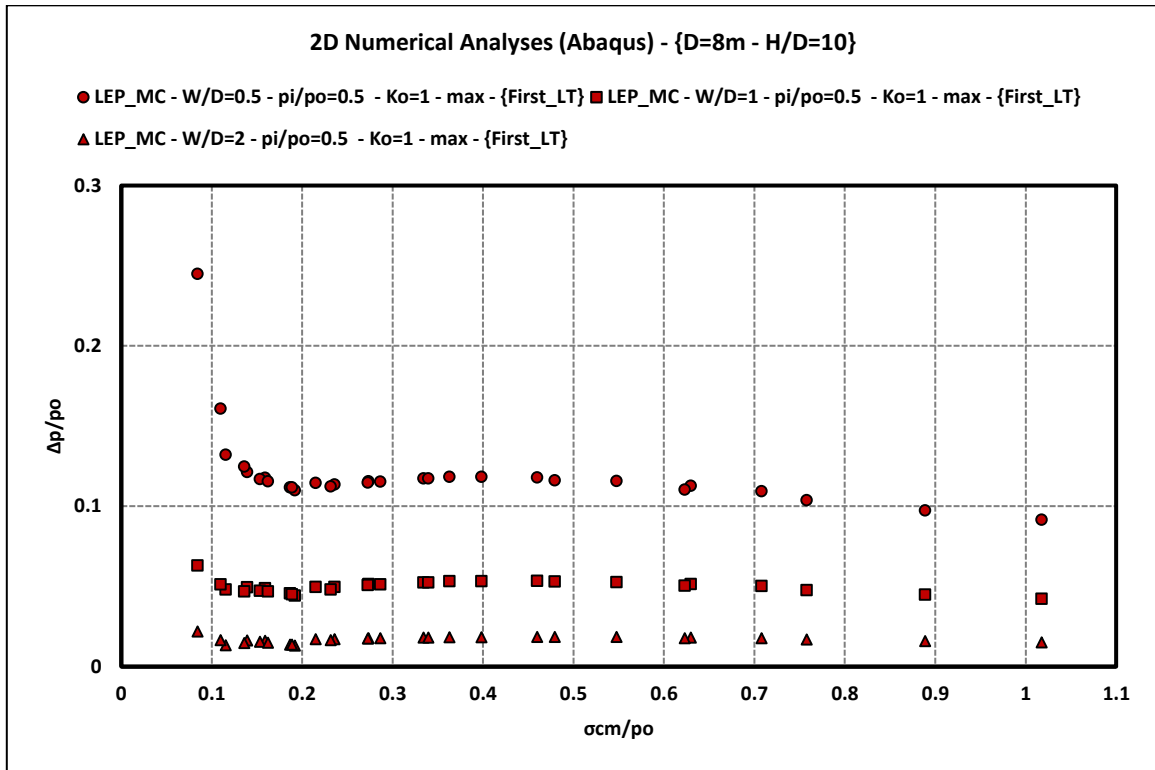
Σημειώνεται ότι τα συμπεράσματα που παράγονται από τα παρακάτω γραφήματα για το φορτίο p είναι ανάλογα με αυτά της αξονικής δύναμης N , καθώς αυτά τα μεγέθη εξαρτώνται μεταξύ τους ($N = p \cdot R$), όπου p η ορθή τάση που ασκείται στο κέλυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



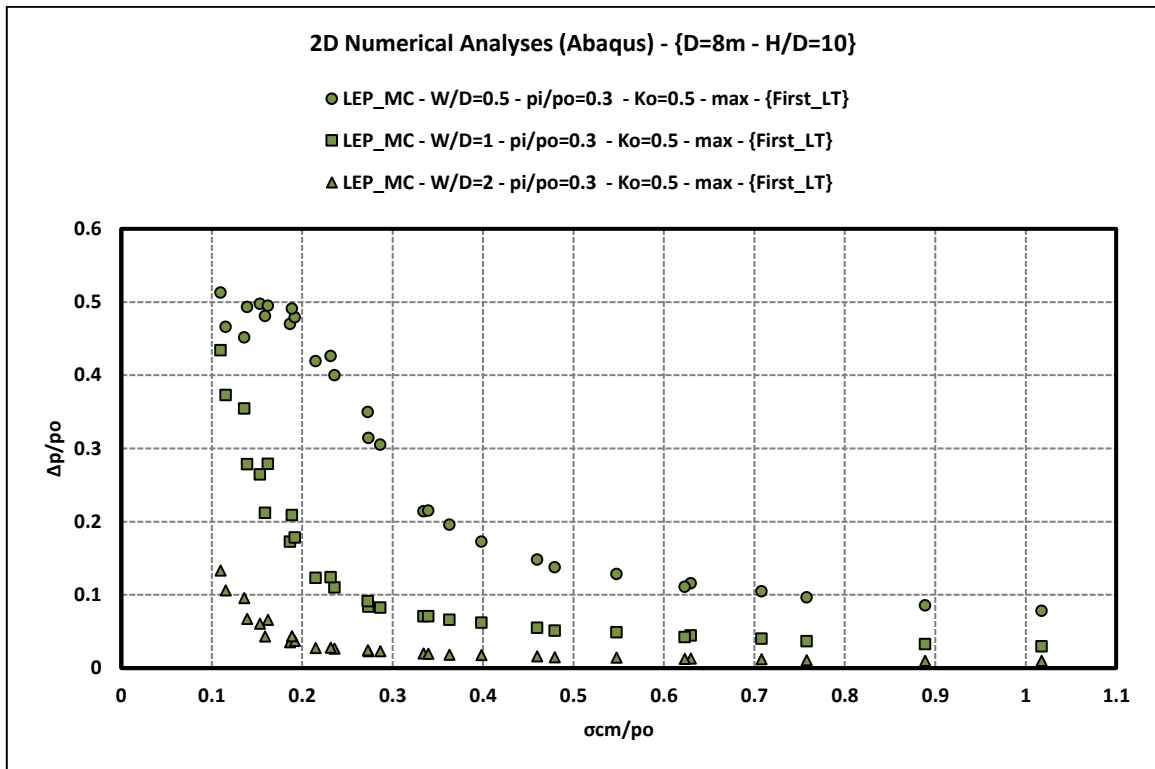
Γράφημα 4-47: Κατανομή της κανονικοποιημένης μέγιστης διαφοράς των φορτίων $\Delta p/\rho_0$, συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_0 , για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα W/D, για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$ και συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=1$.



