



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Δ.Μ.Π.Σ. “Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων”
Σχολές: Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών
Πολιτικών Μηχανικών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΒΑΘΙΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ
ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕΣΩ ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ**

ΚΑΡΑΝΑΣΙΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣ
ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΚΑΒΒΑΔΑΣ ΜΙΧΑΗΛ
ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ
ΙΟΥΝΙΟΣ 2018

Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Δ.Π.Μ.Σ. «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και συγκεκριμένα στον Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, κ. Καββαδά Μιχαήλ, για την ανάθεση της εκπόνησης της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας καθώς και για την ευκαιρία και την βοήθεια που μου έδωσε να εμβαθύνω στο γνωστικό αντικείμενο του σχεδιασμού των σηράγγων.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω και στον κ. Χόρτη Φίλιππο, Υποψήφιο Διδάκτωρ ΕΜΠ για την πολύτιμη και συνεχή βοήθειά του και καθοδήγησή του καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Οι υποδείξεις και οι επιστημονικές γνώσεις που μου παρείχε, συντέλεσαν καθοριστικά στη διεκπεραίωση της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και στους φίλους μου για την έμπρακτη και ουσιαστική υποστήριξη που μου παρείχαν όλους αυτούς τους μήνες.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση και θεωρητικά στοιχεία	3
2.1. Άρθρα αλληλεπίδρασης γειτονικών σηράγγων	3
2.1.1. Terzaghi H. 1942, Ward W.H. & Thomas H.S.H., 1965	3
2.1.2. Ghaboussi J., Ranken R.E., 1977	4
2.1.3. Addenbrooke T.I., Potts D.M., 1996	5
2.1.4. Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C., 1996	7
2.1.5. Koungelis D.K., Augarde C.E., 2004	10
2.1.5.1. Σήραγγες με παράλληλους άξονες κατά την οριζόντια διεύθυνση (side by side geometry)	11
2.1.5.2. Σήραγγες με παράλληλους άξονες κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (piggy back geometries)	13
2.1.6. Kim S.H., 2004	15
2.1.6.1. Πειραματικό μοντέλο και διαδικασία	15
2.1.6.2. Αριθμητικές αναλύσεις	16
2.1.6.3. Αποτελέσματα	16
2.1.7. Ng C.W.W., Lee K.M. & Tang D.K.W., 2004	18
2.1.8. Chen S.L., Lee S.C. & Gui M.W., 2008	23
2.1.8.1. Τρεις παράλληλοι κλάδοι	23
2.1.8.2. Τέσσερις παράλληλοι κλάδοι	24
2.1.8.3. Δύο παράλληλοι κλάδοι	25
2.1.8.4. Συμπεράσματα	26
2.1.9. Μπεκρή Ε., 2009	27
2.1.10. Νύχτη Φ., 2016	33
2.1.11. Ψυχάρη Ε., 2016	37
2.2. Μηχανική των σηράγγων	43
2.2.1. Διαγράμματα αλληλεπίδρασης Carranza-Torres & Diederichs (2009)	43
2.2.2. Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown	46
2.2.3. Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb	48
3. Προσομοίωση του προβλήματος	51
3.1. Εισαγωγή	51
3.2. Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Abaqus v6.14	51
3.3. Περιγραφή των αριθμητικών προσομοιωμάτων	52
3.3.1. Γεωμετρία	52
3.3.2. Διαμόρφωση και διακριτοποίηση καννάβου	54
3.3.3. Βήματα αριθμητικών αναλύσεων και εξαγωγή αποτελεσμάτων	56
3.4. Εξαγωγή αποτελεσμάτων	58
3.5. Παράμετροι αριθμητικών αναλύσεων	59
3.5.1. Γεωμετρικές – Κατασκευαστικές	59
3.5.2. Γεωτεχνικές παράμετροι	59

3.5.3.	Παράμετροι άμεσης υποστήριξης -----	61
3.6.	Έννοιες και παραδοχές -----	63
4.	Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων -----	65
4.1.	Εισαγωγή -----	65
4.2.	Επίδραση παραμέτρων για χαρακτηριστικές βραχομάζες -----	66
4.2.1.	Επίδραση του πλάτους πυλώνα (W/D) -----	66
4.2.2.	Επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης λ -----	70
4.2.3.	Πλαστικές περιοχές στην περιφέρεια των σηράγγων -----	74
4.2.4.	Επίδραση της βαθμονόμησης του καταστατικού προσομοιώματος -----	78
4.2.5.	Τάσεις και μετακινήσεις της βραχομάζας στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση -----	80
4.2.5.1.	Τάσεις και μετακινήσεις εδάφους στην οριζόντια διεύθυνση -----	80
➤	Επιρροή πλάτους πυλώνα -----	85
4.2.5.2.	Τάσεις και μετακινήσεις στην κατακόρυφη διεύθυνση -----	90
➤	Επιρροή πλάτους πυλώνα -----	94
4.3.	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα -----	100
4.3.1.	Επιρροή πλάτους πυλώνα -----	100
4.3.2.	Επιρροή βαθμού αποτόνωσης -----	102
4.3.3.	Διαγράμματα αλληλεπίδρασης -----	105
4.3.3.1.	Διάγραμμα Αλληλεπίδρασης Αξονικής δύναμης – Καμπτικής Ροπής -----	105
4.3.3.2.	Διάγραμμα αλληλεπίδρασης τέμνουσας δύναμης – Αξονικής δύναμης -----	110
4.3.4.	Σύγκριση κριτηρίων αστοχίας Generalized Hoek Brown και Mohr-Coulomb -----	113
5.	Συμπεράσματα & Προτάσεις -----	119
5.1.	Συμπεράσματα -----	120
5.2.	Προτάσεις -----	123

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Σχετικές γεωμετρικές δίδυμων σηράγγων και προφίλ του εδάφους (Addenbrooke & Potts, 1996).	5
Σχήμα 2.2: Απόκριση της επένδυσης της πρώτης σήραγγας κατά την εκσκαφή της δεύτερης.	5
Σχήμα 2.3: Λόγος του πλάτους του πυλώνα σε σχέση με την μονοαξονική αντοχή του πυλώνα,	7
Σχήμα 2.4: Μετακινήσεις που προκαλούνται λόγω της εκσκαφής διατομής 16m σε ζώνη διάρρηξης	8
Σχήμα 2.5: Τρεις διαφορετικές γεωμετρικές, με μεταβαλλόμενη τη θέση της δεύτερης σήραγγας (Koungelis D.K., Augarde C.E., 2004)	10
Σχήμα 2.6: στρωματογραφία του εδάφους που υιοθετήθηκε στην έρευνα (Koungelis D.K., Augarde C.E., 2004)	11
Σχήμα 2.7: καθιζήσεις συναρτήσει του πλάτους πυλώνα.	11
Σχήμα 2.8: Πλαστική ζώνη γύρω από τη δεύτερη διανοιγόμενη σήραγγα αμέσως μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής: α) Για πλάτος πυλώνα ίσο με 0.5D β) Για πλάτος πυλώνα ίσο με 7D.	13
Σχήμα 2.9: Εξέλιξη των επιφανειακών καθιζήσεων καθώς μεταβάλλεται το πλάτος του πυλώνα, για διαφορετικές δυσκαμψίες εδάφους.	14
Σχήμα 2.10: Μορφή συσκευής επίπεδης καταπόνησης και διάταξη προσομοιώματος.	15
Σχήμα 2.11: Διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων	16
Σχήμα 2.12: Μετακινήσεις στην υποστήριξη της υφιστάμενης σήραγγας, λόγω της διάνοιξης σήραγγας στα αριστερά της υφιστάμενης, σε απόσταση 2D (αριστερά) και λόγω της διάνοιξης σήραγγας στα δεξιά της υφιστάμενης, σε απόσταση 1.4D (δεξιά) (Kim S.H., 2004).	16
Σχήμα 2.13: Επίδραση της απόστασης των σηράγγων στην διάμετρο της αρχικής σήραγγας (Kim S.H., 2004)	17
Σχήμα 2.14: Επιπρόσθετες ροπές κάμψης στην υποστήριξη της υφιστάμενης σήραγγας, λόγω της διάνοιξης της γειτονικής σήραγγας στα αριστερά της υφιστάμενης ($W = 2D$) (αριστερά) και λόγω της διάνοιξης της γειτονικής σήραγγας στα δεξιά της υφιστάμενης ($W = 1.4D$) (δεξιά) (Kim S.H., 2004).	17
Σχήμα 2.15: Διατομή δοκιμαστικής σήραγγας (από Deane and Bassett 1995)	18
Σχήμα 2.16: Τρισδιάστατη άποψη της διακριτοποίησης των δίδυμων σηράγγων (Ng, Lee & Tang,	18
Σχήμα 2.17: Τυπική διατομή - πλάγια όψη από τη θετική διεύθυνση x (b). Κάτοψη (c). Εγκάρσια τομή του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων των δίδυμων παράλληλων σηράγγων: (d) x-z επίπεδο, (e) x-y επίπεδο (Ng, Lee & Tang, 2004).	19
Σχήμα 2.18: Παραμόρφωση στην περιφέρεια της σήραγγας σε διαφορετικά τμήματα για $LT = 0D$: (a) στην $y = 0m$ ή $0D$ (τομή A – A) στην $y = -20m$ ή $-2.3D$ (τομή B – B) στην $y = -75m$ ή $-8.6D$ (τομή E – E, που προσεγγίζει συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης). LLD, αριστερή φάση της αριστερής σήραγγας LRD, δεξιά φάση της αριστερής σήραγγας RLD, αριστερή φάση της δεξιάς σήραγγας RRD, δεξιά φάση της δεξιάς σήραγγας (Ng, Lee & Tang, 2004).	19
Σχήμα 2.19: Παραμόρφωση στην περιφέρεια της σήραγγας σε διαφορετικές διατομές για $LT = 3.5D$: (a) στην $y = 0m$ ή $0D$ (τομή A – A) (b) στην $y = -20m$ ή $-2.3D$ (τομή B – B) (c) στην $y = -30m$ ή $-3.5D$ (τομή C – C) (d) στην $y = -50m$ ή $-5.8D$ (τομή D – D) (e) στην $y = -75m$ ή $-8.6D$ (τομή E-E, η οποία προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) (Ng, Lee & Tang, 2004).	20
Σχήμα 2.20: Σύγκριση των παραμορφώσεων στη διατομή E – E ($y = -8.6D$, που προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) για (a) $LT = 0D$ και (b) $LT = 3.5D = 30m$ (Ng, Lee & Tang, 2004).	20
Σχήμα 2.21: Ροπή κάμψης (kNm) στην επένδυση για τη διατομή E-E ($y = -8.6D$, η οποία προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης), για $LT = 3.5D$ (Ng, Lee & Tang, 2004).	21
Σχήμα 2.22: Διακύμανση της ροπής κάμψης (kNm·m) στη επένδυση για τη διατομή E – E ($y = -8.6D$,	21
Σχήμα 2.23: Διακύμανση της μέγιστης ροπής κάμψης (M_{max})	22
Σχήμα 2.24: Διακύμανση της αξονικής δύναμης (kN/m) στη διατομή E – E με διάφορες τιμές LT: (a) αριστερή σήραγγα (b) δεξιά σήραγγα (Ng, Lee & Tang, 2004).	22
Σχήμα 2.25: Εξέλιξη των μετακινήσεων των τριών κλάδων για μεταβαλλόμενο πλάτος πυλώνα: (α)	24
Σχήμα 2.26: Μέγιστες μετακινήσεις για κάθε έναν από τους τέσσερις κλάδους της σήραγγας και	25
Σχήμα 2.27: Επίδραση της βελτίωσης του πυλώνα στις μετακινήσεις των δύο κύριων κλάδων, κατά τη διάρκεια της εκσκαφής (Chen, Lee, Gui, 2008).	26
Σχήμα 2.28: Προσομοίωση της διαδικασίας εκσκαφής με σταδιακή αφαίρεση των πεπερασμένων στοιχείων εντός τη διατομής εκσκαφής (Βήμα 69ο – Τομή προσομοιώματος με οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται από το κέντρο των σηράγγων). (Μπεκρή Ε., 2009)	27
Σχήμα 2.29: Τριδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις. (Μπεκρή Ε., 2009)	27
Σχήμα 2.30: Εγκάρσια όψη του αριθμητικού προσομοιώματος, για $W=D=10m$, όπου διακρίνονται οι	28
Σχήμα 2.31: Σύγκριση, κατά το μήκος διάνοιξης, 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., 2009)	29

Σχήμα 2.32: 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., 2009)	29
Σχήμα 2.33: 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 βραχομάζας ($GSI=10$ και $GSI=40$). (Μπεκρή Ε., 2009)	30
Σχήμα 2.34: Κατανομή των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, περί τη χαρακτηριστική διατομή, για τα τρία διαφορετικά προσομοιώματα ($W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$). (Μπεκρή Ε., 2009)	30
Σχήμα 2.35: Κατανομή ανηγμένης πίεσης της δεξιάς παρειάς ($\theta=90^\circ$) της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $p_{90,(f/s)}p_{90, single}$, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_o , για $W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$. (Μπεκρή Ε., 2009)	31
Σχήμα 2.36: Μηκοτομική όψη και διαστάσεις του ίδιου προσομοιώματος (Νύχτη Φ., 2016)	33
Σχήμα 2.37: Μορφή τριδιάστατου προσομοιώματος που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις (Νύχτη Φ., 2016)	33
Σχήμα 2.38: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά $W/D=0.5$ και δεξιά $W/D=2$. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση. (Νύχτη Φ., 2016)	34
Σχήμα 2.39: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των αξονικών δυνάμεων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχομάζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για όλα τα πλάτη πυλώνα και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second". (Διάνοιξη της Δεξιάς Σήραγγας όταν η Αριστερή έχει Ολοκληρωθεί) (Νύχτη Φ., 2016)	35
Σχήμα 2.40: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των αξονικών δυνάμεων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχομάζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για όλα τα πλάτη πυλώνα και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second". (Ταυτόχρονη Διάνοιξη των Δύο Σηράγγων) (Νύχτη Φ., 2016)	35
Σχήμα 2.41: Προοπτική όψη του τριδιάστατου προσομοιώματος (Ψυχάρη Ε., 2016)	37
Σχήμα 2.42: Εγκάρσια όψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 2D$ (επίπεδο $Z - X$). (Ψυχάρη Ε., 2016)	37
Σχήμα 2.43: Κατανομή της ανηγμένης αξονικής δύναμης $N_{abs}/\rho_o D$ συναρτήσει της γωνίας θ ($^\circ$) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ (αριστερά), $K_o = 1.0$ (δεξιά) και $K_o=1,5$ (κάτω κεντρικά) και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/\rho_o = 0.21$). (Ψυχάρη Ε., 2016)	39
Σχήμα 2.44: Λόγος φορτίων στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας	40
Σχήμα 2.45: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων ($N_{first, avg}/N_{single, avg}$) (αριστερά) και αξονικών δυνάμεων στην εσωτερική παρειά ($N_{first, side} (\theta = 90 \text{ deg})/N_{single, side} (\theta = 90 \text{ deg})$) (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο ($S_{tunnel\text{face}}/D$) της «δεύτερης» σήραγγας (second tunnel) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$. (Ψυχάρη Ε., 2016)	40
Σχήμα 2.46: Γραφική απεικόνιση περιβάλλουσας αστοχίας Mohr–Coulomb	49
Σχήμα 3.1: Περιβάλλον εργασίας Abaqus v6.14	52
Σχήμα 3.2: Μορφή και διαστάσεις του προσομοιώματος όπως σχεδιάστηκε στο Abaqus CAE	53
Σχήμα 3.3: Διακριτοποίηση καννάβου εξωτερικών περιοχών	54
Σχήμα 3.4: Διακριτοποίηση της περιοχής γύρω από τις σήραγγες	55
Σχήμα 3.5: Μορφή των πεπερασμένων στοιχείων γύρω από τις σήραγγες	55
Σχήμα 3.6: Βήμα 1 ^ο της προσομοίωσης του προβλήματος που αφορά το αρχικό εντατικό πεδίο	56
Σχήμα 3.7: Βήμα 2 ^ο της διάνοιξης της αριστερής σήραγγας κατά το οποίο αφαιρείται το υλικό και τοποθετείται κατάλληλη εσωτερική δύναμη που αναλογεί σε κάποιο βαθμό αποτόνωσης	57
Σχήμα 3.8: Βήμα 4 ^ο της διάνοιξης της αριστερής σήραγγας κατά το οποίο αφαιρείται το υλικό και τοποθετείται κατάλληλη εσωτερική δύναμη που αναλογεί σε κάποιο βαθμό αποτόνωσης	57
Σχήμα 3.9: Περιοχή του διαγράμματος GSI η οποία μελετήθηκε στα πλαίσια της έρευνας (Hoek and	60
Σχήμα 3.10: Ονομασία των δύο σηράγγων που διανοίγονται και προσανατολισμός της γωνίας θ	63

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Γεωτεχνικές παράμετροι αριθμητικών αναλύσεων. (Μπεκρή Ε., 2009)	28
Πίνακας 2.2: Συνοπτική παρουσίαση όλων των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. (Νύχτη Φ., 2016)	34
Πίνακας 2.3: Συγκεντρωτικός πίνακας γεωμετρικών, γεωτεχνικών και παραμέτρων άμεσης	38
Πίνακας 3.1: Συγκεντρωτικός πίνακας γεωμετρικών, γεωτεχνικών και παραμέτρων άμεσης υποστήριξης.	62
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά των υπό μελέτη βραχομαζών	65
Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά των βραχομαζών 2 και 20 που μελετώνται	66
Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά των δύο βραχομαζών που μελετώνται ως προς την επίδρασή τους στις τάσεις και μετακινήσεις της βραχομάζας στην οριζόντια διεύθυνση	82
Πίνακας 4.4: Εύρη τιμών του λόγου των μέσων αξονικών δυνάμεων της πρώτης προς τη «μονή» σήραγγα, που δρουν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για όλες τις περιπτώσεις των βαθμών αποτόνωσης και πλατών πυλώνων για βαθμονόμηση του κριτηρίου αστοχίας σε τριαξονική θλίψη (GHB_TXC).	104
Πίνακας 4.5: Εύρη τιμών του λόγου των μέγιστων αξονικών δυνάμεων της πρώτης προς τη μονή σήραγγα, που δρουν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για όλες τις περιπτώσεις των βαθμών αποτόνωσης και πλατών πυλώνων για βαθμονόμηση του κριτηρίου αστοχίας σε τριαξονική θλίψη (GHB_TXC).	105
Πίνακας 4.4: Εύρη τιμών του λόγου των μέσων αξονικών δυνάμεων της πρώτης προς τη μονή σήραγγα, που δρουν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για όλες τις περιπτώσεις των βαθμών αποτόνωσης και πλατών πυλώνων για το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.	117
Πίνακας 4.5: Εύρη τιμών του λόγου των μέγιστων αξονικών δυνάμεων της πρώτης προς τη μονή σήραγγα, που δρουν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για όλες τις περιπτώσεις των βαθμών αποτόνωσης και πλατών πυλώνων για το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.	117

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 4.1:Στοιχεία που κείνται στην περιβάλλουσα αστοχίας στην αριστερή μονή (SingleLT) σήραγγα κατά την εκσκαφή (αριστερά) και επένδυση (δεξιά) αυτής, για την βραχομάζα«2». -----	74
Εικόνα 4.2: Στοιχεία που κείνται στην περιβάλλουσα αστοχίας γύρω από της σήραγγες και στον πυλώνα κατά την διάνοιξη (αριστερά) και υποστήριξη (δεξιά) της «δεύτερης» (SecondLT) σήραγγας, για την βραχομάζα «2».-----	74
Εικόνα 4.3: Παραμένουσες-πλαστικές παραμορφώσεις, μετά την εκσκαφή και υποστήριξη της «μονής» σήραγγας.-	75
Εικόνα 4.4: Παραμένουσες-πλαστικές παραμορφώσεις στο τέλος της διαδικασίας, μετά την εκσκαφή και υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας. -----	76
Εικόνα 4.5: Αναπτυσσόμενες μετακινήσεις κατά την εκσκαφή και υποστήριξη της αριστερής (SingleLT) σήραγγας----	76
Εικόνα 4.6: Αναπτυσσόμενες μετακινήσεις μετά την εκσκαφή και υποστήριξης της «δεύτερης» (SecondRT) σήραγγας -----	77
Εικόνα 4.7: Οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση πάνω στις οποίες εξάγονται οι μετακινήσεις και τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας-----	80

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 2.1: Γραφική απεικόνιση του διαγράμματος αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων-ροπών κάμψης.	44
Γράφημα 2.2: Γραφική απεικόνιση του διαγράμματος αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων-τεμνουσών δυνάμεων.	45
Γράφημα 2.3: Μορφή του κριτηρίου αστοχίας Generalized Hoek–Brown στο π- ρ πανεκατά τη διατύπωσή του στο γενικευμένο τριδιάστατο χώρο τάσεων για βαθμονόμηση σε τριαξονική θλίψη ή τριαξονικό εφελκυσμό.	47
Γράφημα 2.4: Περιβάλλουσα του κριτηρίου αστοχίας Generalized Hoek–Brown στο επίπεδο (διδιάστατο χώρο τάσεων σ_1 - σ_3) για βαθμονόμηση σε τριαξονική θλίψη ή τριαξονικό εφελκυσμό.	47
Γράφημα 4.1: Αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις στην άμεση υποστήριξη για τη «μεμονωμένη» (single), «πρώτη» (first) και «δεύτερη» (second) σήραγγα, για τη βραχομάζα «2», για $W/D=0,5$ και $\lambda=0,7$	67
Γράφημα 4.2: Επίδραση του πλάτους πυλώνα στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις στη «πρώτη» (FirstLT) σήραγγα, για τη βραχομάζα «2» και $\lambda=0,7$	67
Γράφημα 4.3: Επίδραση του πλάτους πυλώνα στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις στη «πρώτη» (FirstLT) σήραγγα, για τη βραχομάζα «20» και $\lambda=0,7$	69
Γράφημα 4.4: Επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης λ στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις στην άμεση υποστήριξη της «μονής» (SingleLT) σήραγγας, για τη βραχομάζα «2» και $W/D=0,5$	70
Γράφημα 4.5: Επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης λ στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις στην άμεση υποστήριξη της «δεύτερης» (SecondRT) σήραγγας, για τη βραχομάζα «2» και $W/D=0,5$	71
Γράφημα 4.6: Επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης λ στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις της άμεσης υποστήριξης της «πρώτης» (FirstLT) σήραγγας, για τη βραχομάζα «2» και $W/D=0,5$	72
Γράφημα 4.7: Επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης λ στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις της άμεσης υποστήριξης της «πρώτης» (FirstLT) σήραγγας, για τη βραχομάζα «20» και $W/D=0,5$	73
Γράφημα 4.8: Επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης λ στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις της άμεσης υποστήριξης της «πρώτης» (FirstLT) σήραγγας, για τη βραχομάζα «2» και $W/D=2$	73
Γράφημα 4.9: Επίδραση της βαθμονόμησης του καταστατικού προσομοιώματος στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις στην περιφέρεια των δύο σηράγγων, για την βραχομάζα «2» και $W/D=0,5$...	78
Γράφημα 4.10: Επίδραση της βαθμονόμησης του καταστατικού προσομοιώματος στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις της «πρώτης» σήραγγας, για κάθε πλάτος πυλώνα, $\lambda=0,7$ και για την βραχομάζα «2»	79
Γράφημα 4.11: Τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας σ_{xx} και σ_{yy} κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση p_o , για την βραχομάζα «2», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων (αριστερά) και μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αντίστοιχου δεξιού κλάδου (δεξιά)	81
Γράφημα 4.12: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} και u_{yy} κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για την βραχομάζα «2», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων (αριστερά) και μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αντίστοιχου δεξιού κλάδου (δεξιά)	81
Γράφημα 4.13: Τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας σ_{yy} (αριστερά) και σ_{xx} (δεξιά) κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση p_o , για τις βραχομάζες «2» και «18», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων	83
Γράφημα 4.14: Τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας σ_{yy} (αριστερά) και σ_{xx} (δεξιά) κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση p_o , για τις βραχομάζες «2» και «18», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του δεξιού κλάδου των δίδυμων σηράγγων	84
Γράφημα 4.15: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} (αριστερά) και u_{yy} (δεξιά) κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για τις βραχομάζες «2» και «18», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων	84
Γράφημα 4.16: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} (αριστερά) και u_{yy} (δεξιά) κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για τις βραχομάζες «2» και «18», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του δεξιού κλάδου των δίδυμων σηράγγων	85
Γράφημα 4.17: Τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας σ_{yy} (αριστερά) και σ_{xx} (δεξιά) κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση p_o , για τη βραχομάζα «2», $\lambda=0,7$, $W/D=0,5$ και $W/D=2$ μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του δεξιού κλάδου των δίδυμων σηράγγων	86
Γράφημα 4.18: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} (αριστερά) και u_{yy} (δεξιά) κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για τη βραχομάζα «2», $\lambda=0,7$, $W/D=0,5$ και $W/D=2$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του δεξιού κλάδου των δίδυμων σηράγγων	87

βαθμονομήσεις του καταστατικού προσομοιώματος (GHB_TXC & GHB_TXE), μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.	99
Γράφημα 4.36: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} (αριστερά) και u_{yy} (δεξιά) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($X/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για τη βραχομάζα «2», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$ και 2 βαθμονομήσεις του καταστατικού προσομοιώματος (GHB_TXC & GHB_TXE), μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του δεξιού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.....	99
Γράφημα 4.37: Λόγος των μέγιστων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς τη «μονή» σήραγγα ($N_{first,max}/N_{single,max}$) στην παρειά ($\theta=90^\circ$), ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), $\lambda=0,7$ και βαθμονόμηση του κριτηρίου αστοχίας σε τριαξονική θλίψη (GHB_TXC)	101
Γράφημα 4.38: Λόγος των μέγιστων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς τη «μονή» σήραγγα ($N_{first,max}/N_{single,max}$) στη στέψη ($\theta=360^\circ$), ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), $\lambda=0,7$ και βαθμονόμηση του κριτηρίου αστοχίας σε τριαξονική θλίψη (GHB_TXC)	101
Γράφημα 4.39: Λόγος των αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς τη «μονή» σήραγγα (N_{first}/N_{single}) στην παρειά ($\theta=90^\circ$), ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o) για διαφορετικούς βαθμούς αποτόνωσης ($\lambda=0,7, 0,6, 0,5$), $W/D=0,5$ και βαθμονόμηση του κριτηρίου αστοχίας σε τριαξονική θλίψη (GHB_TXC).....	102
Γράφημα 4.40: Λόγος των αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς τη «μονή» σήραγγα (N_{first}/N_{single}) στη στέψη ($\theta=360^\circ$), ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/p_o) για διαφορετικούς βαθμούς αποτόνωσης ($\lambda=0,7, 0,6, 0,5$), $W/D=0,5$ και βαθμονόμηση του κριτηρίου αστοχίας σε τριαξονική θλίψη (GHB_TXC).....	103
Γράφημα 4.41: Διάγραμμα Αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων (N) – καμπτικών ροπών (M) για την υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για διάφορα πλάτη πυλώνα ($W/D=0,5, W/D=1, W/D=2$).....	106
Γράφημα 4.42: Διάγραμμα Αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων (N) – καμπτικών ροπών (M) για την υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για διάφορους βαθμούς αποτόνωσης ($\lambda=0,7, \lambda=0,6, \lambda=0,5$).....	107
Γράφημα 4.43: Μέγιστες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις για το σύνολο των βραχομαζών που μελετήθηκαν, για $W/D=0,5$ για τη «μονή» και «πρώτη» σήραγγα, για δύο βαθμούς αποτόνωσης ($\lambda=0,7$ & $\lambda=0,5$).	108
Γράφημα 4.44: Διάγραμμα Αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων (N) – καμπτικών ροπών (M) για την υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τις δύο βαθμονομήσεις του αριθμητικού προσομοιώματος (GHB_TXC&GHB_TXE)...	109
Γράφημα 4.45: Διάγραμμα Αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων (N) – τεμνουσών δυνάμεων (Q) για την υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για διάφορα πλάτη πυλώνα ($W/D=0,5, W/D=1, W/D=2$)	110
Γράφημα 4.46: Διάγραμμα Αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων (N) – τεμνουσών δυνάμεων (Q) για την υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για διάφορους βαθμούς αποτόνωσης ($\lambda=0,7, \lambda=0,6, \lambda=0,5$)	111
Γράφημα 4.47: Διάγραμμα Αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων (N) – τεμνουσών δυνάμεων (Q) για την υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τις δύο βαθμονομήσεις του αριθμητικού προσομοιώματος (GHB_TXC & GHB_TXE)	112
Γράφημα 4.48: Σύγκριση των τριών κριτηρίων αστοχίας (GHB_TXC, GHB_TXE&Mohr-Coulomb) για βαθμό αποτόνωσης $\lambda=0,7$ και πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$ (πάνω αριστερά), $W/D=1$ (πάνω δεξιά) και $W/D=2$ (κάτω κεντρικά)	114
Γράφημα 4.49: Σύγκριση των τριών κριτηρίων αστοχίας (GHB_TXC, GHB_TXE&Mohr-Coulomb) για βαθμό αποτόνωσης $\lambda=0,6$ και πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$ (πάνω αριστερά), $W/D=1$ (πάνω δεξιά) και $W/D=2$ (κάτω κεντρικά).....	115
Γράφημα 4.50: Σύγκριση των τριών κριτηρίων αστοχίας (GHB_TXC, GHB_TXE&Mohr-Coulomb) για βαθμό αποτόνωσης $\lambda=0,5$ και πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$ (πάνω αριστερά), $W/D=1$ (πάνω δεξιά) και $W/D=2$ (κάτω κεντρικά)	116

Περίληψη

Οι σύγχρονες απαιτήσεις των αστικών κέντρων για δημιουργία αξιοποιήσιμου χώρου, καθώς και η ανάγκη βελτίωσης των συγκοινωνιακών δικτύων, έχουν καταστήσει αναγκαία την ανάπτυξη και κατασκευή υπογείων έργων ευρείας κλίμακας. Τέτοιου είδους έργα είναι και οι δίδυμες σήραγγες που χαρακτηρίζονται από αυξημένες απαιτήσεις ασφάλειας και λειτουργικότητας. Ένα βασικό αλλά σύνθετο φαινόμενο που παρουσιάζεται σε αυτά τα τεχνικά έργα και καλείται να αντιμετωπίσει ο μελετητής μηχανικός, είναι αυτό της αλληλεπίδρασης των δύο κλάδων μίας δίδυμης σήραγγας.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματεύεται την διερεύνηση και ποσοτικοποίηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο κλάδων δίδυμων βαθιών σηράγγων. Αρχικά παρουσιάζεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση βασικών ερευνών και εργασιών που αφορούν το συγκεκριμένο θέμα, και γίνεται μία αναφορά στα θεωρητικά στοιχεία που διέπουν το συγκεκριμένο φαινόμενο και χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις της παρούσας εργασίας.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αριθμητικά προσομοιώματα που κατασκευάστηκαν με την βοήθεια του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus ver14, καθώς και οι παράμετροι, σταθερές και μεταβλητές, που χρησιμοποιήθηκαν στην διαδικασία των παραμετρικών, διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων. Οι βασικές μεταβλητές παράμετροι, η επίδραση των οποίων μελετάται ως προς το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων, είναι η ποιότητα της βραχομάζας στην οποία διανοίγονται οι σήραγγες, το πλάτος του πυλώνα, ο βαθμός αποτόνωσης των σηράγγων καθώς και το κριτήριο αστοχίας της βραχομάζας που χρησιμοποιείται.

Τα αποτελέσματα που εξάγονται από τις παραπάνω παραμετρικές αναλύσεις επικεντρώνονται κατά κύριο λόγο στις αναπτυσσόμενες αξονικές δυνάμεις της άμεσης υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, και στον τρόπο που επηρεάζονται αυτές από τις διάφορες μεταβλητές παραμέτρους. Επίσης μελετάται και η επίδραση αυτών στις τάσεις και μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας.

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

Abstract

The requirement of the modern urban centers in creating space, and also the increasing need of improved transport networks, have made the development and building of large scale underground projects necessary. These types of projects include the twin deep tunnels which are characterized by increased safety and functionality demands. A basic but complex phenomenon that occurs in these types of underground structures and the design engineer has to face, is the interaction of the two branches of a twin tunnel.

The current MSc thesis deals with the investigation and the quantification of the interaction between the two branches of a twin deep tunnel. At first, a literature review related with this phenomenon is performed, and then the theoretical elements which are being used in the numerical analyses are being presented.

Afterwards, the numerical models constructed with the finite element code Abaqus ver14, are being featured and the parameters (constants and variables) which are being used in the two-dimensional parametric numerical analyses, are being listed. The basic variable parameters, whose influence on the twin tunnel interaction phenomenon is being examined, are the rockmass quality, the pillar width, the deconfinement ratio and the failure criterion of the rockmass.

The exported results from these two-dimensional numerical analyses mainly focus in the axial forces that are being developed on the shotcrete support of the two tunnels. The effect of the variable parameters on these internal forces of the shotcrete, as well as on the stress and movements of the surrounding rockmass, is being studied.

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

1. Εισαγωγή

Τα υπόγεια έργα αποτελούν μία από τις πλέον αναπτυσσόμενες και σημαντικές κατηγορίες έργων Πολιτικού Μηχανικού των τελευταίων δεκαετιών. Η αύξηση των αναγκών για χώρο στα σύγχρονα πυκνοκατοικημένα αστικά περιβάλλοντα καθώς και η ανάγκη για μείωση των αποστάσεων και του χρόνου, μαζί με την απαραίτητη αύξηση της ποιότητας και ασφάλειας, των μεταφορών προϊόντων και της μετακίνησης ανθρώπων, συνέβαλλαν στην τάση για κατασκευή μίας σειράς υπογείων έργων και υποδομών. Τέτοια έργα αποτελούν κατά κύριο λόγο οι οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες, οι υδραυλικές σήραγγες, οι υπόγειοι χώροι στάθμευσης και αποθήκευσης προϊόντων, διάφοροι χώροι αναψυχής κ.ά.

Οι οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία των παραπάνω υπογείων έργων με μεγάλα χρηματικά ποσά να επενδύονται παγκοσμίως κάθε χρόνο για την κατασκευή τους. Η συνήθης πρακτική που χρησιμοποιείται για την κατασκευή αυτών, και που επιβάλλεται όλο και περισσότερο από νομοθεσίες και προεδρικά διατάγματα (π.χ. Προεδρικό Διάταγμα υπ' αριθμόν 230), είναι η κατασκευή δύο κλάδων σηράγγων, μία για κάθε κατεύθυνση. Η δημιουργία δύο κλάδων (δίδυμων σηράγγων) έχει καθιερωθεί τόσο για κατασκευαστικούς λόγους όσο και για λόγους ασφάλειας. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τους κατασκευαστικούς λόγους, η κατασκευή δύο σηράγγων μικρότερων διατομών είναι ευκολότερη από την κατασκευή μίας σήραγγας μεγάλης διατομής, ενώ σχετικά με τους λόγους ασφάλειας, η ύπαρξη δύο κλάδων σε περίπτωση ατυχήματος, επιτρέπει την διαφυγή από τον έναν κλάδο όπου υπάρχει το πρόβλημα, στον δεύτερο μέσω συνδετήριων σηράγγων.

Ένα βασικό θέμα που δημιουργείται από την κατασκευή των δίδυμων αυτών σηράγγων, είναι ο προσδιορισμός του βαθμού αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο κλάδων κατά τα διάφορα στάδια εκσκαφής αυτών. Συγκεκριμένα είναι σημαντική η εκτίμηση του μεγέθους της διαταραχής που προκαλεί στον προπορευόμενο κλάδο η έλευση του δεύτερου αλλά και η εκτίμηση της συμπεριφοράς του δεύτερου κλάδου κατά τη διάνοιξη συγκριτικά με την περίπτωση σήραγγας μονού κλάδου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την εκσκαφή κάθε κλάδου προκαλείται μία ζώνη διαταραχής γύρω από την εκάστοτε σήραγγα, η οποία επηρεάζει τη γειτονική σήραγγα. Η διαταραχή αυτή μεταφράζεται σε αλλαγή του υπάρχοντος εντατικού πεδίου γύρω από τη σήραγγα που εκσκάπτεται, ενώ ο βαθμός επίδρασης της διαταραχής αυτής στον έτερο κλάδο εξαρτάται από μία σειρά παραμέτρων και παραγόντων όπως είναι το πλάτος του πυλώνα μεταξύ των δύο κλάδων, το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα στη διάνοιξη των δυο κλάδων, η ποιότητα της βραχομάζας όπου γίνεται η διάνοιξη, το ύψος των υπερκειμένων κ.ά.

Η διερεύνηση του φαινομένου αυτού της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων μέσω της μελέτης των παραπάνω παραγόντων, αποτελεί και το στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται παραμετρικές αναλύσεις για ένα εύρος τιμών για δύο εκ των βασικότερων παραγόντων που επηρεάζουν το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, αυτών του πλάτους του πυλώνα και των γεωτεχνικών συνθηκών. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Τα αποτελέσματα

επικεντρώνονται στις τάσεις, τις αξονικές και τέμνουσες δυνάμεις και τις καμπτικές ροπές που αναπτύσσονται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (που χρησιμοποιείται ως μοναδικό μέτρο άμεσης υποστήριξης), καθώς και στις τάσεις που αναπτύσσονται στην περιβάλλουσα βραχομάζα, κατά τα διάφορα στάδια εκσκαφής των δύο σηράγγων. Προσδιορίζεται έτσι το εύρος της ζώνης της βραχομάζας που έχει πλαστικοποιηθεί καθώς και η αστοχία ή όχι του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

2. Βιβλιογραφική επισκόπηση και θεωρητικά στοιχεία

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρατίθεται ένα πλήθος μελετών και ερευνών που έχουν γίνει ανά τον κόσμο και αφορούν το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων, καθώς και θεωρητικά στοιχεία και έννοιες που ακολουθήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Ειδικότερα, γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των γνωστότερων ερευνών από την διεθνή βιβλιογραφία, κατά χρονολογική σειρά, που ασχολούνται με το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης κατά την εκσκαφή δύο σηράγγων, και την επίδραση του πλάτους πυλώνα μεταξύ αυτών. Στη συνέχεια παρατίθενται τα βασικότερα θεωρητικά στοιχεία και έννοιες που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση και αναλύοντας τον τρόπο κατασκευής του διαγράμματος αλληλεπίδρασης με βάση το οποίο ελέγχεται η αστοχία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο για το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb και Hoek-Brown που χρησιμοποιείται, προσαρμοσμένο τόσο για θλίψη όσο και για εφελκυσμό.

2.1. Άρθρα αλληλεπίδρασης γειτονικών σηράγγων

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

Στις δύο αυτές εργασίες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων σε παράλληλες σήραγγες που κατασκευάστηκαν σε άργιλο Σικάγου (πρώτη εργασία) και σε άργιλο Λονδίνου (δεύτερη εργασία). Το πλάτος πυλώνα στην πρώτη περίπτωση όπως παρουσιάστηκε από τον Terzaghi ήταν 0,425 ($W=0,425 \cdot D$) της διαμέτρου της σήραγγας, ενώ στην αντίστοιχη εργασία των Ward&Thomas ήταν 0,6της διαμέτρου της σήραγγας ($W=0,6 \cdot D$). Και στις δύο εργασίες η διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας πραγματοποιείται μετά την διάνοιξη της πρώτης.

Τα τελικά συμπεράσματα και από τις δύο εργασίες είναι παρόμοια και επικεντρώνονται στην επίδραση της αλληλεπίδρασης της διάνοιξης των σηράγγων, στην ακτινική παραμόρφωση στην επένδυση της πρώτης σήραγγας λόγω της διάνοιξης της γειτονικής της. Συγκεκριμένα παρατηρείται ακτινική παραμόρφωση στην επένδυση, της τάξεως του 0.1% και 0.12% της ακτίνας των σηράγγων του Σικάγου και του Λονδίνου αντίστοιχα.

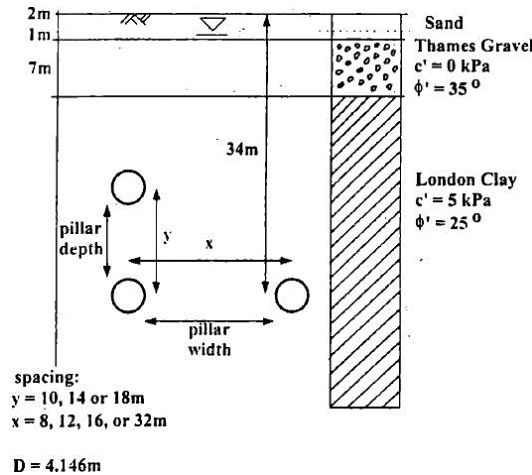
2.1.2. Ghaboussi J., Ranken R.E., 1977

Στη συγκεκριμένη έρευνα, οι Ghaboussi & Ranken μελετούν την αλληλεπίδραση μεταξύ δύο γειτονικών σηράγγων, και την επίδραση αυτής στις τάσεις και μετακινήσεις που αναπτύσσονται στο έδαφος γύρω από τις σήραγγες, καθώς και στα φορτία στην προσωρινή επένδυση. Πραγματοποίησαν για το σκοπό αυτό μία σειρά δισδιάστατων παραμετρικών αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία, για συγκεκριμένα εύρη των υπό μελέτη παραμέτρων, εξετάζοντας επιπρόσθετα στο δεύτερο σκέλος της μελέτης, την επίδραση της αλληλουχίας που κατασκευάζεται η προσωρινή επένδυση (lining) στις δύο γειτονικές σήραγγες. Η κύρια παράμετρος που εξετάζεται στο πρώτο σκέλος της εργασίας, είναι το πλάτος του πυλώνα (pillar width).

Οι αναλύσεις έγιναν τόσο για αβαθείς όσο και για βαθιές σήραγγες, και παρήχθησαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, μία σειρά διαγραμμάτων και νομογραφημάτων. Τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν εν' ολίγοις είναι ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο παράλληλων δίδυμων σηράγγων επηρεάζει τη μέση τάση, τις μετακινήσεις στα τοιχώματα και τις δυνάμεις στην επένδυση των σηράγγων σε μία μικρή μόνο περιοχή γύρω από τον πυλώνα που χωρίζει τις σήραγγες, ενώ αυτά τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης μειώνονται, όσο το πλάτος του πυλώνα αυξάνεται. Επίσης διαπιστώνεται ότι καθώς το πλάτος του πυλώνα μειώνεται, υπάρχει μια σταδιακή αύξηση των κατακόρυφων τάσεων στον πυλώνα, με αντίστοιχη αύξηση των οριζόντιων τάσεων, και κατά συνέπεια, η διεκτροπική τάση να παραμένει σχεδόν σταθερή. Τέλος εξίσου σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η αλληλεπίδραση γίνεται πολύ μικρή για λόγο πλάτους πυλώνα προς διάμετρο ίσο με ένα ($W/D=1$), ενώ για τον αντίστοιχο λόγο με τιμή περίπου ίσο με δύο ($W/D\approx 2$), η αλληλεπίδραση μεταξύ των σηράγγων παύει ουσιαστικά να υφίσταται και αυτές συμπεριφέρονται ως αυτόνομες.

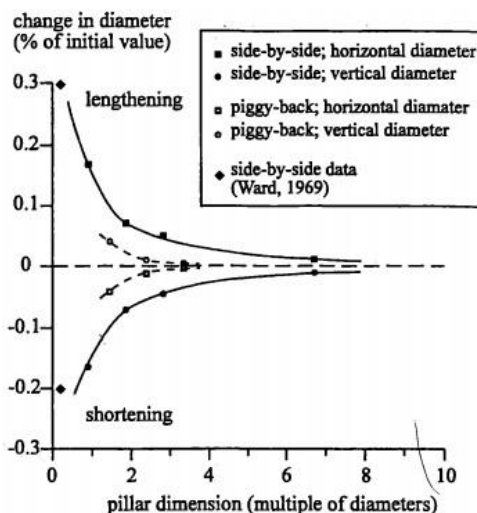
2.1.3. Addenbrooke T.I., Potts D.M., 1996

Οι Addenbrooke & Potts στη συγκεκριμένη έρευνα, προσπαθώντας να προτείνουν κάτι ακριβέστερο από τις εμπειρικές μεθόδους που χρησιμοποιούνταν έως τότε κατά κόρον στην κατασκευή σηράγγων στο μετρό, τόσο για την πρόβλεψη των επιφανειακών καθιζήσεων όσο και για την αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών σηράγγων, προέβησαν σε διδιάστατες παραμετρικές αναλύσεις με τη βοήθεια αριθμητικών μεθόδων και συγκεκριμένα του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ICFEP. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν τόσο για δίδυμες σήραγγες στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο (side by side), όσο και για σήραγγες στον ίδιο κατακόρυφο άξονα (piggy back), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Σχετικές γεωμετρικές δίδυμων σηράγγων και προφίλ του εδάφους (Addenbrooke & Potts, 1996).

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για τα εδαφικά χαρακτηριστικά της Αργίλου του Λονδίνου και του αμμοχάλικου του Τάμεση. Οι αναλύσεις εκτελέστηκαν για διάφορα πλάτη πυλώνων, τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Προέκυψαν αποτελέσματα που αφορούν τη συνολική απόκριση της επιφάνειας του εδάφους καθώς και την αλληλεπίδραση των δίδυμων σηράγγων, και συγκεκριμένα την επίδραση της κατασκευής της δεύτερης σήραγγας (second) στην διάμετρο της ήδη υπάρχουσας σήραγγας (first). Όσον αφορά το δεύτερο σκέλος αποτελεσμάτων που αφορά και τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, προέκυψε το παρακάτω συγκεντρωτικό διάγραμμα (σχήμα 2.2)



Σχήμα 2.2: Απόκριση της επένδυσης της πρώτης σήραγγας κατά την εκσκαφή της δεύτερης.

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει την επίδραση του πλάτους πυλώνα μεταξύ δύο παράλληλων σηράγγων (τόσο στο οριζόντιο όσο και στο κατακόρυφο επίπεδο) στην παραμόρφωση της αρχικής επένδυσης της πρώτης-προϋπάρχουσας σήραγγας. Το πρώτο αποτέλεσμα που εξάγεται, είναι ότι στις παράλληλες, στο οριζόντιο επίπεδο, σήραγγες (side by side), η οριζόντια διάμετρος της πρώτης αυξάνεται σε μήκος κατά την εκσκαφή της δεύτερης, ενώ η κατακόρυφη διάμετρος μειώνεται. Συγκεκριμένα όταν το πλάτος του πυλώνα είναι μικρότερο από μία διάμετρο, η επιμήκυνση της οριζόντιας διαμέτρου είναι λίγο μικρότερη από το 0.2% της αρχικής διαμέτρου. Αυτή η επιμήκυνση μειώνεται με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των σηράγγων. Αντίστοιχα, η βράχυνση της κατακόρυφης διαμέτρου είναι επίσης λίγο μικρότερη από το 0.2% της αρχικής, για το μικρότερο πλάτος πυλώνα που αναλύθηκε, ενώ και αυτή μειώνεται, με την αύξηση του πυλώνα. Τέλος παρατηρείται ότι όταν το πλάτος του πυλώνα είναι μεγαλύτερο από επτά διαμέτρους σηράγγων ($W > 7D$), η διέλευση μια δεύτερης σήραγγας στο ίδιο αξονικό επίπεδο με την πρώτη σήραγγα, επηρεάζει σε αμελητέο βαθμό την υφιστάμενη επένδυση της προϋπάρχουσας σήραγγας.

Αντίθετα, όσον αφορά την αλληλεπίδραση των δίδυμων, σε κατακόρυφο επίπεδο, σηράγγων (riggy back), παρατηρείται πολύ μικρότερη επίδραση της διανοιγόμενης σήραγγας στην διάμετρο της προϋπάρχουσας. Συγκεκριμένα, ακόμα και για την δυσμενέστερη περίπτωση πλάτους πυλώνα που μελετήθηκε, δεν παρατηρήθηκε μεταβολή της διαμέτρου μεγαλύτερη του 0,04% της αρχικής διαμέτρου, ενώ η επίδραση μεταξύ των σηράγγων είναι ουσιαστικά μηδαμινή για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο των τριών διαμέτρων ($W > 3D$).

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

Θέματα όπως αστάθειες, αστοχία μετώπου, εισροή νερών και κυρίως μη αποδεκτές παραμορφώσεις, αποτελούν σύμφωνα με τους Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C., τα συνηθέστερα προβλήματα στην κατασκευή δίδυμων σηράγγων σε μαλακούς βράχους, όπως παρατήρησαν οι ίδιοι και από πραγματικές περιπτώσεις στην Ταϊβάν. Τονίζουν ότι ο περιορισμός των παραμορφώσεων αποτελεί το σημαντικότερο θέμα στην κατασκευή δίδυμων σηράγγων σε μαλακούς σχηματισμούς, ενώ ο μηχανισμός που αυτές εξελίσσονται είναι ιδιαίτερα σύνθετος, μιας και πλήθος παραμέτρων όπως οι επί τόπου τάσεις, η αλληλουχία εκσκαφών, η γεωμετρία των σηράγγων και ο χρόνος τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης, παίζουν καθοριστικό ρόλο. Έτσι μέσω της συγκεκριμένης εργασίας τους, παρουσιάζουν τον τρόπο που προτείνουν να γίνεται η κατασκευή δίδυμων σηράγγων σε τέτοιου είδους σχηματισμούς.

Οι συγγραφείς ξεκινούν αρχικά αναφέροντας ότι για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο των δύο διαμέτρων της σήραγγας ($W > 2D$), οι σήραγγες θεωρούνται αυτόνομες κατασκευές. Η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το επί τόπου εντατικό πεδίο και την αντοχή της βραχομάζας σε σχέση με το λόγο του πλάτους πυλώνα ως προς την διάμετρο της σήραγγας. Η μέση τάση στον πυλώνα αναφέρουν ότι μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

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

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

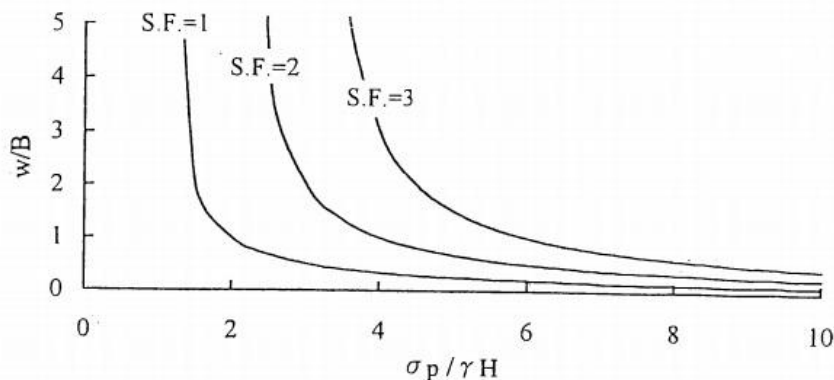
Η μονοαξονική αντοχή του πυλώνα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

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

Όπου c και φ οι παράμετροι διατμητικής αντοχής της βραχομάζας. Επομένως, ο συντελεστής ασφαλείας (S.F.) έναντι αστοχίας του πυλώνα, είναι

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

Στο σχήμα 2.3 που ακολουθεί παρουσιάζεται ο λόγος του πλάτους του πυλώνα προς την διάμετρο των σηράγγων (w/B) σε συνάρτηση με την αντοχή του πυλώνα κανονικοποιημένη ως προς τις γεωστατικές τάσεις, για κυμαινόμενο συντελεστή ασφαλείας από 1 έως 3, ο οποίος στη φάση της κατασκευής πρέπει να λαμβάνεται επαυξημένος.



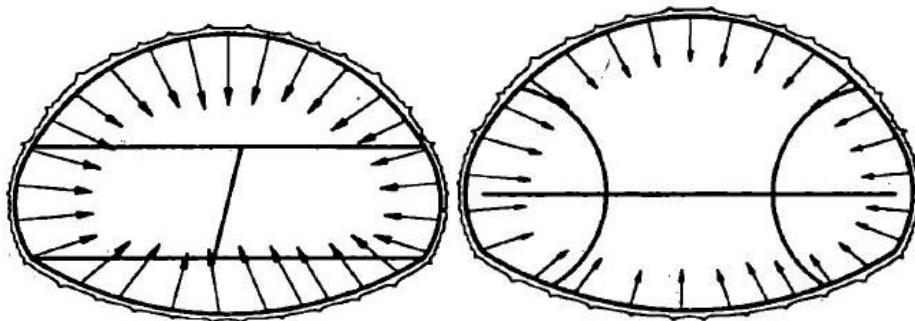
Σχήμα 2.3: Λόγος του πλάτους του πυλώνα σε σχέση με την μονοαξονική αντοχή του πυλώνα, κανονικοποιημένη ως προς τη γεωστατική τάση

Οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι το κατάλληλο πλάτος πυλώνα είναι εκείνο για το οποίο η τάση που ασκείται στον πυλώνα (S_p) είναι μικρότερη της αντοχής του σε μονοαξονική θλίψη (σ_p). Εάν το πλάτος αυτό δεν μπορεί να ικανοποιηθεί για διάφορους λόγους, όπως λόγω περιορισμών που επιβάλλει η οδοποιία, τότε θα πρέπει να εφαρμοστούν κατάλληλα μέτρα υποστήριξης, όπως προεντεταμένα αγκύρια.

Στη συνέχεια οι Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C, σχετικά με το θέμα της αλληλουχίας εκσκαφής των σηράγγων, αναφέρουν ότι μη εμφάνιση πλαστικής ζώνης γύρω από τις διατομές αυτών, θα είχε ως αποτέλεσμα μηδενική επίδραση της αλληλουχίας εκσκαφών στις παραμορφώσεις των σηράγγων. Παρ' όλα αυτά κάτι τέτοιο είναι αδύνατο να συμβεί στους μαλακούς σχηματισμούς που μελετούνται, με αποτέλεσμα η αλληλουχία εκσκαφών να παίζει σημαντικό ρόλο στον τρόπο ανάπτυξης παραμορφώσεων.

Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι διαφορετική αλληλουχία εκσκαφής της διατομής της σήραγγας συνεπάγεται με διαφορετικό βαθμό αποτόνωσης αυτής, με την ολομέτωπη εκσκαφή να προκαλεί τη γρηγορότερη αποφόρτιση της σήραγγας και κατά συνέπεια τη μεγαλύτερη ανάπτυξη παραμορφώσεων. Γι' αυτό το λόγο προτείνεται, σε μαλακούς σχηματισμούς, τμηματική εκσκαφή των διατομών που οδηγεί σε μεγαλύτερη ευστάθεια και μικρότερες παραμορφώσεις.

Αναφέρεται παράλληλα, πως η πιο δημοφιλής μέθοδος εκσκαφής μπορεί να χωριστεί σε δυο υπομεθόδους, τη μέθοδο ορθού μετώπου και βαθμίδας και τη μέθοδο της πλευρικής προσβολής. Η μέθοδος διάνοιξης με πλευρικές στοές είναι κατάλληλη για μεγάλα ανοίγματα, για πτωχή ποιότητα βραχομάζας και κυρίως για εκείνες τις σήραγγες όπου η εξέλιξη των μετακινήσεων θα πρέπει αυστηρά να ελέγχεται. Εμπειρικά, η χρήση της δεύτερης μεθόδου επιτρέπει σχεδόν την ανάπτυξη των μισών μετακινήσεων σε σχέση με αυτές που θα αναπτύσσονταν ύστερα από εφαρμογή της πρώτης μεθόδου. Η υπεροχή της συγκεκριμένης μεθόδου, έναντι της δεύτερης, όσον αφορά τις αναπτυσσόμενες μετακινήσεις, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.4 όπως προκύπτει από αριθμητικές αναλύσεις, που παρατίθεται και δείχνει τις μειωμένες παραμορφώσεις στην οροφή της σήραγγας κατασκευασμένης με την πρώτη μέθοδο σε σχέση με την δεύτερη.



Σχήμα 2.4: Μετακινήσεις που προκαλούνται λόγω της εκσκαφής διατομής 16m σε ζώνη διάρρηξης με τη μέθοδο ορθού μετώπου και βαθμίδας (αριστερά) και με τη μέθοδο πλευρικής προσβολής (δεξιά) (Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C., 1996).

Παράλληλα, αναφέρεται ότι η ξεχωριστή εκσκαφή των δυο κλάδων είναι προτιμότερη σε σχέση με την ταυτόχρονη εκσκαφή αυτών, καθώς στην δεύτερη περίπτωση είναι πιθανό να προκληθεί

αιφνίδια χαλάρωση της περιβάλλουσας βραχομάζας, η οποία μπορεί να προκαλέσει μη αναμενόμενες και παραμένουσες παραμορφώσεις.

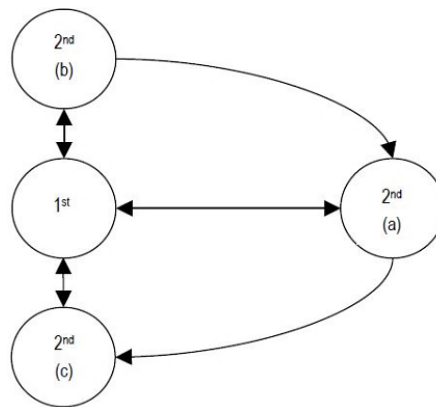
Στην περίπτωση διάνοιξης δίδυμων σηράγγων σε μαλακό βράχο με υψηλές αρχικές πιέσεις, παρουσιάζεται διαρκής παραμόρφωση και συνθήκες σύνθλιψης. Κατά συνέπεια, τα παραδοσιακά εύκαμπτα μέτρα υποστήριξης, δύσκολα μπορούν να παρέχουν επαρκή φέρουσα ικανότητα και δυσκαμψία προκειμένου να εξασφαλίσουν ευστάθεια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

Τέλος οι Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C παρουσιάζουν μία πραγματική περίπτωση εμφάνισης προβλημάτων συγκλίσεων σε δίδυμες σήραγγες κατασκευασμένες σε ασθενείς βράχους, που αντιμετωπίστηκαν με την κατάλληλη τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης (περιμετρικά αγκύρια, σκυρόδεμα, ενίσχυση πυλώνα με αγκύρια), και καταλήγουν στο γενικό συμπέρασμα ότι ο έλεγχος των παραμορφώσεων και της ευστάθειας των σηράγγων αποτελεί κύρια ευθύνη κατά την κατασκευή. Η κατάλληλη επιλογή πλάτους πυλώνα μεταξύ των σηράγγων αρχικά, και η τοποθέτηση των κατάλληλων μέτρων υποστήριξης στον κατάλληλο χρόνο στη συνέχεια, αποτελούν τα βασικά εργαλεία για την ικανοποίηση των παραπάνω.

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

Σκοπός της εργασίας των Koungelis D.K. & Augarde C.E. (2004) αποτελεί η βελτίωση των προβλέψεων σχετικά με την ελάχιστη απόσταση αλληλεπίδρασης μεταξύ πολλαπλών σηράγγων για μικρά βάθη (αβαθείς) σε μαλακά εδάφη. Όπως αναφέρουν, πλήθος σχετικών ερευνών είναι σε εξέλιξη, λόγω αυξανόμενης ανάγκης δημιουργίας υπογείων τούνελ στις αστικές περιοχές κάτω από αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας και ασφάλειας, που θα εξασφαλίζουν μηδενικές βλάβες σε υπάρχοντα επίγεια κτίρια ή υπόγειες κατασκευές. Τονίζουν ότι ο υπολογισμός των επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης πολλαπλών σηράγγων, δεν αποτελεί άθροισμα των επιμέρους καθιζήσεων (που υπολογίζονται μέσω της καμπύλης Gauss) λόγω της κάθε σήραγγας, αλλά η αλληλεπίδραση μεταξύ των γειτονικών σηράγγων προκαλεί διαταραχή στο έδαφος, και επηρεάζει καθοριστικά τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος εδάφους, και συνεπώς την εξέλιξη των καθιζήσεων. Οι Koungelis&Augardeπροσπαθούν με την βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Plaxis, να απαντήσουν και να πάρουν θέση στο ερώτημα όσον αφορά την ελάχιστη απόσταση μεταξύ γειτονικών σηράγγων όπου η αλληλεπίδραση ουσιαστικά αμελείται, για το οποίο οι διάφορες εργασίες δίνουν ένα μεγάλο εύρος πλάτους πυλώνα που κυμαίνεται από 1D έως 7D. Αυτό το επιτυγχάνουν παραθέτοντας τόσο την τελική μορφή των επιφανειακών καθιζήσεων, όσο και την επίδραση των γειτονικών σηράγγων στη μορφή αυτών.

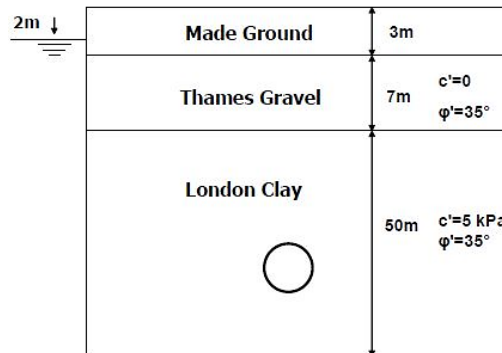
Το μοντέλο που οι συγγραφείς μελέτησαν αφορά 2 γειτονικές παράλληλες σήραγγες σε 3 διαφορετικές σχετικές θέσεις μεταξύ του, όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 2.5:



Σχήμα 2.5: Τρεις διαφορετικές γεωμετρίες, με μεταβαλλόμενη τη θέση της δεύτερης σήραγγας (Koungelis D.K., Augarde C.E., 2004)

Σε όλες τις περιπτώσεις οι σήραγγες θεωρούνται κυκλικής διατομής διαμέτρου $D=4.174\text{m}$ και η στρωματογραφία του μοντέλου διατηρείται σταθερή. Στην πρώτη γεωμετρία (case a) το βάθος του άξονα των σηράγγων είναι 34m και το πλάτος του πυλώνα μεταβάλλεται από 0.5D έως 7D. Οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται για βάθος σήραγγας 14m. Στην δεύτερη περίπτωση (case b), το πλάτος του πυλώνα (κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των σηράγγων) μεταβάλλεται από 0.5D έως 4D. Το βάθος της άνω σήραγγας διατηρείται σταθερό στα 14m, ενώ η θέση της κάτω σήραγγας μεταβάλλεται. Στην τρίτη γεωμετρία (case c), το πλάτος του πυλώνα μεταβάλλεται από 0.5D έως 7D. Όπως και στη δεύτερη γεωμετρία, η άνω σήραγγα βρίσκεται σε βάθος 14m ενώ η θέση της κάτω μεταβάλλεται.

Το πρώτο εδαφικό στρώμα (Made Ground) προσομοιώνεται ως γραμμικώς ελαστικό υλικό, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα να βρίσκεται σε βάθος 2m. Το δεύτερο και το τρίτο εδαφικό στρώμα (Thames Gravel και London Clay αντίστοιχα) προσομοιώνονται ως ελαστικά – απολύτως πλαστικά υλικά, χρησιμοποιώντας το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb (σχήμα 2.6).

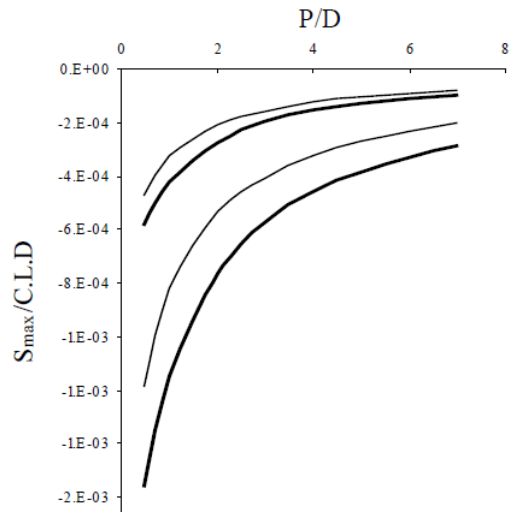


Σχήμα 2.6: στρωματογραφία του εδάφους που υιοθετήθηκε στην έρευνα (Koungelis D.K., Augarde C.E., 2004)

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται σε δύο κατηγορίες: (α) Σήραγγες με παράλληλους άξονες κατά την οριζόντια διεύθυνση (side by side geometry) και (β) Σήραγγες με παράλληλους άξονες κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (piggy back geometries)

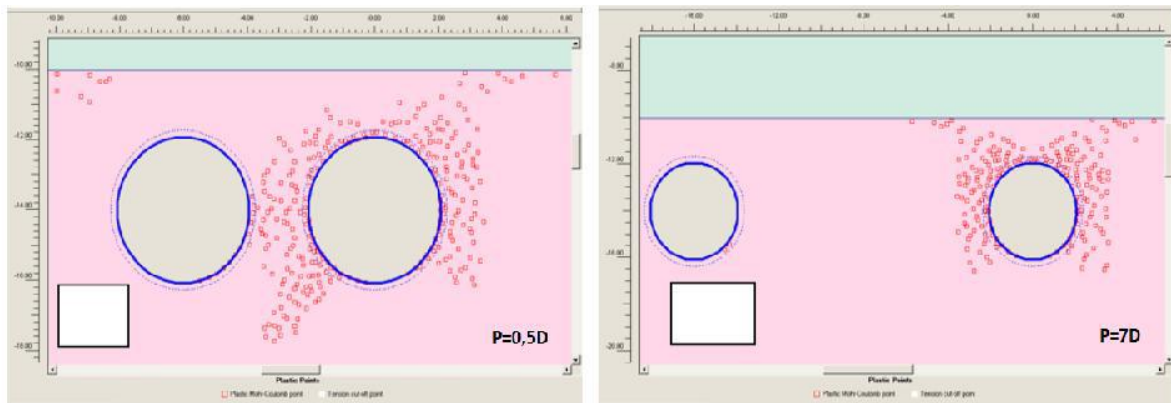
2.1.5.1. Σήραγγες με παράλληλους άξονες κατά την οριζόντια διεύθυνση (side by side geometry)

Αρχικά, για τη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται το διάγραμμα που αφορά τις καθιζήσεις στην επιφάνεια, συναρτήσει του πλάτους του πυλώνα, λόγω της δεύτερης σήραγγας (θεωρώντας τις καθιζήσεις λόγω της πρώτης ως σημείο μηδέν), για δύο διαφορετικά βάθη υπερκειμένων γαιών ($H=14\text{m}$ και $H=34\text{m}$), για δύο διαφορετικές δυσκαμψίες εδάφους ($E=1000 \text{ kPa/m}$ και $E=6000 \text{ kPa/m}$) και για πλάτος πυλώνα από $0,5D$ έως $7D$. Οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους κανονικοποιημένες ως προς την απόσταση μεταξύ των δύο σηράγγων φαίνονται δίπλα.