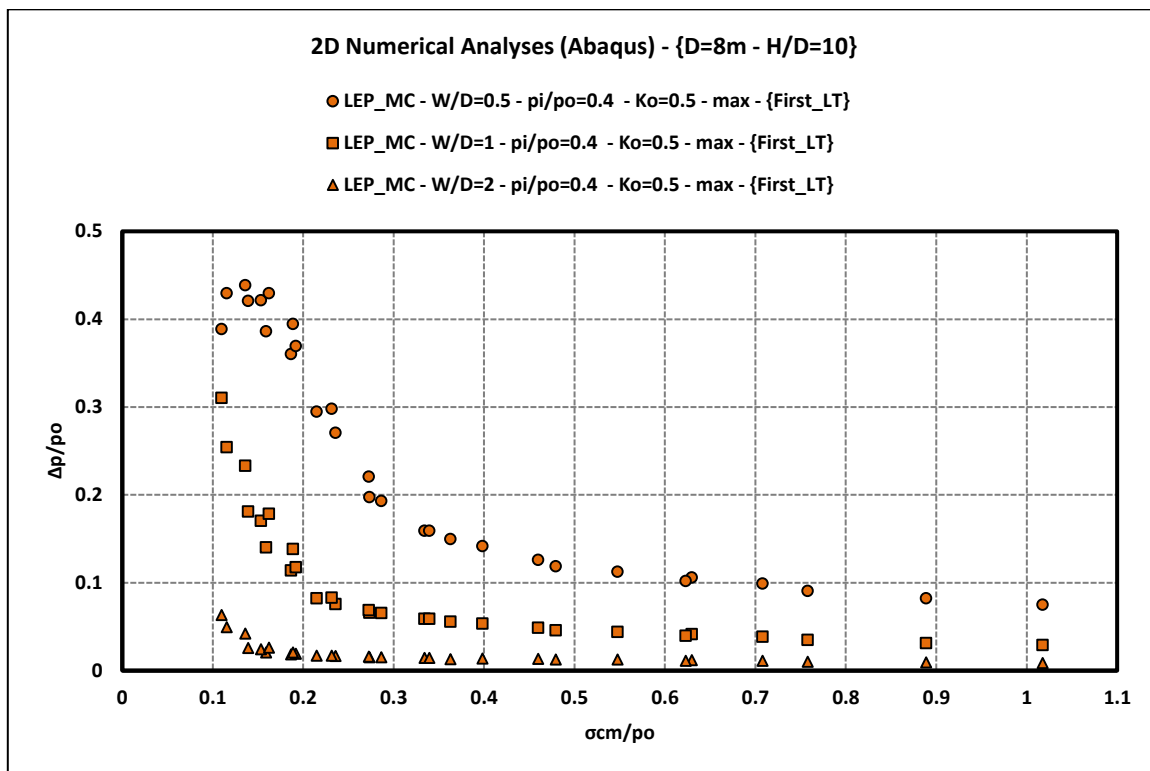
Γράφημα 4-48: Κατανομή της κανονικοποιημένης μέγιστης διαφοράς των φορτίων $\Delta p/\rho_0$, συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_0 , για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα W/D, για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.6$ και συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=1$.



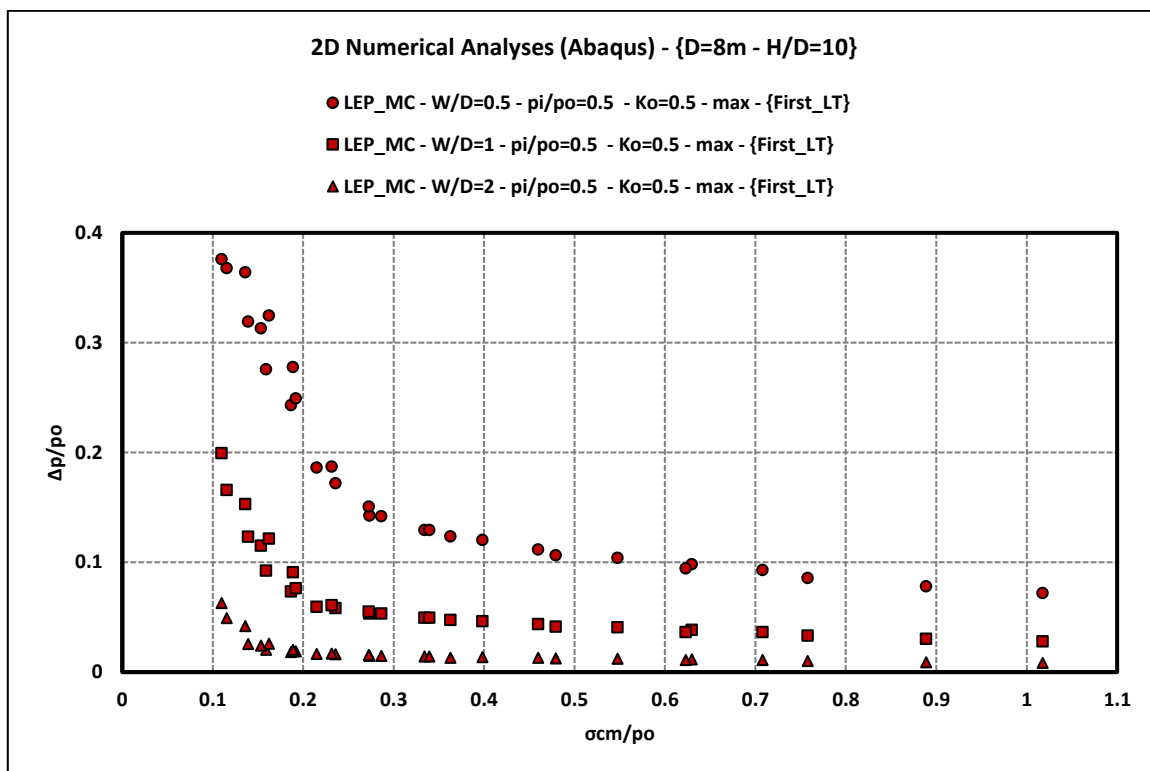
Γράφημα 4-49: Κατανομή της κανονικοποιημένης μέγιστης διαφοράς των φορτίων $\Delta p/\rho_0$, συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_0 , για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα W/D, για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.5$ και συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=1$



Γράφημα 4-50: Κατανομή της κανονικοποιημένης μέγιστης διαφοράς των φορτίων $\Delta p/\rho_0$, συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_0 , για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα W/D, για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.7$ και συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=0.5$



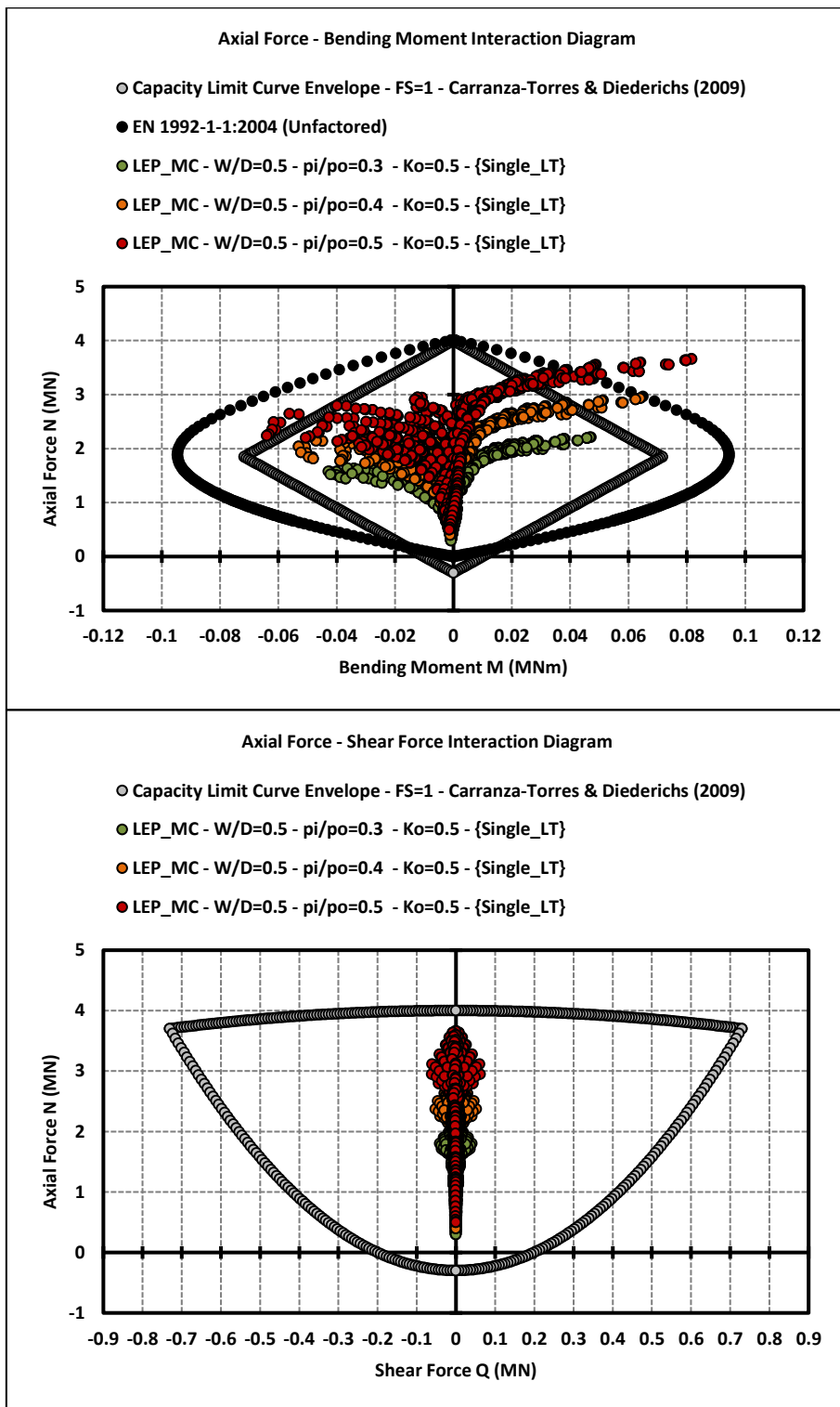
Γράφημα 4-51: Κατανομή της κανονικοποιημένης μέγιστης διαφοράς των φορτίων $\Delta p/\rho_0$, συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_0 , για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα W/D, για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.6$ και συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=0.5$