Σχήμα 2.7: καθιζήσεις συναρτήσει του πλάτους πυλώνα.

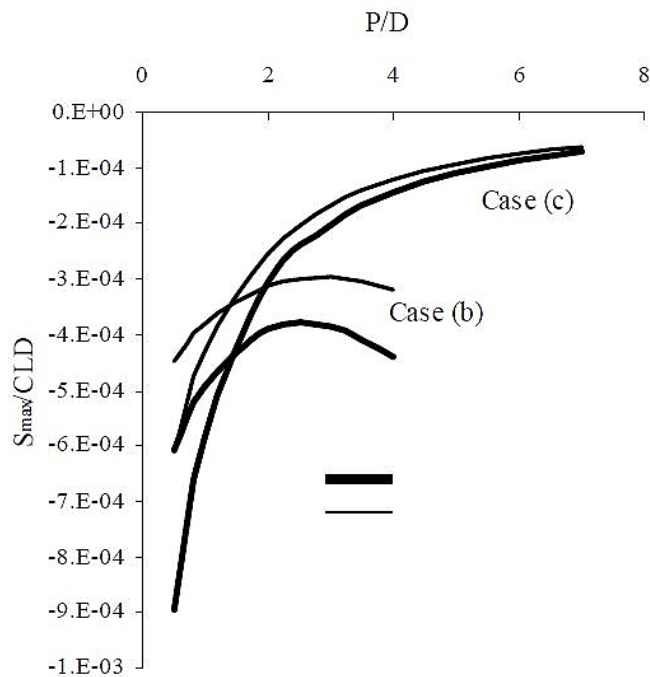
Στη συνέχεια φαίνεται η πλαστική ζώνη που δημιουργείται γύρω από τη δεύτερη σήραγγα, για ακραίες τιμές πλατών πυλώνα $P=0.5D$ και $P=7D$. Όσο το πλάτος του πυλώνα αυξάνεται, η ζώνη πλαστικοποίησης της δεύτερης σήραγγας παύει να επικαλύπτει την πρώτη σήραγγα, συνεπώς δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο κατασκευών, ενώ το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο αισθητό για λιγότερο δύσκαμπτο έδαφος.



Σχήμα 2.8: Πλαστική ζώνη γύρω από τη δεύτερη διανοιγόμενη σήραγγα αμέσως μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής: α) Για πλάτος πυλώνα ίσο με $0.5D$ β) Για πλάτος πυλώνα ίσο με $7D$.

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

Σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις περιπτώσεις b και c όπως περιγράφηκαν παραπάνω, για σήραγγες παράλληλες με τους άξονές τους να βρίσκονται σε κατακόρυφο επίπεδο. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται όπως και πριν μεγαλύτερες καθιζήσεις για πιο δύσκαμπτο έδαφος. Στην περίπτωση όπου η δεύτερη σήραγγα διανοίγεται κάτω από την ήδη προϋπάρχουσα (case c), οι καθιζήσεις αυτές μειώνονται με την αύξηση του πλάτους του πυλώνα, όπως και στην περίπτωση α (case a) ενώ οι καθιζήσεις φαίνονται να είναι μεγαλύτερες για μικρό πλάτος πυλώνα, όταν η άνω διατομή διανοίγεται πρώτη (case c). Αντίθετα η περίπτωση b με την δεύτερη σήραγγα να διανοίγεται πάνω από την πρώτη, παρουσιάζει την ιδιαιτερότητα αύξηση των καθιζήσεων για $P>3D$. Για πλάτος πυλώνα όμως μικρότερο του $3D$ η περίπτωση b παρουσιάζει μικρότερες καθιζήσεις από την περίπτωση c. (σχήμα 2.9)



Σχήμα 2.9: Εξέλιξη των επιφανειακών καθιζήσεων καθώς μεταβάλλεται το πλάτος του πυλώνα, για διαφορετικές δυσκαμψίες εδάφους.

Συγκεντρωτικά, οι Kounghelis&Augarde καταλήγουν στα εξής συμπεράσματα:

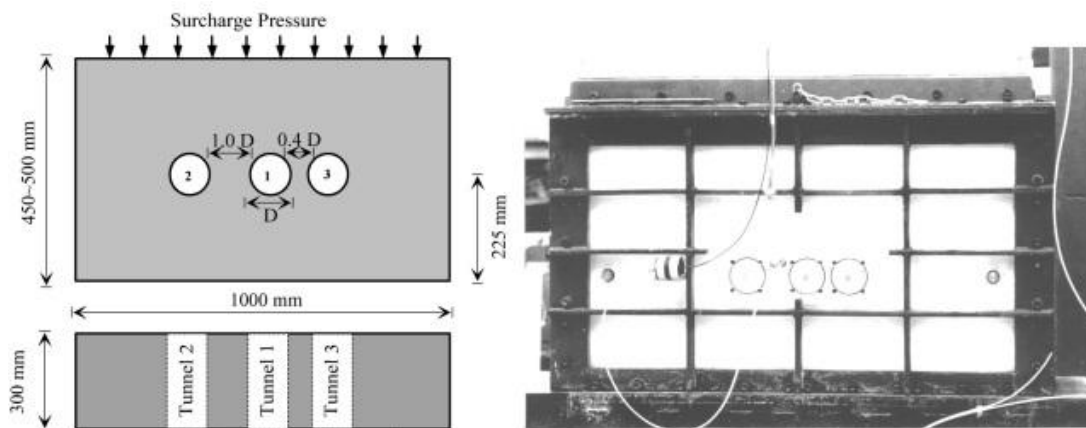
1. Για δύο σήραγγες οι οποίες εκσκάπτονται με τους άξονές τους παράλληλους κατά την οριζόντια διεύθυνση, τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης μεταξύ τους είναι εμφανή για πλάτη πυλώνα έως τρεις με τέσσερις διαμέτρους (3D-4D)
2. Για δύο σήραγγες που εκσκάπτονται με τους άξονές τους παράλληλους κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και για την περίπτωση όπου η δεύτερη διατομή διανοίγεται πάνω από μία ήδη προϋπάρχουσα διατομή, υπάρχουν μικρά φαινόμενα αλληλεπίδρασης σε πλάτος πυλώνα μιας διαμέτρου ($P=1D$). Για αποστάσεις μεγαλύτερες των τριών διαμέτρων ($P>3D$), η αλληλεπίδραση καθίσταται αμελητέα.
3. Για δύο σήραγγες με άξονες παράλληλους κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, όπου η δεύτερη σήραγγα εκσκάπτεται κάτω από την πρώτη, προϋπάρχουσα σήραγγα, τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης παρουσιάζονται, ακόμη και για μεγάλα βάθη εκσκαφής της δεύτερης σήραγγας.

2.1.6. Kim S.H., 2004

Στην παρούσα εργασία ο Kim S.H. εξετάζει την επίδραση της κατασκευής μίας νέας σήραγγας σε αργιλικό έδαφος, στις παραμορφώσεις και τις τάσεις στην επένδυση μιας ήδη υπάρχουσας γειτονικής, τόσο με εργαστηριακές δοκιμές όσο και με δισδιάστατες αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους συγκρίνονται στο τέλος ώστε να παραχθούν συμπεράσματα για τις τεχνικές που πρέπει να χρησιμοποιούνται ώστε να προκύπτουν αξιόπιστες αριθμητικές λύσεις σε τέτοιου είδους προβλήματα.

2.1.6.1. Πειραματικό μοντέλο και διαδικασία

Οι εργαστηριακές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δείγμα αργίλου με καολίνη διαστάσεων 1000x300 mm (επιφάνεια φόρτισης) και ύψους 600 mm, που τοποθετήθηκε σε κατάλληλη συσκευή επίπεδης καταπόνησης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Επίσης φαίνεται και η διάνοιξη των τριών σηράγγων που πραγματοποιήθηκε στο δείγμα αργίλου και προσομοιάζουν τις δύο υπό μελέτη περιπτώσεις, αυτή της απομακρυσμένης δεύτερης σήραγγας από την πρώτη (διαμέτρου 70 mm) σε απόσταση 2D, και την περίπτωση της κοντινής δεύτερης σε απόσταση 1,4D. Τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης αργίλου προσομοιάζουν την άργιλο του Λονδίνου, ενώ στο πάνω επίπεδο υπάρχει ελεγχόμενη πίεση ώστε να προσομοιώνεται η διάνοιξη σηράγγων μακριά από την ελεύθερη επιφάνεια. Η υποστήριξη προσομοιώθηκε με μεταλλικό κύλινδρο και οι παραμορφώσεις μετρήθηκαν με strain gauges.

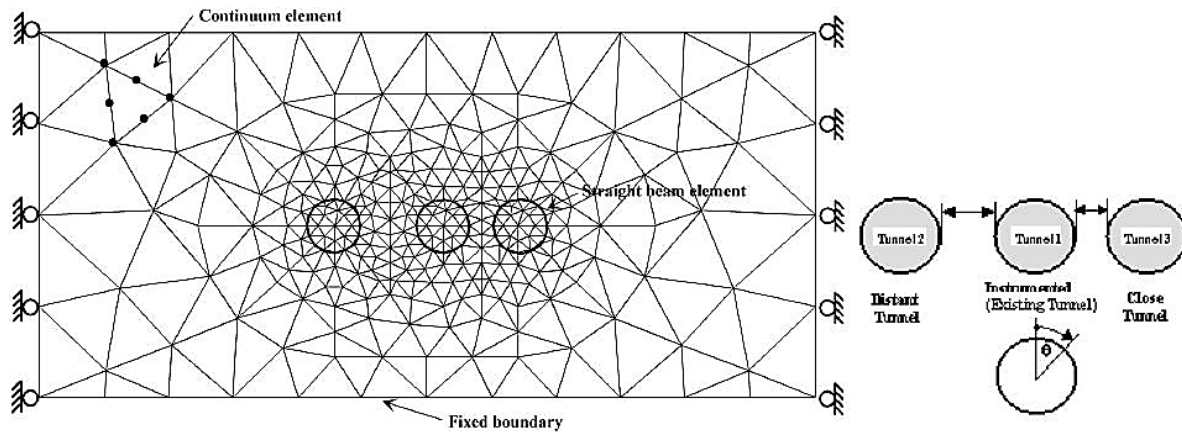


Σχήμα 2.10: Μορφή συσκευής επίπεδης καταπόνησης και διάταξη προσομοιώματος.

Όσον αφορά την αλληλουχία διάνοιξης των σηράγγων στο προσομοίωμα, αρχικά διανοίχθηκε η πρώτη κεντρική σήραγγα και τοποθετήθηκε η επένδυση (πάνω στην οποία τοποθετήθηκαν μετρητές ολικών τάσεων, υδατικών πιέσεων και παραμορφώσεων), έπειτα διανοίχθηκε η δεύτερη σήραγγα στη θέση 2 (σχήμα 2.10) η επίδραση της οποίας στις παραμορφώσεις της πρώτης μετρήθηκε με κατάλληλα μέσα, και τέλος διανοίχθηκε η κοντινή σήραγγα στη θέση 3. Οι σήραγγες στις θέσεις 2 και 3 διανοίχθηκαν αφού είχαν ολοκληρωθεί οι διαδικασίες διόγκωσης και στερεοποίησης από τα προηγούμενα στάδια.

2.1.6.2. Αριθμητικές αναλύσεις

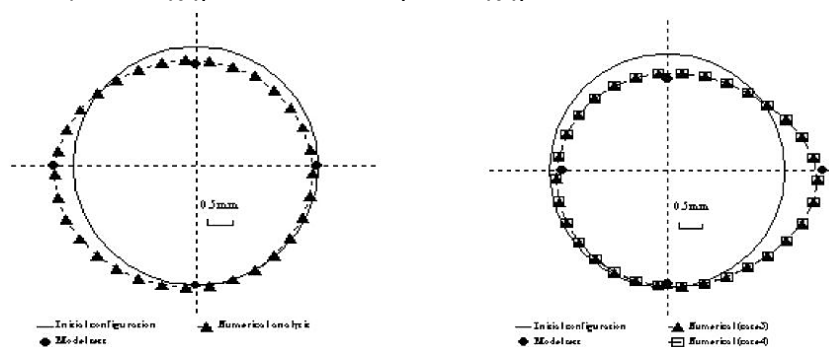
Όλες οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν από τον Kim S.H. με την βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων θεωρώντας την προσομοίωση του εδάφους ως γραμμικώς ελαστικό υλικό, για αστράγγιστες συνθήκες. Το μοντέλο, μετά την διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων και την τοποθέτηση των beam elements των επενδύσεων των σηράγγων φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 2.11: Διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων

2.1.6.3. Αποτελέσματα

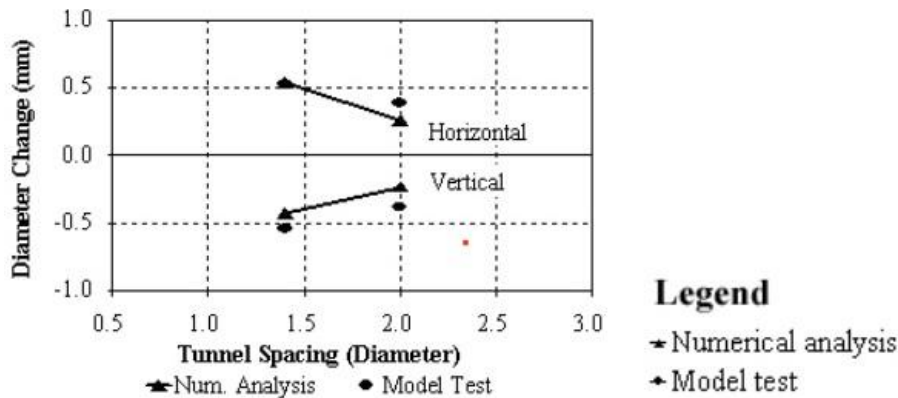
Στο τέλος της εργασίας του ο Kim S.H. επικεντρώνεται κατά κύριο λόγο στη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δύο προηγούμενες προσεγγίσεις του προβλήματος. Αρχικά παρατηρεί ότι τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό μεταξύ τους, παρουσιάζοντας και τα δύο μία μετατόπιση προς τα έξω (προς τη μεριά του δημιουργούμενου πυλώνα) της παρειάς της αρχικής σήραγγας όταν μία νέα γειτονική εκσκάπτεται. Παράλληλα παρατηρείται μία μετατόπιση προς τα κάτω της στέψης της πρώτης σήραγγας, ενώ η μετακίνηση του πυθμένα είναι αμελητέα. Η μορφή των παραμορφώσεων στην πρώτη σήραγγα είναι παρόμοια είτε η νέα διανοιγόμενη σήραγγα εκσκάπτεται στη θέση 2 (2D) είτε στη θέση 3 (1,4D), αλλά διαφορετικού μεγέθους, με την κοντινότερη να δίνει μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Τα παραπάνω παρουσιάζονται σχηματικά στο επόμενο σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12: Μετακινήσεις στην υποστήριξη της υφιστάμενης σήραγγας, λόγω της διάνοιξης σήραγγας στα αριστερά της υφιστάμενης, σε απόσταση 2D (αριστερά) και λόγω της διάνοιξης σήραγγας στα δεξιά της υφιστάμενης, σε απόσταση 1.4D (δεξιά) (Kim S.H., 2004).

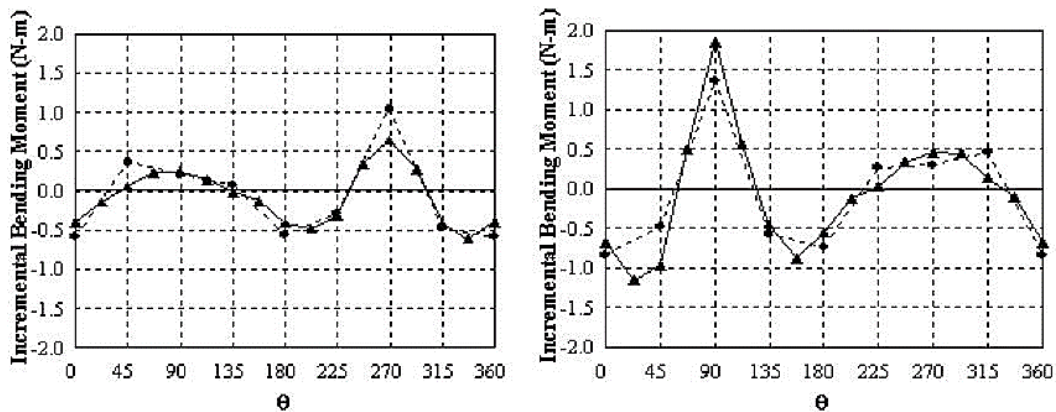
Γραφικά, η επίδραση της απόστασης που διανοίγεται η νέα σήραγγα στις παραμορφώσεις της υφιστάμενης σήραγγας, στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση, φαίνεται στο σχήμα 2.13.

Επίσης μπορεί να δει κανείς τη συμφωνία των αποτελεσμάτων τόσο από την αριθμητική προσέγγιση όσο και από την εργαστηριακή.



Σχήμα 2.13: Επίδραση της απόστασης των σηράγγων στην διάμετρο της αρχικής σήραγγας (Kim S.H., 2004)

Τέλος παρουσιάζονται οι σταδιακά αυξανόμενες ροπές κάμψης στην υποστήριξη της υφιστάμενης σήραγγας, λόγω της κατασκευής των γειτονικών σηράγγων ($W = 2D$ και $W = 1.4D$), τόσο από τις μετρήσεις στις εργαστηριακές δοκιμές όσο και από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων. Παρατηρείται κι εδώ συμφωνία των αποτελεσμάτων από τις δύο μεθόδους, ενώ συμπληρώνεται ότι για μικρότερες αποστάσεις γειτονικών σηράγγων παρατηρούνται μεγαλύτερες ροπές κάμψης.

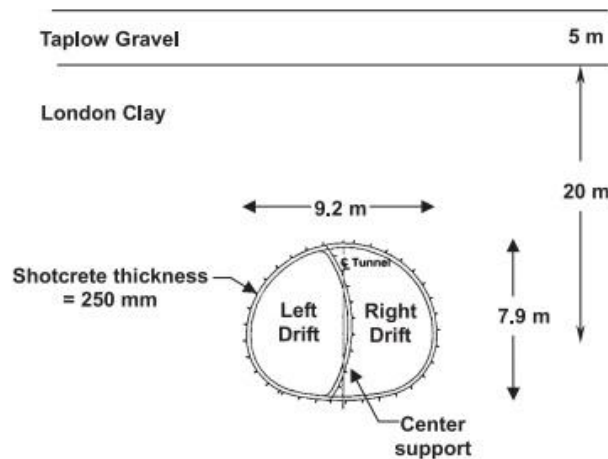


Σχήμα 2.14: Επιπρόσθετες ροπές κάμψης στην υποστήριξη της υφιστάμενης σήραγγας, λόγω της διάνοιξης της γειτονικής σήραγγας στα αριστερά της υφιστάμενης ($W = 2D$) (αριστερά) και λόγω της διάνοιξης της γειτονικής σήραγγας στα δεξιά της υφιστάμενης ($W = 1.4D$) (δεξιά) (Kim S.H., 2004).

Ο Kim S.H. συνοψίζοντας στη συγκεκριμένη εργασία, αναφέρει ότι η εκσκαφή μιας νέας σήραγγας σε πολύ κοντινή απόσταση από μία προϋπάρχουσα σήραγγα δύναται να επιφέρει σημαντικά προβλήματα παραμορφώσεων και αύξησης των ροπών στην υποστήριξη της υφιστάμενης, ενώ φαίνεται ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των σηράγγων είναι αμελητέα, όταν η απόσταση μεταξύ τους είναι μεγαλύτερη από δύο διαμέτρους ($W > 2D$).

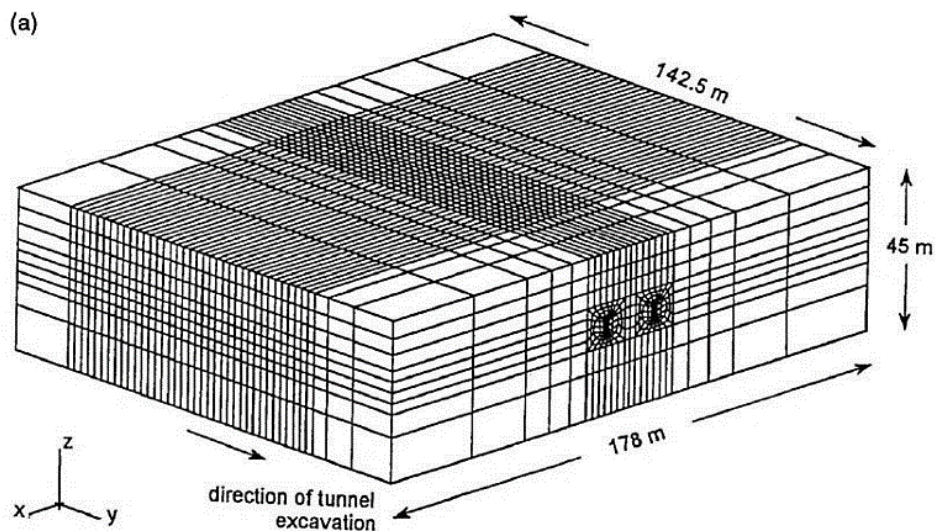
2.1.7. Ng C.W.W., Lee K.M. & Tang D.K.W., 2004

Οι Ng C.W.W., Lee K.M. & Tang D.K.W. προσπάθησαν στη συγκεκριμένη εργασία να διερευνήσουν την αλληλεπίδραση μεταξύ μεγάλου μήκους, παράλληλες σήραγγες κατασκευασμένες σε σκληρή άργιλο με τη χρήση της Νέας Αυστριακής Μεθόδου, με την βοήθεια τρισδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία. Έδωσαν ιδιαίτερη έμφαση στη σχέση μεταξύ της διαμήκου απόστασης εκσκαφής των μετώπων των δίδυμων σηράγγων και το μηχανισμό μεταφοράς φορτίων μεταξύ αυτών. Η γεωμετρία των σηράγγων, η μέθοδος κατασκευής και οι συνθήκες του εδάφους που υιοθετήθηκαν στις τρισδιάστατες προσομοιώσεις είναι παρόμοιες με εκείνες της δοκιμαστικής σήραγγας του Heathrow (New and Bowers 1994; Deane and Bassett 1995). Η μορφή της διατομής που κατασκευάστηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.15.

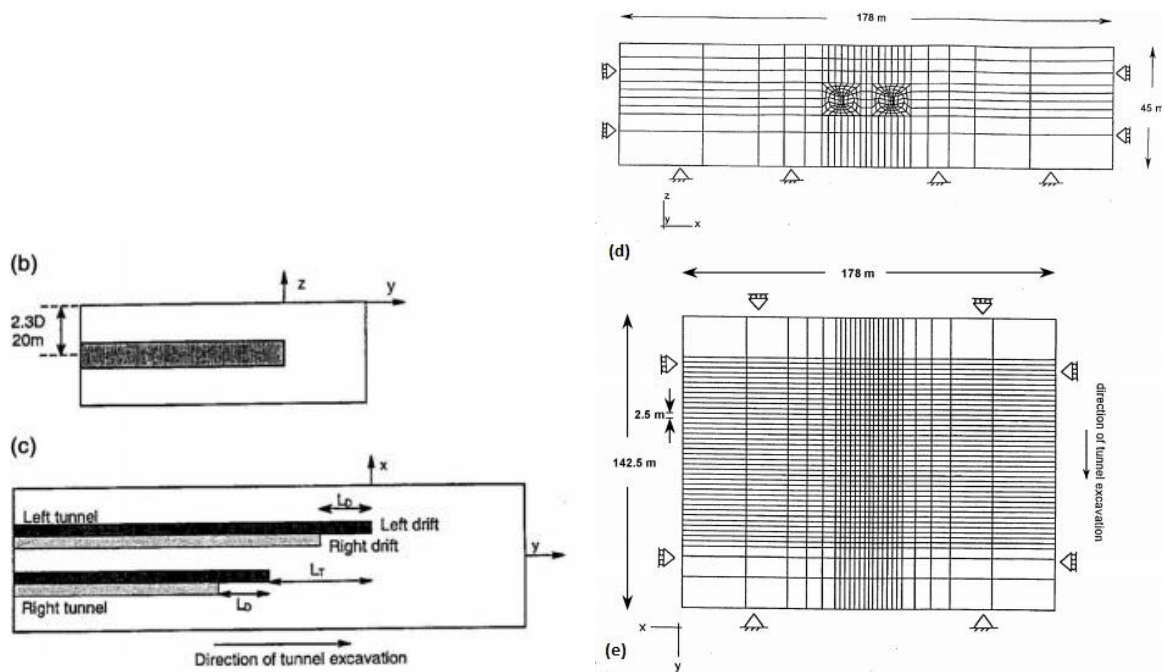


Σχήμα 2.15: Διατομή δοκιμαστικής σήραγγας (από Deane and Bassett 1995)

Για τις αριθμητικές αναλύσεις και προσομοίωση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus (Abaqus, Inc. 1998). Το τελικό μοντέλο που παράχθηκε, μετά και την διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων, και την πύκνωση αυτών στα σημεία που κρίθηκε ότι έχουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον, φαίνεται τόσο σε τρισδιάστατη μορφή όσο και σε δισδιάστατες όψεις και τομές στα παρακάτω σχήματα (2.16, 2.17)

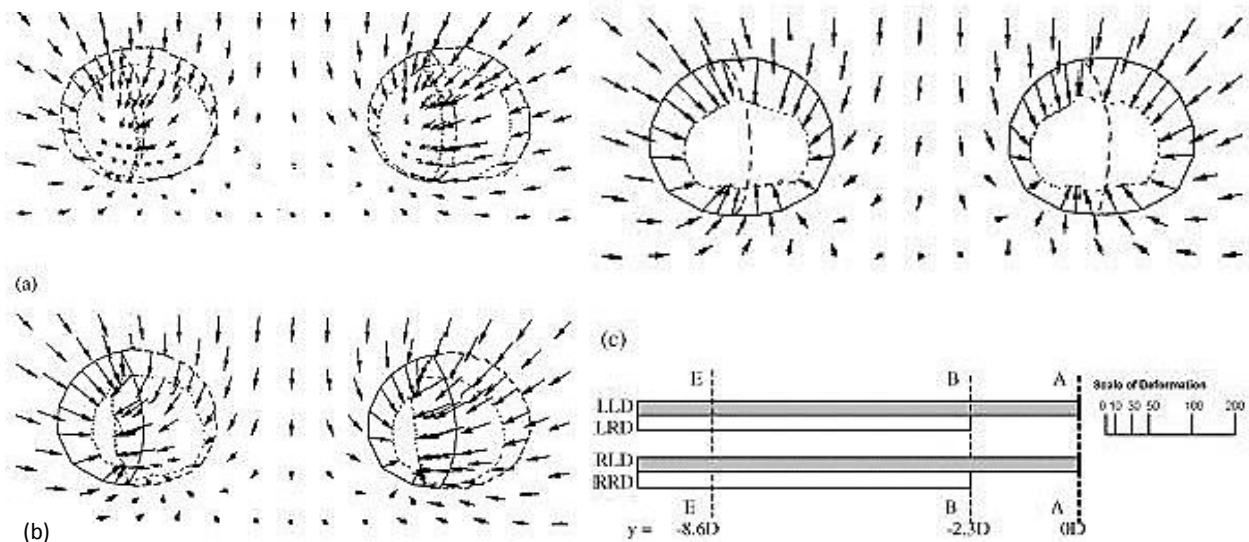


Σχήμα 2.16: Τρισδιάστατη άποψη της διακριτοποίησης των δίδυμων σηράγγων (Ng, Lee & Tang, 2004).

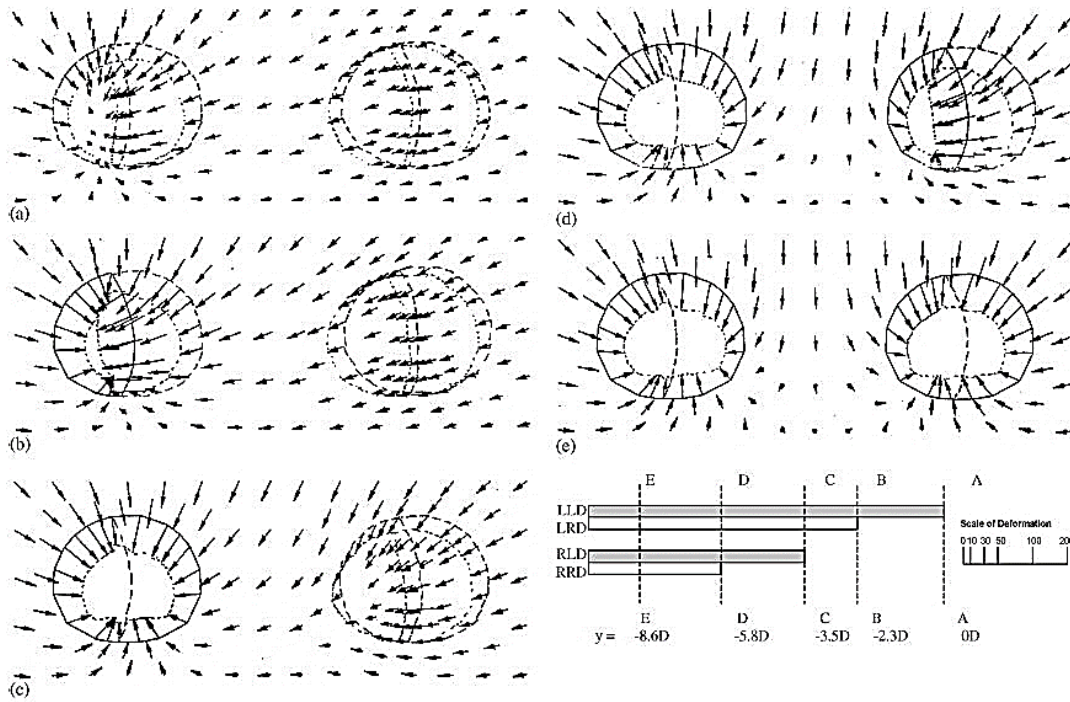


Σχήμα 2.17: Τυπική διατομή - πλάγια όψη από τη θετική διεύθυνση x (b). Κάτοψη (c). Εγκάρσια τομή του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων των δίδυμων παράλληλων σηράγγων: (d) x-z επίπεδο, (e) x-y επίπεδο (Ng, Lee & Tang, 2004).

Από τις τρισδιάστατες αναλύσεις προέκυψαν μία σειρά αποτελεσμάτων και διαγραμμάτων που αφορούν στις παραμορφώσεις του περιβάλλοντος εδάφους, στις παραμορφώσεις και μετακινήσεις των σηράγγων, στις καθιζήσεις, στις ροπές κάμψης και στις αξονικές δυνάμεις της επένδυσης των σηράγγων. Τα αποτελέσματα λήφθηκαν για διάφορες αποστάσεις μεταξύ των μετώπων των δύο σηράγγων όπως φαίνεται στα σχήματα 2.18 και 2.19.

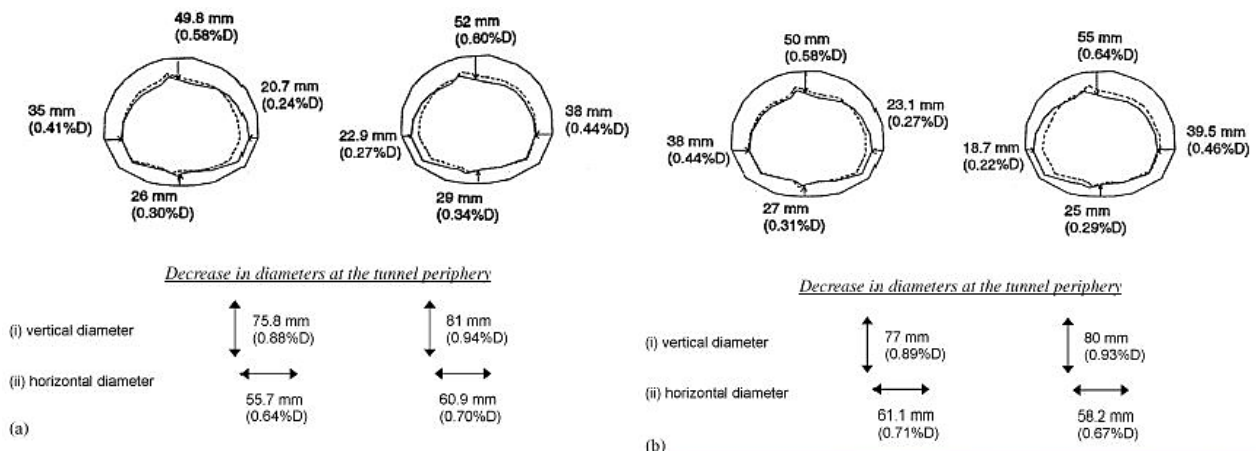


Σχήμα 2.18: Παραμόρφωση στην περιφέρεια της σήραγγας σε διαφορετικά τμήματα για $LT = OD$: (a) στην $y = 0m$ ή OD (τομή A – A) στην $y = -20m$ ή $-2.3D$ (τομή B – B) στην $y = -75m$ ή $-8.6D$ (τομή E – E, που προσεγγίζει συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης). LLD, αριστερή φάση της αριστερής σήραγγας LRD, δεξιά φάση της αριστερής σήραγγας RLD, αριστερή φάση της δεξιάς σήραγγας RRD, δεξιά φάση της δεξιάς σήραγγας (Ng, Lee & Tang, 2004).



Σχήμα 2.19: Παραμόρφωση στην περιφέρεια της σήραγγας σε διαφορετικές διατομές για $LT = 3.5D$: (a) στην $y = 0m$ ή $0D$ (τομή A – A) (b) στην $y = -20m$ ή $-2.3D$ (τομή B – B) (c) στην $y = -30m$ ή $-3.5D$ (τομή C – C) (d) στην $y = -50m$ ή $-5.8D$ (τομή D – D) (e) στην $y = -75m$ ή $-8.6D$ (τομή E-E, η οποία προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) (Ng, Lee & Tang, 2004).

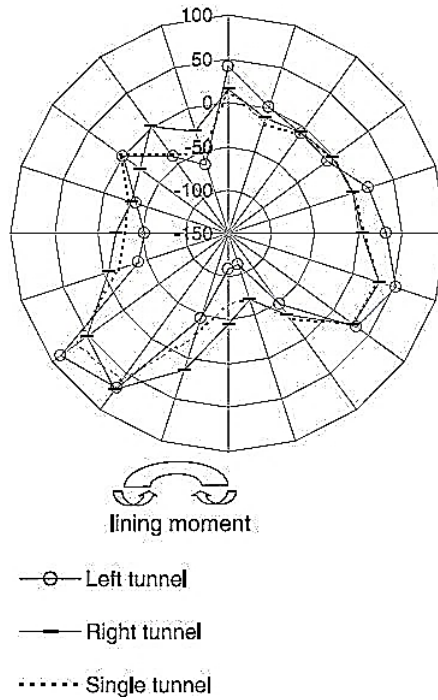
Στη συνέχεια παρατίθενται τα σχήματα που αφορούν την παραμόρφωση στην περιφέρεια της σήραγγας, για $LT=0m$ και $30m$, αντίστοιχα. Η απόσταση LT έχει μεγαλύτερη επιρροή στην οριζόντια παραμόρφωση στην παρειά, παρά στην κατακόρυφη μετακίνηση στη στέψη κάθε σήραγγας.



Σχήμα 2.20: Σύγκριση των παραμορφώσεων στη διατομή E - E ($y = -8.6D$, που προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) για (a) $LT = 0D$ και (b) $LT = 3.5D = 30m$ (Ng, Lee & Tang, 2004).

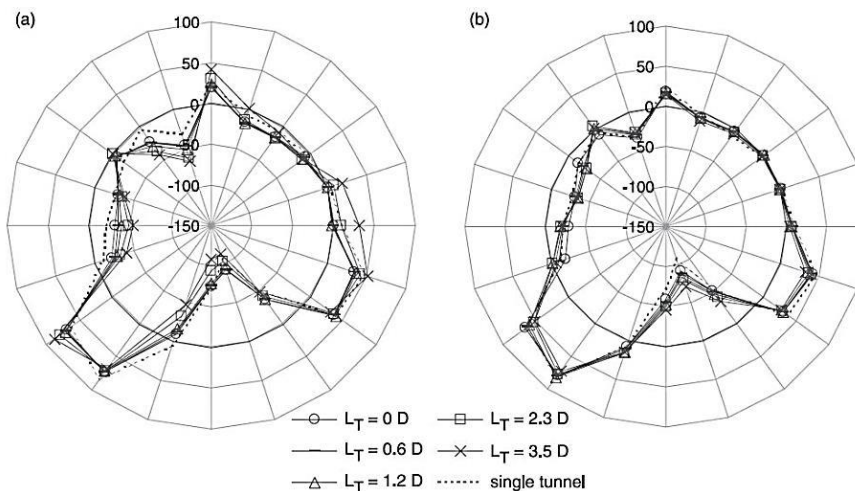
Στη συνέχεια οι συγγραφείς παρουσιάζουν την επίδραση του εξεταζόμενου φαινομένου στις επιφανειακές καθιζήσεις του εδάφους καθώς και στις καμπτικές ροπές και αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην επένδυση των σήραγγων. Τα τελευταία, που είναι και πιο σχετικά με το αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, φαίνεται στα παρακάτω σχήματα. Αρχικά στο σχήμα 2.21 δίνεται η κατανομή των ροπών κάμψης και στις δύο σήραγγες για μεγάλο σχετικά $L_T=3,5D$. Παρατηρείται ομοιότητα στην κατανομή των ροπών στις δύο σήραγγες, με τις τιμές όμως

να είναι μεγαλύτερες στην αριστερή σήραγγα. Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή παρατηρούνται στην αριστερή παρειά και στο ανάστροφο τόξο. Η ομοιότητα μεταξύ των κατανομών των ροπών κάμψης στην αριστερή και τη μονή σήραγγα, υποδηλώνει ότι η αριστερή σήραγγα, στην κατασκευή δίδυμων σηράγγων, ουσιαστικά συμπεριφέρεται ως μονή, λόγω της μεγάλης τιμής του L_T .

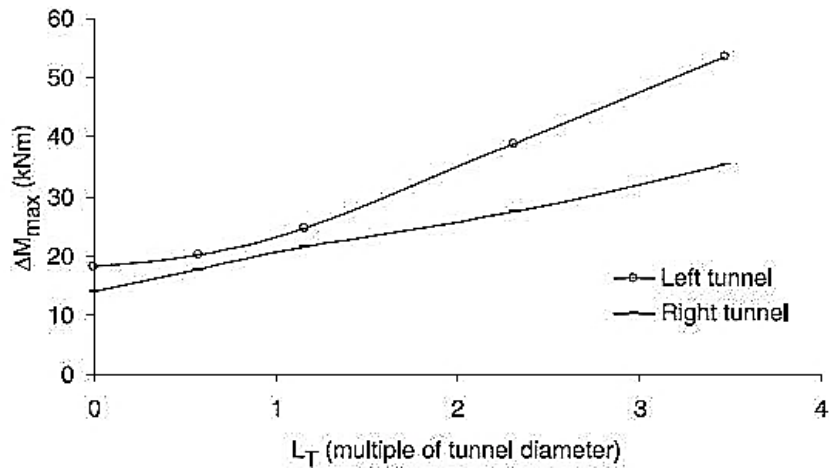


Σχήμα 2.21: Ροπή κάμψης (kNm) στην επένδυση για τη διατομή E-E ($\gamma = -8.6D$, η οποία προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης), για $L_T = 3.5D$ (Ng, Lee&Tang, 2004).

Στο επόμενο σχήμα 2.22 παρουσιάζονται από τους συγγραφείς οι μεταβολές της ροπής κάμψης στην αριστερή και δεξιά σήραγγα στη θέση $\gamma = -75$, για διαφορετικές αποστάσεις L_T , ενώ κλείνοντας με τις ροπές, παρατίθεται το διάγραμμα (σχήμα 2.23) που δείχνει τις διακυμάνσεις της μέγιστης στοιχειώδους ροπής κάμψης στην επένδυση, συναρτήσεως της απόστασης L_T . Σημειώνεται ότι καθώς αυξάνεται η απόσταση L_T παρατηρείται αύξηση της μέγιστης ροπής στην αριστερή σήραγγα και μείωση την δεξιά.

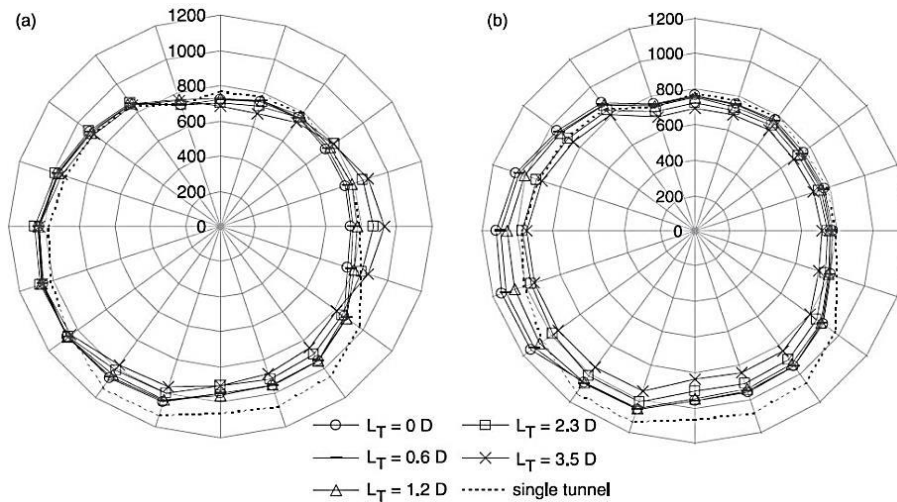


Σχήμα 2.22: Διακύμανση της ροπής κάμψης (kNm·m) στη επένδυση για τη διατομή E – E ($\gamma = -8.6D$, που προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) για διαφορετικές τιμές L_T : (a) αριστερή σήραγγα (b) δεξιά σήραγγα (Ng, Lee&Tang, 2004).



Σχήμα 2.23: Διακύμανση της μέγιστης ροπής κάμψης (M_{max}) στην επένδυση για τη διατομή E – E ($\gamma = -8.6D$, που προσεγγίζει τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης), για διαφορετικές τιμές L_T (Ng, Lee&Tang, 2004).

Τέλος οι Ng C.W.W., Lee K.M. &Tang D.K.W δείχνουν την επίδραση της απόστασης L_T των μετώπων στις αναπτυσσόμενες αξονικές δυνάμεις στις δύο σήραγγες (σχήμα 2.24).



Σχήμα 2.24: Διακύμανση της αξονικής δύναμης (kN/m) στη διατομή E – E με διάφορες τιμές L_T : (a) αριστερή σήραγγα (b) δεξιά σήραγγα (Ng, Lee&Tang, 2004).

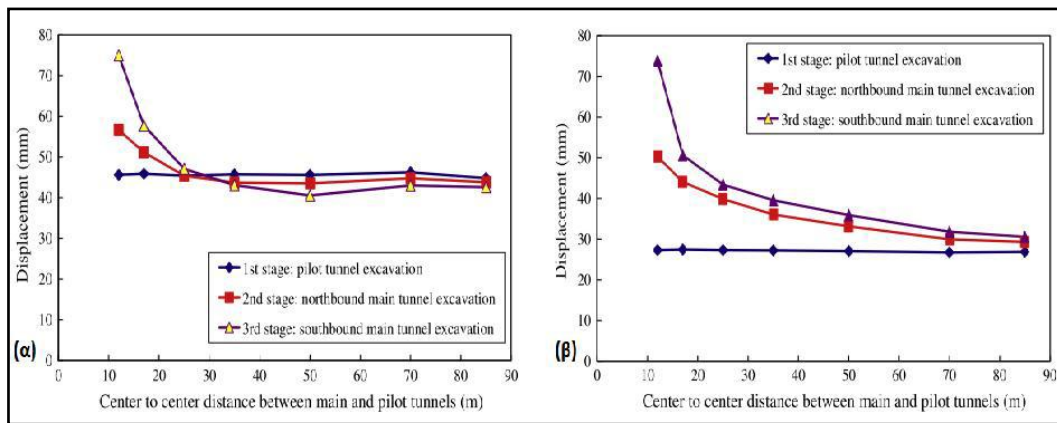
2.1.8. Chen S.L., Lee S.C. & Gui M.W., 2008

Οι Chen S.L., Lee S.C. & Gui M.W. στη συγκεκριμένη εργασία μελετούν την αλληλεπίδραση κατά την εκσκαφή τριών και τεσσάρων παράλληλων σηράγγων, καθώς και την επίδραση της κεκλιμένης τοπογραφίας στον κεντρικό πυλώνα, με την βοήθεια αριθμητικών αναλύσεων με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS ver7.2. Συγκεκριμένα μελετάνε την οδική σήραγγα Xue Shan μήκους 12,9km, στην Ταϊβάν που αρχικά σχεδιάστηκε ως σύστημα τριών παράλληλων σηράγγων (δύο κύριοι κλάδοι και μία προπορευόμενη πιλοτική σήραγγα), ενώ στη συνέχεια, λόγω ειδικών περιστάσεων που εμφανίστηκαν για συγκεκριμένο μήκος, δημιουργήθηκαν τέσσερις παράλληλες σήραγγες (μία επιπλέον πιλοτική σήραγγα). Στις περιοχές των στομιών εξαιτίας των περιορισμών που επέβαλλε η οδοποιία, ήταν δυνατή η κατασκευή μόνο των δυο κύριων κλάδων σε πολύ μικρή μεταξύ τους απόσταση. Έτσι στο στάδιο αυτό μελετάται η συμπεριφορά δίδυμων σηράγγων για μεταβαλλόμενο πλάτος πυλώνα. Το μέγιστο ύψος υπερκειμένων είναι 750 μέτρα, συναντήθηκαν κατά την διάνοιξη 6 κύρια ρήγματα ενώ προέκυψαν πολλά προβλήματα λόγω εισροών υπογείων υδάτων.

Για τη συγκεκριμένη έρευνα έγιναν οι εξής παραδοχές. Το πρόβλημα θεωρήθηκε και επιλύθηκε ως δισδιάστατο επίπεδης παραμόρφωσης, τα υλικά ακολουθούσαν τον νόμο αστοχίας Mohr-Coulomb, ενώ για την επένδυση χρησιμοποιήθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που αναπαραστάθηκε με στοιχεία δοκού στο πρόγραμμα. Δεν λήφθηκε υπόψη η επίδραση του ερπυσμού στις παραμορφώσεις παρά μόνο η επίδραση της εκσκαφής και της υποστήριξης και τέλος η εκσκαφή της διατομής πραγματοποιήθηκε σε μία φάση, με αποτέλεσμα να μην παίζουν ρόλο οι διάφορες φάσεις τμηματικής εκσκαφής των διατομών (όπως έγινε στην πραγματικότητα). Οι γεωτεχνικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν μετά από back-analysis. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν για τρία διαφορετικά τμήματα σήραγγας εξετάζοντας για κάθε μία, την επίδραση του πλάτους πυλώνα στην εξέλιξη των παραμορφώσεων.

2.1.8.1. Τρεις παράλληλοι κλάδοι

Στο συγκεκριμένο τμήμα της σήραγγας όπου απαιτήθηκε η κατασκευή τριών παράλληλων σηράγγων, το ύψος των υπερκειμένων λήφθηκε ίσο με 300m, η βραχομάζα χαρακτηρίστηκε ως πτωχής ποιότητας, ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων K_0 , ίσος με 1.0 ενώ η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου δε συμπεριλήφθηκε στη συγκεκριμένη ανάλυση. Το σύστημα αυτό των τριών σηράγγων περιλαμβάνει τις δύο κύριες σήραγγες διαμέτρου 12 μέτρων καθώς και την προπορευόμενη πιλοτική σήραγγα διαμέτρου 5 μέτρων, με το πλάτος πυλώνα όμως να είναι μεταβαλλόμενο. Στα παρακάτω σχήματα 2.26 παρουσιάζεται η εξέλιξη των μετακινήσεων στις τρεις σήραγγες για διάφορα πλάτη πυλώνα όπως προέκυψε από τις αναλύσεις, τόσο για κυκλική διατομή, όπως στην πραγματική περίπτωση, όσο και για πεταλοειδή διατομή.



Σχήμα 2.25: Εξέλιξη των μετακινήσεων των τριών κλάδων για μεταβαλλόμενο πλάτος πυλώνα: (α) Για πεταλοειδή διατομή (β) Για κυκλική διατομή. (Chen, Lee, Gui, 2008)

Με βάση τα παραπάνω οι συγγραφείς καταλήγουν στα εξής συμπεράσματα όσον αφορά αυτή την περίπτωση των τριών παράλληλων σηράγγων:

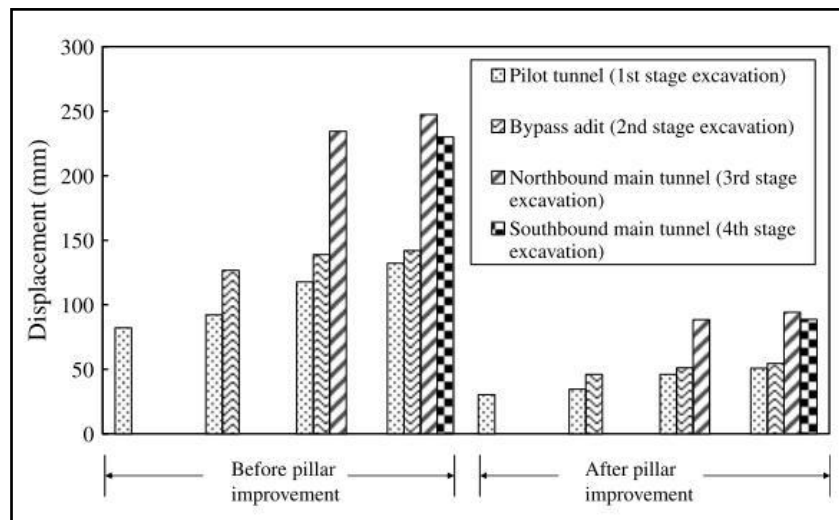
- Η κυκλικής διατομής σήραγγα παράγει σε γενικές γραμμές μικρότερες μετατοπίσεις σε σχέση με αυτή πεταλοειδούς διατομής σε όλα τα στάδια εκσκαφής. Παρόλα αυτά, η αλληλεπίδραση μεταξύ των γειτονικών σηράγγων κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων της εκσκαφής, όταν πρόκειται για κυκλική διατομή, είναι πιο εμφανής σε σχέση με την πεταλοειδή.
- Για την πεταλοειδή διατομή η αλληλεπίδραση μεταξύ των σηράγγων παύει να είναι σημαντική για πλάτη πυλώνα μεγαλύτερα των 30 μέτρων. Όμοια, για τις κυκλικές διατομές το πλάτος αυτό που σταματάει η αλληλεπίδραση εντοπίζεται στα 60 μέτρα. Για μικρότερα πλάτη πυλώνα από τα προαναφερθέντα η αλληλεπίδραση αυξάνεται σημαντικά. Γι αυτό το λόγο αναφέρεται ότι σε περιπτώσεις όπου, αν για λόγους περιορισμού στο χώρο, το πλάτος αυτό δε μπορεί να διατηρηθεί σε κατάλληλα επίπεδα, τότε δύναται να χρειαστεί ενίσχυση της βραχομάζας με τσιμεντενέσεις, είτε επιπρόσθετη υποστήριξη, όπως εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χαλύβδινες νευρώσεις για τη σταθεροποίηση της σήραγγας.

2.1.8.2. Τέσσερις παράλληλοι κλάδοι

Σε μία από τις πολλές σοβαρές αστοχίες και καταρρεύσεις που έλαβαν χώρα κατά την διάνοιξη των σηράγγων, το TBM εγκλωβίστηκε στην κύρια σήραγγα την οποία διάνοιγε. Για το λόγο αυτό διανοίχθηκε μία επιπλέον πιλοτική σήραγγα μεταξύ της πρώτης πιλοτικής και της κύριας, με αποτέλεσμα για ένα συγκεκριμένο τμήμα να υπάρχει ένα σύστημα τεσσάρων παράλληλων σηράγγων, το οποίο και μελετήθηκε.

Οι γεωλογικές συνθήκες ήταν και στην περίπτωση αυτή δυσμενείς, η κατάσταση της βραχομάζας χαρακτηρίζεται πτωχή και το ύψος των υπερκείμενων γαιών λήφθηκε ίσο με 300m. Η αλληλουχία των εκσκαφών ήταν η εξής: διάνοιξη της πιλοτικής σήραγγας, παγίδευση του TBM και εκσκαφή της βοηθητικής σήραγγας, εκσκαφή της αριστερής κύριας σήραγγας, εκσκαφή της δεξιάς κύριας σήραγγας.

Με βάση τα παραπάνω, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις οι οποίες κατέληξαν σε μη αποδεκτές παραμορφώσεις. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη μετατόπιση της πιλοτικής σήραγγας στην πρώτη εκσκαφή ήταν 82mm, ενώ αν η εκσκαφή συνεχιζόταν χωρίς την ενίσχυση της βραχομάζας, οι μέγιστες μετακινήσεις των δύο κύριων κλάδων θα ήταν 247mm και 230mm αντίστοιχα. Για αυτό τον έλεγχο των παραμορφώσεων, πραγματοποιήθηκαν εργασίες αποστραγγίσεως των υπόγειων υδάτων και ενίσχυση της βραχομάζας με τσιμεντενέσεις. Οι τελικές συγκλίσεις του βόρειου και νότιου κλάδου, ύστερα από τις ενέργειες αυτές, ήταν 94mm και 89mm αντίστοιχα. Όλα τα παραπάνω φαίνονται συγκεντρωτικά στο παρακάτω σχήμα 2.26.



Σχήμα 2.26: Μέγιστες μετακινήσεις για κάθε έναν από τους τέσσερις κλάδους της σήραγγας και κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων εκσκαφής (Chen, Lee, Gui, 2008).

2.1.8.3. Δύο παράλληλοι κλάδοι

Η τελευταία περίπτωση που εξετάστηκε αφορά την περίπτωση δύο παράλληλων σηράγγων με μικρό όμως πλάτος πυλώνα λόγω περιορισμών της οδοποιίας αλλά και λόγω περιβαλλοντικών περιορισμών. Η αρκετά ασθενής βραχομάζα οδήγησε τους κατασκευαστές να εφαρμόσουν μία ελάχιστα διαδεδομένη μέθοδος, η central-pillar-gallery tunneling method, η οποία περιλαμβάνει την ολική αντικατάσταση της βραχομάζας που αποτελεί τον πυλώνα.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, διανοίγεται στοά η οποία διαθέτει τις διαστάσεις του πυλώνα. Η διάνοιξη αυτή προηγείται της εκσκαφής των δυο κύριων κλάδων. Απομακρύνεται η πτωχής ποιότητας βραχομάζα και στη συνέχεια ακολουθεί επανεπίχωση της εκσκαφής με σκυρόδεμα. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η διάνοιξη των δυο κλάδων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάζεται η απόσταση μεταξύ των δυο κλάδων είναι ίση με 16m και το ύψος των υπερκείμενων γαιών περίπου 20m, ενώ η επιφάνεια είναι κεκλιμένη.

Και για τις δύο περιπτώσεις, και για την εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου αλλά και για τη μη εφαρμογή αυτής, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις από τις οποίες προέκυψαν τα παρακάτω χαρακτηριστικά αποτελέσματα που αφορούν τις αναπτυσσόμενες μετακινήσεις στους δύο κλάδους πριν και μετά την βελτίωση του πυλώνα. Παρατηρείται η μείωση που προκαλεί στις

μετακινήσεις αυτή η αντικατάσταση της πτωχής βραχομάζας με μία άλλη πιο ενισχυμένη και ισχυρότερη.

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

Σχήμα 2.27: Επίδραση της βελτίωσης του πυλώνα στις μετακινήσεις των δύο κύριων κλάδων, κατά τη διάρκεια της εκσκαφής (Chen, Lee, Gui, 2008).

2.1.8.4. Συμπεράσματα

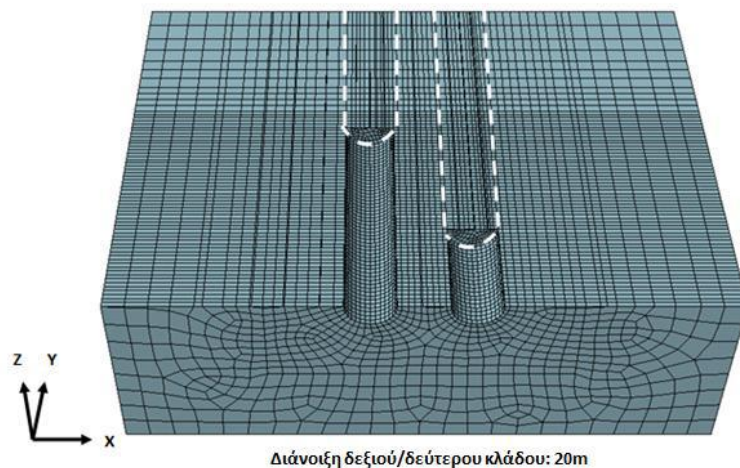
Τελικώς, οι συγγραφείς καταλήγουν στα εξής συμπεράσματα:

- i. Προκύπτει ότι για πλάτος πυλώνα μεταξύ των γειτονικών σηράγγων, πάνω από 2B, τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης δεν είναι πλέον πολύ σημαντικά.
- ii. Παρόλο που το μέγεθος των μετακινήσεων είναι μικρότερο για κυκλικής διατομής σήραγγα από ότι για πεταλοειδούς διατομής, τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης μεταξύ των γειτονικών σηράγγων επηρεάζουν περισσότερο την κυκλική σήραγγα, ειδικά εάν το καθαρό πλάτος πυλώνα είναι μικρότερο από 2B.
- iii. Στην περίπτωση που απαιτούνται επιπλέον σήραγγες από τις δύο κύριες, όπως το σύστημα τεσσάρων σηράγγων που μελετήθηκε, τότε εκτός του ότι οδηγεί σε μεγαλύτερη πολυπλοκότητα το πρόβλημα, μειώνει αρκετά και το πλάτος πυλώνα μεταξύ των σηράγγων. Σε αυτή την ειδική περίπτωση απαιτούνται ειδικές τεχνικές, όπως ενίσχυση του πυλώνα και μείωση της στάθμης των υπόγειων υδάτων για την διατήρηση της σταθερότητας των σηράγγων.
- iv. Σε ορισμένες περιπτώσεις όπως στο σχεδιασμό και κατασκευή σηράγγων στην περιοχή του στομίου σε μικρά ύψη υπερκειμένων και ασθενείς βραχομάζες, χρειάζεται ειδική αντιμετώπιση η οποία μπορεί να οδηγήσει ακόμη και στην πλήρη αντικατάσταση του υλικού του πυλώνα (central-pillar-gallery tunneling method).
- v. Τέλος οι Chen S.L., Lee S.C. & Gui M.W. αναφέρουν ότι σε περιοχές στομίων είναι απαραίτητος ο έλεγχος ευστάθειας των πρανών πάνω από αυτά, καθώς και η πλήρης παρακολούθηση αυτών με διάφορα όργανα παρακολούθησης, ώστε να λαμβάνονται άμεσα στοιχεία σχετικά με τη σταθερότητα και πιθανούς κινδύνους.

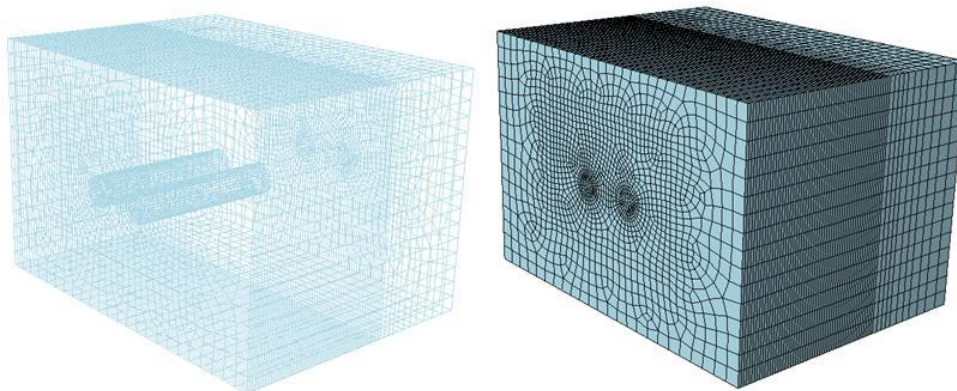
2.1.9. Μπεκρή Ε., 2009

Η Μπεκρή Ε. μελετά στην μεταπτυχιακή της διπλωματική εργασία την αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο κλάδων δίδυμων σηράγγων κατά την διάνοιξή τους, και κατ' επέκταση την κατάλληλη εγκάρσια απόσταση αυτών των δύο όπου εξασφαλίζεται η ασφάλεια και η λειτουργικότητα της κατασκευής.

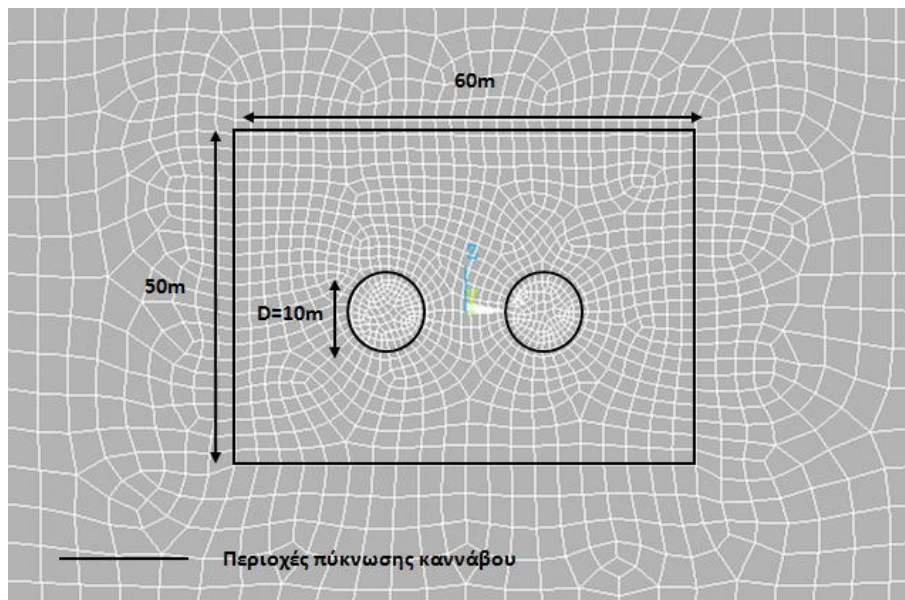
Για την επίλυση του προβλήματος αυτού η Μπεκρή Ε. προέβη σε παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις με τρισδιάστατα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων, που οδηγεί σε μεγαλύτερης ακρίβεια αποτελέσματα απαλλαγμένα από παραδοχές εκτίμησης αποτόνωσεων και προσυγκλίσεων. Η προσομοίωση των μοντέλων έγιναν με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS και η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων ποσοτικοποιείται σε όρους πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης και σε όρους μετακινήσεων στην περίμετρο της εκσκαφής. Οι παράμετροι που μελετώνται ως προς την επίδρασή τους στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι οι γεωτεχνικές συνθήκες, το πλάτος του πυλώνα και το μέτρο ελαστικότητας. Η σήραγγα εκσκάφτηκε σε καθορισμένα βήματα του ενός μέτρου, σε όλες τις αναλύσεις θεωρήθηκε ολομέτωπη εκσκαφή κυκλικής διατομής διαμέτρου $D=10\text{m}$, ενώ η διάνοξη πραγματοποιήθηκε και για τους δυο κλάδους με φορά από $y=0\text{m}$ έως $y=50\text{m}$. Ο συνολικός αριθμός των βημάτων είναι 99 και η μορφή παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 2.28.