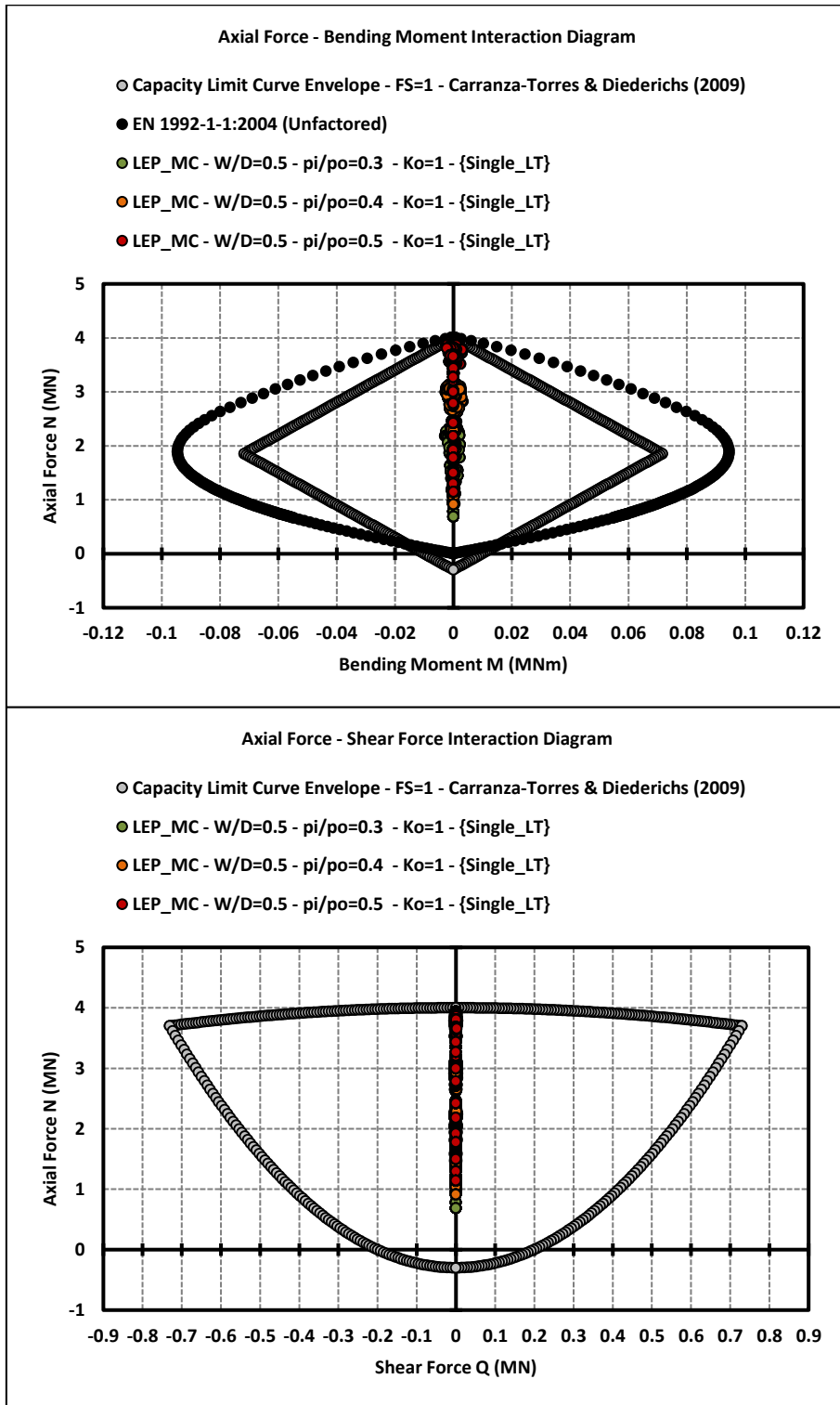
Γράφημα 4-52: Κατανομή της κανονικοποιημένης μέγιστης διαφοράς των φορτίων $\Delta p/\rho_0$, συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_0 , για διαφορετικές τιμές του πλάτους πυλώνα W/D, για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.5$ και συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=0.5$

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων-καμπτικών ροπών και τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων-τεμνουσών δυνάμεων για βραχόμαζες με όλες τις τιμές του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_o που ερευνήθηκαν, διαφορετικές τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ που κυμαίνονται από $\lambda=0.5$ έως $\lambda=0.7$ και για τιμές συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ και $K_o=1$.

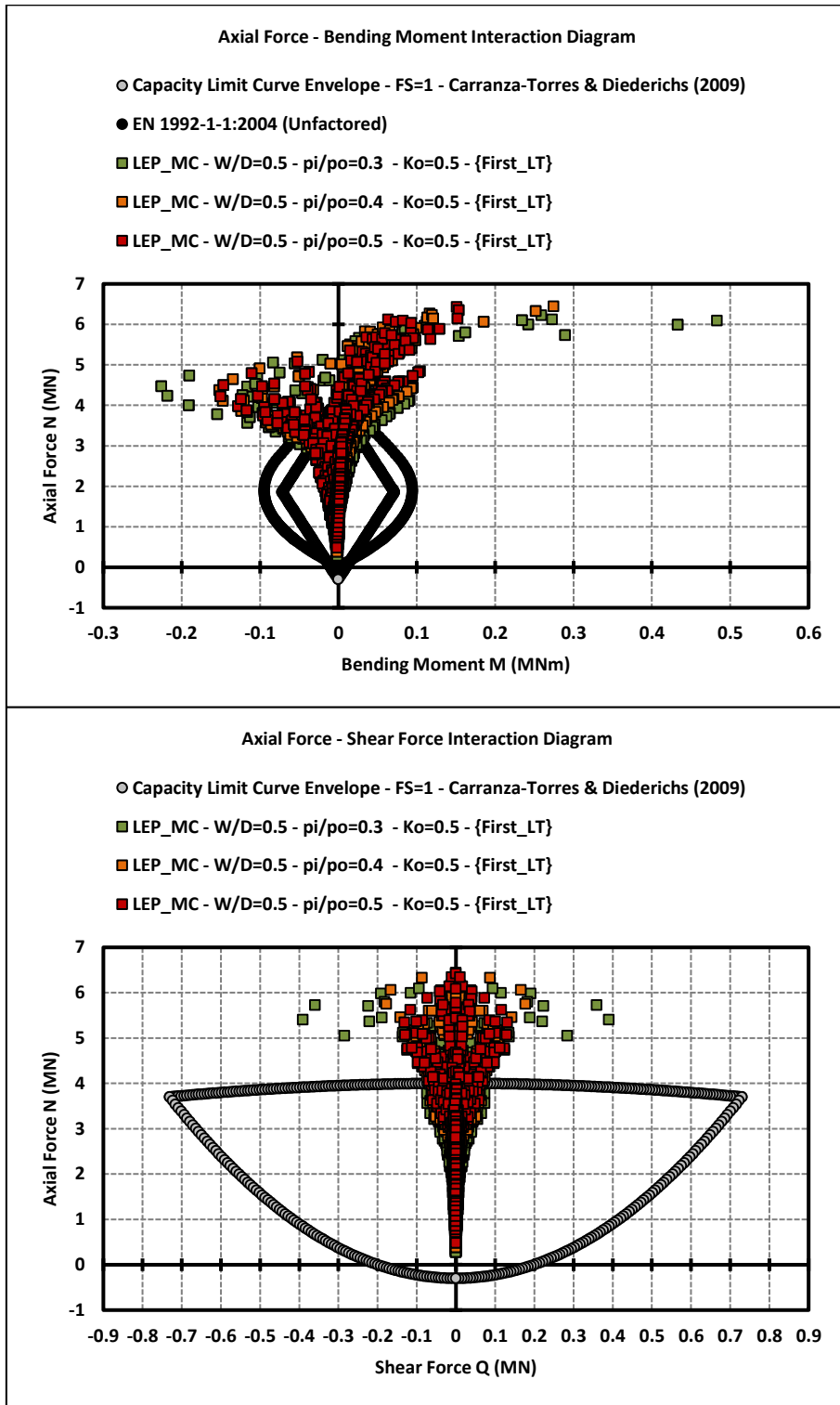
Παρατηρείται λοιπόν από το διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - καμπτικών ροπών για την διατομή της «μονής» σήραγγας ότι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οριακά αστοχεί και μόνο στην περίπτωση για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0.5$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o=0.5$ για ορισμένες τιμές του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών με βάση την καμπύλη αστοχίας κατά τον Ευρωκώδικα. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται μικρή αύξηση του πάχους του σκυροδέματος για την αποφυγή της αστοχίας σε αυτή την περίπτωση. Ενώ στην περίπτωση όπου $\lambda=0.7$ το σκυρόδεμα δεν αστοχεί. Ακόμα, το διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων - τεμνουσών δυνάμεων δεν παρουσιάζει αστοχία στην περίπτωση της «μονής» σήραγγας. Στα γραφήματα που αφορούν την διατομή της «πρώτης» σήραγγας παρατηρείται, από το διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων-καμπτικών ροπών αλλά και από το διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων-τεμνουσών δυνάμεων, ότι υπάρχει αστοχία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης με βάση το όριο της περιβάλλουσας αστοχίας για συντελεστή ασφαλείας $FS=1$ κατά τους Carranza-Torres & Diederichs (2009) αλλά και κατά τον Ευρωκώδικα. Για ακόμα μία φορά τα αποτελέσματα αποδεικνύουν την εντονότερη καταπόνηση της υποστήριξης της διατομής της «πρώτης» σήραγγας σε σχέση με την διατομή της «μονής» σήραγγας.