Σχήμα 2.28: Προσομοίωση της διαδικασίας εκσκαφής με σταδιακή αφαίρεση των πεπερασμένων στοιχείων εντός τη διατομής εκσκαφής (Βήμα 69ο – Τομή προσομοιώματος με οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται από το κέντρο των σηράγγων). (Μπεκρή Ε., 2009)



Σχήμα 2.29: Τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις. (Μπεκρή Ε., 2009)



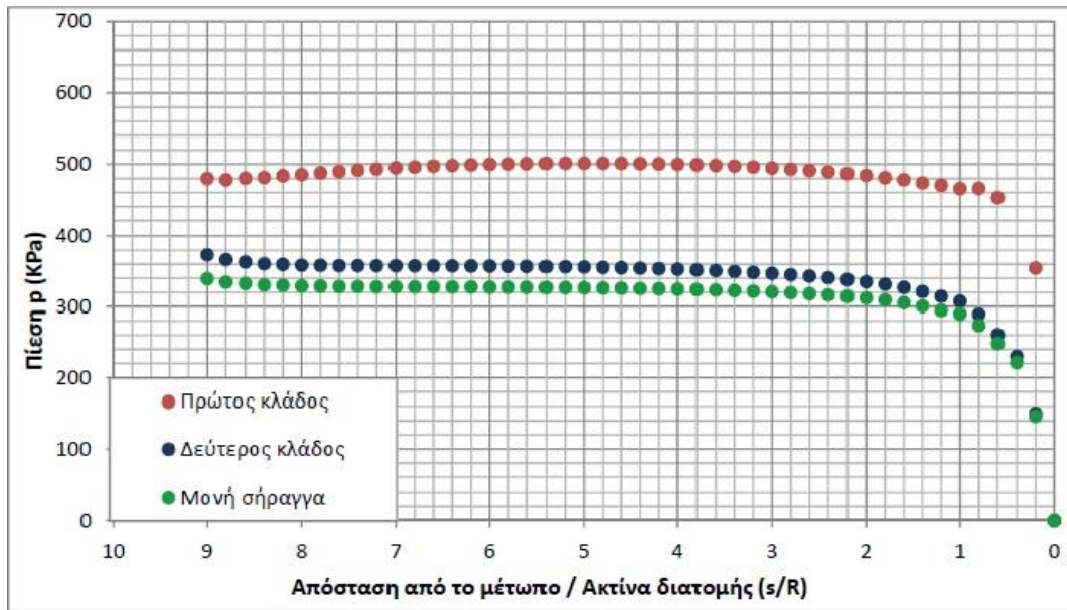
Σχήμα 2.30: Εγκάρσια όψη του αριθμητικού προσομοιώματος, για $W=D=10m$, όπου διακρίνονται οι περιοχές διαφορετικής πυκνότητας των πεπερασμένων στοιχείων (Λογισμικό ANSYS). (Μπεκρή Ε., 2009)

Πίνακας 2.1: Γεωτεχνικές παράμετροι αριθμητικών αναλύσεων. (Μπεκρή Ε., 2009)

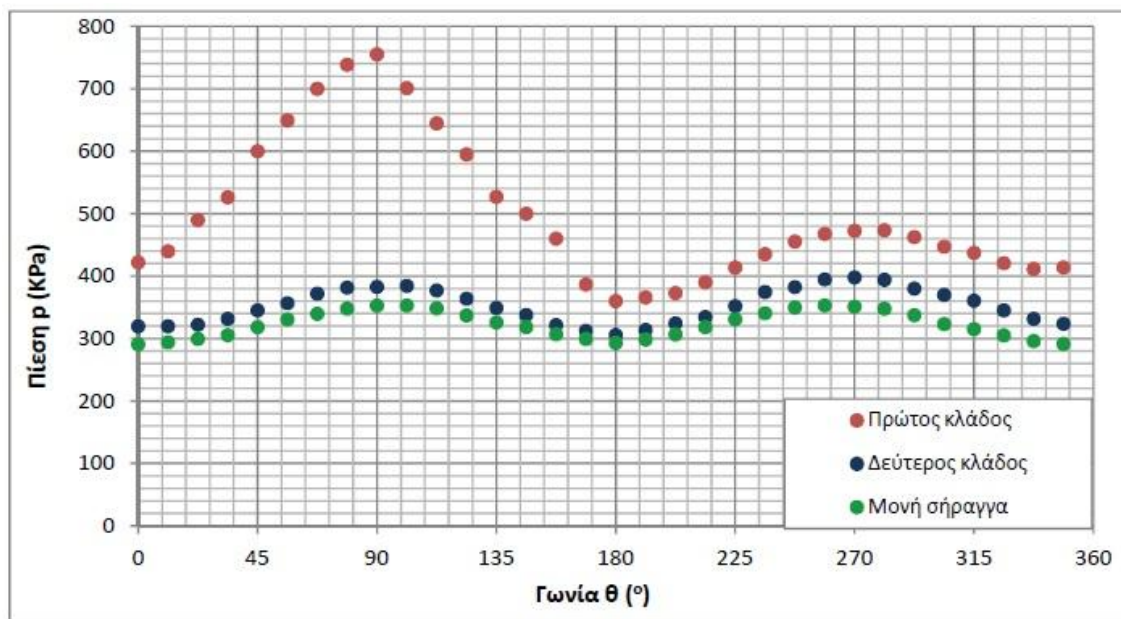
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΑΔΕΣ
Υψος υπερκείμενων γαιών (Μετράται από το κέντρο της διατομής)	H	40	m
Πλάτος πυλώνα (Μετράται από παρειά σε παρειά)	W	5, 10, 20	m
Διάμετρος διατομής	D	10	m
Συντελεστής οριζόντιων τάσεων	K_0	0.7	-
Ειδικό βάρος γεωυλικού	γ	0.025	MN/m ³
Γεωλογικός δείκτης αντοχής	GSI	10-40	-
Αντοχή άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη	σ_c	8-20	MPa
Σταθερά γεωυλικού	m_i	6	-
Συντελεστής διατάραξης	D	0	-
Σταθερά MR	MR	350	-
Αντοχή βραχομάζας	σ_{cm}	0.31-2.17	MPa
Κριτήριο αστοχίας	Mohr-Coulomb		
Ισοδύναμη συνοχή	c	0.039-0.170	MPa
Ισοδύναμη γωνία τριβής	ϕ	23-42	(^ο)
Διαστολικότητα	δ	$\phi/6$	(^ο)
Μέθοδος υπολογισμού μέτρου ελαστικότητας	Hoek et al. (2002) Hoek & Diederichs (2006)		
Λόγος Poisson βραχομάζας	ν	0.3	-

Ως άμεση υποστήριξη θεωρήθηκε ότι τοποθετήθηκε κέλυφος από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ενώ οι βραχομάζες που μελετήθηκαν ήταν σχετικά πτωχής έως καλής ποιότητας. Πραγματοποιήθηκαν μία σειρά τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων, όπου μελετήθηκε η επίδραση κάθε παραμέτρου κρατώντας κάθε φορά τις υπόλοιπες σταθερές.

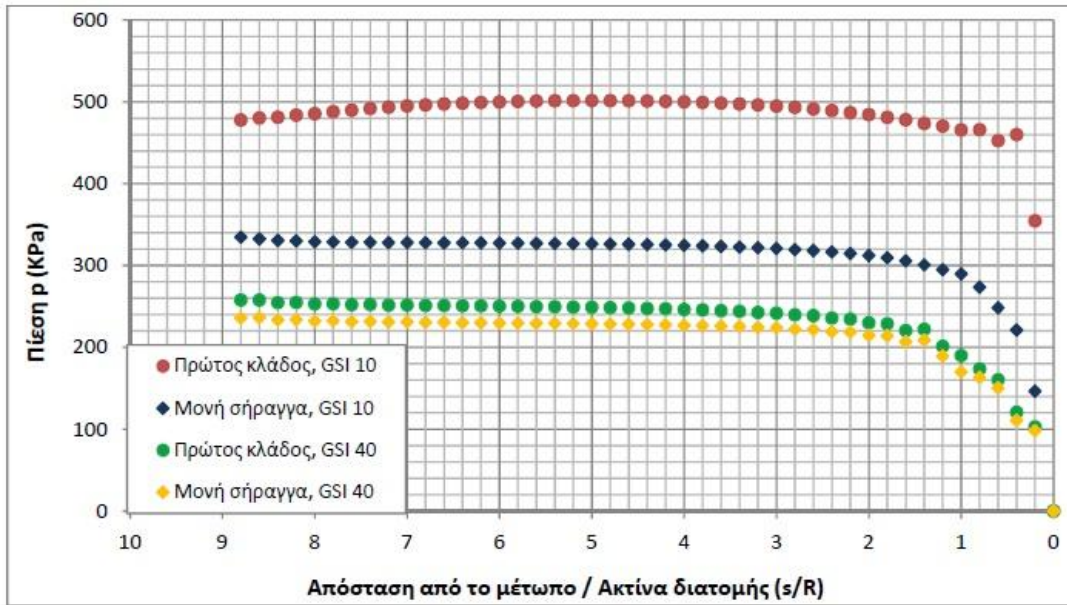
Κάποια βασικά διαγράμματα που εξήχθησαν και επικεντρώνονται στα βασικότερα σημεία της μελέτης παρουσιάζονται παρακάτω.



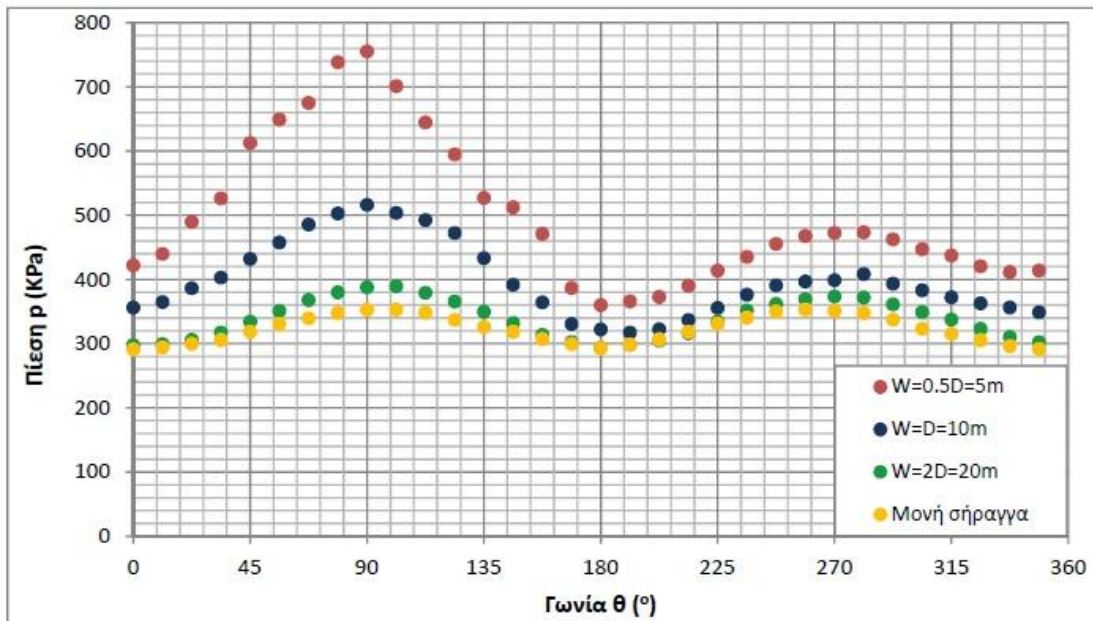
Σχήμα 2.31: Σύγκριση, κατά το μήκος διάνοιξης, των πιέσεων που αναπτύσσονται επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου της δίδυμης σήραγγας ($W=0.5D=5m$), του δεύτερου κλάδου αυτής, καθώς και της σήραγγας μονού κλάδου. (Μπεκρή Ε., 2009)



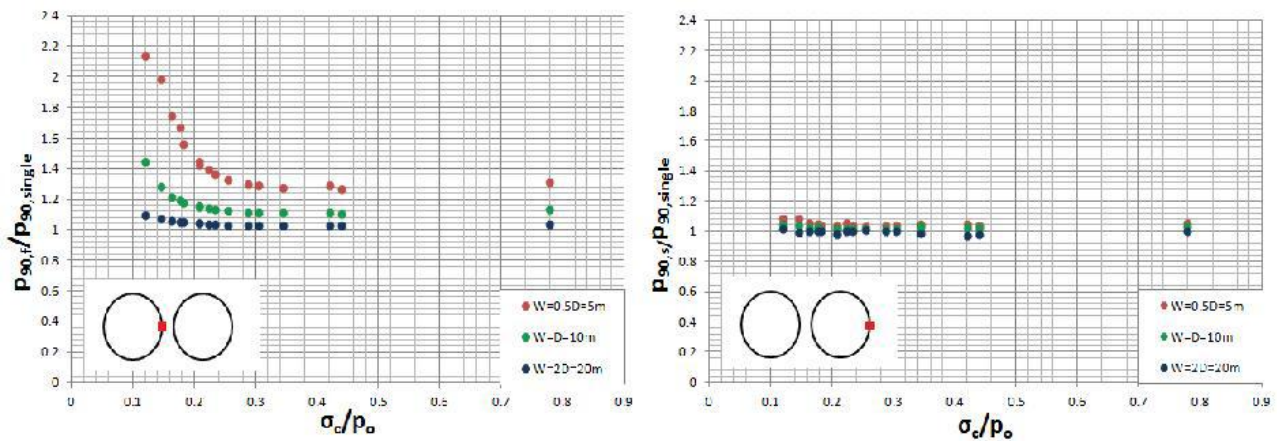
Σχήμα 2.32: Σύγκριση, περί τη χαρακτηριστική διατομή, των πιέσεων που αναπτύσσονται επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου της δίδυμης σήραγγας ($W=0.5D=5m$), του δεύτερου κλάδου αυτής, καθώς και της σήραγγας μονού κλάδου. (Μπεκρή Ε., 2009)



Σχήμα 2.33: 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 βραχομάζας ($GSI=10$ και $GSI=40$). (Μπεκρή Ε., 2009)



Σχήμα 2.34: Κατανομή των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, περί τη χαρακτηριστική διατομή, για τα τρία διαφορετικά προσομοιώματα ($W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$). (Μπεκρή Ε., 2009)



Σχήμα 2.35: Κατανομή ανηγμένης πίεσης της δεξιάς παρειάς ($\theta=90^\circ$) της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου $p_{90,(f/s)}p_{90,single}$, ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/ρ_0 , για $W=0.5D=5m$, $W=D=10m$, $W=2D=20m$. (Μπεκρή Ε., 2009)

Τελικώς η συγγραφέας καταλήγει σε μία σειρά από συμπεράσματα και προτάσεις που συνοψίζουν τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων.

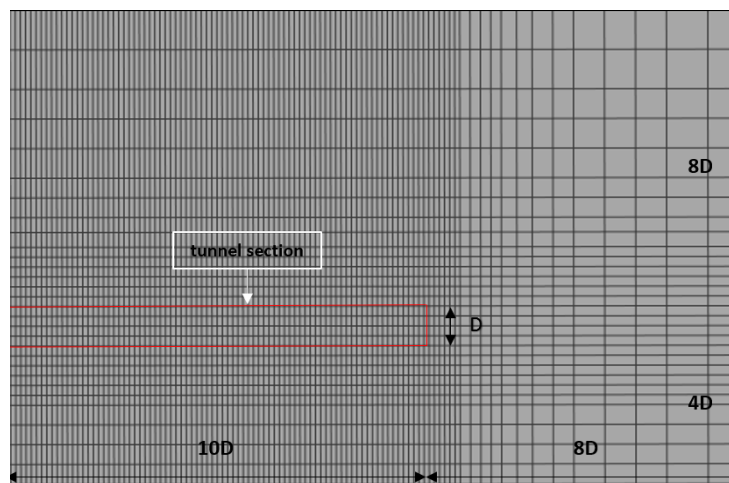
- i. Το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου της εκσκαφής καταπονείται εντονότερα σε σχέση με το κέλυφος του δεύτερου κλάδου.
- ii. Εξετάζοντας τη χρονοϊστορία των κόμβων μιας τυχαίας διατομής του πρώτου κλάδου, η δυσμενέστερη κατάσταση σημειώνεται όταν ο δεύτερος προσεγγίζει τη διατομή. Από τη στιγμή που ο δεύτερος κλάδος βρίσκεται 10m πριν την εξεταζόμενη διατομή μέχρι τη στιγμή που διέρχεται δίπλα από αυτή, σημειώνεται σημαντική αύξηση των πιέσεων στην άμεση υποστήριξη του πρώτου κλάδου. Καθώς το μέτωπο προσεγγίζει τη διατομή, προκαλείται χαλάρωση της περιβάλλουσας βραχομάζας και τα εδαφικά στοιχεία τείνουν να εκδηλώσουν μετακινήσεις. Η δύσκαμπτη άμεση υποστήριξη που έχει ήδη τοποθετηθεί στον πρώτο κλάδο, δεν επιτρέπει την ανάπτυξη των μετακινήσεων και τη σύγκλιση της διατομής και η επίδραση της διάνοιξης του δεύτερου κλάδου στον πρώτο εκδηλώνεται με αύξηση των πιέσεων που ασκούνται στο κέλυφος του εκτοξευμένου σκυροδέματος.
- iii. Όσον αφορά το μέγεθος των μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τις σήραγγες, παρατηρείται ότι οι μετακινήσεις των εδαφικών στοιχείων του πρώτου κλάδου διάνοιξης είναι αμελητέες, σε αντίθεση με τις αντίστοιχες του δεύτερου κλάδου μιας και η δύσκαμπτη υποστήριξη του πρώτου κλάδου εμποδίζει την ανάπτυξη των μετακινήσεων που προκαλεί η εκσκαφή του δεύτερου. Συνεπώς οι μετακινήσεις που καταγράφονται στην περίμετρο της εκσκαφής του πρώτου κλάδου αποκλειστικά από τη διάνοιξη αυτού. Αντίθετα, οι μετακινήσεις του δεύτερου κλάδου αποτελούν άθροισμα των μετακινήσεων που σημειώνονται κατά τη διάνοιξη του πρώτου και των μετακινήσεων που σημειώνονται κατά τη διάνοιξη του δεύτερου κλάδου. Επίσης εξετάζοντας τη χρονοϊστορία των κόμβων μιας τυχαίας διατομής του δεύτερου κλάδου, διαπιστώνεται ότι η δυσμενέστερη κατάσταση σημειώνεται από τη στιγμή που το μέτωπο βρίσκεται πίσω από τη διατομή σε απόσταση ίση με μία διάμετρο σήραγγας έως τη στιγμή που διέρχεται από την εκσκαφή.
- iv. Εξετάζοντας την επίδραση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών, στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, για το δυσμενέστερο πλάτος πυλώνα ($W=0,5D$), και για το μέγεθος των

πιέσεων, η καμπύλη που αντιστοιχεί στον πρώτο κλάδο παρουσιάζει εκθετική μορφή, με μειούμενο ρυθμό μείωσης. Βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών συνεπάγεται μείωση του βαθμού αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων. Για το εύρος των γεωτεχνικών παραμέτρων που εξετάστηκαν, οι δυσμενέστερες συνθήκες αντιστοιχούν σε λόγο μέσων πιέσεων ίσο με 1.6 (σημαντική αλληλεπίδραση των δυο κλάδων), ενώ όσο οι γεωτεχνικές συνθήκες βελτιώνονται ($\sigma_c/\rho_o = 0.4$) ο λόγος τείνει στη μονάδα (μηδενική αλληλεπίδραση των δυο κλάδων). Η καμπύλη που αντιστοιχεί στο δεύτερο κλάδο, προσεγγίζει την ευθεία γραμμή ($\rho_{average,s}/\rho_{average,single}=1$), γεγονός που αποδεικνύει ότι η φόρτιση του δεύτερου κλάδου είναι ανεξάρτητη από την μεταβολή των γεωτεχνικών συνθηκών. Για το μέγεθος των μετακινήσεων, τα σημεία που αντιστοιχούν στον πρώτο κλάδο τείνουν να παραλληλιστούν με την ευθεία $u_{average,f}/u_{average,single}=1$, καθώς οι αναπτυσσόμενες μετακινήσεις είναι απαλλαγμένες από τις γεωτεχνικές συνθήκες. Αντίθετα, οι μετακινήσεις των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τον δεύτερο κλάδο εκσκαφής αυξάνονται καθώς αυξάνεται η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων (μείωση γεωτεχνικών συνθηκών).

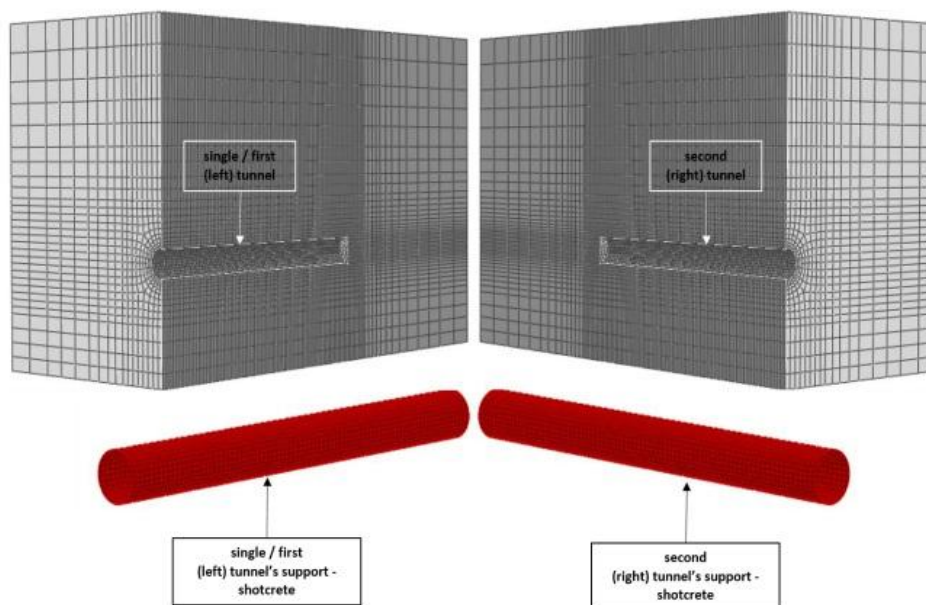
- v. Όσον αφορά την επίδραση του πλάτους πυλώνα στην αλληλεπίδραση των δύο κλάδων, αναφορικά με το μέγεθος των πιέσεων, παρατηρείται ότι για μικρή εγκάρσια απόσταση ($W=0.5D=5m$) η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων είναι έντονη, με το λόγο των μέσων πιέσεων για τον πρώτο κλάδο κυμαίνεται από 1.6, για δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες, έως 1.1, για ισχυρότερη βραχομάζα. Αύξηση του πλάτους του πυλώνα ($W=D=10m$) προκαλεί μετατόπιση της καμπύλης σε χαμηλότερες τιμές, γεγονός που αποδεικνύει τη μείωση του βαθμού αλληλεπίδρασης. Για περεταίρω αύξηση της εγκάρσιας απόστασης ($W=2D=20m$) οι δυο σήραγγες πρακτικά λαμβάνονται ως δυο ανεξάρτητες κατασκευές, καθώς οι τιμές των λόγων τείνουν στη μονάδα, ανεξάρτητα από την ποιότητα της βραχομάζας. Οι αναπτυσσόμενες πιέσεις επί του κελύφους του δεύτερου κλάδου διατηρούνται σταθερές και ανεξάρτητες του πλάτους του πυλώνα. Και από τη σκοπιά των μετακινήσεων, για πλάτος πυλώνα ίσο με $W=2D=5m$, ο βαθμός αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων είναι σχεδόν μηδενικός.

2.1.10. Νύχτη Φ., 2016

Στη συγκεκριμένη εργασία η Νύχτη Φ. ασχολείται με την διερεύνηση και ποσοτικοποίηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μεταξύ γειτονικών βαθιών σηράγγων. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη σχετική απόσταση μεταξύ των δύο μετώπων εκσκαφής, στην δυσκαμψία των μέτρων προσωρινής υποστήριξης καθώς και στο πλάτος του πυλώνα μεταξύ των δύο κλάδων. Πραγματοποιήθηκαν για αυτό το σκοπό τρισδιάστατες παραμετρικές αναλύσεις με τη βοήθεια του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, με την ποσοτικοποίηση του φαινομένου να γίνεται σε όρους φορτίου και εντατικών μεγεθών (αξονικές δυνάμεις και καμπτικές ροπές) επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είχε την παρακάτω μορφή όπως στα σχήματα 2.35 και 2.36. Ελέγχθηκαν 3 περιπτώσεις σχετικής απόστασης μεταξύ της διάνοιξης των δύο κλάδων.



Σχήμα 2.36: Μηκοτομική όψη και διαστάσεις του ίδιου προσομοιώματος (Νύχτη Φ., 2016)

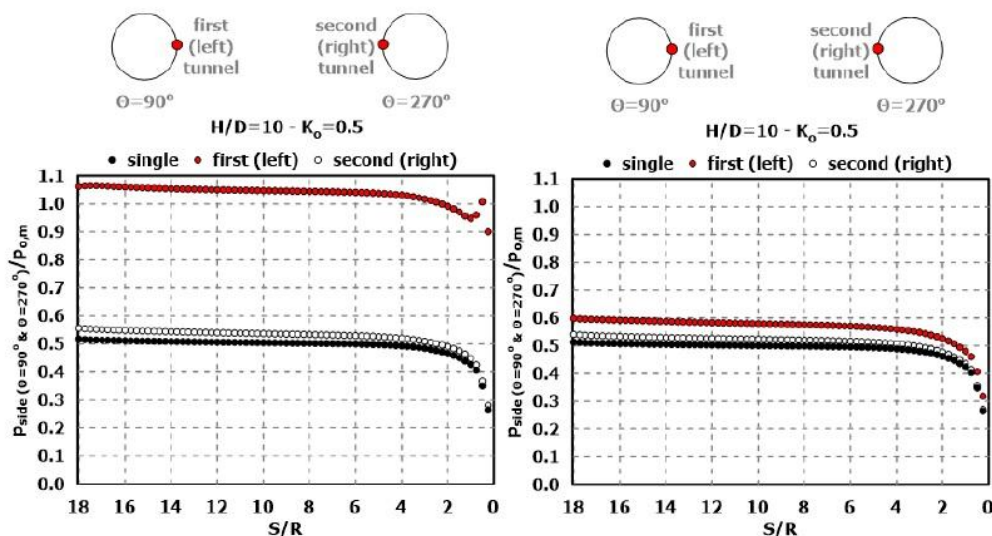


Σχήμα 2.37: Μορφή τρισδιάστατου προσομοιώματος που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις (Νύχτη Φ., 2016)

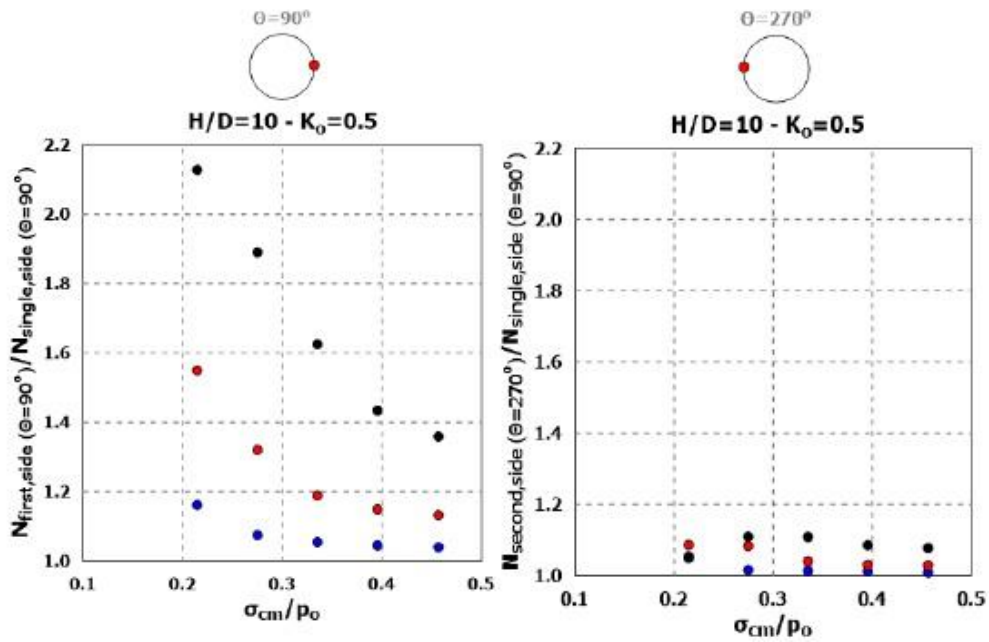
Πίνακας 2.2: Συνοπτική παρουσίαση όλων των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. (Νύχτη Φ., 2016)

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

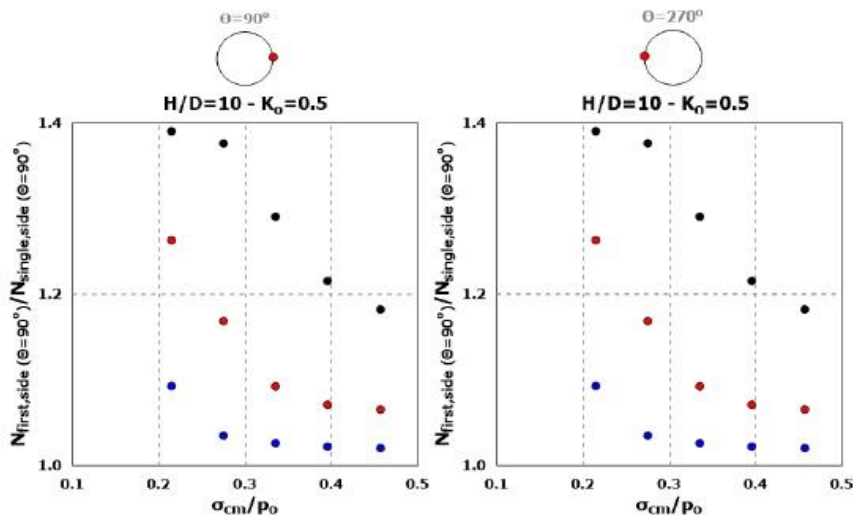
Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια από τα βασικά γραφήματα που εξήχθησαν από τη συγγραφέα



Σχήμα 2.38: Μηκοτομική απεικόνιση των φορτίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις εσωτερικές παρειές των σήραγγων, για τις τρεις περιπτώσεις, single, first και second, για πλάτη πυλώνα, αριστερά W/D=0.5 και δεξιά W/D=2. Τα φορτία είναι κανονικοποιημένα ως προς την μέση γεωστατική τάση. (Νύχτη Φ., 2016)



Σχήμα 2.39: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των αξονικών δυνάμεων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχομάζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second". (Διάνοιξη της Δεξιάς Σήραγγας όταν η Αριστερή έχει Ολοκληρωθεί) (Νύχτη Φ., 2016)



Σχήμα 2.40: Συγκεντρωτικό διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο των αξονικών δυνάμεων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων σε σχέση με την κανονικοποιημένη αντοχή της βραχομάζας (κανονικοποιημένη ως προς την γεωστατική τάση), για όλα τα πλάτη πυλώνων και γεωτεχνικές συνθήκες. Αριστερά είναι για τη "first" και δεξιά για τη "second". (Ταυτόχρονη Διάνοιξη των Δύο Σηράγγων) (Νύχτη Φ., 2016)

Μετά την εκτέλεση όλων των απαραίτητων παραμετρικών αναλύσεων, που διερευνούν την επίδραση παραγόντων όπως η σχετική απόσταση μεταξύ των μετώπων, η δυσκαμψία των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, οι γεωτεχνικές παράμετροι και το πλάτος πυλώνων, στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης γειτονικών σηράγγων, η Νύχτη Φ. καταλήγει στα εξής συμπεράσματα:

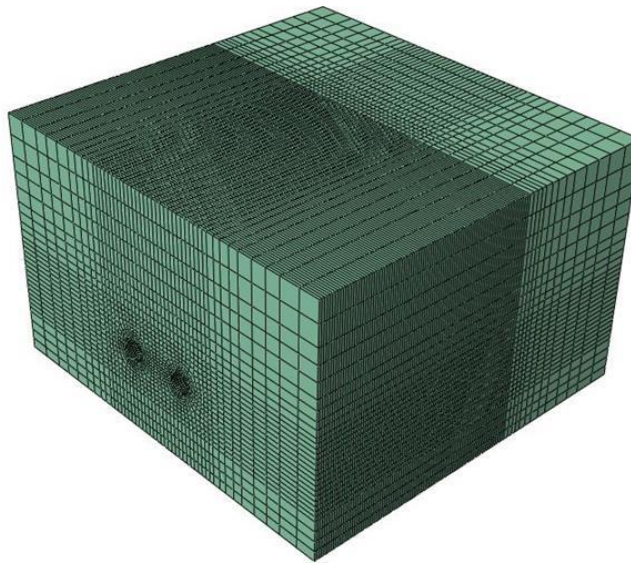
- i. Η εκσκαφή δεύτερης σήραγγας κοντά σε ήδη προϋπάρχουσα προκαλεί αύξηση του φορτίου που καλείται να παραλάβει τόσο η πρώτη σήραγγα, όσο και η δεύτερη (σε μικρότερο βαθμό) σε σχέση με την αρχική-ανεξάρτητη σήραγγα.
- ii. Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μπορεί να θεωρηθεί ότι περιορίζεται σε χαμηλό και αποδεκτό επίπεδο για τιμές του πλάτους πυλώνων μεγαλύτερες ή ίσες με 2D. Επίσης αυτό ελαχιστοποιείται όσο βελτιώνεται το επίπεδο της ποιότητας της περιβάλλουσας

- βραχομάζας με αποτέλεσμα μικρότερες αναλαμβανόμενες τάσεις από την άμεση υποστήριξη.
- iii. Για μεγάλη απόσταση μεταξύ των δύο εκσκαπτόμενων μετώπων, την μεγαλύτερη επιρροή την δέχεται η πρώτη σήραγγα και κυρίως η εσωτερική παρειά της, επειδή η πρώτη σήραγγα καλείται να παραλάβει το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου που προκαλείται από την εκ νέου χαλάρωση της βραχομάζας λόγω τη διάνοιξης της δεύτερης.
 - iv. Η ταυτόχρονη διάνοιξη των δύο σηράγγων αποδεικνύεται ως η ευμενέστερη σε όρους περιορισμού της αλληλεπίδρασης ως προς τη φόρτιση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης των σηράγγων, καθώς το φαινόμενο ισομοιράζεται και στις δύο σήραγγες και παρατηρείται μείωση του φορτίου και των εντατικών μεγεθών στην πρώτη σήραγγα αλλά αύξηση τους στη δεύτερη σήραγγα. Η μοναδική παράμετρος η οποία ενδέχεται να ανατρέπει τη συγκεκριμένη θεώρηση είναι η δυνητική εκτεταμένη αλληλεπίδραση των μετώπων εκσκαφής σε ταυτόχρονη διάνοιξη που ίσως προκαλεί αστάθεια/αστοχία τους. Αν δεν κλονίζεται η ευστάθεια των μετώπων εκσκαφής και δεν εκδηλώνονται ανεξέλεγκτες μετακινήσεις στα μέτωπα εκσκαφής, η ταυτόχρονη διάνοιξη καταδεικνύεται ευμενέστερη.
 - v. Η εφαρμογή ακόμη πιο δύσκαμπτων μέτρων άμεσης υποστήριξης (μεγαλύτερο πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος), προκαλεί μικρή αύξηση στα φορτία και στις αξονικές δυνάμεις και πολύ σημαντική αύξηση στις καμπτικές ροπές που αναπτύσσονται. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή πιο ενδόσιμων μέτρων προσωρινής υποστήριξης δρα ευεργετικά ως προς τον περιορισμό των εντατικών μεγεθών στην άμεση υποστήριξη και ενδείκνυται εφόσον δεν υπάρχουν συγκεκριμένοι περιορισμοί ως προς το μέγεθος των ακτινικών μετατοπίσεων που εκδηλώνονται.

2.1.11. Ψυχάρη Ε., 2016

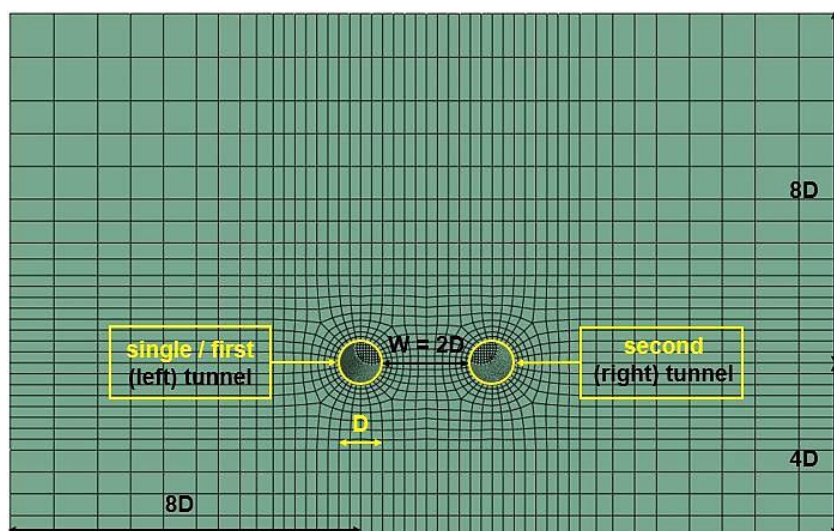
Η Ψυχάρη Ε. στη μεταπτυχιακή διπλωματική της εργασία καταπιάνεται με το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων, ελέγχοντας μία σειρά παραμέτρων όπως ένα εύρος γεωτεχνικών συνθηκών, πλατών πυλώνα, συντελεστών οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και συντελεστών αποτόνωσης.

Πραγματοποιήθηκαν τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS μελετώντας εν ολίγοις την επίδραση που έχει η διάνοιξη μιας νέας σήραγγας στην υφιστάμενη υποστήριξη μιας γειτονικής προϋπάρχουσας σήραγγας, σε όρους φορτίων και εντατικών μεγεθών. Η προοπτική του προσομοιώματος που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.41.



Σχήμα 2.41: Προοπτική όψη του τριδιάστατου προσομοιώματος (Ψυχάρη Ε., 2016)

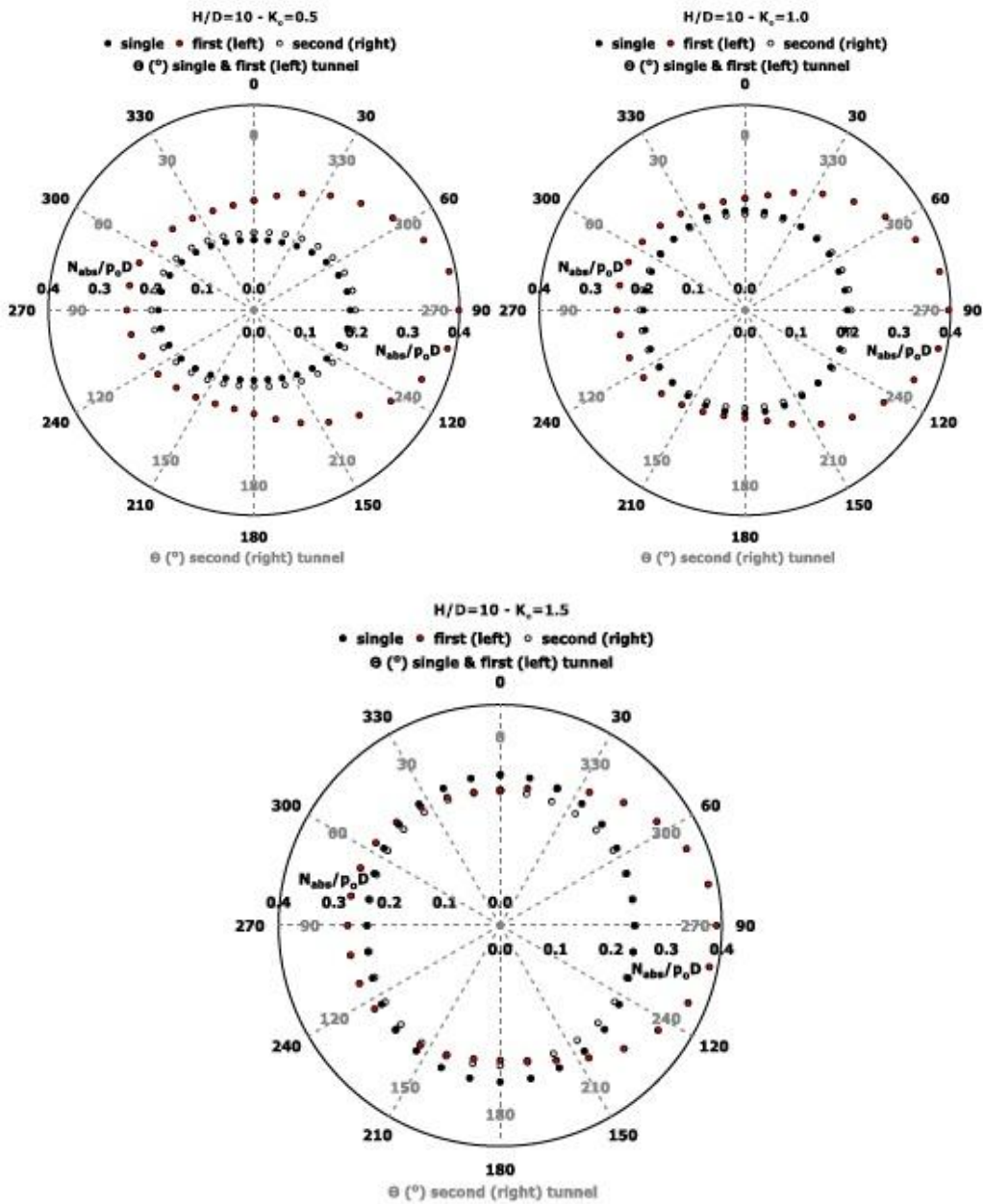
Τα βασικά διαγράμματα που παρουσιάζονται πάνω στα οποία στηρίζει τα συμπεράσματά της φαίνονται παρακάτω.



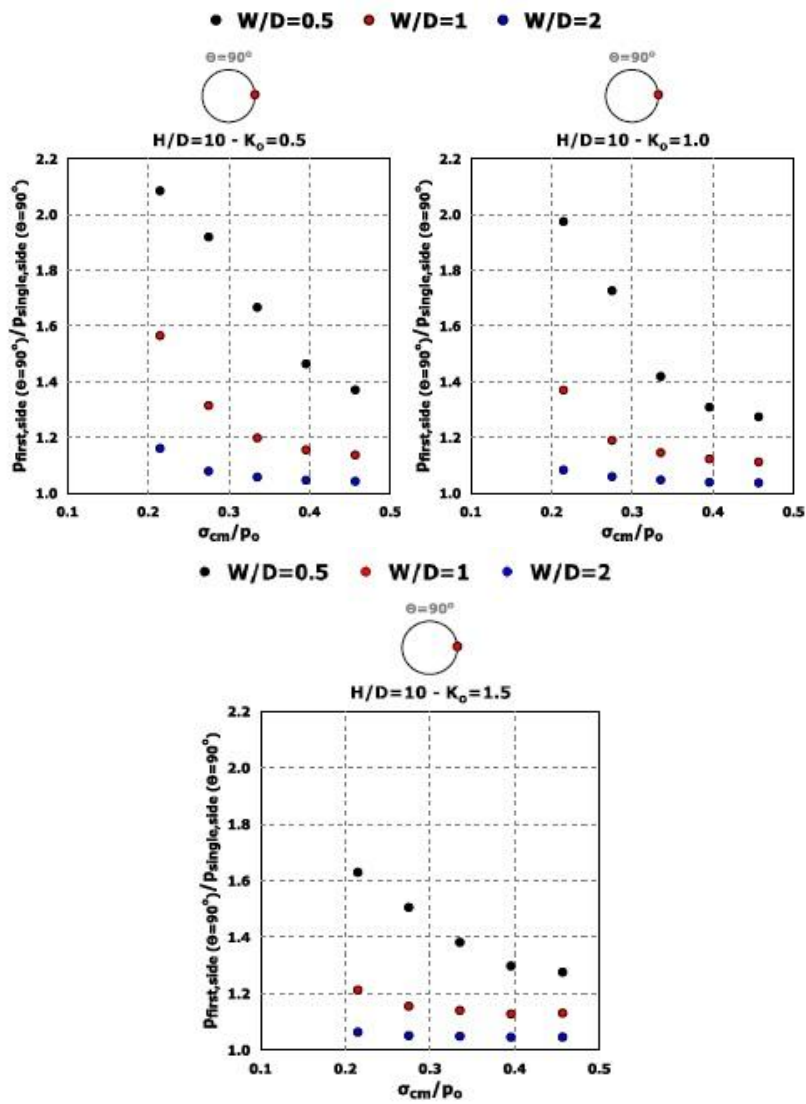
Σχήμα 2.42: Εγκάρσια όψη του προσομοιώματος με πλάτος πυλώνα $W = 2D$ (επίπεδο Z - X). (Ψυχάρη Ε., 2016)

Πίνακας 2.3: Συγκεντρωτικός πίνακας γεωμετρικών, γεωτεχνικών και παραμέτρων άμεσης υποστήριξης. (Ψυχάρη Ε., 2016)

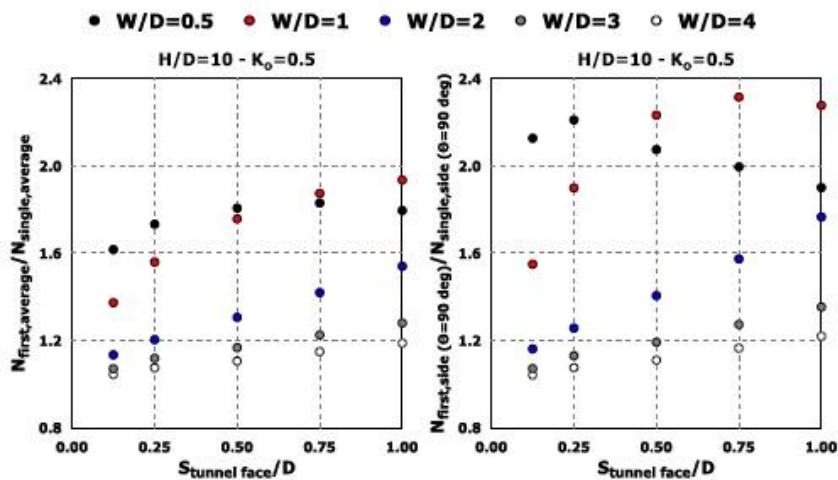
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΙΜΕΣ	ΜΟΝΑΔΕΣ
ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	Διάμετρος Σήραγγας	D	8	m
	Ύψος Υπερκειμένων Γαιών	H/D	10	
	Μήκος Εκσκαφής	L/D	10	
	Πλάτος Πυλώνα	W/D	0.5, 1, 2, 3, 4	
	Απόσταση Εφαρμογής Άμεσης Υποστήριξης από το Μέτωπο («Δεύτερη» Σήραγγα - Second Tunnel)	$S_{\text{tunnel face}}/D$	0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1	
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής	GSI	10 - 30	
	Συντελεστής Διατάραξης της Βραχώμαζας	D	0	
	Αντοχή Άρρηκτου Βράχου σε Ανεμπόδιση Θλίψη	σ_{ci}	10	MPa
	Συντελεστής Αναλογίας	MR	350	
	Μέτρο Ελαστικότητας Άρρηκτου Βράχου	$E_i = MR \cdot \sigma_{ci}$	3500	MPa
	Σταθερά γεωυλικού	m_i	7	
	Αντοχή Βραχώμαζας σε Ανεμπόδιση Θλίψη	σ_{cm}	0.43 - 0.91	MPa
	Μέτρο Παραμορφωσιμότητας Βραχώμαζας	E_m	106.8 - 284.8	MPa
	Λόγος Poisson	ν	0.3	
	Ειδικό Βάρος	γ	0.025	MN/m ³
	Συνοχή	c	0.08 - 0.16	MPa
	Γωνία Τριβής	ϕ	21.1 - 29.4	(^ο)
	Γωνία Διαστολικότητας	$\psi = \phi/4$	5.3 - 7.3	(^ο)
	Συντελεστής Οριζόντιων Γεωστατικών Τάσεων	K_o	0.5, 1, 1.5	
	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ	Μέτρο Ελαστικότητας	E_{sh}	20
Λόγος Poisson		ν_{sh}	0.2	
Πάχος		d_{sh}	0.2	m
Ειδικό Βάρος		γ_{sh}	0.025	MN/m ³



Σχήμα 2.43: Κατανομή της ανηγμένης αξονικής δύναμης $N_{abs}/p_0 D$ συναρτήσει της γωνίας θ (°) στην τυπική διατομή των σηράγγων, για αντιπροσωπευτική ανάλυση με πλάτος πυλώνα $W = 0.5D = 4m$, συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$ (αριστερά), $K_0 = 1.0$ (δεξιά) και $K_0=1,5$ (κάτω κεντρικά) και για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_{cm}/p_0 = 0.21$). (Ψυχάρη Ε., 2016)



Σχήμα 2.44: Λόγος φορτίων στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας $\rho_{first,side}(\theta = 90^\circ)/\rho_{single,side}(\theta = 90^\circ)$ ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$ (αριστερά), $K_o = 1.0$ (δεξιά) και $K_o=1,5$ (κάτω).(Ψυχάρη Ε., 2016)



Σχήμα 2.45: Λόγος μέσων αξονικών δυνάμεων ($N_{first,avg}/N_{single,avg}$) (αριστερά) και αξονικών δυνάμεων στην εσωτερική παρειά ($N_{first,side}(\theta = 90\ deg)/N_{single,side}(\theta = 90\ deg)$) (δεξιά) της «πρώτης» προς της «μονής» σήραγγας συναρτήσει 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), ύψος υπερκειμένων γαιών $H/D = 10$ και συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_o = 0.5$.(Ψυχάρη Ε., 2016)

Τα συμπεράσματα που κατέληξε η συγγραφέας της εργασίας, και αναφέρονται σε κάθε παράμετρο ξεχωριστά, παρουσιάζονται παρακάτω:

➤ **Επίδραση πλάτους πυλώνα (W/D)**

- i. Ανεξαρτήτως του πλάτους του πυλώνα, η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας καταπονείται περισσότερο σε όρους φορτίων συγκριτικά με τη «δεύτερη» σήραγγα, ενώ η «δεύτερη» σήραγγα με τη σειρά της δέχεται λίγο μεγαλύτερα φορτία σε σχέση με τη μεμονωμένη-«μονή» σήραγγα.
- ii. Η αύξηση του πλάτους του πυλώνα συνεπάγεται με μείωση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη των σηράγγων, ενώ το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης ξεκινά να εξαλείφεται για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο από 2D.
- iii. Ανεξαρτήτως του πλάτους του πυλώνα περισσότερο καταπονούνται οι εσωτερικές παρειές των σηράγγων, όπου το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεγιστοποιείται, και ιδιαίτερα αυτή της πρώτης σήραγγας κατά την διάνοιξη της δεύτερης.
- iv. Οι αξονικές δυνάμεις στην επένδυση ακολουθούν τη μορφή που παρουσιάζουν οι τάσεις λόγω του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, ενώ οι ροπές κάμψης παρουσιάζουν αύξηση στο απόλυτο μέγεθος για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$ ενώ για $W/D=2$ η επίδραση καθίσταται αμελητέα. Όμοια με τις αξονικές, έτσι και η ροπές παρουσιάζουν αύξηση στην εσωτερική παρειά της «πρώτης» σήραγγας

➤ **Επίδραση συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (K_0)**

- i. Παρατηρείται στην περίπτωση όπου ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων είναι $K_0 \neq 1$, τα μέγιστα φορτία της «μονής» σήραγγας εντοπίζονται στις περιοχές όπου λαμβάνουν χώρα οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις σε συνδυασμό με τις ελάχιστες μετατοπίσεις. Στην περίπτωση όπου οι γεωστατικές τάσεις είναι ισομεγέθεις ($K_0=1.0$) παρατηρείται ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων στην άμεση υποστήριξη της «μονής» σήραγγας.
- ii. Μετά την επίδραση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, δηλαδή μετά την εκσκαφή της «δεύτερης» σήραγγας, παρατηρείται στην «πρώτη», αύξηση των φορτίων που δέχεται αυτή για οποιαδήποτε τιμή K_0 . Οι μέγιστες τιμές των φορτίων εντοπίζονται στην περιοχή του πυλώνα με έμφαση την εσωτερική παρειά η οποία, ανεξαρτήτως συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων, παραλαμβάνει τελικά το ίδιο κατά μέγεθος φορτίο p/p_0 . Η αύξηση αυτή ακολουθεί μειωτική τάση με τη βελτίωση της ποιότητας του γεωυλικού και την αύξηση των πλατών του πυλώνα. Όσον αφορά την εξωτερική παρειά της «πρώτης» σήραγγας, τη στέψη και τον πυθμένα αυτής, για $K_0=0.5$ και $K_0=1.0$, τα φορτία της αυξάνονται σε κάθε περιοχή. Για $K_0=1.5$ στην «πρώτη» σήραγγα παρατηρείται μείωση των φορτίων στη στέψη και τον πυθμένα και επομένως η διάνοιξη της «δεύτερης» δρα με ευεργετικό/ανακουφιστικό τρόπο στις περιοχές αυτές της υφιστάμενης σήραγγας. Βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών συνεπάγεται μείωση του εύρους της ανακούφισης.

- iii. Όσον αφορά τις αναπτυσσόμενες ροπές κάμψης στην «πρώτη» σήραγγα, η άμεση υποστήριξη δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση λόγω κάμψης στην εσωτερική παρειά, ανεξαρτήτως K_0 , το οποίο οφείλεται στη μεταφορά φορτίου από τη δεξιά σήραγγα στην αριστερή. Αποτελεί όμως ένα ευαίσθητο μέγεθος συγκριτικά με τα υπόλοιπα, αφού οι ροπές κάμψης δεν ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη τάση.

➤ **Επίδραση συντελεστή αποτόνωσης**

- i. Ο συντελεστής αποτόνωσης εισήχθηκε στο πρόβλημα της αλληλεπίδρασης μέσω της μεταβολής των μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο της «δεύτερης» σήραγγας, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $K_0 = 0.5$. Παρατηρήθηκε για τη «δεύτερη» σήραγγα γενικά μείωση των φορτίων με την αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης (δηλαδή αύξηση της απόστασης εφαρμογής της άμεσης υποστήριξης). Στην «πρώτη» σήραγγα παρατηρείται αύξηση των φορτίων καθώς η εκσκαφή της «δεύτερης» σήραγγας διαταράσσει σε μεγαλύτερο εύρος και βαθμό την περιβάλλουσα βραχομάζα και σε συνδυασμό με τη μεγαλύτερη αποτόνωση που συντελείται λόγω της διάνοιξής της, το άκαμπτο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας εμποδίζει αυτή τη μετακίνηση. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση $S_{\text{tunnelface}}/D$ τόσο μεγαλύτερη περιοχή υποβάλλεται σε νέες ανακατανομές τάσεων και σε παραμορφώσεις με αποτέλεσμα η επιφόρτιση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της υφιστάμενης σήραγγας να καθίσταται εντονότερη.
- ii. Επίσης τονίζεται ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής αποτόνωσης, τόσο περισσότερο εντείνεται το φαινόμενο του θόλου, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερων μετακινήσεων γύρω από τη «δεύτερη» σήραγγα και ταυτόχρονη μεγαλύτερη αύξηση των φορτίων στην άμεση, δύσκαμπτη, υποστήριξη της «πρώτης»
- iii. Αύξηση της εγκάρσιας απόστασης μεταξύ των παρειών των σήραγγων έχει ως αποτέλεσμα την άμβλυνση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, καθώς η άμεση υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας παραλαμβάνει ολοένα και μικρότερα φορτία.

2.2. Μηχανική των σηράγγων

2.2.1. Διαγράμματα αλληλεπίδρασης Carranza-Torres & Diederichs (2009)

Οι Carranza-Torres & Diederichs στην εργασία τους «Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets» προσπαθούν σε πρώτο στάδιο να προσδιορίσουν το ποσοστό του φορτίου που αναλαμβάνει μία διατομή σήραγγας με σύμμικτα μέτρα υποστήριξης, και συγκεκριμένα συνδυασμό εκτοξευόμενου σκυροδέματος και μεταλλικών δοκών, καθώς αυτά φορτίζονται από το περιβάλλον έδαφος. Επίσης προσπαθούν να προσδιορίσουν μία μεθοδολογία για το σχεδιασμό μίας σύμμικτης διατομής με βάση τις ασκούμενες δυνάμεις και ροπές, μέσω της κατασκευής των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης. Όσον αφορά το πρώτο σκέλος, αναφέρουν εν ολίγοις ότι η μέθοδος της προσέγγισης της αλληλεπίδρασης μεταξύ εδάφους και επένδυσης είναι η πιο κατάλληλη και δίνουν μία σειρά διαγραμμάτων και τύπων που το δικαιολογούν. Στη συνέχεια παρουσιάζουν τον τρόπο κατασκευής των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης όπως φαίνεται παρακάτω.

➤ Διαγράμματα αλληλεπίδρασης

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης αναπαριστούν μία καμπύλη αστοχίας που ορίζεται από τη συνδυαστική δράση των δυνάμεων μίας διατομής (π.χ. τέμνουσα-αξονική, ροπή κάμψης-αξονική) και παράγουν τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης τέμνουσας-αξονικής και ροπής-αξονικής. Τα διαγράμματα αυτά αποτελούν χρήσιμα εργαλεία για το σχεδιασμό της επένδυσης των σηράγγων. Στη συνέχεια, οι Carranza-Torres & Diederichs ασχολούνται με την κατασκευή αρχικά του διαγράμματος αλληλεπίδρασης ροπών κάμψης-αξονικών δυνάμεων και έπειτα του διαγράμματος τέμνουσών-αξονικών δυνάμεων. Αρχικά παρουσιάζουν την κατασκευή του πρώτου εκ των δύο, δίνοντας τον τύπο της μέγιστης και ελάχιστης ορθής τάσης που ασκείται σε μία διατομή λόγω αξονικής (N) και ροπής (M), ο οποίος είναι σύμφωνα με τους Den Harton (1961) and Timoshenko (1976):

$$\sigma_{\min}^{\max} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I} t/2 \quad (1)$$

όπου A είναι η επιφάνεια, I η ροπή αδρανείας και t/2 το μισό πάχος της επένδυσης.

Ο συντελεστής ασφάλειας για την διατομή, με αντοχή σε θλίψη σ_c και αντοχή σε εφελκυσμό σ_t , είναι:

$$FS = \frac{\sigma_c}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_t}{\sigma_{\min}} \quad (2)$$

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω εξισώσεις προκύπτει η σχέση μεταξύ της αξονικής N, της ροπής M και του συντελεστή ασφαλείας FS. Για σ_{\max} και σ_{\min} οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι οι εξής:

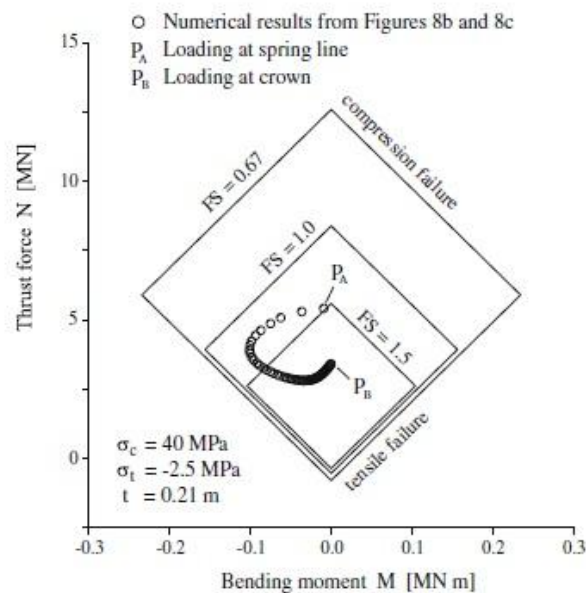
$$N = -\frac{|M|At}{2I} + \frac{\sigma_c A}{FS} \quad (3)$$

$$N = \frac{|M|At}{2I} + \frac{\sigma_t A}{FS} \quad (4)$$

Με εξίσωση των δεξιών μελών των δύο παραπάνω εξισώσεων, προκύπτει η κρίσιμη ροπή κάμψης M_{cr}

$$M_{cr} = \pm \frac{I}{t} \frac{\sigma_c - \sigma_t}{FS} \quad (5)$$

Η σχέση (5) συνδυαστικά με τη σχέση (3) δημιουργούν το διάγραμμα αλληλεπίδρασης, με τις ροπές να βρίσκονται στον άξονα x-x και τις θλιπτικές αξονικές δυνάμεις να είναι στον άξονα γ-γ όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα. Το πάνω όριο αναπαριστά την εξίσωση (3) για περίπτωση διατομής σε θλίψη ενώ το κάτω όριο αναπαριστά την περίπτωση αστοχίας σε εφελκυσμό. Το διάγραμμα έχει μορφωθεί για τις τιμές των σ_c , σ_t και t όπως φαίνονται στο γράφημα.



Γράφημα 2.1: Γραφική απεικόνιση του διαγράμματος αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων-ροπών κάμψης.

Ακολουθώντας την παραπάνω λογική οι συγγραφείς εξήγαγαν και το αντίστοιχο διάγραμμα τεμνουσών και αξονικών δυνάμεων. Συγκεκριμένα η μέγιστη τέμνουσα τάση και η μέγιστη αξονική είναι αντίστοιχα:

$$\tau_{\max} = \frac{3Q}{2A} \quad (6), \quad \sigma_{\max} = \frac{N}{A} \quad (7)$$

Ενώ οι κύριες τάσεις σ_1 , σ_3 και ο συντελεστής ασφάλειας είναι:

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_{\max}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\max}}{2}\right)^2 + \tau_{\max}^2} \quad (8), \quad FS = \frac{\sigma_c}{\sigma_1} = \frac{\sigma_t}{\sigma_3} \quad (9)$$

Συνδυάζοντας κατάλληλα τα παραπάνω, προκύπτει η αξονική δύναμη που αποτελεί το όριο του διαγράμματος, τόσο για θλίψη του στοιχείου όσο και για εφελκυσμό, όπως φαίνεται στις εξής εξισώσεις αντίστοιχα

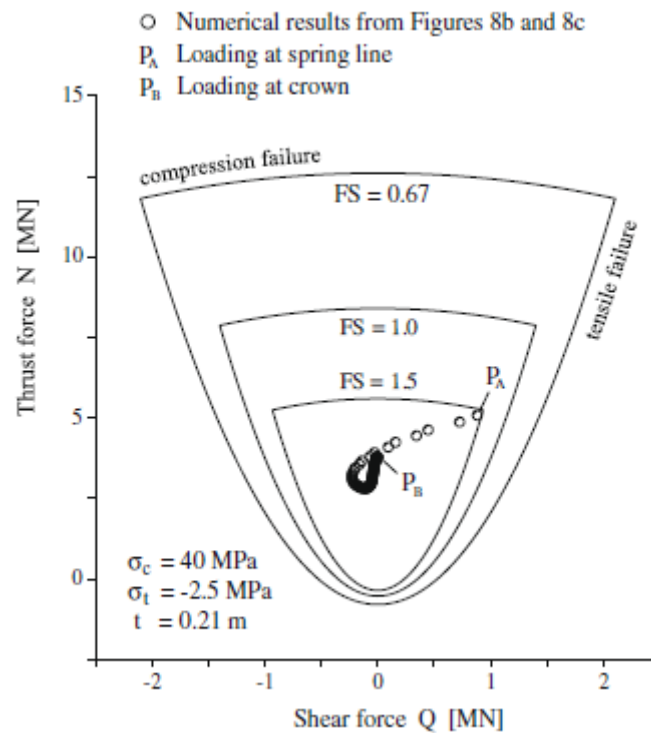
$$N = \frac{\sigma_c A}{FS} - \frac{9}{4} \frac{Q^2 FS}{\sigma_c A} \quad (10)$$

$$N = \frac{\sigma_t A}{FS} - \frac{9}{4} \frac{Q^2 FS}{\sigma_t A} \quad (11)$$

Ενώ η κρίσιμη τιμή για τις τέμνουσες δυνάμεις είναι:

$$Q_{cr} = \pm \frac{A}{FS} \sqrt{-\frac{4}{9} \sigma_c \sigma_t} \quad (12)$$

Το τελικό διάγραμμα αλληλεπίδρασης μεταξύ αξονικών δυνάμεων και τεμνουσών, φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα



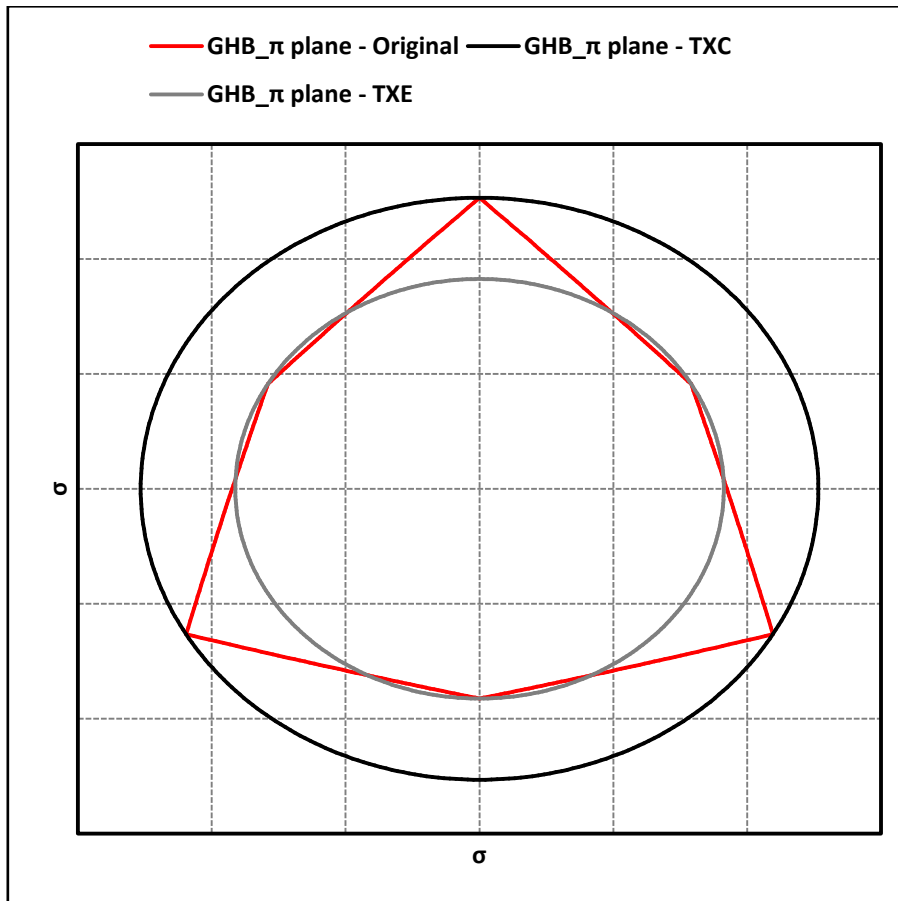
Γράφημα 2.2: Γραφική απεικόνιση του διαγράμματος αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων-τεμνουσών δυνάμεων.

Όμοια με προηγουμένως, το άνω όριο αφορά αστοχία του στοιχείου σε θλίψη, ενώ τα πλευρικά αφορούν αστοχία σε εφελκυσμό.

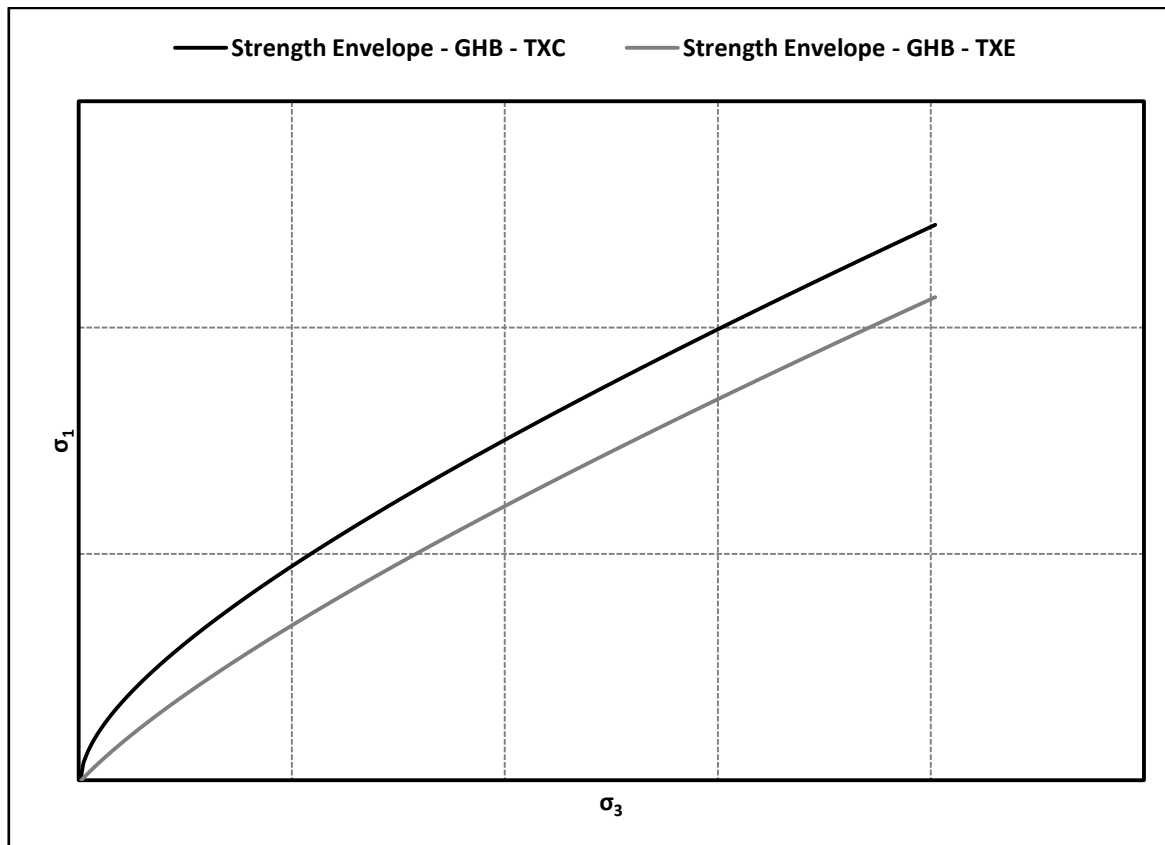
2.2.2. Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Generalized Hoek-Brown το οποίο εισήχθη στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus μέσω σχετικής υπορουτίνας και χρήση των γλωσσών προγραμματισμού Fortran και UMAT. Προκειμένου να εισαχθεί το εμπειρικό κριτήριο αστοχίας και να χρησιμοποιηθεί για αριθμητικούς υπολογισμούς, διατυπώθηκε στο γενικευμένο τριδιάστατο χώρο τάσεων (Kanvadas and Kalos, 2017). Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν διαφορετικές εκφράσεις του συγκεκριμένου κριτηρίου στον τριδιάστατο χώρο. Επικρατούσα έκφραση είναι αυτή που προκύπτει με χρήση των αναλλοίωτων των τάσεων, για τη διατύπωση της συνάρτησης διαρροής, η οποία διαμορφώνει στο π-plane την πολυγωνική (εξαγωνική) μορφή που σημειώνεται στο Γράφημα 2.3 ως «GHB_π plane–Original».

Στο της διατύπωσης των Kanvadas and Kalos (2017) λόγω μη χρήσης της τρίτης αναλλοίωτης των τάσεων (lode angle) κατά το μετασχηματισμό του κριτηρίου στο γενικευμένο τριδιάστατο χώρο τάσεων, η μορφή του στο π-plane είναι κυκλική. Με κατάλληλη βαθμονόμηση η κυκλική μορφή του κριτηρίου διέρχεται, είτε από τις κορυφές του εξάγωνου που αντιστοιχούν σε εντατική κατάσταση τριαξονικής θλίψης, είτε από τις κορυφές του εξάγωνου που αντιστοιχούν σε εντατική κατάσταση τριαξονικού εφελκυσμού. Η βαθμονόμηση σε τριαξονική θλίψη σημειώνεται στο Γράφημα 2.3 ως «GHB_π plane–TXC», ενώ η βαθμονόμηση σε τριαξονικό εφελκυσμό σημειώνεται στο Γράφημα 2.3 ως «GHB_π plane–TXE». Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνώνται παραμετρικά οι δύο προαναφερθείσες βαθμονομήσεις του κριτηρίου (σε τριαξονικό εφελκυσμό ή σε τριαξονική θλίψη).



Γράφημα 2.3: Μορφή του κριτηρίου αστοχίας Generalized Hoek–Brown στο π -plane κατά τη διατύπωσή του στο γενικευμένο τριδιάστατο χώρο τάσεων για βαθμονόμηση σε τριαξονική θλίψη ή τριαξονικό εφελκυσμό.



Γράφημα 2.4: Περιβάλλουσα του κριτηρίου αστοχίας Generalized Hoek–Brown στο επίπεδο (διδιάστατο χώρο τάσεων σ_1 - σ_3) για βαθμονόμηση σε τριαξονική θλίψη ή τριαξονικό εφελκυσμό.

2.2.3. Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (1776) χρησιμοποιείται ευρέως στην Εδαφομηχανική και είναι εφαρμόσιμο σε εδαφικούς ή βραχώδεις σχηματισμούς. Με βάση τον νόμο τριβής του Coulomb καθορίζεται ο συνδυασμός της ορθής και της διατμητικής τάσης, ο οποίος θα έχει ως αποτέλεσμα την αστοχία του υλικού, ενώ με τον κύκλο του Mohr προσδιορίζεται το ζεύγος των κυρίων τάσεων, οι οποίες θα οδηγήσουν στο συνδυασμό της ορθής και της διατμητικής τάσης που θα καταλήξουν στην αστοχία της βραχομάζας, καθώς και στην διεύθυνση του επιπέδου κατά το οποίο η βραχομάζα θα αστοχήσει. Το κριτήριο αυτό είναι εφαρμόσιμο και στη Βραχομηχανική, για κερματισμένες βραχομάζες ή για να εκφράσει την αστοχία σε επίπεδο ασυνέχειας. Ουσιαστικά περιγράφει τον συνδυασμό της μέγιστης διατμητικής τάσης κατά το επίπεδο αστοχίας και της μέγιστης ορθής τάσης κάθετα σε αυτό, σε ελαστικό χώρο. Η μαθηματική διατύπωση του κριτηρίου αστοχίας σε όρους ορθής και διατμητικής τάσης είναι η ακόλουθη:

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

Όπου:

τ : Η διατμητική τάση κατά την αστοχία.

σ : Η ορθή τάση κατά την αστοχία.

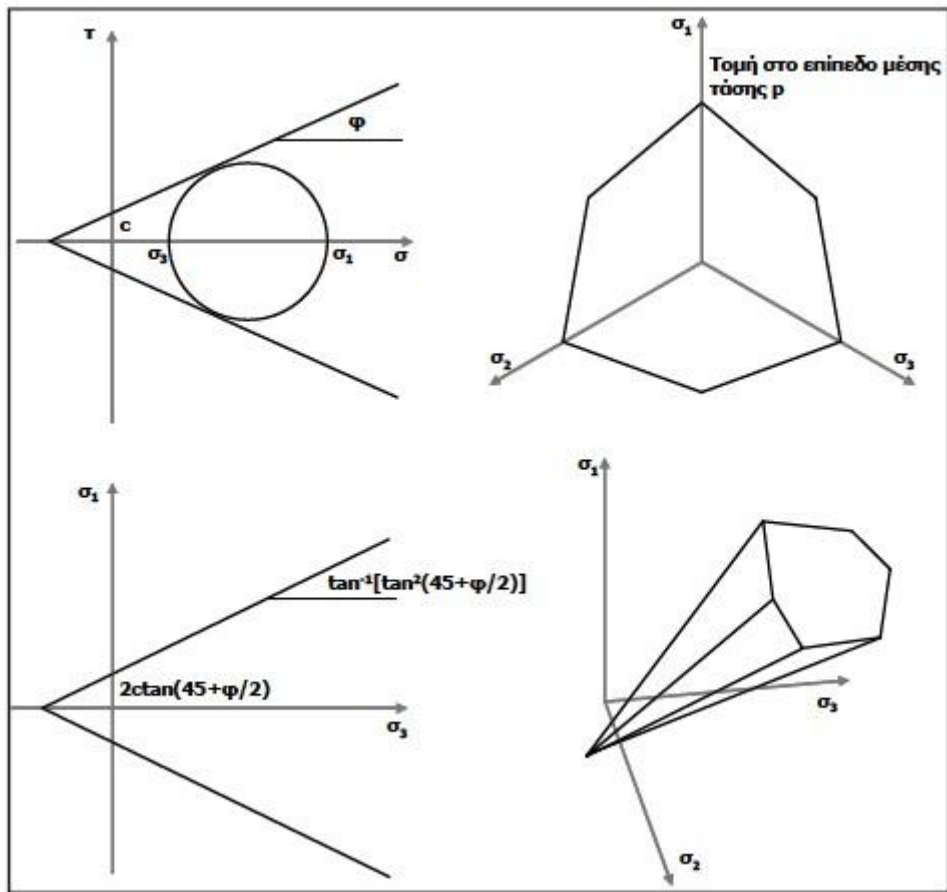
Η συμπεριφορά του υλικού εξαρτάται από την γωνία τριβής φ , η οποία μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά, καθώς και από την συνοχή c , στην περίπτωση που το υλικό είναι συνεκτικό. Για μη συνεκτικό υλικό λαμβάνεται $c=0$.

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

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

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

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



Σχήμα 2.46: Γραφική απεικόνιση περιβάλλουσας αστοχίας Mohr-Coulomb

3. Προσομοίωση του προβλήματος

3.1. Εισαγωγή

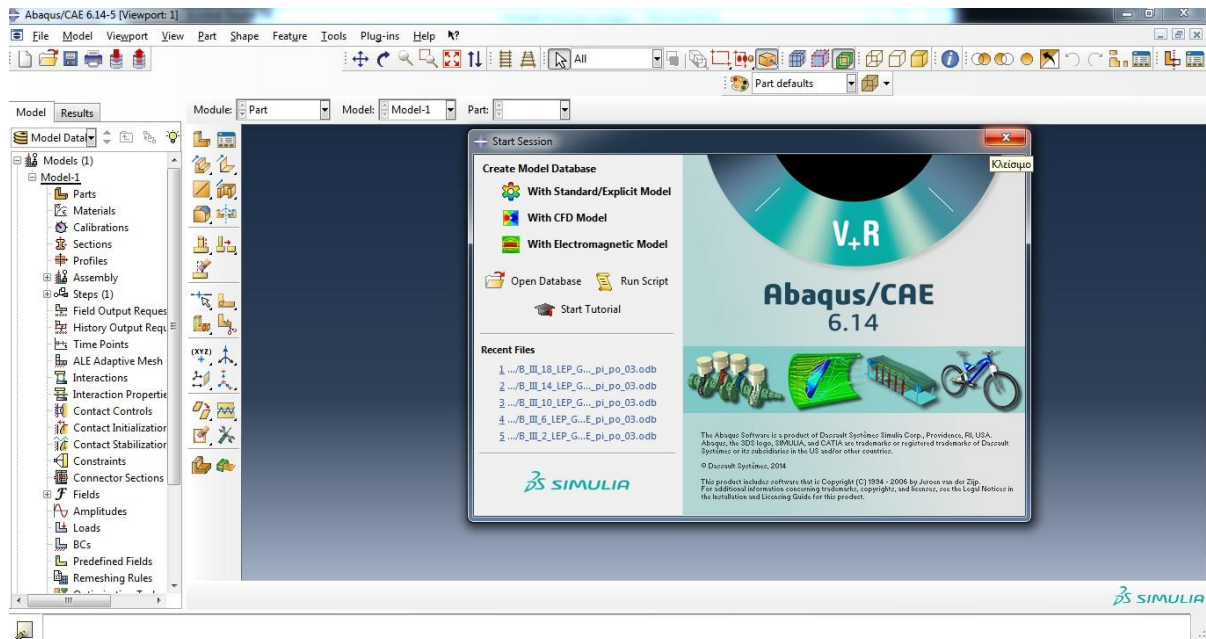
Η σωστή προσομοίωση ενός τόσο σύνθετου προβλήματος όσο αυτού της αλληλεπίδρασης μεταξύ γειτονικών σηράγγων κατά την φάση διάνοιξής τους, αποτελεί βασικό παράγοντα που οδηγεί στην όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της πραγματικής κατάστασης και στην καλύτερη δυνατή εξαγωγή αποτελεσμάτων. Η αλληλεπίδραση μεταξύ κοντινών σηράγγων αποτελεί ένα σύνθετο φαινόμενο με μία σειρά παραμέτρων όπως η γεωμετρία, το πλάτος του πυλώνα, τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της περιβάλλουσας βραχομάζας, η αλληλουχία εκσκαφών και διάνοιξης των σηράγγων, το γεωστατικό εντατικό πεδίο καθώς και πλήθος άλλων, να παίζουν καθοριστικό ρόλο. Επομένως η ακριβέστερη προσομοίωση των παραπάνω συνεπάγεται την ακριβέστερη λήψη αποτελεσμάτων για τις ασκούμενες δυνάμεις και ροπές κάμψης στην άμεση υποστήριξη, τις τάσεις και τις μετακινήσεις στην περιβάλλουσα βραχομάζα καθώς και για άλλα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν.

Στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκαν διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS v6.14. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για διάφορες τιμές του συντελεστή αποτόνωσης, καθώς και για μεταβλητές γεωτεχνικές παραμέτρους και πλάτη πυλώνα. Η προσομοίωση της αποτόνωσης της σήραγγας έγινε με τη μέθοδο της ισοδύναμης πίεσης υποστήριξης που ασκείται στη διατομή της βραχομάζας, όπως παρουσιάζεται και παρακάτω. Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS v6.14, η γεωμετρία και η διακριτοποίηση της βραχομάζας και της άμεσης υποστήριξης, αναλύονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν, γίνεται αναφορά στις έννοιες, στις παραδοχές και στα χρησιμοποιούμενα σύμβολα.

3.2. Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Abaqus v6.14

Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Abaqus αποτελεί έναν από τα πλέον διαδεδομένους που χρησιμοποιείται ευρέως τόσο για διδιάστατες όσο και τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις, για την επίλυση ευρείας γκάμας προβλημάτων μηχανικής. Στο χρήστη προσφέρεται εύχρηστο γραφικό περιβάλλον για το σχεδιασμό του μοντέλου και την διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων ενώ έχει την δυνατότητα να προσδιορίζει τη χρονοϊστορία του προβλήματος, χωρίζοντάς το σε φάσεις και προσδιορίζοντας την αλληλουχία βημάτων (steps). Κάθε ολοκληρωμένη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία αποτελείται από 3 βασικά βήματα:

- Το στάδιο του σχεδιασμού του προβλήματος (pre-processing-modeling) και της δημιουργίας του αρχείου εισαγωγής δεδομένων (input file) που περιλαμβάνει όλα εκείνα τα στοιχεία και δεδομένα που απαιτούνται για την επίλυση του προβλήματος.
- Το στάδιο της ανάλυσης του προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία και την εξαγωγή του αρχείου αποτελεσμάτων (output file)
- Το στάδιο μετά την ανάλυση (post-processing) κατά το οποίο είναι δυνατόν να γίνει επεξεργασία και εξαγωγή των κατάλληλων αποτελεσμάτων, γραφική απεικόνιση κ.ά.



Σχήμα 3.1: Περιβάλλον εργασίας Abaqus v6.14

Συνοπτικά, η διαδικασία που ακολουθήθηκε και παρουσιάζεται παρακάτω αναλυτικότερα περιλαμβάνει το σχεδιασμό του μοντέλου στο γραφικό περιβάλλον Abaqus CAE, την δημιουργία του input file με την βοήθεια του Microsoft Excel, την πραγματοποίηση των αναλύσεων, την εξαγωγή των αποτελεσμάτων που αφορούν τάσεις, δυνάμεις και παραμορφώσεις και τελικά την περαιτέρω επεξεργασία αυτών και την εξαγωγή των κατάλληλων γραφημάτων.

3.3. Περιγραφή των αριθμητικών προσομοιωμάτων

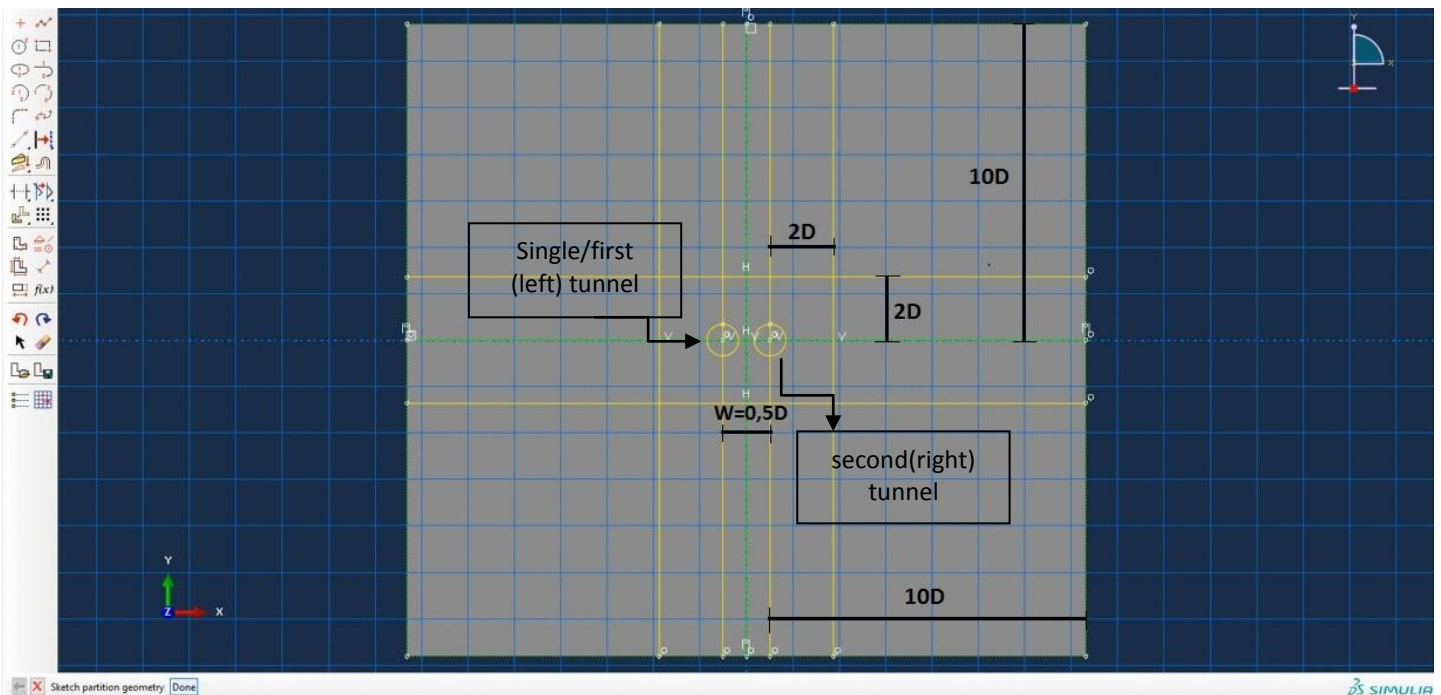
Στη συγκεκριμένη ενότητα γίνεται μία όσο το δυνατόν αναλυτικότερη περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε με σκοπό την κατασκευή των αριθμητικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις. Συγκεκριμένα δίνονται πληροφορίες που αφορούν τη γεωμετρία του αριθμητικού προσομοιώματος, την διακριτοποίησή του σε πεπερασμένα στοιχεία, τις συνοριακές συνθήκες και τα βήματα εκσκαφής. Το μοντέλο που παρουσιάζεται στη συνέχεια αφορά το πλάτος πυλώνα $W=0,5D$, ενώ είναι $W=1D$ και $W=2D$ τα άλλα δύο πλάτη που μελετήθηκαν στην πορεία.

3.3.1. Γεωμετρία

Το πρόβλημα που μελετάται στην παρούσα εργασία, όπως έχει αναφερθεί, αφορά την αλληλεπίδραση των δύο κλάδων δίδυμων σηράγγων κατά τη φάση εκσκαφής, εξετάζοντας την επίδραση διάφορων παραμέτρων. Από αυτές τις παραμέτρους, η μόνη που αλλάζει και αφορά τη γεωμετρία του προβλήματος, είναι αυτή του πλάτους πυλώνα. Επομένως για τα τρία πλάτη πυλώνα που μελετήθηκαν κατασκευάστηκαν τρία αριθμητικά μοντέλα με μόνη διαφορά στο συγκεκριμένο μέγεθος. Οι διαστάσεις των ορίων του προσομοιώματος, που καθορίστηκαν έπειτα από διενέργεια αναλύσεων ευαισθησίας, είναι παρόμοιες γι' αυτά, ενώ έγινε πύκνωση του

καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων στις περιοχές που παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον, πλησιάζοντας κοντά στις σήραγγες.

Η διάμετρος των σηράγγων λήφθηκε $D=8\text{m}$ ενώ η διατομή τους εκσκάπτεται σε μία φάση. Αρχικά διανοίγεται η αριστερή ή «μονή» σήραγγα (single tunnel) και στη συνέχεια εκσκάπτεται η δεξιά ή «δεύτερη» (second tunnel) με την αριστερή πλέον να μετονομάζεται σε «πρώτη» (first tunnel). Το πλάτος του πυλώνα που παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο σηράγγων, και μετριέται από παρειά σε παρειά, επιλέγεται να είναι $W=0,5D=4\text{m}$, $W=1D=8\text{m}$ και $W=2D=16\text{m}$. Για $W>2D$ παρατηρήθηκε μηδαμινή αλληλεπίδραση μεταξύ των σηράγγων. Το σύστημα αξόνων του επιπέδου μελέτης είναι το $x-y$, με τα κέντρα των σηράγγων να βρίσκονται πάνω στον άξονα των x . Οι αποστάσεις των ορίων του προσομοιώματος, τόσο κατά τον άξονα x όσο και κατά τον άξονα y , είναι $10D=80\text{m}$, ενώ σχεδιάστηκαν επίσης κατακόρυφα και οριζόντια όρια σε απόσταση $2D$ από τα κέντρα των σηράγγων, εντός των οποίων έγινε πυκνωση του καννάβου. Το συνολικό μήκος, επομένως, του μοντέλου είναι 172m κατά την διεύθυνση του άξονα x , και 160m κατά τον άξονα y .

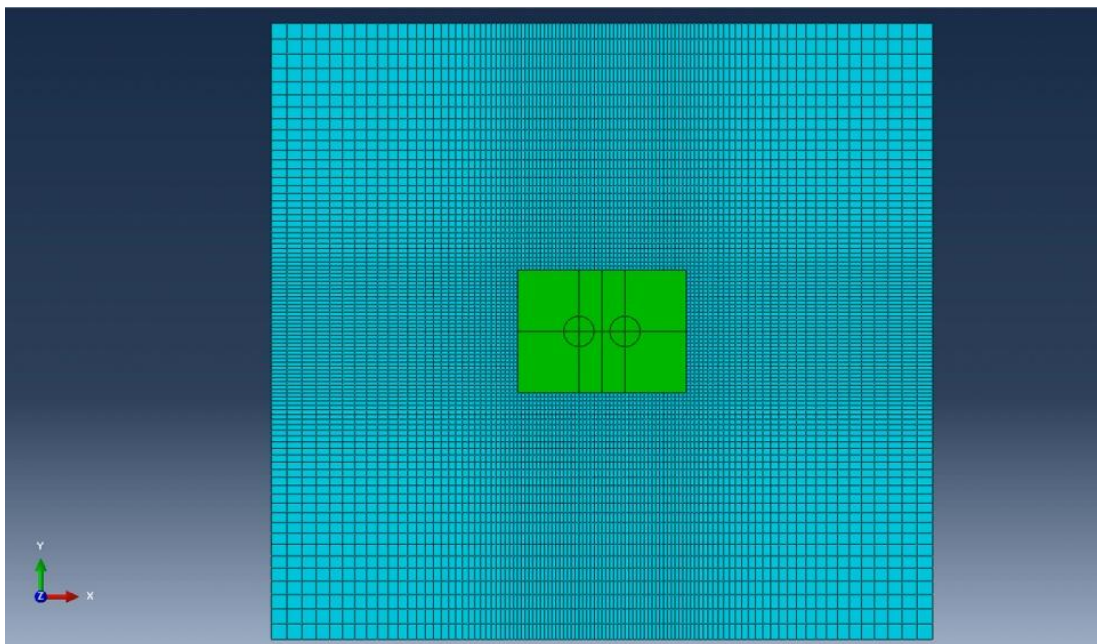


Σχήμα 3.2: Μορφή και διαστάσεις του προσομοιώματος όπως σχεδιάστηκε στο Abaqus CAE

3.3.2. Διαμόρφωση και διακριτοποίηση καννάβου

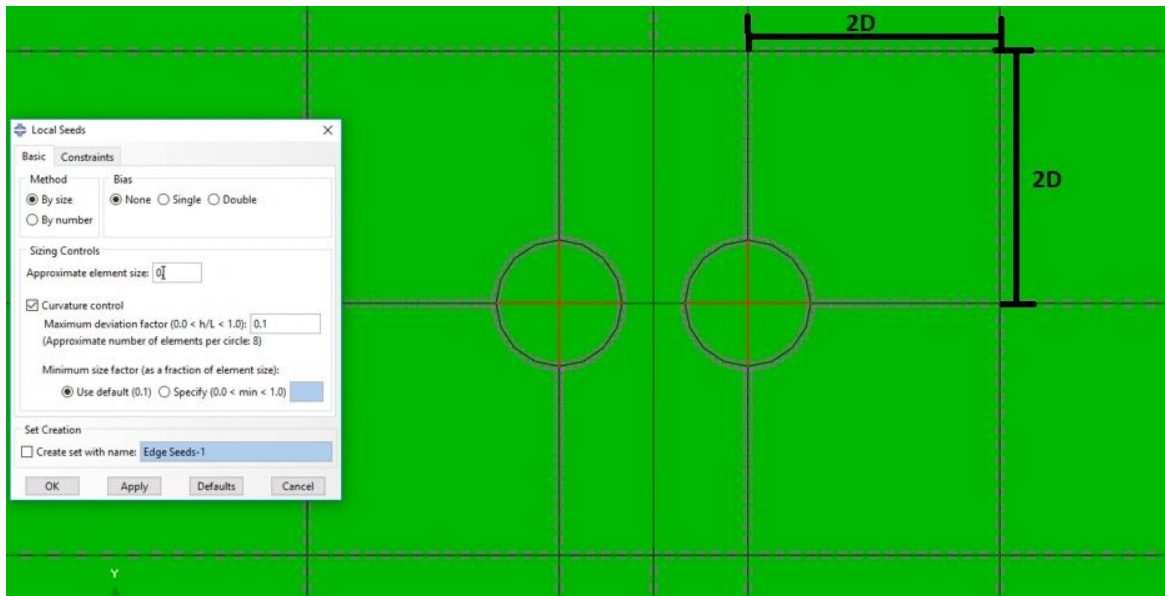
Μετά το στάδιο της γεωμετρικής απεικόνισης του προβλήματος, ακολουθεί η διακριτοποίηση του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία. Επιδιώκεται κατά το βήμα αυτό διακριτοποίηση του καννάβου τέτοια ώστε η επίλυση να επικεντρώνεται στα σημεία ενδιαφέροντος (περιοχές κοντά στις σήραγγες), χρησιμοποιώντας έτσι όσο το δυνατόν λιγότερους υπολογιστικούς πόρους, στο μικρότερο δυνατό χρονικό διάστημα. Αυτό επιτυγχάνεται με την πύκνωση των διαστάσεων των πεπερασμένων στοιχείων όσο πλησιάζουμε κοντά στις σήραγγες, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Αρχικά καθορίζεται στο Abaqus μέσω της εντολής “Mesh”, ο τύπος των πεπερασμένων στοιχείων που θα κατασκευάσει το πρόγραμμα. Επιλέγονται τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία (CPE4) επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain) με τέσσερα σημεία ολοκλήρωσης. Στη συνέχεια καθορίζεται ο τρόπος που θα γίνει η διακριτοποίηση του καννάβου, προσδιορίζοντας είτε τις διαστάσεις είτε τον αριθμό των πεπερασμένων στοιχείων ανάλογα την περιοχή που βρισκόμαστε. Ξεκινώντας από τις εξωτερικές, κοντά στα όρια του προσομοιώματος, περιοχές, επιλέγεται η διακριτοποίηση με βάση το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων, πυκνώνοντάς τα καθώς πλησιάζουμε προς της σήραγγες, ξεκινώντας από μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων τεσσάρων μέτρων (4m) και φτάνοντας μέχρι ένα μέτρο (1m) στις περιοχές που φαίνεται στο σχήμα 3.3.

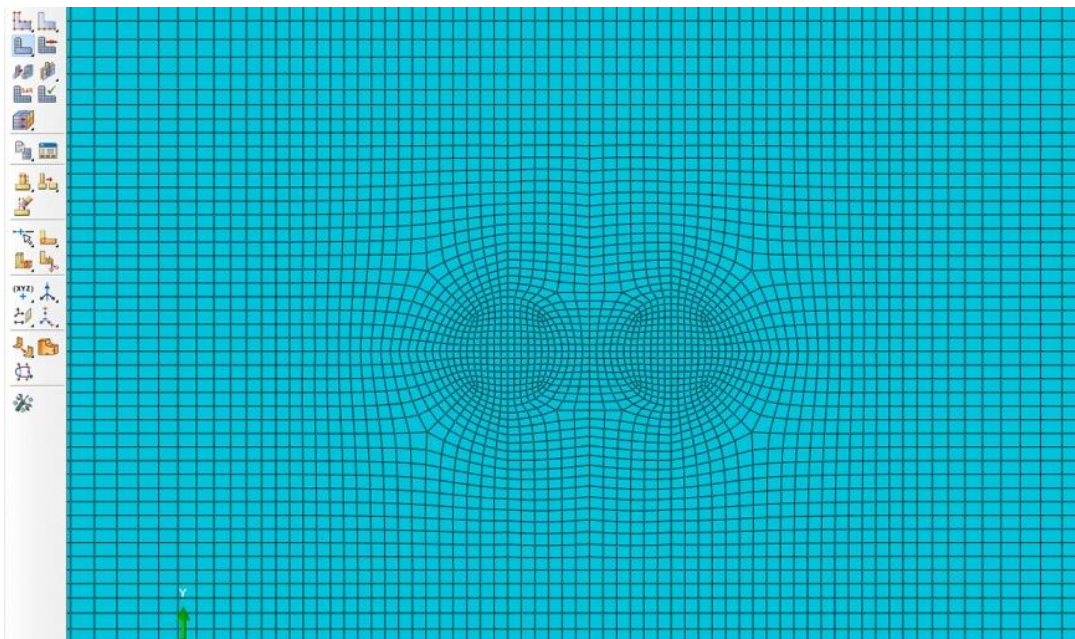


Σχήμα 3.3: Διακριτοποίηση καννάβου εξωτερικών περιοχών

Η περιοχή εντός των ορίων των 2D από τα κέντρα των σηράγγων, που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, διακριτοποιείται κι αυτή με βάση το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων, ξεκινώντας από ένα μέτρο (1m) και φτάνοντας έως το μισό μέτρο (0,5m). Τέλος, οι κύκλοι των διατομών των σηράγγων χωρίζονται με βάση τον αριθμό των στοιχείων, και διαιρούνται σε 48 πεπερασμένα στοιχεία ίσων διαστάσεων (σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4: Διακριτοποίηση της περιοχής γύρω από τις σήραγγες



Σχήμα 3.5: Μορφή των πεπερασμένων στοιχείων γύρω από τις σήραγγες

Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων, έγινε ομαδοποίηση σε κατάλληλα sets των κόμβων (nodes) και των πεπερασμένων στοιχείων (elements), και τελικώς εξήχθη το input file, που περιλαμβάνει όλους τους κόμβους, τα πεπερασμένα στοιχεία και τα διάφορα sets που ορίστηκαν. Σε αυτό ορίζονται κατάλληλα όλες οι απαραίτητες παράμετροι για τη βραχομάζα και την άμεση υποστήριξη, όπως παρουσιάζονται σε επόμενη ενότητα. Επίσης δεσμεύονται με κατάλληλες εντολές οι κόμβοι των εξωτερικών ορίων, επιβάλλοντας τις απαιτούμενες συνοριακές συνθήκες (μηδενικές μετακινήσεις των ορίων κατά x και κατά y), καθώς και το αρχικό εντατικό πεδίο. Το μοντέλο αποτελείται τελικώς από 10181 κόμβους και 9988 πεπερασμένα στοιχεία.

Όσον αφορά την προσομοίωση της άμεσης υποστήριξης, αυτή γίνεται με στοιχεία δοκού (beam elements - B21), για την οποία ορίζεται σαν υλικό το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους $t=0,2\text{m}$ και

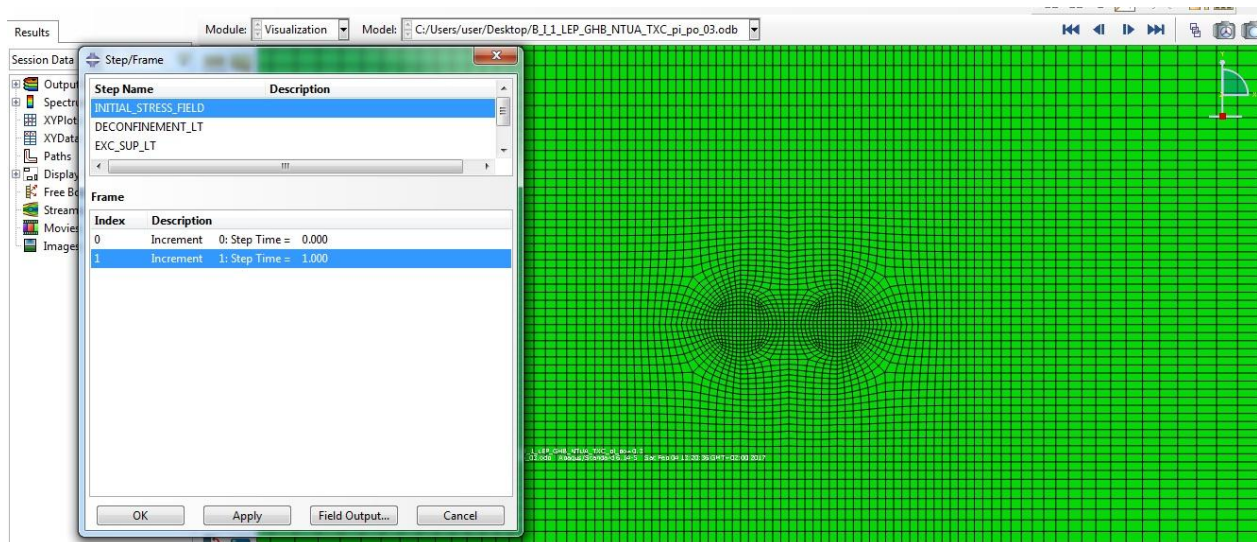
πλάτους στην εκτός επιπέδου διάσταση 1m. Μεταξύ βραχομάζας και άμεσης υποστήριξης ορίζεται διεπιφάνεια η οποία δεν επιτρέπει την ολίσθηση μεταξύ των δύο αυτών επιφανειών που την αποτελούν.

3.3.3. Βήματα αριθμητικών αναλύσεων και εξαγωγή αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα βήματα με βάση τα οποία γίνεται η προσέγγιση και η επίλυση του προβλήματος και αφορά την αλληλουχία εκσκαφών και υποστήριξης των δύο σηράγγων. Η εκσκαφή της διατομής κάθε σήραγγας γίνεται σε μία φάση (ολομέτρητη εκσκαφή). Πρέπει να τονιστεί ότι κάθε ένα από τα βήματα, εκτός του βήματος 1, έχουν χωριστεί σε 10 υποβήματα, κάτι που συμβάλλει στην καλύτερη σύγκλιση των αναλύσεων και προσδίδει μεγαλύτερη ακρίβεια σε αυτές.

➤ Βήμα 1^ο

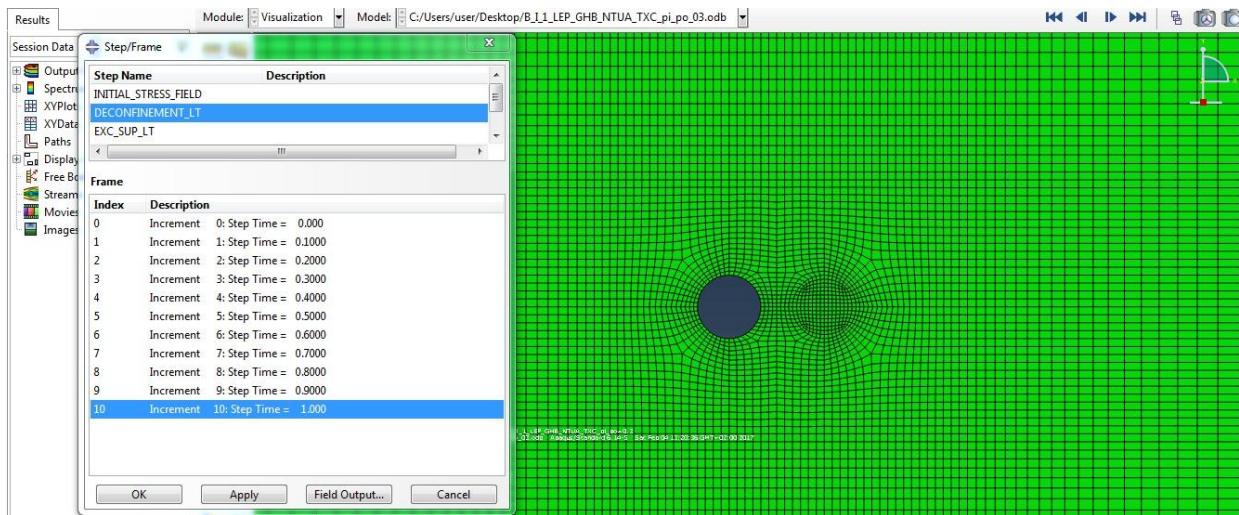
Αφορά το αρχικό εντατικό πεδίο του προβλήματος κατά την οποία καμία σήραγγα δεν έχει εκσκαφθεί και το πεδίο των τάσεων είναι σταθερό με βάση τις επιτόπου τάσεις στο επίπεδο των αξόνων των σηράγγων.



Σχήμα 3.6: Βήμα 1^ο της προσομοίωσης του προβλήματος που αφορά το αρχικό εντατικό πεδίο

➤ Βήμα 2^ο

Στο βήμα αυτό γίνεται αφαίρεση (εκσκαφή) του υλικού της αριστερής σήραγγας και αποτόνωση αυτής με εφαρμογή ενός συντελεστή με τιμές από 0 (μηδενική αποτόνωση) έως 1 (πλήρης αποτόνωση) επί των αρχικών εντατικών δυνάμεων που ασκούνται στα τοιχώματα των σηράγγων. Η βραχομάζα αρχίζει να παραμορφώνεται γύρω από τη σήραγγα, ενώ παρατηρείται και διαταραχή στο πεδίο των τάσεων στο περιβάλλον γεωυλικό.



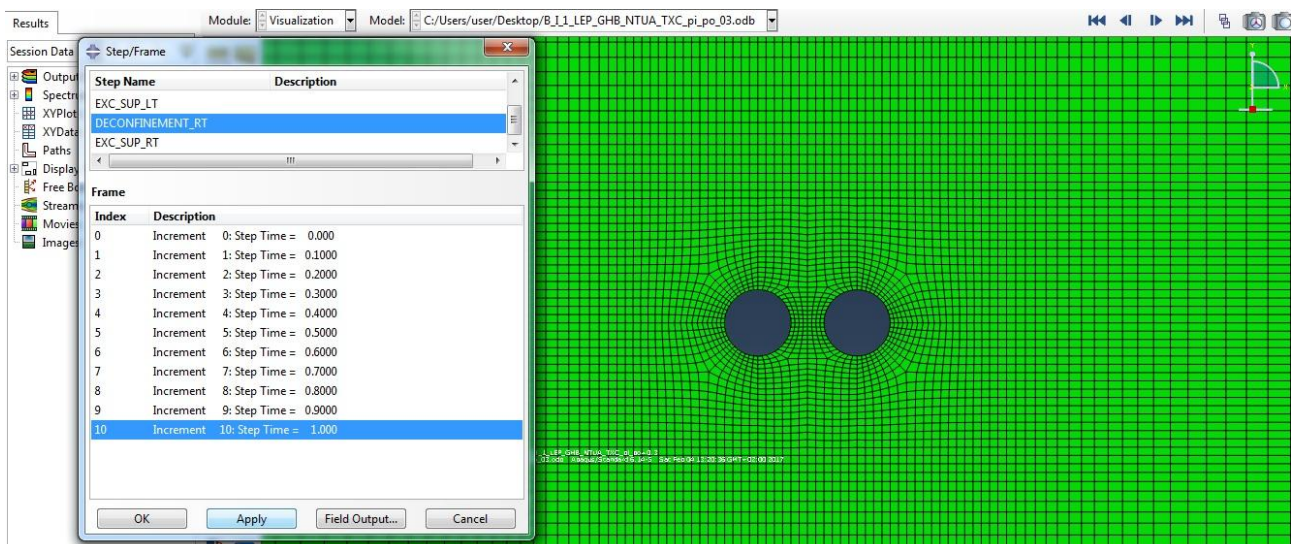
Σχήμα 3.7: Βήμα 2^ο της διάνοιξης της αριστερής σήραγγας κατά το οποίο αφαιρείται το υλικό και τοποθετείται κατάλληλη εσωτερική δύναμη που αναλογεί σε κάποιο βαθμό αποτόνωσης

➤ Βήμα 3^ο

Μετά από την διάνοιξη και αποτόνωση της αριστερής («μονής») σήραγγας, με κατάλληλη τοποθέτηση εσωτερικής δύναμης, αφαιρείται η δύναμη αυτή και ταυτόχρονα τοποθετείται η άμεση υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Παρατηρείται πολύ μικρή επιπλέον επίδραση στις μετακινήσεις και στο τασικό πεδίο λόγω ενδοσιμότητας του σκυροδέματος.

➤ Βήμα 4^ο

Αφού έχει διανοιχθεί και υποστηριχθεί η αρχική αριστερή σήραγγα (single), πραγματοποιείται η ίδια διαδικασία για την “δεύτερη” σήραγγα (second) με την αριστερή πλέον να μετονομάζεται σε “πρώτη” (first).



Σχήμα 3.8: Βήμα 4^ο της διάνοιξης της αριστερής σήραγγας κατά το οποίο αφαιρείται το υλικό και τοποθετείται κατάλληλη εσωτερική δύναμη που αναλογεί σε κάποιο βαθμό αποτόνωσης

➤ Βήμα 5^ο

Στο πέμπτο και τελευταίο βήμα, τοποθετείται η άμεση υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην δεύτερη σήραγγα και το σύστημα ισορροπεί.

3.4. Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Αφού έχει δημιουργηθεί το προσομοίωμα και έχουν καθοριστεί όλα τα βήματα στο πρόγραμμα που προσεγγίζουν την αλληλουχία με την οποία διανοίγονται και υποστηρίζονται οι δύο σήραγγες, το επόμενο στάδιο αφορά την εξαγωγή των κατάλληλων αποτελεσμάτων για τα καθορισμένα πεπερασμένα στοιχεία που μας αφορούν. Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει σε κάθε ένα από τα βήματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα 3.3. Χρήσιμα για την παρούσα διπλωματική είναι τα αποτελέσματα που αφορούν τα βήματα 3 και 5.

Τα αποτελέσματα που εξάγονται σε αρχείο συγκεκριμένης μορφής (.prt), ώστε να επεξεργαστούν κατάλληλα σε φύλλα Excel. Ο συμβολισμός τους στο περιβάλλον Abaqus Viewer είναι ο εξής:

- **Reaction Forces RF:** Εξάγονται στους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων, αναφέρονται στις ισοδύναμες ιδεατές εσωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στην περιφέρεια των σηράγγων και χρησιμοποιούνται κατάλληλα ώστε να προσομοιωθεί η αποτόνωση στις σήραγγες.
- **Μετακινήσεις U:** Περιλαμβάνει τις μετακινήσεις κατά τις διευθύνσεις x-x, y-y και τη συνισταμένη τους, και εξάγονται στους κόμβους (unique nodal) των πεπερασμένων στοιχείων της βραχομάζας, και για τα δύο βασικά βήματα της ανάλυσης (step 3 & 5)
- **Τάσεις S:** Περιλαμβάνει όλες τις τάσεις της βραχομάζας και εξάγονται κι αυτές και για τα δύο βήματα step 3 και step 5. Οι τάσεις σε αντίθεση με τις μετακινήσεις, εξάγονται στο μέσον (centroid) των πεπερασμένων στοιχείων, ως μέσος όρων των τιμών στα τέσσερα σημεία ολοκλήρωσης που αυτά αποτελούνται.
- **SF, SM, CPRESS, CSHEAR:** Αναφέρονται με τη σειρά στα μεγέθη των αξονικών και τεμνουσών δυνάμεων (SF), στις καμπτικές ροπές (SM), στις ορθές τάσεις (CPRESS) και στις διατμητικές τάσεις (CSHEAR) στο κέλυφος της άμεσης υποστήριξης. Εξάγονται στους κόμβους των στοιχείων της υποστήριξης (element nodal) και αφορούν μόνο στοιχεία αυτής (αφού τα έχουμε επιλέξει κατάλληλα). Εξάγονται όπως και τα προηγούμενα για τα βήματα 3 και 5.
- **SDV1:** Περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία της βραχομάζας, ενώ λαμβάνει την τιμή 0 ή 1. Η τιμή 0 αναφέρεται στα πεπερασμένα στοιχεία που των οποίων η τασική κατάσταση είναι στην ελαστική περιοχή ενώ η τιμή 1 αφορά τα στοιχεία των οποίων η τασική κατάσταση κείται πάνω στην περιβάλλουσα αστοχίας της βραχομάζας.
- **SDV2:** Περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία της βραχομάζας και αναφέρεται στο μέγεθος των πλαστικών παραμορφώσεων.

3.5. Παράμετροι αριθμητικών αναλύσεων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται όλες οι παραδοχές που έγιναν κατά το σχεδιασμό των μοντέλων, καθώς και όλες οι βασικές παράμετροι που υπεισέρχονται στις τριδιάστατες αναλύσεις (γεωμετρικές, γεωτεχνικές, παράμετροι άμεσης υποστήριξης). Η βραχομάζα προσομοιώνεται ως ελαστικό – απολύτως πλαστικό υλικό που ακολουθεί το γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown.

3.5.1. Γεωμετρικές – Κατασκευαστικές

➤ **Διάμετρος Σηράγγας**

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

➤ **Ύψος Υπερκειμένων**

Το ύψος των υπερκειμένων διατηρήθηκε επίσης σταθερό σε όλες τις αναλύσεις $H=10D=80\text{m}$.

➤ **Πλάτος Πυλώνα**

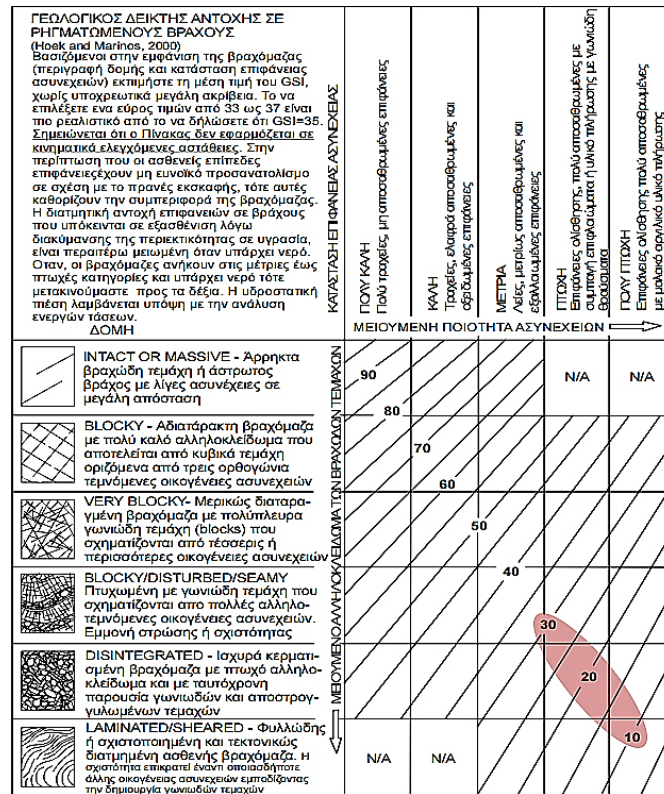
Πλάτος πυλώνα W ορίζεται η οριζόντια απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων μιας δίδυμης σηράγγας, μετρούμενη από τις εσωτερικές παρειές των δύο σηράγγων. Αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς παράγοντες αλληλεπίδρασης μεταξύ δίδυμων σηράγγων και ενός εκ των αντικειμένων μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Διερευνήθηκε στο συγκεκριμένο πρόβλημα αλληλεπίδρασης σηράγγων, τρία πλάτη πυλώνα, και συγκεκριμένα $W=0.5D=4\text{m}$, $W=1D=8\text{m}$ και $W=2D=16\text{m}$.

3.5.2. Γεωτεχνικές παράμετροι

➤ **Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI)**

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας προσομοιώθηκαν βραχομάζες που αναμένεται να παρουσιάζουν παραμορφώσεις και γενικότερα να εμφανίζουν φαινόμενα αλληλεπίδρασης, δηλαδή μέτριας έως πτωχής ποιότητας γεωυλικά. Για τον λόγο αυτό ο γεωλογικός δείκτης αντοχής (GSI) κυμαίνεται από 10 έως 30.



Σχήμα 3.9: Περιοχή του διαγράμματος GSI η οποία μελετήθηκε στα πλαίσια της έρευνας (Hoek and Marinos, 2000).

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

Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης δίδυμων σπράγγων γίνεται εντονότερο όταν αναφέρεται σε βράχους χαμηλής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Έτσι επιλέχθηκε το εύρος τιμών $\sigma_{ci}=5\div 20$ MPa.

➤ **Σταθερά υλικού για άρρηκτο βράχο m_i**

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

➤ **Λόγος Poisson ν**

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

➤ **Μέτρο Ελαστικότητας Άρρηκτου Βράχου E_i και Βραχομάζας E_m**

Για τον καθορισμό τους χρησιμοποιήθηκαν οι πιο σύγχρονες σχέσεις που έχουν προταθεί από τους Hoek & Diederichs, 2006. Ο συντελεστής διατάραξης της βραχομάζας D, λήφθηκε D=0 και η σταθερά MR=350, για όλες τις αναλύσεις. Συγκεκριμένα:

$$E_m = E_i * \left(0,02 + \frac{1}{1 + e^{\frac{60 - GSI}{11}}} \right)$$

Όπου: $E_i = \sigma_{ci} * MR$

Προκύπτει τελικά εύρος τιμών του μέτρου ελαστικότητας της βραχομάζας (53,83-569,68) MPa.

➤ **Αντοχή Βραχομάζας σ_{cm}**

Η αντοχή της βραχομάζας σ_{cm} υπολογίστηκε βάσει του τύπου των Hoek & Brown, 2002:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} * \frac{[(m_b + 4s - a(m_b - 8s)) \left(\frac{m_b}{4} + s\right)^{a-1}]}{[2(1 + a)(2 + a)]} = 0,21 \div 1,83 \text{ MPa}$$

Όπου:

$$m_b = m_i \frac{GSI - 100}{28}$$

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

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

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

Συσχετίζοντας το κριτήριο των Hoek & Brown με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb προκύπτουν οι ισοδύναμες παράμετροι διατμητικής αντοχής c και ϕ . Συγκεκριμένα, $c=0,062 \div 0,209 \text{ MPa}$ και $\phi=17,5^\circ \div 34,5^\circ$

➤ **Γωνία Διαστολικότητας δ**

Η διαστολικότητα της περιβάλλουσας βραχομάζας ελήφθη ίση με $\phi/4$, άρα $\delta=4,37^\circ \div 8,62^\circ$

➤ **Συντελεστής Οριζόντιων Τάσεων (K_0)**

Ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων του γεωυλικού είναι ο λόγος των οριζόντιων τάσεων προς τις κατακόρυφες τάσεις, καθορίζει το γεωστατικό εντατικό πεδίο και επηρεάζει τις διεκτροπικές τάσεις. Διερευνήθηκε μία τιμή του συντελεστή οριζόντιων τάσεων: $K_0=1$.

3.5.3. Παράμετροι άμεσης υποστήριξης

Η άμεση υποστήριξη που εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη εργασία αφορά κέλυφος από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Αυτό ακολουθεί ελαστική συμπεριφορά και οι βασικότερες παράμετροι αυτού παρουσιάζονται παρακάτω.

➤ **Ειδικό Βάρος γ_{sup}**

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

➤ **Μέτρο Ελαστικότητας E_{sup}**

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

➤ **Λόγος Poisson ν_{sup}**

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

➤ **Πάχος d_{sup}**

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

Πίνακας 3.1: Συγκεντρωτικός πίνακας γεωμετρικών, γεωτεχνικών και παραμέτρων άμεσης υποστήριξης.

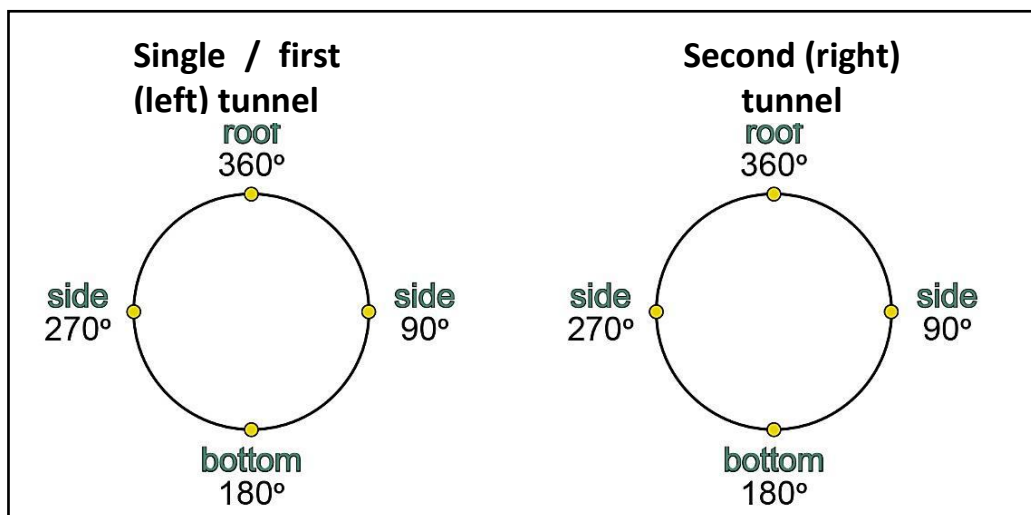
	Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμές	Μονάδες
Γεωμετρικές	Διάμετρος Σήραγγας	D	8	m
Κατασκευαστικές	Ύψος Υπερκείμενων	H	80	m
Παράμετροι Σήραγγας	Πλάτος Πυλώνα	W	4,8,16	m
	Συντελεστής οριζοντίων Τάσεων	K_o	1	-
	Ειδικό Βάρος Γεωλικού	γ	25	KN/m^3
	Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής	GSI	10,15,20,25,30	-
	Αντοχή Άρρηκτου Βράχου σε Μονοαξονική Θλίψη	σ_{ci}	5,10,15,20	MPa
Γεωτεχνικές	Σταθερά Υλικού για Άρρηκτο Βράχο	m_i	7	-
Παράμετροι	Λόγος Poisson	ν	0.3	-
	Μέτρο Ελαστικότητας Άρρηκτου Βράχου	E_i	1750-3500-5250-7000	Mpa
	Μέτρο Ελαστικότητας Βραχώμαζας	E_m	53.83-569.68	MPa
	Αντοχή Βραχώμαζας	σ_{cm}	0.21-1.83	MPa
	Συνοχή	c	0.062-0.209	MPa
	Γωνία Τριβής	ϕ	17.5-34.5	($^\circ$)
	Διαστολικότητα	δ	4.37-8.62	($^\circ$)
	Πάχος	d_{sh}	0.2	m
Παράμετροι Άμεσης	Ειδικό Βάρος	γ_{sh}	25	KN/m^3
Υποστήριξης	Μέτρο Παραμορφωσιμότητας	E_{sh}	20	Gpa
	Λόγος Poisson	ν_{sh}	0.2	-

3.6. Έννοιες και παραδοχές

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και επεξηγούνται όλες οι βασικές παραδοχές και έννοιες που χρησιμοποιήθηκαν σε διάφορα σημεία στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Αρχικά πρέπει να προσδιοριστεί η αλληλουχία με την οποία διανοίγονται οι σήραγγες καθώς και η ονοματολογία αυτών. Συγκεκριμένα προηγείται χρονικά η διάνοιξη και η υποστήριξη της αριστερής σήραγγας, η οποία λόγω του ότι είναι μόνη της, ονομάζεται (και λειτουργεί) ως ανεξάρτητη – «μεμονωμένη» ή «μονή» σήραγγα (“SingleLT”). Μετά την πλήρη αποτόνωσή της (μέχρι τον βαθμό αποτόνωσης που επιλέγεται κάθε φορά), και μετά την υποστήριξη όπου και το σύστημα έχει επέλθει σε ισορροπία, διανοίγεται η “δεύτερη” δεξιά σήραγγα (“SecondRT”) και μετά την αποτόνωσή της, τοποθετείται η άμεση υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Πλέον η αριστερή σήραγγα μετονομάζεται σε «πρώτη» (“FirstLT”) και είναι αυτή που δέχεται τις μεγαλύτερες επιπτώσεις λόγω του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Τα μεγέθη που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο των συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων (κεφάλαιο 4.3) (Αξονικές δυνάμεις, ροπές κάμψης κ.α.) αναφέρονται κατά κύριο λόγο, στον λόγο των τιμών της «πρώτης» σήραγγας ως προς τη «μεμονωμένη» (FirstLT/SingleLT) ή της «δεύτερης» ως προς τη «μεμονωμένη» (SecondRT/SingleLT), με τη μεμονωμένη δηλαδή να αποτελεί την βάση σύγκρισης. Στην μελέτη των μεμονωμένων βραχομαζών (κεφάλαιο 4.2) τα αποτελέσματα επικεντρώνονται στην πρώτη σήραγγα που επηρεάζεται και περισσότερο από το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.

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



Σχήμα 3.10: Ονομασία των δύο σηράγγων που διανοίγονται και προσανατολισμός της γωνίας θ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται ή εξάγονται στη συγκεκριμένη εργασία καθώς και ο συμβολισμός τους.

- **p_o** : Κατακόρυφη αρχική τάση στο επίπεδο της σήραγγας, $p_o = \gamma H$
- **p_{ho}** : Οριζόντια γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας, $p_{ho} = K_o \gamma H$
- **p** : Πίεση επαφής (φορτίο) στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- **u** : Μετακίνηση της βραχομάζας
- **σ** : Τάσεις της βραχομάζας
- **N** : Αξονική δύναμη στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- **Q** : Τέμνουσα δύναμη στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- **M** : Καμπτική ροπή στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- **$N/(p_o * D)$** : κανονικοποιημένη αξονική δύναμη στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας
- **$M/(p_o * D^2)$** : κανονικοποιημένη ροπή κάμψης στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας
- **Single**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει τα μεγέθη της πρώτης - αριστερής σήραγγας, πριν ξεκινήσει η εκσκαφή της δεύτερης – δεξιάς σήραγγας.
- **First**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει τα μεγέθη της πρώτης – αριστερής σήραγγας, αφότου έχει ξεκινήσει η εκσκαφή της δεύτερης – δεξιάς σήραγγας
- **Second**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει τα μεγέθη της δεύτερης – δεξιάς σήραγγας
- **Min**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει την ελάχιστη τιμή και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη
- **Max**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει την μέγιστη τιμή και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη
- **Average (avg)**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει την μέση τιμή και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη
- **Roof ή Crown**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει το μέγεθος στην στέψη της σήραγγας, δηλαδή για $\theta=0^\circ$ ή 360° και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη
- **Bottom**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει το μέγεθος για $\theta=180^\circ$ και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη
- **Side**: Ο δείκτης αυτός συμβολίζει τα μεγέθη στις παρειές της σήραγγας, δηλαδή για $\theta=90^\circ$ ή 270° και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη
- **W/D**: κανονικοποιημένο πλάτος πυλώνα ως προς την διάμετρο της σήραγγας
- **Exc&SupLT**: αφορά την φάση κατά την οποία έχει διανοιχθεί και αποτονωθεί στον επιθυμητό βαθμό η αριστερή σήραγγα, και στη συνέχεια έχει τοποθετηθεί η υποστήριξη.
- **Exc&SupRT**: αφορά την φάση κατά την οποία έχει διανοιχθεί και αποτονωθεί στον επιθυμητό βαθμό και η δεύτερη δεξιά σήραγγα, και τελικώς έχει τοποθετηθεί η υποστήριξη.

4. Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων

4.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αντιπροσωπευτικότερα αποτελέσματα από το σύνολο των αναλύσεων όπως προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις, και μετά την επεξεργασία τους σε υπολογιστικό φύλλο Microsoft Excel. Επιλέχθηκε η παρουσίαση εκείνων των διαγραμμάτων και εικόνων, που παρουσιάζουν τη μέγιστη επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ γειτονικών σηράγγων. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, οι βασικές παράμετροι που εξετάστηκαν ως προς την επίδρασή τους στο συγκεκριμένο φαινόμενο είναι:

- 20 Βραχομάζες με διαφορετικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά (πίνακας 4.1)
- 3 πλάτη πυλώνων ($W/D=0,5$, $W/D=1$, $W/D=2$, για $W/D>2$ παρουσιάστηκε ελαχιστοποίηση του φαινομένου σε πρακτικά αμελητέα επίπεδα)
- 3 συντελεστές αποτόνωσης «λ» ($\lambda=0,7$, $0,6$ και $0,5$)
- Βαθμονόμηση του γενικευμένου κριτηρίου αστοχίας GHB στον τριδιάστατο τασικό χώρο είτε στην τριαξονική θλίψη (συμβολίζεται ως GHB_TXC) είτε στον τριαξονικό εφελκυσμό (συμβολίζεται ως GHB_TXC)

Οι τιμές των χαρακτηριστικών για τις 20 βραχομάζες που εξετάστηκαν φαίνεται στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά των υπό μελέτη βραχομαζών

Βραχομάζες	Συντελεστής οριζοντίων τάσεων	Γεωλογικός δείκτης	Ειδικό βάρος βραχομάζας	Αντοχή άρθρου βράχου σε μονοαξονική θλίψη	Αντοχή βραχομάζας σε μονοαξονική θλίψη	Λόγος αντοχής βραχομάζας προς αρχική κατακόρυφη γεωστατική τάση	Μέτρο ελαστικότητας βραχομάζας	Λόγος Poisson	Ισοδύναμες παράμετροι διατμητικής αντοχής - MC(tunnels)		
α/α	K_0	GSI	γ (MN/m ³)	σ_{ci} (Mpa)	σ_{cm} (Mpa)	σ_{cm}/P_0	E_m (Mpa)	ν	Συνοχή	Γωνία εσωτερικής τριβής	Γωνία διαστολικότητας
									c (Mpa)	ϕ (°)	δ (°)
1	1	10	0.025	5	0.21	0.11	53.4	0.3	0.062	17.5	4.4
2	1	10	0.025	10	0.43	0.21	106.8	0.3	0.079	21.1	5.3
3	1	10	0.025	15	0.64	0.32	160.1	0.3	0.091	23.4	5.9
4	1	10	0.025	20	0.86	0.43	213.5	0.3	0.101	25.1	6.3
5	1	15	0.025	5	0.27	0.14	63.8	0.3	0.078	19.5	4.9
6	1	15	0.025	10	0.55	0.27	127.6	0.3	0.100	23.6	5.9
7	1	15	0.025	15	0.82	0.41	191.4	0.3	0.129	26.1	6.5
8	1	15	0.025	20	1.10	0.55	255.1	0.3	0.129	28.0	7.0
9	1	20	0.025	5	0.34	0.17	79.9	0.3	0.093	21.3	5.3
10	1	20	0.025	10	0.67	0.34	159.9	0.3	0.121	25.7	6.4
11	1	20	0.025	15	1.01	0.50	239.8	0.3	0.140	28.5	7.1
12	1	20	0.025	20	1.34	0.67	319.7	0.3	0.156	30.5	7.6
13	1	25	0.025	5	0.40	0.20	104.7	0.3	0.107	22.9	5.7
14	1	25	0.025	10	0.79	0.40	209.5	0.3	0.140	27.6	6.9
15	1	25	0.025	15	1.19	0.59	314.2	0.3	0.164	30.5	7.6
16	1	25	0.025	20	1.58	0.79	419.0	0.3	0.183	32.6	8.2
17	1	30	0.025	5	0.46	0.23	142.4	0.3	0.121	24.5	6.1
18	1	30	0.025	10	0.91	0.46	284.8	0.3	0.159	29.4	7.3
19	1	30	0.025	15	1.37	0.68	427.3	0.3	0.187	32.4	8.1
20	1	30	0.025	20	1.83	0.91	569.7	0.3	0.209	34.5	8.6

Τα εξαγόμενα αποτελέσματα επικεντρώνονται στις αναπτυσσόμενες αξονικές δυνάμεις και ροπές κάμψης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, στις τάσεις γύρω από τις σήραγγες, στις πλαστικές περιοχές που εμφανίζονται, καθώς και στις μετακινήσεις στα όρια των σηράγγων. Επίσης γίνεται μία σύγκριση μεταξύ των κριτηρίων αστοχίας που μελετήθηκαν σε αυτή την εργασία, του Generalized Hoek Brown (GHB_TXC & GHB_TXE) και του κριτηρίου Mohr-Coulomb. Τέλος, παρουσιάζονται τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της άμεσης υποστήριξης.

4.2. Επίδραση παραμέτρων για χαρακτηριστικές βραχομάζες

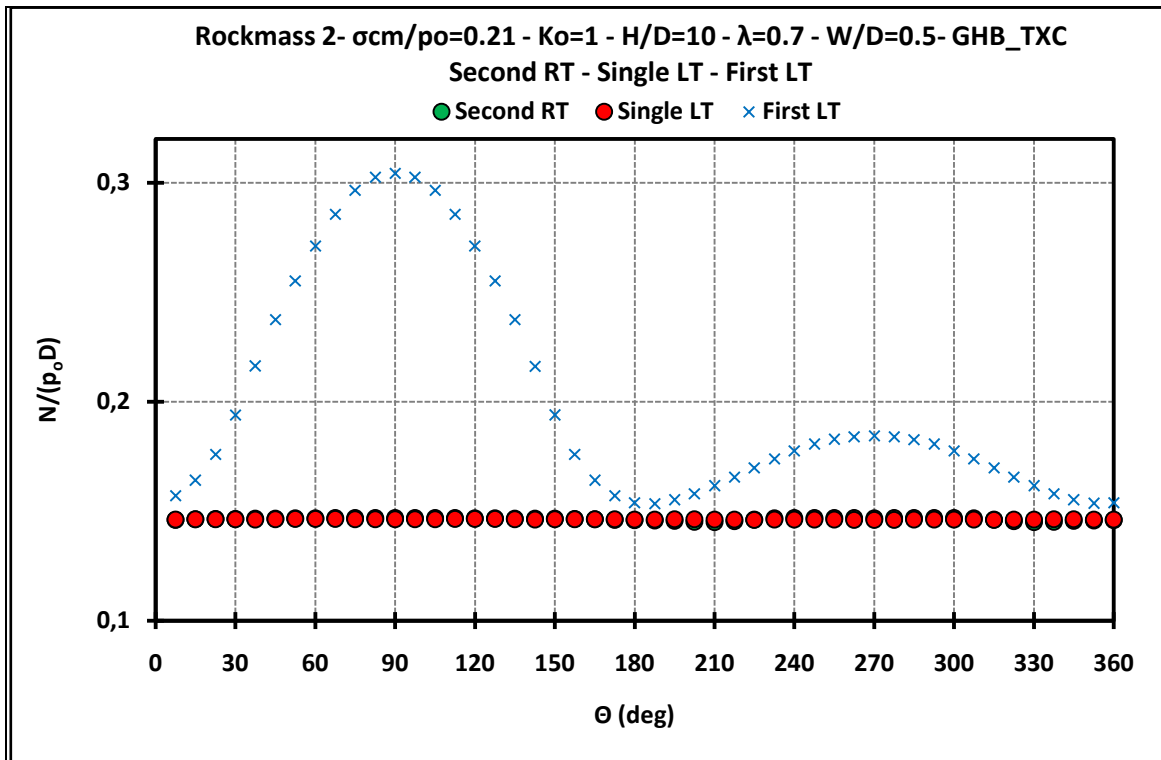
Στην ενότητα αυτή γίνεται μία παρουσίαση της επίδρασης του πλάτους πυλώνα, του συντελεστή αποτόνωσης και της βαθμονόμησης του κριτηρίου αστοχίας στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης γειτονικών σηράγγων, για δύο περιπτώσεις γεωτεχνικών χαρακτηριστικών (βραχομάζα 2 και βραχομάζα 20) (πίνακας 4.2). Η επιλογή των δύο αυτών περιπτώσεων, έγινε ώστε να παρουσιαστούν οι δύο ακραίες περιπτώσεις όσον αφορά την ποιότητα της βραχομάζας. Έτσι στο ένα άκρο μελετάται η πιο ασθενής βραχομάζα με $\sigma_{ci}=5\text{MPa}$, $GSI=10$ και $\sigma_{cm}/\rho_o=0,21$ (βραχομάζα 2), και στο άλλο η πιο ισχυρή από αυτές που μελετήθηκαν, με $\sigma_{ci}=20\text{MPa}$, $GSI=30$ και $\sigma_{cm}/\rho_o=0,91$ (βραχομάζα 20). Το κρισιμότερο αποτέλεσμα το οποίο και παρουσιάζεται εδώ, αφορά την αξονική δύναμη σε όλη την περιφέρεια της άμεσης υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ($\theta=0^\circ-360^\circ$). Επίσης θα παρουσιαστούν κατά κύριο λόγο τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση του μοντέλου GHB_TXC για τα κεφάλαια 4.2.1 και 4.2.2 για καλύτερη εποπτεία των γραφημάτων.