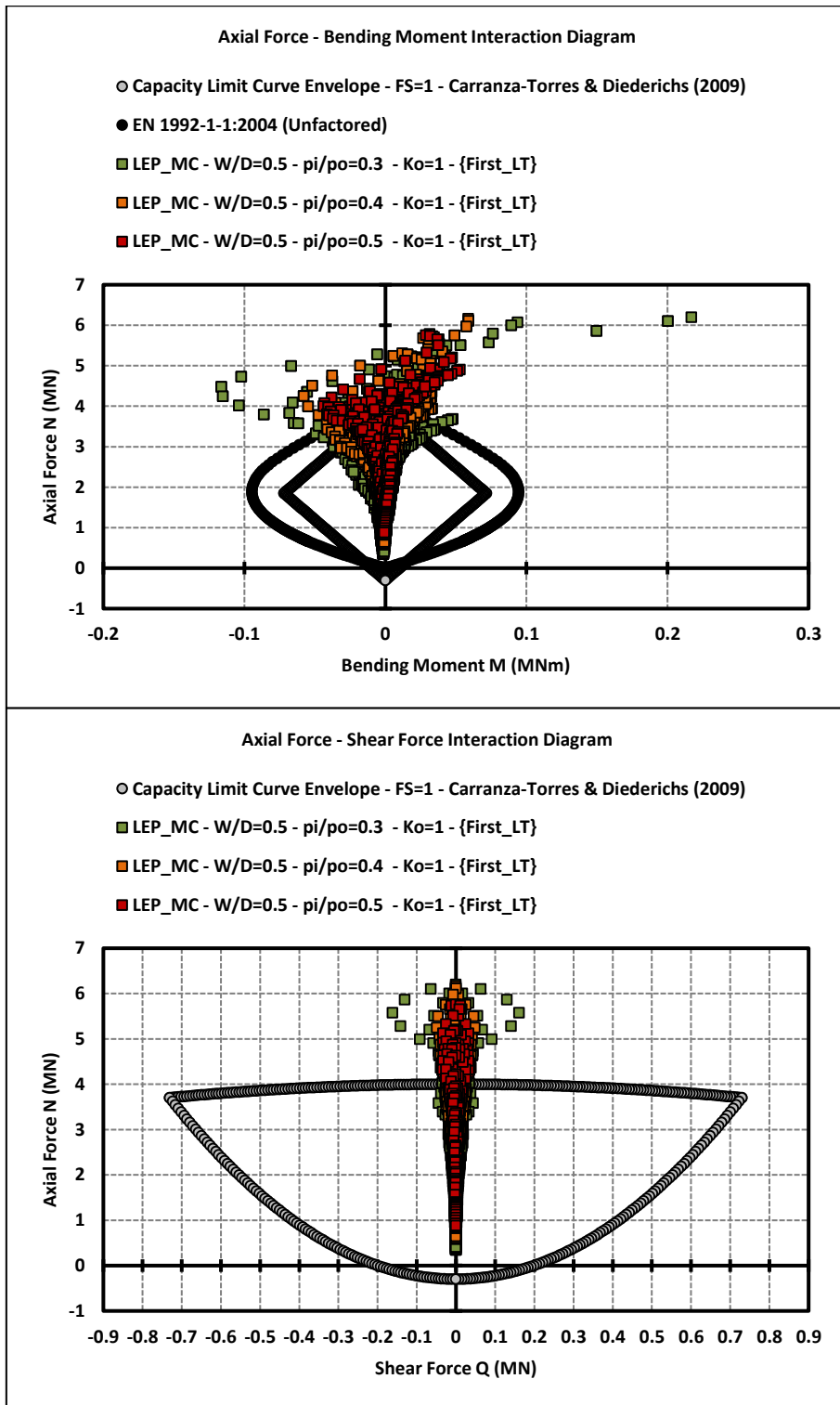
Γράφημα 4-53: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για την υποστήριξη της διατομής της «μονής» σήραγγας για συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=0.5$, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$, για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ και για διαφορετικούς λόγους γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_0 .