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά των βραχομαζών 2 και 20 που μελετώνται

Βραχομάζες συντελεστής οριζοντίων τάσεων	Γεωλογικός δείκτης	Ειδικό βάρος βραχομάζας	Αντοχή άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη	Αντοχή βραχομάζας σε μονοαξονική θλίψη	Λόγος αντοχής βραχομάζας προς αρχική κατακόρυφη γεωστατική τάση	Μέτρο ελαστικότητας βραχομάζας	Λόγος Poisson	Ισοδύναμες παράμετροι διατμητικής αντοχής - MC(tunnels)		Γωνία διαστολικότητας	
								Συνοχή	Γωνία εσωτερικής τριβής		
α/α	K_o	GSI	γ (MN/m ³)	σ_{ci} (Mpa)	σ_{cm} (Mpa)	σ_{cm}/P_o	E_m (Mpa)	ν	c (Mpa)	ϕ (°)	δ (°)
2	1	10	0.025	10	0.43	0.21	106.8	0.3	0.079	21.1	5.3
20	1	30	0.025	20	1.83	0.91	569.7	0.3	0.209	34.5	8.6

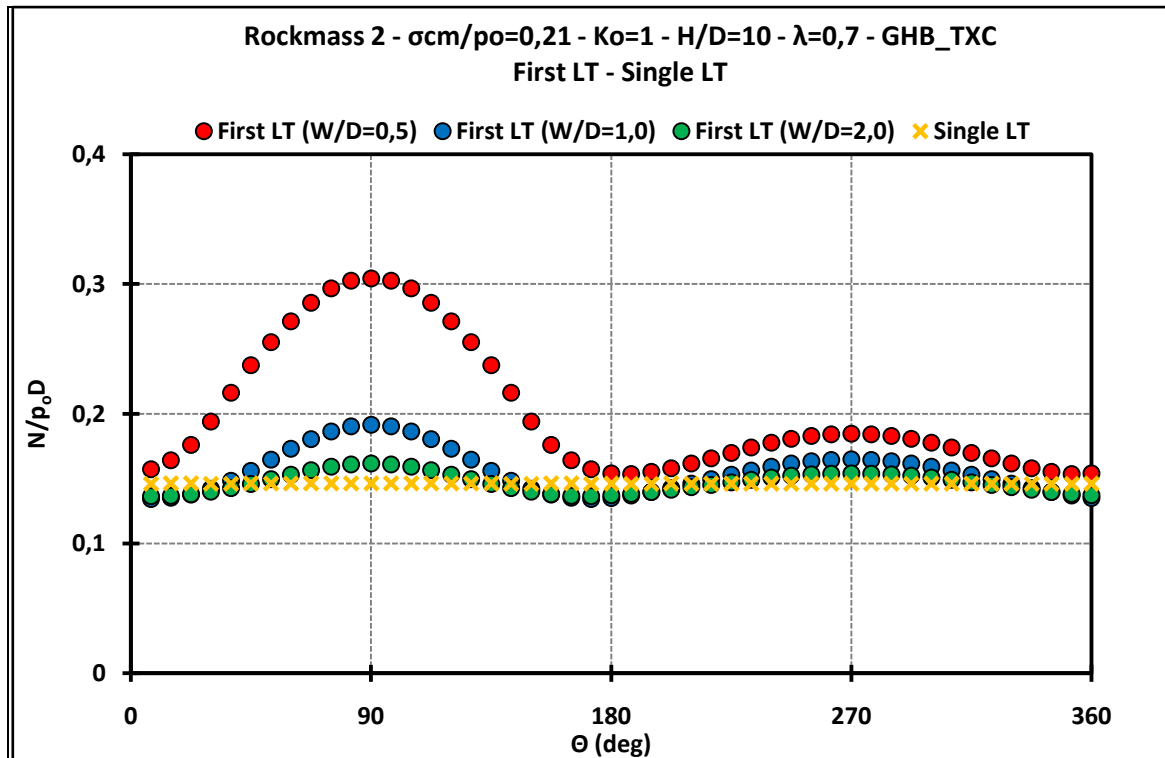
4.2.1. Επίδραση του πλάτους πυλώνα (W/D)

Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις στην περιφέρεια των σηράγγων $N/(\rho_o D)$ συναρτήσει της γωνίας θ , η οποία μετράται όπως έχει παρουσιαστεί στις παραδοχές του Κεφαλαίου 3. Η διατομή στην οποία φαίνεται η επίδραση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης και η οποία αναλύεται, είναι αυτή της «πρώτης» (FirstLT) σήραγγας, μιας και όπως φαίνεται στο γράφημα 4.1, τόσο η «μεμονωμένη» (SingleLT) όσο και η «δεύτερη» (SecondRT) συμπεριφέρονται σαν ανεξάρτητες-μεμονωμένες σήραγγες κατά την εκσκαφή και επένδυσή τους (γράφημα 4.1).



Γράφημα 4.1: Αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις στην άμεση υποστήριξη για τη «μεμονωμένη» (single), «πρώτη» (first) και «δεύτερη» (second) σήραγγα, για τη βραχομάζα «2», για $W/D=0.5$ και $\lambda=0,7$

Επομένως, η επιρροή του πλάτους πυλώνα στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, στη σήραγγα που υφίσταται τη μεγαλύτερη επιρροή (δηλαδή στην «πρώτη» - FirstLT), λόγω της διάνοιξης της «δεύτερης» σήραγγας, φαίνεται στα παρακάτω γραφήματα.

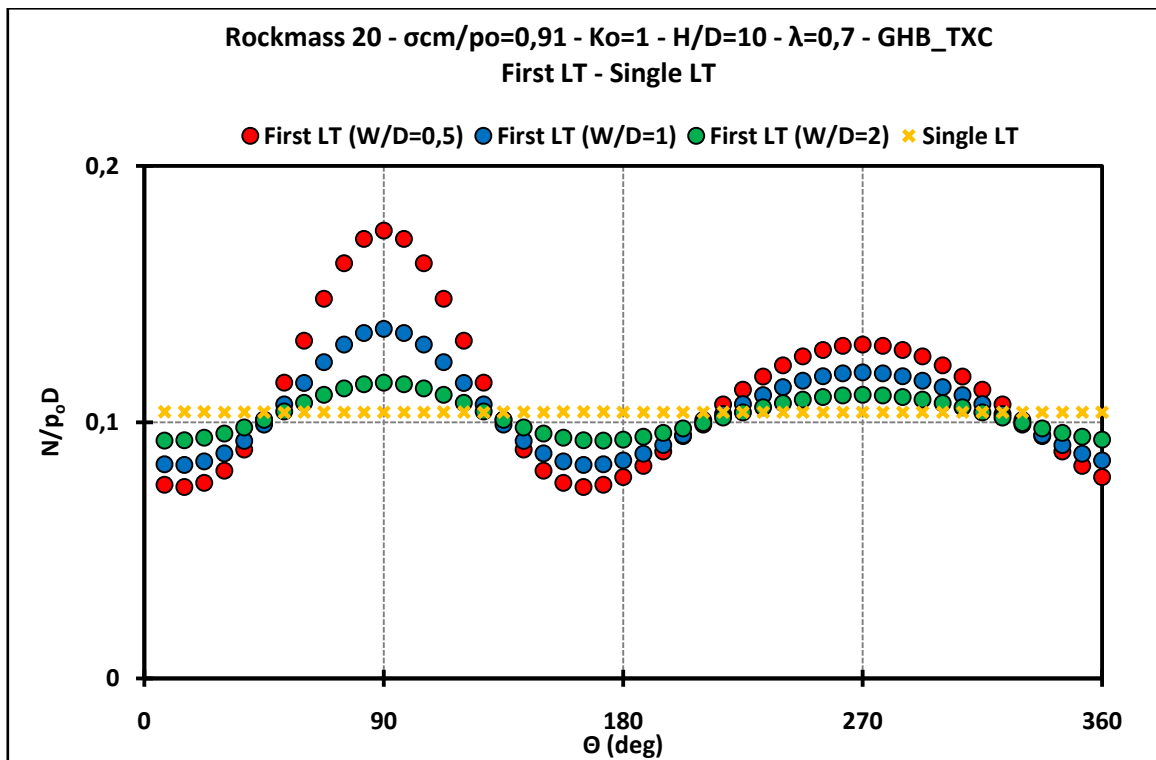


Γράφημα 4.2: Επίδραση του πλάτους πυλώνα στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις στη «πρώτη» (FirstLT) σήραγγα, για τη βραχομάζα «2» και $\lambda=0,7$

Στο γράφημα 4.2 παρουσιάζεται χαρακτηριστικά η επίδραση της εκσκαφής της «δεύτερης» (SecondRT) στην κατανομή των αξονικών δυνάμεων (κανονικοποιημένες ως προς $\rho_0 D$) στην περιφέρεια της «πρώτης» σήραγγας (FirstLT), και ιδιαίτερα στην εσωτερική παρειά αυτής προς τη μεριά του πυλώνα. Συγκεκριμένα, η διάνοιξη της «δεύτερης» δεξιάς σήραγγας (SecondRT), μεταφέρει πρόσθετο φορτίο στον πυλώνα και προκαλεί μία επιπλέον ανακατανομή των τάσεων στο περιβάλλον γύρω από τις σήραγγες, η οποία όμως ανακατανομή δεν συνεπάγεται περεταίρω συγκλίσεις στην αριστερή «πρώτη» σήραγγα (FirstLT) μιας και σε αυτή έχει τοποθετηθεί η άκαμπτη, άμεση υποστήριξη που παρεμποδίζει την διαδικασία αυτή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ανακατανομή των τάσεων στο πεδίο να μεταφράζεται σε αύξηση των φορτίων της άμεσης υποστήριξης της υπό μελέτη σήραγγας σχεδόν στο σύνολο της διατομής, και ιδιαίτερα στην εσωτερική παρειά της σήραγγας προς τη μεριά του πυλώνα.

Η αύξηση αυτή των αξονικών δυνάμεων στην άμεση υποστήριξη εξαρτάται καθοριστικά από την απόσταση του πλάτους πυλώνα. Η μέγιστη αλληλεπίδραση εμφανίζεται για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$, και μειώνεται καθώς αυτό αυξάνεται αφού προκαλείται όλο και μικρότερη διαταραχή στην περιβάλλουσα βραχομάζα ενώ οι πρόσθετες τάσεις αναλαμβάνονται πιο ομοιόμορφα από μεγαλύτερο πλάτος πυλώνα. Η διαταραχή αυτή του εντατικού πεδίου καθίσταται ουσιαστικά αμελητέα για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο του $W/D=2$, με τις σήραγγες σε τέτοια περίπτωση να συμπεριφέρονται ουσιαστικά ως ανεξάρτητες. Παρουσιάζεται επίσης και η καμπύλη της «μονής» σήραγγας ώστε να υπάρχει καλύτερη εποπτεία του φαινομένου της αλληλεπίδρασης.

Όμοια με παραπάνω, παρουσιάζεται το αντίστοιχο γράφημα 4.3 με την διαφορά ότι αναφέρεται στην ισχυρότερη βραχομάζα 20. Κι εδώ φαίνεται χαρακτηριστικά η αύξηση των φορτίων στην «πρώτη» σήραγγα λόγω της εκσκαφής της «δεύτερης», με την τιμή του λόγου $N/(\rho_0 D)$ όμως να μειώνεται σε σχέση με πριν αφού η διαταραχή του πεδίου σε ισχυρότερη βραχομάζα καθίσταται πιο περιορισμένη. Παρατηρείται επίσης όπως και πριν, ότι το μεγαλύτερο πλάτος πυλώνα αναλαμβάνει μεγαλύτερο μέρος της τάσης που μεταφέρεται σε αυτόν χωρίς να πλαστικοποιείται έντονα, το οποίο συνεπάγεται την ανάπτυξη μικρότερων αξονικών δυνάμεων στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης» (FirstLT) σήραγγας. Παρατηρείται κι εδώ ότι τα αποτελέσματα της «πρώτης» σήραγγας για $W/D>2$ προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό αυτά της «μονής» σήραγγας (εξασθένηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης).



Γράφημα 4.3: Επίδραση του πλάτους πυλώνα στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις στη «πρώτη» (FirstLT) σήραγγα, για τη βραχομάζα «20» και $\lambda=0,7$

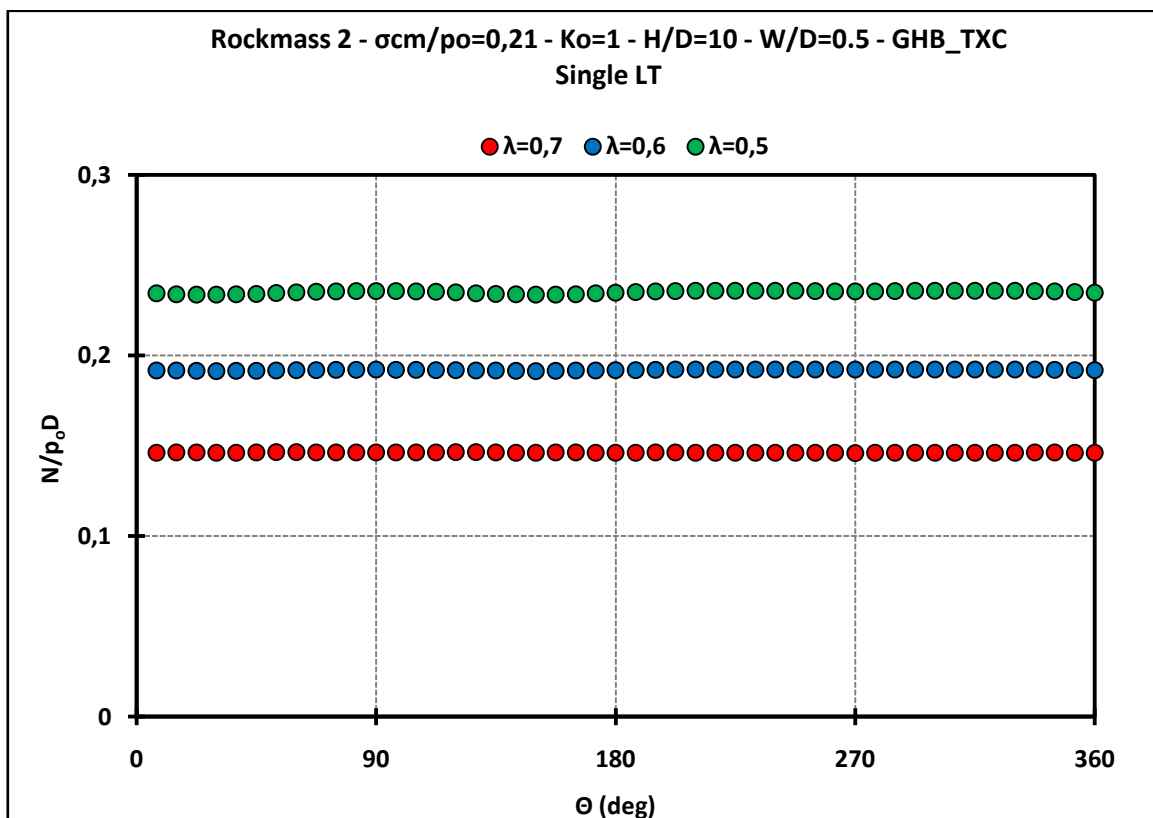
4.2.2. Επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης λ

Ο συντελεστής αποτόνωσης λ αποτελεί ένα βασικό παράγοντα για την διάνοιξη σήραγγων με τη μέθοδο NATM. Ο συντελεστής αυτός ουσιαστικά προσδιορίζει την εσωτερική δύναμη (p_i) που απαιτείται να ασκηθεί στην διατομή της σήραγγας, ώστε να προκύψουν καθορισμένες-επιτρεπτές συγκλίσεις σε αυτήν και βρίσκεται μεταξύ του 0 και 1. Ο συντελεστής αποτόνωσης συνδέεται με αυτή την εσωτερική πίεση με τον τύπο:

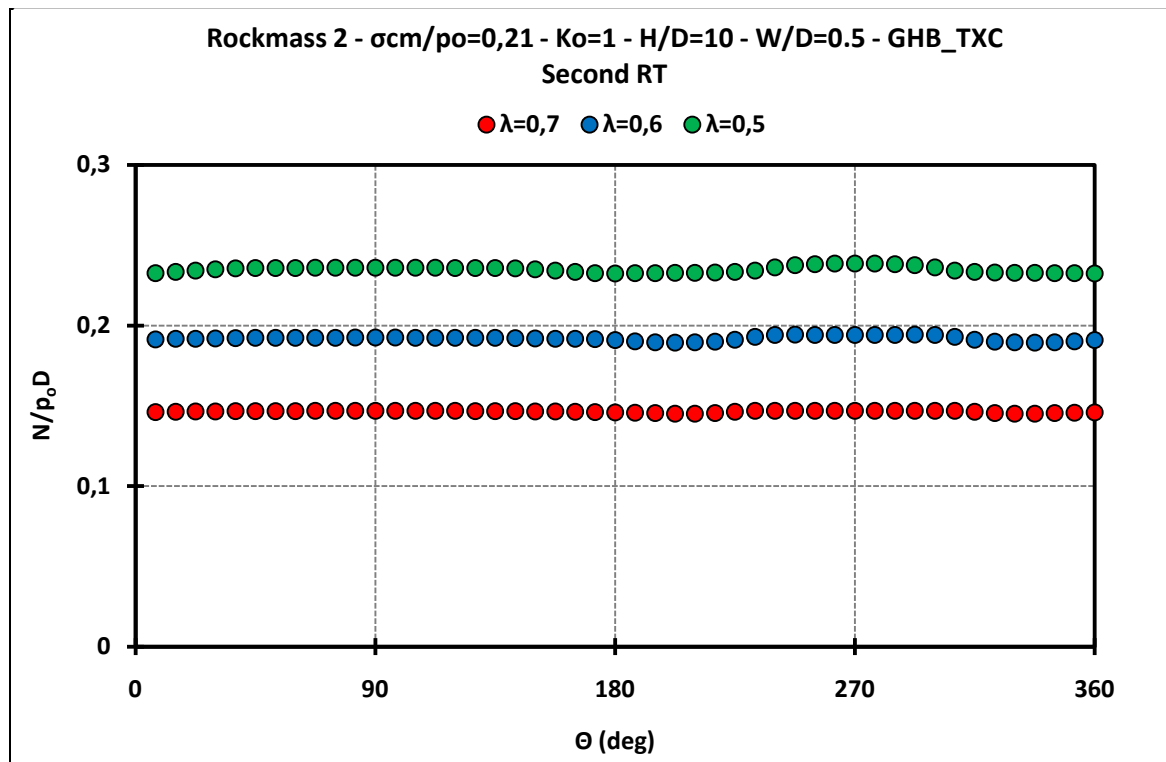
$$\lambda = 1 - \frac{p_i}{p_0}$$

Επομένως, προκύπτει ότι για μικρές τιμές αποτόνωσης λ , απαιτείται μεγάλη ασκούμενη εσωτερική πίεση (π.χ. από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, τα μεταλλικά πλαίσια κτλ), ενώ για μεγάλες τιμές του λ η πίεση αυτή μειώνεται, μιας και η διατομή της σήραγγας συγκλίνει και η βραχομάζα αποτονώνεται.

Η επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης φαίνεται χαρακτηριστικά στα παρακάτω διαγράμματα που παρουσιάζουν την αναπτυσσόμενη κανονικοποιημένη αξονική δύναμη σε όλη την διατομή της σήραγγας για τις μεμονωμένες περιπτώσεις της «μονής» (SingleLT) και «δεύτερης» (SecondRT) σήραγγας (γράφημα 4.4 και 4.5 αντίστοιχα).



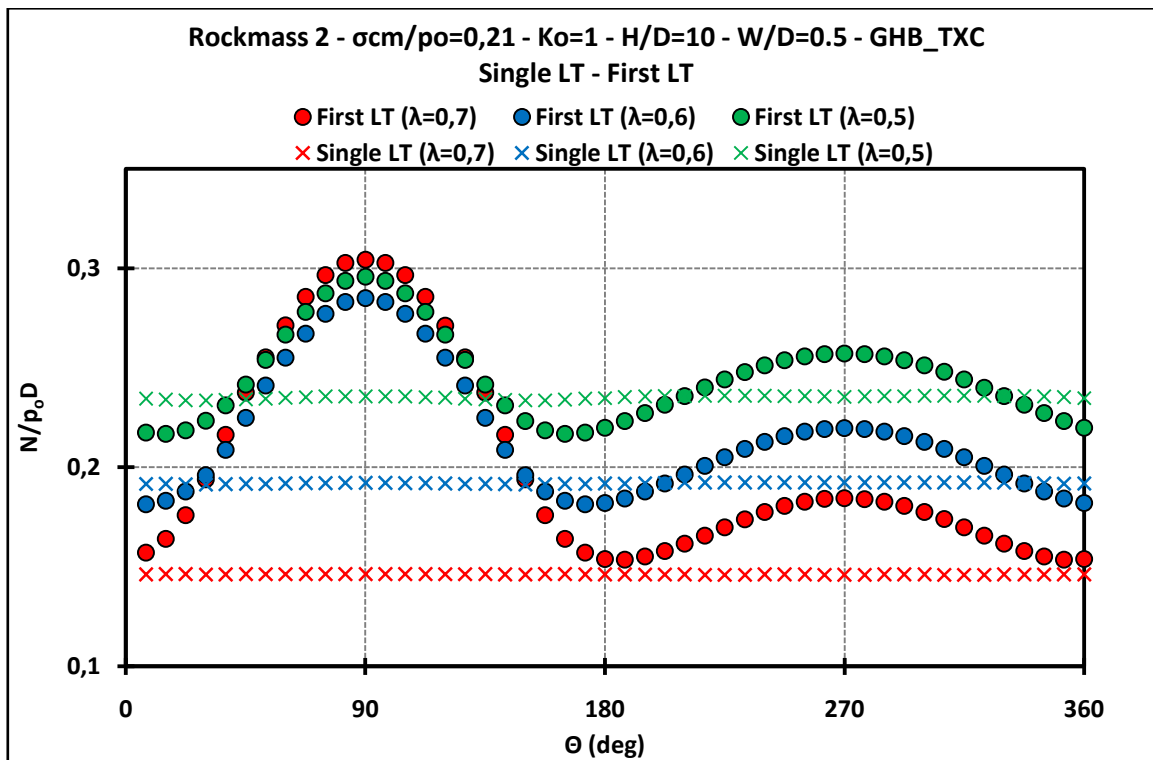
Γράφημα 4.4: Επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης λ στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις στην άμεση υποστήριξη της «μονής» (SingleLT) σήραγγας, για τη βραχομάζα «2» και $W/D=0,5$.



Γράφημα 4.5: Επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης λ στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις στην άμεση υποστήριξη της «δεύτερης» (SecondRT) σήραγγας, για τη βραχομάζα «2» και $W/D=0,5$.

Το φαινόμενο που περιγράφηκε παραπάνω για τη συσχέτιση του συντελεστή αποτόνωσης λ με την εντατική καταπόνηση του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, φαίνεται χαρακτηριστικά στα παραπάνω γραφήματα (γράφημα 4.4 και γράφημα 4.5), που αφορούν τις δύο σήραγγες που συμπεριφέρονται ουσιαστικά ως ανεξάρτητες κατά την διάνοιξή τους. Και στις δύο περιπτώσεις, μεγαλύτερη αποτόνωση συνεπάγεται μικρότερες δυνάμεις στην άμεση υποστήριξη.

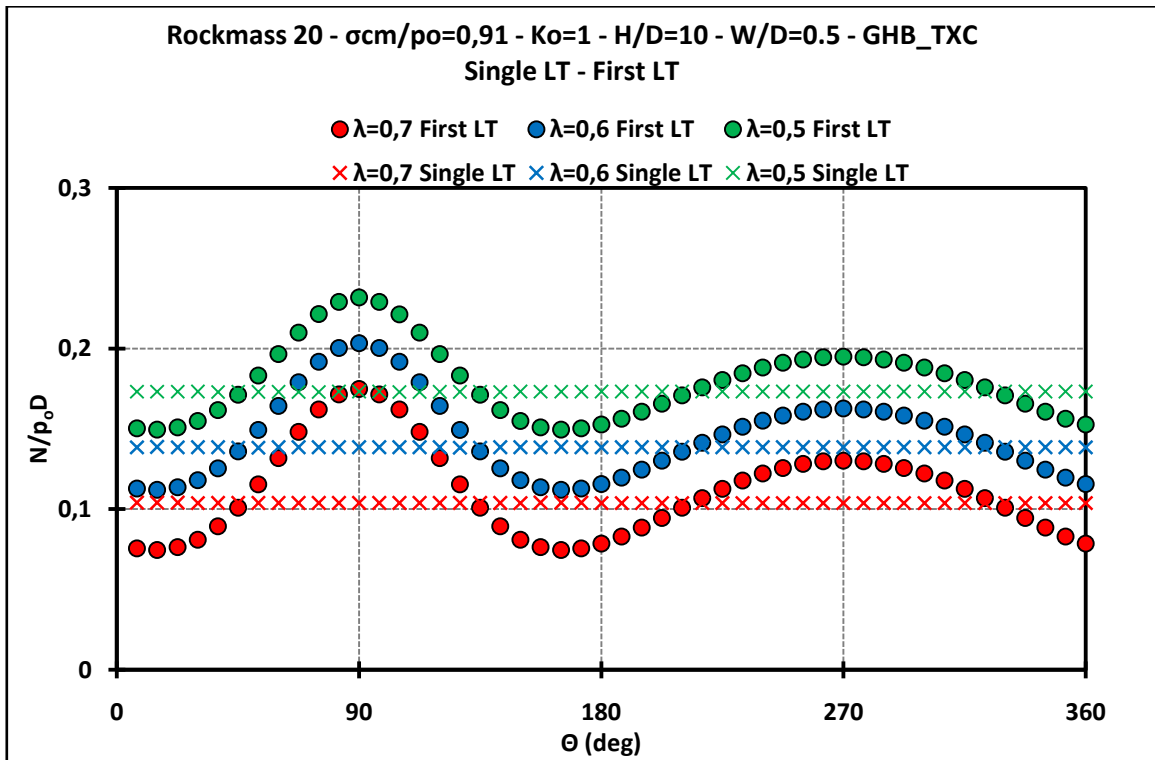
Παρ' όλα αυτά ενδιαφέρον εμφανίζει η περίπτωση της «πρώτης» (FirstLT) σήραγγας στην οποία παρουσιάζονται κατά κύριο λόγο και οι συνέπειες της αλληλεπίδρασης των σηράγγων. Όπως φαίνεται και στο γράφημα 4.6, στην περιοχή της εσωτερικής παρειάς ($\theta=30^\circ \div 150^\circ$), δηλαδή στην παρειά της σήραγγας προς τον πυλώνα, παρατηρείται μία διαφοροποίηση του φαινομένου της αποτόνωσης όπως παρουσιάστηκε στις δύο ανεξάρτητες σήραγγες. Συγκεκριμένα φαίνεται ότι στο διάστημα αυτό, και ιδιαίτερα στο σημείο που αντιστοιχεί στις 90 μοίρες, η καμπύλη που αναφέρεται σε μεγαλύτερη αποτόνωση έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερων αξονικών δυνάμεων στην άμεση υποστήριξη (γράφημα 4.8).



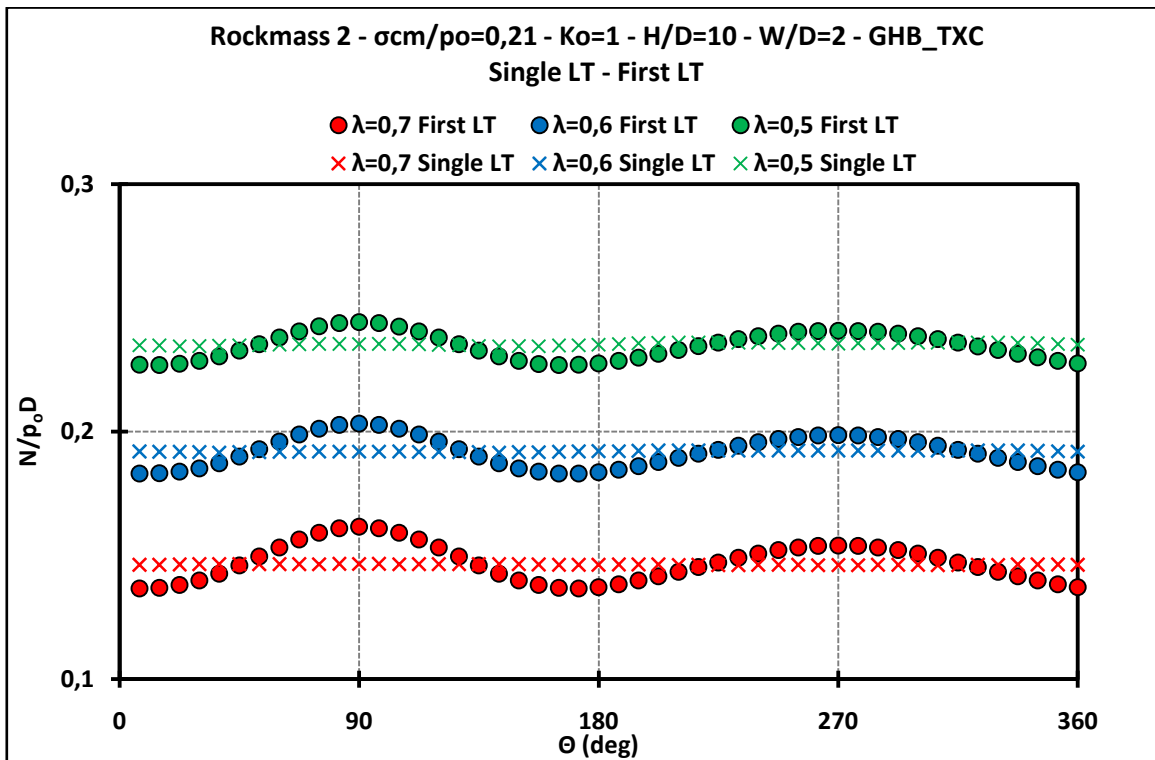
Γράφημα 4.6: Επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης λ στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις της άμεσης υποστήριξης της «πρώτης» (FirstLT) σήραγγας, για τη βραχομάζα «2» και $W/D=0,5$.

Το παραπάνω φαινόμενο, που εμφανίζεται μόνο στη σήραγγα που επηρεάζεται λόγω διάνοιξης άλλης γειτονικής σήραγγας και όχι στις άλλες δύο που συμπεριφέρονται σαν ανεξάρτητες, εξηγείται από την πλαστική περιοχή που αναπτύσσεται στο περιβάλλον των σηράγγων. Συγκεκριμένα, μεγαλύτερη αποτόνωση έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μεγαλύτερου εύρους πλαστική ζώνη γύρω από την εκάστοτε σήραγγα, με την έννοια ότι όλο και περισσότερα στοιχεία του περιβάλλοντος γεωυλικού αστοχούν και τελικώς πλαστικοποιούνται. Η πλαστικοποιημένη αυτή περιοχή φορτίζει τελικώς τη σήραγγα και προκαλεί την ανάπτυξη δυνάμεων και ροπών κάμψης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Έτσι, ενώ οι ανεξάρτητες σήραγγες φορτίζονται ομοιόμορφα, η σήραγγα που δέχεται ταυτόχρονα και το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης (η «πρώτη» FirstLT) παρουσιάζει μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις στην παρειά προς τον πυλώνα, μιας και αυτός πλαστικοποιείται πιο έντονα. Η μορφή των πλαστικών περιοχών και ο τρόπος που αναπτύσσονται κατά την εκσκαφή των δύο σηράγγων φαίνεται στην επόμενη ενότητα 4.3.

Πρέπει να τονιστεί ότι το παραπάνω σύνθετο φαινόμενο, εξαλείφεται όσο το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μικραίνει, όσο δηλαδή η βραχομάζα γίνεται ισχυρότερη ή το πλάτος του πυλώνα μεγαλώνει. Οι δύο ακραίες παραπάνω περιπτώσεις φαίνονται στα παρακάτω γραφήματα 4.7 και 4.8 αντίστοιχα.



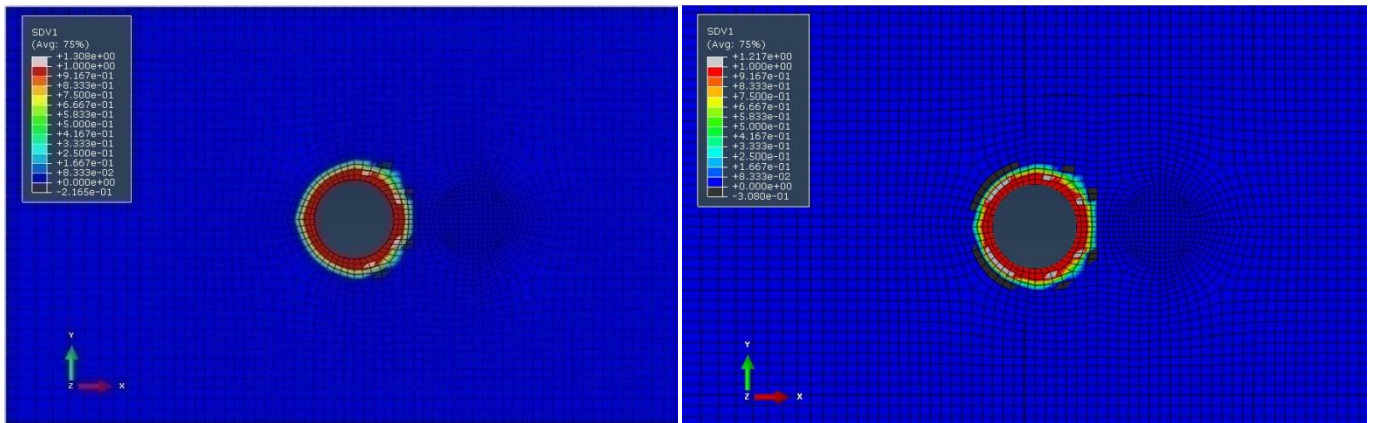
Γράφημα 4.7: Επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης λ στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις της άμεσης υποστήριξης της «πρώτης» (FirstLT) σήραγγας, για τη βραχομάζα «20» και W/D=0,5.



Γράφημα 4.8: Επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης λ στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις της άμεσης υποστήριξης της «πρώτης» (FirstLT) σήραγγας, για τη βραχομάζα «2» και W/D=2.

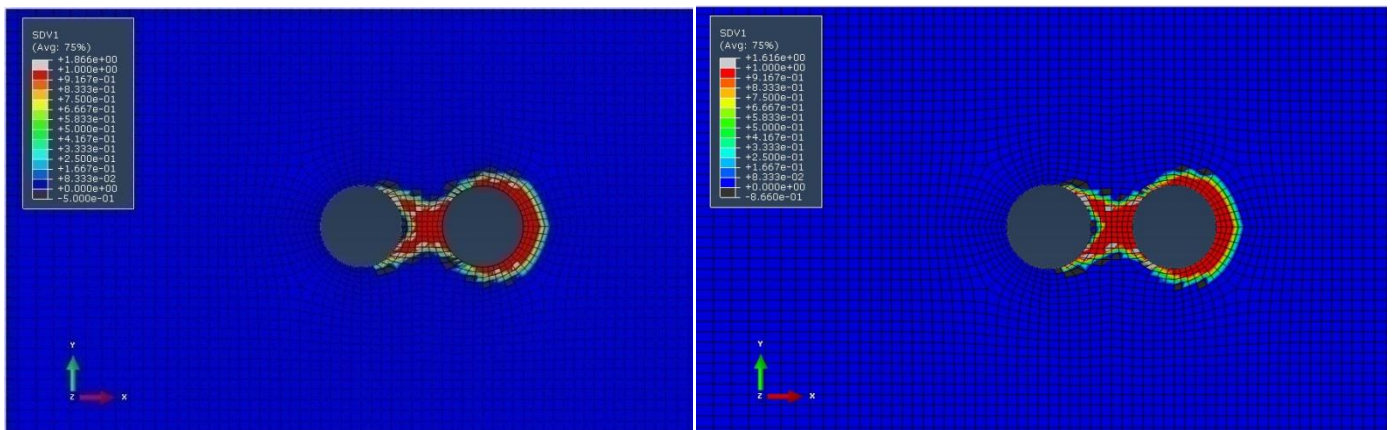
4.2.3. Πλαστικές περιοχές στην περιφέρεια των σηράγγων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται εποπτικά η εξέλιξη του φαινομένου της αλληλεπίδρασης κατά την διάνοιξη γειτονικών σηράγγων ($W/D=0,5$, ασθενής βραχομάζα «2»), μέσω εικόνων που εξήχθησαν από τον κώδικα ABAQUS, για κάθε ένα από τα στάδια εκσκαφής των δύο αυτών σηράγγων. Έτσι γίνεται πιο κατανοητό το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης που μελετάται στην παρούσα εργασία, ενώ ταυτόχρονα γίνεται και σχηματική επεξήγηση της μορφής και του εύρους της πλαστικής ζώνης που αναπτύσσεται γύρω από τις σήραγγες, κάτι που αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα 4.2.2. Αρχικά παρουσιάζονται τα στοιχεία που κείνται πάνω στην περιβάλλουσα αστοχίας σε κάθε στάδιο εκσκαφής και υποστήριξης των δίδυμων σηράγγων (παράμετρος SDV1).



Εικόνα 4.1: Στοιχεία που κείνται στην περιβάλλουσα αστοχίας στην αριστερή μονή (SingleLT) σήραγγα κατά την εκσκαφή (αριστερά) και επένδυση (δεξιά) αυτής, για την βραχομάζα «2».

Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζονται τα στοιχεία που κείνται πάνω στην περιβάλλουσα αστοχίας του γεωυλικού κι επομένως έχουν πλαστικοποιηθεί κατά την εκσκαφή και υποστήριξη στην αριστερή σήραγγα που σε αυτό το στάδιο λειτουργεί σαν ανεξάρτητη. Παρατηρείται μία ομοιόμορφη ζώνη γύρω από τη σήραγγα που οφείλεται στην αποτόνωση αυτής και τελικώς στην ακτινική αποφόρτιση και εφαιπτομενική φόρτιση των στοιχείων του γεωυλικού που αστοχούν. Τονίζεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αποτόνωση, τόσο πιο αυξημένο παρουσιάζεται το εύρος αυτής της περιοχής, ενώ η σήραγγα φορτίζεται με μικρότερες αξονικές δυνάμεις. Αναλογικά μικρότερη αποτόνωση συνεπάγεται με μικρότερο εύρος και μεγαλύτερα αξονικά φορτία.

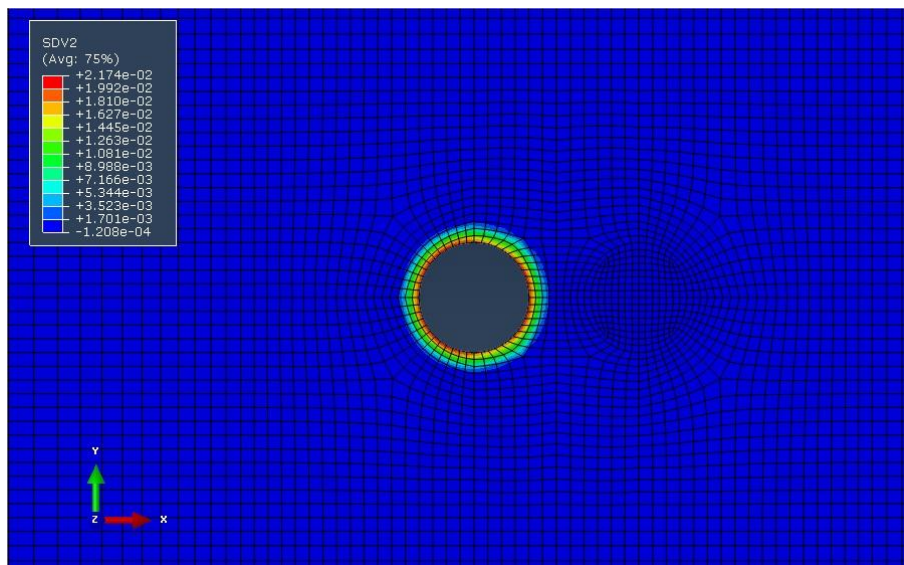


Εικόνα 4.2: Στοιχεία που κείνται στην περιβάλλουσα αστοχίας γύρω από της σήραγγες και στον πυλώνα κατά την διάνοιξη (αριστερά) και υποστήριξη (δεξιά) της «δευτέρας» (SecondLT) σήραγγας, για την βραχομάζα «2».

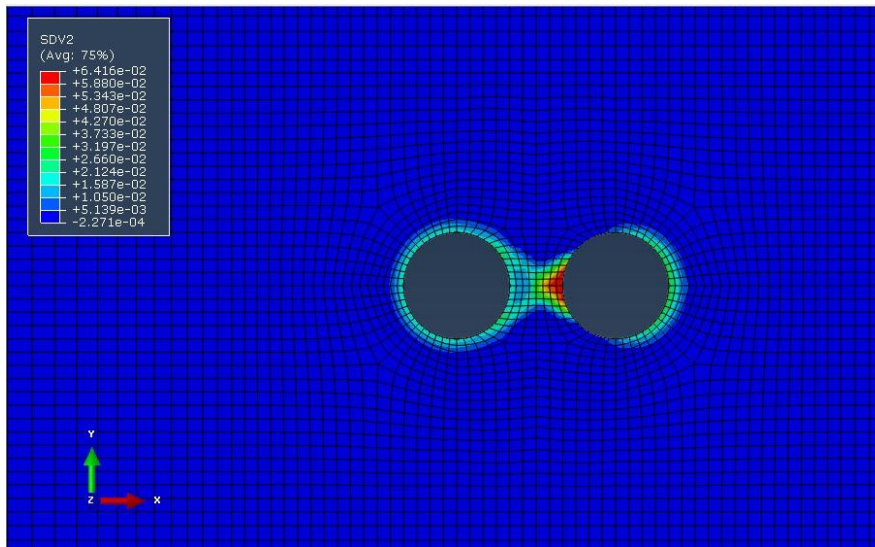
Μετά την εκσκαφή και υποστήριξη και της «δεύτερης» (SecondRT) σήραγγας, εμφανίζεται η κατάσταση που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.2. Περιμετρικά της νέας σήραγγας εμφανίζεται μία σχεδόν ομοιόμορφη ζώνη στοιχείων, όμοια με αυτή της εικόνας 4.1. της «μονής» σήραγγας, ενώ τα αξονικά φορτία που αναπτύσσονται σε αυτή μοιάζουν τόσο σε μορφή όσο και σε απόλυτες τιμές με αυτά της «μονής». Στην πρώτη σήραγγα παρατηρείται μία αποφόρτιση των στοιχείων μεταξύ των γωνιών 180° και 360° τα οποία όμως πρέπει να τονιστεί ότι παραμένουν πλαστικοποιημένα έχοντας συσσωρεύσει πλαστικές παραμορφώσεις, με την μόνη διαφοροποίηση ότι το εντατικό τους πεδίο αλλάζει και δεν κείνται επί τα όρια της περιβάλλουσας αστοχίας όπως καθορίζονται από το κριτήριο αστοχίας (η συγκεκριμένη παρατήρηση εξηγείται αναλυτικότερα παρακάτω με την παρουσίαση του μεγέθους των πλαστικών παραμορφώσεων).

Το τμήμα που εμφανίζει τις μεγαλύτερες ανακατατάξεις στις τάσεις και πλαστικοποιήσεις, είναι αυτό του πυλώνα. Με την διάνοιξη και της δεξιάς σήραγγας ο πυλώνας πλέον φορτίζεται επιπλέον λόγω της διαδρομής που ακολουθούν οι τάσεις (ανακατανομή των τάσεων). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η πλειοψηφία των στοιχείων του πυλώνα να πλαστικοποιούνται και να αστοχούν μην μπορώντας να παραλάβουν τις πρόσθετες τάσεις, τις οποίες τάσεις πλέον αναλαμβάνει η προσωρινή υποστήριξη της πρώτης σήραγγας «μεταφρασμένες» σε αξονικές δυνάμεις και ροπές κάμψης.

Οι πλαστικές παραμορφώσεις (SDV2) που αναπτύσσονται κατά την εξέλιξη των εκσκαφών και υποστήριξης των δύο σηράγγων φαίνονται στην επόμενη εικόνα 4.3. Παρατηρούνται πλαστικές παραμορφώσεις τόσο γύρω από τις σήραγγες όσο και στο εσωτερικό του πυλώνα. Υπογραμμίζεται ότι ακόμα και για τα στοιχεία που αποφορτίζονται και το τασικό τους πεδίο απομακρύνεται από την περιβάλλουσα αστοχίας (στοιχεία αριστερά της πρώτης σήραγγας), παραμένουν πλαστικοποιημένα έχοντας συσσωρεύσει πλαστικές παραμορφώσεις.

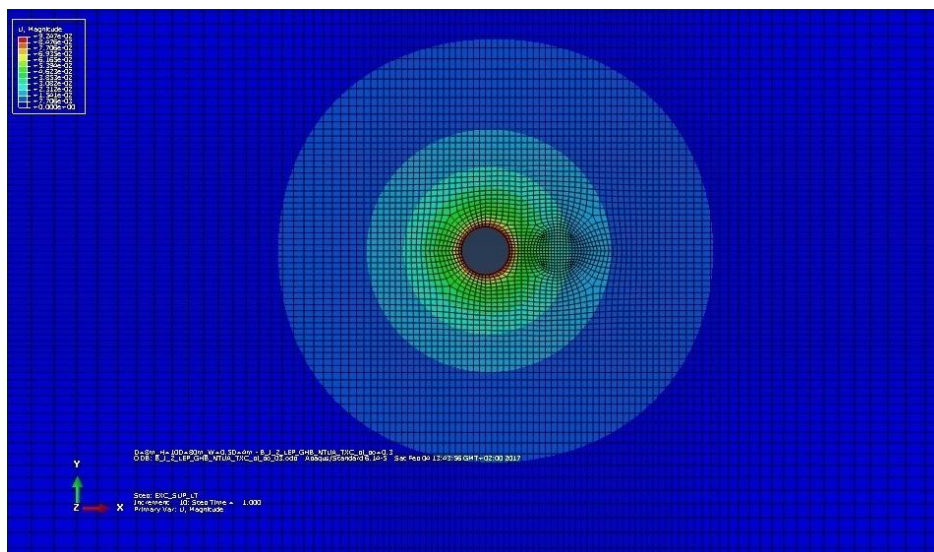


Εικόνα 4.3: Παραμένουσες-πλαστικές παραμορφώσεις, μετά την εκσκαφή και υποστήριξη της «μονής» σήραγγας.

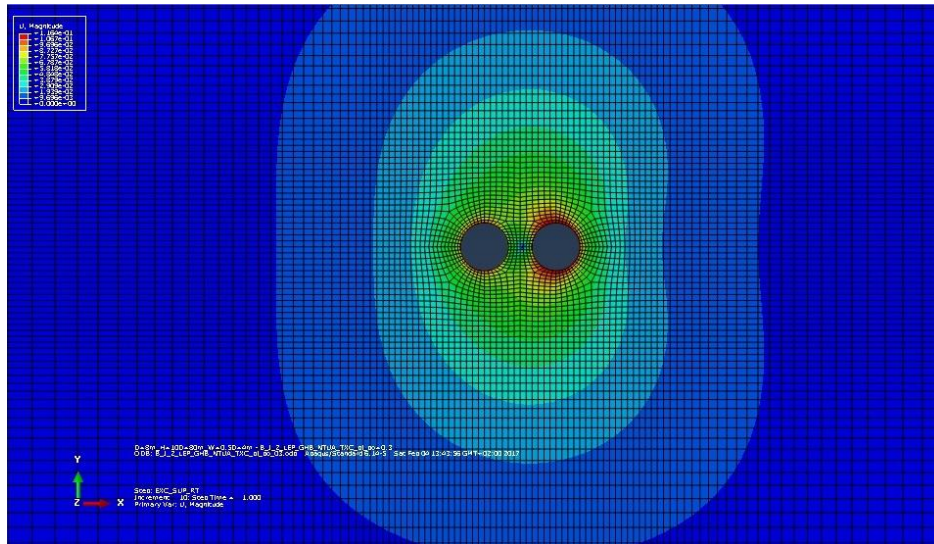


Εικόνα 4.4: Παραμένουσες-πλαστικές παραμορφώσεις στο τέλος της διαδικασίας, μετά την εκσκαφή και υποστήριξη της «δεύτερης» σήραγγας.

Τέλος, παρουσιάζονται οι μετακινήσεις (U) που αναπτύσσονται στις δύο σήραγγες (εικόνες 4.5 και 4.6), τόσο στο στάδιο διάνοιξης της ανεξάρτητης αριστερής σήραγγας (βήμα 3), όσο και στο τελικό στάδιο μετά την εκσκαφή και υποστήριξη και των δύο σηράγγων (βήμα 5).



Εικόνα 4.5: Αναπτυσσόμενες μετακινήσεις κατά την εκσκαφή και υποστήριξη της αριστερής (SingleLT) σήραγγας



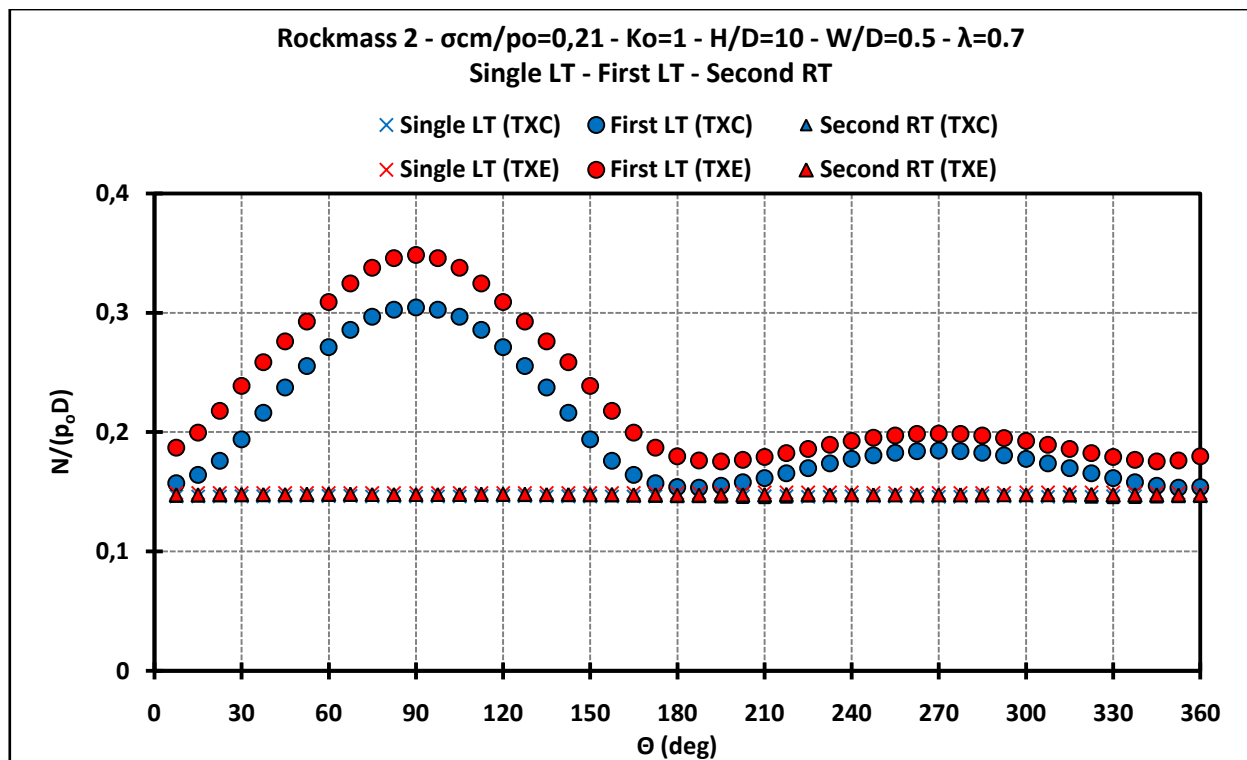
Εικόνα 4.6: Αναπτυσσόμενες μετακινήσεις μετά την εκσκαφή και υποστήριξης της «δεύτερης» (SecondRT) σήραγγας

Από τις παραπάνω εικόνες 4.4 και 4.5 παρατηρείται αρχικά μία ομοιομορφία στις μετακινήσεις του εδάφους κατά την εκσκαφή και υποστήριξη της ανεξάρτητης- αρχικής αριστερής σήραγγας, που οφείλεται στην ομοιομορφία και του πεδίου των τάσεων αφού για $K_0=1$ η σύγκλιση της σήραγγας είναι ομοιόμορφη. Μετά και την εκσκαφή και υποστήριξη και της «δεύτερης» σήραγγας, λόγω ανακατανομής του πεδίου των τάσεων γύρω από τις σήραγγες, οι μετακινήσεις παύουν να είναι ομοιόμορφες και αποκτούν τη μορφή που φαίνεται παραπάνω (εικόνα 4.5), με τις μέγιστες πλέον μετακινήσεις να παρατηρούνται πέριξ της «δεύτερης» (SecondRT) σήραγγας.

4.2.4. Επίδραση της βαθμονόμησης του καταστατικού προσομιώματος

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο αστοχίας που διέπει την απόκριση της βραχομάζας, το γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Generalized Hoek Brown το οποίο βαθμονομήθηκε όπως προαναφέρθηκε τόσο στον τριαξονικό εφελκυσμό (TXC) όσο και στην τριαξονική θλίψη (TXE). Η βαθμονόμηση στον τριαξονικό εφελκυσμό (TXE) οδηγεί σε δυσμενέστερα αποτελέσματα ως προς τα αναπτυσσόμενα φορτία στα προβλήματα σηράγγων σε σχέση με την βαθμονόμηση στην τριαξονική θλίψη (TXC) γιατί το γεωυλικό αστοχεί σε χαμηλότερα επίπεδα τασικών συνδυασμών.

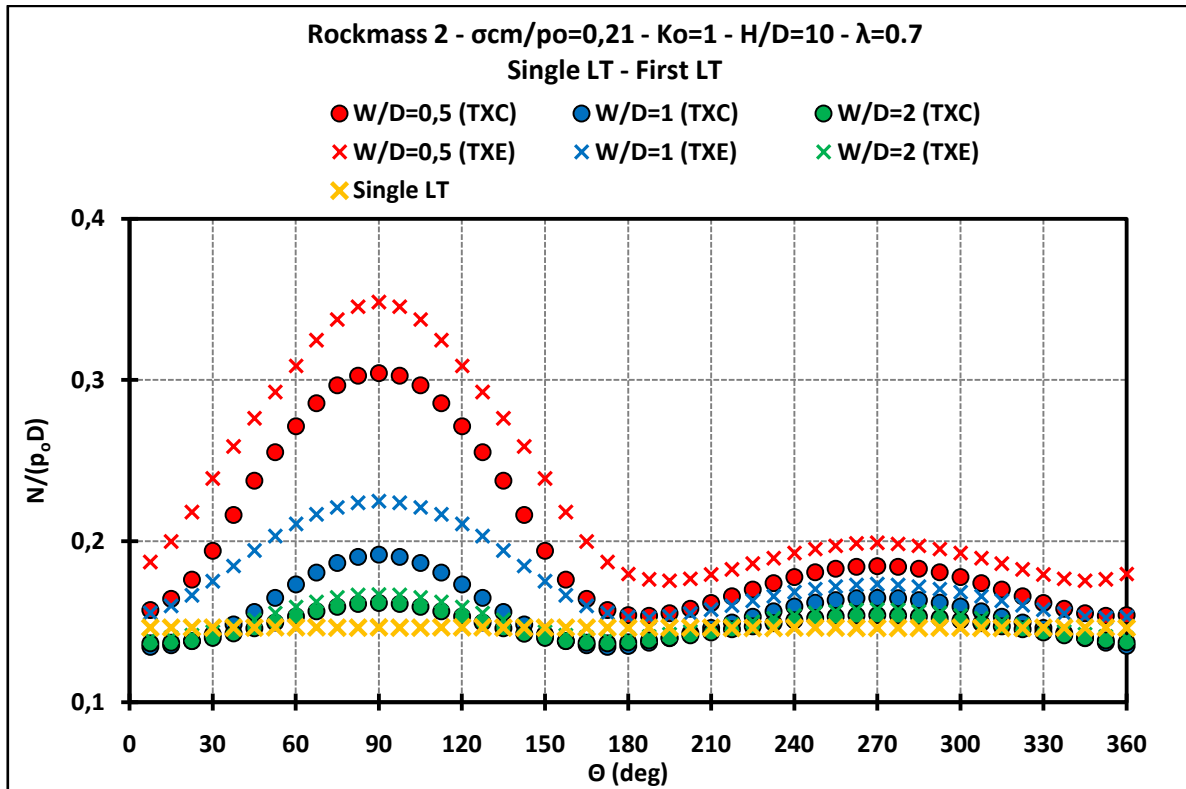
Στο γράφημα 4.9 παρουσιάζεται η επίδραση του χρησιμοποιούμενου κριτηρίου αστοχίας στις αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται και στις τρεις περιπτώσεις σηράγγων που μελετώνται (SingleLT, FirstLT και SecondRT).



Γράφημα 4.9: Επίδραση της βαθμονόμησης του καταστατικού προσομιώματος στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις στην περιφέρεια των δύο σηράγγων, για την βραχομάζα «2» και $W/D=0,5$.

Παρατηρείται στο γράφημα 4.9 ότι η επίδραση της βαθμονόμησης του καταστατικού προσομιώματος σε θλίψη ή εφελκυσμό, περιορίζεται μόνο στην «πρώτη» (FirstLT) σήραγγα που δέχεται και τα φαινόμενα της αλληλεπίδρασης κατά την διάνοξη των δύο σηράγγων, ενώ στις άλλες δύο περιπτώσεις σηράγγων (SingleLT και SecondRT) που συμπεριφέρονται σαν ανεξάρτητες η επίδραση είναι αμελητέα. Εκδηλώνεται αύξηση των αξονικών δυνάμεων στην πρώτη σήραγγα λόγω βαθμονόμησης σε τριαξονικό εφελκυσμό (TXE) σε σχέση με την βαθμονόμηση σε τριαξονική θλίψη (TXC), λόγω της ευρύτερης πλαστικής ζώνης που εμφανίζεται στη βραχομάζα και φορτίζει τις σήραγγες στην πρώτη περίπτωση (GHB_TXE).

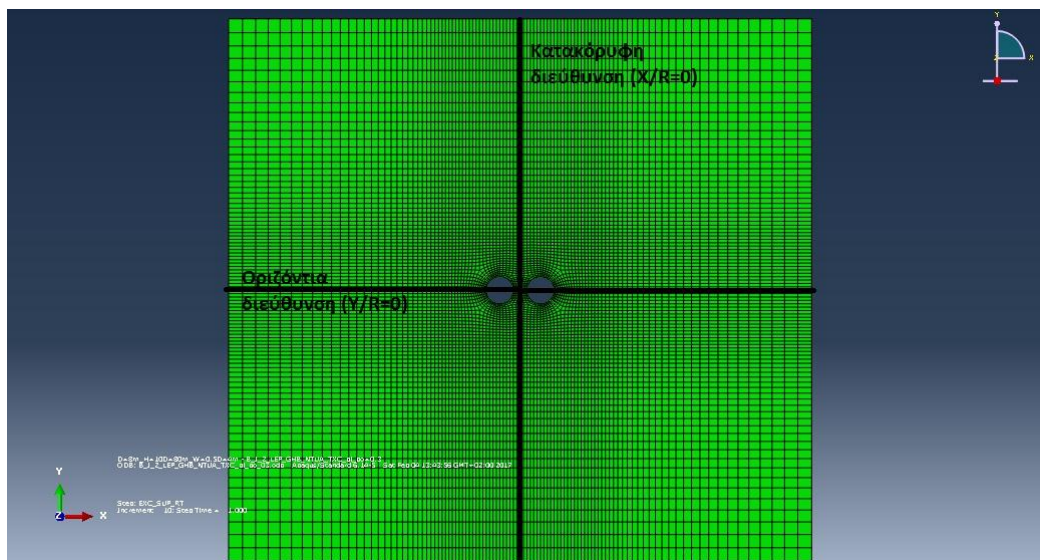
Στο γράφημα 4.10 φαίνεται η επίδραση της βαθμονόμησης του μοντέλου αστοχίας στην πρώτη σήραγγα για κάθε πλάτος πυλώνα που μελετήθηκε. Παρατηρείται μία σταδιακή μείωση της επιρροής της βαθμονόμησης καθώς το πλάτος του πυλώνα αυξάνεται και η αλληλεπίδραση μεταξύ των σηράγγων αμβλύνεται, μιας και τα στοιχεία του πυλώνα φορτίζονται λιγότερο και αστοχούν σε μικρότερο εύρος.



Γράφημα 4.10: Επίδραση της βαθμονόμησης του καταστατικού προσομοιώματος στις αναπτυσσόμενες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις της «πρώτης» σήραγγας, για κάθε πλάτος πυλώνα, $\lambda=0,7$ και για την βραχομάζα «2»

4.2.5. Τάσεις και μετακινήσεις της βραχομάζας στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση

Εκτός των τάσεων, δυνάμεων και ροπών κάμψης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της άμεσης επένδυσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μορφή των τάσεων του εδάφους στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση, κατά τον άξονα x-x και άξονα γ-γ, αντίστοιχα μετά την διάνοιξη και υποστήριξη κάθε μιας εκ των δύο γειτονικών σηράγγων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των οριζόντιων και κατακόρυφων τάσεων και μετακινήσεων της περιβάλλουσας βραχομάζας, τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση για $Y/R=0$ και $X/R=0$ αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.7. Ταυτόχρονα παρουσιάζεται και η επίδραση των διαφόρων μεταβλητών παραμέτρων που μελετήθηκαν, στα παραπάνω μεγέθη. Όλες οι αναλύσεις παρουσιάζονται για την περίπτωση της βαθμονόμησης του αριθμητικού προσομοιώματος σε τριαξονική θλίψη (GHB_TXC)



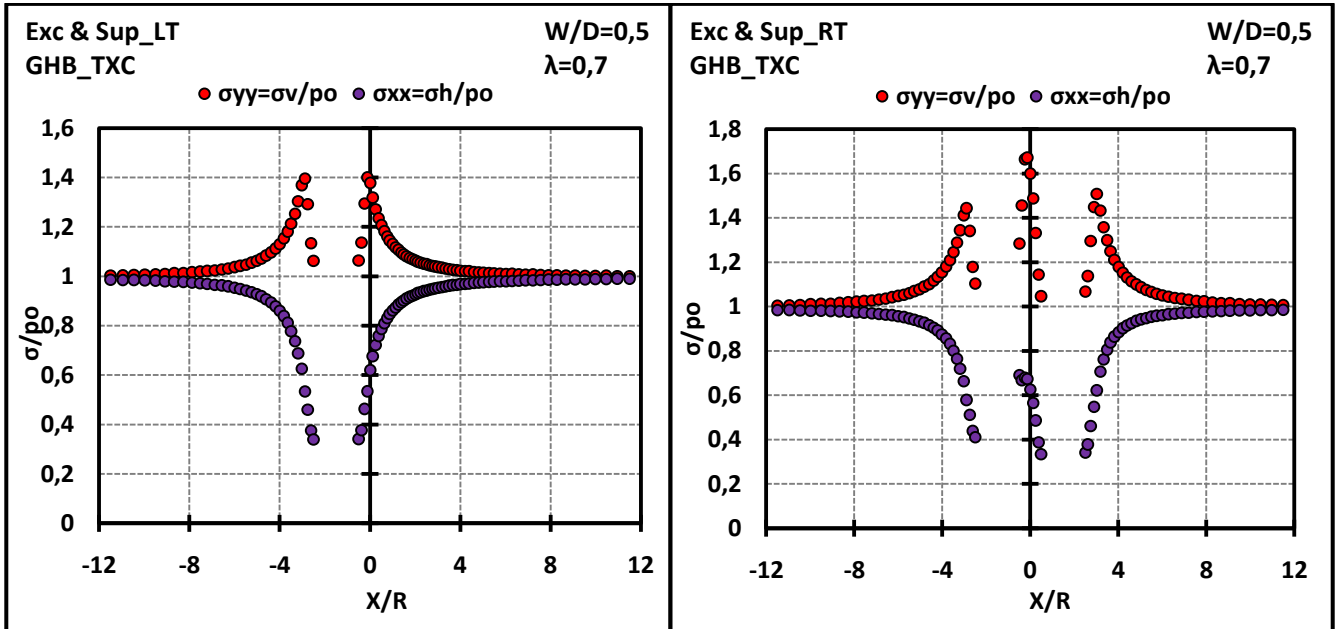
Εικόνα 4.7: Οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση πάνω στις οποίες εξάγονται οι μετακινήσεις και τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας

4.2.5.1. Τάσεις και μετακινήσεις εδάφους στην οριζόντια διεύθυνση

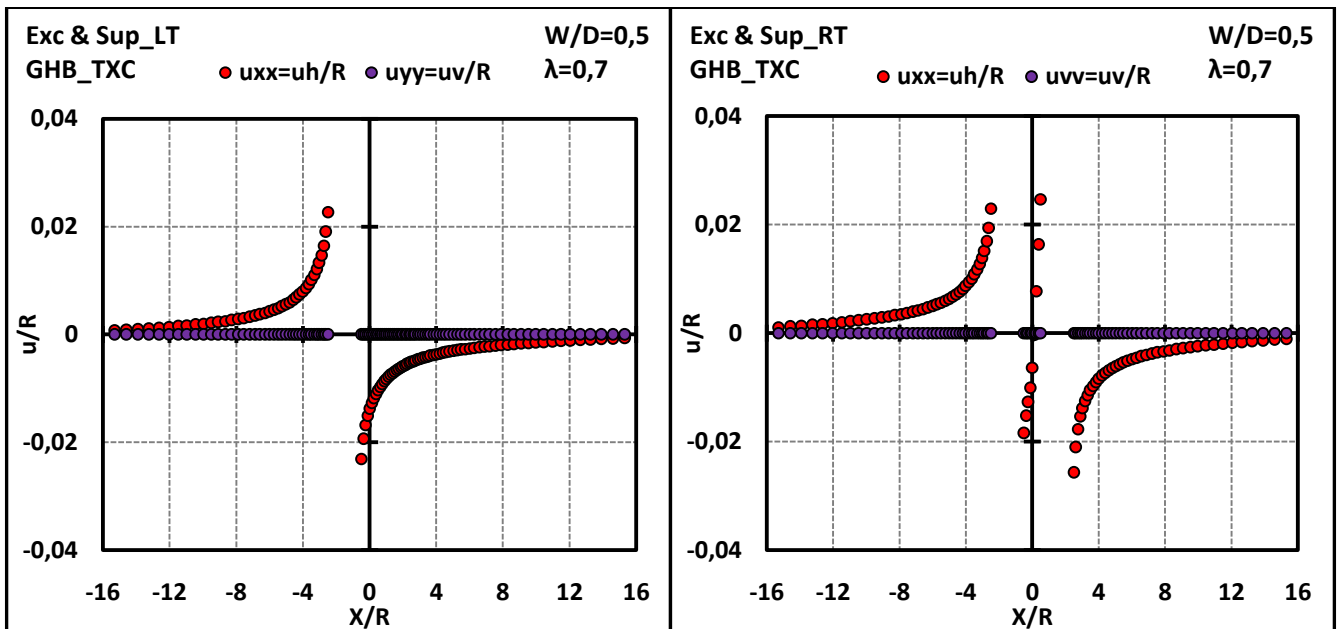
Αρχικά παρουσιάζονται οι τάσεις και οι μετακινήσεις της βραχομάζας στην οριζόντια διεύθυνση για την βραχομάζα 2 και για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$. Παρουσιάζονται εδώ οι τάσεις σ_{xx} και σ_{yy} ανηγμένες ως προς την αρχική γεωστατική τάση p_0 , και οι μετακινήσεις u_{xx} και u_{yy} ανηγμένες ως προς την ακτίνα R .

Παρατηρείται στα γραφήματα 4.11 και 4.12 ότι, αρχικά για τη «μεμονωμένη» (SingleLT) σήραγγα που διανοίγεται στη θέση $X=-1,5R$, η επιρροή αυτής της διάνοιξης στις τάσεις και στις μετακινήσεις, εκτείνεται μέχρι και $6,5R$ εκατέρωθεν του κέντρου της, με την επιρροή όμως να γίνεται εντονότερη στα $\pm 2,5R$, όπου τα μεγέθη που μελετώνται παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αύξηση. Όσον αφορά τις τάσεις, οι κατακόρυφες σ_{yy} παρουσιάζουν αύξηση καθώς φορτίζονται λόγω της τοξωτής λειτουργίας της βραχομάζας, μέχρι το σημείο όπου τα στοιχεία πλαστικοποιούνται (εμφάνιση του «σπασίματος» στην καμπύλη) καθώς αυτά δεν μπορούν να

αναλάβουν επιπρόσθετες τάσεις (γράφημα 4.11 αριστερά). Οι οριζόντιες τάσεις αντιθέτως, μειώνονται καθώς η σήραγγα συγκλίνει και αποτονώνονται, έως ότου τοποθετηθεί η άμεση υποστήριξη και το σύστημα ισορροπήσει. Οι οριζόντιες μετακινήσεις u_{xx} αυξάνονται καθώς η σήραγγα συγκλίνει κατά την αποτόνωσή της, ενώ οι κατακόρυφες u_{yy} παραμένουν μηδενικές (γράφημα 4.12 αριστερά).



Γράφημα 4.11: Τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας σ_{xx} και σ_{yy} κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση ρ_0 , για την βραχομάζα «2», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων (αριστερά) και μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αντίστοιχου δεξιού κλάδου (δεξιά).



Γράφημα 4.12: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} και u_{yy} κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για την βραχομάζα «2», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων (αριστερά) και μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αντίστοιχου δεξιού κλάδου (δεξιά).

Μετά την διάνοιξη και της «δεύτερης» σήραγγας, παρατηρείται αύξηση των κατακόρυφων τάσεων στον πυλώνα που πλέον φορτίζεται επιπλέον λόγω της εκτροπής των τάσεων της βραχομάζας πέριξ της νέας διανοιχθείσας σήραγγας. Οι κατακόρυφες και οριζόντιες τάσεις δεξιά της νέας σήραγγας ακολουθούν την πορεία όπως στην περίπτωση της αριστερής σήραγγας, ενώ στον πυλώνα παρατηρούνται έντονες πλαστικοποιήσεις των στοιχείων που αστοχούν λόγω υψηλών κατακόρυφων τάσεων, ενώ οι οριζόντιες τάσεις αυτών παρουσιάζουν κάποιες συσσωρεύσεις στη συγκεκριμένη περιοχή (γράφημα 4.11 δεξιά).

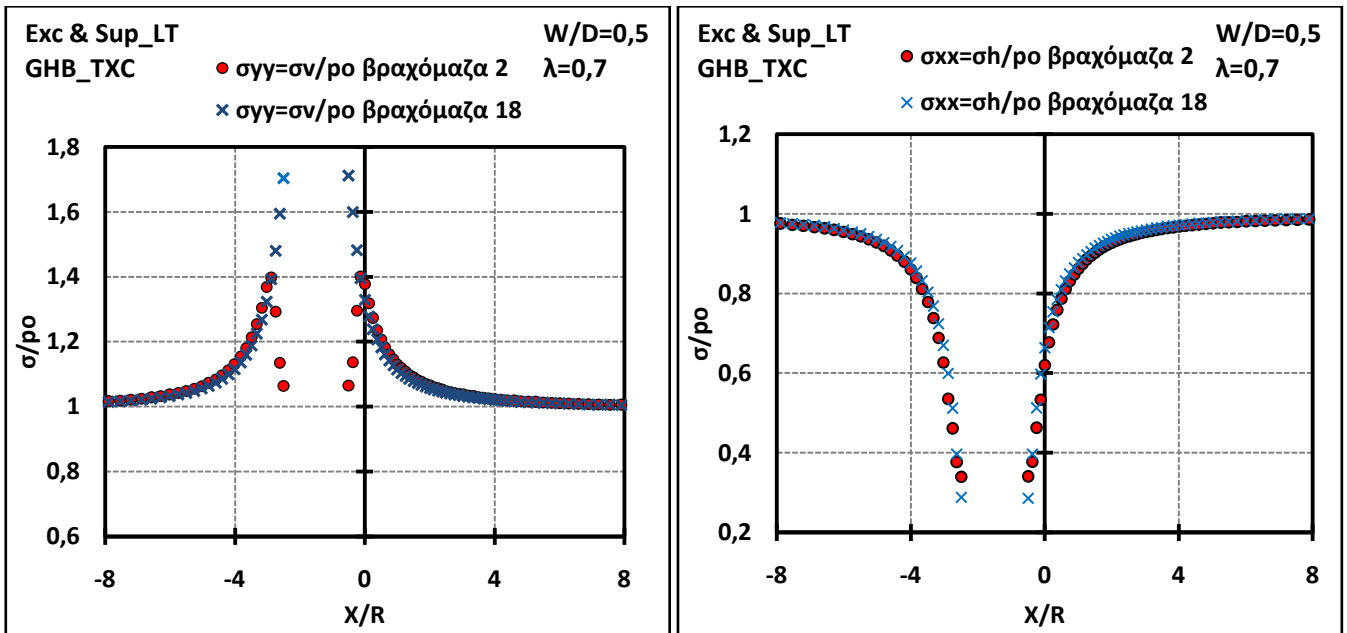
Οι οριζόντιες μετακινήσεις u_{xx} δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές δεξιά της νέας σήραγγας σε σχέση με αυτές στην περίπτωση της μεμονωμένης, εκτός του ότι εμφανίζονται ελάχιστα μεγαλύτερες, ενώ στον πυλώνα επηρεάζονται από την σύγκλιση της νέας σήραγγας με αποτέλεσμα να παρατηρείται μία σχετική μετακίνηση των στοιχείων του πυλώνα προς τα δεξιά. (Γράφημα 4.12 δεξιά) Οι κατακόρυφες μετακινήσεις u_{yy} παραμένουν μηδενικές.

➤ Επιρροή ποιότητας βραχομάζας

Στη συγκεκριμένη ενότητα γίνεται μία διερεύνηση της επίδρασης της ποιότητας της βραχομάζας στην οποία διανοίγονται οι δίδυμες σήραγγες, στις τάσεις και μετακινήσεις της βραχομάζας. Οι αναλύσεις επικεντρώνονται τόσο στην διάνοιξη και υποστήριξη της αριστερής σήραγγας όσο και της δεξιάς, και στην επίδραση αυτών στις τάσεις και μετακινήσεις του της βραχομάζας για $\lambda=0,7$ και $W/D=0,5$, και για 2 βραχομάζες, τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον πίνακα 4.3. Επιλέγεται μία ασθενής βραχομάζα (2) και μία ισχυρή (18), ώστε να γίνει πιο ευδιάκριτη η επιρροή.

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά των δύο βραχομαζών που μελετώνται ως προς την επίδρασή τους στις τάσεις και μετακινήσεις της βραχομάζας στην οριζόντια διεύθυνση

Βραχομάζες Συντελεστής οριζοντίων τάσεων	Γεωλογικός δείκτης	Ειδικό βάρος βραχομάζας	Αντοχή άφρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη	Αντοχή βραχομάζας σε μονοαξονική θλίψη	Λόγος αντοχής βραχομάζας προς αρχική κατακόρυφη γεωστατική τάση	Μέτρο ελαστικότητας βραχομάζας	Λόγος Poisson	Ισοδύναμες παράμετροι διατμητικής αντοχής - MC(tunnels)	Γωνία εσωτερικής τριβής	Γωνία διαστολικότητας	
α/α	K_0	GSI	γ (MN/m ³)	σ_{ei} (Mpa)	σ_{cm} (Mpa)	σ_{cm}/P_0	E_m (Mpa)	ν	c (Mpa)	ϕ (°)	δ (°)
2	1	10	0.025	10	0.43	0.21	106.8	0.3	0.079	21.1	5.3
18	1	30	0.025	10	0.91	0.46	284.8	0.3	0.159	29.4	7.3

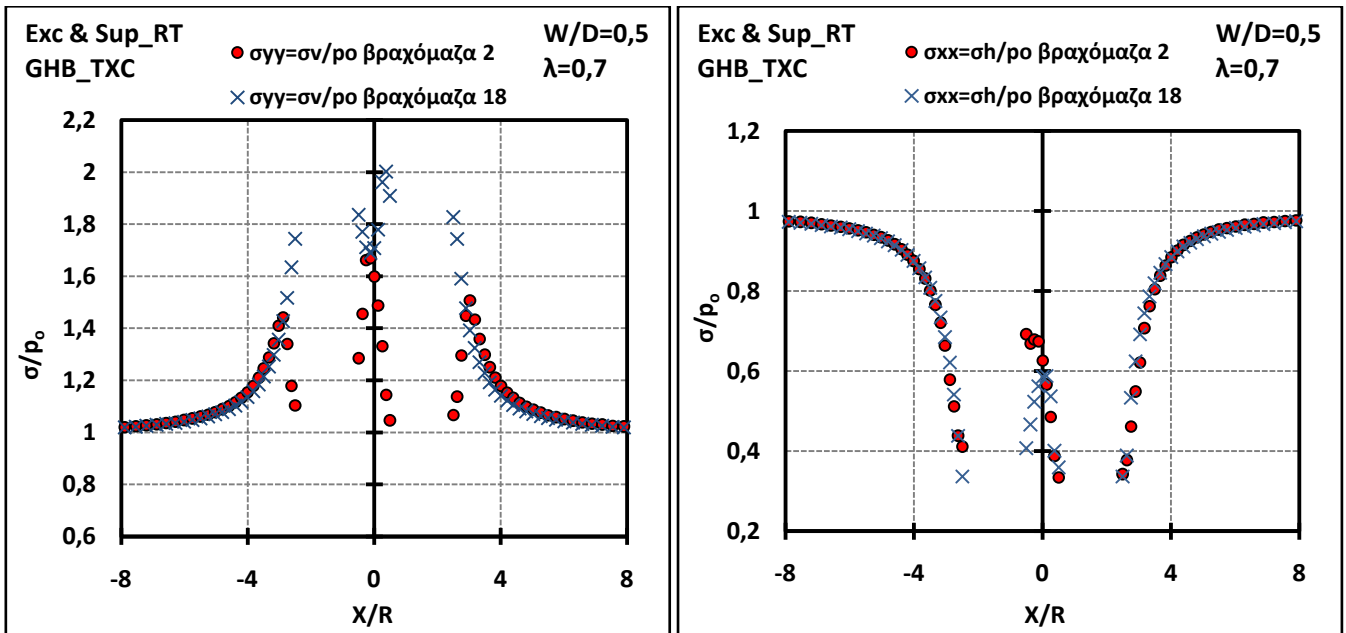


Γράφημα 4.13: Τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας σ_{yy} (αριστερά) και σ_{xx} (δεξιά) κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση ρ_0 , για τις βραχομάζες «2» και «18», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σήραγγων.

Στο παραπάνω γράφημα 4.13, οι οριζόντιες τάσεις σ_{xx} δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές για τις περιπτώσεις των δύο βραχομαζών. Αντίθετα οι κατακόρυφες τάσεις σ_{yy} παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις για τις δύο περιπτώσεις, με τις τάσεις που αναπτύσσονται στην ισχυρή βραχομάζα να είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές της ασθενούς. Αυτό οφείλεται στο ότι η ισχυρή βραχομάζα διαταράσσεται λιγότερο κατά την διάνοιξη της σήραγγας με αποτέλεσμα την πλαστικοποίηση λιγότερων στοιχείων τα οποία είναι ικανά να αναλάβουν τις αυξημένες κατακόρυφες τάσεις. Αντίθετα στην ασθενή βραχομάζα τα στοιχεία κοντά στη σήραγγα πλαστικοποιούνται και αδυνατούν να αναλάβουν τις νέες αυτές κατακόρυφες τάσεις.

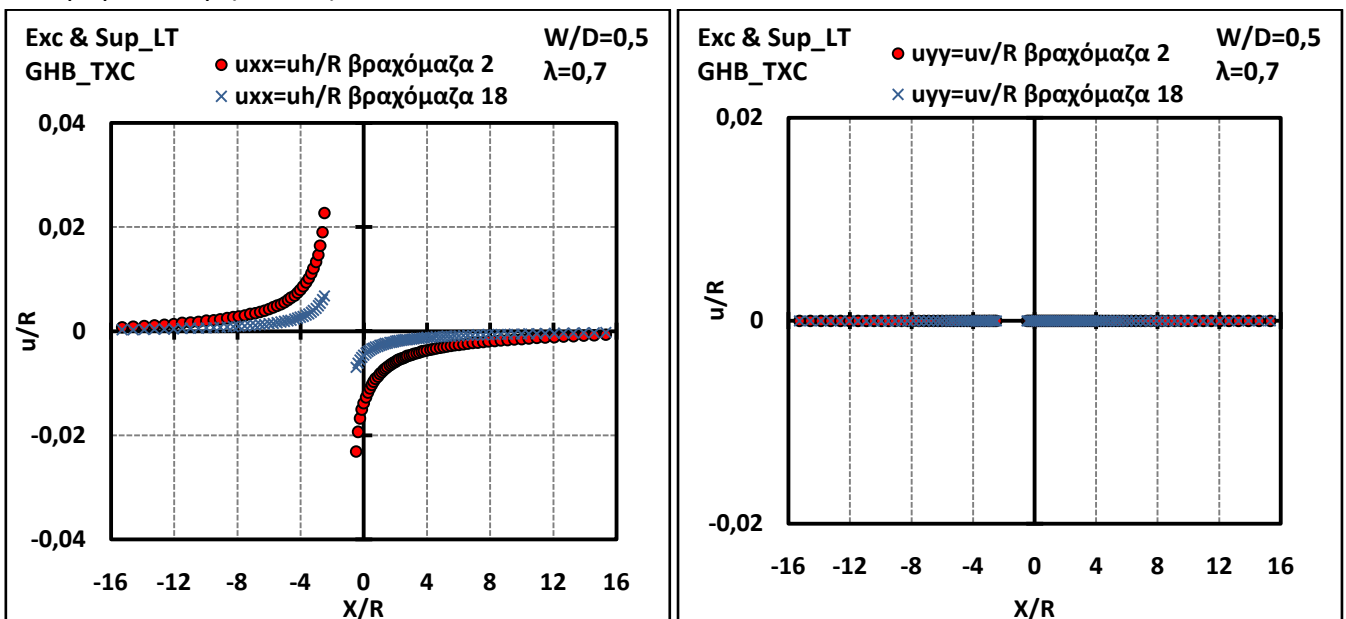
Το ίδιο ισχύει και στο παρακάτω γράφημα 4.14, όπου οι κατακόρυφες τάσεις αναλαμβάνονται πλήρως από τα στοιχεία της βραχομάζας 18 σε αντίθεση από αυτά της βραχομάζας 2 που φαίνεται ότι αστοχούν και πλαστικοποιούνται, χάνοντας την ικανότητα να παραλάβουν τις τάσεις. Ιδιαίτερα στην περιοχή του πυλώνα, φαίνεται χαρακτηριστικά η καλύτερη κατανομή που παρουσιάζουν οι τάσεις σ_{yy} στην ισχυρή βραχομάζα, σε αντίθεση με την ασθενή όπου παρατηρούνται έντονα φαινόμενα πλαστικοποιήσεων και αστοχιών των στοιχείων που επηρεάζονται από το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.

Επίσης παρατηρείται μία ανακούφιση των οριζόντιων τάσεων σ_{xx} και μία καλύτερη κατανομή αυτών, στην περιοχή του πυλώνα στην ισχυρή βραχομάζα 18, σε σχέση με τη βραχομάζα 2, όπου εξαλείφονται οι συσσωρεύσεις των τάσεων που παρατηρούνται στην δεύτερη περίπτωση βραχομάζας.



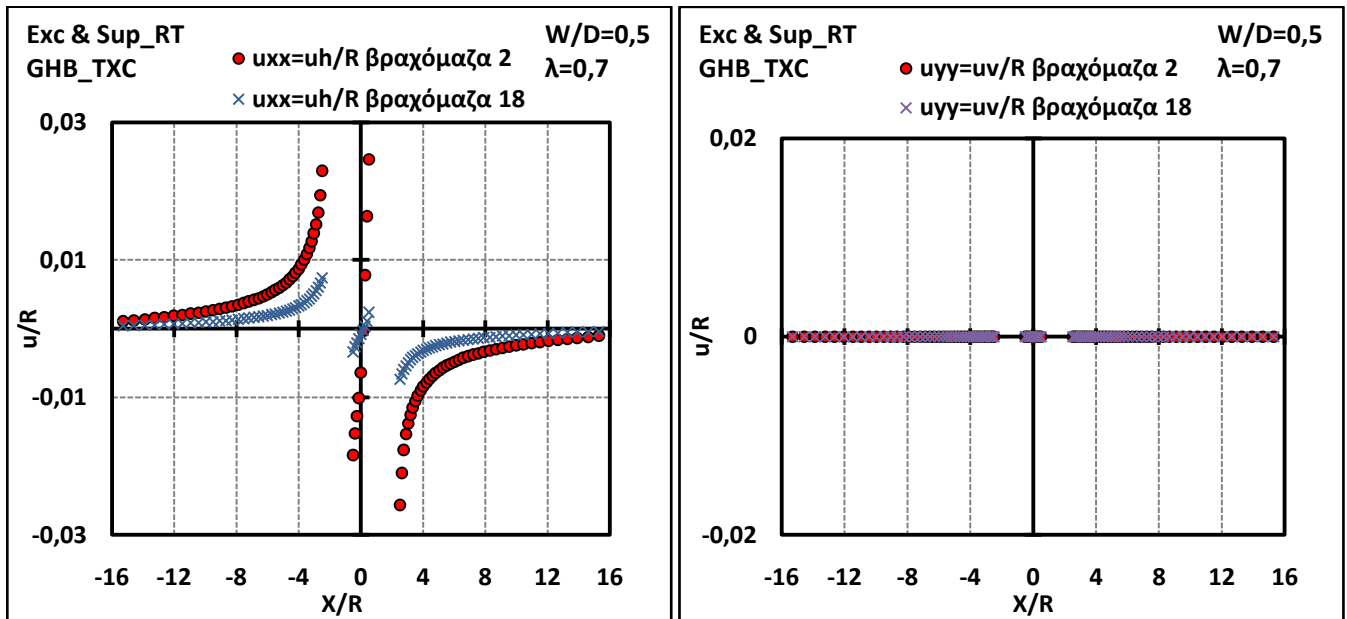
Γράφημα 4.14: Τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας σ_{yy} (αριστερά) και σ_{xx} (δεξιά) κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση ρ_0 , για τις βραχομάζες «2» και «18», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του δεξιού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

Παρόμοια λογική με την παραπάνω ακολουθείται και στην περίπτωση των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων του εδάφους στην οριζόντια διαμήκη διεύθυνση, με την διαφορά ότι τώρα στην ισχυρότερη βραχομάζα αναπτύσσονται μικρότερες μετακινήσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες της ασθενούς, λόγω του γεγονότος ότι ο ρυθμός ανάπτυξης ελαστικών παραμορφώσεων είναι μικρότερος από το ρυθμό ανάπτυξης πλαστικών παραμορφώσεων σε μια διευρυμένη πλαστική περιοχή (όπως αυτής που εμφανίζεται στη βραχομάζα 2). Έτσι, όπως φαίνεται στο γράφημα 4.14 οι κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την διάνοιξη της αριστερής σήραγγας είναι κατά πολύ μεγαλύτερες στην ασθενή βραχομάζα σε σχέση με την ισχυρή, ενώ οι κατακόρυφες μετακινήσεις παραμένουν μηδενικές.



Γράφημα 4.15: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} (αριστερά) και u_{yy} (δεξιά) κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για τις βραχομάζες «2» και «18», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

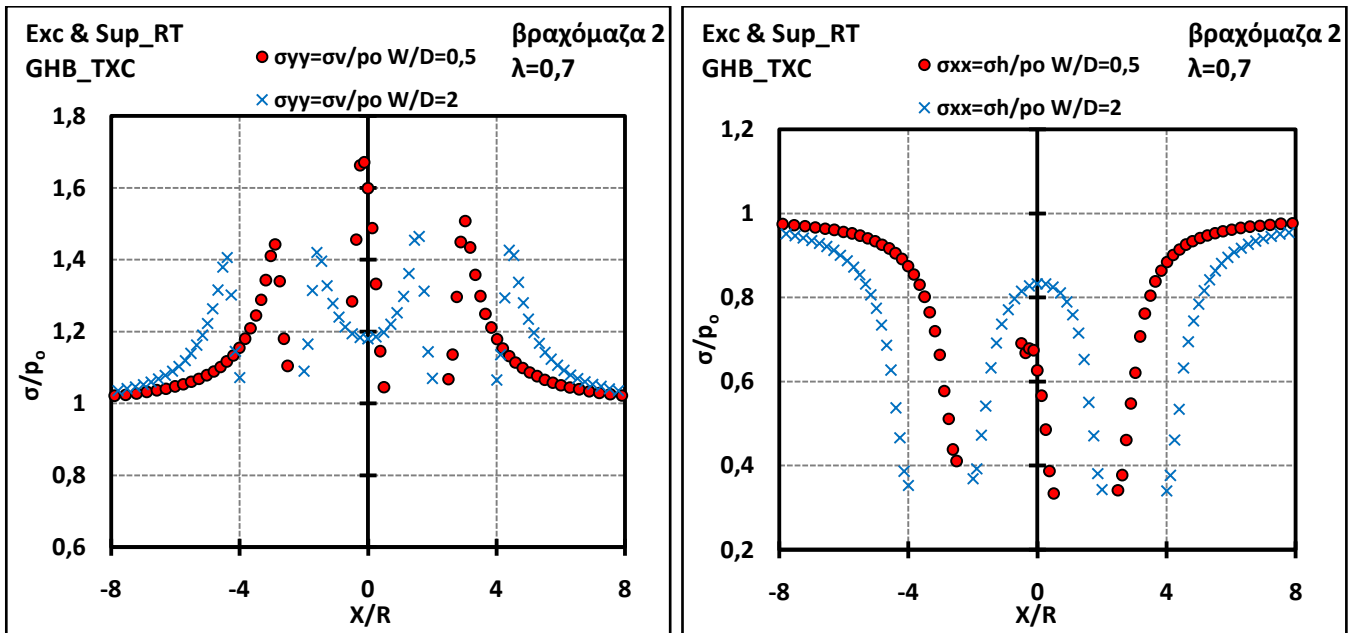
Ανάλογα μεγέθη όπως παραπάνω, επαναλαμβάνονται για τις μετακινήσεις αριστερά και δεξιά των δύο σηράγγων μετά και την εκσκαφή και υποστήριξη και της δεξιάς σήραγγας. Στην περιοχή του πυλώνα παρατηρείται μία μετακίνηση των στοιχείων αυτού προς τα δεξιά καθώς διανοίγεται και η δεύτερη σήραγγα λόγω της σύγκλισής της, η οποία γίνεται εντονότερη καθώς πλησιάζουμε στη νέα σήραγγα δηλαδή για $X/R > 0$ (γράφημα 4.16 αριστερά) Οι κατακόρυφες τάσεις, όπως και προηγουμένως, λόγω συμμετρίας του προβλήματος, συνεχίζουν να παραμένουν μηδενικές (γράφημα 4.16 δεξιά). Οι παραπάνω μετακινήσεις όπως αναφέρθηκε, είναι κατά πού μεγαλύτερες και το φαινόμενο εντονότερο, στην διάνοιξη των σηράγγων στην ασθενή βραχομάζα.



Γράφημα 4.16: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} (αριστερά) και u_{yy} (δεξιά) κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για τις βραχομάζες «2» και «18», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του δεξιού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

➤ Επιρροή πλάτους πυλώνα

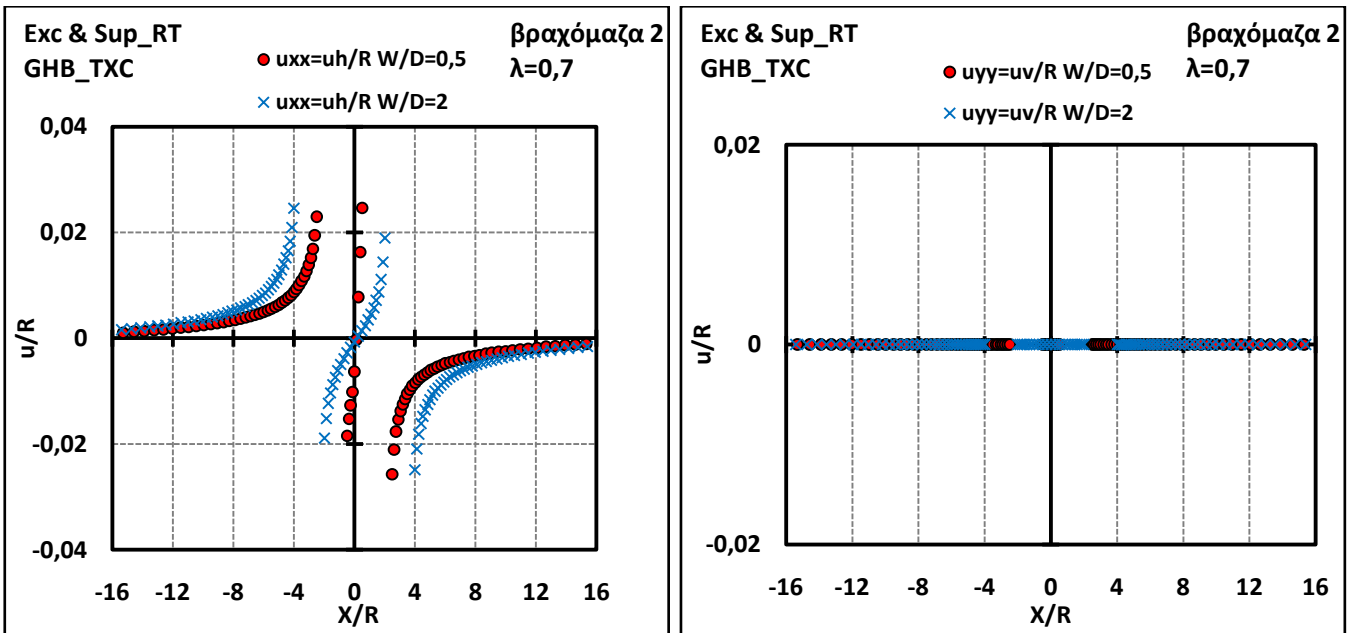
Άλλος ένας βασικός παράγοντας που μελετάται ως προς την επίδρασή του στις τάσεις και μετακινήσεις της βραχομάζας, είναι αυτός του πλάτους πυλώνα μεταξύ των δίδυμων σηράγγων. Για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0,7$ και για την ασθενή βραχομάζα 2, εξετάζονται 2 πλάτη πυλώνα ($W/D=0,5$ και $W/D=2$) όπως φαίνεται παρακάτω. Μελετάται μόνο η περίπτωση μετά την διάνοιξη και της δεύτερης δεξιάς σήραγγας, αφού τότε έχει ουσιαστικά ρόλο η έννοια του πλάτους πυλώνα.



Γράφημα 4.17: Τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας $\sigma_{\gamma\gamma}$ (αριστερά) και σ_{xx} (δεξιά) κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση ρ_0 , για τη βραχομάζα «2», $\lambda=0,7$, $W/D=0,5$ και $W/D=2$ μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του δεξιού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

Στο παραπάνω γράφημα 4.17, παρατηρείται ο ανακουφιστικός ρόλος που διαδραματίζει η αύξηση του πλάτους πυλώνα για τον ίδιο τον πυλώνα. Φαίνεται καθαρά η διαφοροποίηση της κατανομής των κατακόρυφων τάσεων που αναπτύσσονται στις δύο περιπτώσεις, όπου στην περίπτωση του μεγάλου πυλώνα είναι πιο ομαλή σε σχέση με αυτή του μικρού πυλώνα που φαίνεται έντονα διαταραγμένη με πολλά εδαφικά στοιχεία να αστοχούν. Οι οριζόντιες τάσεις παρουσιάζονται γενικώς αυξημένες εντός πυλώνα και καλύτερα κατανεμημένες για $W/D=2$ σε σχέση με αυτές για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$ γεγονός που δρα ευμενώς στην ευστάθεια των στοιχείων του πυλώνα, μιας και μικρές οριζόντιες τάσεις σε συνδυασμό με μικρές κατακόρυφες, οδηγούν τα στοιχεία μακριά από την περιβάλλουσα αστοχίας του κριτηρίου αστοχίας που χρησιμοποιείται.

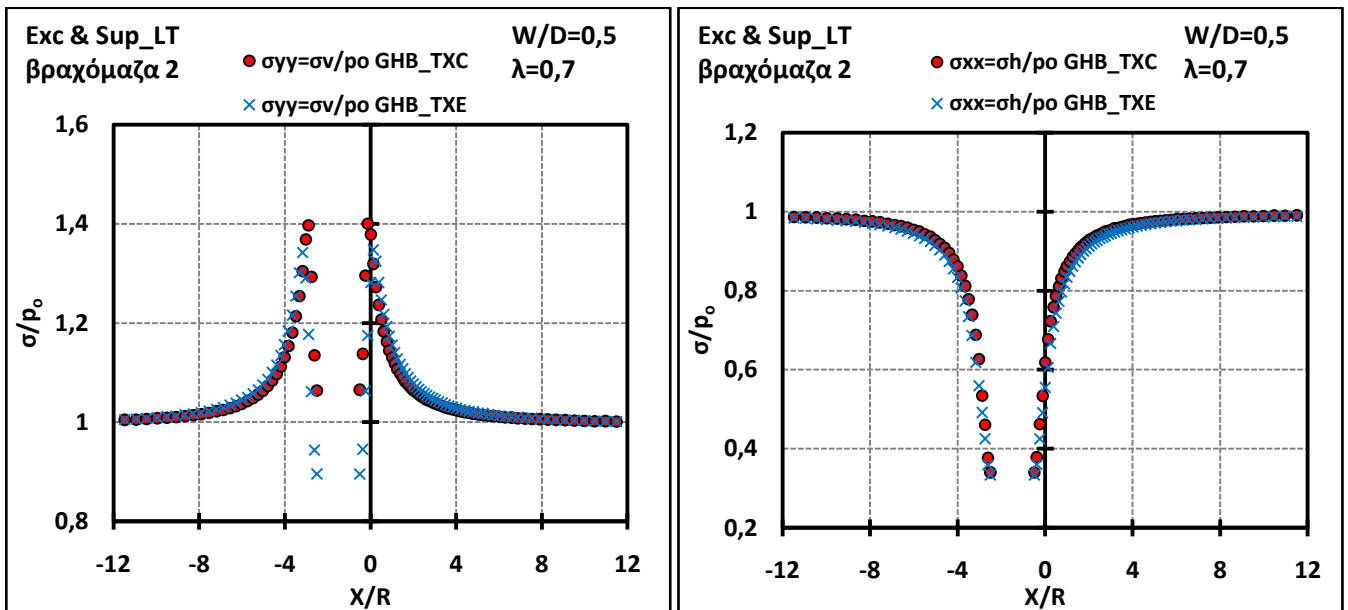
Οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται δεν παρουσιάζουν την ίδια διακύμανση για τα δύο πλάτη πυλώνα όπως οι αντίστοιχες τάσεις. Αντίθετα τα μεγέθη των κατακόρυφων μετακινήσεων παρουσιάζουν ομοιότητες τόσο στη μορφή όσο και στις απόλυτες τιμές που αναπτύσσονται για τα δύο πλάτη πυλώνα, με μία μικρή διαφοροποίηση να παρατηρείται στο δεξιό τμήμα του πυλώνα ($X/R > 0$) όπου το εντονότερα διαταραγμένο πεδίο στον πυλώνα για μικρό πλάτος αυτού οδηγεί σε λίγο μεγαλύτερες μετακινήσεις αυτού προς τα δεξιά. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις παραμένουν κι εδώ μηδενικές (γράφημα 4.18).



Γράφημα 4.18: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} (αριστερά) και u_{yy} (δεξιά) κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για τη βραχομάζα «2», $\lambda=0,7$, $W/D=0,5$ και $W/D=2$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του δεξιού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

➤ **Επιρροή βαθμονόμησης του καταστατικού προσομοιώματος**

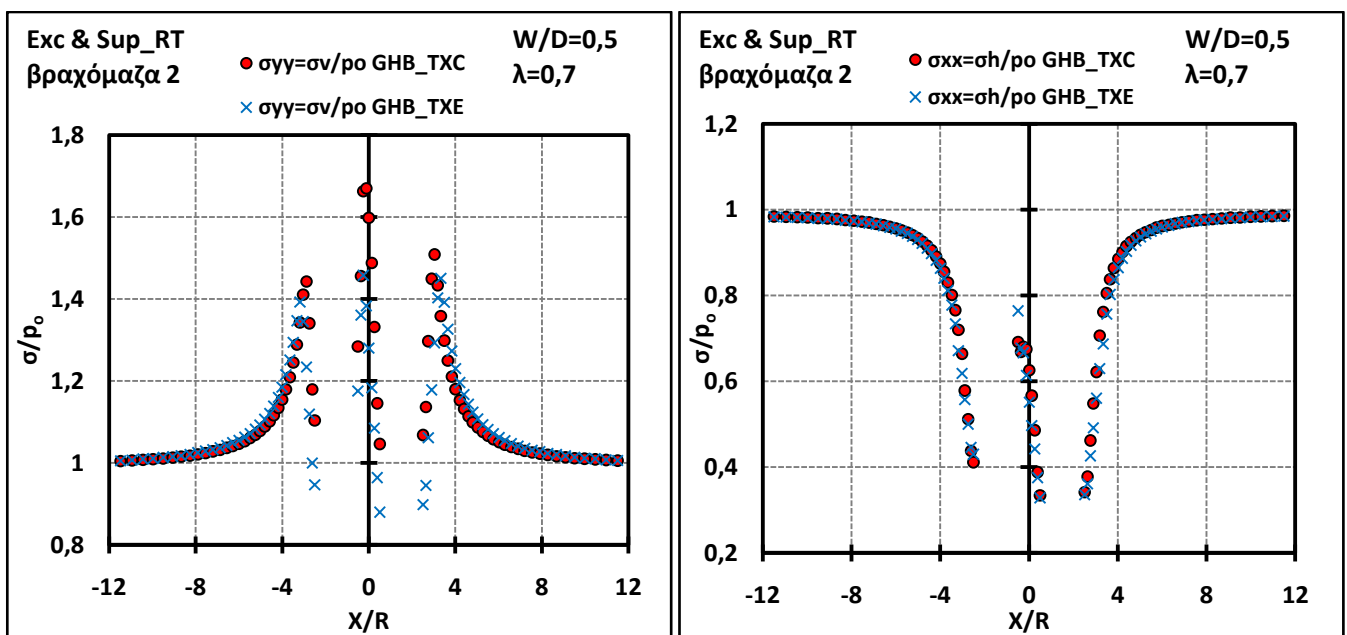
Ιδιαίτερο ρόλο στην τελική εξαγωγή των αποτελεσμάτων, τόσο για τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις στην υποστήριξη όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, όσο και για τις τάσεις και μετακινήσεις που αναπτύσσονται στη βραχομάζα και παρουσιάζονται παρακάτω, διαδραματίζει η βαθμονόμηση του αριθμητικού προσομοιώματος. Αυτή καθορίζει ουσιαστικά τα όρια αστοχίας για κάθε στοιχείο της βραχομάζας, κι επομένως και τις τάσεις που τελικώς αυτά είναι ικανά να αναλάβουν. Εδώ συγκρίνεται η επιρροή της βαθμονόμησης του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown σε τριαξονική θλίψη (ΤΧΣ) και σε τριαξονικό εφελκυσμό (ΤΧΕ).



Γράφημα 4.19: Τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας σ_{yy} (αριστερά) και σ_{xx} (δεξιά) κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση p_0 , για τη βραχομάζα «2», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$ και 2 βαθμονομήσεις του καταστατικού προσομοιώματος (GHB_TXC & GHB_TXE) μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

Από το πρώτο γράφημα 4.19, επιβεβαιώνεται ότι η βαθμονόμηση σε εφελκυσμό είναι γενικώς πιο συντηρητική προσέγγιση από την βαθμονόμηση σε θλίψη, με την έννοια ότι η καμπύλη αστοχίας της πρώτης στο διάγραμμα σ-τ έχει μικρότερα όρια σε σχέση αυτά της δεύτερης. Έτσι παρατηρείται ανάπτυξη μεγαλύτερων κατακόρυφων φορτίων σ_{yy} από τα στοιχεία της βραχομάζας, έστω και κατά μικρό ποσοστό, κατά την βαθμονόμηση σε θλίψη σε σχέση με την βαθμονόμηση σε εφελκυσμό, πριν αυτά πλαστικοποιηθούν και χάσουν την ικανότητα παραλαβής υψηλών τάσεων. Οι οριζόντιες τάσεις παρατηρείται ότι μειώνονται με τον ίδιο ρυθμό όσο η σήραγγα συγκλίνει και στις δύο περιπτώσεις.

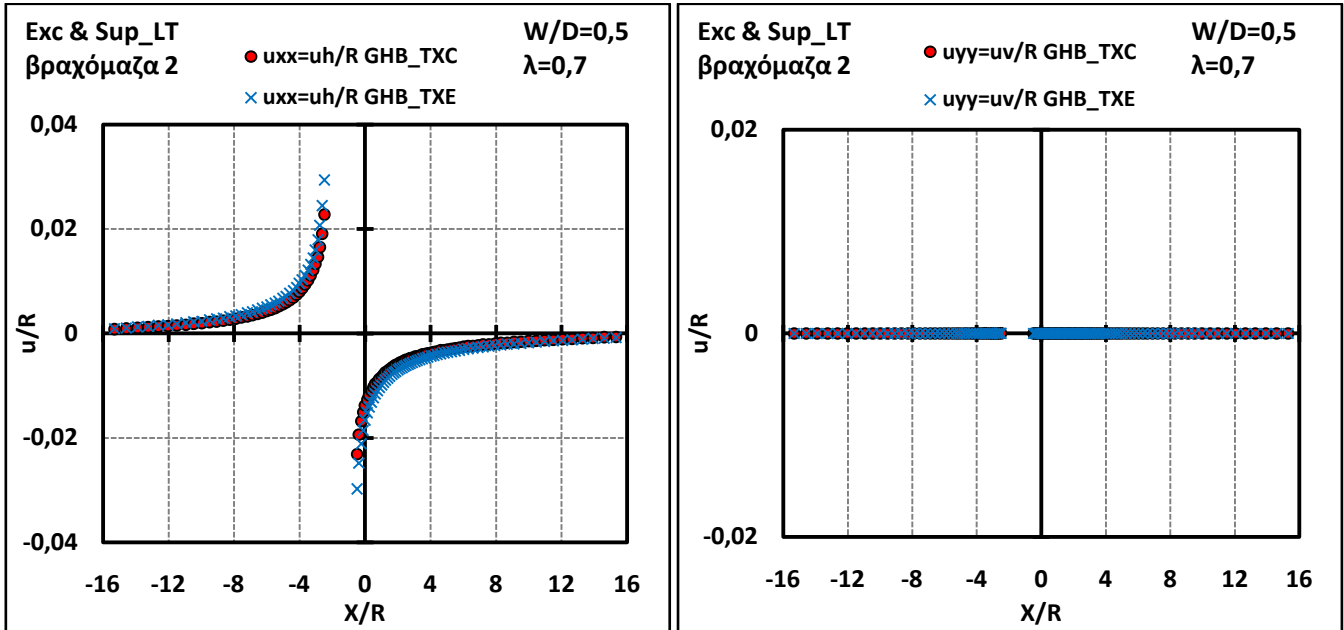
Μετά την διάνοιξη και της δεξιάς σήραγγας, το παραπάνω φαινόμενο συνεχίζει να παρατηρείται στα σημεία κοντά στις σήραγγες όπου δέχονται και τις μεγαλύτερες επιπτώσεις λόγω της διάνοιξης των δύο κλάδων, ενώ αυτό μεγεθύνεται στο τμήμα του πυλώνα μεταξύ των δύο σηράγγων, το οποίο δέχεται και τις μεγαλύτερες ανακατατάξεις τάσεων και γενικότερα διαταραχές λόγω του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Όπως φαίνεται και στο γράφημα 4.20, αυτή η αύξηση στις τάσεις λόγω των δύο διαφορετικών βαθμονομήσεων του κριτηρίου αστοχίας, μεγιστοποιείται για την περίπτωση της τριαξονική θλίψης (ΤΧΧ) σε σχέση με τον τριαξονικό εφελκυσμό (ΤΧΕ). Οι αντίστοιχες μεταβολές για την περίπτωση των οριζόντιων τάσεων είναι μικρότερες ενώ φαίνεται ότι η βαθμονόμηση σε τριαξονικό εφελκυσμό δίνει μεγαλύτερες τιμές για τις σ_{xx} για τα σημεία γύρω από τις σήραγγες, και ιδιαίτερα για κάποια στοιχεία της βραχομάζας εντός του πυλώνα (γράφημα 4.20).



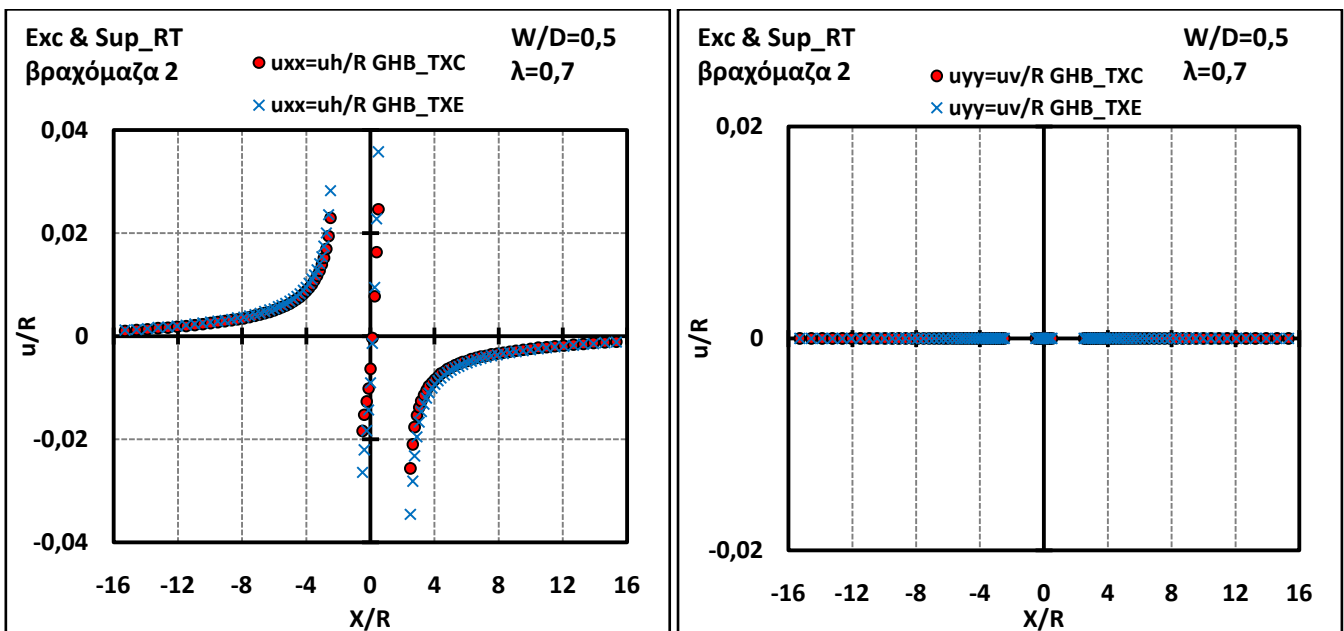
Γράφημα 4.20: Τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας σ_{yy} (αριστερά) και σ_{xx} (δεξιά) κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση ρ_0 , για τη βραχομάζα «2», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$ και 2 βαθμονομήσεις του καταστατικού προσομοιώματος (GHB_TXC & GHB_TXE) μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του δεξιού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

Αναφορικά με την επίδραση της βαθμονόμησης στις οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις των στοιχείων της βραχομάζας, ισχύει και εδώ αυτό που αναφέρθηκε και παραπάνω, δηλαδή ότι πιο διευρυμένη ζώνη πλαστικοποιημένων στοιχείων οδηγεί σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις και

κατά συνέπεια μετακινήσεις αυτών, μιας και ο ρυθμός με τον οποίο εξελίσσονται οι πλαστικές παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό ανάπτυξης των ελαστικών. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά τόσο στο στάδιο της διάνοιξης της πρώτης σήραγγας (γράφημα 4.21), όσο και στο στάδιο της διάνοιξης και της δεύτερης (γράφημα 4.22), όπου οριζόντιες μετακινήσεις u_{xx} (οι κατακόρυφες μετακινήσεις u_{yy} είναι μηδενικές) για την βαθμονόμηση σε τριαξονικό εφελκυσμό (ΤΧΕ) είναι μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές για την βαθμονόμηση σε τριαξονική θλίψη (ΤΧC), και ιδιαίτερα εντός του έντονα διαταραγμένου και πλαστικοποιημένου πυλώνα.



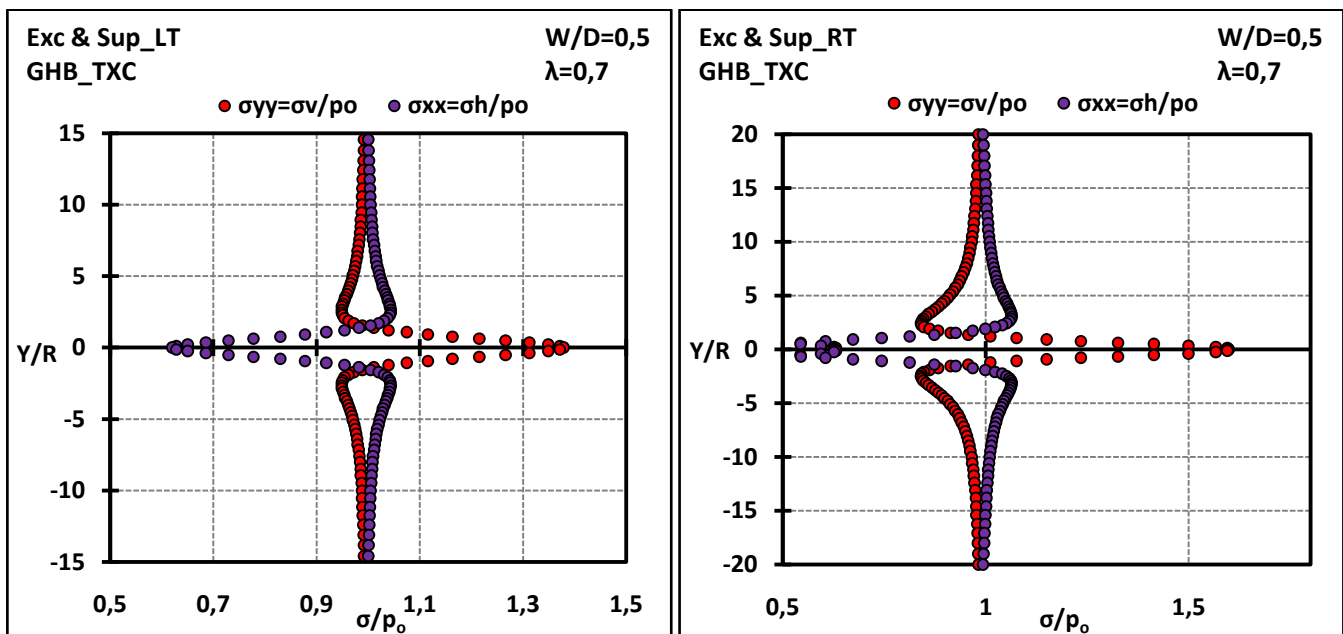
Γράφημα 4.21: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} (αριστερά) και u_{yy} (δεξιά) κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για τη βραχομάζα «2», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$ και 2 βαθμονομήσεις του καταστατικού προσομοιώματος (GHB_TXC & GHB_TXE), μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.



Γράφημα 4.22: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} (αριστερά) και u_{yy} (δεξιά) κατά την οριζόντια διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για τη βραχομάζα «2», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$ και 2 βαθμονομήσεις του καταστατικού προσομοιώματος (GHB_TXC & GHB_TXE), μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του δεξιού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

4.2.5.2. Τάσεις και μετακινήσεις στην κατακόρυφη διεύθυνση

Αφού παρουσιάστηκε η επίδραση της διάνοιξης των δίδυμων σηράγγων στις τάσεις και μετακινήσεις των στοιχείων της βραχομάζας στην οριζόντια διεύθυνση, όμοια προσεγγίζεται η επίδρασή της στις τάσεις και μετακινήσεις στην κατακόρυφη διεύθυνση για $X/R=0$ (κέντρο πυλώνα). Παρακάτω παρουσιάζεται η γενική συμπεριφορά που ακολουθούν τα συγκεκριμένα μεγέθη για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$, συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0,7$, κριτήριο αστοχίας GHB_TXC και για τις δύο φάσεις εκσκαφής και επένδυσης των δύο κλάδων. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται κι εδώ η επίδραση των παραμέτρων που μελετώνται (πλάτος πυλώνα, συντελεστής αποτόνωσης, βαθμονόμηση αριθμητικού προσομοιώματος) και γίνεται μία ποιοτική αιτιολόγηση των φαινομένων που παρατηρούνται.

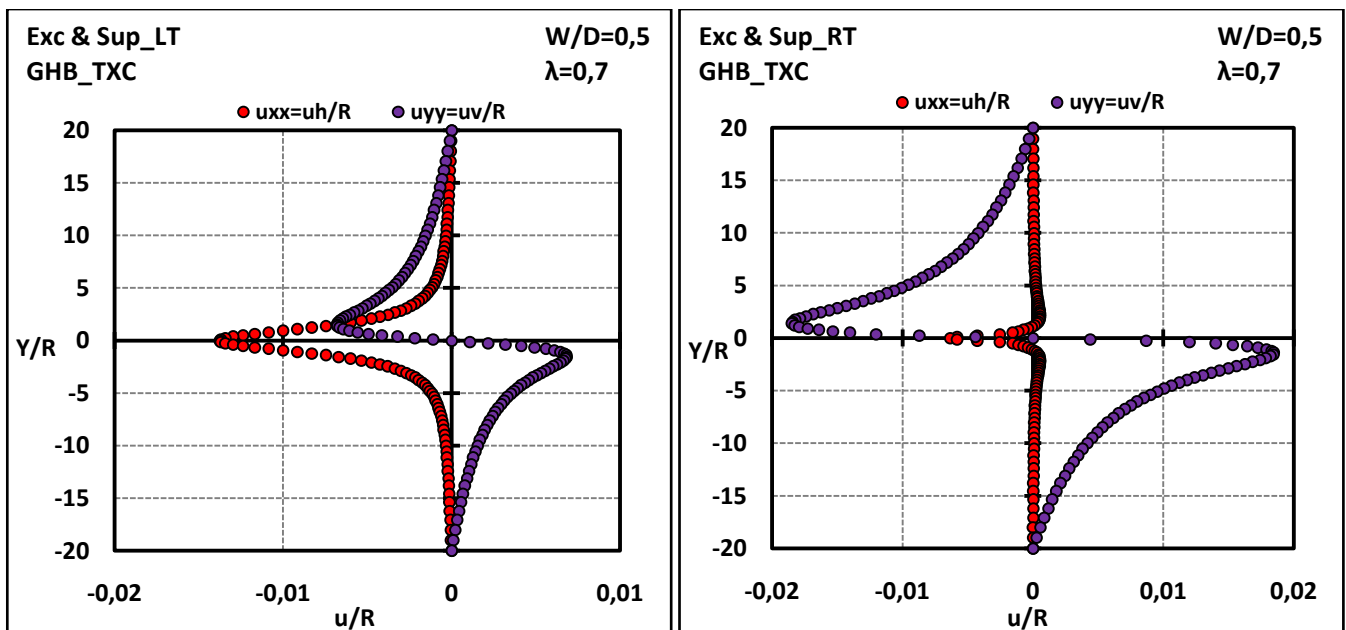


Γράφημα 4.23: Τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας σ_{xx} και σ_{yy} κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($X/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση ρ_0 , για την βραχομάζα «2», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων (αριστερά) και μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αντίστοιχου δεξιού κλάδου (δεξιά).

Στο παραπάνω γράφημα φαίνεται η επίδραση της διάνοιξης των δύο κλάδων, αρχικά της αριστερής σήραγγας (γράφημα 4.23 αριστερά) και έπειτα της δεξιάς (γράφημα 4.23 δεξιά), στις τάσεις σ_{xx} και σ_{yy} της βραχομάζας στην κατακόρυφη διεύθυνση για $X/R=0$. Μετά την εκσκαφή και υποστήριξη της «πρώτης» σήραγγας, οι κατακόρυφες τάσεις σ_{yy} παρουσιάζουν αύξηση στην περιοχή δίπλα από αυτή, λόγω του ότι αναλαμβάνει τις πρόσθετες τάσεις από την τοξωτή λειτουργία και μεταφορά των τάσεων πάνω από τη σήραγγα προς τις παρειές. Αντίθετα, η σταδιακή σύγκλιση της σήραγγας μέχρι την υποστήριξή της, και η αποτόνωση της βραχομάζας που προκαλεί, οδηγεί στη μείωση των οριζόντιων τάσεων σ_{xx} όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.23. Μετά την εκσκαφή και υποστήριξη και της δεύτερης σήραγγας (γράφημα 4.23 δεξιά), παρατηρείται περεταίρω αύξηση των κατακόρυφων σ_{yy} , εξαιτίας των τάσεων που μεταφέρονται από την διάνοιξη του δεύτερου κλάδου, ενώ οι οριζόντιες τάσεις συνεχίζουν να μειώνονται αλλά λιγότερο αναλογικά με πριν, ενώ παρατηρείται και μία συσσώρευση αυτών στο επίπεδο του κέντρου των σηράγγων.

Πάνω και κάτω από το επίπεδο των σηράγγων, και στις δύο περιπτώσεις διάνοιξης των κλάδων, παρατηρείται μία μικρή αύξηση των οριζόντιων τάσεων πριν αρχίζουν να μειώνονται καθώς μεταφερόμαστε εντός του επιπέδου των σηράγγων, ενώ αντίθετα οι αντίστοιχες κάθετες μειώνονται πριν ξεκινήσει η αύξηση της τιμής τους. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της τοξωτής λειτουργίας που εμφανίζεται πάνω από τις σήραγγες, και την διαδρομή που ακολουθούν οι τάσεις λόγω αυτού, καθώς και στη γενικότερη διαταραχή που προκαλείται στο πεδίο των τάσεων γύρω από τις σήραγγες.

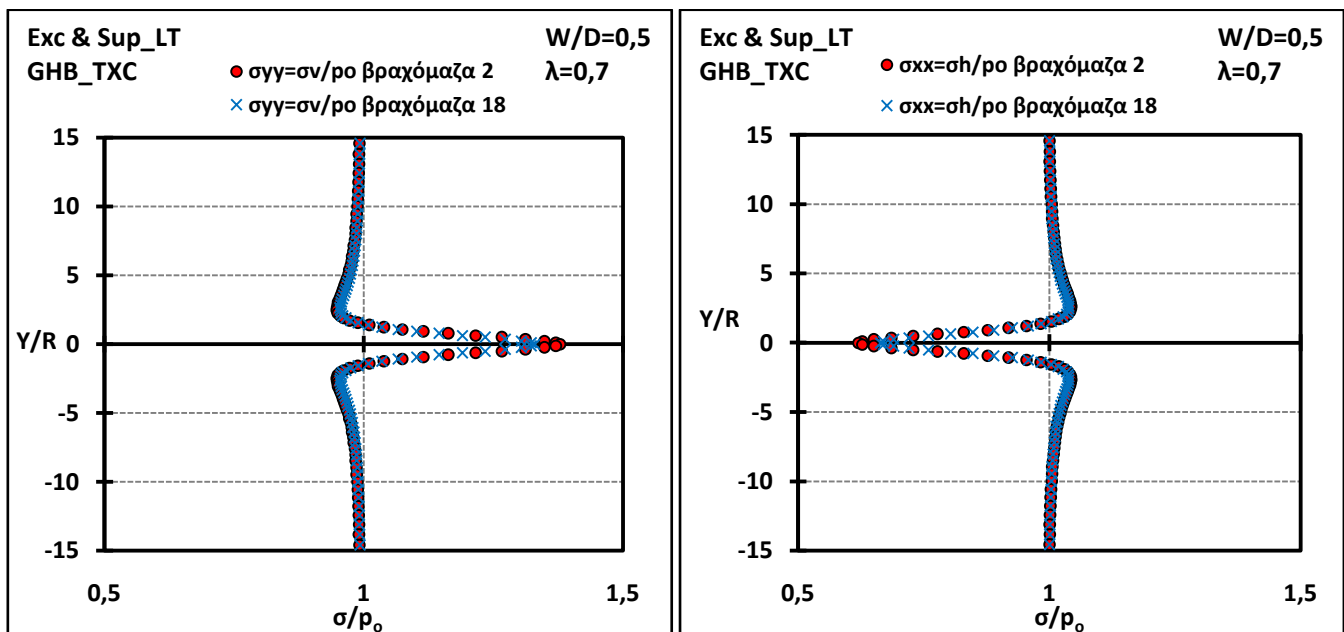
Αναφορικά με τις μετακινήσεις που προκαλούνται σε κάθε μία από τις δύο φάσεις διάνοιξης των δύο κλάδων, παρατηρείται αρχικά μετά την εκσκαφή και υποστήριξη του αριστερού κλάδου, μία μετακίνηση των κεντρικών σημείων του πυλώνα προς τα αριστερά λόγω της σύγκλισης της σήραγγας, ενώ παράλληλα αυτός συμπιέζεται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση λόγω των πρόσθετων τάσεων που αναλαμβάνουν τα στοιχεία του (γράφημα 4.24 αριστερά). Στο τελικό στάδιο ισορροπίας του συστήματος (γράφημα 4.24 δεξιά) μετά την διάνοιξη και υποστήριξη και της δεξιάς σήραγγας, παρατηρείται μία σύνθλιψη του πυλώνα και μείωση των αρχικών οριζόντιων μετακινήσεων εξαιτίας της σύγκλισης της δεξιάς σήραγγας. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις πάνω και κάτω από το κέντρο του πυλώνα, αντιθέτως αυξάνονται, μιας και τα στοιχεία θλίβονται περισσότερο και συμπιέζονται καθώς καλούνται να αναλάβουν επιπλέον κατακόρυφες τάσεις.



Γράφημα 4.24: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} και u_{yy} κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($Y/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για την βραχομάζα «2», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων (αριστερά) και μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αντίστοιχου δεξιού κλάδου (δεξιά).

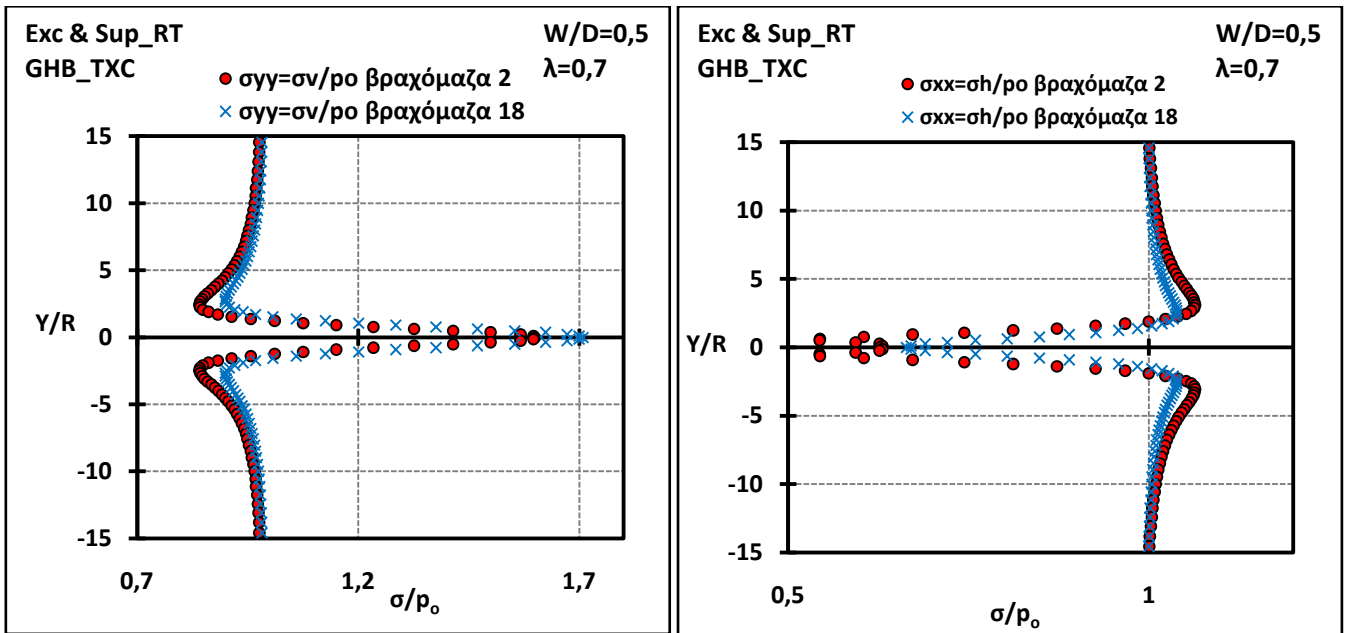
➤ Επιρροή ποιότητας βραχομάζας

Ξεκινώντας κι εδώ την διερεύνηση της επιρροής των παραμέτρων στις αναπτυσσόμενες τάσεις και μετακινήσεις εδάφους, από την επιρροή της ποιότητας της βραχομάζας, παρατηρείται, όπως παρουσιάστηκε και παραπάνω, μία καλύτερη συμπεριφορά του πυλώνα όσον αφορά τις τάσεις καθώς η ποιότητα βελτιώνεται (γράφημα 4.25). Λόγω της καλύτερης συμπεριφοράς και της μεγαλύτερης αντοχής της ισχυρής βραχομάζας 18 σε σχέση με την βραχομάζα 2, εμφανίζονται μικρότερες πλαστικές περιοχές γύρω από τη πρώτη σήραγγα, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πρόσθετης κατακόρυφης φόρτισης των στοιχείων του πυλώνα, και την διατήρηση των οριζόντιων τάσεων σε μεγαλύτερες τιμές.