Γράφημα 4-54: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για την υποστήριξη της διατομής της «μονής» σήραγγας για συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=1$, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$, για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ και για διαφορετικούς λόγους γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_0



Γράφημα 4-55: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για την υποστήριξης της διατομής της «πρώτης» σήραγγας για συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=0.5$, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$, για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ και για διαφορετικούς λόγους γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_0



Γράφημα 4-56: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για την υποστήριξη της διατομής της «πρώτης» σήραγγας για συντελεστή οριζόντιων τάσεων $K_0=1$, για πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$, για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ και για διαφορετικούς λόγους γεωτεχνικών συνθηκών σ_{cm}/ρ_0 .

5. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η διερεύνηση του μηχανισμού της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων. Έτσι, διερευνήθηκαν τα μεγέθη των εντατικών μεγεθών (αξονικών δυνάμεων και ροπών κάμψης) και των ορθών τάσεων που ασκούνται στην άμεση υποστήριξη των δύο κλάδων εξετάζοντας μια σειρά από μεγέθη πλατών πυλώνα μεταξύ των σηράγγων, γεωτεχνικών συνθηκών, συντελεστών οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και συντελεστών αποτόνωσης. Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα, βασισμένα στις παραδοχές που υιοθετήθηκαν στα πλαίσια της έρευνας, καθώς επίσης προτάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης.

5.1. Συμπεράσματα

Ανεξαρτήτως των γεωτεχνικών συνθηκών, πλάτους πυλώνα και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων, η «πρώτη» σήραγγα (first tunnel) δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση σε σχέση με τη «μονή» (single tunnel) ή τη «δεύτερη» (second tunnel). Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι η αριστερή σήραγγα παραλαμβάνει μεγαλύτερο μέρος φορτίου σε σχέση με τη δεξιά, ενώ αυτή η διαφορά στην καταπόνηση μειώνεται με βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών. Η μεγιστοποίηση της αξονικής δύναμης εμφανίζεται στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» σήραγγας ($\Theta=90^\circ$). Επίσης, η «δεύτερη» σήραγγα παρουσιάζει ίδιο προφίλ με αυτό της «μονής» σήραγγας. Το φαινόμενο ερμηνεύεται ως εξής: η δεξιά σήραγγα εκσκάπτεται ύστερα από την ολοκλήρωση της εκσκαφής και υποστήριξης της αριστερής και η ανακατανομή των τάσεων που πραγματοποιείται κατά την εκσκαφή της δεξιάς δεν προκαλεί περαιτέρω σύγκλιση, καθώς η άκαμπτη υποστήριξη της αριστερής εμποδίζει τη μετακίνηση αυτή, οδηγώντας σε αύξηση των φορτίων.

Επίδραση των γεωτεχνικών συνθηκών

Οι γεωτεχνικές συνθήκες ασκούν επιρροή στην αλληλεπίδραση των παράλληλων σηράγγων καθώς τα εντατικά μεγέθη που παραλαμβάνει η άμεση υποστήριξη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος εξαρτώνται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά και την ποιότητα της βραχώμαζας.

Επίδραση του πλάτους του πυλώνα

Η επίδραση που έχει η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των παρειών των δίδυμων σηράγγων στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης περιγράφεται παρακάτω.

- Με την αύξηση του πλάτους του πυλώνα παρατηρείται μείωση των αξονικών δυνάμεων και των ροπών κάμψης στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων, αφού η ζώνη αλληλεπίδρασης μεταξύ τους ελαττώνεται. Πιο συγκεκριμένα, για εγκάρσια απόσταση μεταξύ των παρειών των δίδυμων σηράγγων μεγαλύτερη από την διπλάσια τιμή της

διαμέτρου της σήραγγας, το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης εξαλείφεται και οι σήραγγες αποκρίνονται ως ανεξάρτητες.

Επίδραση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων K_0

- Ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων επηρεάζει σημαντικά τα φορτία και τα εντατικά μεγέθη που δέχεται η άμεση υποστήριξη των σηράγγων. Συγκεκριμένα, καθορίζει την κατανομή των τάσεων περιμετρικά των διατομών, επηρεάζοντας τις αναπτυσσόμενες πλαστικές παραμορφώσεις και μετακινήσεις του περιβάλλοντος γεωυλικού και κατ' επέκταση την κατανομή των φορτίων.
- Για $K_0=0.5$ η άμεση υποστήριξη της «μονής» σήραγγας παραλαμβάνει μεγαλύτερα φορτία στις παρειές, ενώ μικρότερα στη στέψη και τον πυθμένα. Τα μέγιστα φορτία εντοπίζονται στις περιοχές όπου λαμβάνουν χώρα οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις (περιοχή αύξησης των τάσεων). Στην περίπτωση όπου οι αρχικές τάσεις είναι ισομεγέθεις ($K_0=1$) παρατηρείται ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων στην άμεση υποστήριξη της «μονής» σήραγγας

Επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης λ

Η απόσταση εφαρμογής της υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής επιδρά σημαντικά στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.