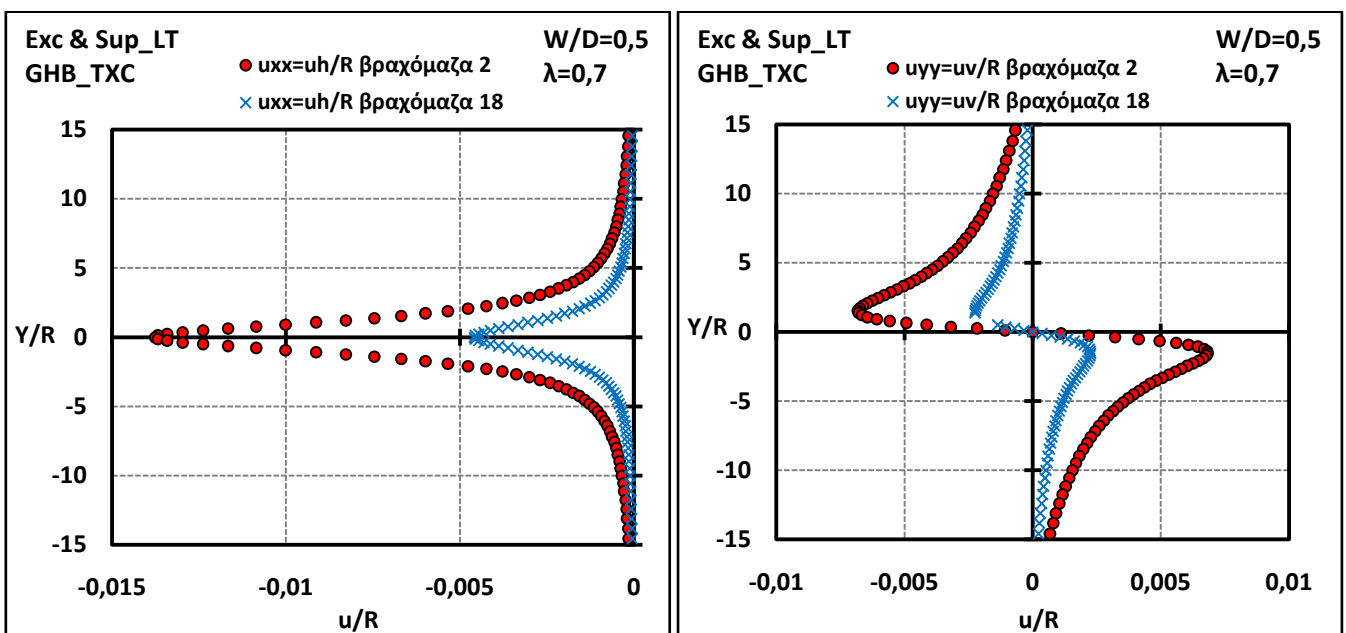
Γράφημα 4.25: Τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας $\sigma_{\gamma\gamma}$ (αριστερά) και σ_{xx} (δεξιά) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($X/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση ρ_0 , για τις βραχομάζες «2» και «18», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

Η θετική επίδραση της βελτίωσης της ποιότητας της βραχομάζας που παρουσιάστηκε παραπάνω, φαίνεται σε μεγαλύτερη κλίμακα στο επόμενο γράφημα 4.26, δηλαδή μετά την διάνοιξη και επένδυση και της δεύτερης δεξιάς σήραγγας. Λόγω του φαινομένου της αλληλεπίδρασης των σηράγγων, προκύπτει μία διεύρυνση της πλαστικής περιοχής στο περιβάλλον των σηράγγων καθώς και πρόσθετη φόρτιση στον πυλώνα με αποτέλεσμα τη συνολική αύξηση των κατακόρυφων τάσεων. Αυτή η πλαστική περιοχή έχει μεγαλύτερη έκταση στην περίπτωση της ασθενούς βραχομάζας 2, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την αστοχία των στοιχείων της βραχομάζας του πυλώνα που δεν μπορούν να παραλάβουν υψηλότερες κατακόρυφες τάσεις $\sigma_{\gamma\gamma}$, ενώ οι αντίστοιχες οριζόντιες παρουσιάζουν ανομοιομορφίες και συσσωρεύσεις. Τα παραπάνω συνεπάγονται με δυσμενέστερη συμπεριφορά όσον αφορά τις σήραγγες, αυξάνοντας τις τελικές δυνάμεις και ροπές που ασκούνται σε αυτές. Αντίθετα τα στοιχεία στην περίπτωση της ισχυρής βραχομάζας 18 αναπτύσσουν μεγαλύτερες κατακόρυφες τάσεις και παρουσιάζουν καλύτερη κατανομή στις οριζόντιες τάσεις, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα στον περιορισμό της αστοχίας και της πλαστικοποίησης αυτών.



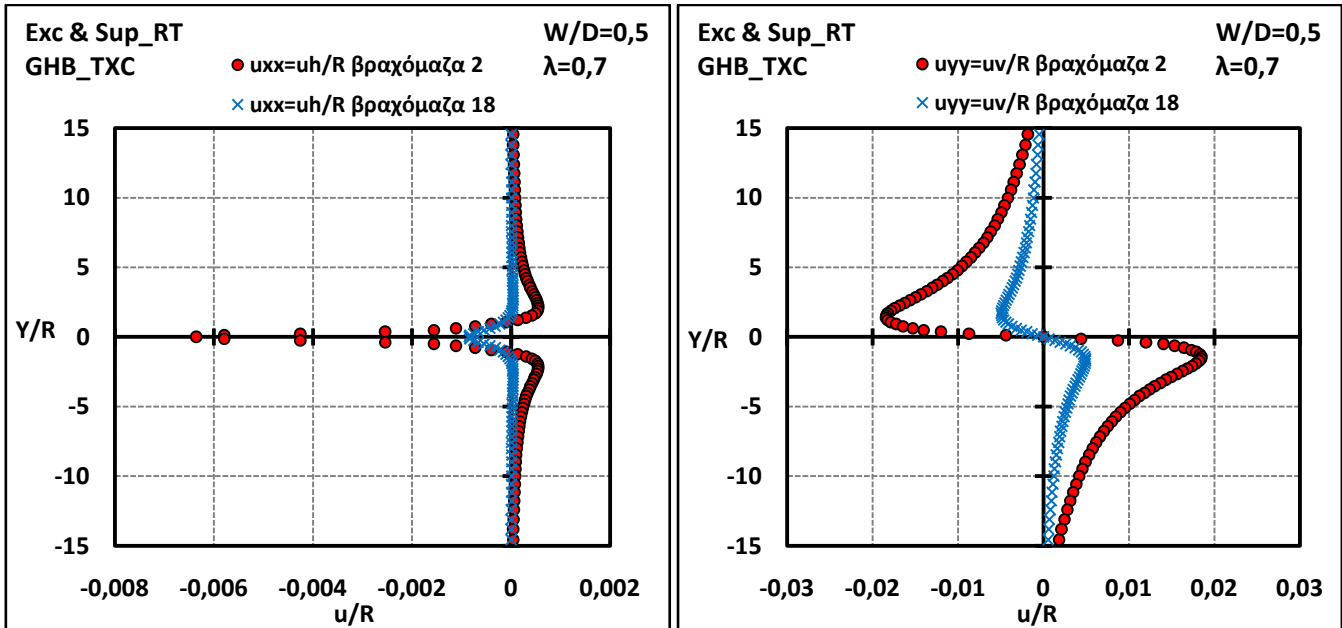
Γράφημα 4.26: Τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας $\sigma_{\gamma\gamma}$ (αριστερά) και σ_{xx} (δεξιά) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($X/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση ρ_0 , για τις βραχομάζες «2» και «18», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του δεξιού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

Η ανάπτυξη ευρύτερης πλαστικής περιοχής στην περίπτωση της ασθενούς βραχομάζας έχει άμεσο αντίκτυπο και στις μετακινήσεις, οριζόντιες και κατακόρυφες, που θα αναπτύξουν τα στοιχεία στον περιβάλλοντα χώρο των σηράγγων. Έτσι στην περίπτωση της ασθενούς βραχομάζας τόσο οι οριζόντιες όσο και οι κατακόρυφες μετακινήσεις των στοιχείων του πυλώνα, στην κατακόρυφη διεύθυνση, παρουσιάζονται μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες της ισχυρής βραχομάζας 18, μιας όπως έχει προαναφερθεί ο ρυθμός ανάπτυξης μετακινήσεων σε πλαστικές περιοχές είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο ρυθμό σε περιοχές που συμπεριφέρονται ελαστικά.



Γράφημα 4.27: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} (αριστερά) και $u_{\gamma\gamma}$ (δεξιά) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($X/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για τις βραχομάζες «2» και «18», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

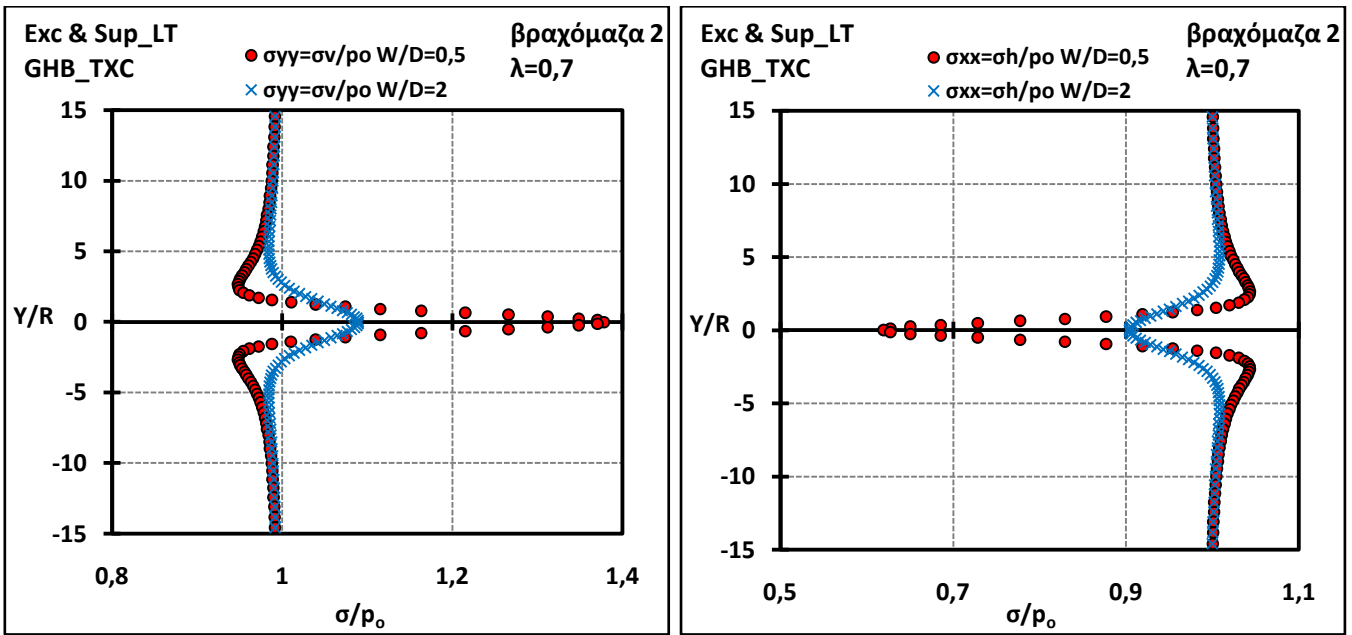
Τα παραπάνω φαίνονται χαρακτηριστικά στο προηγούμενο γράφημα 4.27 που παρουσιάζει τις μετακινήσεις των στοιχείων της βραχομάζας μετά την διάνοιξη της αριστερής «μονής» σήραγγας. Μετά την διάνοιξη και επένδυση και της «δεύτερης» σήραγγας (γράφημα 4.28) οι κατακόρυφες μετακινήσεις συνολικά αυξάνονται σε σχέση με πριν, ενώ λόγος μεταξύ των δύο βραχομαζών να παραμένει περίπου ίδιος. Οι οριζόντιες μετακινήσεις παρουσιάζουν μία τάση να μετατοπίζονται προς τα δεξιά καθώς συγκλίνει η δεύτερη σήραγγα, με αυτές της ισχυρής βραχομάζας να είναι κατά πολύ μικρότερες και πιο ομοιόμορφα κατανεμημένες από τις αντίστοιχες της ασθενούς



Γράφημα 4.28: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} (αριστερά) και u_{yy} (δεξιά) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($X/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για τις βραχομάζες «2» και «18», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του δεξιού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

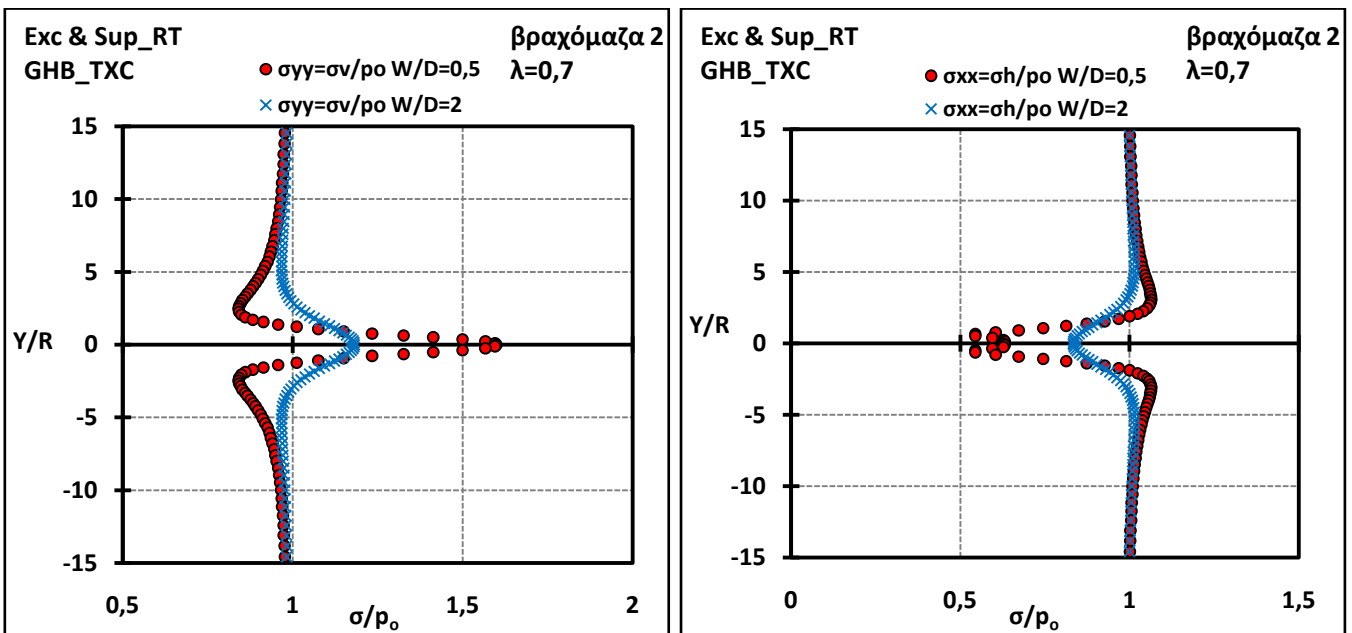
➤ Επιρροή πλάτους πυλώνα

Καθοριστικό παράγοντα στις τελικές τάσεις και μετακινήσεις που θα αναπτυχθούν στο περιβάλλον του συστήματος των δίδυμων σηράγγων έχει, όπως τονίστηκε, το πλάτος του πυλώνα μεταξύ των δύο σηράγγων. Η εκσκαφή της πρώτης, αριστερής σήραγγας σε μεγαλύτερη απόσταση ($W/D=2$) από την κατακόρυφο (για $X/R=0$) που μελετάμε, προκαλεί την ανάπτυξη μικρότερων πρόσθετων κατακόρυφων φορτίων σ_{yy} στα στοιχεία της καθέτου, και διατηρεί τις σ_{xx} σε μεγαλύτερες τιμές με αποτέλεσμα τα στοιχεία αυτά να μην πλησιάζουν την περιβάλλουσα αντοχής τους και να αστοχούν σε μικρό βαθμό. Αντίθετα, η διάνοιξη σήραγγας πιο κοντά στα σημεία ($W/D=2$) της παραπάνω καθέτου, έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερων κατακόρυφων τάσεων και τη μείωση των αντίστοιχων οριζοντίων, συνδυασμός κατά πολύ δυσμενέστερος για τα στοιχεία της βραχομάζας που μελετώνται. (Γράφημα 4.29)



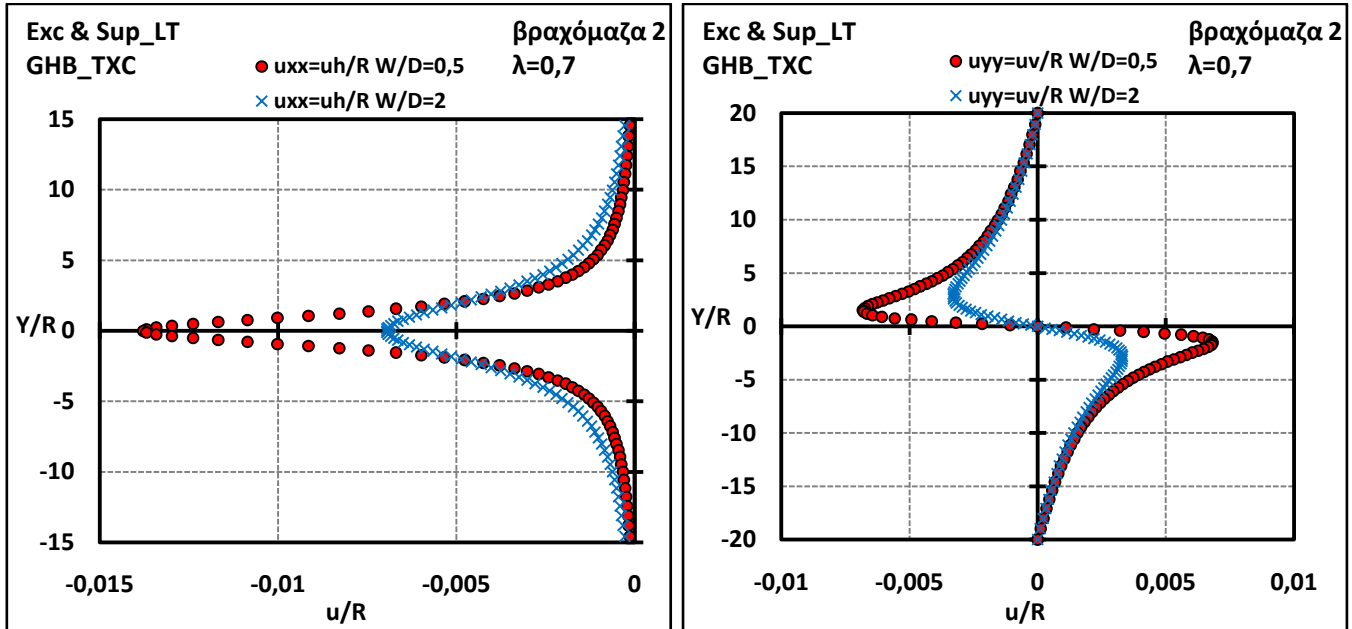
Γράφημα 4.29: Τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας $\sigma_{\gamma\gamma}$ (αριστερά) και $\sigma_{\kappa\kappa}$ (δεξιά) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($X/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση ρ_0 , για τη βραχομάζα «2», $\lambda=0,7$, $W/D=0,5$ και $W/D=2$ μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

Μετά και την διάνοιξη και υποστήριξη και της δεξιάς σήραγγας, παρατηρείται αύξηση των κατακόρυφων τάσεων και στις δύο περιπτώσεις σε σχέση με πριν, με την περίπτωση όμως του μικρού πυλώνα η αύξηση αυτή να είναι αναλογικά μεγαλύτερη μιας και μικρότερη περιοχή εδάφους καλείται να παραλάβει τις νέες τάσεις λόγω τοξωτής λειτουργίας του εδάφους πάνω από την δεύτερη σήραγγα. Επίσης οι οριζόντιες τάσεις εδάφους στην περίπτωση του μικρού πυλώνα, παρουσιάζουν μεγαλύτερο ρυθμό μείωσης και μεγάλες συσσωρεύσεις στο ύψος που διανοίγονται οι σήραγγες, με αποτέλεσμα τα στοιχεία αυτά του πυλώνα να καταπονούνται αρκετά και τελικώς να αστοχούν.



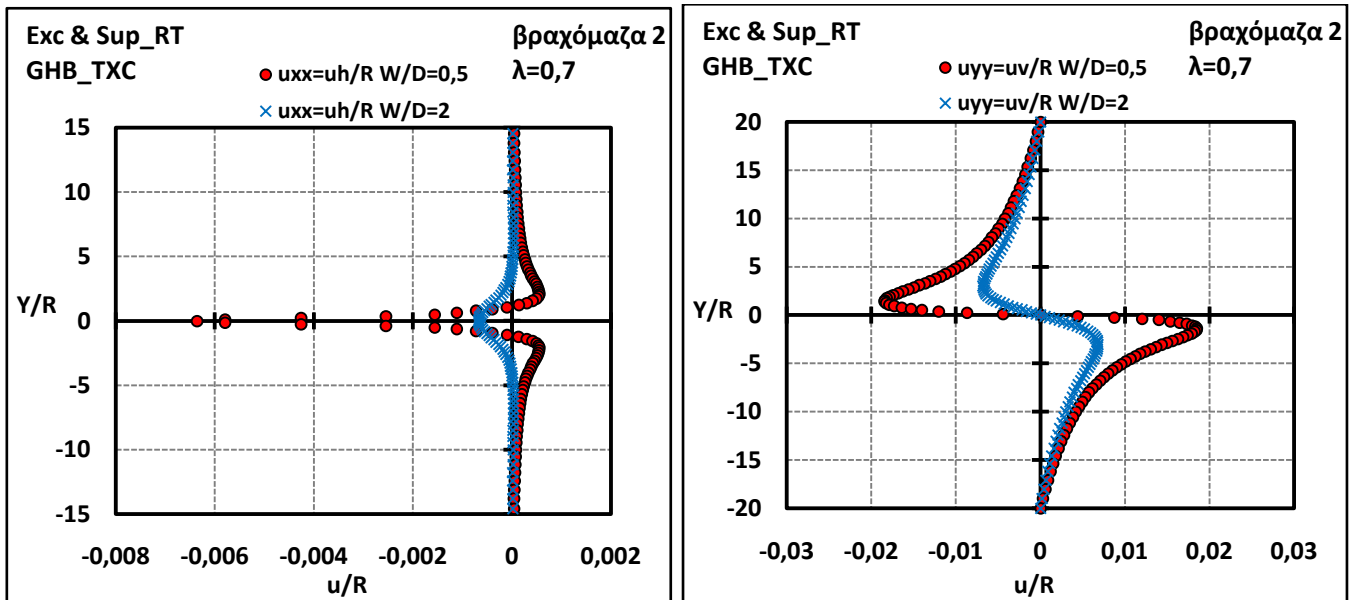
Γράφημα 4.30: Τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας $\sigma_{\gamma\gamma}$ (αριστερά) και $\sigma_{\kappa\kappa}$ (δεξιά) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($X/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση ρ_0 , για τη βραχομάζα «2», $\lambda=0,7$, $W/D=0,5$ και $W/D=2$ μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του δεξιού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

Όσον αφορά τις μετακινήσεις, όπως παρουσιάστηκε και στην προηγούμενη περίπτωση σύγκρισης των δύο βραχομαζών, όμοια κι εδώ η δυσμενέστερη περίπτωση, δηλαδή αυτή για $W/D=0,5$, οδηγεί σε μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις u_{yy} προς τη μεριά διάνοιξης της πρώτης σήραγγας, καθώς και σε μεγαλύτερες κατακόρυφες συμπίεσεις u_{xx} , λόγω του ότι αυτή διανοίγεται πιο κοντά στην κάθετο που μελετάμε (Γράφημα 4.31).



Γράφημα 4.31: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} (αριστερά) και u_{yy} (δεξιά) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($X/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για τη βραχομάζα «2», $\lambda=0,7$, $W/D=0,5$ και $W/D=2$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

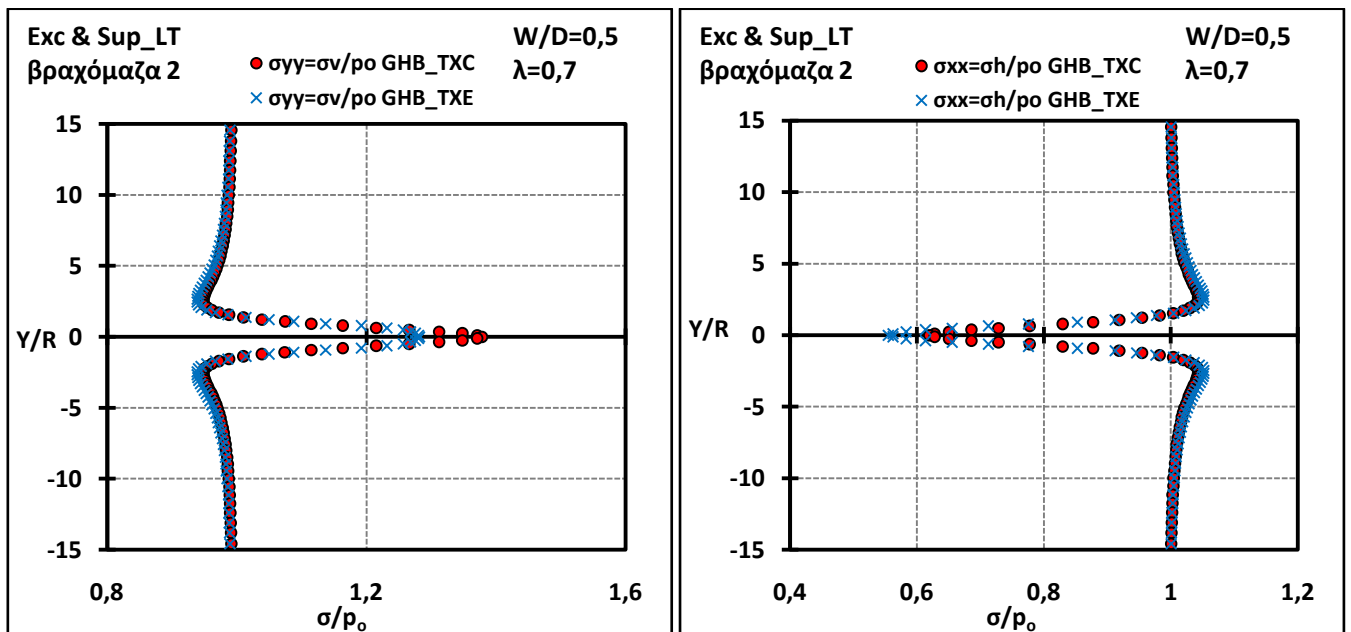
Οι οριζόντιες μετακινήσεις παρουσιάζουν μείωση και για τα δύο πλάτη πυλώνων, με την διαφορά ότι για το μικρό πυλώνα οι τιμές στο επίπεδο των σηράγγων είναι κατά πολύ μικρότερες σε σχέση με αυτές του μεγάλου πυλώνα. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις αυξάνονται ανάλογα και για τις δύο περιπτώσεις σε σχέση με πριν λόγω συμπίεσης των σημείων της καθέτου (γράφημα 4.23).



Γράφημα 4.32: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} (αριστερά) και u_{yy} (δεξιά) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($X/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για τη βραχομάζα «2», $\lambda=0,7$, $W/D=0,5$ και $W/D=2$, μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του δεξιού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

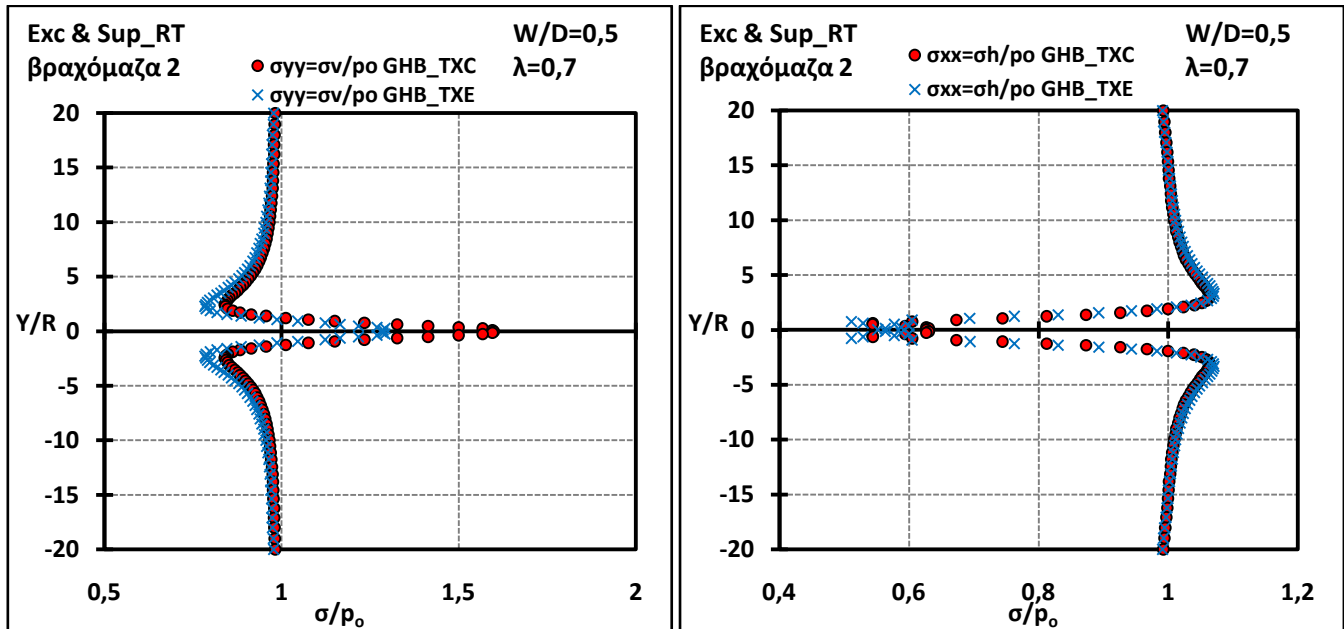
➤ **Επιρροή βαθμονόμησης του αριθμητικού προσομοιώματος**

Κλείνοντας με την ανάλυση των τάσεων και των μετακινήσεων του εδάφους στην κατακόρυφη διεύθυνση, μελετάται η επίδραση της βαθμονόμησης του αριθμητικού προσομοιώματος σε θλίψη (GHB_TXC) και σε εφελκυσμό (GHB_TXE). Φαίνεται χαρακτηριστικά και στο γράφημα 4.33 ότι τα στοιχεία της βραχομάζας που έχουν βαθμονομηθεί σε θλίψη δύναται να αναπτύσσουν μεγαλύτερες κατακόρυφες τάσεις σ_{yy} και μικρότερες οριζόντιες τάσεις σ_{xx} , ενώ παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά και μικρότερες πλαστικοποιήσεις.



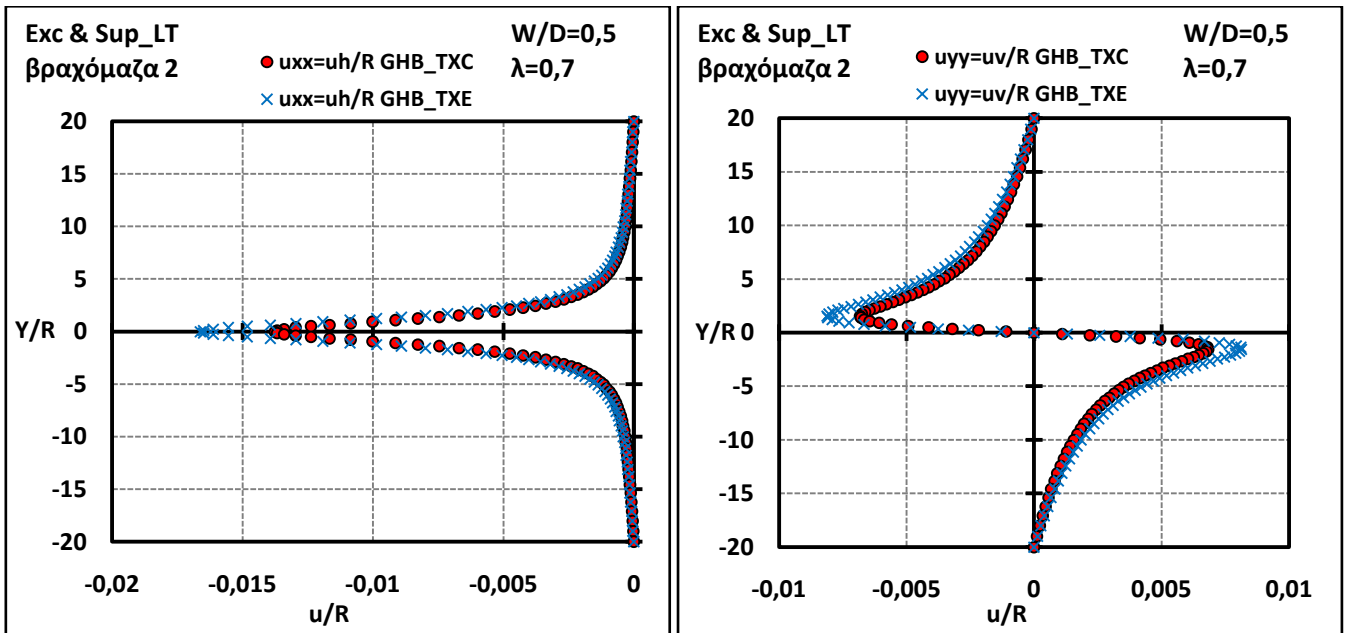
Γράφημα 4.33: Τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας σ_{yy} (αριστερά) και σ_{xx} (δεξιά) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($X/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση p_0 , για τη βραχομάζα «2», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$ και 2 βαθμονομήσεις του καταστατικού προσομοιώματος (GHB_TXC & GHB_TXE) μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

Μετά και την διάνοιξη και υποστήριξη της δεύτερης σήραγγας (γράφημα 4.34), συνεχίζει να παρατηρείται ότι τα στοιχεία που είναι βαθμονομημένα σε θλίψη αναλαμβάνουν ακόμα μεγαλύτερες κατακόρυφες τάσεις και δεν επιτρέπουν τη μείωση των οριζόντιων σε υπερβολικές τιμές, αν και παρατηρείται και μία μικρή συσσώρευση τάσεων που υπονοεί αστοχία των στοιχείων και εμφάνιση πλαστικής περιοχής. Η συσσώρευση αυτή είναι πιο έντονη στην βαθμονόμηση σε εφελκυσμό με αποτέλεσμα την πιο διευρυμένη πλαστική ζώνη στο περιβάλλον των σηράγγων.

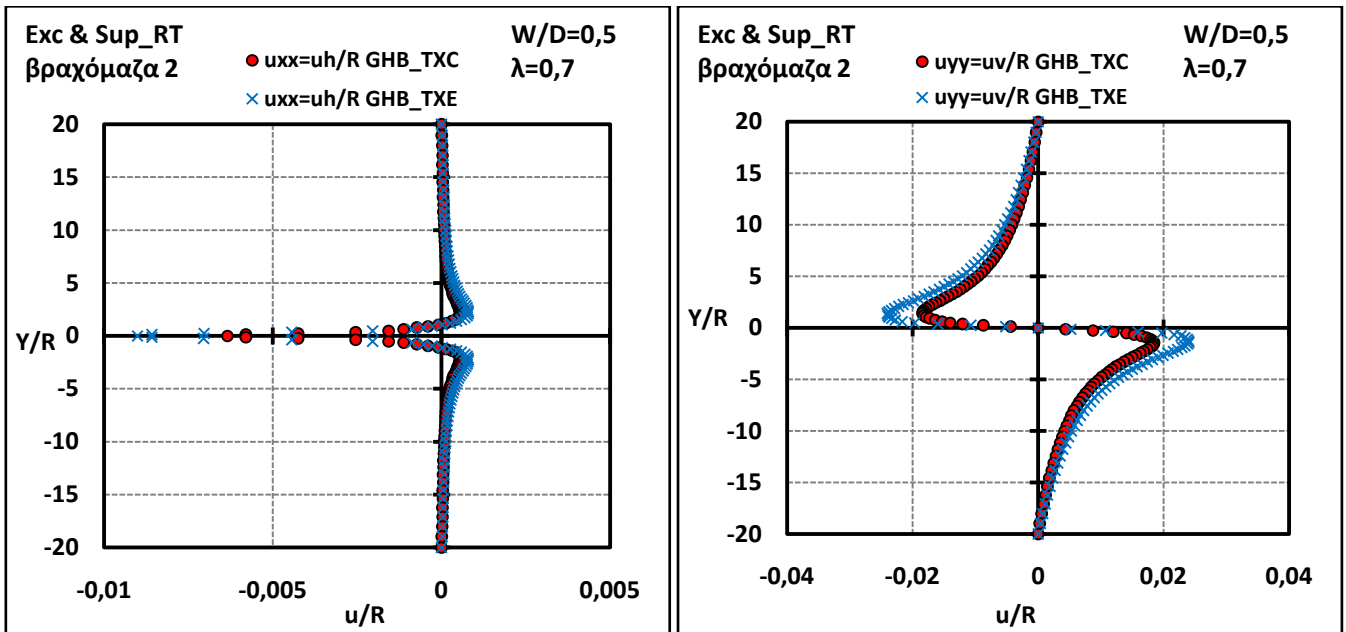


Γράφημα 4.34: Τάσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας $\sigma_{\gamma\gamma}$ (αριστερά) και σ_{xx} (δεξιά) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($X/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση ρ_0 , για τη βραχομάζα «2», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$ και 2 βαθμονομήσεις του καταστατικού προσομοιώματος (GHB_TXC & GHB_TXE) μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του δεξιού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

Οι μετακινήσεις είναι μεγαλύτερες και για τις δύο φάσεις διάνοιξης των σηράγγων, για την βαθμονόμηση σε εφελκυσμό, μιας και όπως εξηγήθηκε η πλαστική περιοχή είναι πιο διευρυμένη σε σχέση με τη βαθμονόμηση σε θλίψη. Επομένως οι τελικές μετακινήσεις σε κάθε φάση εκκαφής είναι μεγαλύτερη για το GHB_TCE, αφού οι πλαστικές μετακινήσεις αυξάνονται με μεγαλύτερο ρυθμό από τις ελαστικές. Το παραπάνω παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στα γραφήματα 4.35 και 4.36.



Γράφημα 4.35: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} (αριστερά) και u_{yy} (δεξιά) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($X/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για τη βραχομάζα «2», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$ και 2 βαθμονομήσεις του καταστατικού προσομοιώματος (GHB_TXC & GHB_TXE), μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του αριστερού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.



Γράφημα 4.36: Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας u_{xx} (αριστερά) και u_{yy} (δεξιά) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($X/R=0$), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα R , για τη βραχομάζα «2», $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$ και 2 βαθμονομήσεις του καταστατικού προσομοιώματος (GHB_TXC & GHB_TXE), μετά την διάνοιξη και υποστήριξη του δεξιού κλάδου των δίδυμων σηράγγων.

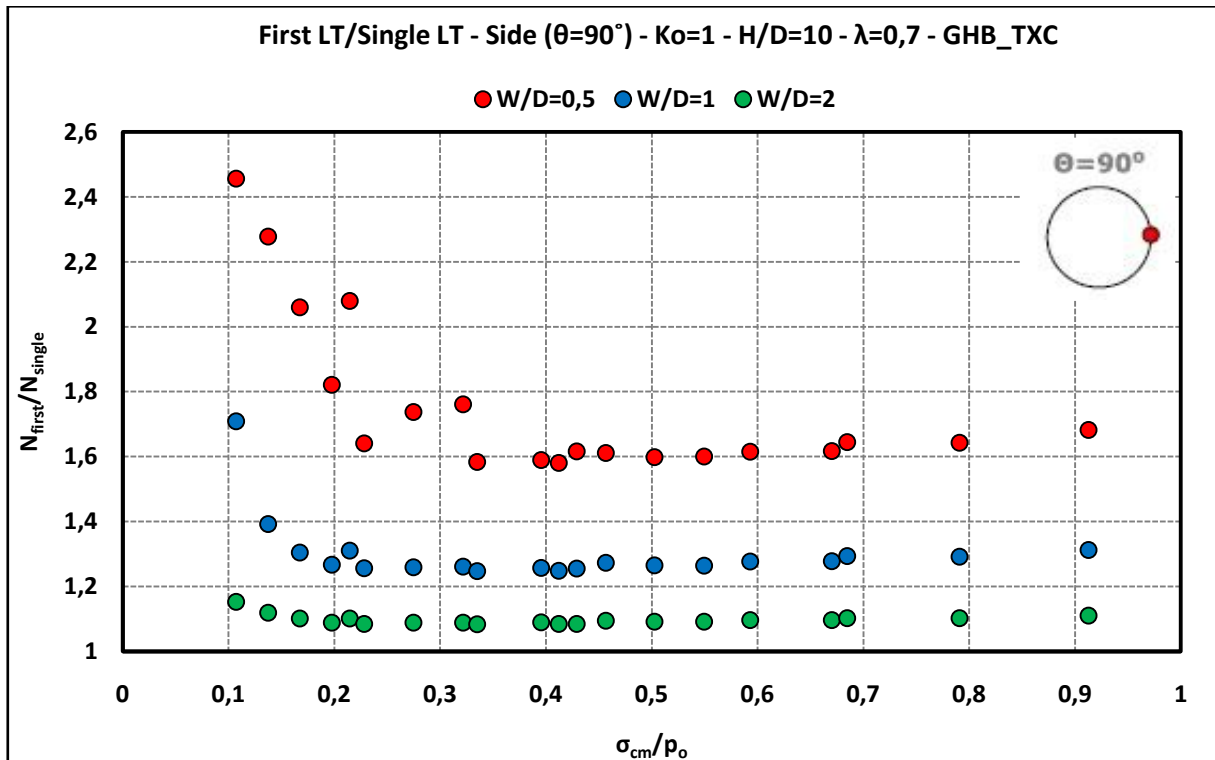
4.3. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στη συγκεκριμένη ενότητα γίνεται μία προσπάθεια ομαδοποίησης των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από το σύνολο των αναλύσεων, παρουσιάζοντας τους λόγους των αξονικών δυνάμεων (κανονικοποιημένων ως προς $\rho_0 D$) της «πρώτης» (FirstLT) σήραγγας ως προς αυτές της «μεμονωμένης» (SingleLT) καθώς και την επίδραση που έχουν σε αυτές οι διάφοροι παράμετροι που μελετώνται (πλάτος πυλώνα, βαθμός αποτόνωσης και βαθμονόμηση αριθμητικού προσομοιώματος). Γίνεται εξαγωγή των γραφημάτων για δύο βασικές θέσεις της «πρώτης» σήραγγας, που είναι στο σημείο της παρειάς προς τη μεριά του πυλώνα ($\theta=90^\circ$) καθώς και στην στέψη αυτής ($\theta=360^\circ$). Επίσης παρουσιάζονται σε πίνακες και οι τιμές των μέγιστων λόγων (\max) και των μέσων τιμών (avg) για κάθε πλάτος πυλώνα W/D και κάθε βαθμό αποτόνωσης “ λ ”.

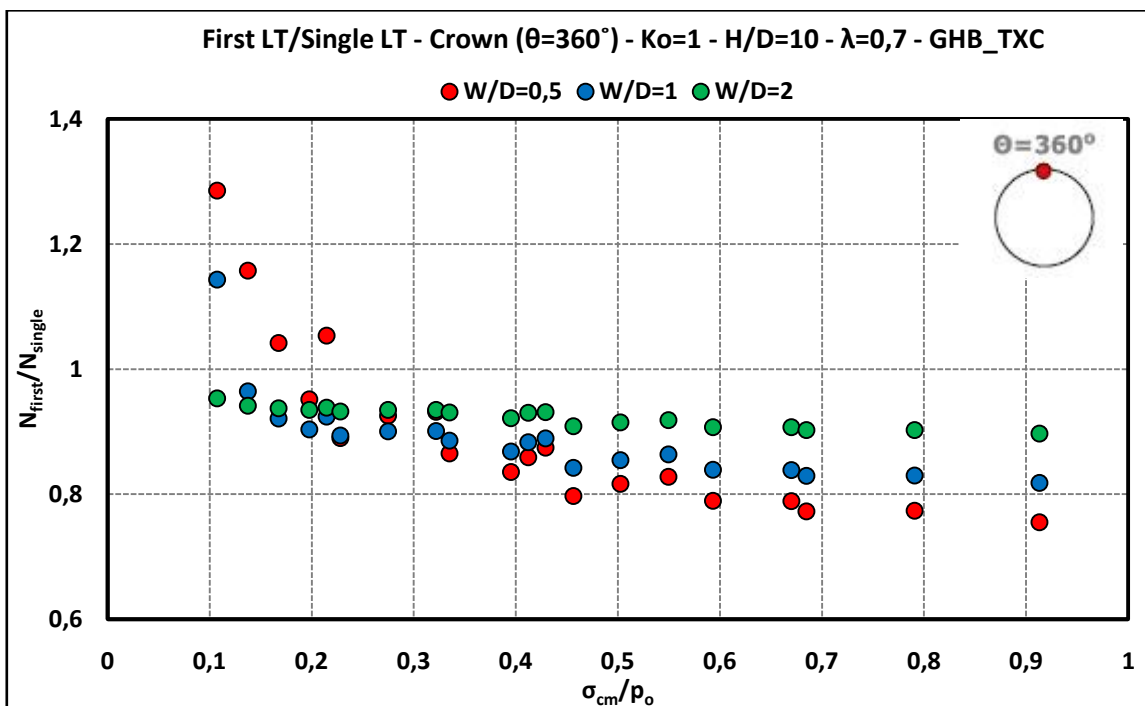
4.3.1. Επιρροή πλάτους πυλώνα

Ξεκινώντας αρχικά με την παρουσίαση του λόγου των αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» ως προς τη «μεμονωμένη» σήραγγα, στη παρειά ($\theta=90^\circ$) για διάφορα πλάτη πυλώνα, φαίνεται ότι γενικά για τη συγκεκριμένη θέση, η διάνοιξη της δεξιάς σήραγγας προκαλεί αύξηση των δυνάμεων στην άμεση υποστήριξη μιας και όπως φαίνεται στο γράφημα 4.37 ο λόγος των τιμών είναι πάντα μεγαλύτερος της μονάδας. Βέβαια παρατηρείται χαρακτηριστικά ότι για πλάτος πυλώνα $W/D=2$, ο λόγος αυτός τείνει προς τη μονάδα κάτι που αποδεικνύει και την ελαχιστοποίηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μεταξύ των σηράγγων. Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί μία σταθεροποίηση του φαινομένου για ποιότητα βραχομάζας $\sigma_{cm}/\rho_0 > 0,5$ μιας και όπως έχει αναφερθεί, η βελτίωση της ποιότητας της βραχομάζας στην οποία διανοίγονται οι δίδυμες σήραγγες συμβάλλει στον περιορισμό του φαινομένου της αλληλεπίδρασης και της διατάραξης του πεδίου των τάσεων στον πυλώνα, και κατ' επέκταση των δυνάμεων που αναπτύσσονται στην υποστήριξη της αριστερής σήραγγας.

Στη συνέχεια εξάγονται τα ίδια αποτελέσματα (γράφημα 4.38), αυτή τη φορά όμως για τη στέψη της αριστερής σήραγγας ($\theta=360^\circ$). Σε αυτή την περίπτωση, η διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας έχει κατά κύριο λόγο ανακουφιστικό χαρακτήρα αφού παρατηρείται (με εξαίρεση κάποιων περιπτώσεων που θα σχολιαστούν παρακάτω) ότι ο λόγος των αξονικών δυνάμεων της πρώτης σήραγγας ως προς τη μεμονωμένη, είναι μικρότερος της μονάδας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας προκαλεί μία ανακούφιση-εκτόνωση σε όλη την περιοχή γύρω από την πρώτη σήραγγα, με εξαίρεση την περιοχή του πυλώνα που φορτίζεται επιπλέον. Η ανακουφιστική τάση λόγω αποφόρτισης προκαλεί μείωση των αξονικών δυνάμεων της υποστήριξης. Όσον αφορά τις περιπτώσεις που βρίσκονται πάνω από τη μονάδα, αυτές αφορούν περιπτώσεις πολύ ασθενών βραχομαζών στις οποίες η αρχική πλαστικοποίηση είναι μεγάλου εύρους και ακόμα και η εκτόνωση λόγω της νέας σήραγγας δεν επαρκεί ώστε να λειτουργήσει ανακουφιστικά στην οροφή της προϋπάρχουσας σήραγγας.



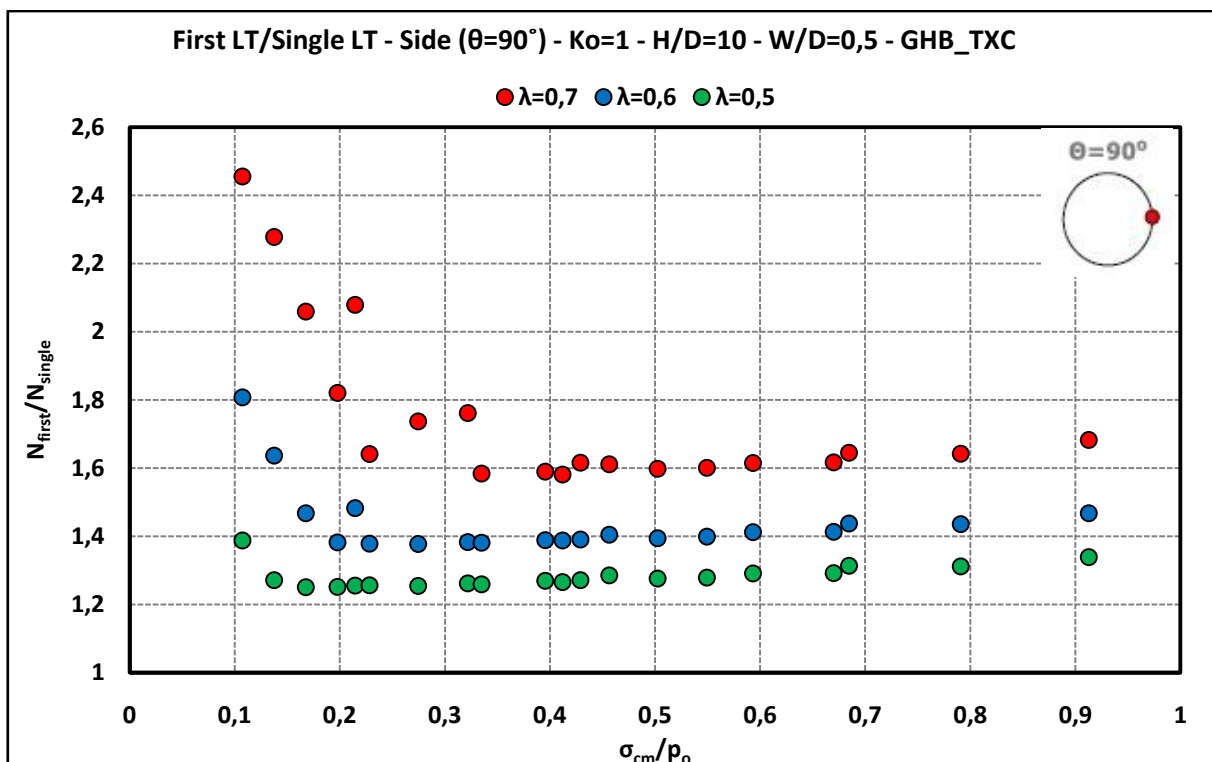
Γράφημα 4.37: Λόγος των μέγιστων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς τη «μονή» σήραγγα ($N_{first,max}/N_{single,max}$) στη παρειά ($\theta=90^\circ$), ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), $\lambda=0,7$ και βαθμονόμηση του κριτηρίου αστοχίας σε τριαξονική θλίψη (GHB_TXC)



Γράφημα 4.38: Λόγος των μέγιστων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς τη «μονή» σήραγγα ($N_{first,max}/N_{single,max}$) στη στέψη ($\theta=360^\circ$), ως συνάρτηση του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) για διαφορετικές τιμές πλάτους πυλώνα (W/D), $\lambda=0,7$ και βαθμονόμηση του κριτηρίου αστοχίας σε τριαξονική θλίψη (GHB_TXC)

4.3.2. Επιρροή βαθμού αποτόνωσης

Όσον αφορά την επίδραση του βαθμού αποτόνωσης των σηράγγων, στο λόγο των κανονικοποιημένων αξονικών δυνάμεων της πρώτης σήραγγας ως προς τη μεμονωμένη, στην παρειά ($\theta=90^\circ$), παρατηρείται εκ πρώτης όψεως ότι η μεγαλύτερη αποτόνωση προκαλεί, για κάθε ποιότητα βραχομάζας, αύξηση του λόγου αξονικών δυνάμεων ($N_{\text{first}}/N_{\text{single}}$). Αυτό το φαινόμενο παρατηρήθηκε και εξεσηγήθηκε και στην ενότητα 4.2.2 για τις 2 χαρακτηριστικές βραχομάζες που μελετήθηκαν. Όπως είχε αναφερθεί και σε εκείνη την ενότητα, η μεγαλύτερη αποτόνωση δρα ανακουφιστικά στη μεμονωμένη σήραγγα (τόσο στην μονή σήραγγα όσο και στη δεύτερη σήραγγα) αφού η βραχομάζα αποτονώνεται και επιβάλλει μικρότερα φορτία στην υποστήριξη. Αντίθετα στην περίπτωση της πρώτης σήραγγας που δρα επιπρόσθετα και το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, η μεγαλύτερη αποτόνωση συνδέεται με διεύρυνση της πλαστικής ζώνης γύρω από τις σήραγγες, και τελικώς η αποδιοργανωμένη ζώνη που φορτίζει τον πυλώνα και την δεξιά παρειά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, είναι μεγαλύτερη, άρα μεγαλύτερα είναι και τα αντίστοιχα φορτία που αναπτύσσονται στην υποστήριξη. Όμοια με πριν, έτσι κι εδώ παρατηρείται και για τους τρεις βαθμούς αποτόνωσης λ , μία σταδιακή μείωση του λόγου των αξονικών δυνάμεων μέχρι τις τιμές του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_{\text{cm}}/\rho_0=0,5$ και στη συνέχεια για $\sigma_{\text{cm}}/\rho_0>0,5$ μία σταθεροποίηση (γράφημα 4.39).

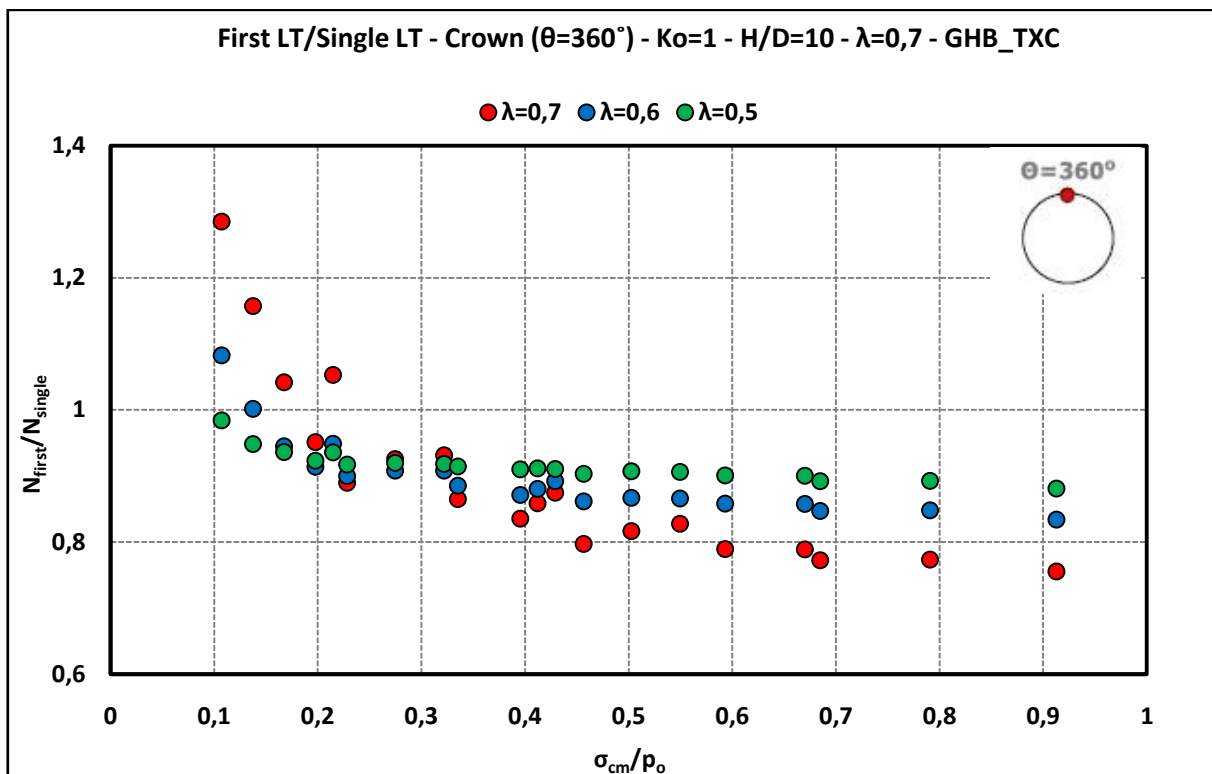


Γράφημα 4.39: Λόγος των αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς τη «μονή» σήραγγα ($N_{\text{first}}/N_{\text{single}}$) στην παρειά ($\theta=90^\circ$), ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{\text{cm}}/\rho_0$) για διαφορετικούς βαθμούς αποτόνωσης ($\lambda=0,7, 0,6, 0,5$), $W/D=0,5$ και βαθμονόμηση του κριτηρίου αστοχίας σε τριαξονική θλίψη (GHB_TXC)

Το παραπάνω φαινόμενο δεν παρατηρείται στις περιοχές της σήραγγας που δεν γειτνιάζουν με τον πυλώνα. Όπως φαίνεται στο επόμενο γράφημα 4.40 που αναφέρεται στην οροφή της πρώτης σήραγγας, φαίνεται ότι γενικά, με εξαίρεση κάποιες πολύ ασθενείς βραχομάζες, κάθε βαθμός αποτόνωσης δρα ανακουφιστικά στις αξονικές δυνάμεις στη συγκεκριμένη θέση. Τα

σημεία που βρίσκονται πάνω από τη μονάδα αφορούν έντονα διαταραγμένες και πλαστικοποιημένες ασθενείς βραχομάζες.

Επίσης παρατηρείται χαρακτηριστικά η πιο «λογική» επίδραση του βαθμού αποτόνωσης στις αξονικές δυνάμεις, καθώς μεγαλύτερη αποτόνωση της σήραγγας έχει ως αποτέλεσμα την εκτόνωση των τάσεων της βραχομάζας και τελικώς τη μεταφορά μικρότερων φορτίων στην υποστήριξη. Αυτό φαίνεται πιο έντονα όσο η ποιότητα της βραχομάζας βελτιώνεται, ενώ για πιο ασθενείς βραχομάζες που οι αστοχίες και οι πλαστικές περιοχές είναι πιο διευρυμένες, παρατηρείται διαφοροποίηση στα αποτελέσματα που ακολουθούν την προηγούμενη τάση.



Γράφημα 4.40: Λόγος των αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς τη «μονή» σήραγγα ($N_{\text{first}}/N_{\text{single}}$) στη στέψη ($\theta=360^\circ$), ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{\text{cm}}/\rho_o$) για διαφορετικούς βαθμούς αποτόνωσης ($\lambda=0,7, 0,6, 0,5$), $W/D=0,5$ και βαθμονόμηση του κριτηρίου αστοχίας σε τριαξονική θλίψη (GHB_TXC)

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι μέσοι (avg) και μέγιστοι (max) λόγοι των κανονικοποιημένων αξονικών δυνάμεων της «πρώτης» προς τη «μεμονωμένη» σήραγγα, οι οποίοι παρουσιάζονται αντίστοιχα στους πίνακες 4.4 και 4.5. Η μέγιστη τιμή παρατηρείται ως επί το πλείστον στην περιοχή της πρώτης σήραγγας που δέχεται την μεγαλύτερη επίδραση από το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, δηλαδή για $\theta=90^\circ$, ενώ η μέση τιμή αφορά το μέσο όρο όλων των τιμών στην διατομή που μελετάται ($\theta=0^\circ-360^\circ$).

Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται μία σταθεροποίηση των τιμών για $\sigma_{\text{cm}}/\rho_o > 0,5$ και γι' αυτό το λόγο λαμβάνεται ενδεικτικά μία μέση τιμή τους. Για $\sigma_{\text{cm}}/\rho_o < 0,5$ υπάρχει μία σχετικά μεγάλη διακύμανση των τιμών, γι' αυτό και λαμβάνονται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή. Μελετώντας τις τιμές των πινάκων, προκύπτει τόσο για την μέση όσο και για τη μέγιστη, ένταση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, όσο φτωχότερη είναι η ποιότητα της βραχομάζας, όσο μικρότερο είναι το πλάτος του πυλώνα και όσο μεγαλύτερη είναι η αποτόνωση των σηράγγων, καθώς οι τιμές των

λόγων παρουσιάζονται μεγαλύτερες. Αντίθετά όταν κάποια από τις παραπάνω παραμέτρους βελτιώνεται, τότε το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης αμβλύνεται και τελικώς ελαχιστοποιείται.

Όσον αφορά τη μέση αξονική δύναμη, ο λόγος γίνεται πρακτικά ίσος με τη μονάδα για κάθε περίπτωση πυλώνα και βαθμού αποτόνωσης, όταν η ποιότητα της βραχομάζας είναι μέτρια προς καλή δηλαδή για $\sigma_{cm}/\rho_o > 0,5$. Ο μέγιστος λόγος καταγράφεται για την ασθενέστερη βραχομάζα, πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$ και $\lambda=0,7$ και ισούται με 1,60. Για την ίδια βραχομάζα, αυξάνοντας το πλάτος του πυλώνα σε $W/D=1$ και $W/D=2$, ο λόγος γίνεται 1,3 και 1,05 αντίστοιχα.

Οι λόγοι των μέγιστων αξονικών δυνάμεων ακολουθούν την ίδια πορεία με τους μέσους λόγους, με την διαφορά ότι οι τιμές σε αυτή την περίπτωση είναι αρκετά μεγαλύτερες. Παρατηρείται ότι ο λόγος είναι για κάθε συνδυασμό ποιότητας βραχομάζας, βαθμού αποτόνωσης και πλάτους πυλώνα, μεγαλύτερος της μονάδας αν και για πλάτος πυλώνα $W/D=2$ και για τις περισσότερες βραχομάζες ο λόγος είναι πρακτικά μονάδα (ελαχιστοποίηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης). Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι (για $W/D=0,5$, $\lambda=0,7$ και χαμηλότερη ποιότητα βραχομάζας) περίπου 2,50, και μειώνεται αισθητά καθώς το πλάτος πυλώνα αυξάνει ή ο βαθμός αποτόνωσης μειώνεται. Καθοριστικό ρόλο φαίνεται πως παίζει το πλάτος πυλώνα, όπου για $W/D=2$, ο λόγος για την δυσμενέστερη βραχομάζα σχεδόν μηδενίζεται.

Πίνακας 4.4: Εύρη τιμών του λόγου των μέσων αξονικών δυνάμεων της πρώτης» προς τη «μονή» σήραγγα, που δρουν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για όλες τις περιπτώσεις των βαθμών αποτόνωσης και πλατών πυλώνα για βαθμονόμηση του κριτηρίου αστοχίας σε τριαξονική θλίψη (GHB_TXC).

$(N_{first,avg}/N_{single,avg}) - Ko=1 - GHB_TXC$						
	W/D=0,5		W/D=1		W/D=2	
	$\sigma_{cm}/\rho_o < 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o > 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o < 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o > 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o < 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o > 0,5$
$\lambda=0,7$	1.60-1.10	1.10	1.30-1.00	1.00	1.05-1.00	1.00
$\lambda=0,6$	1.30-1.05	1.05	1.05-1.00	1.00	1.00	1.00
$\lambda=0,5$	1.10-1.05	1.05	1.05-1.00	1.00	1.00	1.00

Πίνακας 4.5: Εύρη τιμών του λόγου των μέγιστων αξονικών δυνάμεων της πρώτης προς τη μονή σήραγγα, που δρουν στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα, για όλες τις περιπτώσεις των βαθμών αποτόνωσης και πλατών πυλώνα για βαθμονόμηση του κριτηρίου αστοχίας σε τριαξονική θλίψη (GHB_TXC).

$(N_{first,max}/N_{single,max}) - Ko=1 - GHB_TXC$						
W/D=0,5		W/D=1		W/D=2		
$\sigma_{cm}/\rho_o < 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o > 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o < 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o > 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o < 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o > 0,5$	
$\lambda=0,7$	2.50-1.60	1.60	1.70-1.25	1.30	1.15-1.10	1.10
$\lambda=0,6$	1.80-1.35	1.40	1.25-1.15	1.20	1.05	1.05
$\lambda=0,5$	1.40-1.25	1.30	1.15-1.10	1.15	1.05	1.05

4.3.3. Διαγράμματα αλληλεπίδρασης

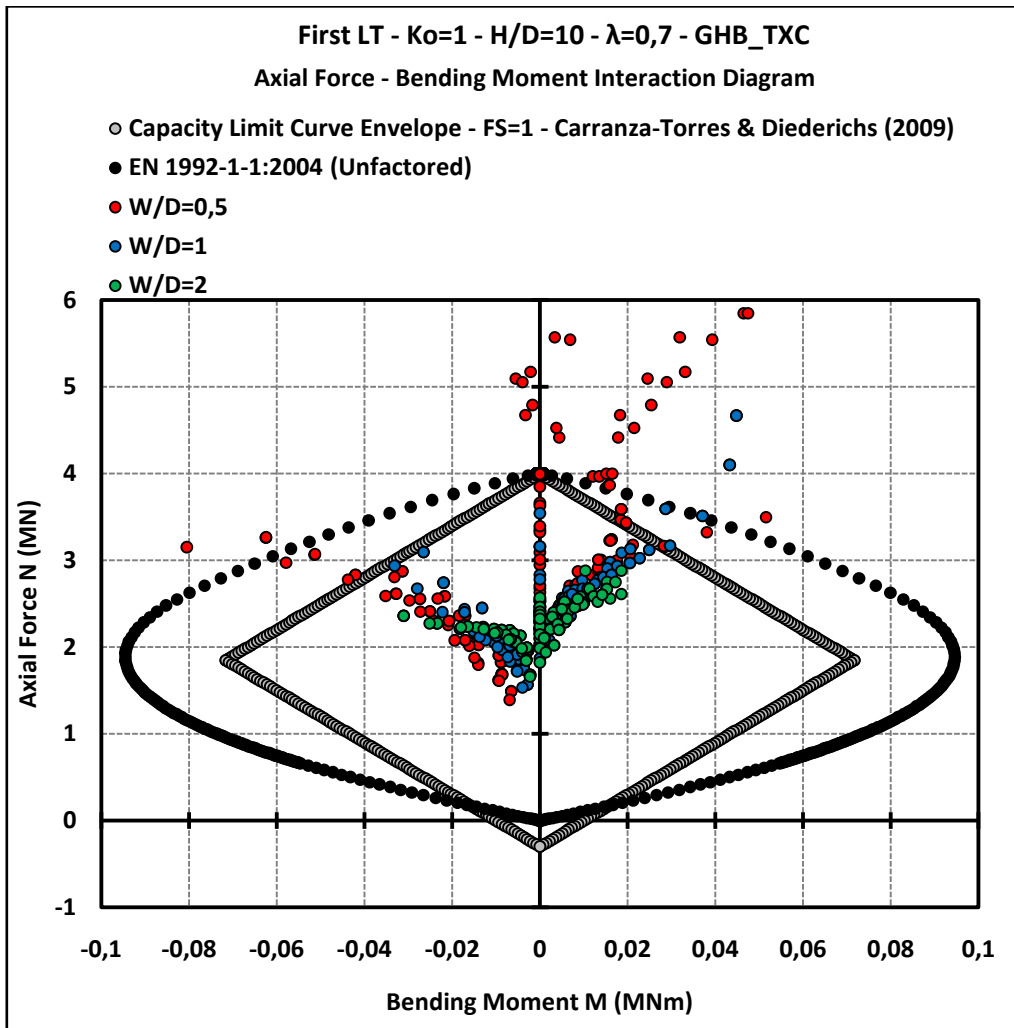
Άλλο ένα σημαντικό στοιχείο που εξάγεται από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, είναι η απόκριση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως προς τη συνδυαστική δύναμη της αξονικής δύναμης και της καμπτικής ροπής που δρουν σε αυτό καθώς και της αξονικής δύναμης με την τέμνουσα δύναμη. Το πρώτο παρουσιάζεται με την βοήθεια των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης που στον οριζόντιο άξονα αναπαριστούν την καμπτική ροπή που δέχεται ένα σημείο διατομής, και στον κατακόρυφο την αντίστοιχη αξονική (θλιπτική) δύναμη, ενώ το δεύτερο με τα αντίστοιχα διαγράμματα που στον οριζόντιο άξονα έχουν τις τέμνουσες δυνάμεις και στον κατακόρυφο τις αξονικές. Παρουσιάζεται κι εδώ η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων (πλάτος πυλώνα, βαθμός αποτόνωσης, βαθμονόμηση αριθμητικού προσομοιώματος) στην απόκριση του σκυροδέματος μέσω των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης. Όλα τα διαγράμματα αφορούν την «πρώτη» (First LT) σήραγγα.

4.3.3.1. Διάγραμμα Αλληλεπίδρασης Αξονικής δύναμης – Καμπτικής Ροπής

Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα M-N (αξονικών δυνάμεων - καμπτικών ροπών), τα οποία όπως παρατηρήθηκε είναι και τα κρισιμότερα. Γίνεται μία προσπάθεια να προβληθεί η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων και σε αυτά τα διαγράμματα μέσω της εξέλιξης των καμπυλών, οι οποίες αποτελούνται από όλες τις βραχομάζες που μελετήθηκαν και όλες τις χαρακτηριστικές τιμές που τις αφορούν (avg, max, min, $\theta=90^\circ$, $\theta=270^\circ$, $\theta=180^\circ$, $\theta=360^\circ$). Στα διαγράμματα παρουσιάζονται τα όρια των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης (περιβάλλουσες αστοχίας) όπως έχουν ορίζονται κατά των Ευρωκώδικα2 και κατά Carranza&Diederichs (2009). Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης παρουσιάζονται χωρίς επιμέρους συντελεστές ασφαλείας στις δράσεις ή τις αντοχές (οι τιμές είναι χαρακτηριστικές).

- Επίδραση πλάτους πυλώνα

Ξεκινώντας την παρουσίαση των διαγραμμάτων με την επιρροή που έχει σε αυτά το πλάτος του πυλώνα, παρατηρείται κι εδώ μία ανάδειξη της κρισιμότητας αυτού καθώς μειώνεται με ελάχιστη τιμή αυτή για $W/D=0,5$. Παρατηρείται μία μεγαλύτερη διασπορά των σημείων καθώς το πλάτος του πυλώνα μικραίνει, με μία αύξηση τόσο των αξονικών δυνάμεων όσο και των αντίστοιχων καμπτικών ροπών. Φαίνεται και στο γράφημα 4.41 ένα μεγάλο πλήθος σημείων να αστοχούν σε θλίψη για πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$, ένα αρκετά μικρότερο πλήθος να αστοχεί για $W/D=1$ ενώ ουσιαστικά κανένα σημείο δεν αστοχεί για το μεγάλο πλάτος πυλώνα $W/D=2$.

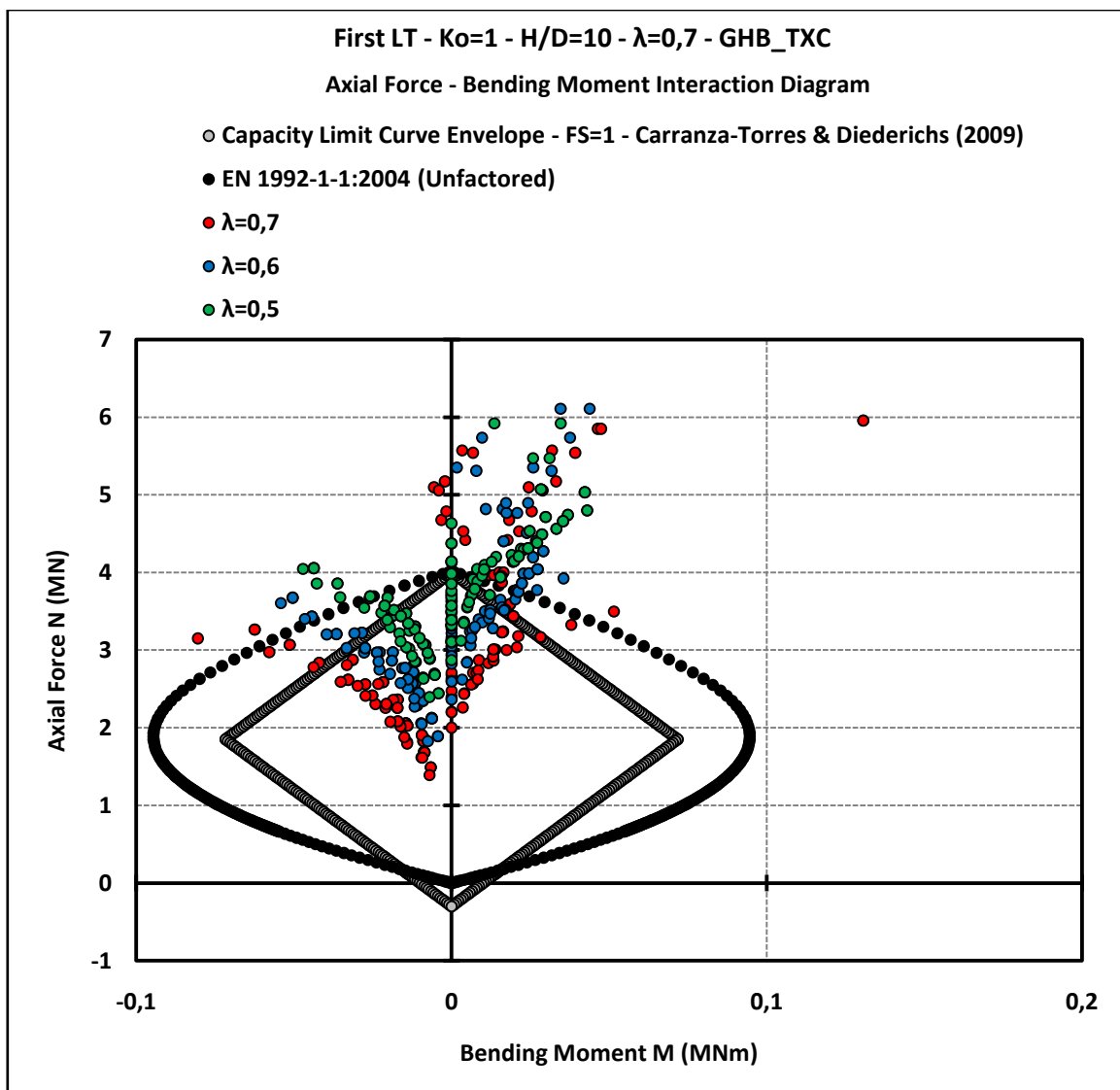


Γράφημα 4.41: Διάγραμμα Αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων (N) – καμπτικών ροπών (M) για την υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για διάφορα πλάτη πυλώνα ($W/D=0,5$, $W/D=1$, $W/D=2$)

- Επιρροή βαθμού αποτόνωσης

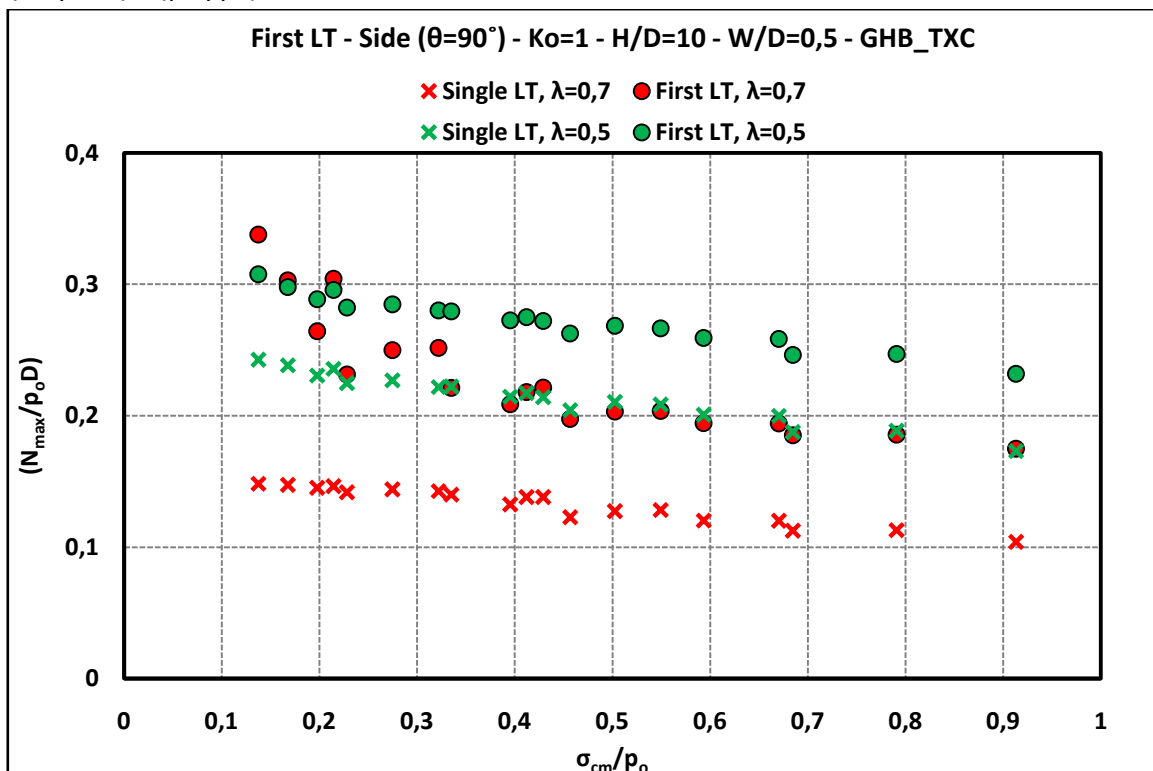
Όμοια με πριν, στο επόμενο γράφημα 4.42 παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων-καμπτικών ροπών, με την διαφορά ότι εδώ φαίνεται η επίδραση του βαθμού αποτόνωσης των σηράγγων στη συνδυαστική αυτή δράση στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Το διάγραμμα αναφέρεται κι εδώ στη κρίσιμη αριστερή πρώτη σήραγγα.

Εδώ παρατηρείται ότι η μικρότερη αποτόνωση της σήραγγας ($\lambda=0,5$) έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερους συνδυασμούς αξονικών δυνάμεων-καμπτικών ροπών, το οποίο συνεπάγεται με περισσότερα σημεία να αστοχούν. Βέβαια παρατηρείται και μία περιοχή σημείων όπου πολλά σημεία που αναφέρονται στην αποτόνωση $\lambda=0,7$, αστοχούν όντας εκτός ορίων που ορίζονται στο διάγραμμα. Σε αυτή την περιοχή τα σημεία για τις διάφορες αποτονώσεις δεν ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη τάση και υπάρχει πλήθος σημείων που αφορούν και τις τρεις αποτονώσεις που τελικώς αστοχούν.



Γράφημα 4.42: Διάγραμμα Αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων (N) – καμπτικών ροπών (M) για την υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για διάφορους βαθμούς αποτόνωσης ($\lambda=0,7$, $\lambda=0,6$, $\lambda=0,5$)

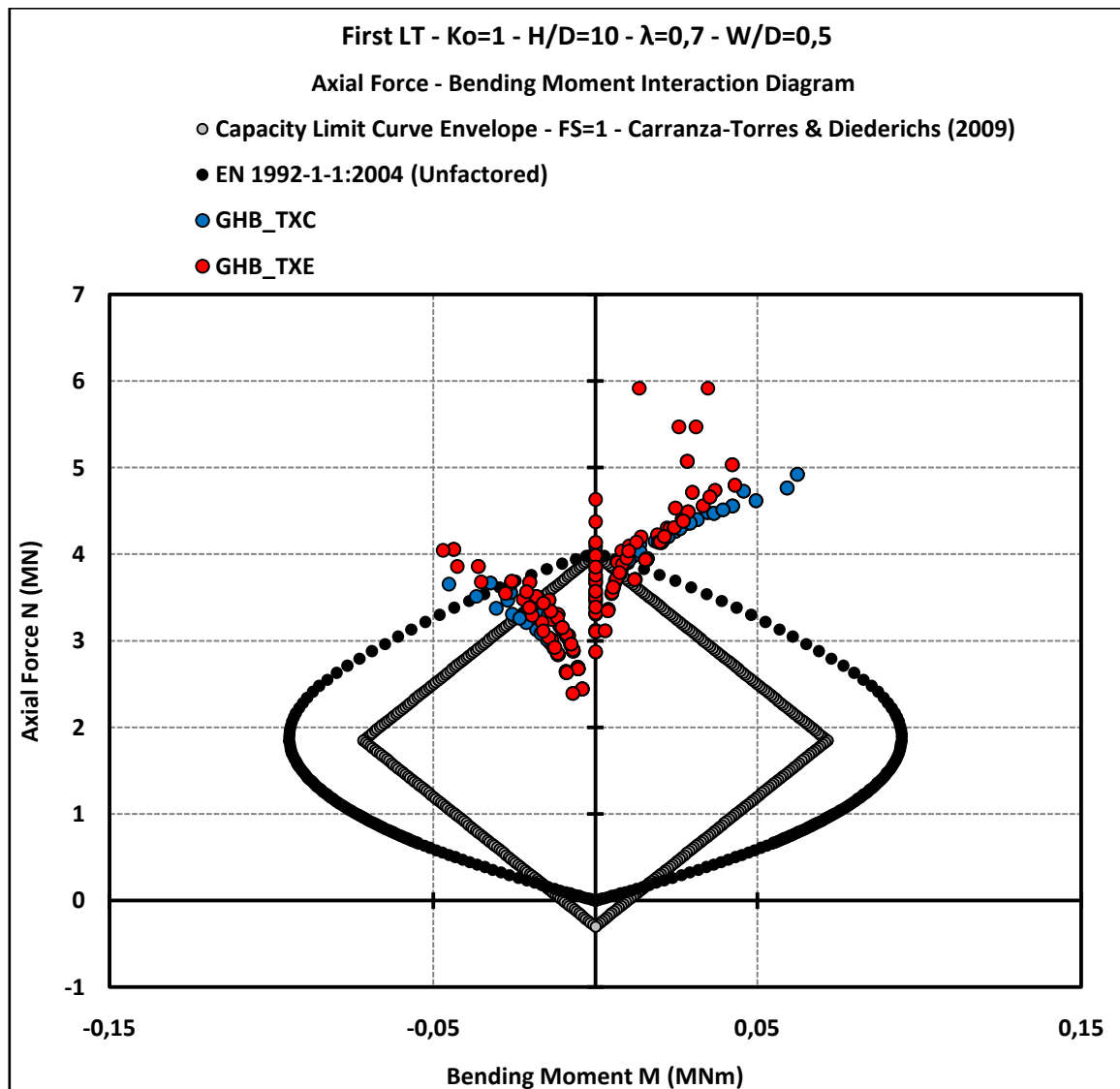
Άλλο ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα που προκύπτει από το παραπάνω γράφημα 4.42 συνδυαστικά με τους πίνακες 4.4 και 4.5, είναι ότι ενώ σαν απόλυτες τιμές η μικρή αποτόνωση $\lambda=0,5$ δίνει μεγαλύτερες τιμές για την «πρώτη» (FirstLT) σήραγγα, οι λόγοι που φαίνονται στους πίνακες (FirstLT/SingleLT) είναι μικρότεροι συγκριτικά με τις δύο μεγαλύτερες αποτονώσεις ($\lambda=0,6$ και $\lambda=0,7$). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τιμές της αξονικής δύναμης τόσο για τη μονή όσο και για την πρώτη σήραγγα είναι μεγαλύτερες για $\lambda=0,5$ αλλά κοντά σχετικά μεταξύ τους, με αποτέλεσμα ο λόγος να μην είναι μεγάλος. Αντίθετα για τις μεγαλύτερες αποτονώσεις (πχ $\lambda=0,7$) η τιμή της αξονικής δύναμης για τη «μονή» σήραγγα είναι μικρή (λόγω αποτόνωσης της τάσης του περιβάλλοντος γεωυλικό) αλλά η «πρώτη» αναπτύσσει (ειδικά για ασθενείς βραχομάζες) αρκετά μεγάλες τιμές, με αποτέλεσμα ο λόγος των δυνάμεων της «πρώτης» προς τη «μονή» να προκύπτει μεγάλος. Αυτό το φαινόμενο (παρουσιάζονται οι τιμές στο παρακάτω γράφημα 4.43 και έχει αναφερθεί και στην ενότητα 4.2.2) οφείλεται στην μεγαλύτερη πλαστική ζώνη που δημιουργείται κατά τη μεγαλύτερη αποτόνωση της αριστερής σήραγγας, που σε συνδυασμό με την τασική ανακατανομή λόγω διάνοιξης της δεξιάς σήραγγας και την εμφάνιση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, έχει ως αποτέλεσμα την φόρτιση του πυλώνα και κατά συνέπεια την «πρώτη» σήραγγα, από ευρύτερη πλαστικοποιημένη περιοχή. Όλα τα παραπάνω οδηγούν το λόγο της να αυξάνεται για αυτή την αποτόνωση αλλά τις τιμές της αξονικής δύναμης για κάθε μία σήραγγα να είναι σχετικά μικρότερες από ότι για $\lambda=0,5$ (με εξαίρεση πολύ ασθενείς βραχομάζες για την πρώτη σήραγγα).



Γράφημα 4.43: Μέγιστες κανονικοποιημένες αξονικές δυνάμεις για το σύνολο των βραχομαζών που μελετήθηκαν, για $W/D=0,5$ για τη «μονή» και «πρώτη» σήραγγα, για δύο βαθμούς αποτόνωσης ($\lambda=0,7$ & $\lambda=0,5$).

- Επιρροή βαθμονόμησης αριθμητικού προσομοιώματος

Στο παρακάτω γράφημα 4.44 φαίνεται η επίδραση της βαθμονόμησης του αριθμητικού προσομοιώματος ως προς τα αναπτυσσόμενα ζεύγη των εντατικών μεγεθών που ασκούνται στην υποστήριξη. Επιβεβαιώνεται, όπως έχει παρατηρηθεί και σε προηγούμενες ενότητες της εργασίας, η συντηρητική προσέγγιση κατά την βαθμονόμηση σε τριαξονικό εφελκυσμό, με αρκετές θέσεις της υποστήριξης να αναπτύσσουν αρκετά μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις σε σχέση τις αντίστοιχες τιμές για θέσεις της υποστήριξης κατά τη βαθμονόμηση σε τριαξονική θλίψη. Αυτό συνεπάγεται αρκετά περισσότερες θέσεις της υποστήριξης για βαθμονόμηση του κριτηρίου αστοχίας σε τριαξονικό εφελκυσμό να αστοχούν τελικά σε σχέση με την βαθμονόμηση σε τριαξονική θλίψη.

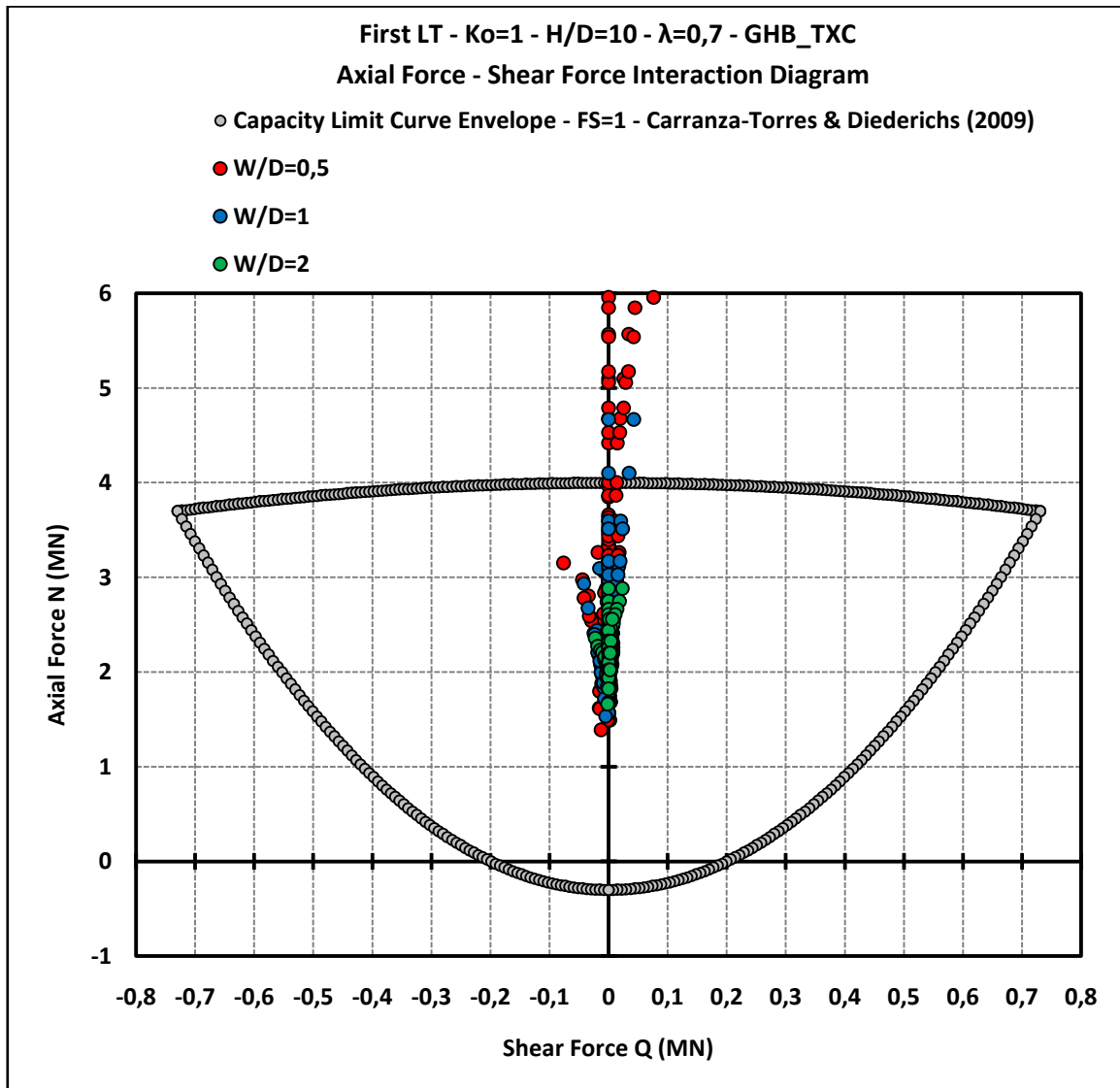


Γράφημα 4.44: Διάγραμμα Αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων (N) – καμπτικών ροπών (M) για την υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τις δύο βαθμονομήσεις του αριθμητικού προσομοιώματος (GHB_TXC & GHB_TXE)

4.3.3.2. Διάγραμμα αλληλεπίδρασης τέμνουσας δύναμης – Αξονικής δύναμης

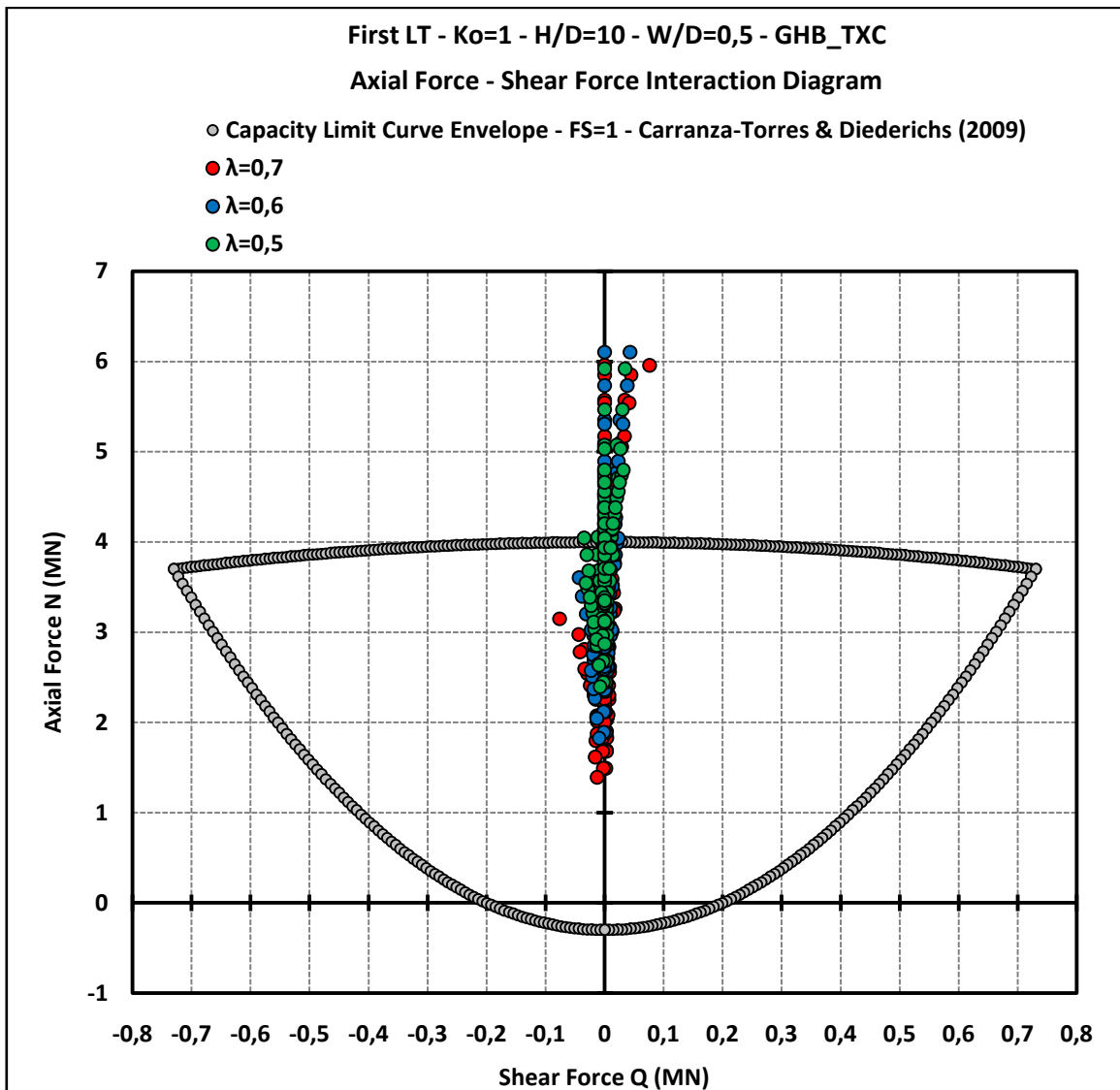
Εδώ παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα αλληλεπίδρασης όπως προηγουμένως, που αναφέρονται όμως στην τέμνουσα δύναμη (Q) συνδυαστικά με την αξονική δύναμη (N). Όπως φαίνεται στα παρακάτω γραφήματα, η τέμνουσα παίζει πολύ μικρό ρόλο στα διαγράμματα αλληλεπίδρασης, μιας και οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις που αναπτύσσονται στις διατομές έχουν αρκετά μικρές τιμές και παρουσιάζονται περισσότερο για λόγους πληρότητας.

- Επίδραση πλάτους πυλώνα



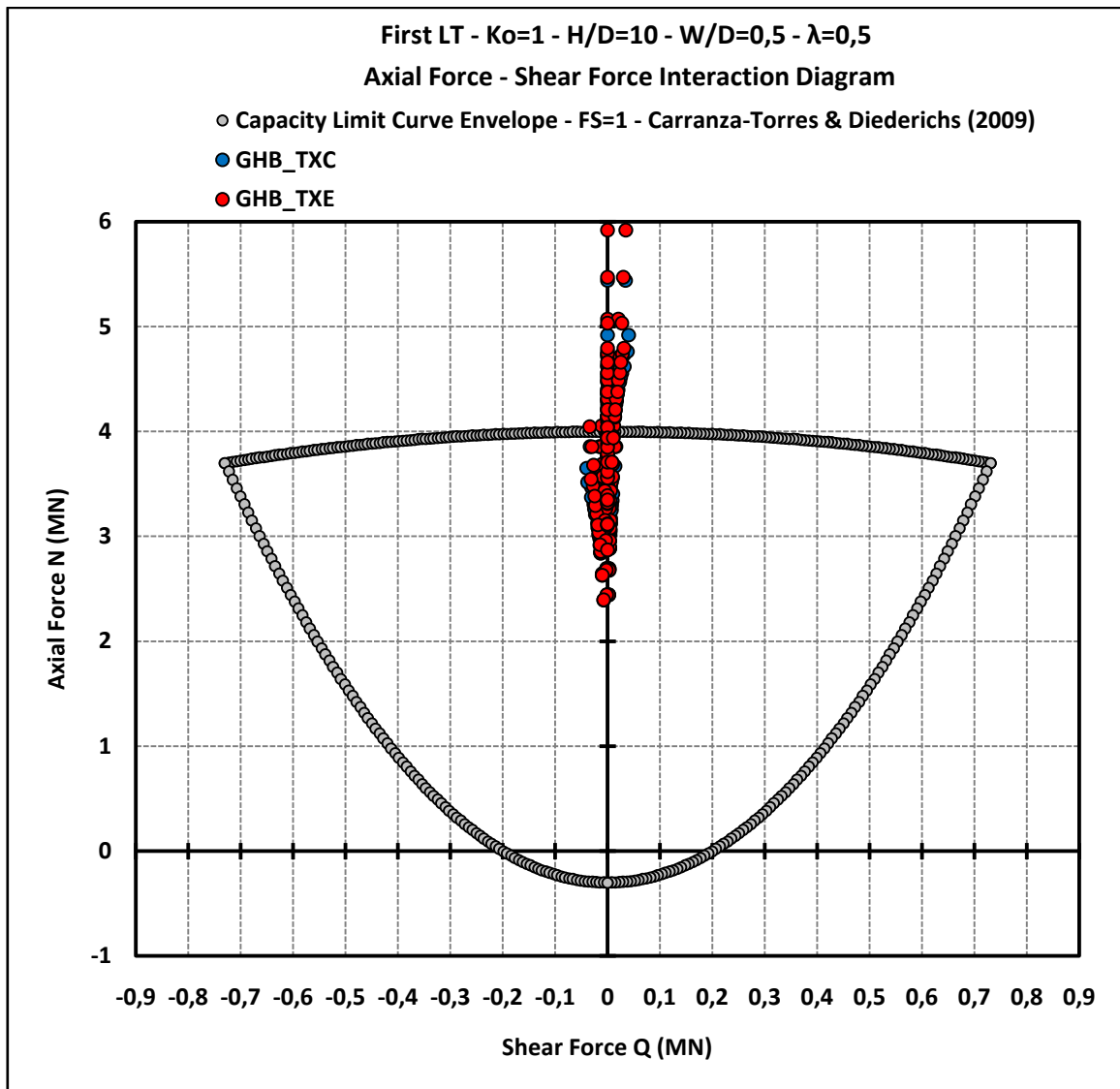
Γράφημα 4.45: Διάγραμμα Αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων (N) – τεμνουσών δυνάμεων (Q) για την υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για διάφορα πλάτη πυλώνα (W/D=0,5, W/D=1, W/D=2)

- Επιρροή βαθμού αποτόνωσης



Γράφημα 4.46: Διάγραμμα Αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων (N) – τεμνουσών δυνάμεων (Q) για την υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για διάφορους βαθμούς αποτόνωσης (λ=0,7, λ=0,6, λ=0,5)

- Επιρροή βαθμονόμησης αριθμητικού προσομοιώματος



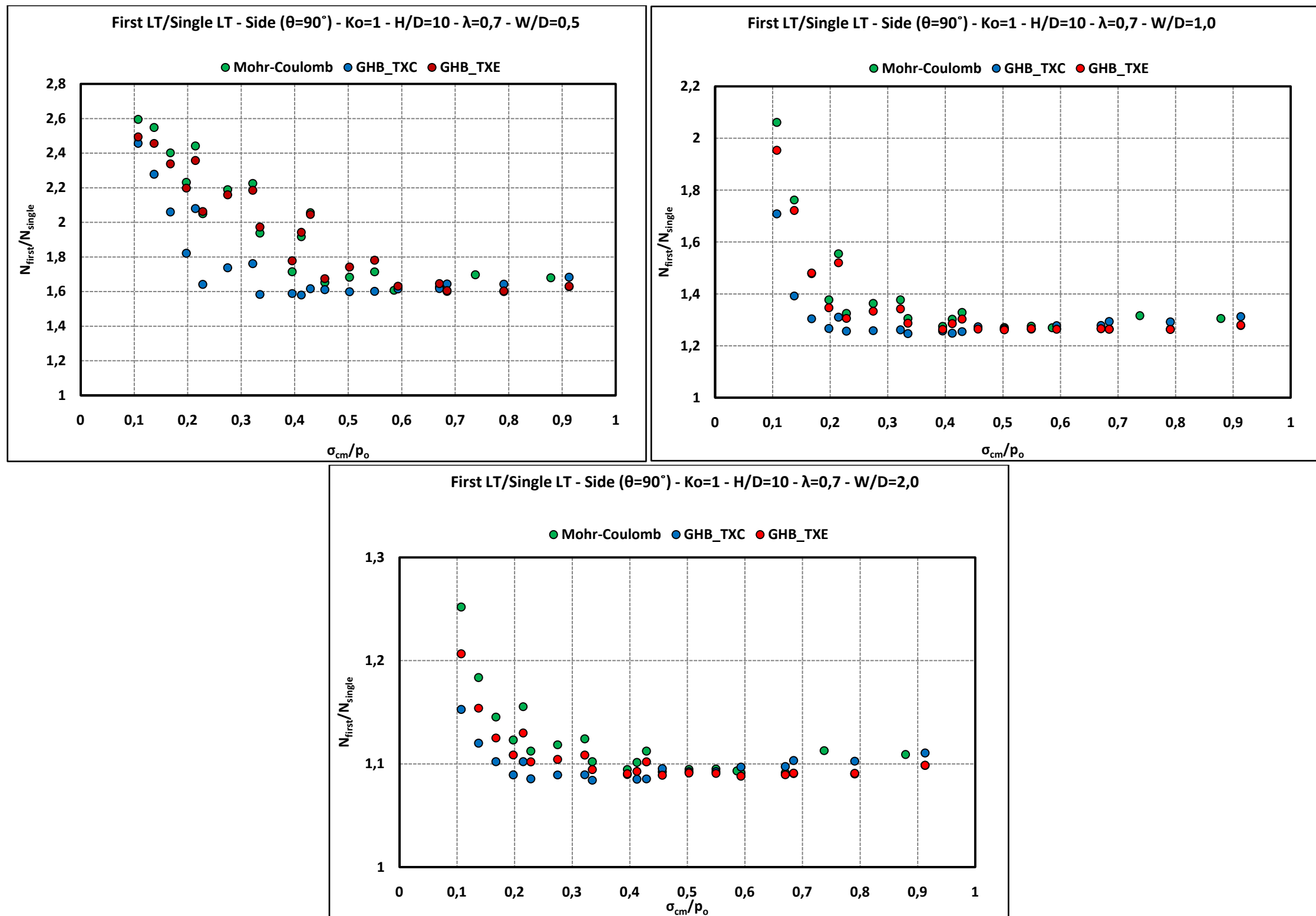
Γράφημα 4.47: Διάγραμμα Αλληλεπίδρασης αξονικών δυνάμεων (N) – τεμνουσών δυνάμεων (Q) για την υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τις δύο βαθμονομήσεις του αριθμητικού προσομοιώματος (GHB_TXC & GHB_TXE)

4.3.4. Σύγκριση κριτηρίων αστοχίας Generalized Hoek Brown και Mohr-Coulomb

Άλλο ένα αντικείμενο με το οποίο ασχολείται η παρούσα εργασία, αφορά τη σύγκριση των δύο βαθμονομήσεων του κριτηρίου αστοχίας Generalized Hoek Brown που μελετήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις, με ένα άλλο αρκετά διαδεδομένο κριτήριο αστοχίας που χρησιμοποιείται αρκετά στην πράξη, το κριτήριο αστοχία Mohr-Coulomb. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των λόγων της πρώτης προς τη μονή σήραγγα των κανονικοποιημένων αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην εσωτερική παρειά προς τον πυλώνα ($\theta=90^\circ$) της αριστερής σήραγγας για όλες τις βραχομάζες που αναλύθηκαν και για τα τρία κριτήρια αστοχίας που συγκρίνονται (GHB_TXC, GHB_TXE και Mohr-Coulomb). Παρουσιάζονται ομαδοποιημένα τα αποτελέσματα και για τα τρία πλάτη πυλώνα, για κάθε βαθμό αποτόνωσης ξεχωριστά (γράφημα 4.48, 4.49 και 4.50). Στη συνέχεια παρατίθενται και σχολιάζονται και οι πίνακες που αφορούν τις μέγιστες (max) και μέσες (avg) τιμές του λόγου των αξονικών δυνάμεων της πρώτης προς τη μονή σήραγγα κάθε πλάτος πυλώνα και βαθμό αποτόνωσης, όπως προκύπτει από τις αναλύσεις με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb λαμβάνονται από την διπλωματική εργασία της Μακατουνάκη (2017). Σημειώνεται ότι στην εν λόγω εργασία η μοναδική διαφοροποίηση είναι το διαφορετικό κριτήριο αστοχίας και ως εκ τούτου η σύγκριση κρίνεται ως ορθή.

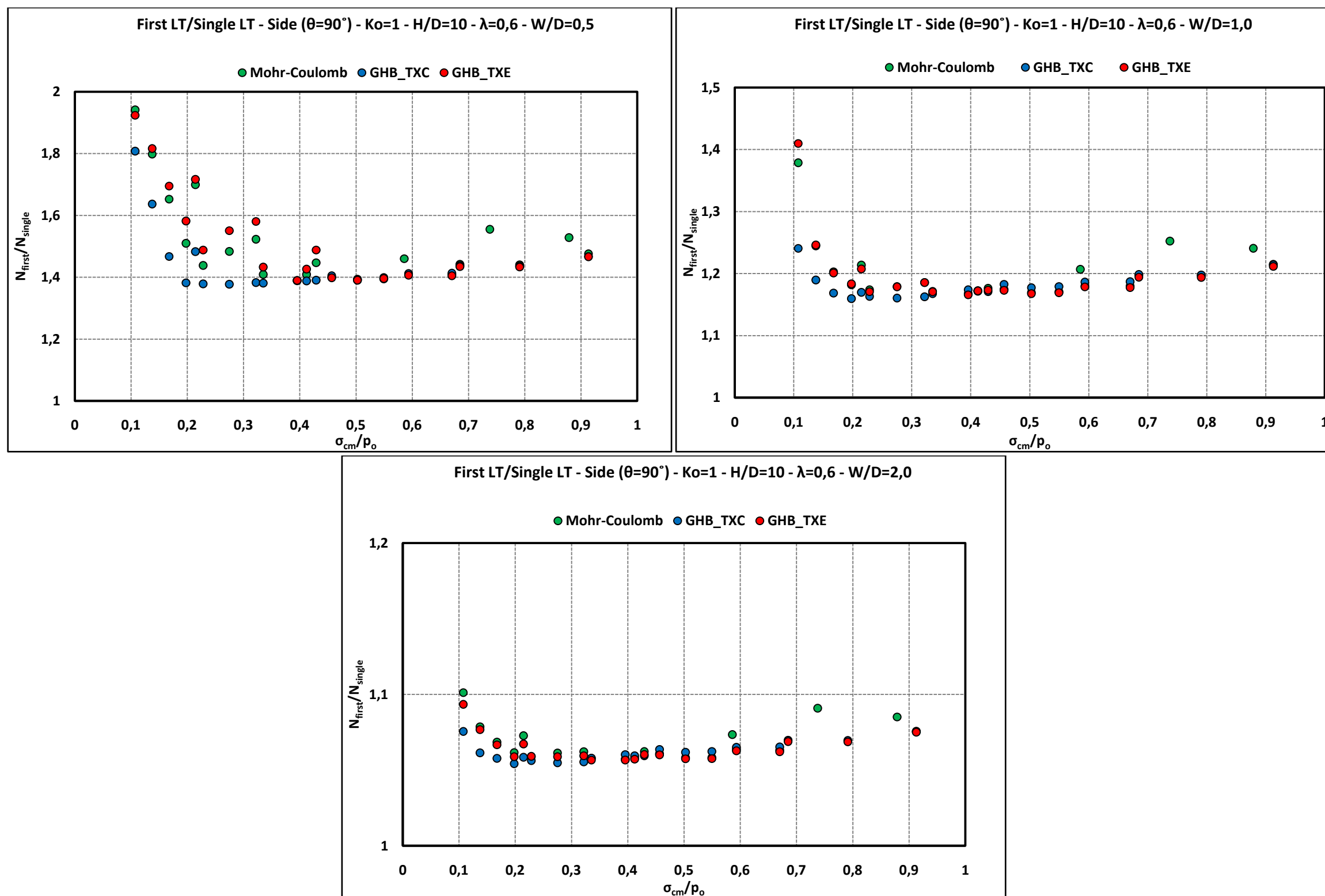
Το βασικότερο συμπέρασμα που εξάγεται από τα διαγράμματα όπου συγκρίνονται τα τρία κριτήρια αστοχίας, είναι ότι το κριτήριο Mohr-Coulomb και το κριτήριο Generalized Hoek Brown βαθμονομημένο σε τριαξονικό εφελκυσμό (GHB_TXE) δίνουν αποτελέσματα που συμφωνούν ως προς την ποσοτικοποίηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης και ειδικότερα τις μεγαλύτερες τιμές για τους παραπάνω λόγους σε σχέση με το κριτήριο Generalized Hoek Brown βαθμονομημένο σε τριαξονική θλίψη (GHB_TXC). Στην περίπτωση όπου το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των σηράγγων ελαχιστοποιείται, παρουσιάζεται μία ταύτιση των αποτελεσμάτων και για τα τρία κριτήρια που συγκρίνονται. Αυτό συμβαίνει είτε για το μεγάλο πλάτος πυλώνα είτε για τις ισχυρότερες βραχομάζες και τους μικρότερους βαθμούς αποτόνωσης.

$\lambda=0,7$



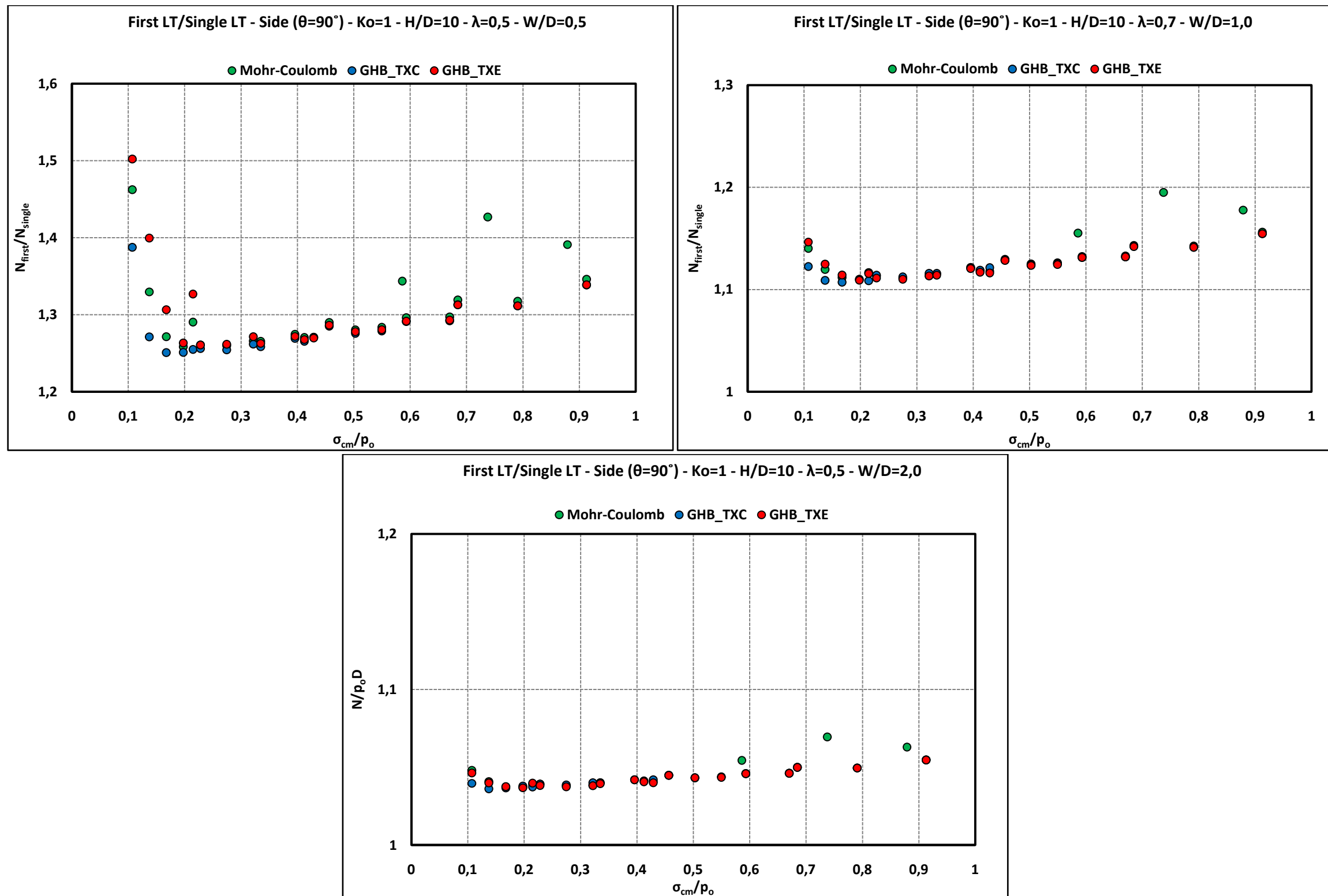
Γράφημα 4.48: Σύγκριση των τριών κριτηρίων αστοχίας (GHB_TXC, GHB_TXE&Mohr-Coulomb) για βαθμό αποτόνωσης $\lambda=0,7$ και πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$ (πάνω αριστερά), $W/D=1$ (πάνω δεξιά) και $W/D=2$ (κάτω κεντρικά)

$\lambda=0.6$



Γράφημα 4.49: Σύγκριση των τριών κριτηρίων αστοχίας (GHB_TXC, GHB_TXE & Mohr-Coulomb) για βαθμό αποτόνωσης $\lambda=0.6$ και πλάτος πυλώνα $W/D=0.5$ (πάνω αριστερά), $W/D=1$ (πάνω δεξιά) και $W/D=2$ (κάτω κεντρικά)

$\lambda=0,5$



Γράφημα 4.50: Σύγκριση των τριών κριτηρίων αστοχίας (GHB_TXC, GHB_TXE & Mohr-Coulomb) για βαθμό αποτόνωσης $\lambda=0,5$ και πλάτος πυλώνα $W/D=0,5$ (πάνω αριστερά), $W/D=1$ (πάνω δεξιά) και $W/D=2$ (κάτω κεντρικά)

Κλείνοντας με τη σύγκριση των τριών κριτηρίων αστοχίας, που παρουσιάστηκε και παραπάνω στα γραφήματα, παρουσιάζονται ομαδοποιημένα τα αποτελέσματα, στους παρακάτω πίνακες, που αφορούν τους μέγιστους λόγους (max) και τις μέσες τιμές αυτών (avg). Παρατηρείται ότι οι τιμές των λόγων και στους δύο πίνακες είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που παρουσιάστηκαν στους πίνακες 4.4 και 4.5, μιας και εκείνοι αναφέρονται στα ίδια αποτελέσματα μεν, αλλά με βάση τη βαθμονόμηση σε τριαξονική θλίψη, δε.

Πίνακας 4.6: Εύρη τιμών του λόγου των μέσων αξονικών δυνάμεων της πρώτης προς τη μονή σήραγγα, που δρουν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για όλες τις περιπτώσεις των βαθμών αποτόνωσης και πλατών πυλώνα για το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

	$(N_{first,avg}/N_{single,avg}) - Ko=1 - MC$					
	W/D=0,5		W/D=1		W/D=2	
	$\sigma_{cm}/\rho_o < 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o > 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o < 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o > 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o < 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o > 0,5$
$\lambda=0,7$	1.70-1.15	1.07	1.50-1.05	1.00	1.10-1.00	1.00
$\lambda=0,6$	1.40-1.10	1.05	1.15-1.00	1.00	1.05-1.00	1.00
$\lambda=0,5$	1.15-1.05	1.03	1.05-1.00	1.00	1.00	1.00

Πίνακας 4.7: Εύρη τιμών του λόγου των μέγιστων αξονικών δυνάμεων της πρώτης προς τη μονή σήραγγα, που δρουν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για όλες τις περιπτώσεις των βαθμών αποτόνωσης και πλατών πυλώνα για το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

	$(N_{first,max}/N_{single,max}) - Ko=1 - MC$					
	W/D=0,5		W/D=1		W/D=2	
	$\sigma_{cm}/\rho_o < 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o > 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o < 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o > 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o < 0,5$	$\sigma_{cm}/\rho_o > 0,5$
$\lambda=0,7$	2.60-1.65	1.65	2.05-1.25	1.25	1.25-1.05	1.05
$\lambda=0,6$	1.95-1.40	1.40	1.40-1.15	1.15	1.10-1.05	1.05
$\lambda=0,5$	1.45-1.25	1.30	1.15-1.10	1.10	1.05-1.00	1.00

5. Συμπεράσματα & Προτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται μία μεγάλη κατηγορία υπογείων τεχνικών έργων, αυτή των δίδυμων γειτονικών σηράγγων. Η ύπαρξη και χρήση αυτών έχει γίνει αναγκαία στις σύγχρονες αναπτυγμένες κοινωνίες, ενώ η κατασκευή τους πρέπει να ανταποκρίνεται σε αυξημένες απαιτήσεις ασφάλειας και λειτουργικότητας. Προκύπτει, επομένως, η αναγκαιότητα της πλήρους και σε βάθος κατανόησης του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μεταξύ γειτονικών δίδυμων σηράγγων, καθώς και του μηχανισμού εξέλιξης των μετακινήσεων και ανάπτυξης των τάσεων τόσο στο περιβάλλον γεωυλικό όσο και στην άμεση υποστήριξη. Αυτό αποτελεί και το βασικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας, που επικεντρώνεται κατά κύριο λόγο στις αναπτυσσόμενες αξονικές δυνάμεις στην διατομή της άμεσης υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, και στις δύο σήραγγες, και στην επιρροή του φαινομένου της αλληλεπίδρασης σε αυτές. Επίσης μελετώνται και οι τάσεις και μετακινήσεις της βραχομάζας σε χαρακτηριστικές θέσεις, λόγω της διάνοιξης των δύο σηράγγων. Για όλα τα παραπάνω πραγματοποιήθηκε μία σειρά παραμετρικών αναλύσεων, ελέγχοντας βασικές παραμέτρους, όπως το πλάτος του πυλώνα (W/D), τον συντελεστή αποτόνωσης των σηράγγων (λ) και την βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος ως προς την επίδρασή τους σε αυτά τα μεγέθη και κατ' επέκταση στον μηχανισμό της αλληλεπίδρασης των σηράγγων. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, και στη συνέχεια τα αποτελέσματα επεξεργάστηκαν με υπολογιστικά φύλλα Excel.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία του συνόλου των αναλύσεων και των διαγραμμάτων που παρήχθησαν, ενώ περιλαμβάνεται και μια σειρά προτάσεων για την περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Τα συμπεράσματα αναφέρονται στις συγκεκριμένες παραδοχές που υιοθετήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας.

5.1. Συμπεράσματα

Το βασικό συμπέρασμα που εξάγεται από την πλειοψηφία των αναλύσεων (ανεξάρτητα των τιμών των μεταβλητών παραμέτρων) και αποτελεί την βάση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης των σηράγγων, είναι ότι η «πρώτη» σήραγγα (FirstLT) καταπονείται περισσότερο (έστω και τμηματικά) σε σχέση με τη «μονή» (SingleLT) και «δεύτερη» (SecondRT) σήραγγα.

Το φαινόμενο ερμηνεύεται ως εξής: αρχικά εκσκάπτεται και υποστηρίζεται η αριστερή-ανεξάρτητη σήραγγα η οποία συγκλίνει ως ένα καθορισμένο βαθμό, προκαλώντας ανακατανομές τάσεων και μία ομοιόμορφη πλαστική ζώνη γύρω από αυτή. Στη συνέχεια εκσκάπτεται και η δεξιά σήραγγα προκαλώντας επιπλέον ανακατανομή τάσεων και διεύρυνση της πλαστικής περιοχής ιδιαίτερα στην περιοχή του πυλώνα, χωρίς όμως να προκαλεί περαιτέρω σύγκλιση στην πρώτη σήραγγα, καθώς η άκαμπτη υποστήριξή της εμποδίζει τη μετακίνηση αυτή. Αυτό οδηγεί σε έντονη αύξηση των φορτίων, ενώ στην περίπτωση δυσμενών γεωτεχνικών συνθηκών με την ύπαρξη εκτενέστερης πλαστικής ζώνης, το φαινόμενο εντείνεται.

✓ Επίδραση πλάτους πυλώνα

- i. Αποτελεί βασικό παράγοντα που επηρεάζει τον βαθμό που αναπτύσσεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης. Το μεγαλύτερο πλάτος πυλώνα είναι ικανό να αναλάβει μεγαλύτερες τάσεις μετά την διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας, χωρίς να καταπονείται ιδιαίτερα η δεξιά παρειά της «πρώτης» σήραγγας.
- ii. Παρατηρήθηκε ότι για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο από $W/D=2$, το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο σηράγγων εξαλείφεται και οι δύο σήραγγες συμπεριφέρονται ουσιαστικά σαν μεμονωμένες-ανεξάρτητες.
- iii. Καθώς το πλάτος πυλώνα μειώνεται (από $W/D=2$ μέχρι την τιμή $W/D=0,5$ που μελετάται), παρατηρείται αύξηση των αξονικών δυνάμεων στο σύνολο της διατομής της «πρώτης» σήραγγας, και ιδιαίτερα στην δεξιά παρειά αυτής (προς τη μεριά του πυλώνα) για γωνίες $\theta=30^\circ$ μέχρι $\theta=150^\circ$.
- iv. Όσον αφορά τις τάσεις και μετακινήσεις της βραχομάζας, παρατηρείται για μεγαλύτερο πλάτος πυλώνα, κατανομή των τάσεων με πολύ λιγότερα στοιχεία να αστοχούν σε σχέση με μικρότερα πλάτη πυλώνα. Όμοια οι μετακινήσεις διατηρούνται σε σχετικά μικρότερες τιμές.
- v. Οι αξονικές δυνάμεις της «πρώτης» σήραγγας συγκριτικά με αυτές της «μονής», είναι αυξημένες στην δεξιά παρειά αυτής προς τον πυλώνα ($\theta=30^\circ-150^\circ$) για οποιαδήποτε περίπτωση βραχομάζας και W/D . Αντίθετα στην υπόλοιπη διατομή της «πρώτης» σήραγγα παρατηρείται μείωση των τιμών, το οποίο σημαίνει ότι αυτή η περιοχή ανακουφίζεται. Αυτό το φαινόμενο δεν παρατηρείται μόνο για $W/D=0,5$ και για πολύ ασθενείς βραχομάζες.

✓ Επίδραση βαθμού αποτόνωσης

- i. Μεγαλύτερος βαθμός αποτόνωσης της σήραγγας συνεπάγεται ανάπτυξη μικρότερων αξονικών δυνάμεων σε όλη την διατομή της «μονής» και «δεύτερης» σήραγγας, οι οποίες συμπεριφέρονται σαν ανεξάρτητες.
- ii. Αυτό παρατηρείται και στη «πρώτη» σήραγγα αλλά μόνο στην περιοχή εκτός της παρειάς προς τον πυλώνα ($\theta < 30^\circ$ & $\theta > 150^\circ$) όπου δεν φορτίζεται επιπλέον λόγω αλληλεπίδρασης των σηράγγων.
- iii. Στην περιοχή της δεξιάς παρειάς της «πρώτης» σήραγγας η οποία δέχεται και τις επιβαρυντικές συνέπειες του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, για αρκετά ασθενείς βραχομάζες, η αξονική δύναμη που δέχεται για μεγαλύτερη αποτόνωση είναι μεγαλύτερη σε σχέση με μικρότερη αποτόνωση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μεγαλύτερη αποτόνωση σε ασθενή βραχομάζα δημιουργεί πολύ πιο διευρυμένη πλαστικοποιημένη περιοχή στο περιβάλλον των σηράγγων, με αποτέλεσμα ο πυλώνας και κατ' επέκταση και η δεξιά παρειά της «πρώτης» σήραγγας να φορτίζονται πιο έντονα απ' ότι για μικρή αποτόνωση.
- iv. Για πιο ευμενείς συνθήκες (ισχυρότερες βραχομάζες, μεγάλο πλάτος πυλώνα) οι αξονικές δυνάμεις στην δεξιά παρειά της «πρώτης» σήραγγας είναι μικρότερες για μεγάλο βαθμό αποτόνωσης απ' ότι για μικρό βαθμό αποτόνωσης, λόγω περιορισμού της πλαστικοποιημένης περιοχής που αναπτύσσεται στη βραχομάζα.
- v. Παρόλα αυτά, παρατηρείται για όλες τις βραχομάζες και για όλα τα πλάτη πυλώνα, ότι ο λόγος των αξονικών δυνάμεων (στην παρειά του αριστερού κλάδου για $\theta = 90^\circ$) της «πρώτη» προς τη «μονή» σήραγγα, είναι πάντα μεγαλύτερος για την μεγαλύτερη τιμή της αποτόνωσης. Έτσι ενώ οι τιμές των αξονικών δυνάμεων τόσο για τη «μονή» όσο και για την «πρώτη» σήραγγα είναι μεγαλύτερες σε γενικές γραμμές για τη μικρή αποτόνωση, η πρόσθετη φόρτιση που επέρχεται λόγω της αλληλεπίδρασης είναι πάντα μεγαλύτερη για τη μεγαλύτερη αποτόνωση. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην διαδικασία της κατασκευής των δίδυμων σηράγγων ώστε να μην υποεκτιμάται η αρχική μικρή φόρτιση της «μονής» σήραγγας, υποδιαστασιολογώντας την άμεση υποστήριξη, αφού η αξονική της δύναμη λόγω της διάνοιξης του διπλανού κλάδου, αναμένεται να επιβαρυνθεί σε σημαντικό βαθμό.

✓ Επίδραση βαθμονόμησης του καταστατικού προσομοιώματος

- i. Η βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος σε τριαξονικό εφελκυσμό (GHB_TXE) δίνει γενικά μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε σχέση με την βαθμονόμηση σε τριαξονική θλίψη (GHB_TXC). Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι τα στοιχεία της βραχομάζας αστοχούν σε χαμηλότερα επίπεδα τάσεων (χαμηλότερη στάθμη περιβάλλουσας αστοχίας) στην πρώτη περίπτωση σε σχέση με την δεύτερη, το οποίο συνεπάγεται με ευρύτερη πλαστική ζώνη στον πυλώνα των σηράγγων, κι επομένως μεγαλύτερη φόρτιση αυτών και ειδικά στην παρειά της «πρώτης» που δέχεται εντονότερα τα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης.

- ii. Η διαφορετική ανάπτυξη τάσεων στην βραχομάζα φαίνεται χαρακτηριστικά και στα διαμήκη διαγράμματα, όπου τα στοιχεία της βραχομάζας βαθμονομημένα σε τριαξονικό εφελκυσμό δεν είναι ικανά να αναπτύσσουν το ίδιο υψηλές τάσεις σε σχέση με αυτά που είναι βαθμονομημένα σε τριαξονική θλίψη, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται συχνότερα σε αυτά αστοχίες, συσσωρεύσεις τάσεων και ανομοιόμορφες κατανομές αυτών.
- iii. Από τη σύγκριση των δύο βαθμονομήσεων του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown με αυτό του Mohr-Coulomb, προκύπτει ότι τα αποτελέσματα (λόγος αξονικών δυνάμεων στην άμεση υποστήριξη της «πρώτης» προς τη «μονή» σήραγγα) της βαθμονόμησης του κριτηρίου αστοχίας Generalized Hoek-Brown βαθμονομημένο σε τριαξονικό εφελκυσμό (GHB_TXE) ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με αυτά που προκύπτουν από το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Αντίθετα οι λόγοι των αξονικών δυνάμεων των δύο σηράγγων, προκύπτουν μικρότεροι για την βαθμονόμηση σε τριαξονική θλίψη (GHB_TXC) μιας και λιγότερα στοιχεία βραχομάζας αστοχούν φορτίζοντας στη συνέχεια τις σήραγγες.
- iv. Για πολύ ευνοϊκές συνθήκες διάνοιξης των σηράγγων (ισχυρή βραχομάζα, μεγάλο πλάτος πυλώνα κτλ) τα τρία κριτήρια αστοχίας δίνουν σχεδόν ίδια αποτελέσματα, μιας και η εντατική κατάσταση των στοιχείων της βραχομάζας παραμένει μακριά από οποιαδήποτε καμπύλη αστοχίας.
- v. Από τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, φαίνεται ότι σχετικά μεγαλύτερο πλήθος ζευγών αναπτύσσουν συνδυασμό αξονικών δυνάμεων-καμπτικών ροπών (ή τεμνουσών δυνάμεων), τέτοιοι ώστε να ξεπερνούν τα όρια των διαγραμμάτων, όταν το κριτήριο αστοχίας είναι βαθμονομημένο σε τριαξονικό εφελκυσμό σε σχέση με όταν είναι βαθμονομημένο σε τριαξονική θλίψη.

- **Επίδραση γεωτεχνικών συνθηκών (ποιότητας βραχομάζας)**

- i. Η ποιότητα της βραχομάζας στην οποία διανοίγονται οι δύο σήραγγες, αποτελεί βασικό παράγοντα που επιδρά στον τρόπο και στον βαθμό εμφάνισης του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Για τιμές του λόγου γεωτεχνικών συνθηκών (σ_{cm}/ρ_o) $<0,5$ παρατηρείται μία μειούμενη επιρροή αυτής στο μέγεθος του λόγου των αξονικών δυνάμεων, ενώ για (σ_{cm}/ρ_o) $>0,5$ παρατηρείται σταθεροποίηση αυτού σε συγκεκριμένη τιμή.
- ii. Με εξαίρεση τις πολύ ασθενείς βραχομάζες (σε συνδυασμό με μικρό πλάτος πυλώνα), για όλες οι υπόλοιπες ισχυρότερες βραχομάζες, ανεξαρτήτως των λοιπών παραμέτρων, παρατηρείται μία ανακούφιση της υποστήριξης της αριστερής σήραγγας λόγω της διάνοιξης της «δεύτερης», σε όλα τα σημεία εκτός της δεξιάς παρειάς τα οποία φορτίζονται επιπρόσθετα. Αυτό οφείλεται στην αποτόνωση και σύγκλιση της δεξιάς σήραγγας, η οποία προκαλεί ανακατανομές στο τασικό πεδίο στο κοντινό περιβάλλον των σηράγγων.

5.2. Προτάσεις

Από την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας αλλά και λαμβάνοντας υπόψη βιβλιογραφικά δεδομένα καθώς και τις γενικότερες διεθνείς εξελίξεις σχετικά με τη μελέτη και κατασκευή δίδυμων σηράγγων, παρατίθενται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση:

- Η επίδραση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης σε σήραγγες διαφορετικού σχήματος από το κυκλικό που μελετήθηκε (π.χ. πεταλοειδείς)
- Διενέργεια αναλύσεων που προσομοιώνουν τμηματική εκσκαφή των σηράγγων σε δύο ή περισσότερες φάσεις εκσκαφής.
- Πραγματοποίηση αναλύσεων για καταστατικά προσομοιώματα που ενσωματώνουν κι άλλα πιο σύνθετα χαρακτηριστικά, και σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα υπάρχοντα.

Βιβλιογραφία

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

Addenbrooke T.I., Potts D.M., 1996, Twin tunnel construction-ground movements and lining behavior. In proceedings of the 1st International Symposium on the Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Balkema, Rotterdam, 441-446.

Carranza-Torres C., 2004, Elasto-plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the hoek-brown failure criterion, Itasca Consulting Group Inc., Minnesota, USA

Carranza-Torres C.,*, Fairhurst C., 1999, The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 36, 777-809

Carranza-Torres C., Diederichs M. S., 2000, Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion, Elsevier Science Ltd., Tunneling and underground space technology Volume 15, Number 2, 187-213

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

Chang C.T., Lee M.C., Hou P.C., 1996, Design of twin-tube tunnel through soft rock. Proceedings of the International Symposium on the Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Balkema, Rotterdam, 251-255.

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

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

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

Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B., 2002, Hoek-Brown failure criterion. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunnelling Association of Canada. NARMS-TAC, Toronto, Canada, 1, 267-273

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

Hoek E., Marinos P., 2007, A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. *Soils and Rocks*, No. 2. November 2007.

Karakus M., Ozsan A., Hakan B., 2006, Finite element analysis for the twin metro tunnel constructed in Ankara Clay, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66, 71-79

Kim S.H., 2004, Interaction behaviors between parallel tunnels in soft ground. *Tunneling and Underground Space Technology*, 19, 448-454

Koungelis D.K., Augarde C.E., 2004, Interaction between multiple tunnels in soft ground. In *Developments in mechanics of structures & materials: Proceedings of the 18th Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*, Perth. Australia

Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W., 2004, Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunnelling method (NATM) twin tunnel interactions. *Canadian Geotechnical Journal*, 41, 523-539

Terzaghi, H. 1942. Liner-plate tunnels on the Chicago subway. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 68(6), pp. 862-899.

Vlachopoulos N., Diederichs M. S., 2009, Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels, *Rock Mech Rock Engng* (2009) 42: 131–146

Ward, W.H. & Thomas, H.S.H. 1965. The development of earth loading and deformation in tunnel linings in London Clay. In *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Toronto, Ont. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. Vol. 2, pp. 432-436.

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

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

Νύχτη Φ., 2016, Υπολογιστική διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ βαθιών δίδυμων σηράγγων. 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. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