- Αναφορικά στην «μονή» σήραγγα, με την μείωση του συντελεστή του βαθμού αποτόνωσης λ , δηλαδή μείωση της απόστασης εφαρμογής της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής προκαλείται αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη. Δηλαδή, όσο πιο γρήγορα τοποθετείται η άμεση υποστήριξη, τόσο δεν ολοκληρώνεται η σύγκλιση της βραχόμαζας και η άμεση υποστήριξη της διατομής αναλαμβάνει μεγαλύτερα φορτία.
- Επίσης σημειώνεται για την «πρώτη» σήραγγα ότι για ασθενείς γεωτεχνικές συνθήκες, με την αύξηση του βαθμού αποτόνωσης, δηλαδή την αύξηση της απόστασης εφαρμογής της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής, σημειώνεται αύξηση του φορτίου της άμεσης υποστήριξης. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η εκσκαφή της «δεύτερης» σήραγγας διαταράσσει σε μεγαλύτερο εύρος και βαθμό την περιβάλλουσα βραχόμαζα και σε συνδυασμό με τη μεγαλύτερη αποτόνωση που συντελείται λόγω της διάνοιξής της, το άκαμπτο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας εμποδίζει την ανάπτυξη μετακινήσεων. Ως αποτέλεσμα, η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας παραλαμβάνει μεγαλύτερα φορτία σε σχέση με αυτή της «μονής». Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής τόσο μεγαλύτερη περιοχή υποβάλλεται σε νέες ανακατανομές τάσεων και σε επιπρόσθετες παραμορφώσεις με αποτέλεσμα η επιφόρτιση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της υφιστάμενης σήραγγας να καθίσταται εντονότερη.

5.2. Προτάσεις

Παρακάτω παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων.

- Η πραγματοποίηση τμηματικής εκσκαφής αντί για ολομέτωπη εκσκαφή που μελετά η παρούσα εργασία, δηλαδή η εκσκαφή να αποτελείται από δύο ή περισσότερες φάσεις.
- Η μελέτη της συμπεριφοράς πεταλοειδούς διατομής σηράγγων και σύγκριση των εντατικών μεγεθών και των ορθών τάσεων με αυτά των κυκλικών διατομών.
- Η μελέτη διαφορετικού και πιο σύνθετου καταστατικού προσομοιώματος και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb.
- Η επιλογή διαφορετικού τύπου υποστήριξης από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Για παράδειγμα άλλοι τύποι υποστήριξης που θα μπορούσαν να μελετηθούν είναι τα αγκύρια, τα μεταλλικά πλαίσια, κλπ.

Βιβλιογραφία

ABAQUS 6.14-5 Documentation, 2014, SIMULIA, United States of America

Adachi T., Kimura M., Osada H., 1993, "Interaction Between Multi-Tunnels Under Construction", Eleventh Southeast Asian Geotechnical Conference, Singapore, pp. 51-60

Addenbrooke T.I., Potts D.M., 1996, "Twin tunnel construction - Ground movements and lining behavior", Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Balkema, Rotterdam, pp. 441-446

Carranza C. - Torres, Diederichs M, 2009, "Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports - For example liners consisting of shotcrete and steel sets", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 24, pp. 506–532

Carranza C. - Torres, Fairhurst C., 2000, "Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 15, pp. 187-213

Chen S.L, Lee S.C., Gui M.W., 2009, "Effects of rock pillar width on the excavation behavior of parallel tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 24, pp. 148–154

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

Do N-A, Dias D., Oreste P., Djeran-Maigre I., 2014, "Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin tunnels in soft ground", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 42, pp. 40–51

Ghaboussi J., Ranken R.E., 1977, "Interaction Between Two Parallel Tunnels", International Journal For Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 1, 75-103

Hoek E., Diederichs M.S., 2006, "Empirical estimation of rock mass modulus", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 43, pp. 203–215

Karakus M., Ozsan A., Basarir H., 2007, "Finite element analysis for the twin metrotunnel constructed in Ankara Clay-Turkey", Bull Eng Geol Env, Vol. 66, pp. 71–79

Kim S.H, 2004, "Interaction Behaviours between Parallel Tunnels in Soft Ground", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 19, pp. 448-454

Kim S.H., Burd H.J., Milligan G.W.E., 1998, “Model testing of closely spaced tunnels in clay”, *Geotechnique* Vol. 48, pp. 375–388

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

Liu H.Y., Small J.C., Carter J.P., 2007, “Full 3D modelling for effects of tunnelling on existing support systems in the Sydney region”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.23,pp. 399–420

Soliman E., Duddeck H., Ahrens H., 1993, “Two-and Three-dimensional Analysis of Closely Spaced Double-tube Tunnels”, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 8, pp. 13-18

Καββαδάς Μ., 2012, “Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Καββαδάς Μ., Τσιαμπάος Γ., 2016, “Σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος Βραχομηχανική - Σήραγγες”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Μπεκρή Ε., 2012, “Διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων”, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Ψυχάρη Ε., 2016, “Υπολογιστική διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων βαθιών σηράγγων με έμφαση στο συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και στο συντελεστή αποτόνωσης”, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα