



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΔΙΔΥΜΩΝ ΑΒΑΘΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
Αριστείδη Ν. Τουσμάνη  
Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού, Π.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:  
Μ. ΚΑΒΒΑΔΑΣ  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2015



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής του Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του κ. Μ.Καββαδά, Αν. Καθηγητή Ε.Μ.Π. Ολοκληρώνοντας την προσπάθεια αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν και συνέβαλαν στην εκπόνηση της εργασίας.

Πιο συγκεκριμένα, οφείλω να ευχαριστήσω τον κ. Μ. Καββαδά, Αν. Καθηγητή Ε.Μ.Π για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το θέμα της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την ευκαιρία που έδωσε να εμβαθύνω στο γνωστικό αντικείμενο του σχεδιασμού αβαθών σηράγγων.

Επίσης θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Φ. Χόρτη, Πολιτικό Μηχανικό και Υπ. Διδάκτορα Ε.Μ.Π. για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Η συμβολή του στην περάτωση της παρούσας διπλωματικής ήταν καθοριστική, τόσο σε επιστημονικό, όσο και σε οργανωτικό επίπεδο. Τον ευχαριστώ επίσης για τον προσωπικό του χρόνο που διέθεσε, για την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο επιστημονικό μου έργο και για την υπομονή του όλους αυτούς τους μήνες.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους φίλους που στάθηκαν δίπλα μου αυτό το διάστημα για την στήριξή τους και το ενδιαφέρον τους. Το μεγαλύτερο όμως ευχαριστώ ανήκει στην οικογένειά μου για την ανεκτίμητη βοήθεια και τη στήριξη που μου παρείχε, τόσο σε προσωπικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά τα τελευταία χρόνια η υπόγεια ανάπτυξη που συντελείται στα αστικά κέντρα έχει δημιουργήσει την ανάγκη για διάνοιξη παράλληλων όμοιων σηράγγων σε μικρή μεταξύ τους απόσταση, οι οποίες είναι γνωστές με τον όρο δίδυμες σήραγγες. Το πρόβλημα σε αυτά τα τεχνικά έργα είναι ότι οι δύο κλάδοι αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι δυνάμεις και οι μετακινήσεις στην επένδυση των δύο σηράγγων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την αλληλεπίδραση δίδυμων σηράγγων, εκσκαπτόμενων με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με πίεση στο μέτωπο (EPB/Slurry TBM), σε μικρό βάθος από την επιφάνεια και εντός χαλαρού εδαφικού υλικού. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν τριδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, μέσω των οποίων πραγματοποιήθηκαν πολυπαραμετρικές αναλύσεις διάνοιξης δίδυμων σηράγγων. Οι παράγοντες που εξετάστηκαν ήταν το ύψος των υπερκειμένων, η οριζόντια (διαμήκης) απόσταση των δύο μετώπων, η ασκούμενη από το TBM πίεση στο μέτωπο, τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους και ο συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων.

Η εργασία περιλαμβάνει αρχικά μία βιβλιογραφική ανασκόπηση παλαιότερων ερευνών σχετικών με το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης, αφού το ζήτημα της αλληλεπίδρασης είναι αρκετά πολύπλοκο ώστε να καλυφθεί από μία και μόνο έρευνα. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των αριθμητικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν, των παραδοχών που υιοθετήθηκαν, των τιμών που επιλέχθηκαν και των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, πρώτα για τη μονή σήραγγα, έπειτα για την επίδραση της μίας σήραγγας πάνω στην άλλη και τέλος για την επίδραση των εξεταζόμενων παραμέτρων στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης. Κλείνοντας, πραγματοποιείται μια σύνοψη όλων όσων αναφέρθηκαν στην εργασία και αναφέρονται διάφορα χρήσιμα συμπεράσματα.



## ABSTRACT

Over the past few years, the underground development that takes place in urban areas makes the construction of similar, parallel, closely spaced tunnels necessary. These constructions are known as twin tunnels. The interaction of the two branches of a twin tunnel is the main problem in that kind of engineering projects, because it leads to the increase of structural lining internal forces (normal forces & bending moments), contact pressure on the lining and displacements on the surrounding soil.

The present thesis discusses the interaction of twin tunnels at shallow depths, excavated by tunnel boring machines with face pressure (EPB/Slurry TBM) in soft ground. The investigation performed in this study, led to the development of 3D numerical models using the finite element code ABAQUS. The main parameters investigated in this study are (i) the overburden height ratio, (ii) the horizontal (longitudinal) distance of the two faces, (iii) the face pressure, (iv) the geotechnical conditions and (v) the lateral earth pressure coefficient.

At first, a literature review of previous researches relevant with the interaction effect is being carried out, as this subject is extremely complicated to be dealt with only one research. A detailed description of the numerical models is performed then, all the assumptions made and the analyses took place are mentioned. Subsequently, the results of the numerical models are presented, firstly for a single tunnel, secondly for the effect of one branch over the other and thirdly for the effect of the investigated parameters on the subject. Finally, a review of the study is performed and useful conclusions are carried out.



# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
2.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	5
2.1	<i>Terzaghi H., 1942, Ward W.H. &amp; Thomas H.S.H., 1965 (from Ng C.W.W. Lee K.M., Tang D.K.W., 2004)</i> .....	5
2.2	<i>Adachi T., Kimura M., Osada H., 1993 (from Ng C.W.W. Lee K.M., Tang D.K.W., 2004)</i> .....	6
2.3	<i>Ngoc-Anh Do, Daniel Dias, Pierpaolo Oreste, Irini Djeran-Maigre, 2014</i> .....	6
2.3.1	ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ .....	7
2.3.2	ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ .....	8
2.3.3	ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....	8
2.3.4	ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΕΝΔΥΣΗ .....	9
2.3.5	ΡΟΠΕΣ ΚΑΜΨΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΕΝΔΥΣΗ .....	11
2.4	<i>R.P. Chen, J. Zhu, W. Liu, X.W. Tang, 2011</i> .....	12
2.4.1	ΠΙΕΣΗ ΠΟΡΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΔΑΦΟΣ .....	13
2.4.2	ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ .....	14
2.4.3	ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ .....	15
2.5	<i>Benson Bin-Chen Hsiung and Kuan-Lin Lu, 2007</i> .....	16
2.6	<i>Sang-Hwan Kim, 2004</i> .....	18
2.7	<i>Addenbrooke T.I., Potts D.M., 1996</i> .....	19
2.8	<i>D. N. Chapman, C. D. F. Rogers, D. V. L. Hunt</i> .....	21
3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ.....	23
4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ .....	33
4.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΟΝΗ ΣΗΡΑΓΓΑ.....	34
4.1.1	ΠΙΕΣΗ ΕΠΑΦΗΣ (ΦΟΡΤΙΟ) ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ.....	34
4.1.2	ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ.....	37
4.1.3	ΡΟΠΕΣ ΚΑΜΨΗΣ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ .....	38
4.1.4	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ .....	40
4.1.5	ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ .....	42
4.2	ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ.....	46
4.2.1	ΠΙΕΣΗ ΕΠΑΦΗΣ (ΦΟΡΤΙΟ) ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ.....	46
4.2.2	ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ.....	49
4.2.3	ΡΟΠΕΣ ΚΑΜΨΗΣ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ .....	50
4.2.4	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ .....	51
4.2.5	ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ .....	54
4.2.6	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΠΥΛΩΝΑ .....	57
4.3	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	61
4.3.1	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΩΠΩΝ .....	61
4.3.1.1	ΠΙΕΣΕΙΣ ΕΠΑΦΗΣ (ΦΟΡΤΙΑ) – ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ – ΡΟΠΕΣ ΚΑΜΨΗΣ .....	61
4.3.1.2	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ .....	63
4.3.1.3	ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ .....	65
4.3.2	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ.....	66
4.3.2.1	ΠΙΕΣΗ (ΦΟΡΤΙΟ) ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ .....	67
4.3.2.2	ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ .....	69
4.3.2.3	ΡΟΠΕΣ ΚΑΜΨΗΣ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ .....	71
4.3.2.4	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ .....	73
4.3.2.5	ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ .....	75
4.3.3	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΟ ΜΕΤΩΠΟ .....	77
4.3.3.1	ΠΙΕΣΗ (ΦΟΡΤΙΟ) ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ .....	78
4.3.3.2	ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ .....	80

---

4.3.3.3	ΡΟΠΕΣ ΚΑΜΨΗΣ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ.....	82
4.3.3.4	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....	84
4.3.3.5	ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	85
4.3.4	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΩΘΗΣΕΩΝ.....	87
4.3.4.1	ΠΙΕΣΗ (ΦΟΡΤΙΟ) ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ.....	88
4.3.4.2	ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ.....	90
4.3.4.3	ΡΟΠΕΣ ΚΑΜΨΗΣ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ.....	92
4.3.4.4	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....	94
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....	97
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....</b>	<b>103</b>
	Διεθνής βιβλιογραφία.....	103
	Ελληνική Βιβλιογραφία.....	104
	Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις.....	104

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το έδαφος ανέκαθεν αποτελούσε ένα ιδιαίτερο υλικό για τον τεχνικό κόσμο. Εξαιτίας της φυσικής του προέλευσης χαρακτηρίζεται από εγγενής ανομοιογένεια, ενώ ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων του και η προσομοίωση της συμπεριφοράς του μέσω αριθμητικών μοντέλων παρουσιάζουν μεγάλες δυσκολίες. Επομένως, η κατασκευή ενός έργου επί, πόσο μάλλον δε διαμέσου, του εδάφους αποτελεί μια ιδιαίτερη πρόκληση για κάθε μηχανικό. Χαρακτηριστική περίπτωση τέτοιων έργων είναι οι σήραγγες καθώς:

- πρόκειται για επιμήκη έργα, κατά μήκος των οποίων συναντώνται γεωυλικά με ποικίλα και συνήθως πτωχά χαρακτηριστικά
- αποτελούν έργα μεγάλου κόστους και μεγάλης σημασίας για το κοινωνικό σύνολο
- όταν κατασκευάζονται εντός του αστικού ιστού και σε μικρά βάθη επηρεάζουν σημαντικά τις υπέργειες υπάρχουσες κατασκευές και τα δίκτυα κοινής ωφέλειας.

Ταυτόχρονα τις τελευταίες δεκαετίες συντελείται μία ραγδαία ανάπτυξη των μεγάλων πόλεων. Η ανάπτυξη αυτή συνοδεύεται από διαρκή αύξηση του πληθυσμού και των λειτουργιών που λαμβάνουν χώρα εντός του αστικού ιστού, ο οποίος επίσης διευρύνεται για καλύψει τις αυξημένες αυτές ανάγκες. Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική ανάγκη να μεταφερθούν όσο το δυνατόν περισσότερες λειτουργίες της πόλης στον υπόγειο χώρο. Στην κορυφή αυτής της λίστας βρίσκονται οι μεταφορές (σιδηροδρομικές, οδικές) για τις οποίες απαιτείται ένα πολυδαίδαλο δίκτυο σηράγγων. Εξάλλου οι σήραγγες και γενικότερα η υπόγεια ανάπτυξη είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τη βελτίωση της μεταφορικής ικανότητας οδικών και σιδηροδρομικών δικτύων και με το πρόβλημα της έλλειψης χώρου στην επιφάνεια.

Η κάλυψη των παραπάνω αναγκών, καθώς και πολλών ακόμα που δεν αναλύθηκαν, οδήγησε στην άνθιση μιας τεράστιας βιομηχανίας σχετικής με την μελέτη και την κατασκευή σηράγγων. Η βιομηχανία αυτή, που έχει τις ρίζες της στην αρχαία Ελλάδα με την διάνοιξη του Ευπαλίνειου Ορύγματος στη Σάμο, διαρκώς αναπτύσσεται και βελτιώνεται. Σήμερα, τα έργα σηραγγοποιίας που κατασκευάζονται ανά τον κόσμο αποτελούν αριστουργήματα της μηχανικής και προκαλούν θαυμασμό για το μέγεθός τους, τη λειτουργικότητά τους και για τις αντιξοότητες που αντιμετωπίστηκαν κατά την κατασκευή τους.

Όλη αυτή η εξέλιξη στην κατασκευή των σηράγγων έφερε την ιδέα για δημιουργία δύο παράλληλων όμοιων κλάδων σε μικρή απόσταση μεταξύ τους (δίδυμες σήραγγες). Με την πάροδο των ετών η χρήση της μεθόδου εξαπλώθηκε και επεκτάθηκε σε βαθμό τέτοιο, ώστε να θεωρείται πλέον ο κανόνας και όχι η εξαίρεση σε καινούργια έργα. Η ύπαρξη δύο παράλληλων κλάδων (ενός για κάθε ρεύμα κυκλοφορίας σε περιπτώσεις οδικών και σιδηροδρομικών έργων) σε σχέση με την αντίστοιχη μονή σήραγγα που θα απαιτούσε το έργο λύνει πολλά τεχνικά ζητήματα, τόσο κατά τη φάση κατασκευής, όσο και κατά τη φάση λειτουργίας του έργου. Βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

- Απαιτούνται μικρότερες διατομές καθώς ο κυκλοφοριακός φόρτος μοιράζεται σε δύο σήραγγες. Η ελάττωση της διαμέτρου είναι ιδιαίτερα σημαντική, ειδικά σε περιπτώσεις διάνοιξης εντός γεωυλικού με πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά, όπως

ασθενής βράχος ή εδαφικό υλικό. Τα υλικά αυτά συναντώνται στην πλειονότητα των υπόγειων εκσκαφών εντός του αστικού ιστού, λόγω του γεγονότος ότι: (α) τα βάθη από την επιφάνεια του εδάφους είναι μικρά, (β) στις περιοχές αυτές το υπέδαφος συνήθως αποτελείται από προσχώσεις και αποθέσεις των πιο σύγχρονων γεωλογικών περιόδων, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται ασθενές και χωρίς συνοχή.

- Η κατασκευή πραγματοποιείται με μεγαλύτερη ευκολία, ταχύτητα και ασφάλεια. Οι φάσεις εκσκαφής ελαττώνονται (στην περίπτωση όρυξης με συμβατικά μέσα), η αποκομιδή των γεωυλικών είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμη και γενικώς όλες οι παράλληλες εργασίες στους δύο κλάδους οργανώνονται και εκτελούνται πιο εύκολα και οικονομικά.
- Ο συνολικός όγκος του εκσκαπόμενου γεωυλικού είναι μικρότερος από αυτόν που θα προέκυπτε για μονή σήραγγα αντίστοιχης κυκλοφοριακής ικανότητας. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό εντός του αστικού ιστού όπου η απόθεση αυτών των υλικών είναι συνήθως μεγάλο πρόβλημα και ταυτόχρονα ανεβάζει σημαντικά το κοστολόγιο.
- Τα μέτρα υποστήριξης που απαιτούνται για το μέτωπο και την περιφέρεια της διατομής είναι στο σύνολό τους σημαντικά πιο ελαφριά και οικονομικά από αυτά που χρειάζονται για μία μονή σήραγγα μεγαλύτερων διαστάσεων.
- Οι δύο παράλληλοι κλάδοι εξυπηρετούνται από τους ίδιους βοηθητικούς χώρους (εργοτάξια), μηχανήματα (γερανοί, φορτηγά κλπ.) και προσωπικό (πχ συνεργείο συντήρησης μηχανημάτων), με αποτέλεσμα το κοστολόγιο να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα.
- Η σήραγγα που προηγείται λειτουργεί ως οδηγός (πλότος) για αυτή που έπεται. Συνεπώς όταν εκσκάπτεται ο δεύτερος κλάδος είναι ήδη γνωστές με πολύ μεγάλη ακρίβεια οι γεωτεχνικές συνθήκες που θα συναντηθούν και ο τρόπος που θα αντιμετωπισθούν με επιτυχία.
- Ο διαχωρισμός των δύο ρευμάτων κυκλοφορίας σε ξεχωριστές σήραγγες (σε οδικά και σιδηροδρομικά έργα πάντα) βελτιώνει αισθητά τις συνθήκες ασφάλειας για τους χρήστες και μειώνει τον κίνδυνο ατυχημάτων.
- Η μία σήραγγα λειτουργεί ως έξοδος διαφυγής για την άλλη σε περίπτωση ατυχήματος ή πυρκαγιάς, υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι οι δύο κλάδοι επικοινωνούν κατά διαστήματα μέσω συνδετήριων σηράγγων. Σύμφωνα με διεθνείς κανονισμούς (Οδηγία 2004/54/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου) και του Προεδρικού Διατάγματος 230/2007 (Φ.Ε.Κ. Α264) η απόσταση μεταξύ δύο εξόδων κινδύνου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 500 μέτρα. Επίσης προβλέπει ότι όπου ο κυκλοφοριακός φόρτος υπερβαίνει τα 10000 οχήματα είναι υποχρεωτική η πρόβλεψη σήραγγας δύο κλάδων μονής κατεύθυνσης κυκλοφορίας ανά κλάδο.
- Σε αστικές περιοχές η κατασκευή δύο σηράγγων μικρότερης διατομής δημιουργεί μικρότερες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή μικρότερη όχληση στις υπερκείμενες κατασκευές και μικρότερη πιθανότητα πρόκλησης βλαβών στα κτίρια.

Βασική πρόκληση που προκύπτει για τους μηχανικούς σε περιπτώσεις δίδυμων σηράγγων, τόσο κατά τη διαδικασία μελέτης, όσο και κατά τη φάση κατασκευής είναι το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των δύο κλάδων. Σύμφωνα με τη συνήθη πρακτική πρώτα ξεκινάει η

εκσκαφή της μίας σήραγγας και αφού προχωρήσει το μέτωπο σε μήκος τουλάχιστον ίσο με το δεκαπλάσιο της διαμέτρου αρχίζει η εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας. Έτσι τα δύο μέτωπα έχουν πάντα μία (σταθερή) απόσταση. Με αυτή την πρακτική κατά τη διέλευση της δεύτερης σήραγγας η πρώτη επηρεάζεται (σε όρους μετακινήσεων και έντασης επί της υποστήριξης) καθώς το εδαφικό υλικό τείνει να μετακινηθεί προς το κενό που δημιουργεί η εκσκαπτόμενη σήραγγα. Παράλληλα η διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας είναι δυσμενέστερη σε σχέση με μία αντίστοιχη μονή, αφού εδώ η εκσκαφή πραγματοποιείται εντός της ζώνης επιρροής της πρώτης σήραγγας. Ταυτόχρονα το γεωυλικό ανάμεσα στις δύο σήραγγες (αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως πυλώνας) φορτίζεται υπερβολικά λόγω των τάσεων που προκύπτουν από τις εκσκαφές εκατέρωθέν του.

Γενικώς η αλληλεπίδραση των δίδυμων σηράγγων είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο, το οποίο είναι δύσκολο να ερμηνευθεί και να μελετηθεί. Ο μηχανισμός λειτουργίας δεν είναι σαφής και δεν είναι ίδιος σε όλες τις περιπτώσεις. Το πρόβλημα είναι εντονότερο σε περιπτώσεις αβαθών σηράγγων, όπου το ύψος των υπερκειμένων δεν επαρκεί για τη δημιουργία του φαινομένου του θόλου. Επίσης στις περιπτώσεις αυτές ο λόγος τους βάθους προς τη διάμετρο της σήραγγας ( $H/D$ ) είναι μικρός, με αποτέλεσμα το αρχικό εντατικό πεδίο να μεταβάλλεται κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα της διατομής. Όπως είναι φυσικό, η κατανομή των τάσεων γύρω από τη διατομή είναι περίπλοκη ακόμα και σε περιπτώσεις μονών σηράγγων, πόσο μάλλον σε δίδυμες εκσκαφές όπως εδώ.

Δυστυχώς, η παραγωγή μαθηματικών εξισώσεων που να περιγράφουν με σαφήνεια και ακρίβεια το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι αδύνατη καθώς πρόκειται από τη φύση του για ένα περίπλοκο πρόβλημα, το οποίο επηρεάζεται από έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων, όπως:

- Γεωτεχνικές (έδαφος ή βράχος, φυσικά, μηχανικά και παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά γεωυλικού)
- Υδρογεωλογικές (ύπαρξη υπόγειου νερού, θέση υδροφόρου ορίζοντα κλπ.)
- Γεωμετρικές (ύψος υπερκειμένων, διάμετρος ανοιγμάτων, πλάτος πυλώνα, απόσταση μετώπων κλπ.)
- Κατασκευαστικές (εκσκαφή με εκρηκτικά, με συμβατικές μεθόδους ή με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής TBM, αριθμός φάσεων εκσκαφής, είδος μηχανήματος TBM και χαρακτηριστικά, πίεση στο μέτωπο, ενεμάτωση κλπ.)
- Υποστήριξη (είδος προσωρινής και μόνιμης υποστήριξης, δυσκαμψία, δυνατότητα αποτόνωσης του εδάφους πριν την εφαρμογή της επένδυσης κλπ.)

Όπως γίνεται αντιληπτό, η καθολική εξέταση του φαινομένου, με ταυτόχρονη διερεύνηση όλων των παραμέτρων, αλλά και συνδυασμών αυτών είναι αδύνατη. Στην πράξη η μελέτη του φαινομένου γίνεται με τρεις τρόπους: με εργαστηριακά πειράματα σε μικρά μοντέλα εδαφικού όγκου εντός του οποίου διανοίγονται σήραγγες, με επί τόπου μετρήσεις πεδίου σε πραγματικά έργα εκσκαφής δίδυμων σηράγγων και τέλος μέσω αναλύσεων με αριθμητικά προσομοιώματα (πεπερασμένων στοιχείων, πεπερασμένων διαφορών κλπ.) δύο ή τριών διαστάσεων.

Κάθε σχετική με το αντικείμενο εργασία που έχει εκπονηθεί και είναι διαθέσιμη στη διεθνή βιβλιογραφία έχει συμβάλει περισσότερο ή λιγότερο στην πλήρη διερεύνηση του αχανούς

αυτού προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε εργασία οι ερευνητές εξετάζουν την επιρροή ενός μικρού αριθμού παραμέτρων θεωρώντας όλες τις άλλες ως σταθερές του προβλήματος. Δυστυχώς, με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται πολύ συγκεκριμένες συνθήκες εντός των οποίων μεταβάλλονται οι υπό διερεύνηση παράμετροι, με αποτέλεσμα οι λύσεις που προκύπτουν να μην έχουν καθολική ισχύ.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι ανάμεσα στις διάφορες εργασίες παρατηρείται κάποια σύγκλιση απόψεων σχετικά με τον τρόπο που η κάθε παράμετρος επηρεάζει το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης. Αντίθετα, σε επίπεδο αριθμητικών τιμών των αποτελεσμάτων και δεικτών αλληλεπίδρασης (εκφράζονται συνήθως ως λόγοι τιμών για τις δίδυμες σήραγγες προς τις τιμές για την αντίστοιχη μονή σήραγγα) οι διαφορές είναι συνήθως σημαντικές.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μέρος αυτής της προσπάθειας για μελέτη της αλληλεπίδρασης δίδυμων σηράγγων και ευελπιστεί να συμβάλει καθοριστικά στην πλήρη διερεύνηση και κατανόηση του φαινομένου. Το θέμα της εργασίας είναι η αλληλεπίδραση δίδυμων αβαθών σηράγγων, οι οποίες διανοίγονται εντός εδαφικού υλικού, με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής με πίεση στο μέτωπο (EPB / Slurry TBM). Η προσομοίωση γίνεται μέσω αριθμητικών μοντέλων, με χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Οι παράμετροι που μεταβάλλονται στις αναλύσεις είναι τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους (συνοχή, εσωτερική γωνία τριβής και μέτρο ελαστικότητας), ο συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων, το βάθος των σηράγγων, η απόσταση των μετώπων στην διαμήκη διεύθυνση και η πίεση που ασκεί το TBM στο μέτωπο.

Η διάρθρωση της εργασίας έχει γίνει με γνώμονα την βέλτιστη παρουσίαση του ερευνητικού έργου που προηγήθηκε. Περιληπτικά, οι ενότητες που την απαρτίζουν είναι οι εξής:

- Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά σε προϋπάρχουσα διεθνή βιβλιογραφία σχετική με το ζήτημα της αλληλεπίδρασης των σηράγγων. Παρουσιάζεται μια επιλογή από εργασίες, οι οποίες σύμφωνα με τον συγγραφέα θεωρούνται οι πλέον τεκμηριωμένες και ταυτόχρονα συναφείς με την παρούσα.
- Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αριθμητικών προσομοιωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της εργασίας. Επίσης παραθέτονται οι τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν, καθώς και οι συνδυασμοί αυτών. Τέλος γίνεται η επεξήγηση των όλων συμβόλων που χρησιμοποιούνται μετέπειτα.
- Το Κεφάλαιο 4 αφορά τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων. Αρχικά παρουσιάζονται αποτελέσματα για τη μονή σήραγγα και έπειτα για τις δίδυμες, με ταυτόχρονη επεξήγηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των μεγεθών ανάμεσα στις διάφορες περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί, ώστε να εξετασθεί η επιρροή της κάθε παραμέτρου στο φαινόμενο.
- Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τον παρόν ερευνητικό έργο και από τη σύγκρισή των αποτελεσμάτων του με την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Από τη στιγμή που ξεκίνησε η κατασκευή δίδυμων σηράγγων μέχρι και σήμερα έχει εκπονηθεί ένας μεγάλος αριθμός ερευνών σχετικών με το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης. Η πιο συνηθισμένη και διαδεδομένη μεθοδολογία μελέτης του φαινομένου είναι τα αριθμητικά προσομοιώματα δύο ή τριών διαστάσεων με χρήση κάποιου κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών. Επίσης συχνά συναντώνται εργασίες που αφορούν την επεξεργασία και παρουσίαση αποτελεσμάτων από επιτόπου μετρήσεις σε πραγματικά έργα δίδυμων σηράγγων. Λιγότερο διαδεδομένη είναι η χρήση δοκιμών για παραγωγή εργαστηριακών πειραμάτων μικρής, ή λίγο μεγαλύτερης, κλίμακας. Κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της σε σχέση με την αξιοπιστία των δεδομένων και των αποτελεσμάτων, με τον τρόπο προσομοίωσης, με το πλήθος παραμέτρων που δύνανται να εξετασθούν, με τον απαιτούμενο χρόνο και κόστος κλπ.

Στην παρούσα ενότητα παρατίθεται μία επιλογή από σχετικές εργασίες του παρελθόντος. Αν και η εργασία αποσκοπεί στην παρουσίαση της έρευνας του ίδιου του συγγραφέα, το κεφάλαιο αυτό θεωρείται απαραίτητο ώστε ο αναγνώστης να εξοικειωθεί με το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης. Σκοπός του κεφαλαίου είναι να πραγματοποιηθεί μία εισαγωγή στη δράση του φαινομένου και να δοθούν επιπρόσθετες πληροφορίες σχετικά με το θέμα.

Στις παραγράφους που ακολουθούν πραγματοποιείται μία συνοπτική περιγραφή ορισμένων αξιόλογων ερευνών και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από αυτές:

### 2.1 Terzaghi H., 1942, Ward W.H. & Thomas H.S.H., 1965 (from Ng C.W.W. Lee K.M., Tang D.K.W., 2004)

Στις δύο αυτές εργασίες, οι οποίες είναι και οι παλαιότερες σε χρονολογική σειρά που βρέθηκαν από την αναζήτηση στη διεθνή βιβλιογραφία, πραγματοποιούνται επιτόπου μετρήσεις σε πραγματικά έργα δίδυμων σηράγγων.

Στην πρώτη, ο Terzaghi μελετάει τη διάνοιξη δίδυμων σηράγγων στο Σικάγο, εντός της ομώνυμης αργίλου. Οι δύο κλάδοι έχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με  $W=0.425D$ , ενώ η έναρξη των εργασιών στη δεύτερη σήραγγα έπεται της περάτωσης της πρώτης. Αυτό που διαπιστώνει είναι έντονα φαινόμενα αλληλεπίδρασης ανάμεσα στους δύο κλάδους, με τις αξονικές μετατοπίσεις στην επένδυση του πρώτου κλάδου (κατά τη διάνοιξη του δεύτερου) να φτάνουν το 0,1% της ακτίνας της διατομής.

Αντίστοιχα, στην δεύτερη εργασία οι Ward & Thomas εξετάζουν δίδυμες σήραγγες εντός της αργίλου του Λονδίνου σε απόσταση  $W=0.6D$  και με διαδικασία εκσκαφής ανάλογη με την παραπάνω. Και εδώ τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης είναι έντονα, με την αξονική μετατόπιση να είναι της τάξεως του 0,12% της ακτίνας.

## 2.2 Adachi T., Kimura M., Osada H., 1993 (from Ng C.W.W. Lee K.M., Tang D.K.W., 2004)

Στην παρούσα μελέτη οι ερευνητές πραγματοποιούν την αλληλεπίδραση αβαθών σηράγγων που διανοίγονται εντός αμμωδών εδαφών. Για το σκοπό πραγματοποιούν ένα πλήθος εργαστηριακών δοκιμών μικρής κλίμακας με χρήση κατάλληλων δοκιμίων.

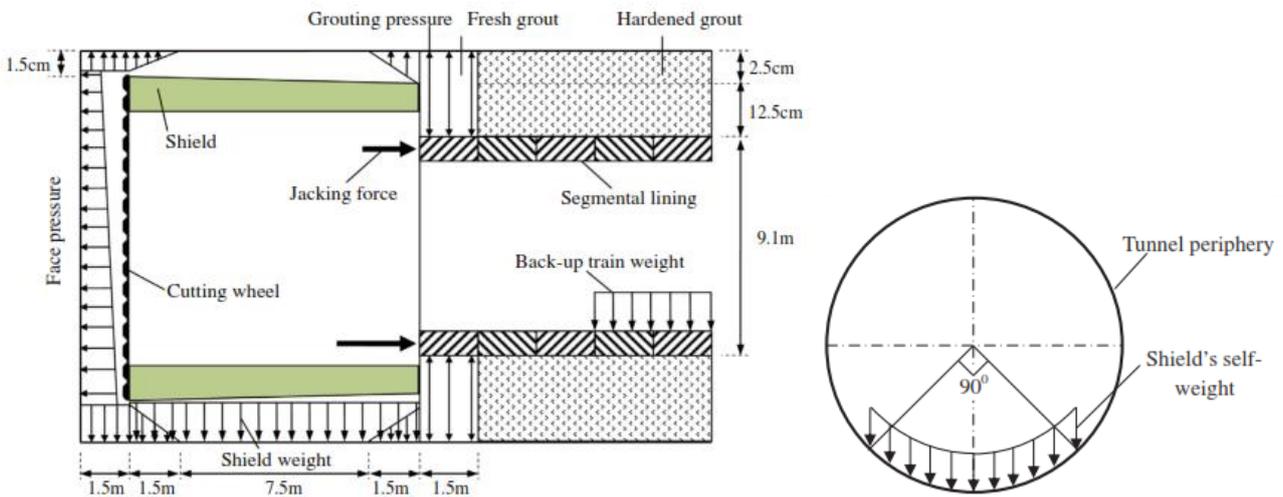
Βασικό συστατικό της έρευνάς τους αποτελεί ο λόγος  $H/W$ , δηλαδή ο λόγος του βάθους της σήραγγας (ύψος υπερκειμένων μετρημένο από την οροφή της σήραγγας έως την επιφάνεια του εδάφους) προς την οριζόντια απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων του έργου.

Πιο συγκεκριμένα, από την έρευνά τους κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το παραπάνω κλάσμα είναι ένας βασικός δείκτης της αλληλεπίδρασης που υφίστανται οι δύο σήραγγες. Για σταθερή απόσταση  $W$ , η αλληλεπίδραση αυξάνεται με το βάθος εκσκαφής. Αντίστοιχα, για σταθερό ύψος υπερκειμένων  $H$ , η αλληλεπίδραση αυξάνει όσο μειώνεται η οριζόντια απόσταση των δύο κλάδων.

## 2.3 Ngoc-Anh Do, Daniel Dias, Pierpaolo Oreste, Irini Djeran-Maigre, 2014

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η αλληλεπίδραση δίδυμων σηράγγων εκσκαπτόμενων με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής, μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC<sup>3D</sup>. Η προσομοίωση περιλαμβάνει τις βασικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάνοιξη με ένα EPB TBM: την κωνικότητα της ασπίδας, την πίεση στο μέτωπο, την περιφερειακή πίεση που ασκείται στην κυλινδρική επιφάνεια του εκσκαπτόμενου εδάφους μέσα στο θάλαμο και πίσω από το μέτωπο, την περιφερειακή πίεση που ασκείται ανάμεσα στο έδαφος και την ασπίδα και οφείλεται στην διαρροή του ενέματος προς τα πίσω, την πίεση του ενέματος που δρα ταυτόχρονα στο περιβάλλον έδαφος και στην επένδυση της σήραγγας, την σταδιακή σκλήρυνση του ενέματος, την πίεση των εμβόλων, το βάρος της ασπίδας και του πίσω μέρους του μηχανήματος, τις συνδέσεις των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης, τόσο μεταξύ των τεμαχίων του ίδιου δακτυλίου (segments), όσο και των δακτυλίων μεταξύ τους (rings). Το αριθμητικό προσομοίωμα χρησιμοποιεί το strain hardening καταστατικό μοντέλο CYsoil. Οι σήραγγες έχουν διάμετρο  $D=9.1\text{m}$ , η απόστασή του ισούται με  $W=1.25D=11.75\text{m}$  (από κέντρο σε κέντρο) και το ύψος των υπερκειμένων είναι μικρό. Εξετάζονται δύο ενδεχόμενα: α) ταυτόχρονη διάνοιξη των δύο κλάδων β) απόσταση των δύο μετώπων ίση με  $10D$ .

Η έρευνα εστιάζει σε πέντε βασικά εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη: τις καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους, τις στο μέσο του πυλώνα, τις συγκλίσεις στην περιφέρεια της διατομής, τις αξονικές και τις διαμήκης δυνάμεις στην επένδυση και τέλος τις ροπές κάμψης που αναπτύσσονται στην επένδυση.

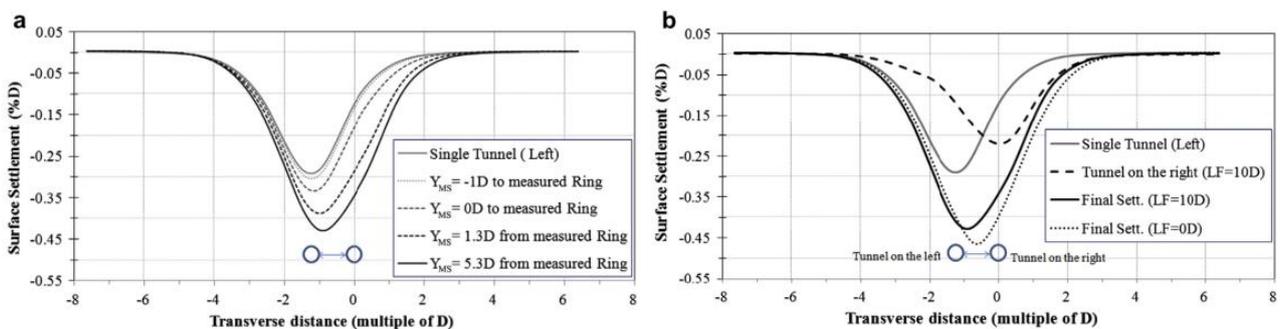


Εικόνα 2.1 Αριστερά: Διάταξη του μοντέλου για το TBM, Δεξιά: Προσομοίωση του ίδιου βάρους της ασπίδας (Do et al., 2014).

### 2.3.1 ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων η διέλευση του δεύτερου κλάδου αυξάνει σημαντικά τις καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους (Διαγρ.2.1). Η τελική μέγιστη τιμή της καμπύλης των κατακόρυφων μετακινήσεων είναι 47,4% μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη για τη μονή σήραγγα. Μάλιστα η καμπύλη των καθιζήσεων που οφείλεται στην δεύτερη σήραγγα είναι πιο ρηχή και πιο πλατιά σε σχέση με της πρώτης διατομής. Το αποτέλεσμα είναι η τελική καμπύλη να είναι μετατοπισμένη προς τα αριστερά του άξονα συμμετρίας, δηλαδή προς την πρώτη σήραγγα. Το γεγονός αυτό εν μέρη οφείλεται στο είδος του εδάφους που προσομοιώνεται και στο καταστατικό μοντέλο συμπεριφοράς.

Στην περίπτωση της ταυτόχρονης διάνοιξης παρατηρούνται μεγαλύτερες καθιζήσεις κατά 9% σε σχέση με το σενάριο όπου τα μέτωπα απέχουν απόσταση ίση με 10D, ενώ η καμπύλη εδώ είναι συμμετρική ως προς τους δύο κλάδους. Αντιθέτως το πλάτος της καμπύλης είναι παρόμοιο και στις δύο περιπτώσεις.

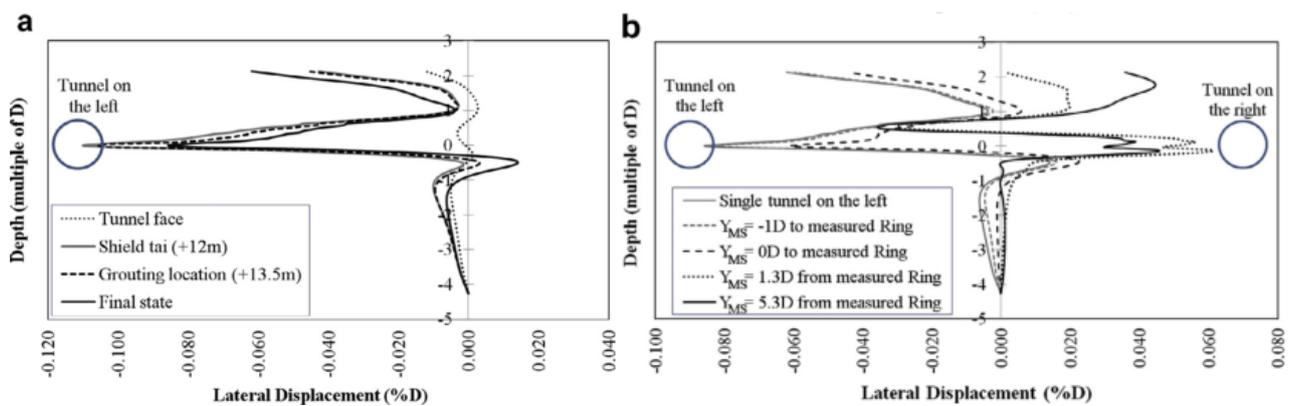


Διάγραμμα 2.1 Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από τις δίδυμες σήραγγες (Do et al., 2014).

### 2.3.2 ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ

Η μεταβολή των οριζόντιων μετακινήσεων καθ' ύψος του άξονα συμμετρίας φαίνεται στο Διαγρ. 2.2 Κατά τη διέλευση του πρώτου (αριστερού) κλάδου το έδαφος μετακινείται αρχικά προς τα έξω λόγω της πίεσης που ασκείται στο μέτωπο. Στη συνέχεια ξεκινάει η αντίστροφη κίνηση, εξαιτίας των συγκλίσεων της διατομής που συμβαίνουν κατά μήκος της ασπίδας. Τέλος το έδαφος κινείται πάλι προς τα έξω λόγω της εισπίεσης του τσιμεντενέματος, η οποία συνοδεύεται από μεγάλη πίεση. Η κίνηση αυτή συνεχίζεται έως ότου επέλθει ισορροπία και οφείλεται αφενός μεν στην σταθεροποίηση του ενέματος, αφετέρου δε στη χαμηλή οριζόντια γεωστατική τάση.

Κατά τη διέλευση του δεύτερου κλάδου (Διαγρ. 2.2), και ενώ αυτός πλησιάζει τη διατομή ελέγχου παρατηρείται εδαφική κίνηση προς το νέο μέτωπο, εξαιτίας των συγκλίσεων κατά μήκος της ασπίδας, η οποία φτάνει τη μέγιστη τιμή της τη στιγμή που η ουρά της ασπίδας βρίσκεται στη διατομή ελέγχου. Στη συνέχεια η δράση του ενέματος προκαλεί μετακινήσεις προς τα έξω (δηλαδή προς την υπάρχουσα σήραγγα), όπως ακριβώς συνέβη και στην πρώτη σήραγγα.



Διάγραμμα 2.2 Οριζόντιες μετακινήσεις ανάμεσα στις δύο σήραγγες (Do et al., 2014).

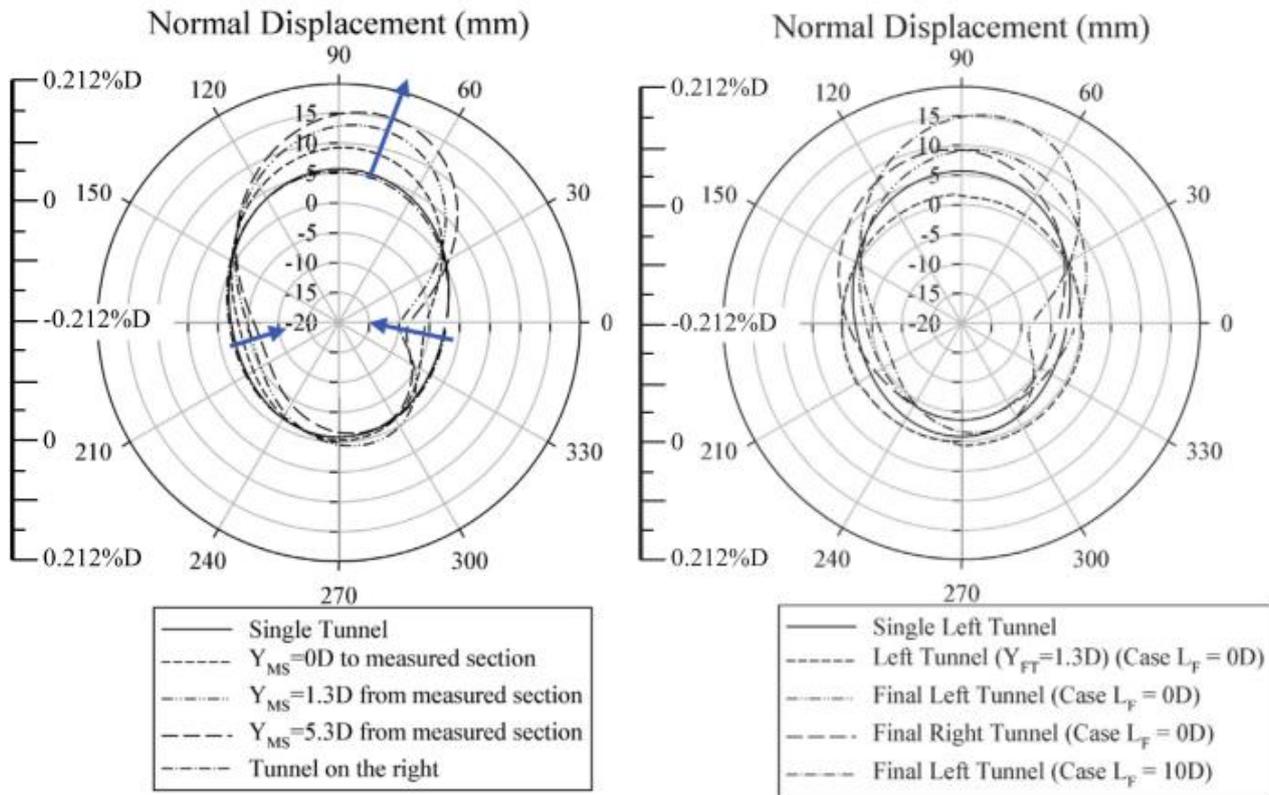
Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι ο εδαφικός όγκος ανάμεσα στις δύο σήραγγες υπόκειται σε πολύ μεγαλύτερες κατακόρυφες παρά οριζόντιες μετατοπίσεις κατά την κατασκευή δίδυμων σηράγγων. Επίσης στην περίπτωση ταυτόχρονης διάνοιξης των δύο κλάδων οι οριζόντιες μετακινήσεις είναι μηδενικές.

### 2.3.3 ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Στο Διαγρ. 2.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις μετακινήσεις του εδάφους στην περιφέρεια των δίδυμων σηράγγων. Οι θετικές και οι αρνητικές τιμές εδώ αντιπροσωπεύουν σύγκλιση και παραμόρφωση προς τα έξω αντίστοιχα. Όπως φαίνεται, κατά τη διέλευση του δεύτερου κλάδου η στέψη της πρώτης σήραγγας συγκλίνει προς τα μέσα, ενώ οι δύο παρειές δείχνουν τάση να κινηθούν προς τα έξω. Αντίθετα, η κατανομή των συγκλίσεων γύρω από τη

δεύτερη σήραγγα είναι παρόμοια με αυτή της μονής σήραγγας, με τη διαφορά ότι οι τιμές είναι 7,9% - 9,9% μεγαλύτερες.

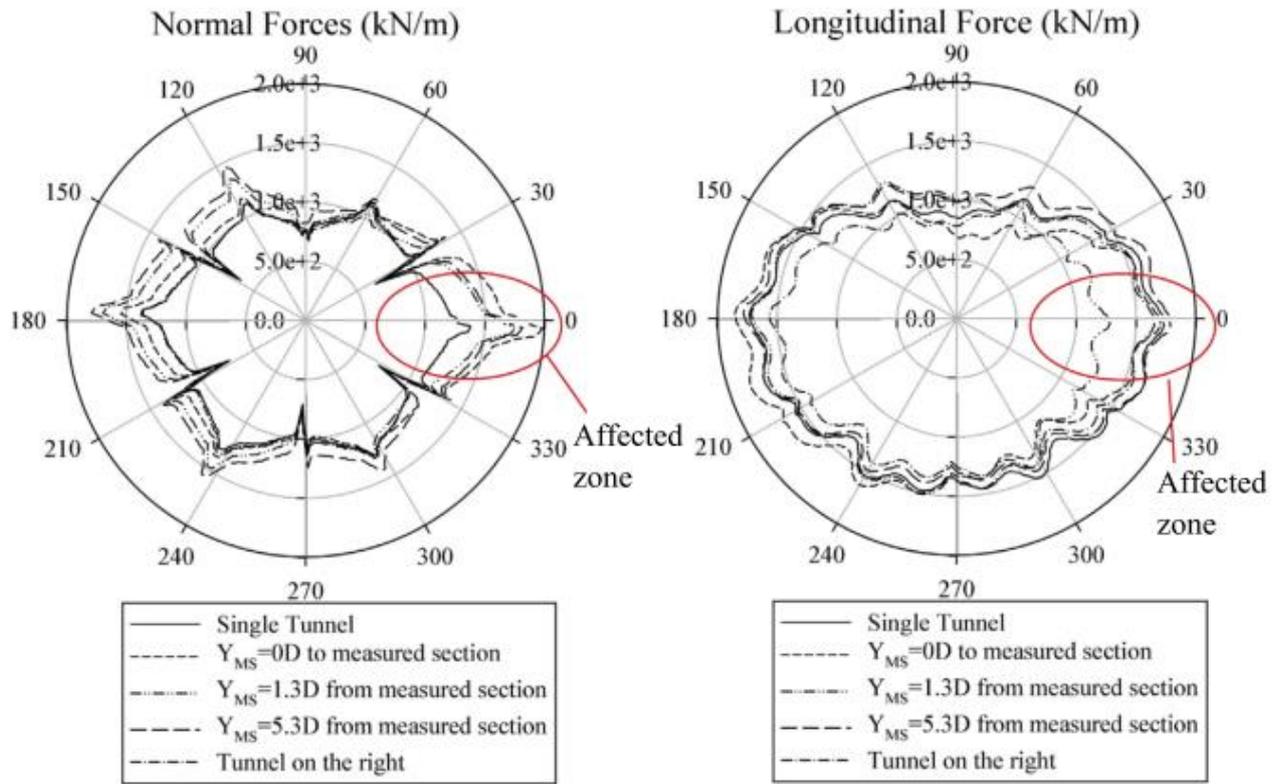
Κατά τη ταυτόχρονη διάνοιξη των δίδυμων σηράγγων, οι δύο κλάδοι αλληλοεπιδρούν με αποτέλεσμα τα διαγράμματα των συγκλίσεων να είναι συμμετρικά ως προς τον κατακόρυφο άξονα στο μέσο του πυλώνα. Οι παραμορφώσεις και εδώ είναι αυξημένες σε σχέση με τη μονή σήραγγα, κυρίως στις εσωτερικές παρειές.



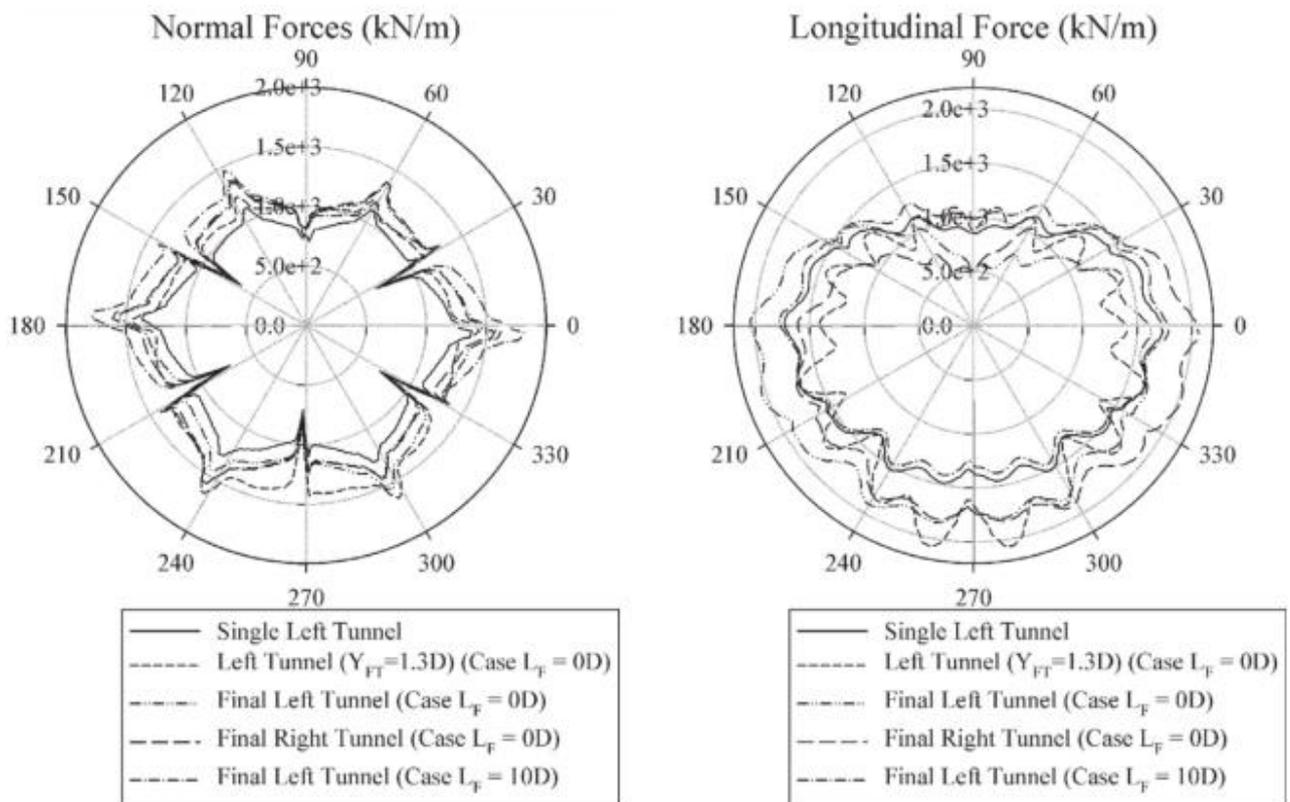
Διάγραμμα 2.3 Αξονικές μετατοπίσεις στη διατομή ελέγχου της υπάρχουσας (αριστερής) σήραγγας α) Αριστερά: για  $L_F=10D$ , β) Δεξιά: για  $L_F=0D$  (Do et al., 2014).

### 2.3.4 ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΕΝΔΥΣΗ

Καθώς το μέτωπο της δεύτερης σήραγγας πλησιάζει τη διατομή ελέγχου παρατηρείται σημαντική αύξηση της αξονικής δύναμης στην εσωτερική παρειά της υπάρχουσας, η οποία φτάνει το 40,7% σε σχέση με έναν μονό κλάδο. Αυτό υποδεικνύει ότι μεταφορά φορτίου από την καινούργια σήραγγα προς την αρχική λαμβάνει χώρα. Στη συνέχεια, η αξονική δύναμη μειώνεται εξαιτίας των συγκλίσεων της διατομής του δεύτερου κλάδου κατά μήκος της ασπίδας, γεγονός που δηλώνει την μεταφορά φορτίου από την υπάρχουσα προς την καινούργια σήραγγα αυτή τη φορά. Όμως, καθώς η ασπίδα περνάει την διατομή ελέγχου οι αξονικές δυνάμεις αυξάνονται πάλι, αυτή τη φορά μέχρι το 29,3% της αντίστοιχης τιμής για τη μονή σήραγγα. Αντίθετα, στην αριστερή παρειά της υπάρχουσας σήραγγας παρατηρείται μία σταθερή τάση για αύξηση των αξονικών δυνάμεων, λόγω της γενικότερης τάσης του εδάφους να μετακινείται προς τον διανοιγόμενο κλάδο (δηλαδή προς τα δεξιά).



Διάγραμμα 2.4 Αξονικές και διαμήκης δυνάμεις στην επένδυση της υπάρχουσας (αριστερής) σήραγγας κατά τη διέλευση του νέου (δεξιού) κλάδου για την περίπτωση  $L_F=10D$  (Do et al., 2014).



Διάγραμμα 2.5 Αξονικές και διαμήκης δυνάμεις στην επένδυση της υπάρχουσας (αριστερής) σήραγγας κατά τη διέλευση του νέου (δεξιού) κλάδου για την περίπτωση  $L_F=0D$  (Do et al., 2014).

Όσον αφορά τις αξονικές δυνάμεις στον διαμήκη άξονα, καθώς το καινούργιο μέτωπο πλησιάζει τη διατομή ελέγχου παρατηρείται αύξηση 6,6% των δυνάμεων στην εσωτερική (δεξιά) παρειά, η οποία συνδέεται άμεσα με την αύξηση των αξονικών δυνάμεων στην περίμετρο, μέσω του φαινομένου Poisson. Αντίθετα, στη στέψη της διατομής οι δυνάμεις μειώνονται περίπου 27%, κάτι που οφείλεται στον περιορισμό του coupling effect (αλληλοκλείδωμα των κόμβων) ανάμεσα στους προκατασκευασμένους δακτυλίους της επένδυσης και προκαλείται λόγω της κίνησης του εδάφους μπροστά από το καινούργιο μέτωπο προς το εσωτερικό του μηχανήματος. Αφού το μέτωπο περάσει τη διατομή ελέγχου στην παρειά και τη στέψη της πρώτης σήραγγας έχουμε αντίστοιχα μείωση 24% και αύξηση 23,5% στις διαμήκεις αξονικές δυνάμεις, γεγονός που εξηγείται από την πλευρική κίνηση του εδάφους προς την καινούργια διατομή.

Αντιθέτως με την υπάρχουσα σήραγγα, οι αξονικές δυνάμεις επί της υποστήριξης της δεύτερης σήραγγας και στις δύο διευθύνσεις είναι παρόμοιες (τόσο σε κατανομή κατά μήκος της περιφέρειας, όσο και σε μέτρο) με αυτές που αναπτύσσονται σε μία μονή σήραγγα, συνεπώς είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες του πρώτου κλάδου. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο πρώτος κλάδος δέχεται περισσότερο εξωτερικό φορτίο.

Κατά την ταυτόχρονη διάνοιξη οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι 11,4% μικρότερες σε σχέση με την περίπτωση  $L_F=10D$ , ενώ οι διαμήκεις δυνάμεις 87,4% μεγαλύτερες.

### 2.3.5 ΡΟΠΕΣ ΚΑΜΨΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΕΝΔΥΣΗ

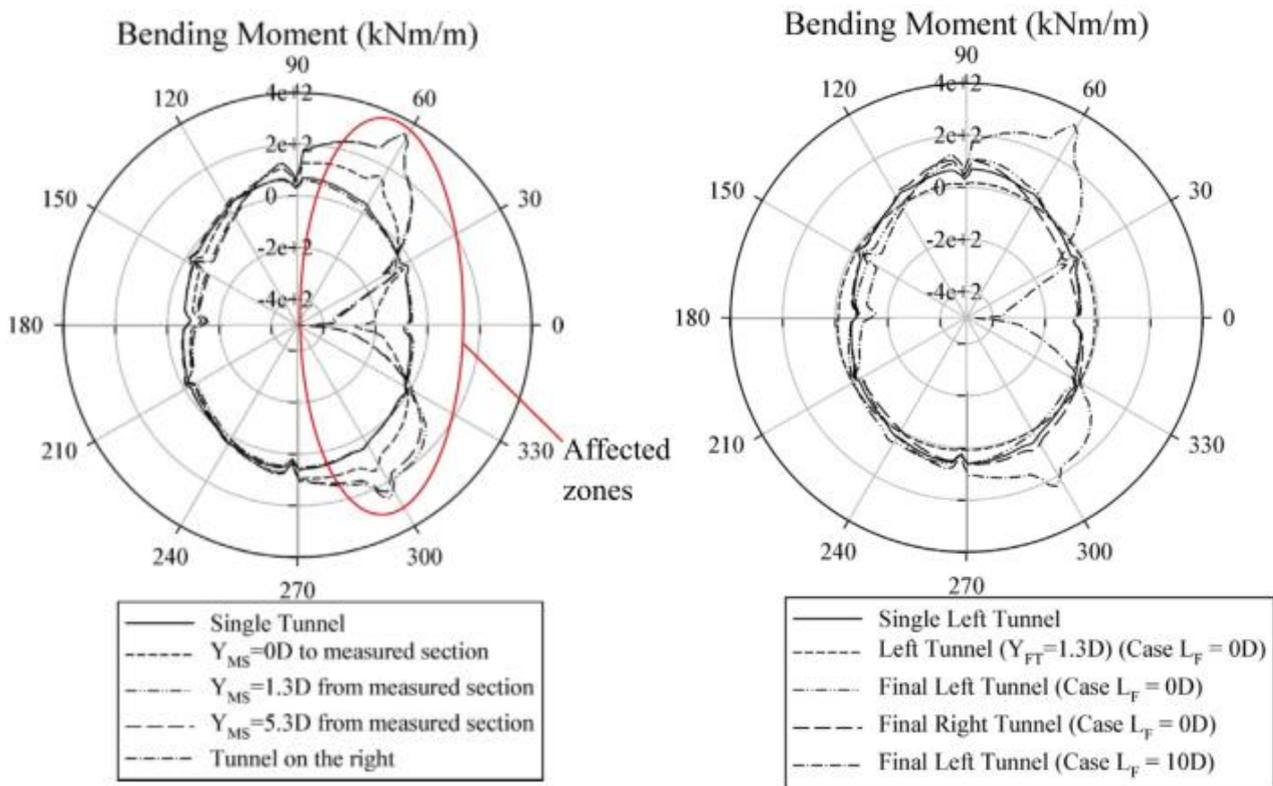
Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα και για τις ροπές κάμψης (Διαγρ. 2.6). Η προχώρηση του δεύτερου κλάδου προκαλεί πολύ σημαντικές αυξήσεις στις ροπές κάμψης της επένδυσης της υπάρχουσας σήραγγας, κυρίως στο δεξί (εσωτερικό) ημικύκλιο. Αφού η ασπίδα περάσει τη διατομή ελέγχου η επίδραση μειώνεται και οι ροπές μειώνονται ως ένα βαθμό. Επίσης, σημαντική είναι η αύξηση των ροπών και στην εξωτερική (αριστερή) πλευρά της διατομής, παραμένει όμως αρκετά μικρότερη σε σχέση με τη δεξιά. Η κατανομή και το μέτρο των ροπών κάμψης στη δεύτερη σήραγγα είναι παρόμοια με μίας μονής σήραγγας.

Τέλος, κατά την ταυτόχρονη διάνοιξη παρουσιάζονται φαινόμενα αλληλεπίδρασης των δύο κλάδων μέσω της αύξησης των ροπών κάμψης (τα διαγράμματα είναι πάντα συμμετρικά ως προς τον άξονα συμμετρίας της κατασκευής), όμως οι τιμές παραμένουν μικρότερες σε σχέση με της υφιστάμενης σήραγγας κατά την περίπτωση όπου  $L_F=10D$ .

Η εργασία καταλήγει συμπερασματικά στα εξής:

- Κατά την διάνοιξη του δεύτερου κλάδου σε δίδυμες σήραγγες, η πρώτη διατομή δέχεται έντονα φαινόμενα αλληλεπίδρασης σε όρους δυνάμεων και μετακινήσεων. Η μεγιστοποίηση της επίδρασης συμβαίνει καθώς η ουρά της ασπίδας βρίσκεται στην διατομή ελέγχου, ενώ καθώς το μέτωπο προχωράει η αλληλεπίδραση μειώνεται σταδιακά.
- Η εκσκαφή της καινούργιας (δεύτερης) σήραγγας είναι παρόμοια με αυτή μιας μονής σήραγγας ίδιας διαμέτρου.

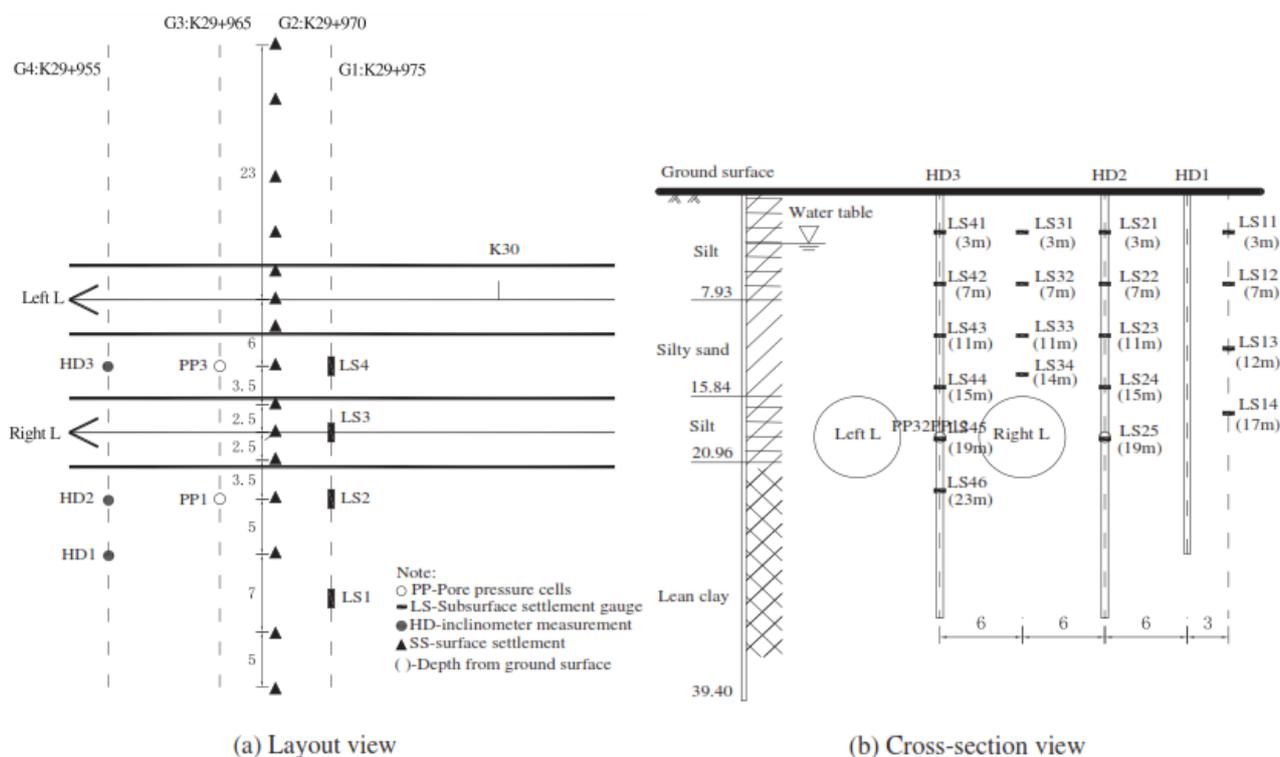
- Κατά την ταυτόχρονη διάνοιξη των δίδυμων σιηράγγων αναπτύσσονται μικρότερες δυνάμεις σε σχέση με αυτές που παραλαμβάνει η πρώτη σιηραγγα στην περίπτωση διαδοχικής διάνοιξης. Όμως η επιλογή αυτή μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.



Διάγραμμα 2.6 Ροπές κάμψης στην επένδυση της υπάρχουσας (αριστερής) σιηραγγας α) Αριστερά: για  $L_F=10D$ , β) Δεξιά: για  $L_F=0D$  (Do et al., 2014).

## 2.4 R.P. Chen, J. Zhu, W. Liu, X.W. Tang, 2011

Η παρούσα εργασία αφορά μετρήσεις πεδίου κατά την κατασκευή των δίδυμων σιηράγγων της γραμμής 1 του Hangzhou metro στην ανατολική Κίνα. Το έργο αποτελείται από δύο σιηραγγες εξωτερικής διαμέτρου 6.2m (εσωτερική διάμετρος 5,5m, πάχος επένδυσης 0,35m), οι άξονες των οποίων απέχουν μεταξύ τους 12m και από την επιφάνεια του εδάφους 19m. Η διάνοιξη γίνεται με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής με πίεση στο μέτωπο (EPB TBM). Το μήκος της ασπίδας ισούται με 8,4m και η πίεση στο μέτωπο παρέμεινε σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών και ίση με 250kPa, δηλαδή λίγο μεγαλύτερη από το άθροισμα της ενεργής γεωστατικής και της υδροστατικής πίεσης (περίπου 228,6 kPa). Το σύστημα παρακολούθησης και οργανομετρήσεων αποσκοπούσε στην μέτρηση της πίεσης των πόρων, των καθιζήσεων και των οριζόντιων μετακινήσεων. Στην Εικόνα. 2.2 φαίνονται τα όργανα και οι θέσεις που αυτά τοποθετήθηκαν. Η μέτρηση της πίεσης των πόρων πραγματοποιείτο κάθε 10 λεπτά, ενώ οι μετρήσεις των μετατοπίσεων κάθε 8 ώρες.

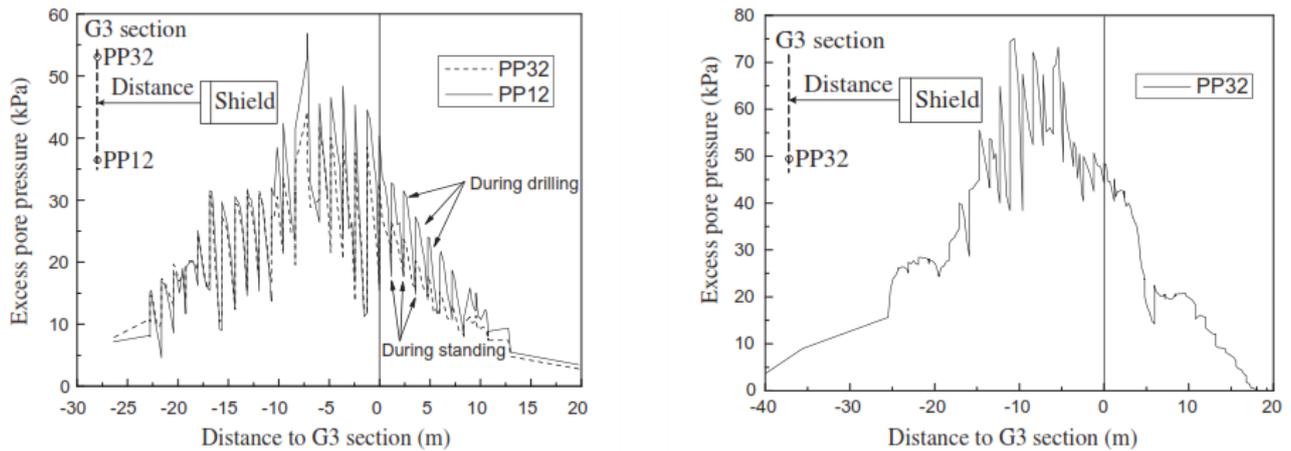


Εικόνα 2.2 Διάταξη των οργάνων μέτρησης και των σηράγγων στο πεδίο. Αριστερά: κάτοψη, Δεξιά: Τομή (R.P. Chen., 2011).

## 2.4.1 ΠΙΕΣΗ ΠΟΡΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΔΑΦΟΣ

Στο Διαγρ. 2.7 φαίνεται η μεταβολή της πίεσης των πόρων καθώς οι δύο κλάδοι περνάνε διαδοχικά από τη διατομή μέτρησης. Αύξηση της πίεσης των πόρων κατά την εκσκαφή της πρώτης σήραγγας παρατηρείται όταν αυτή βρίσκεται σε απόσταση ίση με 20m από το όργανο. Οι συνεχείς αυξομειώσεις της πίεσης που παρατηρούνται έχουν να κάνουν με τον κύκλο εργασιών του μηχανήματος. Η πίεση μεγαλώνει κατά τη φάση της εκσκαφής, ενώ πέφτει κατά τη διάρκεια των υπόλοιπων εργασιών. Αφού η ουρά της ασπίδας περάσει τη διατομή ελέγχου η πίεση αρχίζει σιγά σιγά να μειώνεται, έως ότου επανέλθει στα αρχικά της επίπεδα, όταν η ασπίδα έχει προχωρήσει περίπου 30m.

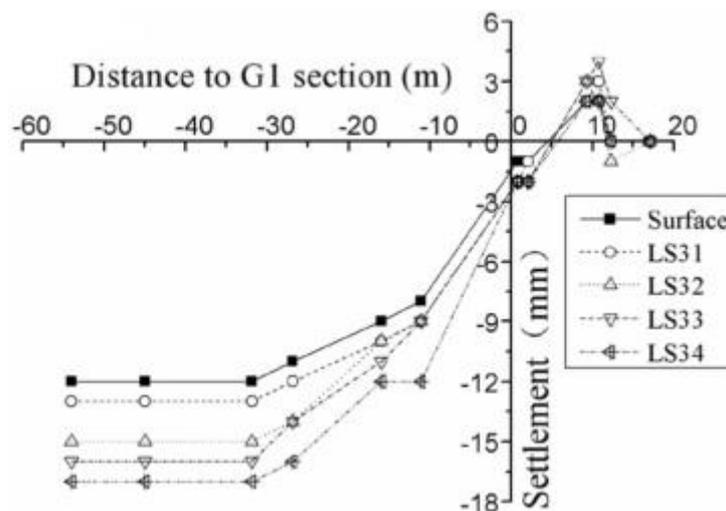
Κατά τη διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας η εικόνα είναι παρόμοια, με τη διαφορά ότι εδώ η μέγιστη επιπρόσθετη πίεση είναι μεγαλύτερη σε σχέση με πριν, ενώ δεν είναι τόσο εμφανής ο κύκλος εργασιών του TBM (τα ζιζακ στο διάγραμμα). Οι διαφορές αυτές οφείλονται κατά κύριο λόγο στο τσιμεντένεμα που εισπιέζεται εντός του εδαφικού υλικού και έχει την ικανότητα να αλλάζει τις ιδιότητές του. Πιο συγκεκριμένα αυξάνει την αντοχή του εδάφους και μειώνει τη διαπερατότητά του, με αποτέλεσμα να επηρεασθούν οι ενδείξεις πίεσης των πόρων.



Διάγραμμα 2.7 Η αλλαγή στην πίεση των πόρων κατά τη διέλευση των δύο κλάδων. Αριστερά: Πρώτη (δεξιά) σήραγγα, Δεξιά: Δεύτερη (αριστερή) σήραγγα (R.P. Chen., 2011).

## 2.4.2 ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

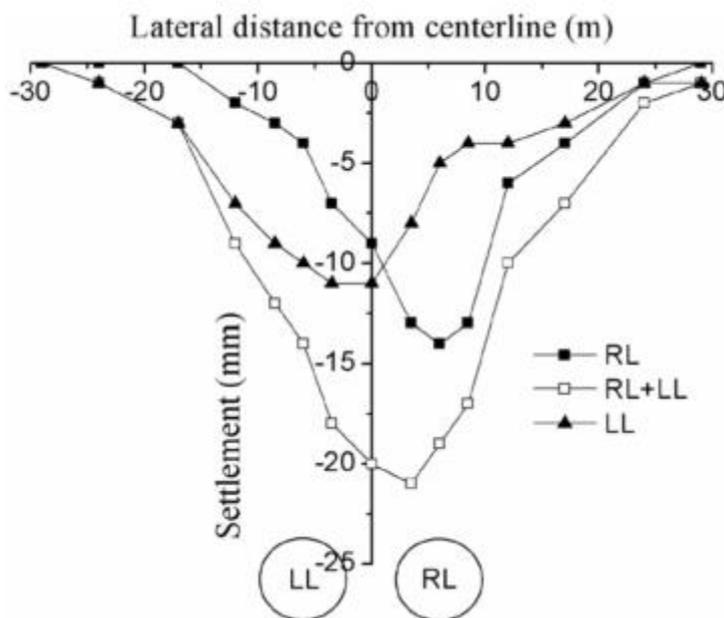
Οι καθιζήσεις στην επιφάνεια και εντός του εδαφικού υλικού που προέκυψαν από όλα τα όργανα μέτρησης παρουσιάζουν συναφή συμπεριφορά. Αρχικά παρατηρείται μία ανοδική τάση του υλικού όταν το μέτωπο βρίσκεται σε απόσταση 20m και οφείλεται στην πίεση που ασκείται στο μέτωπο. Καθώς το μέτωπο πλησιάζει τη διατομή ελέγχου το έδαφος αρχίζει να κινείται προς τα κάτω, ενώ οι καθιζήσεις παίρνουν τη μέγιστη τιμή τους πριν το TMB εισπιάσει ένεμα στη διατομή ελέγχου. Αφού το μέτωπο διάνοιξης περάσει μπροστά 20-40m οι καθιζήσεις σταθεροποιούνται.



Διάγραμμα 2.8 Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους και εντός του υπεδάφους (R.P. Chen., 2011).

Αυτό που έχει ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες καθιζήσεις εντός του εδαφικού υλικού σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη κατακόρυφη κίνηση στην επιφάνεια ήταν 11mm, ενώ εντός υπεδάφους έφτασε τα 17mm σε βάθος 12m από την επιφάνεια (Διαγρ. 2.8). Από το βάθος αυτό και μέχρι την στέψη

της σήραγγας σημειώθηκε σταθερή μείωση των καθιζήσεων, έως και μηδενισμός αυτών ακριβώς πάνω από την εκσκαφή.



Διάγραμμα 2.9 Καμπύλες επιφανειακών καθιζήσεων (R.P. Chen., 2011).

Όσον αφορά τις επιφανειακές καθιζήσεις (Διαγρ. 2.9) καταγράφηκε ότι ο δεύτερος κλάδος προκαλεί καμπύλη λιγότερο βαθιά και περισσότερο πλατιά σε σχέση με τον πρώτο. Συνεπώς η τελική (αθροιστική) καμπύλη είναι μετατοπισμένη προς τα δεξιά (δηλαδή προς την πρώτη σήραγγα) του άξονα συμμετρίας. Η μέγιστη μετακίνηση παραμένει όμως πάνω από την περιοχή του πυλώνα, δηλαδή ανάμεσα στις δύο δίδυμες σήραγγες.

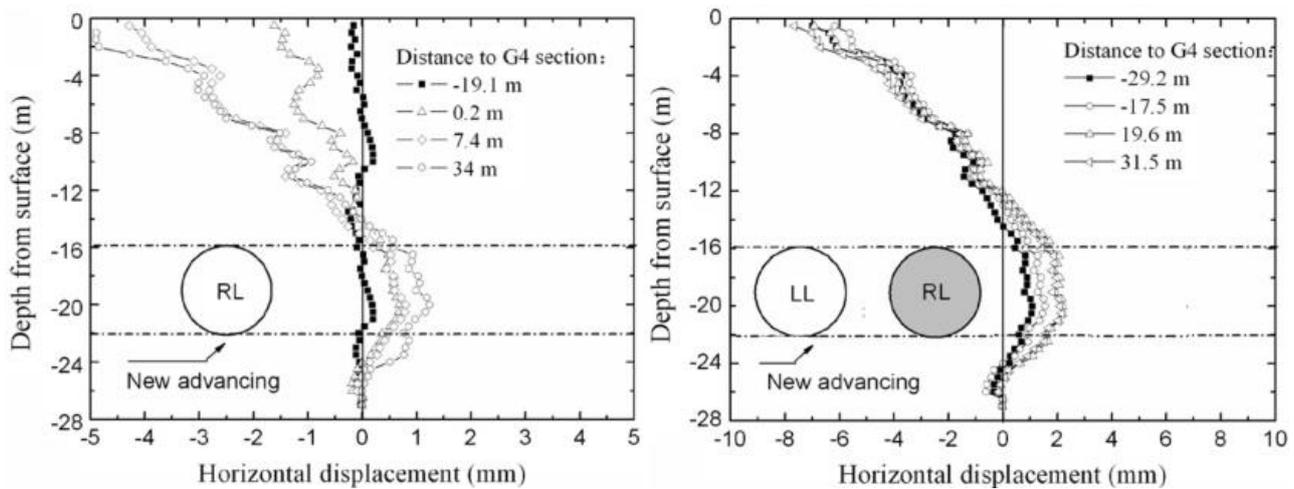
### 2.4.3 ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Στην παρούσα παράγραφο παραθέτονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από δύο εγκατεστημένα ινκλινόμετρα και αφορούν τις οριζόντιες μετατοπίσεις του εδάφους δεξιά της πρώτης σήραγγας (Διαγρ. 2.10) και ανάμεσα στους δύο κλάδους (Διαγρ. 2.11).

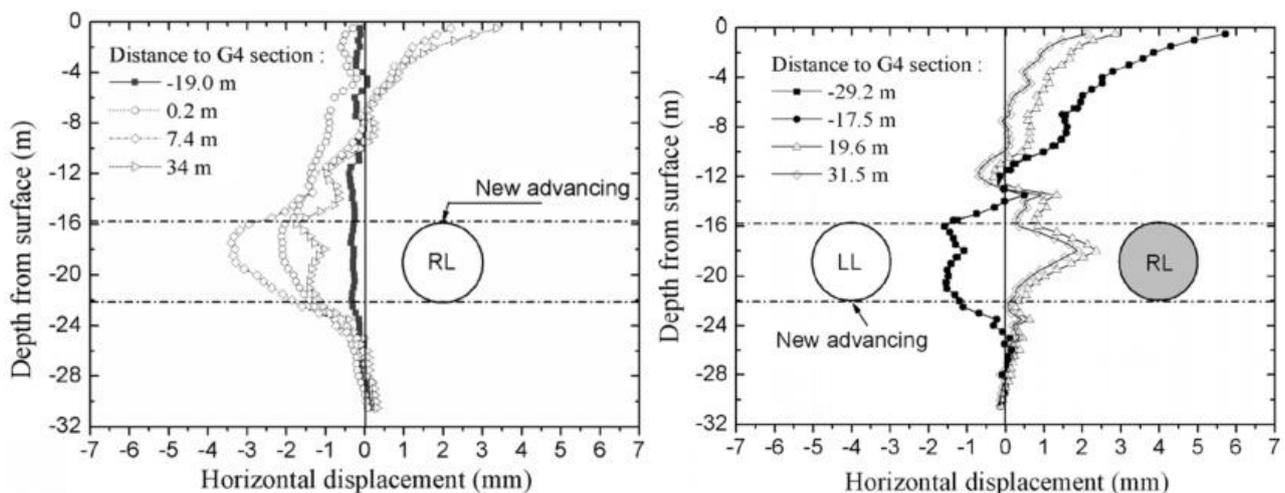
Καθώς το TBM της πρώτης σήραγγας πλησιάζει τη διατομή ελέγχου, ο εδαφικός όγκος ανάμεσα στη στέψη και τον πυθμένα μετακινείται προς τα έξω εξαιτίας της πίεσης στο μέτωπο και της τριβής μεταξύ κεφαλής και εδάφους. Αντίθετα, το έδαφος πάνω από τη σήραγγα μετακινείται προς το εσωτερικό, ως συνέπεια της απώλειας εδαφικού όγκου από τις συγκλίσεις στην περιφέρεια της εκσκαφής. Η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση σε αυτό το στάδιο ήταν 5mm. Κατά τη διέλευση του δεύτερου κλάδου, εξαιτίας της μεγάλης απόστασης από το όργανο μέτρησης δεξιά της πρώτης διατομής, στο συγκεκριμένο σημείο καταγράφηκε μόνο μικρή μετακίνηση του εδάφους προς τα έξω.

Το όργανο που βρίσκεται ανάμεσα στις δύο σήραγγες κατέγραψε παρόμοιες μετακινήσεις κατά τη διέλευση του πρώτου κλάδου, με τη διαφορά ότι εδώ γίνεται εμφανής η κίνηση του εδάφους προς τα έξω κατά την εισπίεση ενέματος στο πίσω μέρος της ασπίδας. Η δεύτερη

σήραγγα προκαλεί αντίστοιχες οριζόντιες μετακινήσεις με την πρώτη, αλλά με αντίθετη φορά. Το αποτέλεσμα είναι ότι αναιρούνται σε μεγάλο βαθμό οι κινήσεις προς τα δεξιά και στην τελική κατάσταση η μετατόπιση στην επιφάνεια του εδάφους είναι μόνο 2mm.



Διάγραμμα 2.10 Οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις του εδάφους δεξιά του πρώτου κλάδου (R.P. Chen., 2011).



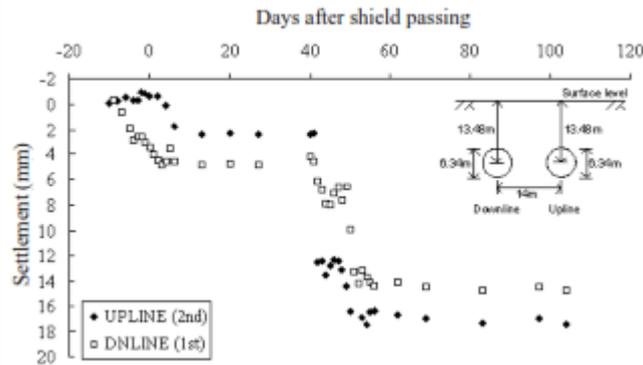
Διάγραμμα 2.11 Οριζόντιες μετακινήσεις του εδάφους στο μέσο του πυλώνα (R.P. Chen., 2011).

## 2.5 Benson Bin-Chen Hsiung and Kuan-Lin Lu, 2007

Η παρούσα εργασία πραγματοποιείται τις καθιζήσεις μετρήθηκαν κατά την κατασκευή δίδυμων σηράγγων εντός μαλακού εδάφους (υλιώδης άμμος) στο μετρό της πρωτεύουσας του Ταϊβάν, Kaohsiung.

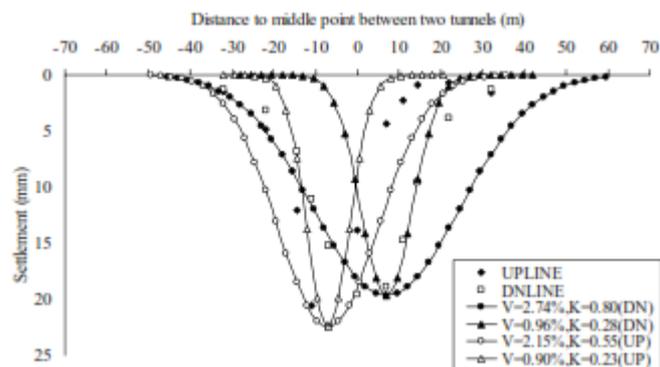
Στο Διάγρ. 2.12 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία των καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους από έναν σταθμό μέτρησης. Στην εργασία παρουσιάζονται αντίστοιχα γραφήματα και από άλλους σταθμούς. Από τη διακύμανση των τιμών είναι εμφανείς οι καθιζήσεις λόγω της προχώρησης του μετώπου και της εισπίεσης ενέματος. Σε σύγκριση με παρόμοιες μελέτες δεν παρατηρήθηκαν καθιζήσεις στερεοποίησης, γεγονός που οφείλεται κατά κυρίως στο είδος

του εδάφους. Η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση για την πρώτη σήραγγα ξεπερνά σε κάποιους σταθμούς τα 20mm, ενώ η διάνοιξη της δεύτερης μπορεί να αυξήσει τις καθιζήσεις στα 40mm. Γενικά το ποιος από τους δύο κλάδους προκαλεί μεγαλύτερες καθιζήσεις δεν είναι ξεκάθαρο εδώ και εξαρτάται από την εμπειρία στη λειτουργία του μηχανήματος που αποκτήθηκε κατά τη φάση της πρώτης διάνοιξης.



Διάγραμμα 2.12 Χρονοϊστορία των εδαφικών καθιζήσεων στην επιφάνεια (Benson Bin-Chen Hsiung and Kuan-Lin Lu, 2008).

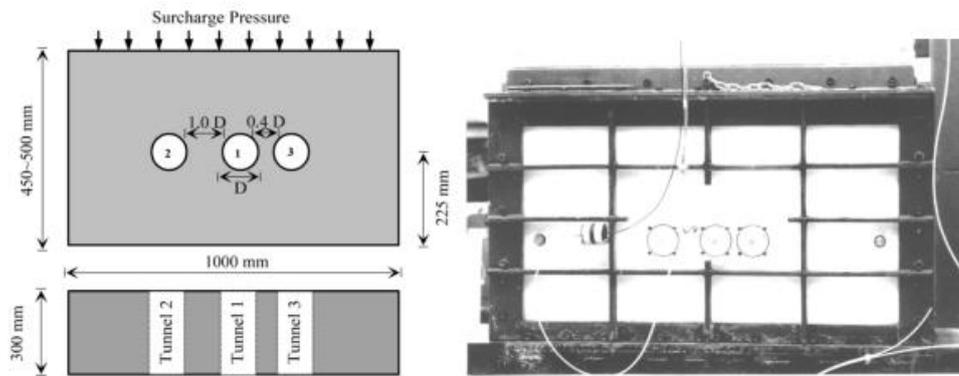
Επίσης, στην παρούσα έρευνα εξετάζονται οι καθιζήσεις κατά μήκος δύο χαρακτηριστικών διατομών κάθετων στον άξονα των δίδυμων σιδηροδρόμων (Διαγρ. 2.13). Η μέγιστη καθίζηση που προκαλεί μία μονή σήραγγα μπορεί να φτάσει τα 22.4mm. Στη συνέχεια γίνεται απόπειρα προσομοίωσης των καμπυλών μέσω της γνωστής καμπύλης σφάλματος του Peck (1969). Από την ανάλυση των δεδομένων προέκυψαν τιμές του συντελεστή V (απώλεια εδαφικού όγκου) μεταξύ 0.31 και 1.85% και του συντελεστή K (συντελεστής καμπύλης καθιζήσεων) από 0.4 μέχρι 0.9. Ο τελευταίος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του πλάτους (τυπικής απόκλισης) της καμπύλης καθιζήσεων από τη σχέση των O'Reilly and New (1982), ενώ ο πρώτος για τον προσδιορισμό της μέγιστης τιμής της καθίζησης. Οι καμπύλες που προέκυψαν από τις ανάστροφες αναλύσεις παρουσιάζονται επίσης στο διάγραμμα.



Διάγραμμα 2.13 Καμπύλες επιφανειακών καθιζήσεων από μετρήσεις πεδίου και μέσω των σχέσεων που προτείνονται στην εργασία (Benson Bin-Chen Hsiung and Kuan-Lin Lu, 2008).

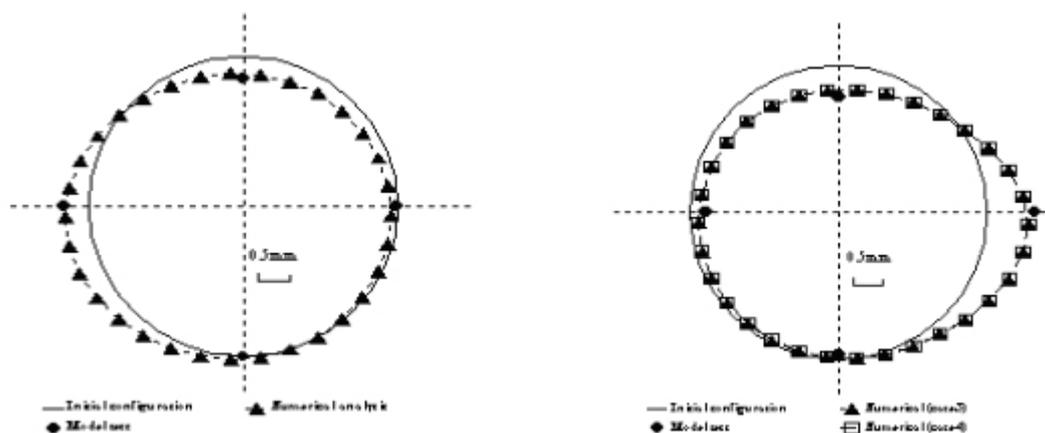
## 2.6 Sang-Hwan Kim, 2004

Η συγκεκριμένη μελέτη ασχολείται με την μεταβολή των τάσεων και των παραμορφώσεων σε μία υφιστάμενη σήραγγα εξαιτίας της διάνοιξης δίδυμης διατομής σε μικρή απόσταση. Για το σκοπό της έρευνας πραγματοποιούνται εργαστηριακές δοκιμές μικρής κλίμακας και ταυτόχρονες διδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων.



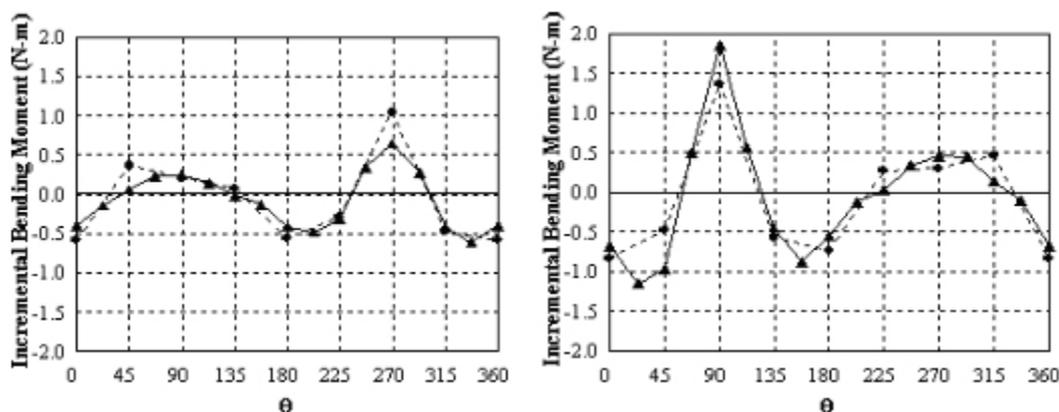
Εικόνα 2.3 Διάταξη του εργαστηριακού μοντέλου όπου προσομοιώνεται η διάνοιξη σηράγγων (Sang-Hwan Kim, 2004).

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν πέντε σετ εργαστηριακών δοκιμών με τη βοήθεια της πειραματικής διάταξης της Εικ. 2.3 για διάφορες τιμές του βάθους των σηράγγων, των ιδιοτήτων της αργίλου, του πάχους της επένδυσης και της πρόσθετης φόρτισης στην επιφάνεια. Σε κάθε σετ δοκιμών διανοίγονταν τρεις σήραγγες (σε διαφορετική μεταξύ τους απόσταση), έτσι ώστε να γίνονται δύο πειράματα αλληλεπίδρασης σε κάθε δοκιμή. Κατά την διάνοιξη των σηράγγων έχει προσομοιωθεί υπερεκσκαφή της τάξης του 6%. Οι διδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων αποσκοπούσαν στο να προσομοιώσουν τις εργαστηριακές δοκιμές που περιγράφηκαν.



Διάγραμμα 2.14 Επιπρόσθετες μετακινήσεις στην επένδυση της υπάρχουσας σήραγγας κατά τη διέλευση του δεύτερου κλάδου (αποτελέσματα από εργαστηριακό μοντέλο και αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων). Αριστερά: Δεύτερος κλάδος στη θέση 2 ( $W=2.0D$ ), Δεξιά: Δεύτερος κλάδος στη θέση 3 ( $W=1.4D$ ) (Sang-Hwan Kim, 2004).

Στο Διαγρ. 2.14 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις της υφιστάμενης (μεσαίας) σήραγγας για δύο διαφορετικές του πλάτους του πυλώνα. Η συμπεριφορά είναι παρόμοια και στις δύο περιπτώσεις, όμως για τη μικρή απόσταση παρατηρήθηκε εντονότερη αλληλεπίδραση. Η διέλευση του δεύτερου κλάδου οδήγησε σε συγκλίσεις στη στέψη της σήραγγας και σε παραμόρφωση προς τα έξω στην εσωτερική παρειά. Συνεπώς η οριζόντια διάμετρος της διατομής επιμηκύνεται και η κατακόρυφη συμπιέζεται.



Διάγραμμα 2.15 Επιπρόσθετες ροπές κάμψης στην επένδυση της υπάρχουσας σήραγγας κατά τη διέλευση του δεύτερου κλάδου (αποτελέσματα από εργαστηριακό μοντέλο και αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων). Αριστερά: Δεύτερος κλάδος στη θέση 2 ( $W=2.0D$ ), Δεξιά: Δεύτερος κλάδος στη θέση 3 ( $W=1.4D$ ) (Sang-Hwan Kim, 2004).

Αντίστοιχα είναι τα αποτελέσματα για την αύξηση των ροπών κάμψης στην υφιστάμενη διατομή, όπως δείχνει το Διαγρ. 2.15 και στις δύο περιπτώσεις σημειώθηκε σημαντική αύξηση, με την αλληλεπίδραση να είναι εντονότερη για το μικρό πλάτος πυλώνα.

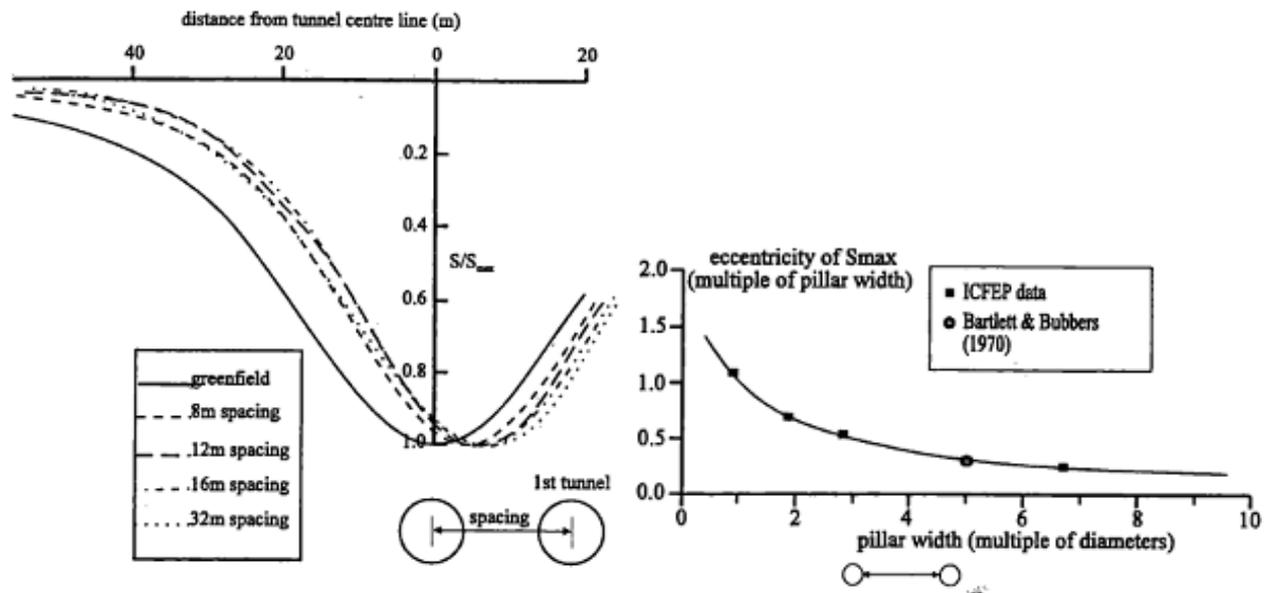
Στα συμπεράσματα της εργασίας ο συγγραφέας αναφέρει ότι η αλληλεπίδραση παύει να είναι σημαντική όταν οι δύο κλάδοι απέχουν μεταξύ τους απόσταση μεγαλύτερη από δύο διαμέτρους. Επίσης καταλήγει ότι τα αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές και τις αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία βρίσκονται σε συμφωνία.

## 2.7 Addenbrooke T.I., Potts D.M., 1996

Στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιούνται διδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό τη διερεύνηση της συμπεριφοράς δίδυμων (τόσο κατά την οριζόντια, όσο και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση) σηράγγων κυκλικής διατομής. Στα αριθμητικά μοντέλα προσομοιώνεται η περίπτωση του μετρό του Λονδίνου, οι σήραγγες έχουν διάμετρο 4.146m, ύψος υπερκειμένων 34m και μεταξύ τους αποστάσεις που κυμαίνονται από 8 έως 32m στην οριζόντια διεύθυνση και από 10 έως 18m στην κατακόρυφη. Για την προσομοίωση του υπεδάφους υιοθετήθηκε το μοντέλο μη γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς της αργίλου του Λονδίνου. Ο τρόπος διάνοιξης αντιστοιχεί σε εκσκαφή με συμβατικά μέσα και υποστήριξη της διατομής αφού είχε πρώτα επιτευχθεί απώλεια εδαφικού όγκου ίση με 1.4%.

Πρώτο μέγεθος που εξετάζεται είναι οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους (Διαγρ. 2.16). Όπως φαίνεται, η μείωση της απόστασης μεταξύ των δύο κλάδων αυξάνει τις καθιζήσεις στη

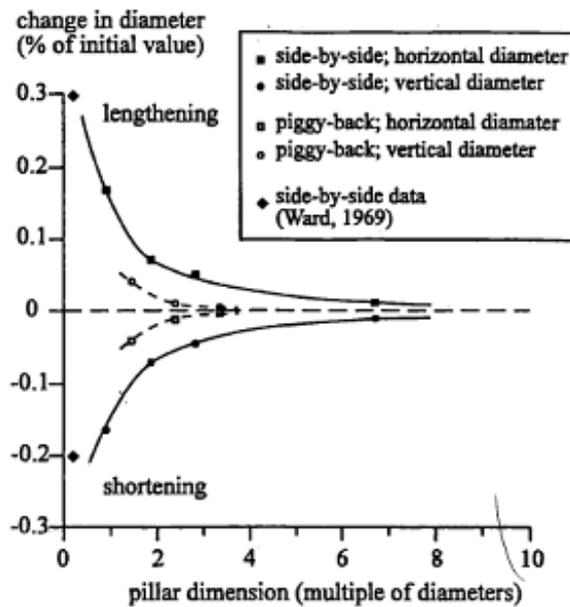
δεύτερη σήραγγα, ενώ ταυτόχρονα μετατοπίζει το κέντρο της καμπύλης προς την προϋπάρχουσα διατομή. Σύμφωνα με τον συγγραφέα, η μειωμένη δυσκαμψία του εδάφους στην περιοχή διάνοιξης της δεύτερης σήραγγας επηρεάζει την απώλεια εδαφικού όγκου. Παρομοίως αυξάνονται οι καθιζήσεις καθώς μικραίνει η απόσταση των δίδυμων κλάδων κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.



Διάγραμμα 2.16 Αριστερά: Καμπύλες επιφανειακών καθιζήσεων πάνω από τη δεύτερη σήραγγα, Δεξιά: Εκκεντρότητα της θέσης όπου μεγιστοποιείται η τιμή της καθίζησης σε σχέση με το πλάτος του πυλώνα (Addenbrooke T.I., Potts D.M., 1996).

Το επόμενο μέγεθος που απασχολεί τους ερευνητές είναι η απόκριση σε όρους μετακινήσεων της υπάρχουσας επένδυσης κατά τη διέλευση του δεύτερου κλάδου. Για παράλληλες σήραγγες στην οριζόντια διεύθυνση παρατηρείται επιμήκυνση της οριζόντιας διαμέτρου και μείωση του μήκους στην κατακόρυφη. Για πλάτος πυλώνα μικρότερο της μίας διαμέτρου οι μεταβολές αυτές είναι της τάξης του 0.2%. Αντίθετα είναι τα αποτελέσματα για σήραγγες παράλληλες στην κατακόρυφη διεύθυνση. Και στις δύο περιπτώσεις τα φαινόμενα της αλληλεπίδρασης μειώνονται καθώς αυξάνεται το πλάτος του πυλώνα, όπως δείχνει και το Διαγρ. 2.17.

Καταλήγοντας, οι συγγραφείς αναφέρουν ότι η αρχή της επαλληλίας για τις καθιζήσεις αποτυγχάνει να προσομοιώσει την μετατόπιση του κέντρου της δεύτερης καμπύλης, συνεπώς δεν είναι κατάλληλη για την πρόβλεψη των καθιζήσεων στις δίδυμες σήραγγες. Τέλος, θεωρούν ότι τα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης είναι αμελητέα για απόσταση μεταξύ των σηράγγων στην οριζόντια διεύθυνση μεγαλύτερη από επτά διαμέτρους.



Διάγραμμα 2.17 Απόκριση της επένδυσης της πρώτης σήραγγας κατά το πέρασμα του δεύτερου κλάδου σε όρους μετακινήσεων (Addenbrooke T.I., Potts D.M., 1996).

## 2.8 D. N. Chapman, C. D. F. Rogers, D. V. L. Hunt

Η εργασία αυτή πραγματεύεται μεθόδους για την πρόβλεψη των καθιζήσεων κατά την εκσκαφή σηράγγων. Αρχικά πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στις διάφορες μεθόδους που υπάρχουν στη βιβλιογραφία σχετικά με την πρόβλεψη των καθιζήσεων πάνω από σήραγγα μονού κλάδου. Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι η σχέση του Peck (1969) δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε αντίστοιχες μεθόδους για δίδυμες σήραγγες.

Βασιζόμενοι σε προγενέστερες έρευνες, οι συγγραφείς θεωρούν ότι κατά την εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας οι καθιζήσεις στην επιφάνεια είναι πιο έντονες σε σχέση με την πρώτη, ενώ το κέντρο της καμπύλης είναι μετατοπισμένο προς την πρώτη σήραγγα. Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με μείωση του μέτρου ελαστικότητας, την παραμόρφωση και την απώλεια όγκου του εδαφικού υλικού εξαιτίας της διάνοιξης του πρώτου κλάδου. Ως αποτέλεσμα, η καμπύλη του Peck και οι σχέσεις που την συνοδεύουν για τον υπολογισμό της μέγιστης καθίζησης και του πλάτους της καμπύλης δεν ανταποκρίνονται στα δεδομένα από μετρήσεις πεδίου.

Οι συγγραφείς προτείνουν τη μέθοδο της επαλληλίας για την πρόβλεψη των καθιζήσεων πάνω από δίδυμες σήραγγες. Για την πρώτη σήραγγα θα χρησιμοποιείται η εξίσωση του Peck ως έχει και για τη δεύτερη εισάγουν στην εξίσωση διορθωτικούς συντελεστές (Εξ. 2.1)

$$s = s_{max} * \exp\left(-\frac{x^2}{2(K_2 * Z)^2}\right) \quad (2.1)$$

όπου Z το βάθος της σήραγγας και  $K_2$  ο αδιάστατος παράγοντας για το πλάτος της καμπύλης των O'Reilly and New (1982). Πιο συγκεκριμένα, για τη δεύτερη σήραγγα προτείνουν ο παράγοντας K να παίρνει δύο διαφορετικές τιμές, μία για την πλευρά της σήραγγα που

βρίσκεται προς την προϋπάρχουσα διατομή και μία για την απέναντι. Το σκεπτικό πίσω από αυτή την πρόταση είναι ότι η εσωτερική παρειά βρίσκεται εντός πιο διαταραγμένης εδαφικής ζώνης (εξαιτίας του πρώτου κλάδου) και συνεπώς εκεί θα προκύψουν μεγαλύτερες καθιζήσεις. Αντίστοιχοι συντελεστές προτείνονται για τη μέγιστη καθίζηση  $s_{max}$  (Charman et al. 2003) καθώς και για τις οριζόντιες μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

Τέλος, στην εργασία παρουσιάζονται ανάστροφες αναλύσεις στις οποίες χρησιμοποιούνται δεδομένα από μετρήσεις πεδίου σε πραγματικά έργα για να υπολογισθούν τιμές των συντελεστών που προτάθηκαν παραπάνω. Στον Πιν. 2.1 φαίνονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των τριών έργων που μελετήθηκαν και οι τιμές για τη μέγιστη καθίζηση και για συντελεστή  $K$  που προέκυψαν από τις αναλύσεις.

Πίνακας 2.1 Λεπτομέρειες των δίδυμων σηράγγων που εξετάστηκαν (D. N. Charman)

Location	Lafayette Park		St James Park		Hedden Express	
	Green	2	Green	2	Green	2
D(m)	6.4	6.4	4.8	4.8	9	9
Z <sub>c</sub> (m)	14.6	14.6	20.5	20.5	26	26
Z <sub>l</sub> (m)	0	0	0	0	13	13
d(m)	-	-11	-	22.5	-	23
V(%)	3	3.63	2	2.7	1.2	1.8
W <sub>50</sub> (mm)	52.7	69.6	18.48	22.6	29.3	35
U <sub>50</sub> (mm)	10.39	38.52	3.64	11.6	-	-
K <sub>c</sub>	0.5	0.6	0.4	0.43	0.8	1.2
K <sub>s</sub>	0.5	0.35	0.4	0.4	0.8	0.8
Focal Pt (x,z)	(-11,22.5)	(-9,9)	(22.5,31.5)	(22.5,12)	N/A	N/A
M	-	0.6	-	0.6	-	0.6

### 3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

Στα πλαίσια της εργασίας, και για την διερεύνηση της αλληλεπίδρασης δύο παράλληλων αβαθών σηράγγων, πραγματοποιήθηκαν τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων SIMULIA ABAQUS. Με τη βοήθεια του γραφικού περιβάλλοντος του κώδικα δημιουργήθηκαν αριθμητικά μοντέλα, τα οποία προσομοιώνουν μέρος του υπόγειου χώρου εντός του οποίου πραγματοποιείται σε βήματα η εκσκαφή των δύο σηράγγων.

Η εργασία προσομοιώνει την εκσκαφή σηράγγων με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής που ασκούν πίεση στο μέτωπο (EPB/Slurry Tunnel Boring Machine, TBM), πρακτική που αποτελεί εδώ και χρόνια τον κανόνα σε σήραγγες εντός του αστικού ιστού (π.χ. μετρό). Η προσομοίωση που υιοθετήθηκε είναι αρκετά απλουστευτική, καθώς αγνοεί αρκετές από τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την διάνοιξη σηράγγων με την προαναφερθείσα μέθοδο. Η ακρίβεια όμως που παρέχει κρίνεται ικανοποιητική τόσο για την ποιοτική περιγραφή και αντίληψη του σύνθετου αυτού φαινομένου της αλληλεπίδρασης, όσο και για την ποσοτικοποίηση της επιρροής του στις υπόγειες κατασκευές. Παράλληλα, η επιλογή μην γίνει πλήρης προσομοίωση της εκσκαφής με το EPB/Slurry TBM περιορίζει σημαντικά το απαιτούμενο υπολογιστικό κόστος και τον απαιτούμενο αποθηκευτικό χώρο για τα αποτελέσματα, μεγέθη τα οποία είναι εξαιρετικά σημαντικά σε τέτοιο είδους μοντέλα.

Για την εξαγωγή όλων των απαραίτητων αποτελεσμάτων ακολουθείται μια συγκεκριμένη αλληλουχία εκσκαφής των δύο σηράγγων. Αρχικά εκσκάπτεται μόνη της η αριστερή σήραγγα, η οποία σε αυτό το στάδιο προσομοιώνει την περίπτωση μονής αβαθούς σήραγγας (στη συνέχεια θα αναφέρεται και ως «single tunnel»). Στο στάδιο περάτωσης της διάνοιξης λαμβάνονται αποτελέσματα για τα υπό εξέταση εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη. Τα αποτελέσματα αυτά θα χρησιμοποιηθούν ως σημείο αναφοράς για τη διερεύνηση της έντασης της αλληλεπίδρασης. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η διάνοιξη της δεύτερης, δεξιάς σήραγγας (θα αναφέρεται και ως «second tunnel»). Πλέον η αριστερή σήραγγα προσομοιώνει την αρχική, προϋπάρχουσα σήραγγα, η οποία επηρεάζεται από την εκσκαφή της δεύτερης (θα αναφέρεται και ως «first tunnel»). Μόλις ολοκληρωθεί η εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας λαμβάνονται αποτελέσματα για τις δύο δίδυμες σήραγγες και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα για τη μονή σήραγγα.

Η εκσκαφή κάθε σήραγγας γίνεται βηματικά σύμφωνα με την εξής λογική: σε κάθε βήμα πραγματοποιείται προχώρηση της εκσκαφής κατά 1m (με αφαίρεση του αντίστοιχου γεωυλικού) και ασκείται μία ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση στο καινούργιο μέτωπο της σήραγγας. Ταυτόχρονα, εγκαθίσταται η επένδυση από προκατασκευασμένο δακτύλιο σκυροδέματος στη διατομή που διανοίχτηκε στο ακριβώς προηγούμενο βήμα. Έτσι κάθε διατομή παραμένει ανυποστήρικτη για ένα βήμα, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αποτόνωσης των τάσεων εντός του εδαφικού υλικού.

Επειδή κάθε μοντέλο που σχεδιάζεται προορίζεται να χρησιμοποιηθεί για ένα μεγάλο πλήθος παραμετρικών αναλύσεων δόθηκε πολύ μεγάλη βάση στον άρτιο σχεδιασμό τους. Στόχος ήταν η διασφάλιση της βέλτιστης λειτουργίας των αναλύσεων, η οποία επιτυγχάνεται εφ' όσον τηρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- Το μήκος εκσκαφής να είναι επαρκές ώστε να εξασφαλίζεται η ύπαρξη τουλάχιστον μίας τυπικής διατομής, δηλαδή μίας περιοχής εντός της οποίας θα λαμβάνονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα για την αλληλεπίδραση των σηράγγων. Απαραίτητη προϋπόθεση, επομένως, είναι στην περιοχή αυτή όλα τα υπό εξέταση εντατικά μεγέθη να έχουν σταθερές τιμές. Όπως είναι γνωστό, η επιρροή των εργασιών εκσκαφής μιας σήραγγας σε μία διατομή του εδαφικού χώρου ξεκινάει όταν το μέτωπο βρίσκεται σε μια απόσταση πίσω από την εν λόγω διατομή (της τάξεως των δύο διαμέτρων), ενώ συνεχίζεται και αφού το μέτωπο περάσει μπροστά από αυτή (και για απόσταση της τάξεως των τριών με τέσσερις διαμέτρους). Συνεπώς η περιοχή λήψης αποτελεσμάτων θα πρέπει να απέχει από το μπροστινό όριο απόσταση επαρκή ώστε να μηδενίζεται η επιρροή των συνοριακών συνθηκών που έχουν επιβληθεί εκεί. Ταυτόχρονα, πρέπει να απέχει από το μέτωπο της σήραγγας (όταν η εκσκαφή βρίσκεται στην τελική της θέση) απόσταση ικανή να εξαλείψει την συνεισφορά του στην ανάληψη τάσεων και τη μείωση των μετακινήσεων.
- Οι διαστάσεις του μοντέλου να είναι τέτοιες ώστε οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στα άκρα του να μην επηρεάζουν την περιοχή όπου λαμβάνονται αποτελέσματα για τις δύο σήραγγες. Πιο συγκεκριμένα, το μήκος του μοντέλου πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να περιλαμβάνεται επαρκές μήκος εκσκαφής (όπως αυτό περιγράφηκε παραπάνω), ενώ ταυτόχρονα το μέτωπο, στα τελευταία βήματα εκσκαφής, θα πρέπει να έχει ικανή απόσταση από το πίσω όριο του μοντέλου, ώστε να μην επηρεάζεται από τον περιορισμό των οριζόντιων μετακινήσεων που έχει επιβληθεί εκεί. Επίσης υπάρχει η απαίτηση για επαρκή απόσταση των σηράγγων από τα πλευρικά και από το κάτω όριο, ώστε κοντά σε αυτά τα όρια να μηδενίζονται οι μετακινήσεις και να αποκαθίστανται οι γεωστατικές τάσεις.
- Η διακριτοποίηση του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία να παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων ικανοποιητικής ακρίβειας για ένα γεωτεχνικό πρόβλημα (οι μεταβλητές που υπεισέρχονται σε μία γεωτεχνική ανάλυση αδυνατούν να προσομοιώσουν με ακρίβεια όλες τις παραμέτρους του προβλήματος λόγω της φύσης του υλικού). Για το λόγο αυτό πραγματοποιείται πύκνωση του κανάβου γύρω από την περιοχή εκσκαφής των σηράγγων, ενώ όσο πλησιάζουμε προς τα όρια του μοντέλου ο κánaβος γίνεται πιο αραιός.
- Η επιλογή του πλήθους των σταδίων προσομοίωσης της εκσκαφής να γίνει με γνώμονα την κατά το δυνατόν αντιπροσωπευτική προσομοίωση του φυσικού προβλήματος και ταυτόχρονα τη διασφάλιση σαφούς ακρίβειας των αποτελεσμάτων, με δεδομένη πάντα την ακρίβεια των γεωτεχνικών προβλημάτων.
- Σε αντιδιαστολή με όλα τα παραπάνω, οι διαστάσεις του μοντέλου, το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων και ο αριθμός των βημάτων προσομοίωσης πρέπει να είναι περιορισμένα στα απολύτως απαραίτητα. Αυτή η απαίτηση προκύπτει για την κατά το δυνατόν μείωση του υπολογιστικού χρόνου της κάθε ανάλυσης και του αναγκαίου αποθηκευτικού χώρου για το αρχείο των αποτελεσμάτων, μεγέθη που για τέτοιου είδους αναλύσεις είναι αξιοσημείωτα.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η σχεδίαση του βέλτιστου μοντέλου αναλύσεων απαιτεί την ταυτόχρονη ικανοποίηση αντικρουόμενων συνθηκών. Προκειμένου λοιπόν να επιλεγούν τα

μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στο κυρίως μέρος των αριθμητικών αναλύσεων αρχικά προηγήθηκε εκτενής αναζήτηση παρόμοιων εργασιών στην διεθνή και την ελληνική βιβλιογραφία και επιλέχθηκαν ενδεικτικές τιμές των διαστάσεων του μοντέλου. Στη συνέχεια ακολούθησαν σύντομες αναλύσεις ευαισθησίας των αποτελεσμάτων στην μεταβολή των διαστάσεων, ώστε να υλοποιηθεί ο τελικός σχεδιασμός των μοντέλων.

Για τις ανάγκες των αναλύσεων της παρούσας εργασίας κατασκευάστηκαν δύο αριθμητικά προσομοιώματα δίδυμων σηράγγων κυκλικής διατομής, διαμέτρου  $D=6$  m, σε βάθος  $H$  (μετρούμενο από το κέντρο της) ίσο με  $2D$  (μοντέλο I) και  $4D$  (μοντέλο II) αντίστοιχα. Κατά τα άλλα, τα δύο αυτά μοντέλα ήταν παρόμοια. Το μήκος τους ισούται με  $L_{tot}=18D=108m$ , εκ του οποίου τα  $L_{exc}=10D=60m$  χρησιμοποιούνται για την εκσκαφή των σηράγγων. Το πλάτος κάθε μοντέλου ισούται με  $B=21,5D=129m$ , η απόσταση από το κέντρο των σηράγγων μέχρι το κάτω όριο του μοντέλου είναι ίση με  $3D=18m$  για το μοντέλο I ( $H/D=2$ ) και  $4D=24m$  για το μοντέλο II ( $H/D=4$ ), ενώ το άνω όριο των μοντέλων συμπίπτει με την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Τέλος, το πλάτος του πυλώνα (η απόσταση ανάμεσα στις δύο σήραγγες μετρούμενη από τις εσωτερικές παρειές τους) επιλέχθηκε να παραμείνει σταθερό σε όλες τις αναλύσεις και ίσο με  $W=0.5D=3m$ . Τα γεωμετρικά στοιχεία των δύο αριθμητικών προσομοιωμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1

Πίνακας 3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δύο αριθμητικών προσομοιωμάτων

	Διάμετρος	Ακτίνα	Βάθος Σήραγγας	Ύψος Μοντέλου	Μήκος Μοντέλου	Μήκος Εκσκαφής	Πλάτος Μοντέλου	Πλάτος Πυλώνα
	D (m)	R (m)	H/D	H <sub>TOT</sub> /D	L <sub>TOT</sub> /D	L <sub>EXC</sub> /D	B/D	W/D
<b>ΜΟΝΤΕΛΟ I</b>	6	3	2	5	18	10	21.5	0.5
<b>ΜΟΝΤΕΛΟ II</b>	6	3	4	8	18	10	21.5	0.5

Όσον αφορά τον κάναβο των πεπερασμένων στοιχείων, επιλέχθηκε να γίνει πύκνωση των στοιχείων γύρω και εντός της περιοχής εκσκαφής των σηράγγων και αραιώση προς τα άκρα του μοντέλου. Η απόφαση αυτή ελήφθη ώστε να μειωθεί στο ελάχιστο το υπολογιστικό κόστος, χωρίς να μειωθεί όμως η ακρίβεια στα σημεία ενδιαφέροντος, δηλαδή εκεί που θα μας απασχολήσουν στη συνέχεια τα αποτελέσματα.

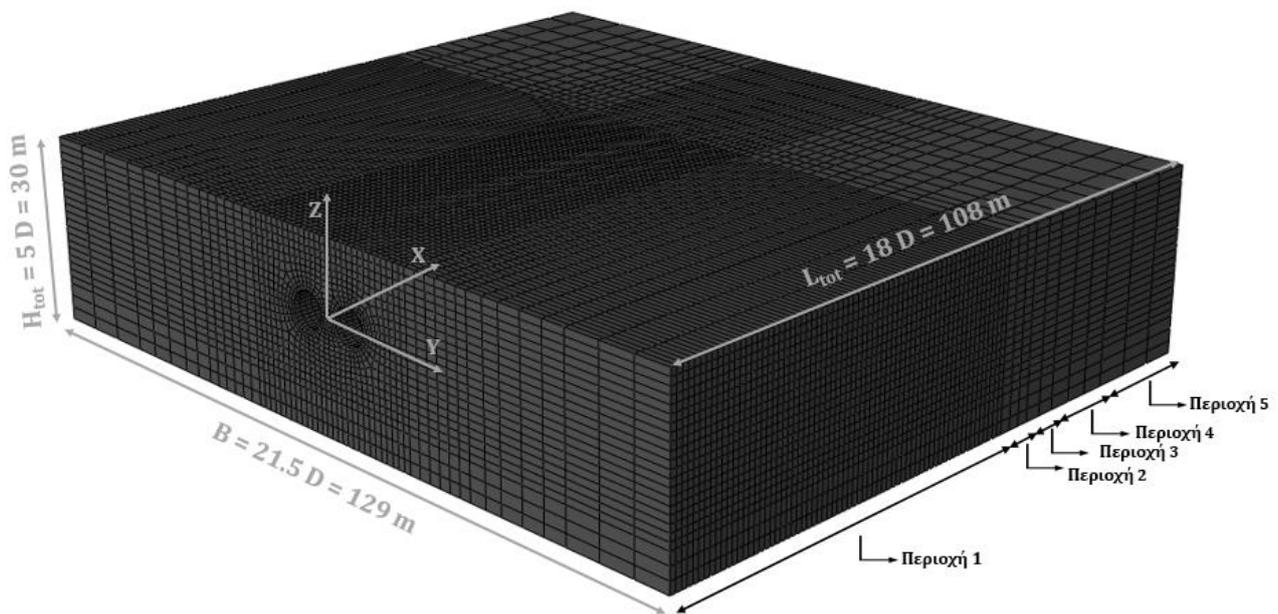
Πιο συγκεκριμένα, στην κατά μήκος διάσταση (άξονας  $y$ ) τα μοντέλα χωρίζονται σε πέντε περιοχές: στην περιοχή 1 ( $y$  από 0 μέχρι 66) μήκους 66m, στην οποία εμπεριέχεται και το μήκος εκσκαφής των σηράγγων, και η διακριτοποίηση έγινε ανά 1m, στην περιοχή 2 ( $y$  από 66 έως 72) μήκους 6m με διακριτοποίηση ανά 2m, στην περιοχή 3 ( $y$  από 72 μέχρι 78) μήκους 6m με διακριτοποίηση ανά 3m, στην περιοχή 4 ( $y$  από 78 έως 90) μήκους 12m με διακριτοποίηση ανά 4m και τέλος στην περιοχή 5 ( $y$  από 90 μέχρι 108) μήκους 18m με διακριτοποίηση ανά 6m.

Στην κατά πλάτος διάσταση (άξονας  $x$ ) ο διαχωρισμός γίνεται σε έξι περιοχές: στην περιοχή i μήκους 9m ανάμεσα στα κέντρα των δύο σηράγγων ( $x$  από -4,50 έως 4,50) όπου η διακριτοποίηση έγινε ανά 1,125m, στις περιοχές ii ( $x$  από -4,50 έως -16,50 και από 4,50 έως 16,50) μήκους 12m με διακριτοποίηση ανά 1,20m, στις περιοχές iii ( $x$  από -16,50 έως -28,50 και από 16,50 έως 28,50) μήκους 12 μέτρων με πεπερασμένα στοιχεία πλάτους 2m, στις

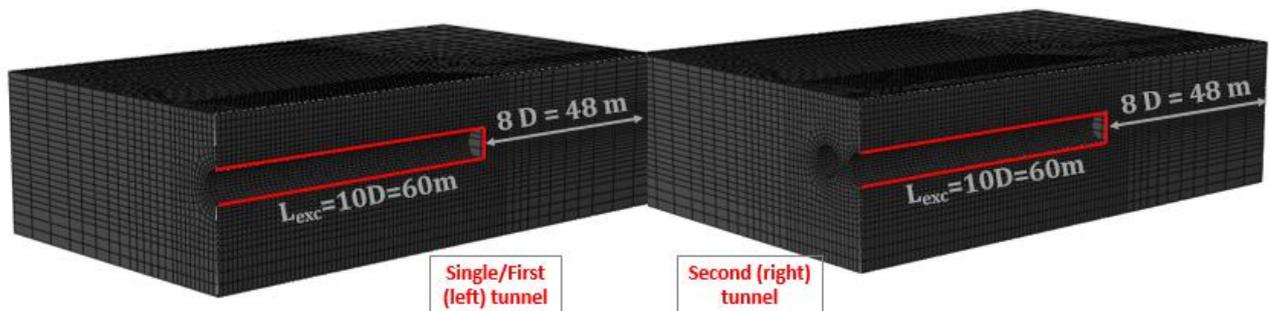
περιοχές iv ( $x$  από  $-28,50$  έως  $-34,50$  και από  $28,50$  έως  $34,50$ ) μήκους  $6m$  με διακριτοποίηση ανά  $3m$ , στις περιοχές v ( $x$  από  $-34,50$  έως  $-46,50$  και από  $34,50$  έως  $46,50$ ) μήκους  $12m$  με διακριτοποίηση ανά  $4m$  και τέλος στις περιοχές vi ( $x$  από  $-46,50$  έως  $-64,50$  και από  $46,50$  έως  $64,50$ ) μήκους  $18m$  με πεπερασμένα στοιχεία πλάτους  $6m$ .

Στην καθ' ύψος διάσταση (άξονας  $z$ ), το μοντέλο I ( $H/D=2$ ) χωρίζεται σε δύο περιοχές: την περιοχή α, με μήκος  $24m$  που ξεκινάει από την επιφάνεια του εδάφους ( $z$  από  $-12$  έως  $12$ ) διακριτοποίηση ανά  $1,20m$  και στην περιοχή β ( $z$  από  $-12$  έως  $-18$ ) μήκους  $6m$  με διακριτοποίηση ανά  $2m$ . Το μοντέλο II ( $H/D=4$ ) χωρίζεται αντίστοιχα σε 3 περιοχές: στην περιοχή α που ξεκινάει από την επιφάνεια του εδάφους, με ύψος  $12m$  ( $z$  από  $12$  έως  $24$ ) με διακριτοποίηση ανά  $2m$ , στην περιοχή β στο μέσο του μοντέλου ( $z$  από  $-12$  έως  $12$ ) ύψους  $24m$  με διακριτοποίηση ανά  $1,20m$  και στην περιοχή γ στο κάτω μέρος του μοντέλου ( $z$  από  $-12$  έως  $-24$ ) μήκους  $12m$  με πεπερασμένα στοιχεία  $2m$ .

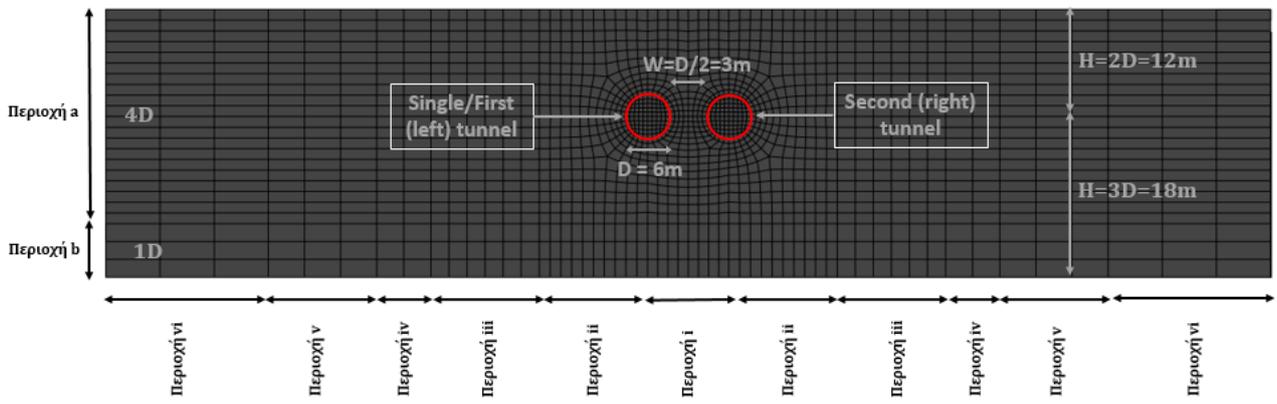
Τέλος, σημειώνεται ότι η διατομή των δύο σηράγγων, καθώς και η περιοχή γύρω από αυτές έχουν διακριτοποιηθεί με ακόμα πυκνότερο κανάβο πεπερασμένων στοιχείων, ο οποίος φτάνει έως και τα  $0,40m$ .



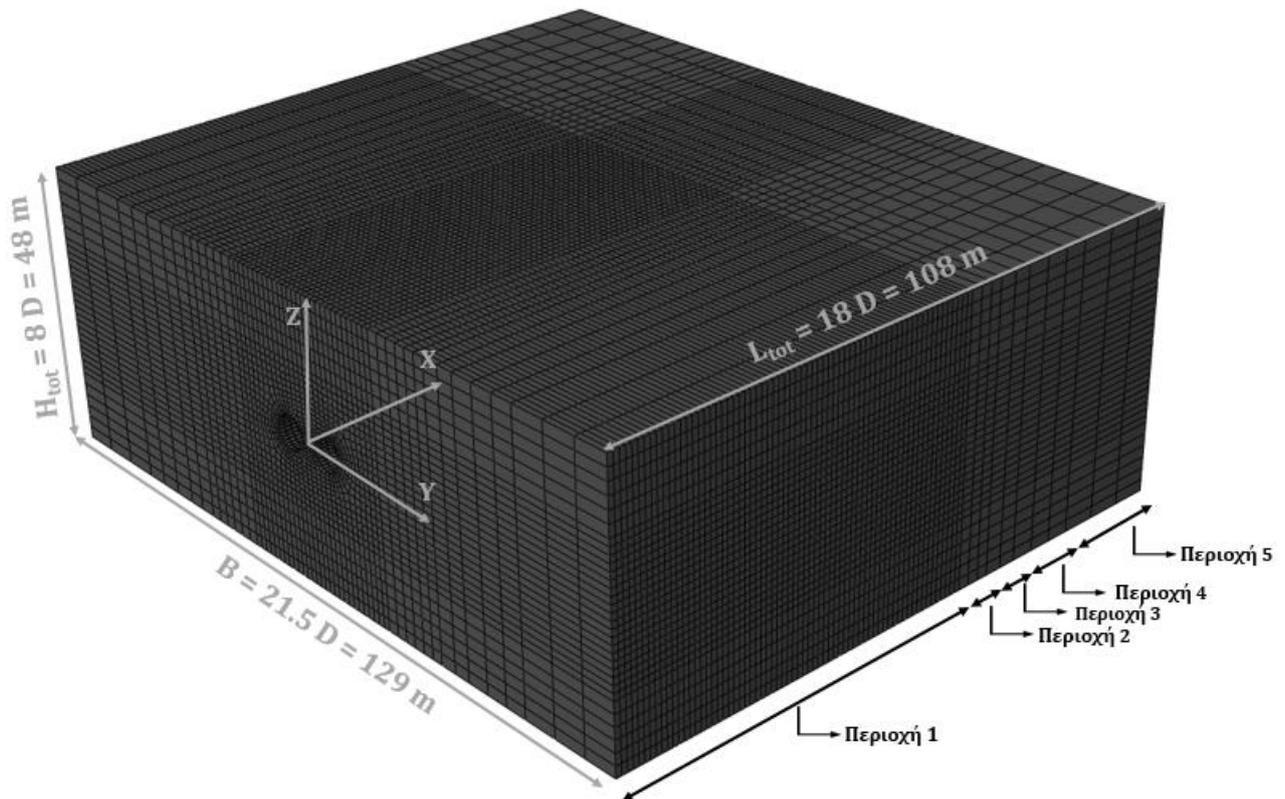
Εικόνα 3.1 Τριδιάστατη όψη του Μοντέλου I ( $H/D=2$ )



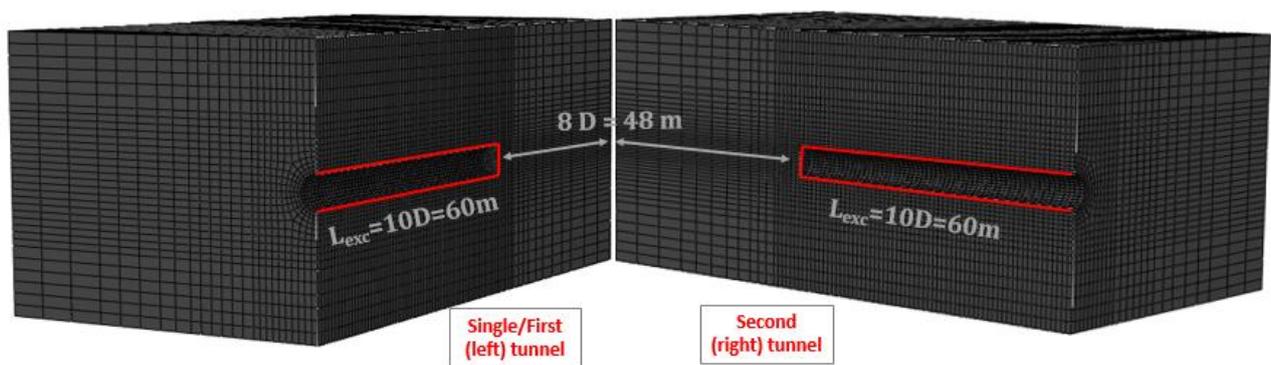
Εικόνα 3.2 Τομές του Μοντέλου I ( $H/D=2$ )



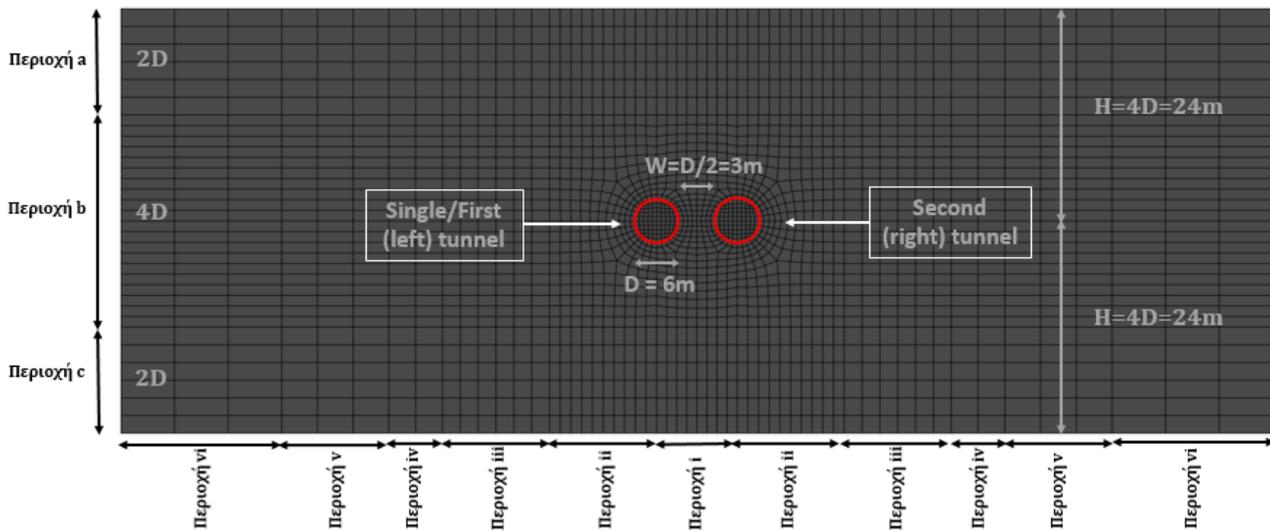
Εικόνα 3.3 Μπροστινή όψη ( $x=0$ ) του Μοντέλου I ( $H/D=2$ )



Εικόνα 3.4 Τριδιάστατη όψη του Μοντέλου II ( $H/D=4$ )



Εικόνα 3.5 Τομές του Μοντέλου II ( $H/D=4$ )



Εικόνα 3.6 Μπροστινή όψη ( $x=0$ ) του Μοντέλου II ( $H/D=4$ )

Όπως φαίνεται και από τις τριδιάστατες λήψεις των δύο μοντέλων παραπάνω, η αρχή των αξόνων επιλέχθηκε, για λόγους ευκολότερης κατασκευής του αριθμητικού προσομοιώματος και καλύτερης διαχείρισης των αποτελεσμάτων, να ορισθεί ανάμεσα στις δύο σήραγγες, στην μέση ακριβώς του πυλώνα. Ο οριζόντιος άξονας  $x$  διέρχεται από την οριζόντια διάμετρο των δύο εκσκαφών, ενώ η αρχή του διαμήκη άξονα  $y$  ταυτίζεται με την αρχή των εκσκαφών.

Κατά την κατασκευή των μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά είδη πεπερασμένων στοιχείων. Το εδαφικό υλικό προσομοιώθηκε με εξαεδρικά οκτακομβικά πεπερασμένα στοιχεία (C3D8 solid elements), ενώ αντίθετα η επένδυση της σήραγγας με τετρακομβικά στοιχεία κελύφους (S4 shell elements). Η διεπιφάνεια μεταξύ εδάφους και υποστήριξης ορίστηκε ως πλήρους επαφής (rigid connection), που σημαίνει ότι δεν επιτρέπεται η σχετική ολίσθηση της επένδυσης πάνω εδαφικό υλικό.

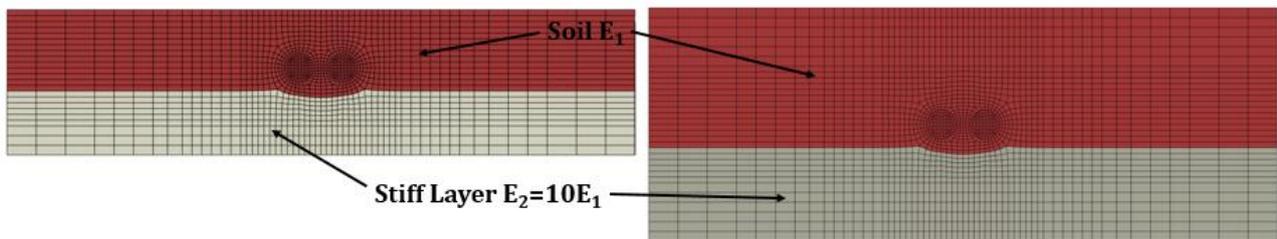
Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδαφικού υλικού υιοθετήθηκε το καταστατικό μοντέλο συμπεριφοράς των Mohr – Coulomb. Πρόκειται για μία σειρά γραμμικών εξισώσεων που περιγράφουν σε όρους κυρίων τάσεων τις συνθήκες κάτω από τις οποίες ένα ιστροπικό υλικό θα φτάσει στην αστοχία. Το κριτήριο αναφέρεται μόνο σε ελαστική – τέλεια πλαστική συμπεριφορά του υλικού κατά τη φόρτιση και την αποφόρτισή του. Στο αριθμητικό προσομοίωμα εισάγονται οι παράμετροι που απαιτούνται για τον ορισμό των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών στο συγκεκριμένο καταστατικό μοντέλο, δηλαδή η συνοχή ( $c$ ), η γωνία εσωτερικής τριβής ( $\varphi$ ), η γωνία διασταλτικότητας ( $\delta=\varphi/5$ ), και το μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ). Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται ως συνάρτηση των υπόλοιπων γεωτεχνικών χαρακτηριστικών και της μέσης γεωστατικής τάσης στην περιοχή διάνοιξης της σήραγγας. Χρησιμοποιείται η σχέση του Bowles (1997) (Σχ. 3.1) ελαφρώς τροποποιημένη ώστε να δίνει δυσμενέστερες τιμές του μέτρου ελαστικότητας.

$$E_{\text{soil}} = 300S_u \quad (3.1)$$

όπου

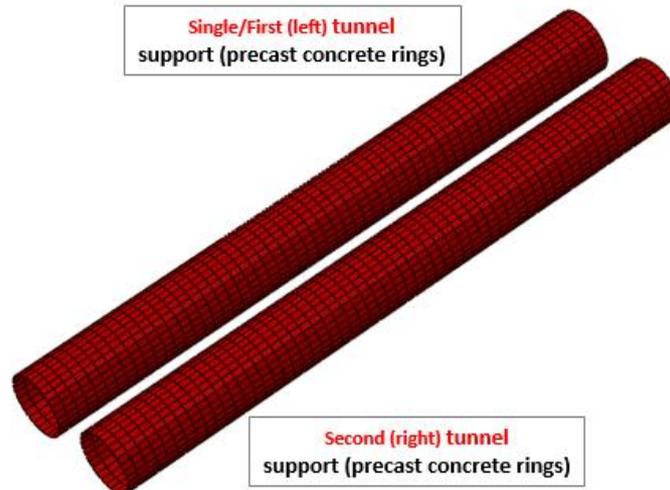
$S_u$  η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους.

Υλικά που υπακούουν στο καταστατικό μοντέλο των Mohr – Coulomb έχουν ταυτόσημη συμπεριφορά τόσο κατά τη φόρτιση, όσο και κατά την αποφόρτιση (δηλαδή έχουν κοινό μέτρο ελαστικότητας και για τις δύο αυτές περιπτώσεις). Το γεγονός αυτό δημιουργεί ανυψώσεις στον πυθμένα των σηράγγων από την αποφόρτισή του κατά την αφαίρεση του γεωυλικού. Οι ανυψώσεις αυτές όμως δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα και πρέπει να μειθούν κατά το δυνατόν, ώστε να διατηρηθεί υψηλή η αξιοπιστία του αριθμητικού προσομοιώματος. Η λύση δόθηκε με τη δημιουργία ενός στρώματος εδαφικού υλικού κάτω από τον πυθμένα των σηράγγων, το οποίο έχει μέτρο ελαστικότητας δέκα φορές μεγαλύτερο από το πραγματικό (stiff layer).



Εικόνα 3.7 Εφαρμογή της τεχνικής του Stiff Layer (μπεζ χρώμα) στα μοντέλα

Η υποστήριξη της σήραγγας επιλέχθηκε να γίνει μέσω δακτυλίων άοπλου σκυροδέματος πλάτους 1m οι οποίοι τοποθετούνται ένα βήμα πίσω από το μέτωπο (όπως περιγράφηκε παραπάνω). Η προσομοίωση αυτή αναπαριστά δακτυλίους σκυροδέματος (rings) των οποίων τα επί μέρους τεμάχια (segments) βρίσκονται σε πλήρη επαφή. Επίσης πλήρης επαφής θεωρούνται και οι διεπιφάνειες μεταξύ διαδοχικών δακτυλίων. Η προσομοίωση αυτή, αν και διαφέρει ελαφρώς από την πραγματικότητα, δεν μειώνει την αξιοπιστία του μοντέλου. Καθώς η επένδυση από δακτυλίους σκυροδέματος φορτίζεται κατά μήκος της σήραγγας, η διάταξη των κόμβων οδηγεί στην ανάπτυξη μηχανισμών αλληλεπίδρασης και αλληλοεμπλοκής ανάμεσα σε γειτονικούς δακτυλίους, προκαλώντας το γνωστό ως coupling effect φαινόμενο. Συνεπώς, η επένδυση συμπεριφέρεται ως μία τριδιάστατη κατασκευή, η οποία εξαιτίας της αύξησης της δυσκαμψίας της συμπεριφέρεται ως ένα συνεχές κέλυφος.



Εικόνα 3.8 Προσομοίωση της επένδυσης από δακτυλίους προκατασκευασμένου σκυροδέματος με στοιχεία κελύφους

Για την πλήρη κατανόηση και ποσοτικοποίηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης πραγματοποιήθηκε μεγάλος αριθμός παραμετρικών αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε ένα από τα δύο βάθη εκσκαφής εξετάστηκαν οι εξής παράμετροι:

- Η οριζόντια κατά μήκος απόσταση των μετώπων εκσκαφής των δύο σηράγγων. Εξετάστηκε η περίπτωση μεγάλης απόστασης  $L_{HD}=10D=60m$ , μεσαίας απόστασης  $L_{HD}=5D=30m$  και ταυτόχρονης διάνοιξης των δύο σηράγγων  $L_{HD}=0$ .
- Η πίεση που ασκείται στο μέτωπο από το μηχάνημα ολομέτωπης κοπής EPB/Slurry TBM. Επιλέγονται δύο περιπτώσεις οι οποίες αντιστοιχούν στο 50% ( $p_{fs}/p_{ho}=0.50$ ) και στο 25% ( $p_{fs}/p_{ho}=0.25$ ) της οριζόντιας γεωστατικής τάσης αντίστοιχα.
- Για το μοντέλο I ( $H/D=2$ ) και για κάθε μία από τις περιπτώσεις που περιεγράφηκαν εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων  $K_0=0.5$ ,  $K_0=1.0$  και  $K_0=1.5$ . Για το μοντέλο II μελετήθηκε μόνο η τιμή  $K_0=0.5$ .

Τέλος για κάθε μία από τις παραπάνω υποπεριπτώσεις πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις ως προς τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Χρησιμοποιήθηκαν οκτώ ζεύγη τιμών συνοχής – γωνίας εσωτερικής τριβής, τα οποία θεωρείται ότι καλύπτουν όλο το εύρος τιμών που μπορεί να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη αβαθούς σήραγγας σε εδαφικό σχηματισμό.

Σημειώνεται ότι ως βασικό μοντέλο ορίστηκε αυτό με το μικρό ύψος υπερκειμένων ( $H/D=2$ ,  $L_{HD}=10D=60m$ ,  $p_{fs}/p_{ho}=0.50$ ,  $K_0=0.5$ ). Στα αποτελέσματα από αυτό το μοντέλο θα γίνει εκτενής αναφορά στη συνέχεια και βάση αυτών θα περιγραφεί το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης. Επίσης η επιρροή των υπόλοιπων παραμέτρων θα γίνει κατανοητή μέσω της αντιπαράθεσης των αποτελεσμάτων από τα υπόλοιπα αριθμητικά προσομοιώματα με τα αντίστοιχα του βασικού μοντέλου.

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές αναλύσεις και τα εύρη τιμών που επιλέχθηκε να εξετασθούν.



Εικόνα 3.9 Προσανατολισμός μέτρησης της γωνίας για τις δύο σήραγγες.

Ο προσανατολισμός που επιλέχθηκε για τη μέτρηση της γωνίας στη δεξιά και την αριστερή σήραγγα είναι δεξιόστροφος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.9. Για να επιτευχθεί ακριβής σύγκριση των τιμών των υπό εξέταση παραμέτρων η σύγκριση γίνεται ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας που περνάει από το μέσο του πυλώνα (άξονας z). Πιο συγκεκριμένα, συγκρίνονται οι εσωτερικές παρειές (ως προς τον πυλώνα) των δύο σηράγγων μεταξύ τους, και αντίστοιχα οι εξωτερικές.

Πίνακας 3.2 Παράμετροι των αριθμητικών αναλύσεων

Κατηγορία	Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμές	M.M.
Γεωμετρικές παράμετροι	Διάμετρος Σήραγγας	D	6	m
	Ύψος Υπερκειμένων	H/D	2, 4	
	Πλάτος Πυλώνα	W/D	0.5	
	Απόσταση Μετώπων	F <sub>H/D</sub> /D	10, 5, 0	
Γεωτεχνικές παράμετροι	Ειδικό Βάρος Εδάφους	$\gamma_s$	20	kN/m <sup>3</sup>
	Συντελεστής Οριζόντιων Ωθήσεων	K <sub>0</sub>	0.5, 1.0, 1.5	
	Συνοχή	c	10, 15, 20, 25	kPa
	Γωνία Εσωτερικής τριβής	$\varphi$	25, 30	(°)
	Γωνία Διασταλτικότητας	$\delta = \varphi/5$	5, 6	(°)
	Μέτρο Ελαστικότητας Εδάφους	E <sub>s</sub>	27 - 65	Mpa
	Λόγος Poisson Εδάφους	$\nu_s$	0.3	
	Αντοχή Εδάφους σε Θλίψη	$\sigma_{cs}$	31.4 - 86.6	kPa
Παράμετροι Υποστήριξης εκ Σκυροδέματος	Πίεση στο Μέτωπο	$p_{fs}/p_{ho}$	0.50, 0.25	
	Μέτρο Ελαστικότητας Σκυροδέματος	E <sub>c</sub>	30	Gpa
	Λόγος Poisson Υποστηριξης	$\nu_c$	0.2	
	Πάχος Δακτυλίου Σκυροδέματος	d <sub>c</sub>	0.3	m
	Ειδικό Βάρος Σκυροδέματος	$\gamma_c$	0.025	MN/m <sup>3</sup>

Τέλος, στον Πίνακα 3.3 ορίζονται τα κύρια σύμβολα που χρησιμοποιούνται για τις παραμέτρους των αριθμητικών αναλύσεων και των αποτελεσμάτων τους στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας. Οι δείκτες που έχουν ενσωματωθεί στα κύρια σύμβολα των

αποτελεσμάτων ανταποκρίνονται στον προσανατολισμό των γωνιών που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 3.9.

Πίνακας 3.3 Προσδιορισμός των βασικών συμβόλων της αριθμητικής ανάλυσης

Σύμβολο	Επεξήγηση
$p_{0,m}$	Μέση γεωστατική τάση στον άξονα της διατομής
$\sigma_{cm}$	Μονοαξονική αντοχή του εδάφους
$p$	Φορτίο επί της υποστήριξης από δακτυλίους σκυροδέματος
$N$	Αξονική δύναμη στην επένδυση της σήραγγας
$M$	Ροπές Κάμψης στην επένδυση της σήραγγας
$N/(p_{0,m}*D)$	Ανηγμένη αξονική δύναμη στην υποστήριξη
$M/(p_{0,m}^2*D)$	Ανηγμένη ροπή κάμψης στην υποστήριξη
$U_R$	Συνισταμένη των συγκλίσεων της διατομής
$U_v$	Κατακόρυφες μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους
$U_h$	Οριζόντιες μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους
$i$	Πλάτος της καμπύλης καθιζήσεων (τυπική απόκλιση)
$V_s/V_0$	Σχετική απώλεια εδαφικού όγκου
$S/D$	Ανηγμένη απόσταση από το μέτωπο
$X/D$	Ανηγμένη απόσταση από το μέσο του πυλώνα
single	Μονή σήραγγα
first	Η πρώτη σε σειρά εκσκαφής από τις δίδυμες σήραγγες
second	Η δεύτερη σε σειρά εκσκαφής από τις δίδυμες σήραγγες
pillar	Ο πυλώνας ανάμεσα στις δυο σήραγγες
abs	Απόλυτη τιμή ενός μεγέθους
max	Η μέγιστη τιμή ενός μεγέθους στην περιφέρεια της διατομής
Steps	Μέτρηση των βημάτων που πραγματοποιείται η εκσκαφή

## 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Στο κεφάλαιο που προηγήθηκε έγινε μία εκτενής περιγραφή των αριθμητικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν, των διάφορων επιλογών και παραμέτρων για την προσομοίωση, καθώς και των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων, με γνώμονα δύο βασικούς σκοπούς:

α) την ποιοτική περιγραφή του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, την κατανόηση του μηχανισμού εξέλιξης των φορτίσεων επί της υποστήριξης κατά τη διάνοιξη των σηράγγων, καθώς επίσης και την αλληλουχία των εδαφικών μετατοπίσεων που πραγματοποιούνται γύρω από τις εκσκαφές και στην επιφάνεια του εδάφους,

β) την ποσοτική περιγραφή της αλληλεπίδρασης, η οποία συνίσταται στην κατανόηση της έκτασης του φαινομένου, καθώς και της σημασίας του στην μελέτη και την κατασκευή ενός τεχνικού έργου. Εξετάζεται ξεχωριστά η επιρροή κάθε μίας από τις παραμέτρους (γεωμετρικές και γεωτεχνικές) που μελετήθηκαν και γίνεται σύγκριση αυτών, ώστε να διαπιστωθεί ποιες τελικά παράμετροι επιδρούν περισσότερο κατά τη διάνοιξη δίδυμων σηράγγων.

Η επεξήγηση του ρόλου κάθε παραμέτρου βασίζεται στην παράθεση εξαγόμενων από των κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus αποτελεσμάτων, κατάλληλα επεξεργασμένων, τα οποία παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων και εικόνων. Μέσω των διαγραμμάτων γίνεται αντιληπτή η κατανομή των εντατικών μεγεθών, τόσο κατά μήκος των εκσκαφών, όσο και γύρω από μία τυπική διατομή. Ταυτόχρονα, επισημαίνεται η σχέση των μεγεθών αυτών με τις γεωτεχνικές παραμέτρους του προβλήματος και επεξηγούνται οι μηχανισμοί που συντελούν στη διαμόρφωση των αποτελεσμάτων.

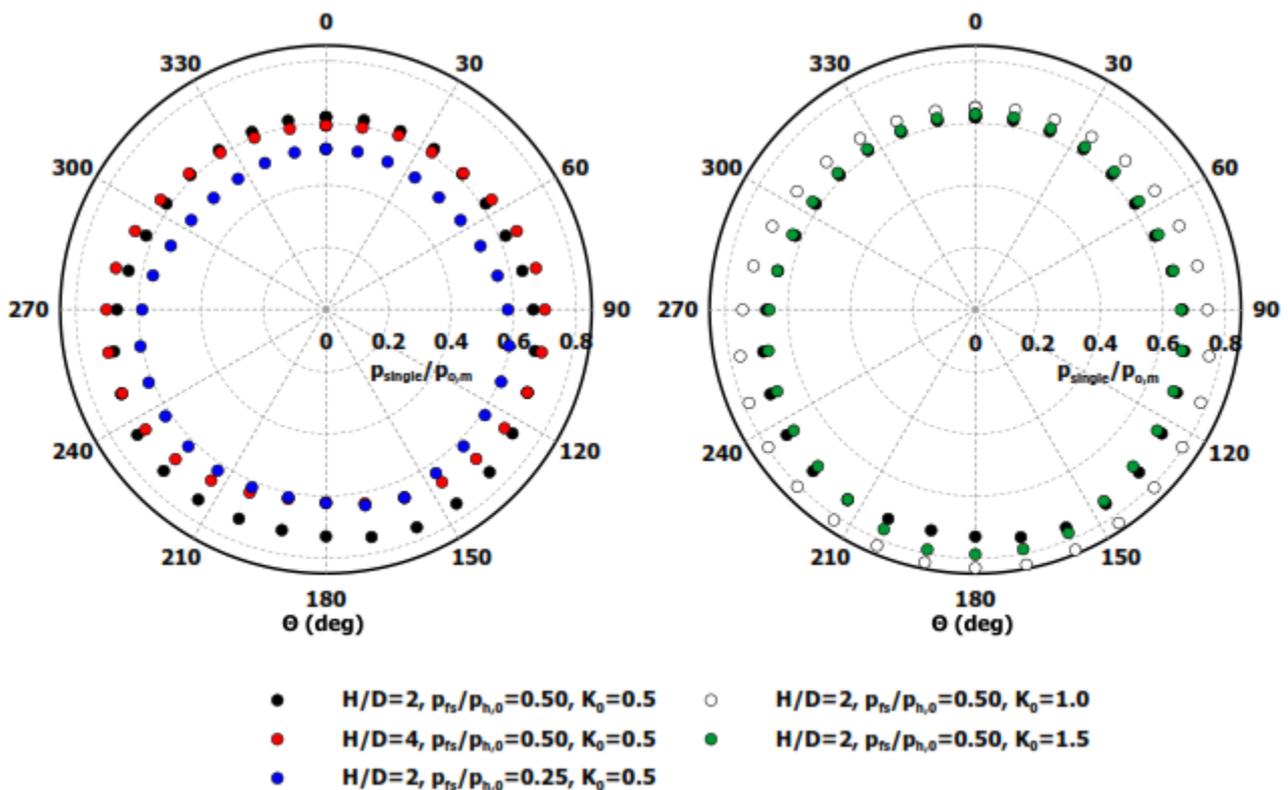
Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι λόγω του μεγάλου αριθμού των παραμέτρων που εξετάστηκαν και του ακόμα μεγαλύτερου αριθμού αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν δεν είναι δυνατόν να παρουσιασθούν αναλυτικά αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων για όλες τις περιπτώσεις. Η επιλογή των διαγραμμάτων που ακολουθούν έγινε με γνώμονα την βέλτιστη εποπτεία του υπό εξέταση τεχνικού ζητήματος.

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, από τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έγινε εξαγωγή αποτελεσμάτων και για την περίπτωση μονής σήραγγας, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως μέτρο σύγκρισης της αλληλεπίδρασης. Στο σημείο αυτό, και πριν από την περιγραφή των αποτελεσμάτων για δίδυμες σήραγγες, ακολουθεί μία συνοπτική παρουσίαση των εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών που διέπουν τη διάνοιξη μονής σήραγγας, για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Η αναφορά των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάνοιξη μίας σήραγγας, καθώς και των ιδιοτεροτήτων που παρουσιάζει κάθε μία από τις καταστάσεις που προσομοιώθηκαν, θεωρείται απαραίτητη για την βαθύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων στη φάση της αλληλεπίδρασης.

## 4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΟΝΗ ΣΗΡΑΓΓΑ

### 4.1.1 ΠΙΕΣΗ ΕΠΑΦΗΣ (ΦΟΡΤΙΟ) ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

Στο εδάφιο αυτό θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα που αφορούν στην πίεση που ασκείται επί της υποστήριξης της σήραγγας (προκατασκευασμένοι δακτύλιοι οπλισμένου σκυροδέματος) για την περίπτωση της μονής σήραγγας. Στο Διάγρ. 4.1 φαίνεται η κατανομή της πίεσης στην περίμετρο της υποστήριξης για τις διάφορες περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Οι τιμές είναι ανηγμένες ως προς την μέση γεωστατική τάση ( $p_{0,m}$ ) στο επίπεδο του άξονα της εκάστοτε σήραγγας.



Διάγραμμα 4.1 Κατανομή της πίεσης επαφής στην περιφέρεια της επένδυσης για τη μονή σήραγγα και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Όπως φαίνεται, στην βασική περίπτωση που εξετάζεται ( $H/D=2, K_0=0.5$  και  $p_{fs}/p_{ho}=0.50$ ) η μέγιστη πίεση αναπτύσσεται στον πυθμένα της σήραγγας, η ελάχιστη στη στέψη, ενώ μεσαίες τιμές παρατηρούνται στις παρειές. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο μικρό βάθος της σήραγγας σε σχέση με τη διάμετρό της ( $H/D=2$ ), που έχει σαν συνέπεια τη σημαντική αύξηση της γεωστατικής τάσης από τη στέψη της μέχρι τον πυθμένα. Επίσης, το μικρό ύψος των υπερκειμένων δεν επαρκεί για τον πλήρη σχηματισμό του φαινομένου του θόλου. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός βοηθάει σημαντικά στην καλύτερη κι επαρκή ανακατανομή των τάσεων που συντελείται λόγω της εκσκαφής και την «εκτροπή» τους περιμετρικά της διατομής, με συνέπεια την αποφόρτιση της επένδυσης της σήραγγας.

Τα αποτελέσματα, όπως άλλωστε αναμενόταν, είναι απόλυτα συμμετρικά ως προς τον κατακόρυφο άξονα της σήραγγας. Σημειώνεται ότι στο διάγραμμα οι τιμές της πίεσης που παρουσιάζονται είναι ανηγμένες ως προς τη μέση γεωστατική τάση που επικρατεί σε κάθε περίπτωση, με σκοπό την καλύτερη εποπτεία και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

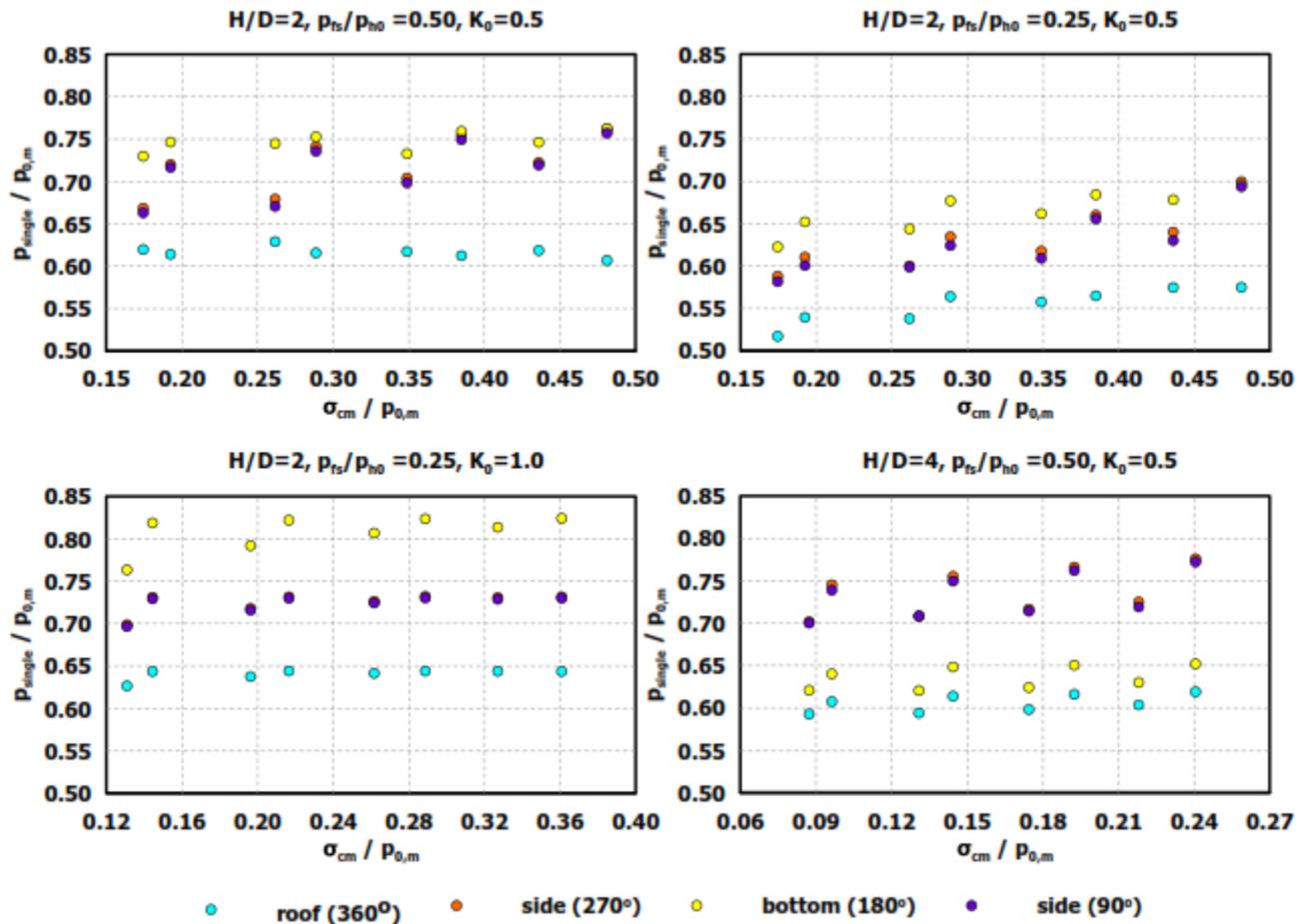
Στο μοντέλο με τη βαθιά σήραγγα ( $H/D=4$ ) παρατηρούμε μια σαφώς διαφοροποιημένη εικόνα. Η μέγιστη πίεση εδώ ασκείται κοντά στις παρειές της εκσκαφής, ενώ ο πυθμένας παρουσιάζει μικρότερη τιμή, πολύ κοντινή μάλιστα με αυτή της στέψης. Σε σχέση με το βασικό μοντέλο ( $H/D=2$ ) οι ανηγμένες τιμές της πίεσης είναι κατά μέσο όρο μικρότερες (οι απόλυτες τιμές πίεσης είναι, όπως αναμένεται, μεγαλύτερες λόγω των εντονότερων γεωστατικών τάσεων). Η διαφοροποίηση είναι εντονότερη στον πυθμένα της εκσκαφής, ενώ εξαίρεση αποτελούν οι περιοχές κοντά στις παρειές όπου οι πιέσεις στο εν λόγω μοντέλο είναι ελαφρώς μεγαλύτερες. Φαίνεται λοιπόν ότι η αύξηση των υπερκειμένων, αν και επιβαρύνει την επένδυση με επιπλέον φορτίο, παρέχει τη δυνατότητα καλύτερης ανακατανομής των τάσεων μετά την εκσκαφή. Με άλλα λόγια γίνεται πιο έντονη και εμφανής η λειτουργία του φαινομένου του θόλου, το οποίο σε πλήρη ανάπτυξη ανακουφίζει σημαντικά την περιφέρεια της σήραγγας.

Στη συνέχεια εξετάζεται η επιρροή του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων (μοντέλα με  $H/D=2$ ,  $p_{fs}/p_{ho}=0.5$  και  $K_0=0.5 - 1.0 - 1.5$ ). Για  $K_0=1.0$  η επένδυση δέχεται τις μεγαλύτερες πιέσεις (σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις) σε όλη την περιφέρειά της. Για  $K_0=1.5$  και σε αντιπαράθεση με το βασικό μοντέλο, η πίεση είναι μεγαλύτερη στον πυθμένα και τη στέψη, ενώ παρουσιάζεται ελαφρώς μικρότερη στις παρειές της εκσκαφής. Είναι σημαντικό όμως ότι ανεξαρτήτως της τιμής του  $K_0$  η κατανομή των πιέσεων γύρω από την περίμετρο της σήραγγας (δηλαδή η σχέση της πίεσης στον πυθμένα με την πίεση στη στέψη και τις παρειές) παραμένει σταθερή και ίδια με αυτή του βασικού μοντέλου. Με την παρατήρηση αυτή υπογραμμίζεται ο καθοριστικός ρόλος που παίζει το μικρό βάθος της σήραγγας στην κατανομή των πιέσεων.

Τέλος, στην προσομοίωση ρηχής σήραγγας με μειωμένη πίεση στο μέτωπο από το EPB/Slurry TBM ( $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$  και  $p_{fs}/p_{ho}=0.25$ ) παρατηρούμε κατανομή των πιέσεων στην περιφέρεια της εκσκαφής παρόμοια με αυτή του βασικού μοντέλου. Όμως οι τιμές της πίεσης σε αυτή την παραλλαγή είναι σαφώς μικρότερες. Η μειωμένη πίεση στο μέτωπο επιτρέπει στο γεωυλικό μεγαλύτερη υποχώρηση προς το εσωτερικό της σήραγγας κατά τη διάρκεια της εκσκαφής και του ενός βήματος στο οποίο το έδαφος παραμένει ανυποστήρικτο. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε αυξημένη αποτόνωση του περιβάλλοντος εδάφους, με τελικό αποτέλεσμα την μικρότερη καταπόνηση της υποστήριξης που τοποθετείται στη συνέχεια.

Μάλιστα αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε για μειωμένη πίεση μετώπου και στις υπόλοιπες περιπτώσεις που εξετάστηκαν (δηλαδή για μεγαλύτερο βάθος και διαφορετικούς συντελεστές οριζόντιων ωθήσεων). Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων απαιτήθηκε διαδικασία αντίστοιχη με αυτή που ακολουθήθηκε για τα παραπάνω, όμως δεν κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιασθούν και αυτά. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι όσο πιο μεγάλο γίνεται το γεωστατικό εντατικό πεδίο γύρω από τη σήραγγα (δηλαδή όσο μεγαλώνει η μέση γεωστατική τάση  $p_{0,m}$ ), τόσο μικρότερη είναι η μείωση στις τιμές των πιέσεων που καταγράφηκαν για την περίπτωση με πίεση στο μέτωπο εκσκαφής  $p_{fs}/p_{ho}=0.25$ .

Όσον αφορά τη μεταβολή των πιέσεων συναρτήσει των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του εδάφους, ενδεικτικά παρουσιάζεται παρακάτω το Διαγρ. 4.2.



Διάγραμμα 4.2 Μεταβολή της πίεση επαφής στην υποστήριξης της μονής σήραγγας (στη στέψη, τον πυθμένα και τις παρειές) ως προς τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

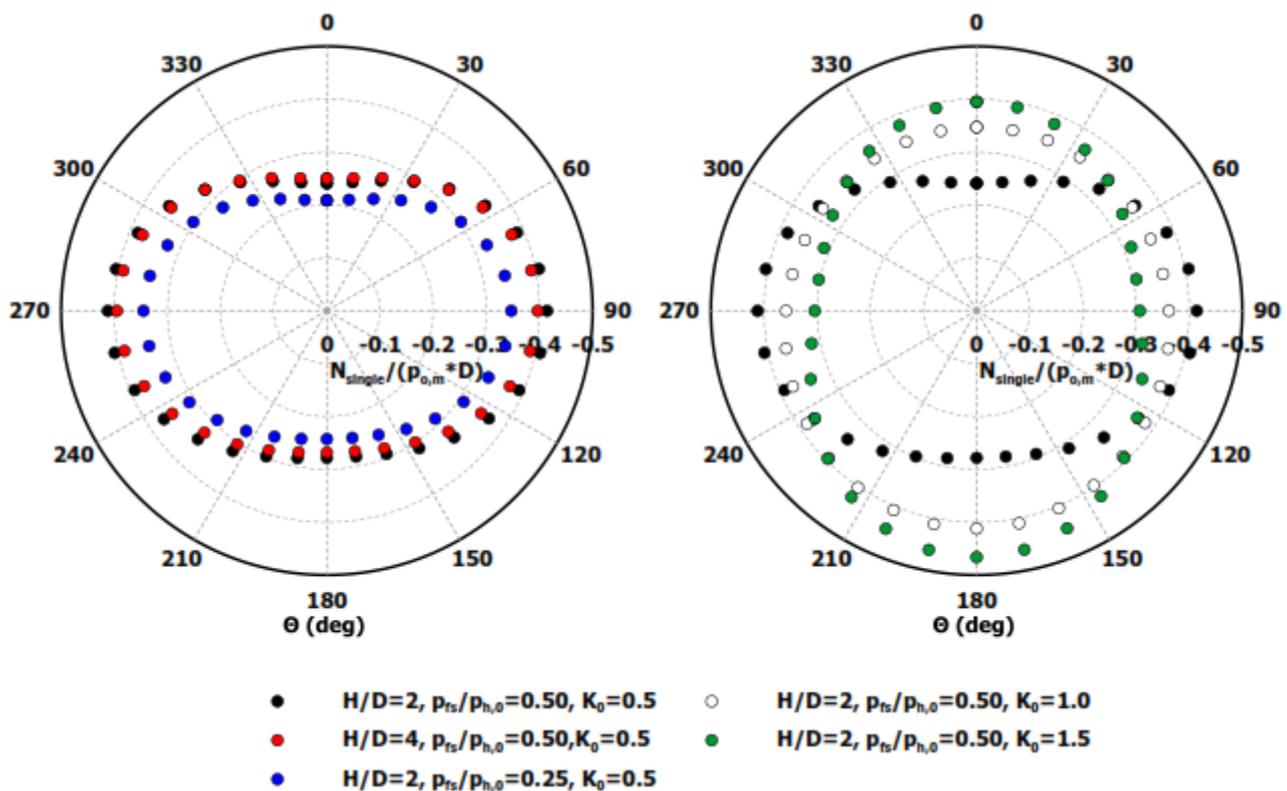
Όπως γίνεται αντιληπτό η επικρατούσα τάση είναι να αυξάνονται ελαφρώς οι τιμές της πίεσης επί της επένδυσης όσο βελτιώνονται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους (η διατμητική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας). Γεωυλικά με ισχυρότερα μηχανικά χαρακτηριστικά αποτονώνονται σε μικρότερο βαθμό κατά το ένα βήμα που παραμένουν ανυποστήρικτα. Συνεπώς όταν το μέτωπο προχωρήσει αρκετά και το σύστημα εδάφους – υποστήριξης ισορροπήσει, η τελευταία καλείται να αναλάβει μεγαλύτερες τάσεις.

Βέβαια υπάρχουν και εξαιρέσεις, με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα την οροφή της σήραγγας στο βασικό μοντέλο. Εκεί η πίεση της υποστήριξης μειώνεται με την αύξηση της αντοχής του εδάφους. Το γεγονός αυτό προκύπτει από την ικανότητα του εδάφους να παραλάβει μεγαλύτερο μέρος του νεκρού φορτίου που προκύπτει από το υπερκείμενο υλικό, ανακουφίζοντας ταυτόχρονα την επένδυση. Πρόκειται για άλλη μία ένδειξη ότι στην ρηχή σήραγγα δεν υπάρχει το απαιτούμενο ύψος μέχρι την επιφάνεια για ανακατανομή των τάσεων και ανάπτυξη του φαινομένου του θόλου. Τέλος, αναφέρουμε ότι για  $K_0=1.0$  και  $K_0=1.5$  οι αντίστοιχες μεταβολές είναι σαφώς μικρότερες.

Σημειώνεται πως οι αυξομειώσεις της πίεσης για διαδοχικές τιμές της αντοχής του εδάφους οφείλονται στην διαρκή εναλλαγή των τιμών της γωνίας εσωτερικής τριβής του υλικού (από  $\varphi=25^\circ$  σε  $\varphi=30^\circ$ ). Για το λόγο αυτό σε ορισμένα διαγράμματα «σηματίζονται» δύο νοητές καμπύλες (των τεσσάρων σημείων έκαστη) για κάθε μέγεθος, όπου κάθε μία αντιστοιχεί σε συνδυασμό μίας τιμής της γωνίας εσωτερικής τριβής με τέσσερις τιμές της συνοχής. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται και παρακάτω στην εργασία. Πάντως όσο βελτιώνεται η αντοχή του εδάφους οι αυξομειώσεις περιορίζονται.

#### 4.1.2 ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Διαγρ. 4.3) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις αξονικές δυνάμεις που δρουν στην υποστήριξη για τις διάφορες περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Οι τιμές της δύναμης είναι ανηγμένες ως προς τον παράγοντα  $\rho_{0,m} * D$  (μέση γεωστατική τάση επί τη διάμετρο της σήραγγας).

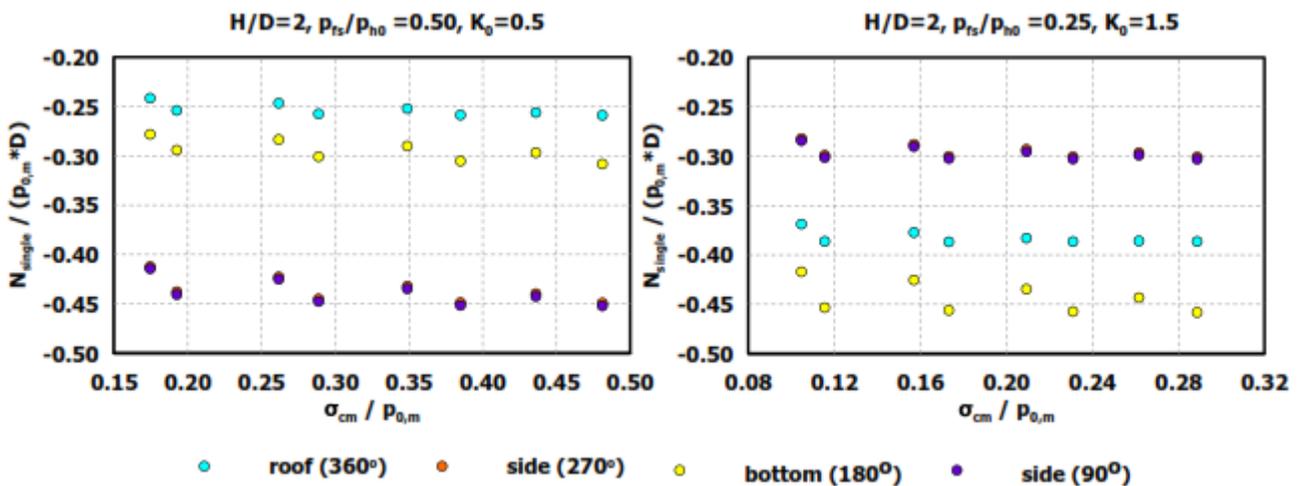


Διάγραμμα 4.3 Κατανομή των αξονικών δυνάμεων στην υποστήριξη της μονής σήραγγας για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Όπως γίνεται αντιληπτό από το γράφημα η κατανομή των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος της περιμέτρου της επένδυσης εξαρτάται άμεσα από τις γεωστατικές τάσεις. Για τις περιπτώσεις όπου ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων είναι  $K_0=0.5$  παρατηρούμε την ανάπτυξη μεγάλων δυνάμεων κοντά στις παρειές της σήραγγας, την ώρα που στον πυθμένα και τη στέψη οι αντίστοιχες τιμές είναι πολύ περιορισμένες. Στο βασικό μοντέλο οι δυνάμεις στον πυθμένα είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από τη στέψη λόγω της έντονης εξάρτησης των

εντατικών μεγεθών από το βάθος του κάθε σημείου. Κατά την προσομοίωση της βαθιάς σήραγγας ( $H/D=4$ ) οι ανηγμένες τιμές αξονικής δύναμης είναι, όπως και στις πιέσεις, ελαφρώς μικρότερες από αυτές του βασικού μοντέλου, με εξαίρεση τη στέψη της εκσκαφής. Παρομοίως, στην περίπτωση μειωμένης πίεσης μετώπου ( $p_{fs}/p_{ho}=0.25$ ) οι αξονικές δυνάμεις είναι μικρότερες από του βασικού μοντέλου. Το φαινόμενο αυτό, όπως και στις πιέσεις, οφείλεται στην πιο έντονη αποτόνωση που υφίσταται το έδαφος λόγω της μειωμένης πίεσης που ασκείται στο μέτωπο από το TBM.

Η μεταβολή του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων, παρ' όλα αυτά, μεταβάλλει σημαντικά τη μορφή των αποτελεσμάτων. Για  $K_0=1.0$  η απόλυτα ομοιόμορφη κατανομή των αξονικών δυνάμεων που αναμένεται λόγω της υδροστατικής μορφής του εντατικού πεδίου επηρεάζεται μόνο από την άμεση σχέση της τάσης κάθε σημείου με το βάθος του, δίνοντας τελικά ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές δύναμης στον πυθμένα της επένδυσης. Επίσης για συντελεστή  $K_0=1.5$  η εικόνα είναι αντίστροφη από την περίπτωση όπου  $K_0=0.5$ . Εδώ οι μέγιστες τιμές της αξονικής δύναμης εμφανίζονται στον πυθμένα και την στέψη της σήραγγας, ενώ στις παρειές οι αντίστοιχες τιμές είναι σαφώς μικρότερες. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε απόλυτη συμφωνία με το θεωρητικό υπόβαθρο και τις αναλυτικές σχέσεις που κυκλοφορούν στην βιβλιογραφία για την ανάλυση κυκλικών σήραγγων.

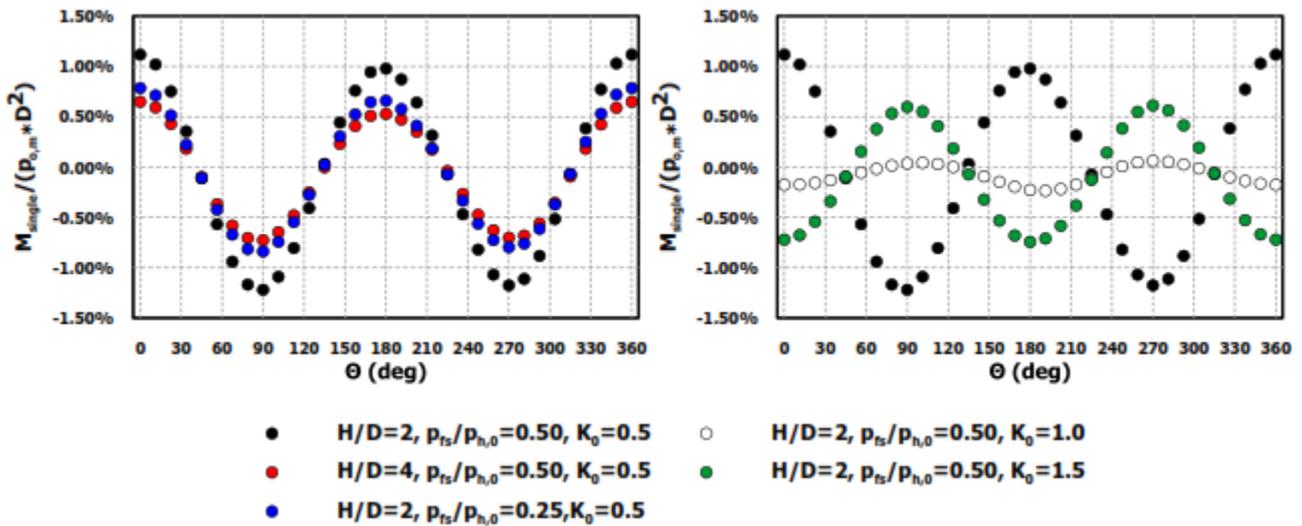


Διάγραμμα 4.4 Μεταβολή της αξονικής δύναμης στην υποστήριξη της μονής σήραγγας (στη στέψη, τον πυθμένα και τις παρειές) ως προς τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

Σχετικά με την μεταβολή των αξονικών δυνάμεων συναρτήσει των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους (Διάγρ. 4.4) αναφέρεται ότι (όπως ακριβώς συμβαίνει και με τις πιέσεις) παρατηρείται η τάση για αύξηση των τιμών καθώς βελτιώνεται η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του γεωυλικού. Η αύξηση αυτή είναι αμελητέα για τις υψηλές τιμές του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων ( $K_0=1.0$  και  $K_0=1.5$ ), ενώ γίνεται εμφανέστερη για μικρή τιμή της πίεσης μετώπου ( $p_{fs}/p_{ho}=0.25$ ).

#### 4.1.3 ΡΟΠΕΣ ΚΑΜΨΗΣ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

Η κατανομή των ροπών κάμψης κατά μήκος της περιφέρειας μιας τυπικής διατομής διαφέρει σημαντικά από την αντίστοιχη για τα προηγούμενα υπό εξέταση μεγέθη, όπως φαίνεται και στο Διαγρ. 4.5. Οι τιμές που εμφανίζονται στο διάγραμμα είναι ανηγμένες ως προς τον παράγοντα  $\rho_{0,m} * D^2$  (μέση γεωστατική τάση επί το τετράγωνο της διαμέτρου).



Διάγραμμα 4.5 Κατανομή των ροπών κάμψης στην υποστήριξη της μονής σήραγγας για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

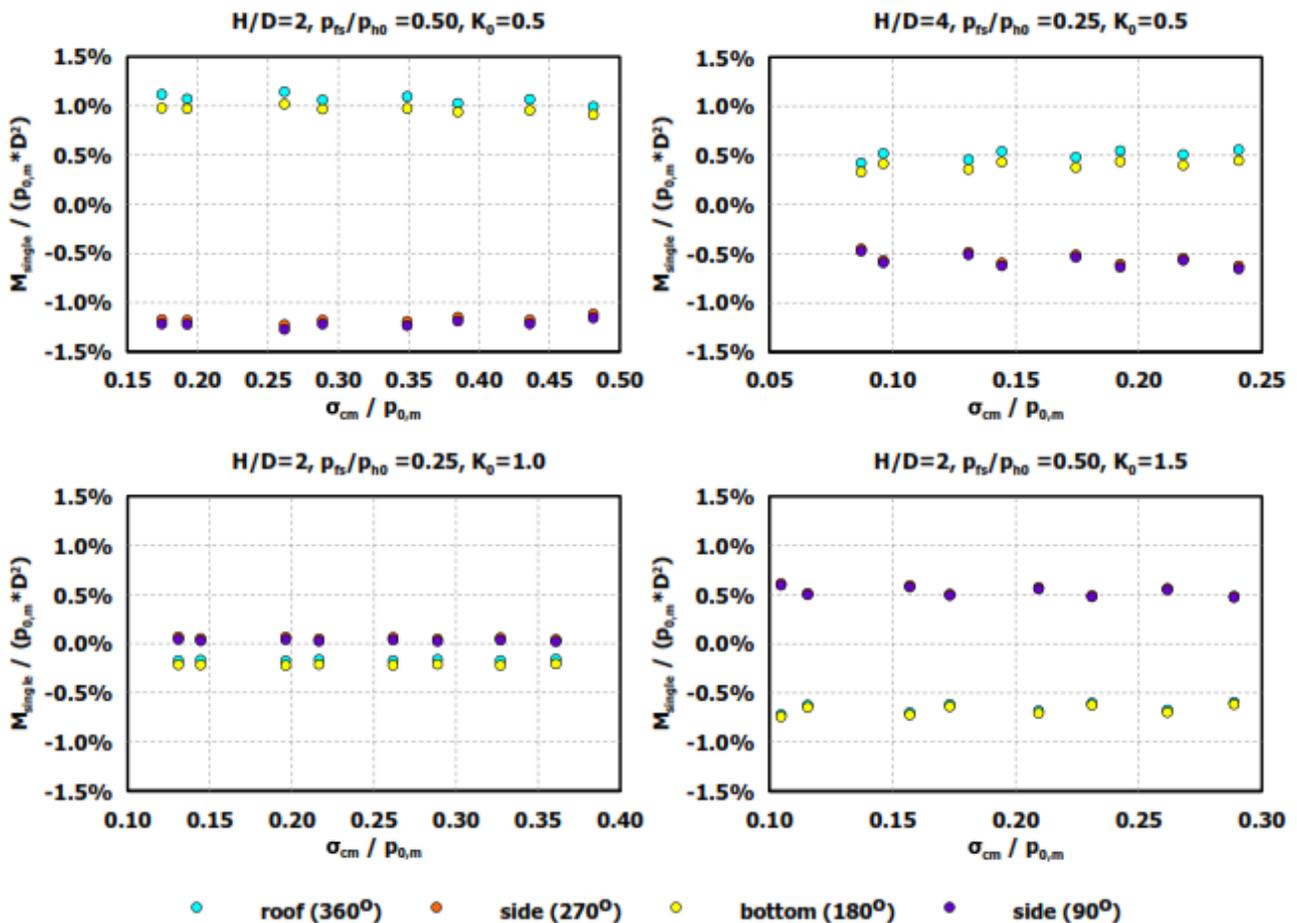
Ροπές κάμψης, για όλες τις περιπτώσεις, αναπτύσσονται γύρω από τις παρειές, τον πυθμένα και την στέψη της σήραγγας, ενώ μεγιστοποιούνται ακριβώς σε αυτά τα σημεία (δηλαδή στις 90°, στις 180°, στις 270° και στις 360°). Αντιθέτως, στα ενδιάμεσα σημεία οι ροπές ελαχιστοποιούνται, έχοντας μάλιστα μηδενικές τιμές στις 45°, 135°, 225° και 315°.

Για το βασικό μοντέλο η μέγιστη κατ' απόλυτη τιμή ροπή κάμψης εμφανίζεται στις παρειές, η μικρότερη στον πυθμένα, ενώ ενδιάμεση τιμή αναπτύσσεται στη στέψη της σήραγγας. Ακριβώς ίδια εικόνα έχουμε και στην περίπτωση μειωμένης πίεσης μετώπου ( $p_{fs}/p_{h,0}=0.25$ ), με τις τιμές των ροπών κάμψης εδώ να είναι μικρότερες, όπως αναμενόταν σύμφωνα και με τα προαναφερθέντα εντατικά μεγέθη. Όμοια κατάσταση προέκυψε και για το βαθύ μοντέλο ( $H/D=4$ ), με τις ανηγμένες τιμές των ροπών εδώ να είναι ακόμα μικρότερες.

Όπως και στα υπόλοιπα εντατικά μεγέθη, η μεταβολή του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Για  $K_0=1.0$  η μέγιστη ροπή κάμψης είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερη απ' ό,τι για  $K_0=0.5$ , γεγονός που εξηγείται από το ομοιόμορφο εντατικό πεδίο και έχει άμεση σχέση με τις μεγάλες τιμές αξονικής δύναμης που αναπτύχθηκαν. Για την περίπτωση όπου  $K_0=1.5$  η μορφή του διαγράμματος είναι παρόμοια με αυτή του βασικού μοντέλου, με ανεστραμμένη όμως την προσήμανση των ροπών. Επίσης, τα μέγιστα εδώ παρουσιάζονται στην στέψη και στον πυθμένα αντί για τις παρειές της σήραγγας. Οι δύο αυτές διαφορές οφείλονται στην αλλαγή διεύθυνσης της κύριας γεωστατικής τάσης.

Σχετικά με την προσήμανση των ροπών κάμψης αναφέρεται ότι για  $K_0=0.5$  οι ροπές είναι θετικές στον πυθμένα και τη στέψη της σήραγγας, ενώ είναι αρνητικές στις παρειές. Σημειώνεται ότι θετικές θεωρούνται οι ροπές που εφελκούν την εσωτερική ίνα της επένδυσης. Συνεπώς η παρατηρηθείσα τάση περιλαμβάνει τη συμπίεση της κατακόρυφης

διαμέτρου του ανοίγματος με ταυτόχρονη επιμήκυνση της οριζόντιας. Ακριβώς αντίθετη είναι η κατάσταση για  $K_0=1.0$  και  $K_0=1.5$  (θετικές είναι οι ροπές στις παρειές και αρνητικές στον πυθμένα και τη στέψη). Τα αποτελέσματα ερμηνεύονται λαμβάνοντας υπόψη την διεύθυνση της κυρίαρχης γεωστατικής τάσης σε κάθε περίπτωση και την επιρροή της στη διαμόρφωση του εντατικού πεδίου.



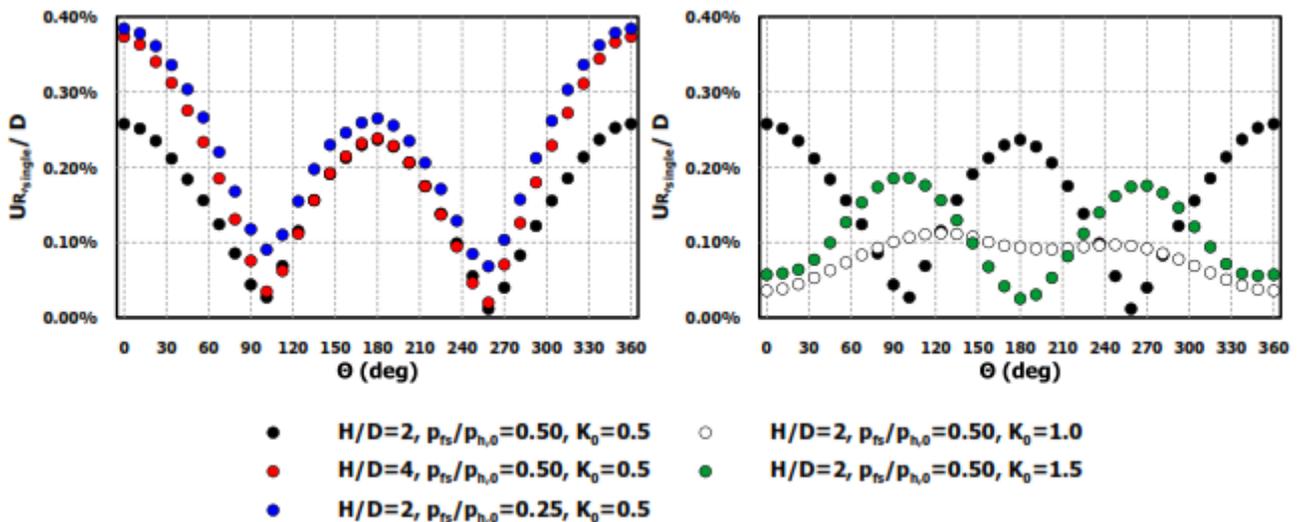
Διάγραμμα 4.6 Μεταβολή των ροπών κάμψης στην υποστήριξης της μονής σήραγγας (στη στέψη, τον πυθμένα και τις παρειές) ως προς τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

Τέλος, όσον αφορά την επιρροή των μηχανικών χαρακτηριστικών της γεωμάζας (Διάγρ. 4.6), παρατηρήθηκε η τάση σε εδάφη με μεγαλύτερη αντοχή να αναπτύσσεται μικρότερη ροπή κάμψης στην επένδυση, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με ότι ίσχυε για τα μεγέθη που παρουσιάστηκαν νωρίτερα στην παρούσα ενότητα. Εξαιρέση αποτελούν οι περιπτώσεις μειωμένης πίεσης μετώπου για  $K_0=0.5$  (και για τα δύο βάθη που εξετάστηκαν), όπου οι ροπές κάμψης αυξάνονται με τη βελτίωση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του γεωυλικού.

#### 4.1.4 ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούμε στις τελικές μετακινήσεις στις οποίες υπόκειται η περιφέρεια της υποστηριγμένης σήραγγας. Με τον όρο μετακινήσεις αναφερόμαστε μόνο

στις συνιστώσες που είναι κάθετες στον άξονα της σήραγγας, ενώ αγνοείται η συνιστώσα που είναι παράλληλη στον άξονα. Στο Διάγρ. 4.7 παρουσιάζεται η συνισταμένη της οριζόντιας και της κατακόρυφης μετακίνησης σε επίπεδο διατομής. Τα μεγέθη που παρουσιάζονται είναι ανηγμένα ως προς τη διάμετρο της σήραγγας ώστε να υπάρχει δυνατότητα σύγκρισής τους με σήραγγες διαφορετικής διατομής.



Διάγραμμα 4.7 Κατανομή των μετακινήσεων στην περιφέρεια της μονής σήραγγας για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, για  $K_0=0.5$  η τάση των μετακινήσεων είναι να παρουσιάζουν σημαντικές τιμές στην στέψη και τον πυθμένα, οι οποίες μηδενίζονται σταδιακά προς τις δύο παρειές της σήραγγας. Οι οριζόντιες μετακινήσεις παίρνουν πολύ μικρές τιμές λόγω συμμετρίας αλλά και εντατικού πεδίου, με αποτέλεσμα οι κατακόρυφες κινήσεις να είναι οι καθοριστικές. Μάλιστα οι μετακινήσεις στην οροφή είναι μεγαλύτερες από του πυθμένα, εξαιτίας του φαινομένου του «νεκρού βάρους», δηλαδή της έντονης φόρτισης της στέψης από το υπερκείμενο έδαφος εξαιτίας της μερικής μόνο ανάπτυξης του φαινομένου του θόλου.

Στα αποτελέσματα αυτά συμβάλει και η ύπαρξη του stiff layer κάτω από τη σήραγγα. Όπως αναφέρθηκε και στο παραπάνω κεφάλαιο η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε για να περιορισθούν οι συνέπειες από την εγγενώς εσφαλμένη προσομοίωση της αποτόνωσης του εδάφους από το καταστατικό μοντέλο Mohr – Coulomb. Η θεώρηση μέτρου ελαστικότητας 10 φορές μεγαλύτερου από του πραγματικού εδάφους βασίζεται μόνο στην εμπειρία πάνω σε συναφείς γεωτεχνικές αναλύσεις, συνεπώς η ακρίβεια των αποτελεσμάτων δεν είναι εξασφαλισμένη.

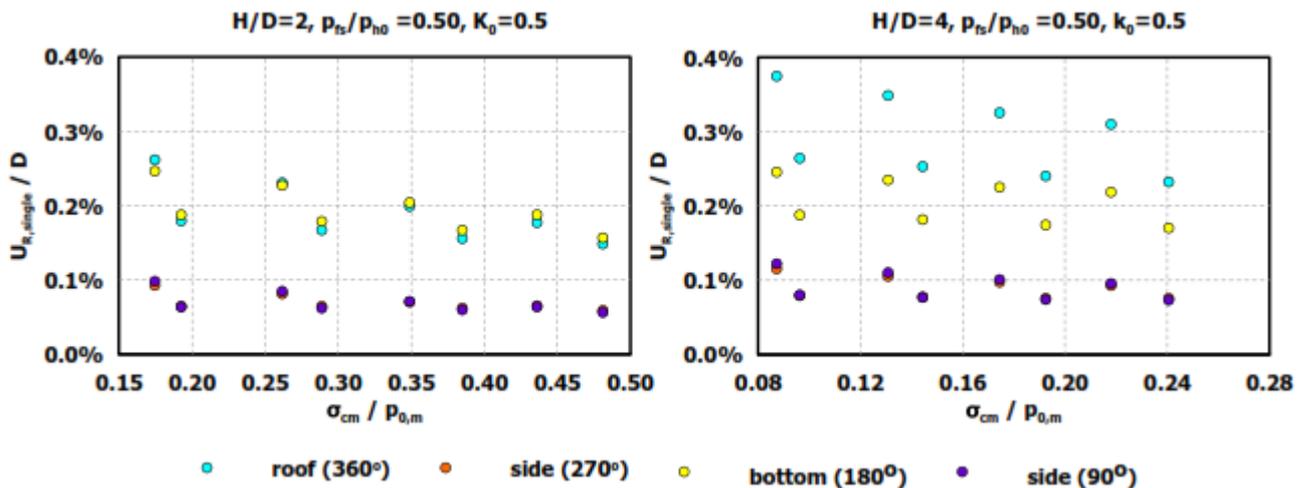
Στο μοντέλο με τη βαθιά σήραγγα ( $H/D=4$ ) παρατηρούνται μεγαλύτερες μετατοπίσεις στην άνω ημιδιατομή της σήραγγας, οι οποίες οφείλονται στο μεγαλύτερο βάρος των υπερκείμενων γεωυλικών. Αντίθετα, στην κάτω ημιδιατομή οι μετακινήσεις είναι παρόμοιες με του βασικού μοντέλου, αν και το αρχικό εντατικό πεδίο είναι σαφώς πιο ισχυρό. Η εξήγηση έχει να κάνει με την ύπαρξη του stiff layer στην ίδια απόσταση κάτω από τον

πυθμένα της σήραγγας και στα δύο μοντέλα. Λόγω του μεγάλου μέτρου ελαστικότητας, εντός του stiff layer οι μετακινήσεις είναι πρακτικά μηδενικές.

Στην περίπτωση της μειωμένης πίεσης μετώπου οι μετακινήσεις ακολουθούν την κατανομή του βασικού μοντέλου, οι τιμές τους όμως είναι εμφανώς μεγαλύτερες. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ελάττωση της πίεσης του μετώπου επιτρέπει μεγαλύτερη αποτόνωση του εδάφους, δηλαδή αυξημένες μετακινήσεις κατά το διάστημα που η σήραγγα παραμένει ανυποστήρικτη. Οι αυξημένες αυτές μετακινήσεις, σε συνδυασμό με τις ωθήσεις λόγω εντονότερης χαλάρωσης του περιβάλλοντος εδάφους, οδηγούν στην τελική κατάσταση που περιγράφηκε για την τυπική διατομή.

Για  $K_0=1.0$  η κατάσταση, όπως αναμενόταν, διαφοροποιείται αρκετά. Η μέγιστη μετακίνηση έχει σημαντικά μικρότερη τιμή σε σχέση με το βασικό μοντέλο λόγω της πιο ομοιόμορφης κατανομής των πιέσεων γύρω από τη διατομή. Μάλιστα εδώ οι δύο παρειές και η κάτω ημιδιατομή παρουσιάζουν όμοιες μετακινήσεις, ενώ η άνω ημιδιατομή δίνει μικρότερες τιμές.

Για  $K_0=1.5$  το προφίλ των μετακινήσεων είναι στραμμένο σε σχέση με το βασικό μοντέλο, όπως είναι στραμμένο και το γεωστατικό εντατικό πεδίο. Οι μέγιστες τιμές των μετακινήσεων εμφανίζονται στις παρειές της εκσκαφής, παράλληλα δηλαδή στην κύρια τάση (όπως και στο βασικό μοντέλο) ενώ στον πυθμένα η μετακίνηση είναι μηδενική. Στην οροφή η βύθιση της υποστήριξης δεν είναι μηδέν εξαιτίας του νεκρού βάρους των υπερκειμένων.



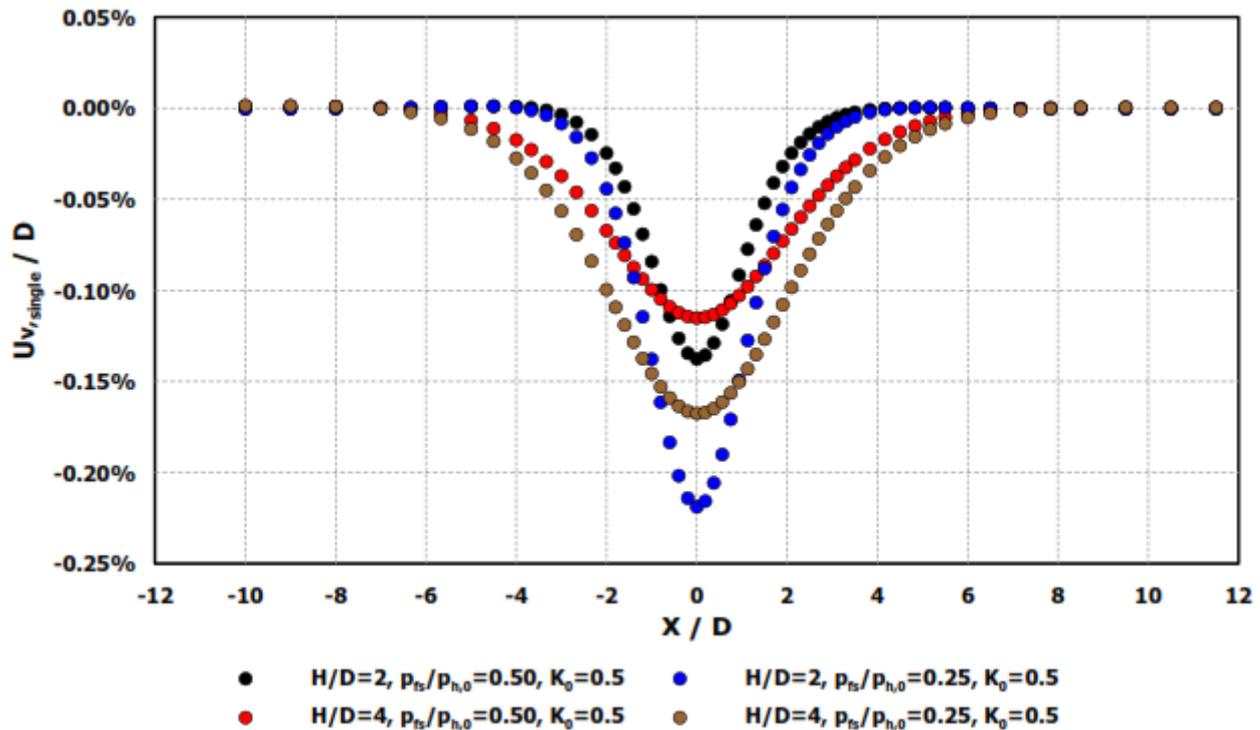
Διάγραμμα 4.8 Μεταβολή των μετακινήσεων στην περιφέρεια της μονής σήραγγας (στη στέψη, τον πυθμένα και τις παρειές) ως προς τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

Τέλος, για όλα τις περιπτώσεις παρατηρείται μείωση των μετακινήσεων καθώς βελτιώνονται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους (Διαγρ. 4.8). Αυτό οφείλεται τόσο στην μειωμένη αποτόνωση που υφίστανται τα πιο ισχυρά εδάφη, όσο και στο μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας που παρουσιάζουν.

#### 4.1.5 ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Το τελευταίο παραμορφωσιακό μέγεθος που εξετάζεται στην παρούσα εργασία είναι οι καθιζήσεις που προκαλούνται στην επιφάνεια του εδάφους από την διάνοιξη των σήραγγων. Στο Διαγρ. 4.9 παρουσιάζονται οι καθιζήσεις (κατακόρυφες μετακινήσεις) που προέκυψαν κατά την εκσκαφή για το βασικό μοντέλο, για την περίπτωση βαθιάς σήραγγας και για τις αντίστοιχες περιπτώσεις μειωμένης πίεσης μετώπου.

Όπως γίνεται φανερό από το γράφημα, οι επιφανειακές καθιζήσεις παρουσιάζουν την αναμενόμενη καμπύλη, η οποία μπορεί να προσομοιωθεί με ικανοποιητική ακρίβεια από μια



Διάγραμμα 4.9 Καμπύλες επιφανειακών καθιζήσεων πάνω από τη μονή σήραγγα και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

καμπύλη σφάλματος, της οποίας η μαθηματική έκφραση δίνεται από την γνωστή μας από τη βιβλιογραφία εξίσωση (Peck, 1969) (Εξ. 4.1):

$$s = s_{max} * \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) \quad (4.1)$$

όπου

$s$  η καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους σε σημείο το οποίο απέχει εγκάρσια απόσταση  $y$  από τον άξονα της σήραγγας,

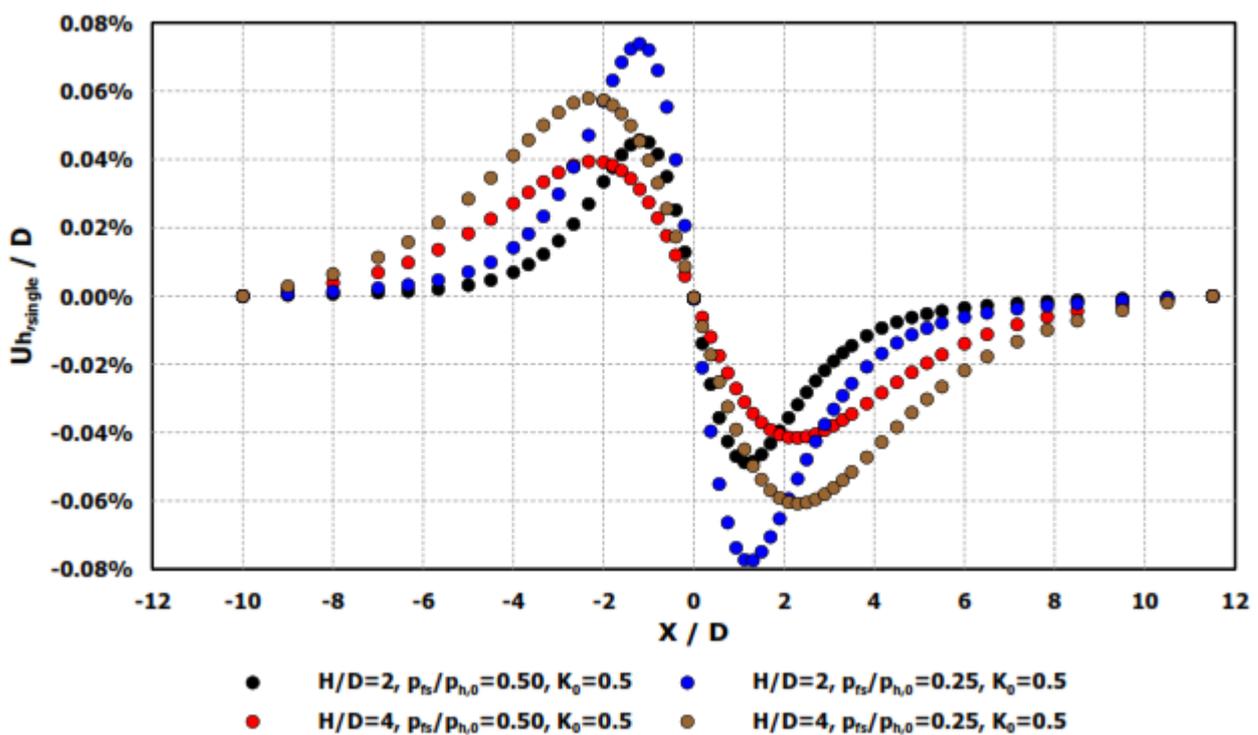
$s_{max}$  η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους η οποία προκύπτει για τη θέση  $y = 0$

$i$  η τυπική απόκλιση της καμπύλης των καθιζήσεων. Η τιμή της παραμέτρου αυτής καθορίζει ουσιαστικά το εύρος της καμπύλης και αντιστοιχεί στην θέση του σημείου καμπής.

Στην περίπτωση της βαθιάς σήραγγας παρατηρούμε μικρότερη μέγιστη καθίζηση κάτω από το κέντρο της σε σχέση με το βασικό μοντέλο. Ο όγκος του γεωυλικού που εισχωρεί εντός της διανοιγμένης διατομής είναι μεγαλύτερος στο βαθύ μοντέλο, όπως μαρτυρούν και οι μεγαλύτερες μετακινήσεις (κυρίως στη στέψη) που περιγράφηκαν στην παραπάνω ενότητα.

Συνεπώς αντίστοιχα μεγαλύτερη είναι και η απώλεια εδαφικού όγκου στην επιφάνεια του εδάφους, όπως φαίνεται και στο Διάγρ. 4.11. Όμως, η μεγαλύτερη απόσταση της σήραγγας από την επιφάνεια του εδάφους δίνει τη δυνατότητα για εξάπλωση των καθιζήσεων σε μεγαλύτερο μήκος κάθετα στον άξονα της εκσκαφής. Έτσι εξηγείται η μικρότερη τιμή της μέγιστης καθίζησης. Στον αντίποδα όμως, το μοντέλο αυτό παρουσιάζει πιο πλατιά καμπύλη καθιζήσεων και σχεδόν διπλάσια τιμή της τυπικής απόκλισης  $i$ .

Για τις προσομοιώσεις μειωμένης πίεσης μετώπου, όπως αναμένεται, παρατηρούμε σημαντικά αυξημένη τιμή της μέγιστης καθίζησης, με μικρή αύξηση του εύρους των καθιζήσεων (δηλαδή χωρίς ουσιαστική μεταβολή του σχήματος της καμπύλης). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αυξημένη αποτόνωση του εδάφους, η οποία προκαλεί μεγάλες συγκλίσεις των τοιχωμάτων της σήραγγας, όπως περιγράφηκε στις παραπάνω ενότητες.



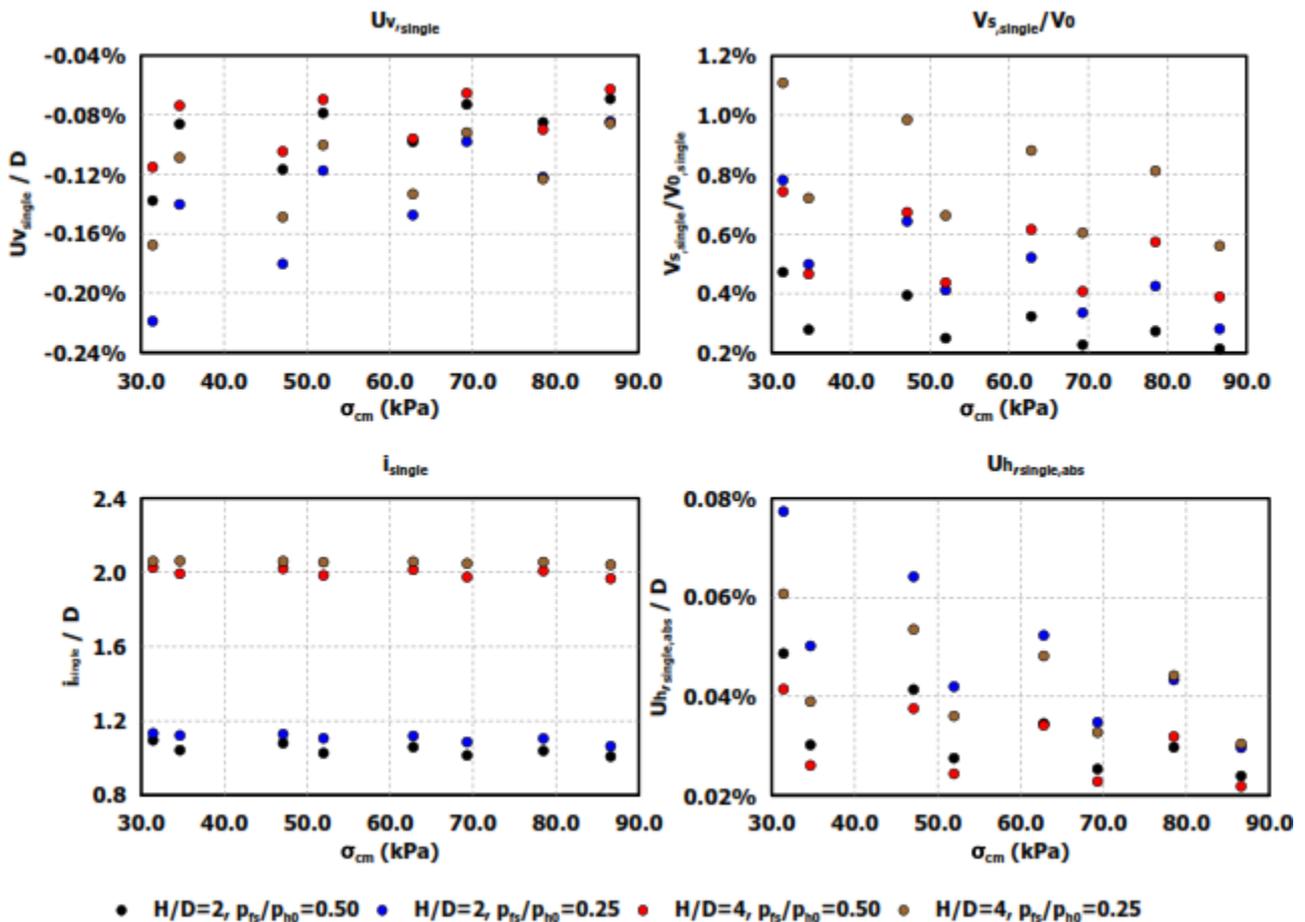
Διάγραμμα 4.10 Καμπύλες οριζόντιων επιφανειακών καθιζήσεων για την περίπτωση μονής σήραγγας και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Αντίστοιχη είναι η εικόνα και για τις οριζόντιες μετακινήσεις που προέκυψαν κατά την εκσκαφή μονής σήραγγας, όπως φαίνεται στο Διαγρ. 4.10. Η προσήμανση των μετακινήσεων είναι σύμφωνη με αυτή του κανάβου των πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή θετική τιμές υποδηλώνουν κίνηση προς τα δεξιά. Όπως ήταν αναμενόμενο οι οριζόντιες μετακινήσεις μηδενίζονται πάνω από τον άξονα της σήραγγας λόγω συμμετρίας, ενώ παρουσιάζουν τις μέγιστες τιμές σε απόσταση από τον άξονα ίση με την τυπική απόκλιση της καμπύλης καθιζήσεων  $i$ .

Όσον αφορά την επιρροή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του εδάφους, παρατηρούμε ότι όσο βελτιώνονται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού, τόσο μειώνονται τα μεγέθη των καθιζήσεων. Το γεγονός αυτό συνδέεται άμεσα με τις μειωμένες συγκλίσεις που

παρουσιάζουν οι σήραγγες εντός γεωυλικών με αυξημένα μηχανικά και παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά (αντοχή και μέτρο ελαστικότητας), όπως παρουσιάστηκε στην παραπάνω ενότητα.

Σημειώνεται ότι η απώλεια εδαφικού όγκου στην επιφάνεια του εδάφους υπολογίζεται με ολοκλήρωση των κατακόρυφων μετακινήσεων όλων των επιφανειακών κόμβων του μοντέλου κατά μήκος μιας τυπικής διατομής. Επίσης, η τυπική απόκλιση της καμπύλης των καθιζήσεων  $i$  βρίσκεται επιλύοντας την Εξ. 4.1 ως προς  $i$  για ένα πλήθος κόμβων εκατέρωθεν του άξονα της καμπύλης και υπολογίζοντας έπειτα το μέσο όρο των αποτελεσμάτων.



Διάγραμμα 4.11 Μεταβολή των χαρακτηριστικών μεγεθών των καθιζήσεων (μέγιστη κατακόρυφη και οριζόντια μετακίνηση, πλάτος καμπύλης, απώλεια εδαφικού όγκου) της μονής σήραγγας ως προς τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

## 4.2 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάσθηκαν τα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη που αναπτύσσονται κατά τη διάνοιξη μιας μονής σήραγγας εντός εδαφικού υλικού. Επίσης προσδιορίσθηκε η επιρροή των παραμέτρων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία και επισημάνθηκαν ομοιότητες και διαφορές που παρουσιάζουν οι διάφορες περιπτώσεις. Έχοντας ως βάση όλα τα παραπάνω, σε αυτή την ενότητα προχωράμε στην περιγραφή του φαινομένου της αλληλεπίδρασης δύο παράλληλων σηράγγων. Για το σκοπό αυτό θα παρουσιασθούν αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις για το βασικό μοντέλο σε όρους φορτίων, εντατικών μεγεθών και μετατοπίσεων. Στη συνέχεια θα παρατεθούν αποτελέσματα από τις υπόλοιπες περιπτώσεις, ώστε να εξετασθεί τελικά ποιοι είναι οι παράμετροι που επιδρούν σημαντικά στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των σηράγγων.

Ως μέτρο σύγκρισης της αλληλεπίδρασης χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα για τη μονή σήραγγα. Η σύγκριση γίνεται είτε με ευθεία αντιπαράθεση των εντατικών μεγεθών, είτε χρησιμοποιώντας λόγους στους οποίους αριθμητής είναι το εκάστοτε εντατικό μέγεθος και παρονομαστής το αντίστοιχο μέγεθος για τη μονή σήραγγα.

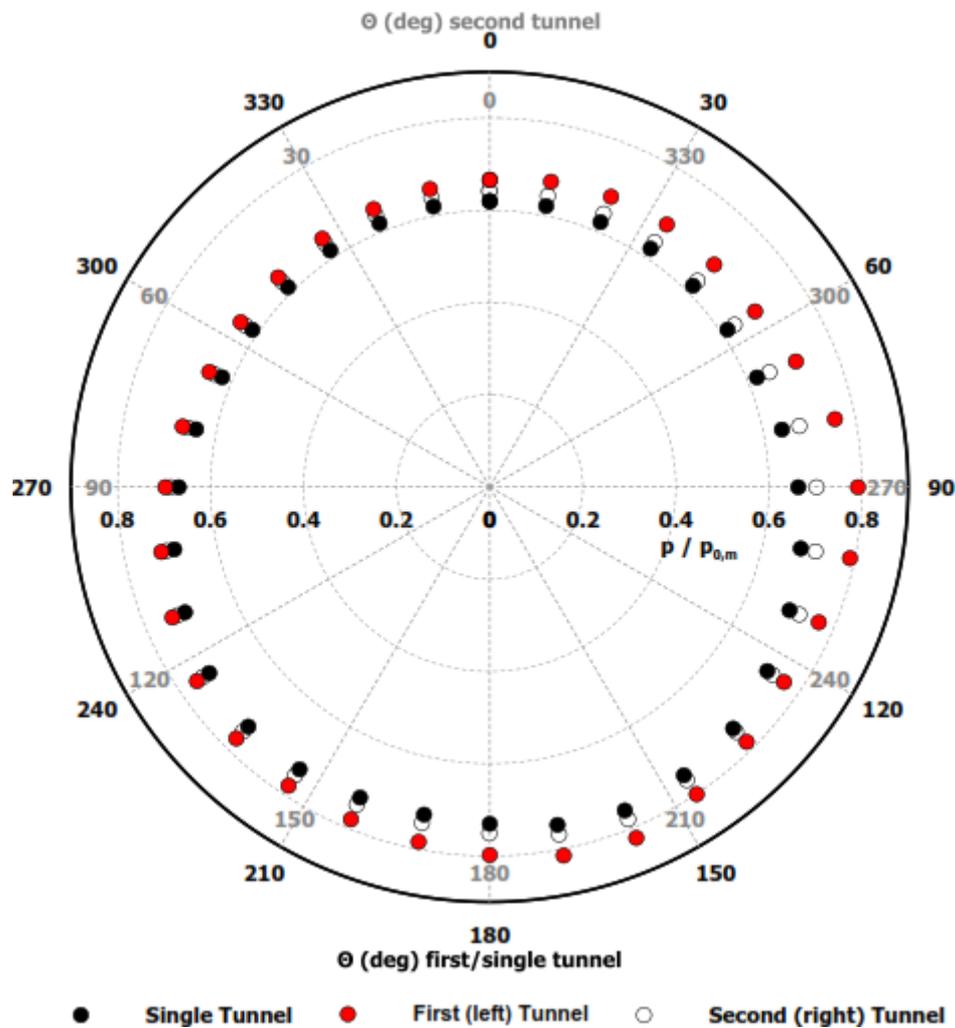
### 4.2.1 ΠΙΕΣΗ ΕΠΑΦΗΣ (ΦΟΡΤΙΟ) ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

Τα αποτελέσματα σχετικά με την πίεση επί της υποστήριξης παρουσιάζονται αρχικά για το βασικό μοντέλο ( $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $r_{fs}/r_{ho}=0.5$ , και  $F_{HD}/D=10$ ) και μάλιστα για την ανάλυση που αντιστοιχεί στα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα, η οποία δίνει και τη μέγιστη αλληλεπίδραση για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, στο κυκλικό διάγραμμα (Διαγρ. 4.12) φαίνεται η κατανομή της πίεσης στην περίμετρο της υποστηριγμένης εκσκαφής για την μονή σήραγγα, την πρώτη (προϋπάρχουσα) και την δεύτερη κατά σειρά εκσκαφής σήραγγα. Τα δεδομένα αντιστοιχούν σε μία τυπική διατομή, δηλαδή σε θέση, στην κατά μήκος διεύθυνση, όπου τα εντατικά μεγέθη έχουν συγκλίνει στην τελική τους τιμή.

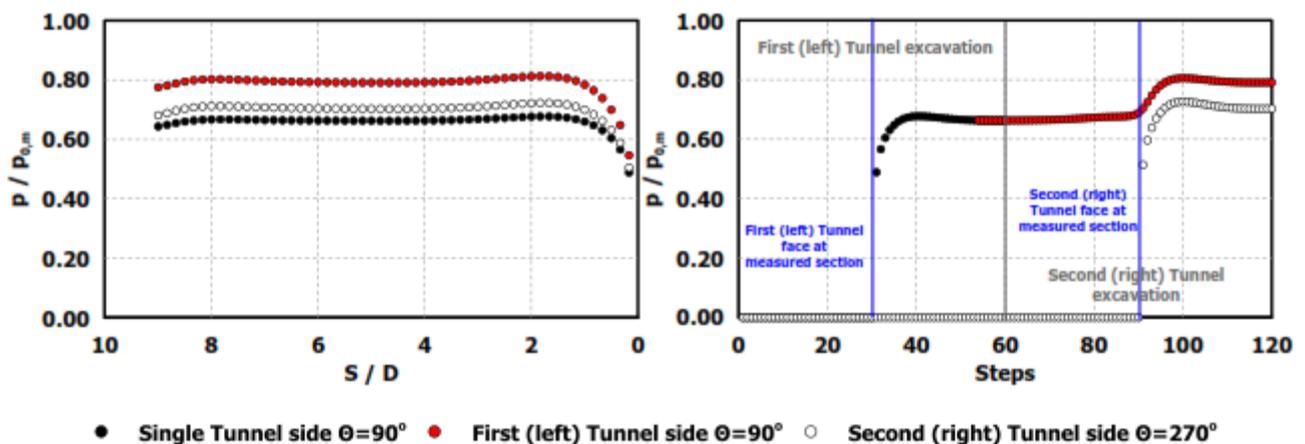
Τα αποτελέσματα δείχνουν μία αξιοσημείωτη αύξηση των πιέσεων στην πρώτη σήραγγα. Η αύξηση αυτή είναι ασύμμετρη και μεγιστοποιείται στην εσωτερική παρειά της διατομής ( $\theta=90^\circ$ ). Αντίθετα, στην δεύτερη σήραγγα η αύξηση των φορτίων είναι πολύ μικρή και γίνεται αισθητή κυρίως στην εσωτερική παρειά ( $\theta=270^\circ$ ). Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η πρώτη σήραγγα έχει ήδη εκσκαπτεί και υποστηριχθεί κατά την διάνοιξη της δεύτερης. Συνεπώς, η υποστήριξη καλείται να παραλάβει την επιπρόσθετη φόρτιση που προκύπτει από την ανακατανομή των τάσεων λόγω της δεύτερης εκσκαφής. Επίσης η άκαμπτη υποστήριξη δεν επιτρέπει την ανάπτυξη επιπλέον μετατοπίσεων προς το εσωτερικό της σήραγγας, με αποτέλεσμα όλη αυτή η πρόσθετη φόρτιση να εμφανίζεται σε όρους πίεσης.

Στον αντίποδα, η δεύτερη σήραγγα εκσκάπτεται σε ένα εντατικό πεδίο ήδη επηρεασμένο από την πρώτη σήραγγα. Ολόκληρη ή μέρος της διατομής βρίσκεται εντός της ζώνης επιρροής της πρώτης σήραγγας, όπου το έδαφος είναι χαλαρωμένο (έχει μειωμένα γεωτεχνικά

χαρακτηριστικά) και είναι πιθανή η ύπαρξη πλαστικών παραμορφώσεων. Ως αποτέλεσμα, η μικρή αυτή αύξηση των πιέσεων είναι απολύτως δικαιολογημένη, όπως και η μεγιστοποίησή της στην εσωτερική παρειά, η οποία έχει επηρεασθεί περισσότερο από την προϋπάρχουσα σήραγγα.



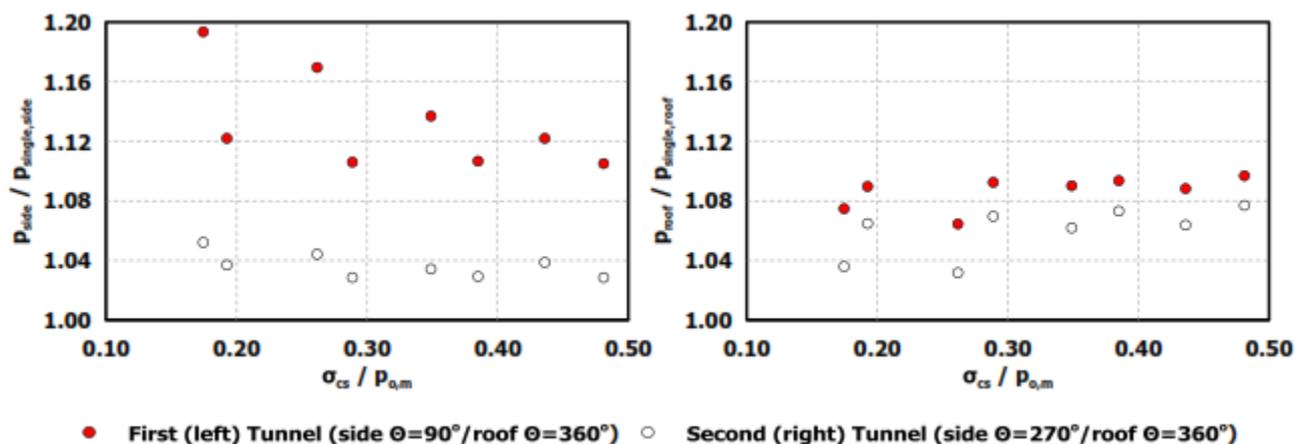
Διάγραμμα 4.12 Κατανομή της πίεσης επαφής στην επένδυση των σηράγγων. Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $\rho_f/\rho_{ho}=0.25$  και τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα.



Διάγραμμα 4.13 Αριστερά: Κατανομή της πίεσης επαφής κατά μήκος της εκσκαφής στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, Δεξιά: Γράφημα χρονοϊστορίας της πίεσης επαφής στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων. Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $\rho_f/\rho_{ho}=0.25$  και τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα.

Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και από το μηκοτομικό διάγραμμα (Διαγρ. 4.13 αριστερά) όπου παρουσιάζονται οι πιέσεις κατά μήκος της εκσκαφής στην εσωτερική παρειά ( $\Theta=90^\circ$  για την πρώτη σήραγγα και  $\Theta = 270^\circ$  για τη δεύτερη). Στο διάγραμμα αυτό, εκτός από την διαφορά των πιέσεων στις τρεις περιπτώσεις, φαίνεται η επιρροή του μετώπου ( $S/D=0$ ) και των συνοριακών συνθηκών ( $S/D=10$ ). Κοντά στο μέτωπο της εκσκαφής οι τιμές της πίεσης μειώνονται λόγω της συνεισφοράς του στην ανάληψη τάσεων στο τριδιάστατο εντατικό πεδίο. Στην άλλη άκρη του μοντέλου οι συνοριακές τιμές που εισήχθησαν κατά την κατασκευή του αριθμητικού προσομοιώματος δίνουν τιμές πίεσης που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Στο μεσαίο τμήμα, ανάμεσα στα δύο αυτά άκρα, οι τιμές είναι σταθερές και αντιστοιχούν στις τελικές τιμές πίεσης της υποστήριξης. Μέσα στο τμήμα αυτό βρίσκεται και η τυπική διατομή, από την οποία αντλείται το σύνολο σχεδόν των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία.

Η επιρροή της εκσκαφής της δεύτερης σήραγγας στην πρώτη γίνεται φανερή και από το διάγραμμα χρονοϊστορίας (Διαγρ 4.13 δεξιά). Το διάγραμμα παρουσιάζει τη μεταβολή της πίεσης σε σταθερό σημείο, και πιο συγκεκριμένα στο μέσον της εκσκαφής ( $S/D=5$ ) και αφορά τις εσωτερικές παρειές των δύο σηράγγων (όπως και το προηγούμενο διάγραμμα). Το μηχάνημα ολομέτωπης κοπής διέρχεται από την υπό εξέταση θέση στο βήμα 30, οπότε και αρχίζουν να αναπτύσσονται πιέσεις στην υποστήριξη της πρώτης σήραγγας. Στο βήμα 60 τελειώνει η εκσκαφή της πρώτης και αρχίζει η εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας, ενώ στο βήμα 90 το TBM της εν λόγω σήραγγας φτάνει στη διατομή ελέγχου. Από το γράφημα είναι εμφανές ότι κατά τη διέλευση αυτή αυξάνεται σημαντικά η πίεση στην πρώτη σήραγγα, ενώ ταυτόχρονα αρχίζει να φορτίζεται η επένδυση της δεύτερης.



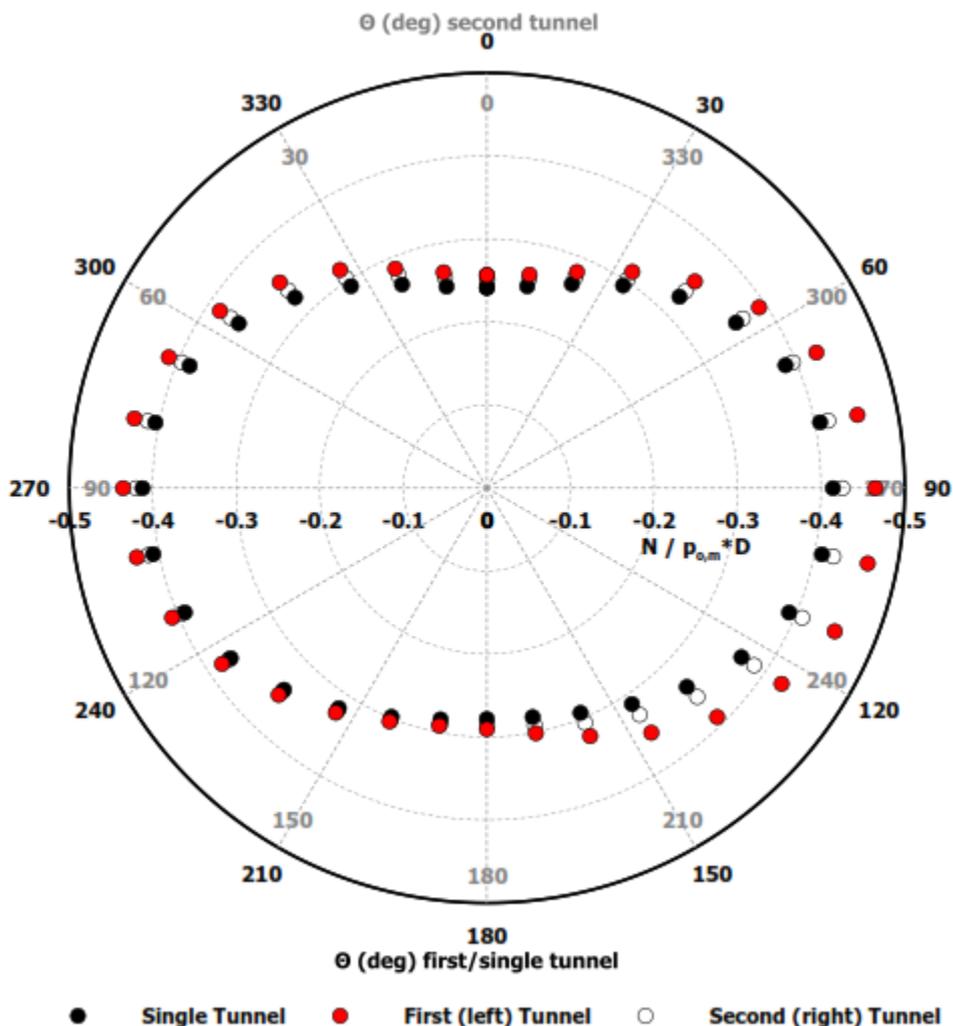
Διάγραμμα 4.14 Λόγοι αλληλεπίδρασης της πίεσης επαφής στις δύο σήραγγες για την εσωτερική παρειά (αριστερά) και για τη στέψη (δεξιά). Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $\rho_f/\rho_{ho}=0.25$  και τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα.

Επίσης στο Διάγρ. 4.14 παρουσιάζεται ένα μέτρο της αλληλεπίδρασης που υφίστανται οι δύο σήραγγες. Οι τιμές στο αριστερό διάγραμμα δίδονται ως κλάσματα της πίεσης στην εσωτερική παρειά της εκάστοτε σήραγγας προς την πίεση στο αντίστοιχο σημείο που είχε καταγραφεί στη μονή σήραγγα ( $p_{first,\theta=90deg} / p_{single,\theta=90deg}$  και  $p_{second,\theta=270deg} / p_{single,\theta=270deg}$  αντίστοιχα). Στο δεξιά γράφημα οι τιμές αφορούν την οροφή των σηράγγων. Από το γράφημα αυτό, εκτός από την εμφανώς μεγαλύτερη επίδραση που δέχεται η πρώτη σήραγγα,

φαίνεται ότι το μέτρο της αλληλεπίδρασης μειώνεται σημαντικά όσο βελτιώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Τέλος, γίνεται και εδώ εμφανές ότι η μέγιστη αλληλεπίδραση λαμβάνει χώρα στην εσωτερική παρειά των διατομών, καθώς στη στέψη το φαινόμενο είναι λιγότερο έντονο. Αντίστοιχα με τη στέψη συμπεριφέρεται και ο πυθμένας, ενώ η εξωτερική παρειά επηρεάζεται ακόμα λιγότερο.

#### 4.2.2 ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

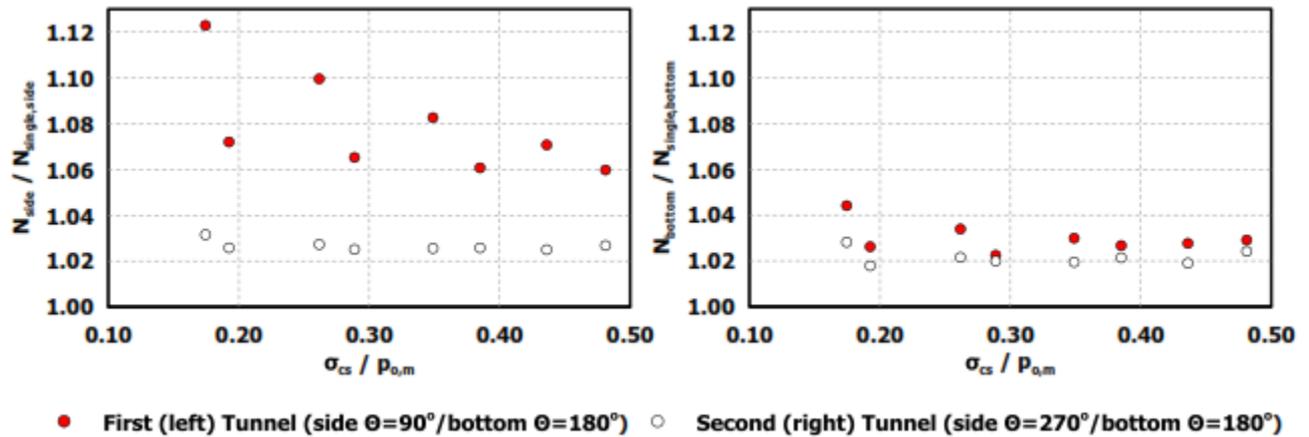
Πέρα από την αλληλεπίδραση σε επίπεδο εξωτερικών δράσεων (πιέσεων), η εκσκαφή δίδυμων σηράγγων οδηγεί και σε διαφοροποίηση των εσωτερικών εντατικών μεγεθών της υποστήριξης (δακτύλιοι προκατασκευασμένου σκυροδέματος). Η επιρροή της μίας εκσκαφής πάνω στην άλλη όσον αφορά τις αξονικές δυνάμεις παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα (Διαγρ. 4.15). Στην πρώτη σήραγγα αναπτύσσονται ελαφρώς αυξημένες τιμές σε σχέση με τη μονή, κατά κύριο λόγο στην εσωτερική της παρειά ( $\theta=90^\circ$ ). Στη δεύτερη σήραγγα, οι αξονικές δυνάμεις είναι επίσης ελαφρώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της μονής στην εσωτερική



Διάγραμμα 4.15 Κατανομή των αξονικών δυνάμεων στην επένδυση των σηράγγων. Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $p_{fs}/p_{ho}=0.25$  και τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα.

παρειά ( $\Theta=270^\circ$ ). Ακριβώς όπως και στις πιέσεις, η επίδραση που δέχεται η αριστερή (πρώτη) σήραγγα είναι σαφώς εντονότερη από τη δεύτερης. Στον πυθμένα και τη στέψη της σήραγγας η επαύξηση των τιμών εξαιτίας της αλληλεπίδρασης είναι αμελητέα.

Στο Διαγρ 4.16 παρουσιάζονται α) οι αξονικές δυνάμεις ανηγμένες ως προς τις τιμές της μονής σήραγγας για τις διάφορες περιπτώσεις γεωτεχνικών παραμέτρων και τις εσωτερικές παρειές των δύο εκσκαφών και β) το αντίστοιχο διάγραμμα για τις αξονικές δυνάμεις στον πυθμένα των διατομών. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα δύο αυτά γραφήματα είναι παρόμοια με αυτά που αναφέρθηκαν στα αντίστοιχα γραφήματα για τις πιέσεις.



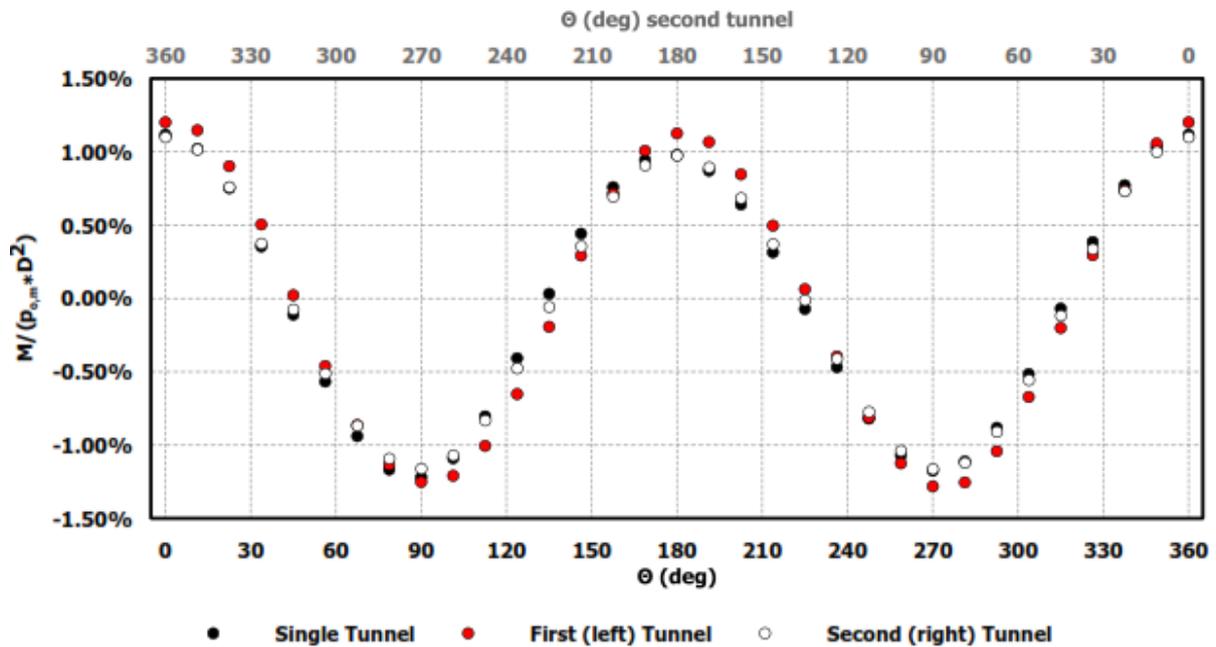
Διάγραμμα 4.16 Λόγοι αλληλεπίδρασης των αξονικών δυνάμεων στις δύο σήραγγες για την εσωτερική παρειά (αριστερά) και για τον πυθμένα (δεξιά). Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $p_f/p_{ho}=0.25$  και τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα.

### 4.2.3 ΡΟΠΕΣ ΚΑΜΨΗΣ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

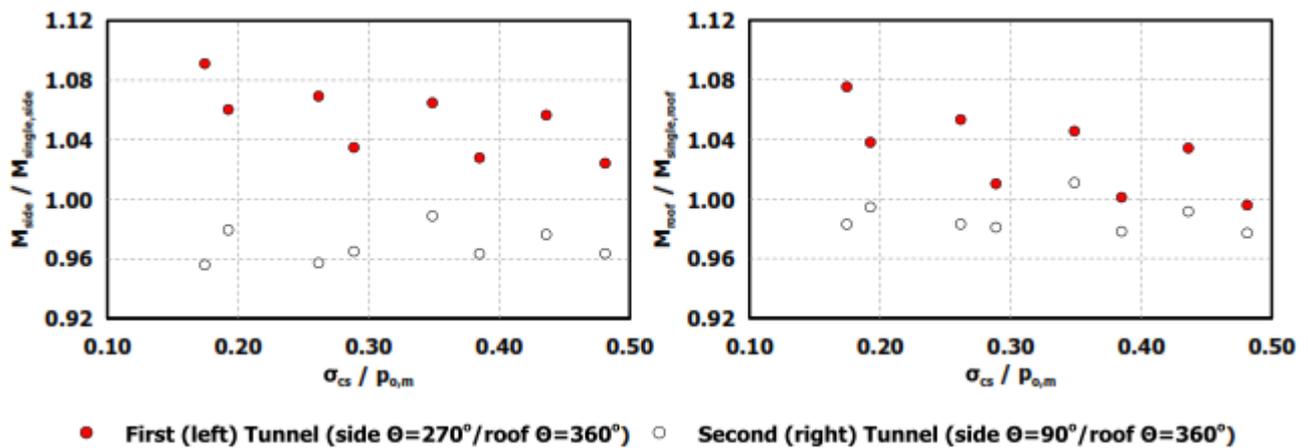
Όσον αφορά τις ροπές κάμψης, η διαφοροποίηση που παρουσιάζουν οι δίδυμες σήραγγες σε σχέση με την μονή φαίνεται στο Διάγρ. 4.17. Όπως παρατηρούμε, στην επένδυση της πρώτης σήραγγας οι ροπές αυξάνονται από τη διάνοιξη της δεύτερης. Το φαινόμενο είναι πιο έντονο κυρίως στην εξωτερική παρειά ( $\Theta=270^\circ$ ), δευτερευόντως στην στέψη και τον πυθμένα και λιγότερο στην εσωτερική παρειά ( $\Theta=90^\circ$ ). Αντιθέτως η δεύτερη σήραγγα ελάχιστα επηρεάζεται από την προϋπάρχουσα εκσκαφή. Πιο συγκεκριμένα υπάρχει η τάση για αποφόρτιση της επένδυσης από ροπές κάμψης, τάση η οποία είναι πιο έντονη στην εξωτερική παρειά ( $\Theta=90^\circ$ ). Η κατανομή αυτή της μεταβολής των ροπών και στις δύο σήραγγες έρχεται σε αντίθεση με ότι συναντήσαμε στην περίπτωση των πιέσεων και των αξονικών δυνάμεων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην στατική λειτουργία του δακτυλίου που υπόκειται σε μεταβαλλόμενη φόρτιση κατά μήκος της περιφέρειάς του.

Επίσης, στο Διαγρ. 4.18 παρουσιάζονται οι τιμές των ροπών για την τυπική διατομή ανηγμένες ως προς τις αντίστοιχες τιμές της μονής σήραγγας για όλο το εύρος των γεωτεχνικών παραμέτρων. Το αριστερά γράφημα αφορά τις εξωτερικές παρειές των δύο σήραγγων και το δεξιά τη στέψη των διατομών αυτών. Εδώ φαίνεται καθαρά η αύξηση των τιμών στην πρώτη σήραγγα λόγω της διέλευσης της δεύτερης, τη στιγμή που οι ροπές στην επένδυση της δεύτερης διατομής είναι παρόμοιες και ελαφρώς μικρότερες από της μονής

σήραγγας. Επίσης παρατηρούμε ότι η ένταση της αλληλεπίδρασης είναι παρόμοια στα δύο σημεία των σηράγγων για χαμηλές τιμές των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του εδάφους. Όσο τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού όμως βελτιώνονται, η αλληλεπίδραση στη στέψη μειώνεται με ταχύτερους ρυθμούς.



Διάγραμμα 4.17 Κατανομή των ροπών κάμψης στην επένδυση των σηράγγων. Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $\rho_{fs}/\rho_{ho}=0.25$  και τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα.

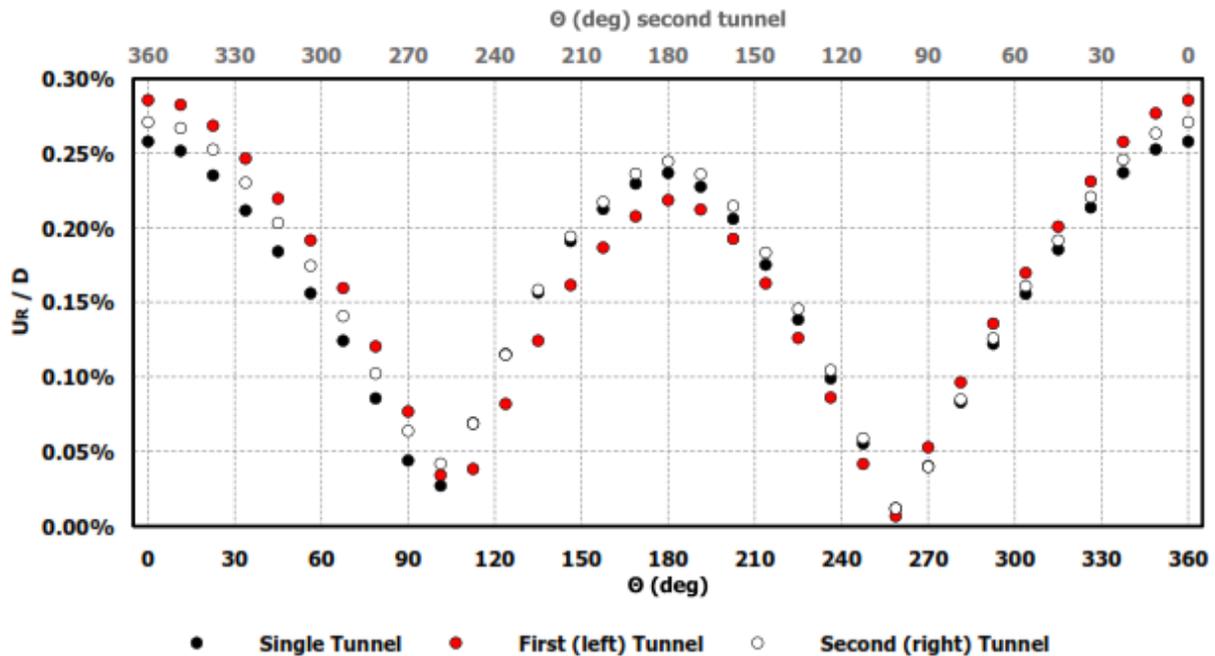


Διάγραμμα 4.18 Λόγοι αλληλεπίδρασης των ροπών κάμψης στις δύο σήραγγες για την εσωτερική παρειά (αριστερά) και για τη στέψη (δεξιά). Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $\rho_{fs}/\rho_{ho}=0.25$  και τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα.

#### 4.2.4 ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Εκτός από τα εντατικά μεγέθη, για την πλήρη απεικόνιση και κατανόηση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης εξετάζονται και τα παραμορφωσιακά μεγέθη που αφορούν την εκσκαφή μιας σήραγγας. Στο Διάγρ. 4.19 παρουσιάζεται η συνισταμένη των μετατοπίσεων, σε επίπεδο

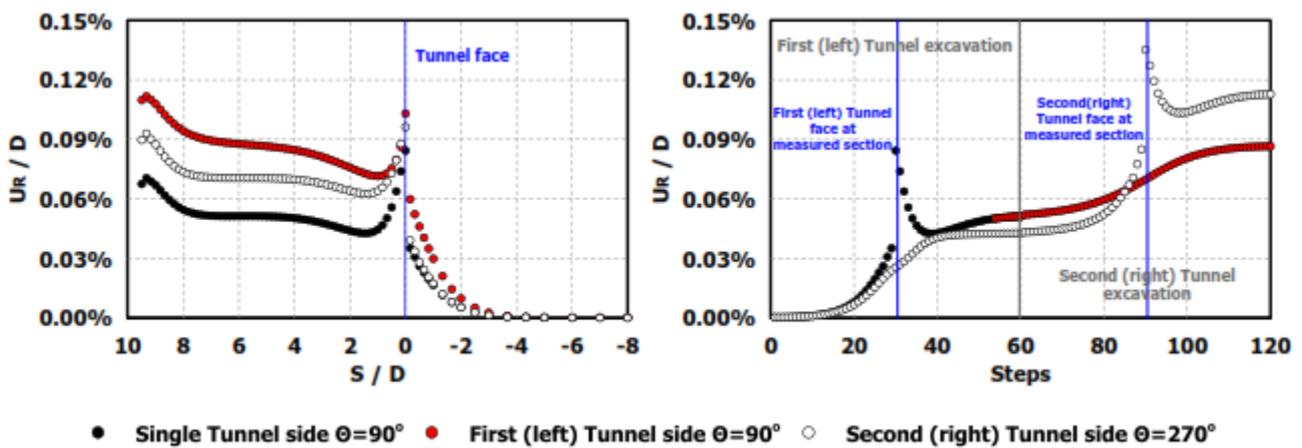
διατομής, στην επένδυση των υπό διερεύνηση σηράγγων. Όπως φαίνεται, η δεύτερη σήραγγα αυξάνει τις μετατοπίσεις στην στέψη και τις δύο παρειές της πρώτης, ενώ ταυτόχρονα προκαλεί μείωση των τιμών γύρω από τον πυθμένα. Οι επιπλέον κατακόρυφες μετακινήσεις λόγω αλληλεπίδρασης τείνουν να μετατοπίσουν προς τα κάτω ολόκληρη τη διατομή, λόγω της αυξημένης γεωστατικής πίεσης που καλείται να παραλάβει το περιβάλλον έδαφος και η επένδυση. Ομοίως, στον οριζόντιο άξονα υπάρχει η τάση για μετατόπιση προς τα αριστερά εξαιτίας της επιπρόσθετης φόρτισης του πυλώνα.



Διάγραμμα 4.19 Κατανομή των μετακινήσεων στην επένδυση των σηράγγων. Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $\rho_B/\rho_{ho}=0.25$  και τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα.

Όσον αφορά την δεύτερη σήραγγα, αυτή παρουσιάζει περιμετρικά αυξημένες τιμές μετατόπισης σε σχέση με τη μονή σήραγγα. Μάλιστα η διαφορά είναι εντονότερη στην εσωτερική παρειά και τη στέψη ( $\theta=270^\circ$  και  $\theta=360^\circ$  αντίστοιχα). Όπως είδαμε και στην περίπτωση της μονής σήραγγας, οι μετακινήσεις σε όλη την περιφέρεια της σήραγγας αυξάνονται σε εδάφη με δυσμενέστερες γεωτεχνικές παραμέτρους. Συνεπώς εδώ επιβεβαιώνεται η απλουστευτική θεώρηση ότι η δεύτερη διάνοιξη μπορεί να προσομοιωθεί ως μία μονή σήραγγα που εκσκάπτεται εντός ασθενέστερης γεωτεχνικά ζώνης. Τα φτωχότερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά στην περιοχή της δεύτερης σήραγγας προκύπτουν από την χαλάρωση και την πιθανή πλαστικοποίηση του εδάφους εξαιτίας της πρώτης εκσκαφής.

Σε σχέση με την πρώτη σήραγγα παρατηρούμε μεγαλύτερες μετατοπίσεις στο κάτω μέρος της διατομής, ενώ ελαττωμένες είναι οι τιμές στην άνω ημιδιατομή και τις παρειές. Γενικά και στις δύο σήραγγες η μεγαλύτερη τιμή του λόγου της αλληλεπίδρασης (δηλαδή της τιμής για τις δίδυμες σήραγγες προς την τιμή για την μονή) παρουσιάζεται στην εσωτερική παρειά. Όμως επειδή εκεί οι απόλυτες τιμές της μετακίνησης είναι πολύ μικρότερες, οι κρίσιμες περιοχές για το συγκεκριμένο παραμορφωσιακό μέγεθος είναι ο πυθμένας και η στέψη ( $\theta=180^\circ$  και  $\theta=360^\circ$  αντίστοιχα).

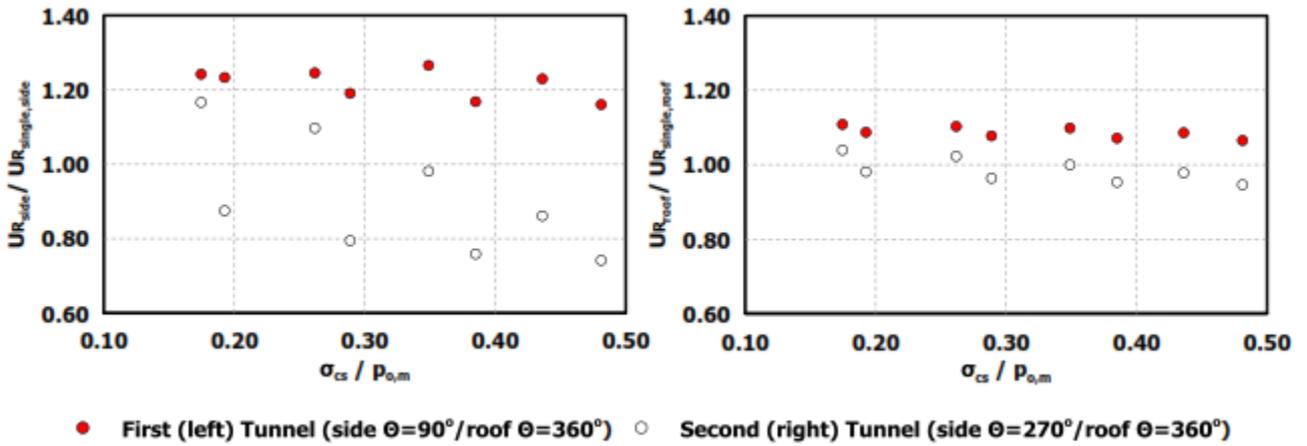


Διάγραμμα 4.20 Αριστερά: Κατανομή των μετακινήσεων κατά μήκος της εκσκαφής στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, Δεξιά: Γράφημα χρονοϊστορίας των μετακινήσεων στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων. Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $p_f/p_{ho}=0.25$  και τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα.

Στο Διαγρ. 4.20 (αριστερά) παρουσιάζεται η κατανομή της συνισταμένης μετατόπισης κατά μήκος της εκσκαφής και για τις περιπτώσεις. Οι τιμές στα αριστερά ( $S/D=8-10$ ) επηρεάζονται από τις συνοριακές συνθήκες και δεν θεωρούνται αντιπροσωπευτικές. Στη συνέχεια έχουμε ένα τμήμα όπου οι τιμές είναι πρακτικά σταθερές, πριν αρχίσουν να μειώνονται όσο πλησιάζουμε προς το μέτωπο. Εκεί, λόγω της συμβολής του εδαφικού όγκου πίσω από το μέτωπο στην ανάληψη τάσεων στο τριδιάστατο εντατικό πεδίο οι συγκλίσεις δεν έχουν αναπτυχθεί πλήρως. Ακριβώς πριν το μέτωπο ( $S/D=0$ ) παρατηρούμε μία αύξηση των μετατοπίσεων που οφείλεται στο ένα ανυποστήρικτο βήμα, σε συνδυασμό με αστάθειες των πεπερασμένων στοιχείων στην περιοχή αυτή. Πίσω από το μέτωπο οι μετακινήσεις μειώνονται με ταχύ ρυθμό μέχρι το μηδενισμό τους σε απόσταση ίση με τρεις διαμέτρους. Επίσης στο διάγραμμα αυτό είναι φανερή η επιρροή της αλληλεπίδρασης στην αύξηση των συγκλίσεων, κυρίως στην πρώτη σήραγγα, αλλά και δευτερευόντως στον δεύτερο κλάδο.

Επιπλέον, στο Διαγρ. 4.20 (δεξιά) παρουσιάζεται το γράφημα χρονοϊστορίας των μετατοπίσεων για τις εσωτερικές παρειές των δύο σηράγγων. Αρχικά, και μέχρι το Step 25 βλέπουμε τις μετατοπίσεις και στις δύο σήραγγες να αυξάνονται με παρόμοιο ρυθμό. Κατά τη διέλευση όμως του πρώτου κλάδου από τη διατομή ελέγχου προκύπτει απότομη αύξηση των συγκλίσεων στην παρειά της πρώτης σήραγγας, η οποία όμως αποτονώνεται καθώς το μέτωπο προχωράει προς τα μπροστά. Καθώς ο δεύτερος κλάδος φτάνει στη διατομή ελέγχου παρατηρείται μία μικρή αύξηση των μετακινήσεων στην πρώτη σήραγγα, αύξηση η οποία υποδηλώνει την αλληλεπίδραση που υφίσταται ο κλάδος αυτός. Ταυτόχρονα στη δεύτερη σήραγγα έχουμε απότομη αύξηση των τιμών λόγω της εκσκαφής, η οποίες επίσης επανέρχονται εν μέρη μετά την τοποθέτηση της υποστήριξης. Τέλος, και στις δύο σήραγγες οι μετατοπίσεις τείνουν να φτάσουν σε κατάσταση ηρεμίας καθώς ολοκληρώνεται η εκσκαφή και του δεύτερου κλάδου.

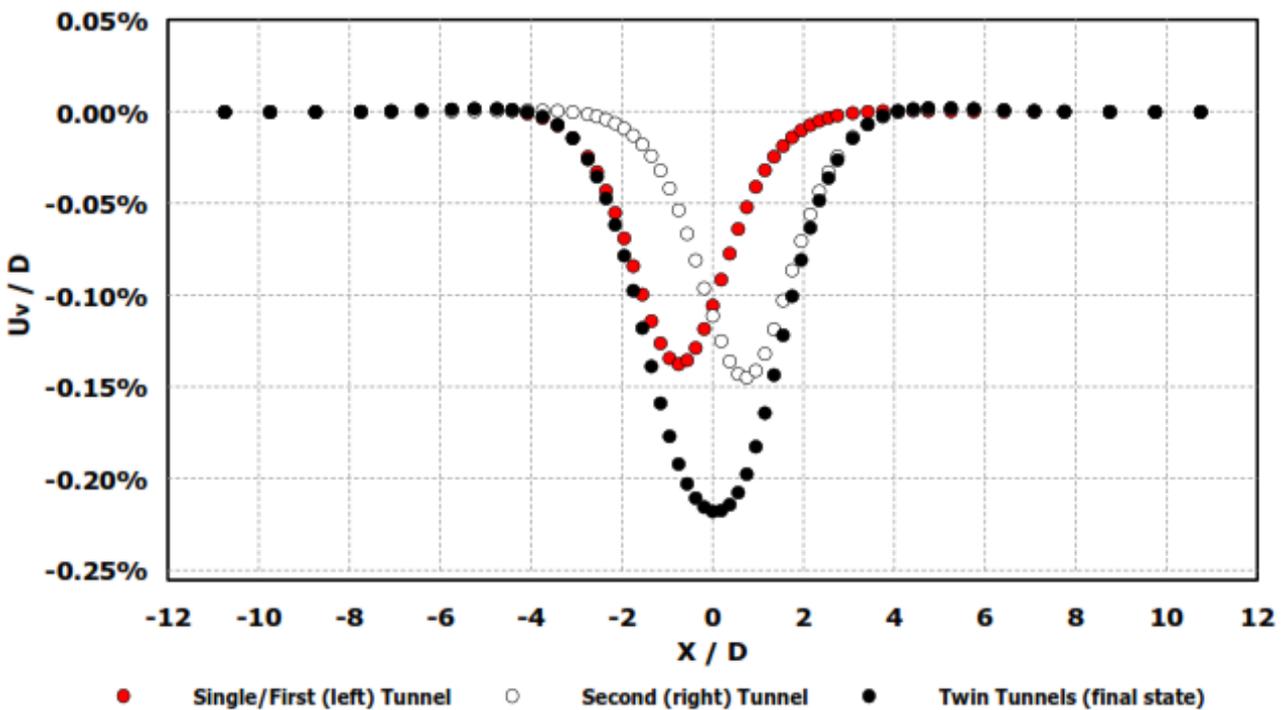
Ομοίως, η επιρροή της αλληλεπίδρασης φαίνεται και στο Διαγρ. 4.21, όπου παρουσιάζονται οι ανηγμένες ως προς την μονή σήραγγα συγκλίσεις για τις εσωτερικές παρειές και τη στέψη των δίδυμων σηράγγων. Εδώ είναι επίσης εμφανές πως καθώς βελτιώνονται τα γεωτεχνικά δεδομένα στη δεύτερη σήραγγα προκύπτουν μετατοπίσεις μικρότερες από τις αντίστοιχες για τη μονή σήραγγα.



Διάγραμμα 4.21 Λόγοι αλληλεπίδρασης των μετακινήσεων στις δύο σήραγγες για την εσωτερική παρειά (αριστερά) και για τη στέψη (δεξιά). Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $\rho_f/\rho_{ho}=0.25$  και τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα.

### 4.2.5 ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Κατά την διάνοιξη παρατηρούνται καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους στην ευρύτερη περιοχή της εκσκαφής εξαιτίας της μετακίνησης εδαφικού υλικού προς το εσωτερικό της σήραγγας. Σε περιπτώσεις αβαθών σιράγγων εντός αστικών περιοχών οι καθιζήσεις αυτές είναι ικανές να δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα στις υπερκείμενες κατασκευές (κτίρια, δρόμους, μνημεία κλπ.). Για το λόγο αυτό, σε επίπεδο μελέτης δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα

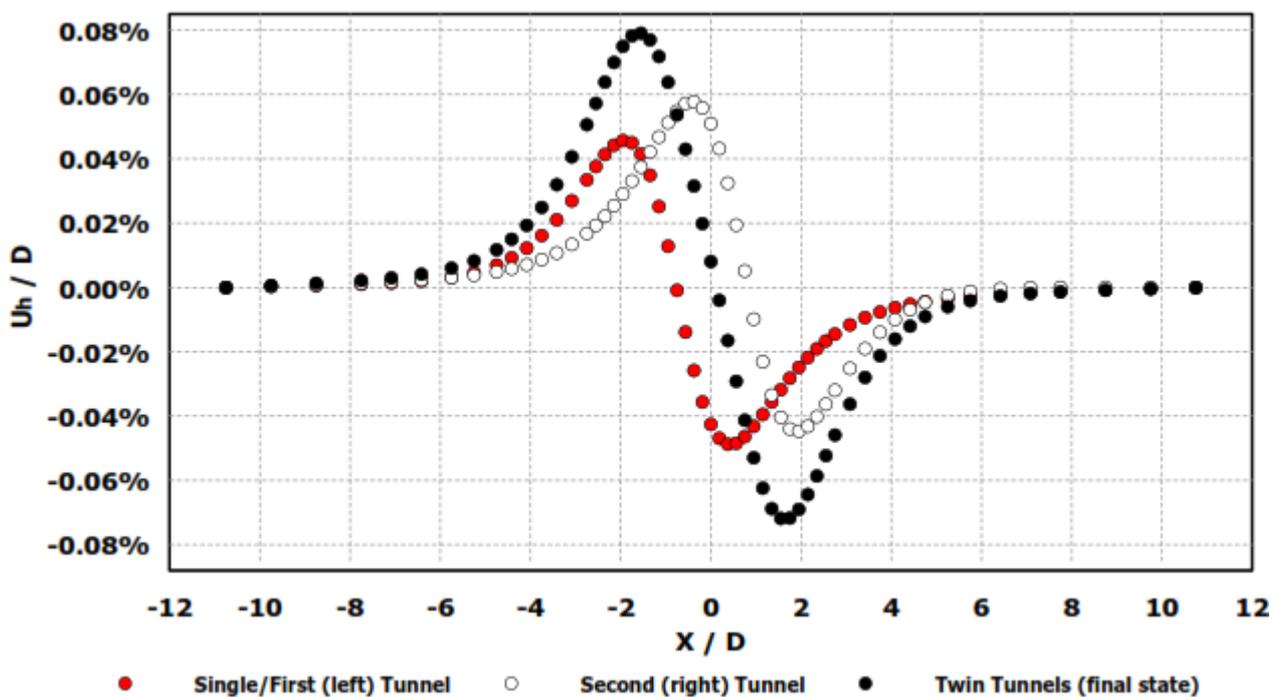


Διάγραμμα 4.22 Καμπύλες επιφανειακών καθιζήσεων. Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $\rho_f/\rho_{ho}=0.25$  και τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα.

στην πρόβλεψη των συγκεκριμένων μετακινήσεων. Στο Διαγρ. 4.22 παρουσιάζονται οι καμπύλες καθιζήσεων για την πρώτη σήραγγα (που σε αυτή την περίπτωση είναι η μονή), για την δεύτερη, και για την τελική μορφή της καμπύλης καθιζήσεων. Σημειώνεται ότι επειδή μέσω των αριθμητικών αναλύσεων είναι αδύνατο να απομονωθούν οι καθιζήσεις της δεύτερης σήραγγας, η συγκεκριμένη καμπύλη προκύπτει μέσω αφαίρεσης της πρώτης καμπύλης από την τελική.

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, οι καμπύλες της πρώτης και της δεύτερης σήραγγας έχουν παρόμοια μορφή. Παρότι οι διαφοροποιήσεις εδώ είναι αμελητέες η δεύτερη σήραγγα έχει την τάση να προκαλέσει μεγαλύτερες καθιζήσεις, γεγονός που οφείλεται στο χαλαρωμένο εδαφικό υλικό εντός του οποίου εκσκάπτεται η δεύτερη σήραγγα.

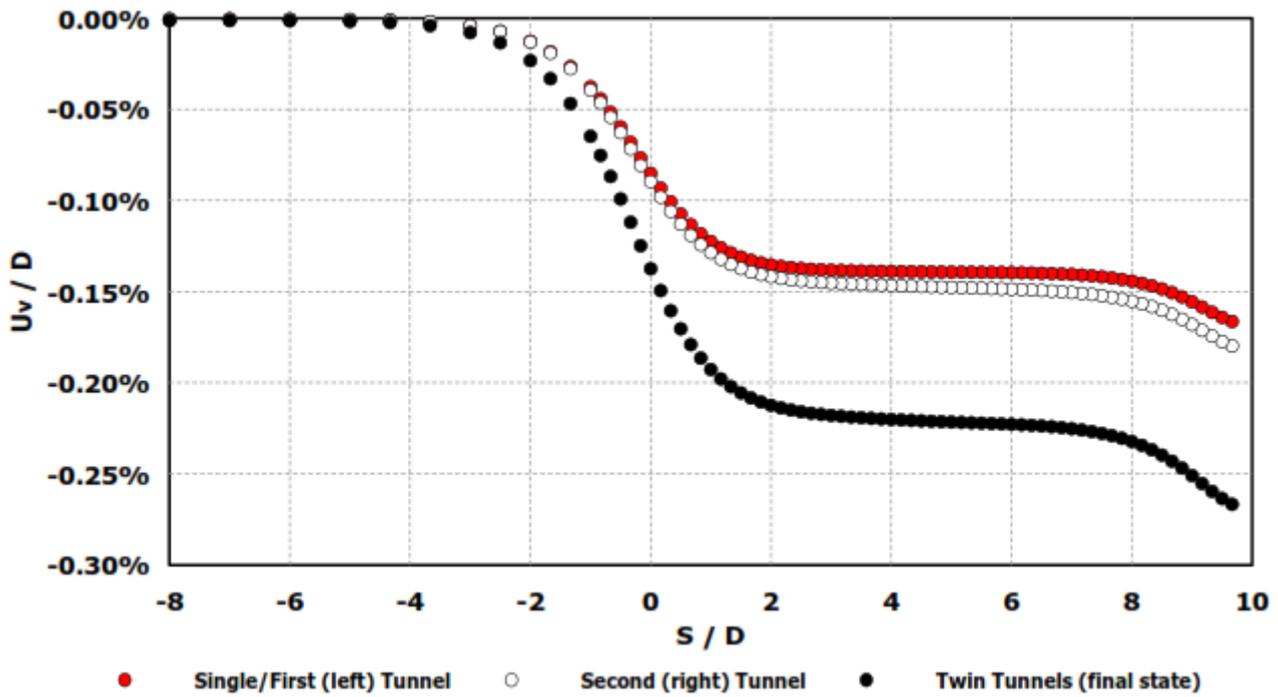
Η τελική μορφή της καμπύλης των καθιζήσεων, η οποία ουσιαστικά αποτελεί το άθροισμα των δύο προηγούμενων, παρουσιάζει, όπως αναμενόταν, αυξημένες τιμές. Σε σχέση με την πρώτη σήραγγα η μέγιστη καθίζηση είναι 1,6 φορές μεγαλύτερη και το πλάτος 1,5 φορές. Μάλιστα, η κορυφή της καμπύλης έχει την τάση να μετατοπιστεί προς τα δεξιά, δηλαδή προς τη δεύτερη σήραγγα, εξαιτίας της εντονότερης καθιζήσης που προκαλεί η συγκεκριμένη εκσκαφή.



Διάγραμμα 4.23 Καμπύλες οριζόντιων μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $\rho_f/\rho_{ho}=0.25$  και τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα.

Όσον αφορά τις οριζόντιες μετακινήσεις, αυτές έχουν φορά προς το κέντρο της εκάστοτε εκσκαπτόμενης σήραγγας. Από το Διαγρ. 4.23 για την μονή σήραγγα οι μέγιστες τιμές των μετακινήσεων δεξιά και αριστερά της σήραγγας είναι παρόμοιες, όπως άλλωστε αναμενόταν. Η μικρή διαφορά που προκύπτει οφείλεται στην ανομοιομορφία του κανάβου των πεπερασμένων στοιχείων. Ως θετική έχει ορισθεί η μετακίνηση προς τα δεξιά, όπως ακριβώς είναι δηλαδή και η προσήμανση του οριζόντιου άξονα των μοντέλων. Στην δεύτερη σήραγγα, καθώς και στην τελικώς διαμορφωμένη κατάσταση οι οριζόντιες μετακινήσεις προς τα δεξιά

είναι εντονότερες από αυτές προς τα αριστερά. Με άλλα λόγια, κυριαρχεί η εδαφική κίνηση από την υπάρχουσα σήραγγα προς την δεύτερη διάνοιξη, φαινόμενο το οποίο επίσης χρεώνεται στο χαλαρωμένο εδαφικό υλικό στην περιοχή γύρω από την αρχική εκσκαφή. Το συμπέρασμα αυτό σχετίζεται επίσης με την μετατόπιση της καμπύλης των καθιζήσεων προς τα δεξιά, όπως αυτό αναφέρθηκε παραπάνω.

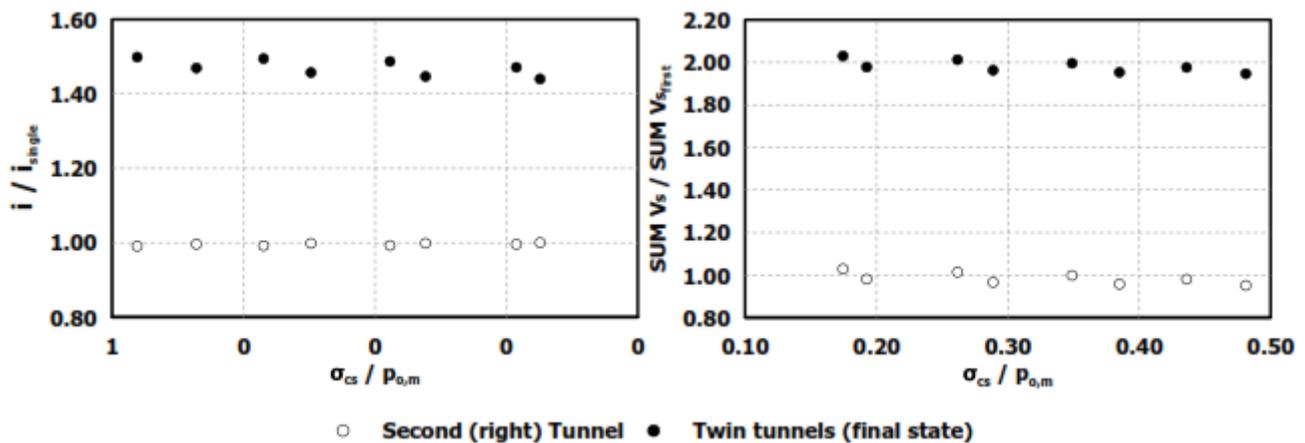


Διάγραμμα 4.24 Καμπύλες για τη μέγιστη τιμή της καθιζήσεως στην επιφάνεια του εδάφους κατά μήκος της εκσκαφής. Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $p_{fs}/p_{ho}=0.25$  και τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα.

Στο Διαγρ. 4.24 φαίνονται οι μέγιστες καθιζήσεις κατά μήκος της εκσκαφής και για τις τρεις φάσεις των δίδυμων σηράγγων. Οι αρχικές τιμές ( $S/D=8-10$ ) επηρεάζονται από τις συνοριακές συνθήκες στο άκρο του μοντέλου και δεν θεωρούνται αξιόπιστες. Στη συνέχεια οι καθιζήσεις και στις τρεις καμπύλες παρουσιάζουν σταθερές τιμές. Καθώς πλησιάζουμε προς το μέτωπο ( $S/D=0$ ) οι τιμές των μετακινήσεων μειώνονται, αφού εκεί δεν έχουν αναπτυχθεί πλήρως οι καθιζήσεις εξαιτίας της επιρροής του μετώπου. Πίσω από το μέτωπο εκσκαφής οι μετακινήσεις περιορίζονται ραγδαία, έως ότου μηδενισθούν στο σημείο όπου πλέον η διάνοιξη της σήραγγας δεν επηρεάζει την επιφάνεια του εδάφους ( $S/D=-4$ ). Και σε αυτό το γράφημα είναι εμφανείς οι ελαφρώς μεγαλύτερες καθιζήσεις κατά τη διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας σε σχέση με τη πρώτη. Στην τελική κατάσταση, οι δίδυμες σήραγγες προκαλούν σαφώς εντονότερες κατακόρυφες μετακινήσεις, που όμως σε καμία περίπτωση δεν πλησιάζουν τη διπλάσια τιμή των μονών σηράγγων.

Τέλος, στο Διαγρ. 4.25 παρουσιάζονται οι λόγοι του πλάτους της καμπύλης των καθιζήσεων και της απώλειας εδαφικού όγκου για τη δεύτερη και τις δίδυμες σήραγγες προς τα αντίστοιχα μεγέθη για τη μονή σήραγγα. Όπως φαίνεται, το πλάτος της καμπύλης παραμένει σταθερό για τον δεύτερο κλάδο ενώ αυξάνεται σημαντικά στην τελική κατάσταση. Αντίστοιχα, η απώλεια εδαφικού όγκου στη δεύτερη σήραγγα είναι παρόμοια και ελαφρώς

μικρότερη από ότι στην πρώτη. Στην τελική κατάσταση η απώλεια εδαφικού όγκου είναι διπλάσια απ' αυτή που συμβαίνει για τη μονή σήραγγα.



Διάγραμμα 4.25 Λόγοι αλληλεπίδρασης για το πλάτος της καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων και για την απώλεια εδαφικού όγκου. Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $\rho_f/\rho_{ho}=0.25$  και τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα.

Εδώ σημειώνεται ότι τα μεγέθη των καθιζήσεων που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη εργασία έχουν μικρές τιμές και δεν θα προκαλούσαν το παραμικρό πρόβλημα στην πλειοψηφία των υπέργειων κατασκευών. Σε αυτό συντελεί η πίεση στο μέτωπο, η μικρή διάμετρος των ανοιγμάτων, και η δυσκαμψία της υποστήριξης, ενώ οι τιμές θα ήταν ακόμα μικρότερες αν είχε προσομοιωθεί στο αριθμητικό μοντέλο η ασπίδα του μηχανήματος και η εισπίεση τσιμεντενέματος πίσω από την υποστήριξη.

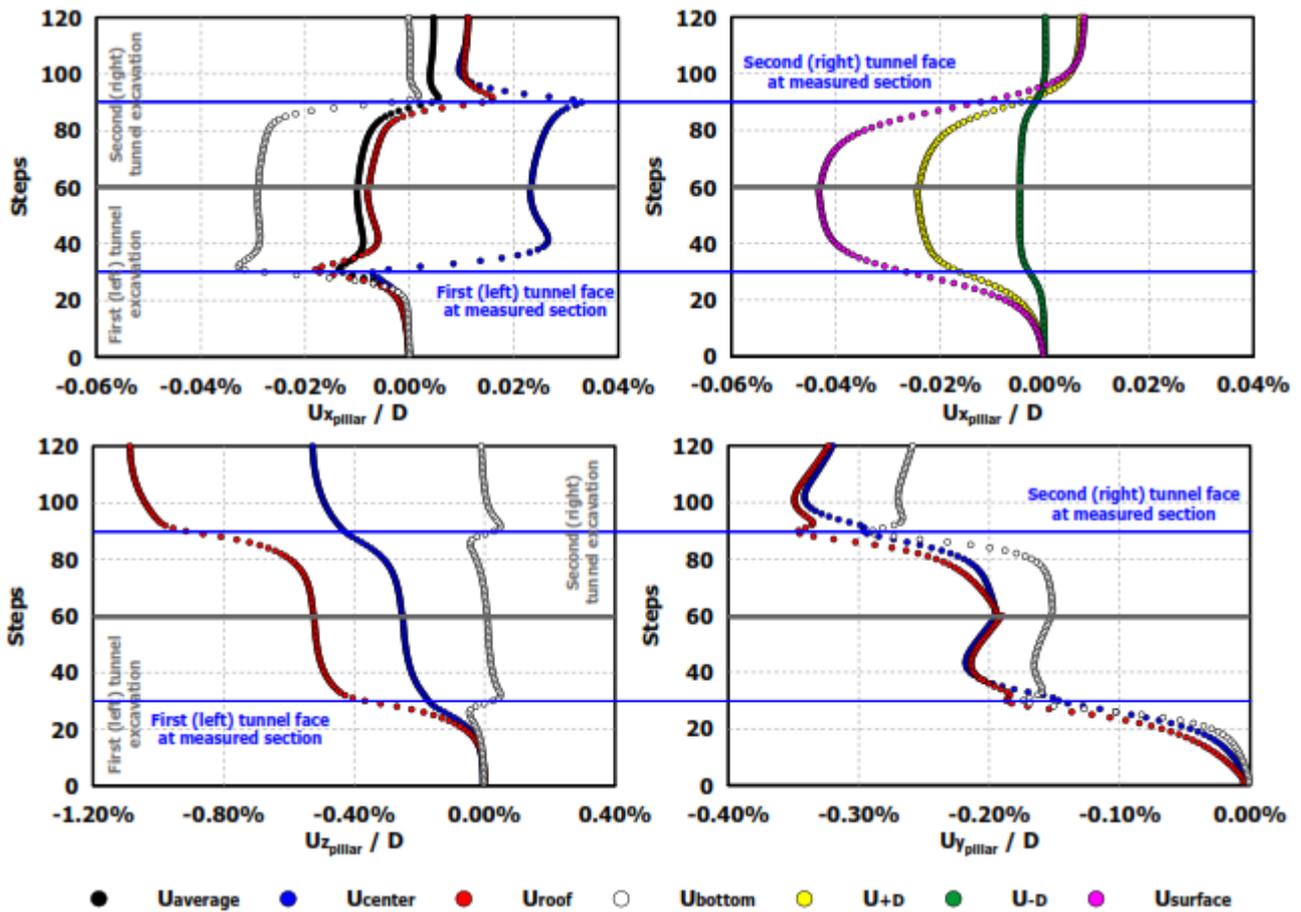
#### 4.2.6 ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΠΥΛΩΝΑ

Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε τις μετακινήσεις που συμβαίνουν σε μία κατακόρυφη στήλη εδάφους η οποία βρίσκεται στο μέσο του πυλώνα, συμπίπτει δηλαδή με τον άξονα συμμετρίας του υπόγειου έργου. Το σημείο που επιλέχθηκε να εξετασθεί βρίσκεται στο μέσο της διάνοιξης στην κατά μήκος διεύθυνση (δηλαδή σε απόσταση  $5D=30m$  από την αρχή του μοντέλου και από το τελικό μέτωπο των δίδυμων σηράγγων), έτσι ώστε να μην επηρεάζεται ούτε από συνοριακές συνθήκες, αλλά ούτε και από την αποτόνωση των τάσεων στο μέτωπο.

Το υπό εξέταση μέγεθος, στην πραγματικότητα, δεν έχει καμία εφαρμογή τόσο κατά τον σχεδιασμό όσο και κατά τη φάση υλοποίησης του έργου. Όμως σε επίπεδο διερεύνησης του φαινομένου της αλληλεπίδρασης είναι χρήσιμο καθώς μας βοηθάει να αντιληφθούμε τις μετακινήσεις που υφίσταται το έδαφος κατά τη διέλευση των δύο κλάδων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, ειδικά αν σκεφτούμε ότι ο πυλώνας είναι η πιο κρίσιμη περιοχή κατά τη διάνοιξη δίδυμων σηράγγων, μιας και είναι το εδαφικό υλικό που συνδέει και ταυτόχρονα χωρίζει τους δύο κλάδους.

Στο Διαγρ. 4.26 παρουσιάζονται σε μορφή χρονοϊστορίας οι μετακινήσεις διαφόρων σημείων καθ' ύψος του πυλώνα. Με τον όρο average ορίζεται η μέση τιμή για όλα τα σημεία του πυλώνα, με τα roof, center, bottom η οροφή, ο άξονας και ο πυθμένας των σηράγγων

αντίστοιχα, με το +D και -D τα σημεία που αντιστοιχούν μία διάμετρο πάνω από τη στέψη και μία διάμετρο κάτω από τον πυθμένα της σήραγγας, και τέλος με το surface η επιφάνεια του εδάφους.



Διάγραμμα 4.26 Διαγράμματα ιστορίας για τις μετακινήσεις στο κέντρο του πυλώνα σε διάφορα σημεία καθ' ύψος. Επάνω: Οριζόντιες μετατοπίσεις, Κάτω αριστερά: Κατακόρυφες μετακινήσεις, Κάτω δεξιά: Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά μήκος του άξονα εκσκαφής. Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $\rho_{fs}/\rho_{no}=0.25$  και τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα.

Στα δύο πάνω γραφήματα του Διαγρ. 4.26 φαίνονται οι οριζόντιες μετακινήσεις σε επίπεδο διατομής. Στην αρχή οι μετατοπίσεις είναι μηδενικές, ενώ καθώς διέρχεται η πρώτη (αριστερή) σήραγγα, η οποία φτάνει στη διατομή ελέγχου στο Step 30, το εδαφικό υλικό κινείται προς τα αριστερά, μιας και εκεί βρίσκει χώρο να αποτονωθεί. Όμως, με την εφαρμογή της δύσκαμπτης επένδυσης στο Step 31 η κατάσταση αντιστρέφεται και το έδαφος δείχνει να επανέρχεται εν μέρη προς την αρχική του θέση. Σε αυτό συντελεί και η σταδιακή απομάκρυνση του μετώπου, καθώς σε κατάσταση ισορροπίας η οριζόντια διάμετρος της διατομής είναι διεσταλμένη. Εφόσον το μέτωπο έχει προχωρήσει αρκετά ώστε να μην επηρεάζει τη διατομή ελέγχου (περίπου στο Step 40) δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις έως ότου πλησιάσει στη διατομή ο δεύτερος κλάδος (περίπου στο Step 77). Από εκείνη τη στιγμή και μέχρι την εφαρμογή της επένδυσης στη δεύτερη (δεξιά) σήραγγα παρατηρούνται σημαντικές μετακινήσεις καθ' όλο το ύψος προς τα δεξιά. Μάλιστα αυτή τη φορά το μέτρο των μετατοπίσεων είναι ελαφρώς μεγαλύτερο απ' ό τι στην προς τα αριστερά κίνηση κατά τη διέλευση του πρώτου κλάδου. Αυτό συμβαίνει επειδή το έδαφος είναι ήδη

χαλαρωμένο από την πρώτη κίνηση και επειδή ο πυλώνας πλέον δέχεται τα διπλάσια κατακόρυφα φορτία. Από την τοποθέτηση της επένδυσης και στον δεξιά κλάδο (Step 91) αρχίζει επίσης μία διαδικασία μείωσης των μετακινήσεων, ενώ καθώς το μέτωπο προχωράει οι τιμές σταθεροποιούνται. Στο τελικό στάδιο, καθ' όλο το ύψος του πυλώνα και εξαιτίας της εντονότερης κίνησης κατά τη διέλευση της δεύτερης σήραγγας, τα σημεία παρουσιάζουν μικρή μετατόπιση προς τα δεξιά.

Στο πάνω δεξιά γράφημα του Διαγρ. 4.26 τα υπό εξέταση σημεία απέχουν απόσταση τουλάχιστον ίση με μία διάμετρο από την περιφέρεια των σηράγγων. Στο γεγονός αυτό οφείλεται ότι τα σημεία αυτά δεν «αντιλαμβάνονται» με λεπτομέρεια τη διέλευση των δύο κλάδων. Όμως, η γενική μορφή της κίνησης των σημείων αυτών συμπίπτει με τις μετακινήσεις των σημείων γύρω από τις σήραγγες. Επίσης από το γράφημα αυτό φαίνεται ότι το εδαφικό υλικό πάνω από τη σήραγγα δέχεται μεγαλύτερες μετακινήσεις σε σχέση με το αντίστοιχο κάτω από τον πυθμένα της. Εδώ συντελεί και η ύπαρξη του stiff layer, καθώς το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας μειώνει σημαντικά τις μετατοπίσεις.

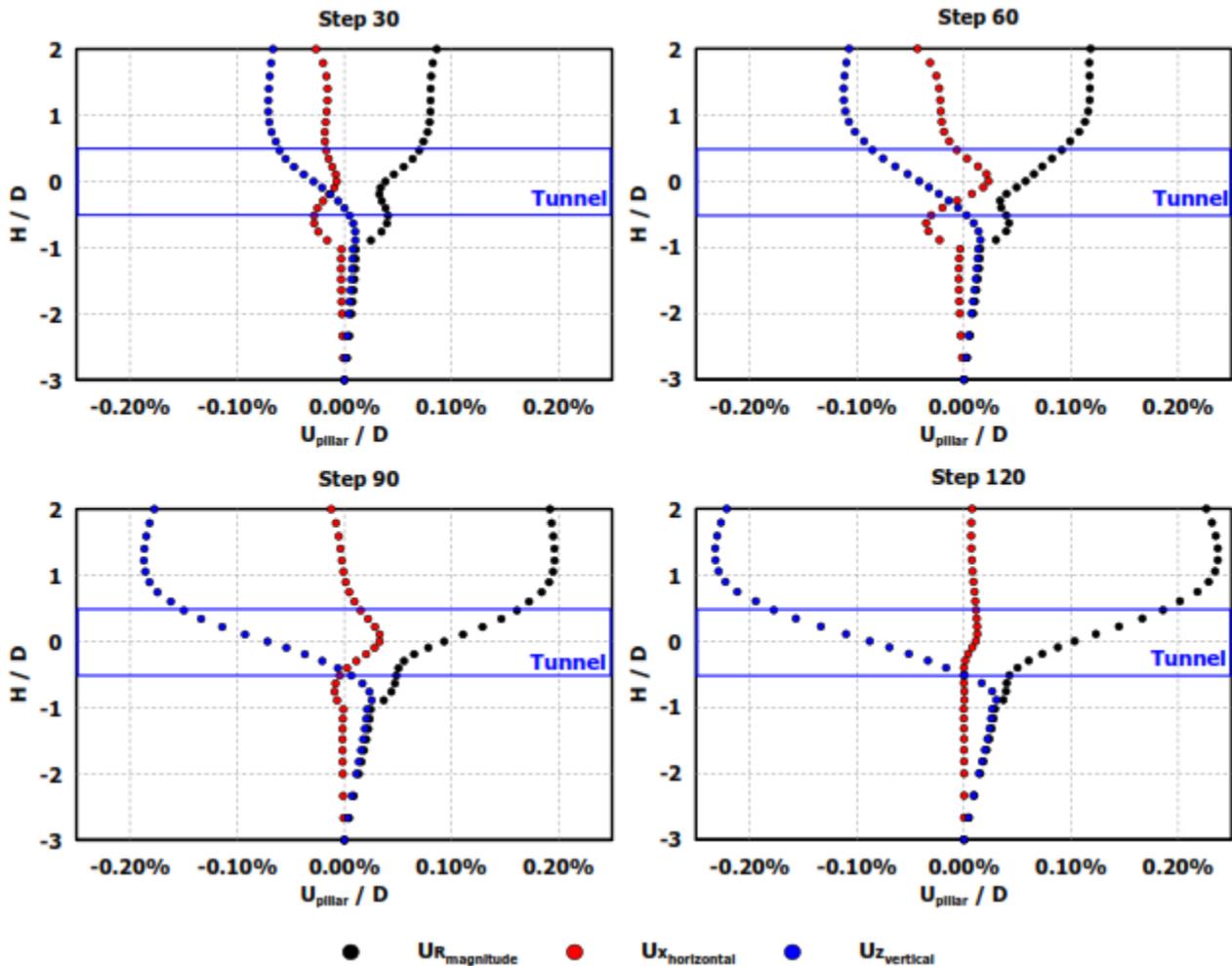
Σχετικά με τις κατακόρυφες μετακινήσεις, το Διαγρ. 4.26 (κάτω αριστερά) παρουσιάζει τη χρονοϊστορία των κινήσεων για τρία σημεία, στην οροφή των σηράγγων, στη στέψη και στο κέντρο. Όπως γίνεται αντιληπτό, κατά τη διέλευση των δύο σηράγγων το έδαφος δέχεται αρνητικές (προς τα κάτω) μετακινήσεις. Εξάιρεση αποτελεί ο πυθμένας, ο οποίος ανυψώνεται όταν οι δύο κλάδοι περνάνε από τη διατομή ελέγχου, μιας και το έδαφος βρίσκει κενό εντός της διανοιγόμενης σήραγγας να αποτονωθεί. Στα διαστήματα κατά τα οποία κανένα μέτωπο δεν είναι κοντά στη διατομή ελέγχου οι μετακινήσεις είναι πρακτικά μηδενικές.

Παρόμοια είναι η εικόνα του Διαγρ. 4.26 (κάτω δεξιά) για τις κατά μήκος μετακινήσεις (άξονας  $y$ ). Εδώ η κίνηση ξεκινάει όταν ακόμα το μέτωπο είναι πολύ μακριά (τουλάχιστον  $5D=30m$ ) και μεγιστοποιείται όταν πλησιάζει τη διατομή ελέγχου. Η κατά μήκος κίνηση είναι πάντα προς το μέτωπο, δηλαδή προς τα πίσω (αρνητική) όταν αυτό πλησιάζει και προς τα μπροστά (θετική) όταν απομακρύνεται.

Στο Διαγρ. 4.27 φαίνονται τα στιγμιότυπα των οριζόντιων, των κατακόρυφων και της συνισταμένης (της οριζόντιας και της κατακόρυφης) μετακίνησης σε επίπεδο διατομής καθ' ύψος του πυλώνα. Τα τέσσερα στιγμιότυπα που παρουσιάζονται αντιστοιχούν στην διέλευση της πρώτης σήραγγας από τη διατομή ελέγχου (Step 30), στο πέρας της εκσκαφής της πρώτης σήραγγας (Step 60), στη διέλευση της δεύτερης σήραγγας από τη διατομή ελέγχου (Step 90) και τέλος στο πέρας εκσκαφής και της δεύτερης σήραγγας (Step 120).

Όσον αφορά τις οριζόντιες μετατοπίσεις, παρατηρούμε την κίνηση προς τα αριστερά κατά τη διάνοιξη της πρώτης σήραγγας. Οι εναλλαγές που προκύπτουν εντός του περιγράμματος της διατομής οφείλονται στις συγκλίσεις των τοιχωμάτων στην εσωτερική ημιδιατομή του ανοίγματος. Μάλιστα, καθώς το μέτωπο έχει περάσει τη διατομή ελέγχου (Step 60) στο κέντρο της διατομής έχουμε θετικές μετακινήσεις, γεγονός που υποδηλώνει την αύξηση του μήκους της οριζόντιας διαμέτρου. Επίσης, κατά τη διέλευση του δεύτερου κλάδου είναι εμφανής η κίνηση προς τα δεξιά, η οποία είναι πιο έντονη στον πυθμένα και τη στέψη της σήραγγας, καθώς και στην επιφάνεια του εδάφους. Στην κατάσταση ισορροπίας (Step 120)

βλέπουμε, όπως και παραπάνω, την ελαφριά μετατόπιση των σημείων του πυλώνα προς τα δεξιά.



Διάγραμμα 4.27 Στιγμιότυπα από τις μετακινήσεις του πυλώνα καθ' όλο το ύψος του. Παρουσιάζονται οριζόντιες, κατακόρυφες μετακινήσεις και η συνισταμένη αυτών. Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $\rho_{fs}/\rho_{ho}=0.25$  και τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα.

Τέλος, όσον αφορά τις κατακόρυφες μετατοπίσεις, βλέπουμε ότι αυτές παρουσιάζουν μικρές θετικές τιμές στην περιοχή κάτω από τη σήραγγα. Καθ' ύψος της διατομής όμως αυξάνονται σημαντικά σε μέτρο, ενώ αλλάζει ταυτόχρονα και η φορά τους. Από τη στέψη της διατομής και μέχρι την επιφάνεια του εδάφους η τιμή τους παραμένει πρακτικά σταθερή. Η διακύμανσή τους κατά τη διάρκεια του έργου δείχνει διαρκή αύξηση των τιμών, ιδιαίτερα κατά το πέρασμα των δύο κλάδων από τη διατομή ελέγχου.

### 4.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιασθεί η επίδραση που έχουν οι διάφορες παράμετροι που εξετάσθηκαν στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων. Για το σκοπό αυτό παρουσιάζονται α) διαγράμματα της αλληλεπίδρασης (λόγοι της τιμής ενός μεγέθους προς την αντίστοιχη τιμή για τη μονή σήραγγα) κατά μήκος της περιμέτρου της διατομής για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και β) διαγράμματα αλληλεπίδρασης (σε όρους μέγιστης τιμής της πρώτης/δεύτερης σήραγγας προς την μέγιστη τιμή για τη μονή σήραγγα) σε συγκεκριμένες θέσεις ως προς την αντοχή του εδάφους.

#### 4.3.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΩΠΩΝ

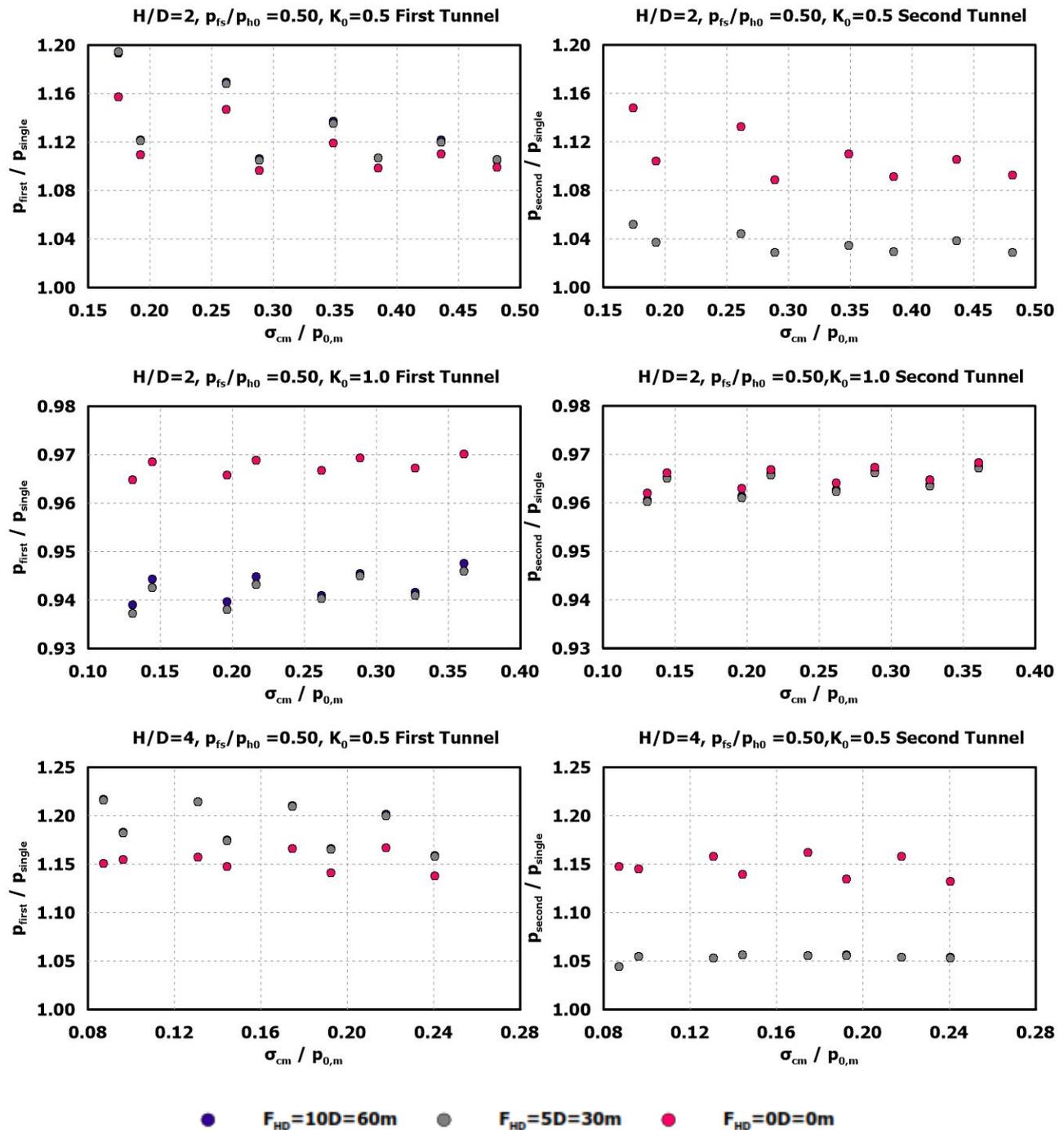
Μία από τις βασικές παραμέτρους που επιλέχθηκε να εξετασθεί ως προς την επιρροή που έχει στην αλληλεπίδραση των δίδυμων σηράγγων είναι η οριζόντια απόσταση ανάμεσα στα δύο μέτωπα εκσκαφής. Στην πράξη η απόσταση αυτή συνηθίζεται να είναι μεγάλη, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μηδενική συμμετοχή της στην αλληλεπίδραση, ενώ ταυτόχρονα διευκολύνεται η κατασκευαστική διαδικασία. Για παράδειγμα, όταν η εκσκαφή της μίας σήραγγας προηγείται της άλλης η πρώτη σήραγγα μπορεί να λειτουργεί ως πιλότος για τη δεύτερη. Επίσης όταν η απόσταση είναι μεγάλη τα δύο μηχανήματα βρίσκονται σε διαφορετική φάση κάθε στιγμή με αποτέλεσμα να εξυπηρετούνται από το ίδιο συνεργείο κατ' εναλλαγή (π.χ. συντήρηση).

Παρά ταύτα, η παράμετρος αυτή είναι σημαντική, καθώς μας επιτρέπει να γνωρίζουμε ποια είναι η ελάχιστη απόσταση των δύο μετώπων ώστε να αποφεύγεται επιπρόσθετη αλληλεπίδραση και ποιες συνέπειες για το τεχνικό μας έργο σε περίπτωση που τα δύο μέτωπα πλησιάσουν σε μικρότερη από την κρίσιμη απόσταση.

Για το σκοπό αυτό εξετάζονται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις οριζόντιας απόστασης μετώπων: α) μεγάλη απόσταση  $F_{HD}/D=10$ , μεσαία απόσταση  $F_{HD}/D=5$  και ταυτόχρονη διάνοιξη των δύο σηράγγων  $F_{HD}/D=0$ . Η διερεύνηση έχει πραγματοποιηθεί για τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις συνδυασμού βάθους και συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων ( $H/D=2 - K_0=0.5-1.0-1.5$  και  $H/D=4 - K_0=0.5$ ) ενώ για κάθε συνδυασμό εξετάσθηκε όλο το εύρος των γεωτεχνικών παραμέτρων.

##### 4.3.1.1 ΠΙΕΣΕΙΣ ΕΠΑΦΗΣ (ΦΟΡΤΙΑ) – ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ – ΡΟΠΕΣ ΚΑΜΨΗΣ

Στο Διαγρ. 4.28 παρουσιάζονται οι πιέσεις στην εσωτερική παρειά για την πρώτη και για τη δεύτερη σήραγγα, ανηγμένες ως προς της αντίστοιχες τιμές της μονής σήραγγας για τις τρεις από τις τέσσερις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Διάγραμμα 4.28 Λόγοι αλληλεπίδρασης για την πίεση επαφής, για την πρώτη (αριστερά) και τη δεύτερη (δεξιά) σήραγγα, και για τις τρεις περιπτώσεις οριζόντιας απόστασης μετώπων.

Όπως φαίνεται από όλα τα διαγράμματα οι δύο πρώτες περιπτώσεις ( $F_{HD}/D=10$ ,  $F_{HD}/D=5$ ) δεν παρουσιάζουν καμία ουσιαστική διαφορά μεταξύ τους στα αποτελέσματα. Συνεπώς μπορούμε να πούμε με ασφάλεια ότι η κρίσιμη οριζόντια απόσταση των δύο μετώπων ώστε αυτό το μέγεθος να συμβάλει στην αλληλεπίδραση των σηράγγων είναι μικρότερη από  $F_{HD}/D=5$ .

Όσον αφορά την περίπτωση ταυτόχρονης διάνοιξης ( $F_{HD}/D=0$ ) είναι φανερό ότι οι δύο κλάδοι παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, όπως και αναμενόταν. Μάλιστα, ο άξονας

συμμετρίας διέρχεται από το κέντρο του πυλώνα. Το γεγονός αυτό είναι απόλυτα λογικό αφού οι δύο σήραγγες διανοίγονται την ίδια στιγμή, με αποτέλεσμα να δέχονται η μία την αλληλεπίδραση της άλλης με τον ίδιο ακριβώς τρόπο.

Σε σύγκριση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις η πίεση επί της υποστήριξης της αριστερής (πρώτης) σήραγγας είναι μικρότερη για την ταυτόχρονη διάνοιξη. Εδώ, δεν υφίσταται κάποια προϋπάρχουσα εκσκαφή, η επένδυση της οποίας καλείται να παραλάβει το επιπλέον φορτίο που προκύπτει από την εκσκαφή της δεύτερης. Κατά την ταυτόχρονη εκσκαφή η αλληλεπίδραση οφείλεται μόνο στην επιπρόσθετη ένταση που δέχεται ο πυλώνας και στην εντονότερη διατάραξη του εδάφους από τις δύο εκσκαφές (οι ζώνες επιρροής των δύο σηράγγων επικαλύπτονται στην περιοχή γύρω από τον πυλώνα).

Όπως αναφέρθηκε σε παραπάνω εδάφιο, η εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας όταν τα μέτωπα είναι σε μεγάλη απόσταση προσομοιώνει τη διάνοιξη μονής σήραγγας εντός ασθενέστερου εδαφικού υλικού, με αποτέλεσμα τη μικρή αύξηση των πιέσεων. Αντιθέτως, στην ταυτόχρονη διάνοιξη οι δύο σήραγγες (άρα και η δεξιά) συμπεριφέρονται με ακριβώς τον ίδιο τρόπο, όπως δηλαδή περιγράφηκε στην παραπάνω παράγραφο. Το αποτέλεσμα αυτής της διαφοροποίησης είναι οι αυξημένες τάσεις που παρουσιάζονται στα διαγράμματα για την δεξιά σήραγγα στην περίπτωση της ταυτόχρονης διάνοιξης.

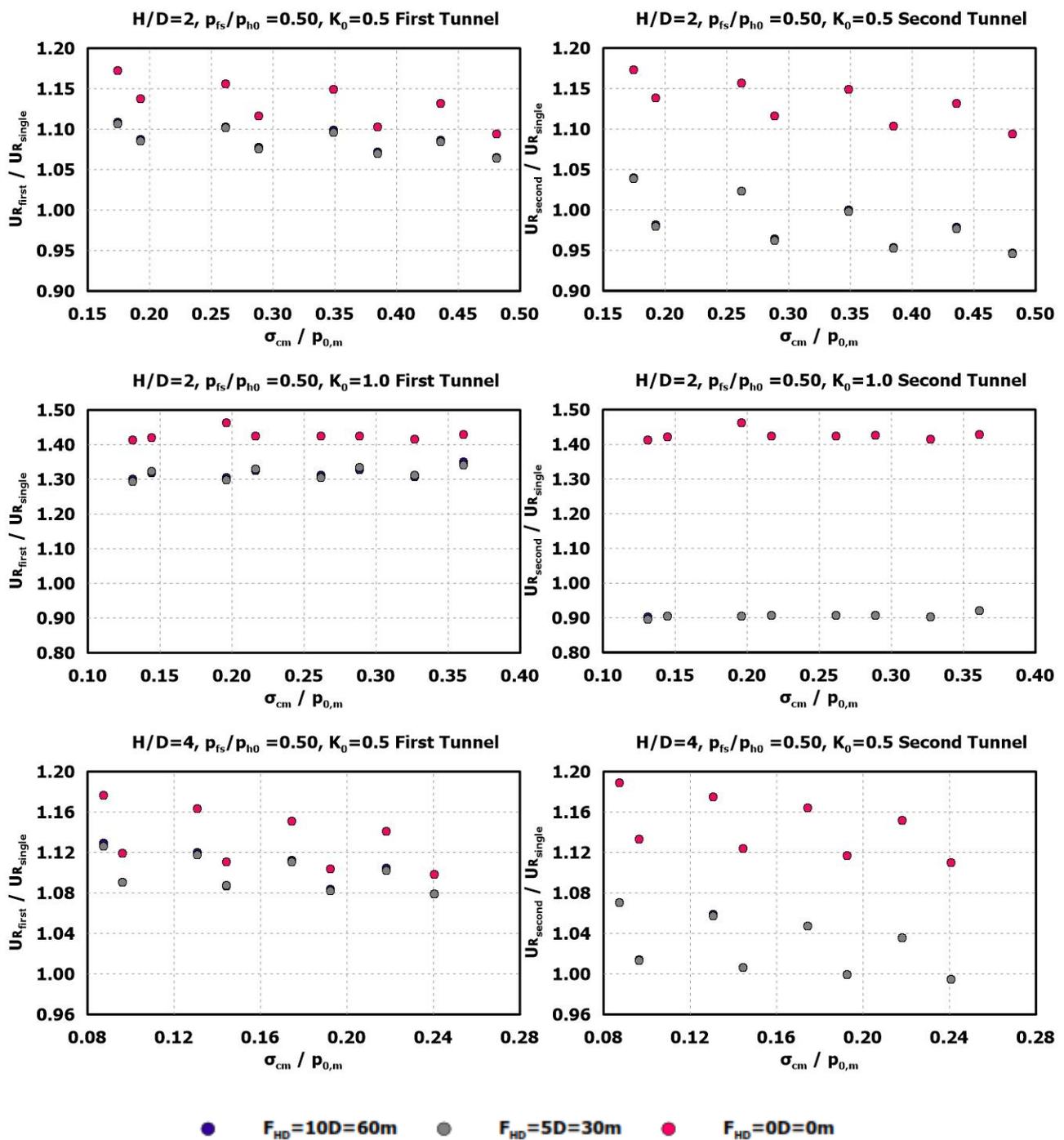
Αντίστοιχα αποτελέσματα με αυτά που παρουσιάστηκαν παραπάνω προκύπτουν και για το μοντέλο με  $H/D=2$  και  $K_0=1.5$ . Επίσης παρόμοια είναι τα συμπεράσματα από την εξέταση των αξονικών δυνάμεων και των ροπών κάμψης που αναπτύσσονται εντός της επένδυσης από σκυρόδεμα. Για το λόγο αυτό δε κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω αναφορά σε αυτά τα μεγέθη. Τέλος σημειώνεται ότι όσο βελτιώνονται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους τόσο μειώνεται η ένταση των διαφοροποιήσεων που αναλύθηκαν παραπάνω σε αυτή την ενότητα.

#### 4.3.1.2 ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Όσον αφορά τις συγκλίσεις των τοιχωμάτων της σήραγγας μετά τη διάνοιξή της, η επιρροή της κατά μήκος απόστασης των δύο μετώπων παρουσιάζεται στο Διαγρ. 4.29, όπου απεικονίζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέψη της διατομής ανηγμένες ως προς τις αντίστοιχες τιμές της μονής σήραγγας.

Από τα γραφήματα γίνεται φανερό ότι, όπως ακριβώς και στις πιέσεις, οι αποστάσεις μετώπων  $F_{HD}/D=10$  και  $F_{HD}/D=5$  δεν παρουσιάζουν διαφορά και για τις δύο σήραγγες και για όλες τις περιπτώσεις γεωτεχνικών και γεωμετρικών παραμέτρων που εξετάστηκαν.

Αντιθέτως η ταυτόχρονη διάνοιξη των σηράγγων αυξάνει σημαντικά την επιρροή της αλληλεπίδρασης και στους δύο κλάδους. Αυτό συμβαίνει διότι την ίδια στιγμή διανοίγονται δύο σήραγγες, οπότε το έδαφος δέχεται μεγαλύτερες καταπονήσεις, οι οποίες το οδηγούν με τη σειρά τους σε έντονες παραμορφώσεις προς το εσωτερικό των δύο ανοιγμάτων, ιδιαίτερα κατά το ένα βήμα εκσκαφής όπου αυτές παραμένουν ανυποστήρικτες. Έτσι εξηγούνται οι μεγαλύτερες συγκλίσεις στην πρώτη σήραγγα.



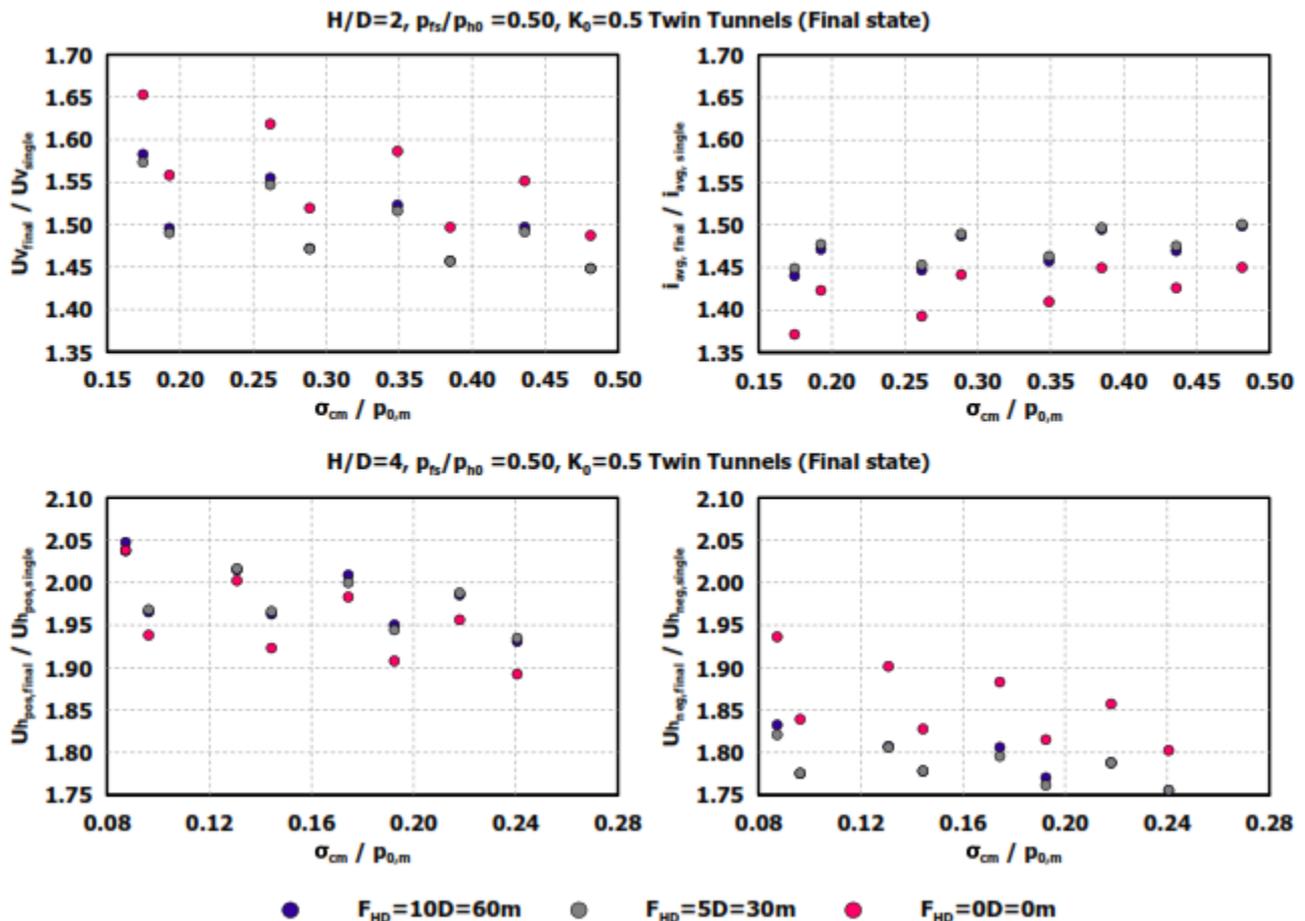
Διάγραμμα 4.29 Λόγοι αλληλεπίδρασης για τις μετακινήσεις, για την πρώτη (αριστερά) και τη δεύτερη (δεξιά) σήραγγα, και για τις τρεις περιπτώσεις οριζόντιας απόστασης μετώπων.

Λόγω συμμετρίας, παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και η δεύτερη σήραγγα κατά την ταυτόχρονη διάνοιξη ( $F_{HD}/D=0$ ). Όμως κατά τις δύο άλλες περιπτώσεις απόστασης μετώπων οι μετακινήσεις γύρω από τη δεύτερη σήραγγα διαφοροποιούνται αρκετά σε σχέση με την αριστερή (πρώτη σήραγγα), και μάλιστα όπως είδαμε σε παραπάνω κεφάλαιο είναι μικρότερες. Συνεπώς είναι λογικό εδώ η ταυτόχρονη διάνοιξη να οδηγεί σε ακόμα

μεγαλύτερες συγκλίσεις σε σχέση με τη σταδιακή διάνοιξη των δίδυμων σηράγγων. Μάλιστα η διαφορά είναι πιο έντονη για συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων  $K_0=1.0$ , όπου για  $F_{HD}/D=10$  και  $F_{HD}/D=5$  οι συγκλίσεις είναι μικρότερες της μονής σήραγγας, ενώ για  $F_{HD}/D=0$  ο λόγος  $U_{Rsecond}/U_{Rsingle}$  είναι μεγαλύτερος από το 1.40 για όλο το εύρος των γεωτεχνικών δεδομένων.

#### 4.3.1.3 ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Αντίστοιχη εικόνα με τις μετατοπίσεις παρουσιάζουν και οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.



Διάγραμμα 4.30 Λόγοι αλληλεπίδρασης για τα μεγέθη των καθιζήσεων και για τις τρεις περιπτώσεις οριζόντιας απόστασης μετώπων. Επάνω αριστερά: Κατακόρυφες μετακινήσεις, Επάνω δεξιά: Πλάτος καμπύλης καθιζήσεων, Κάτω αριστερά: Θετική οριζόντια μετακίνηση, Κάτω δεξιά: Αρνητική οριζόντια μετακίνηση.

Όπως φαίνεται και στο Διαγρ. 4.30 για τις δύο περιπτώσεις όπου το ένα μέτωπο προηγείται του δεύτερου οι μετακινήσεις πάνω από το τεχνικό έργο και κάθετα στον άξονά του είναι παρόμοιες. Όμως κατά την ταυτόχρονη διάνοιξη σηράγγων οι καθιζήσεις που προκύπτουν είναι συγκριτικά μεγαλύτερες. Το γεγονός συμπίπτει με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για τις συγκλίσεις της διατομής των σηράγγων και οφείλεται στην επιβάρυνση του πυλώνα και της γειτονικής εδαφικής μάζας από την ταυτόχρονη διάνοιξη των σηράγγων. Μάλιστα, κατά τη διαδικασία της διάνοιξης εδώ και οι δύο δίδυμες διατομές παραμένουν ανυποστήρικτες, δίδοντας έτσι τη δυνατότητα στο καταπονημένο γεωυλικό να εκτονωθεί, προκαλώντας τις αυξημένες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους. Αντίστοιχα με τις κατακόρυφες

μετακινήσεις, κατά την ταυτόχρονη διάνοιξη, αυξάνονται και οι τιμές της απώλειας εδαφικού όγκου  $V_s/V_0$ .

Στον αντίποδα, ακριβώς επειδή η διαδικασία των καθιζήσεων, κατά την ταυτόχρονη διάνοιξη, έχει ως πυρήνα τον εδαφικό πυλώνα ανάμεσα στις δύο σήραγγες, οι κατακόρυφες κινήσεις περιορίζονται σε μικρότερο εύρος πάνω από τις εκσκαφές. Το αποτέλεσμα, όπως φαίνεται και στο Διαγρ. 4.30 (επάνω δεξιά), είναι ότι η καμπύλη των καθιζήσεων στην περίπτωση αυτή έχει μικρότερο πλάτος (τυπική απόκλιση) ή σε σχέση με την διαδοχική διάνοιξη ( $F_{HD}/D=10$  και  $F_{HD}/D=5$ ).

Σχετικά με τις οριζόντιες μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους, στις περιπτώσεις διαδοχικής διάνοιξης η συμπεριφορά είναι και εδώ πανομοιότυπη. Οι κινήσεις προς τα δεξιά (θετικές) έχουν μεγαλύτερες τιμές καθώς η διάνοιξη της δεύτερης (δεξιάς) σήραγγας δημιουργεί επιπρόσθετη πίεση στο έδαφος, η οποία αποτονώνεται εντός της ίδιας της εκσκαφής, μιας και πρώτη σήραγγα έχει ήδη υποστηριχθεί μέσω της άκαμπτης επένδυσης από σκυρόδεμα (η οποία δεν είναι δεκτική σε έντονες παραμορφώσεις). Αντίθετα, η τάση λόγω της ταυτόχρονης διάνοιξης είναι η διατήρηση της συμμετρίας ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Για το λόγο αυτό στο Διαγρ. 4.30 (κάτω) για  $F_{HD}/D=0$  παρατηρούμε μικρότερες θετικές και μεγαλύτερες αρνητικές οριζόντιες μετακινήσεις στην επιφάνεια. Αντίστοιχα, στην περίπτωση αυτή η το κέντρο της καμπύλης των καθιζήσεων βρίσκεται στο μέσον του πυλώνα και δεν είναι μετατοπισμένο προς τα δεξιά όπως συμβαίνει κατά την διαδοχική διάνοιξη των δύο σηράγγων.

Τέλος, σημειώνουμε ότι και εδώ όλες οι παραπάνω διαφοροποιήσεις μειώνονται καθώς βελτιώνονται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

### 4.3.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

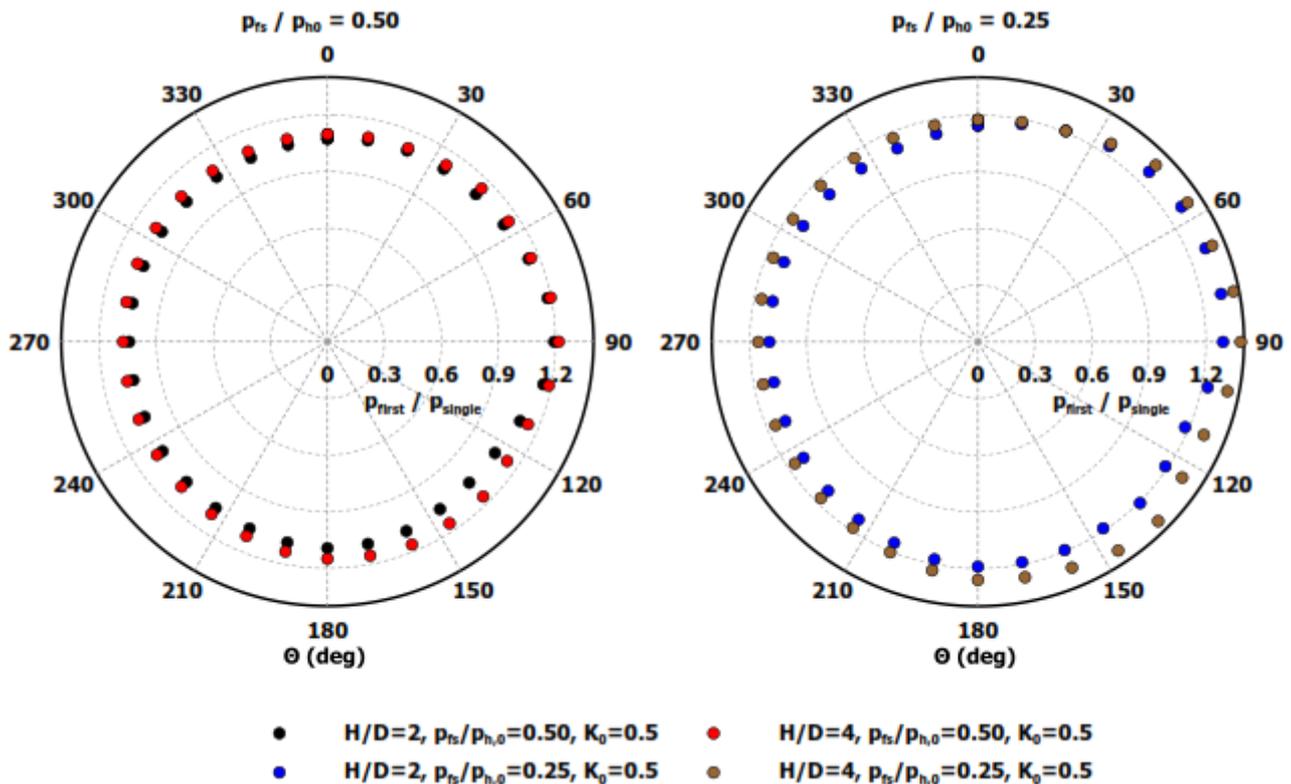
Ένα από τα σημαντικότερα γεωμετρικά στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό μιας σήραγγας είναι η απόστασή της από την επιφάνεια του εδάφους. Στο παρόν εδάφιο εξετάζεται η επιρροή του παράγοντα βάθος στην αλληλεπίδραση των δίδυμων σηράγγων. Για το σκοπό αυτό γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων από τα δύο αριθμητικά προσομοιώματα ( $H/D=2$  και  $H/D=4$ ), για τις δύο τιμές της πίεσης μετώπου ( $p_{fs}/p_{ho}=0.50$  και  $p_{fs}/p_{ho}=0.25$ ) αντίστοιχα.

Για κάθε μία από τις δύο σήραγγες (πρώτη, δεύτερη) και για κάθε ένα από τα υπό εξέταση εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη παραθέτονται κυκλικά διαγράμματα στα οποία παρουσιάζεται η κατανομή της αλληλεπίδρασης (ως η τιμή του μεγέθους προς την αντίστοιχη τιμή για τη μονή σήραγγα) κατά μήκος της περιφέρειας της σήραγγας. Επίσης δίδονται αντίστοιχα διαγράμματα αλληλεπίδρασης συναρτήσεως των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του εδάφους, στα οποία όμως η αλληλεπίδραση ορίζεται ως η μέγιστη τιμή του υπό εξέταση μεγέθους στην δίδυμη σήραγγα (πρώτη ή δεύτερη) προς την αντίστοιχα μέγιστη τιμή της μονής σήραγγας. Το μέγεθος αυτό έχει μεγαλύτερη χρησιμότητα στον

τεχνικό κόσμο, καθώς προσδιορίζει με απόλυτη σαφήνεια τις επιπρόσθετες απαιτήσεις κατά τη μελέτη και την κατασκευή δίδυμων σηράγγων.

#### 4.3.2.1 ΠΙΕΣΗ (ΦΟΡΤΙΟ) ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

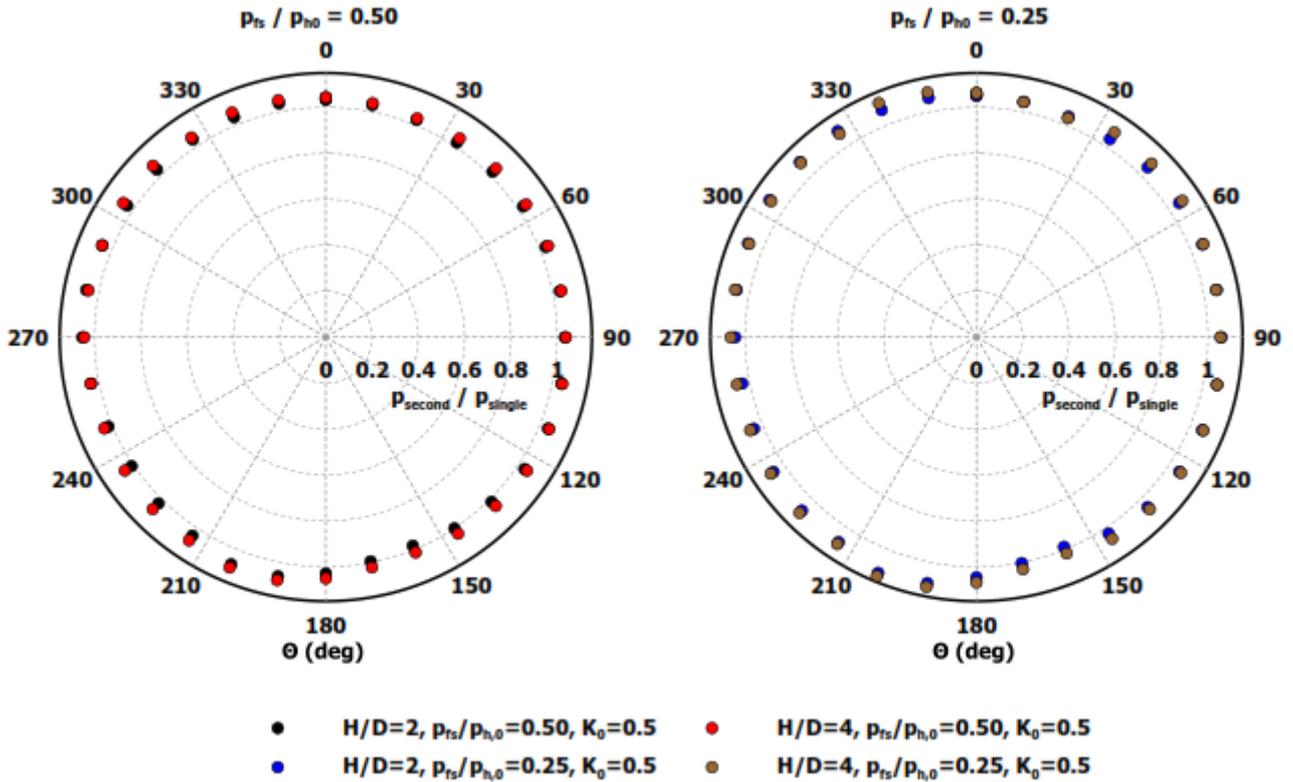
Όσον αφορά την πρώτη (αριστερή) σήραγγα (Διαγρ. 4.31), και για τα δύο ζεύγη τιμών πίεσης μετώπου, προκύπτει αυξημένο μέτρο αλληλεπίδρασης (σε όρους πίεσης υποστήριξης προς την αντίστοιχη τιμή για την μονή σήραγγα) στα μοντέλα με το μεγαλύτερο βάθος ( $H/D=4$ ). Η διαφορά είναι πιο έντονη στο διάστημα  $\theta=120^\circ - 160^\circ$ , δηλαδή ανάμεσα στη εσωτερική παρειά και τον πυθμένα της σήραγγας. Στα υπόλοιπα σημεία της περιφέρειας η διαφοροποίηση δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική. Επίσης, όπως αναμενόταν, η σύγκριση των μοντέλων με τη μικρή πίεση μετώπου δίνει πιο μεγάλες διαφορές στο μέτρο της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στα δύο βάθη σήραγγας.



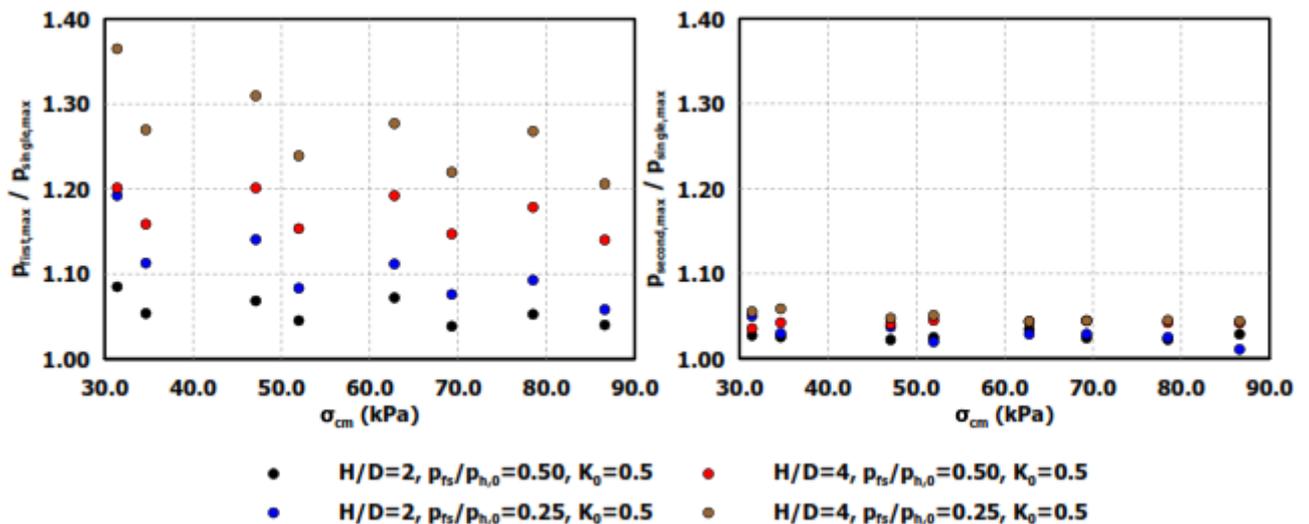
Διάγραμμα 4.31 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης της πίεσης επαφής κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της πρώτης σήραγγας ανάμεσα στα δύο βάθη εκσκαφής. Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης μετώπου και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Αντίστοιχα είναι τα συμπεράσματα και για τη δεύτερη σήραγγα (Διαγρ. 4.32). Πιο έντονη διαφοροποίηση εμφανίζεται ανάμεσα στην εσωτερική παρειά και τον πυθμένα, ενώ στην εξωτερική παρειά οι διαφορές είναι αμελητέες. Μάλιστα στο διάστημα  $\theta=270^\circ - 300^\circ$  υπάρχουν σημεία όπου η ρηχή σήραγγα παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερη αλληλεπίδραση.

Ομοίως, από τα γραφήματα για τη μεταβολή των μέγιστων τιμών (Διαγρ. 4.33) βλέπουμε ότι, ανεξαρτήτως κλάδου, μεγαλύτερη αλληλεπίδραση υφίστανται οι πιο βαθιές σήραγγες ( $H/D=4$ ) και μάλιστα η διαφορά είναι εντονότερη όταν μειώνεται η πίεση που ασκείται στο μέτωπο.



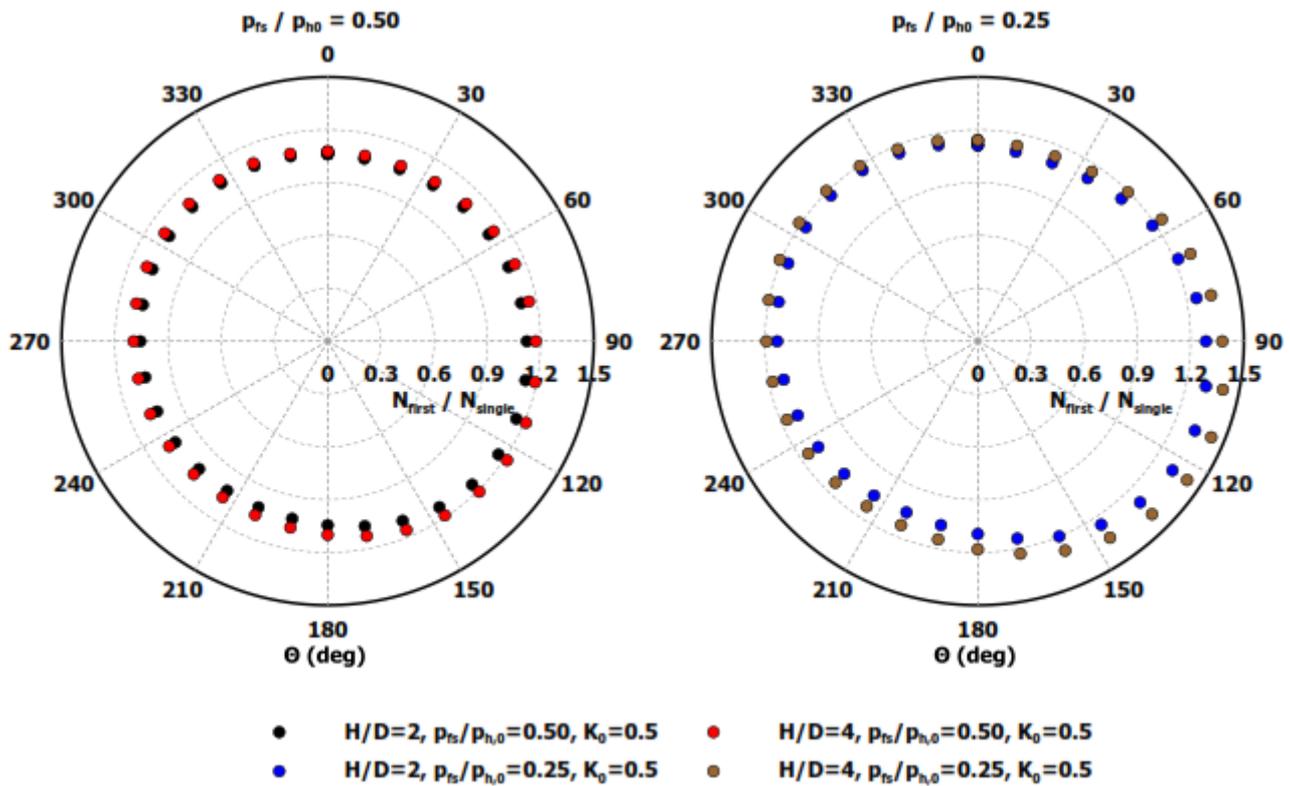
Διάγραμμα 4.32 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης της πίεσης επαφής κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της δεύτερης σήραγγας ανάμεσα στα δύο βάθη εκσκαφής. Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης μετώπου και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.



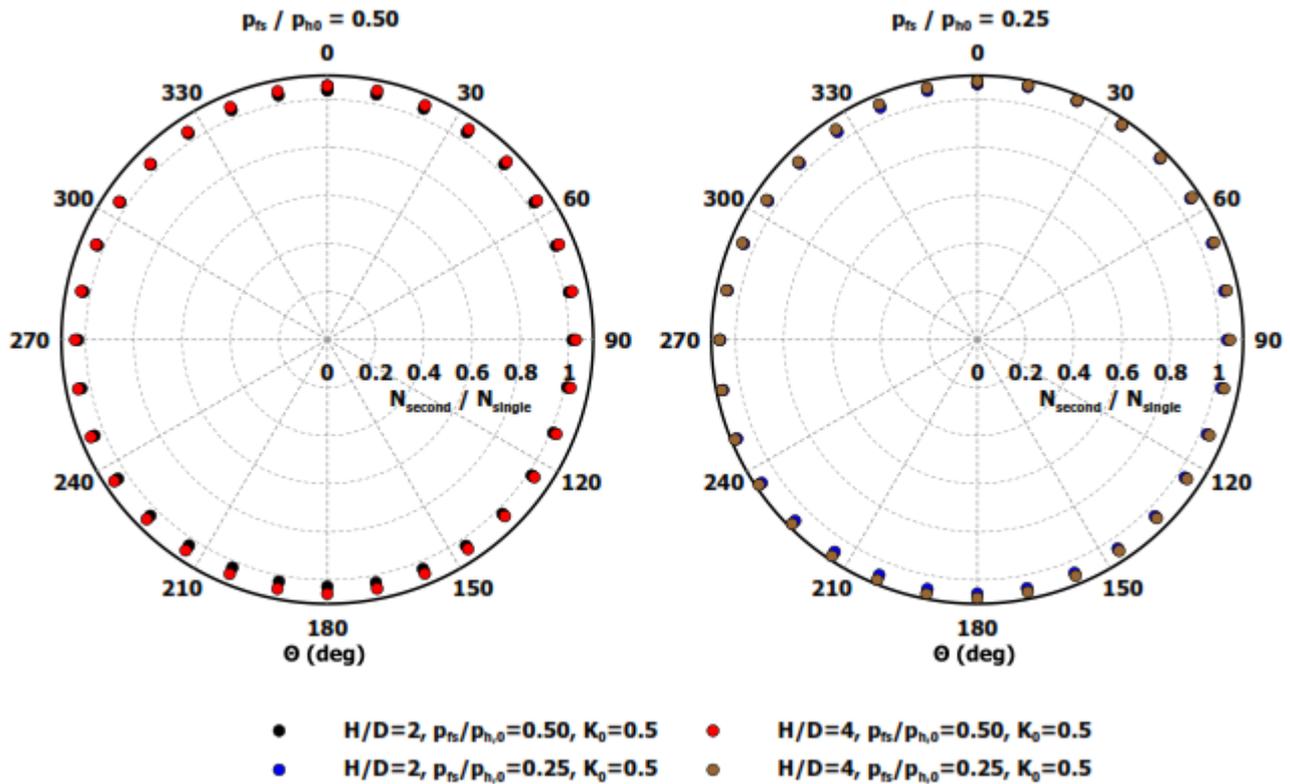
Διάγραμμα 4.33 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης της πίεσης επαφής (σε όρους μέγιστων τιμών) για την πρώτη (αριστερά) και τη δεύτερη (δεξιά) σήραγγα ανάμεσα στα δύο βάθη εκσκαφής και για δύο τιμές της πίεσης στο μέτωπο.

#### 4.3.2.2 ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

Κατά τη σύγκριση των αξονικών δυνάμεων για την αριστερή, πρώτη, σήραγγα (Διαγρ. 4.34) τα αποτελέσματα είναι απολύτως αντίστοιχα με αυτά για τις πιέσεις επί της υποστήριξης.



Διάγραμμα 4.34 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της πρώτης σήραγγας ανάμεσα στα δύο βάθη εκσκαφής. Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης μετώπου και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

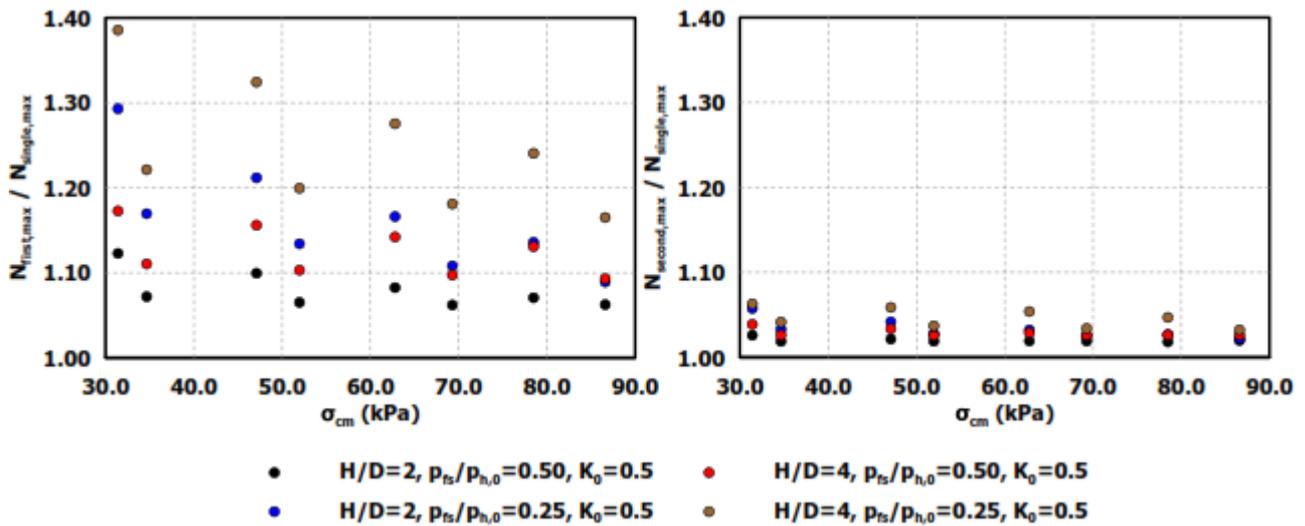


Διάγραμμα 4.35 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της δεύτερης σήραγγας ανάμεσα στα δύο βάθη εκσκαφής. Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης μετώπου και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Δηλαδή και εδώ το μοντέλο με  $H/D=4$  δίνει μεγαλύτερη αλληλεπίδραση, ενώ η διαφορά είναι πιο έντονη για  $p_{Ts}/p_{No}=0.25$ . Επίσης, παρόμοια είναι τα μέτρα της αλληλεπίδρασης και το διάστημα όπου η διαφοροποίηση είναι πιο έντονη.

Στη δεύτερη σήραγγα (Διαγρ. 4.35) οι διαφορές είναι πολύ μικρότερες και εντοπίζονται κυρίως στον πυθμένα και δευτερευόντως στην στέψη, πάντα προς την πλευρά της εσωτερικής παρειάς. Το μέτρο της αλληλεπίδρασης είναι στα ίδια επίπεδα με το αντίστοιχο των πιέσεων.

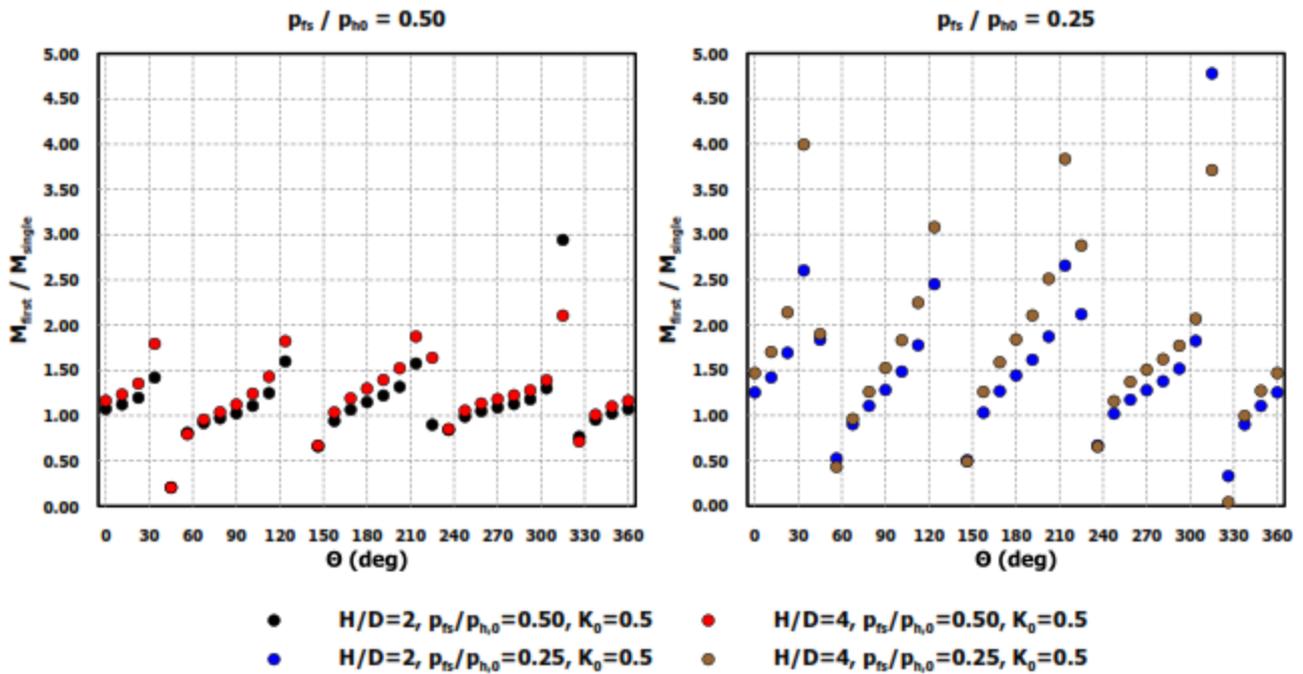
Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και από το (Διαγρ. 4.36) σχετικά με την αλληλεπίδραση σε όρους μέγιστων τιμών. Μεγαλύτερη αύξηση των αξονικών δυνάμεων και στις δύο σήραγγες έχουμε για το μεγαλύτερο ύψος υπερκειμένων. Η μείωση της πίεσης στο μέτωπο αυξάνει αυτή τη διαφορά, όμως η βελτίωση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών την εξομαλύνει.



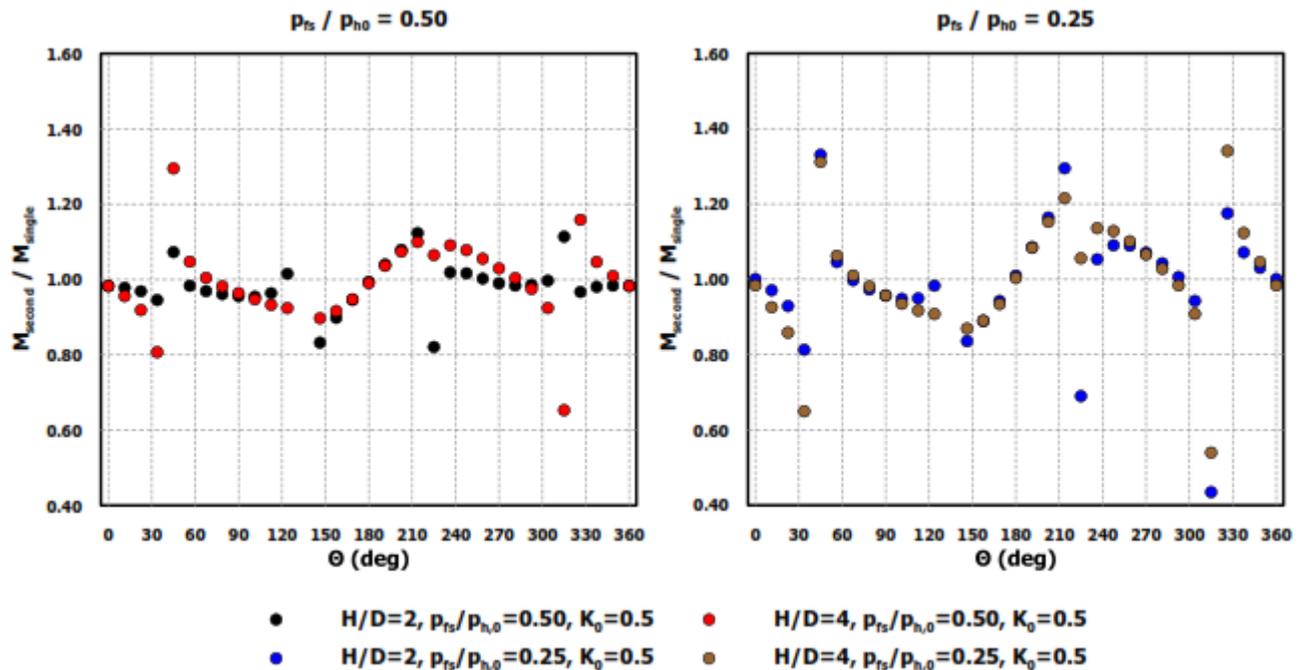
Διάγραμμα 4.36 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των αξονικών δυνάμεων (σε όρους μέγιστων τιμών) για την πρώτη (αριστερά) και τη δεύτερη (δεξιά) σήραγγα ανάμεσα στα δύο βάθη εκσκαφής και για δύο τιμές της πίεσης στο μέτωπο.

#### 4.3.2.3 ΡΟΠΕΣ ΚΑΜΨΗΣ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

Όσον αφορά την αλληλεπίδραση των ροπών κάμψης (Διαγρ. 4.37) που αναπτύσσονται στην υποστήριξη, η κατάσταση είναι επίσης παρόμοια. Η ιδιαιτερότητα εδώ είναι ότι η αλληλεπίδραση λειτουργεί ευεργετικά (μειώνει τις ροπές, δηλαδή οι λόγοι είναι μικρότεροι της μονάδας) γύρω από τις διαμέτρους των  $\Theta=330^\circ - 150^\circ$  και  $\Theta=50^\circ - 230^\circ$ , ενώ τείνουν να φτάσουν πολύ μεγάλες τιμές για  $\Theta=60^\circ$ ,  $\Theta=120^\circ$ ,  $\Theta=210^\circ$  και  $\Theta=300^\circ$ . Τα στοιχεία αυτά πάντως έχουν άμεση συσχέτιση με την ανομοιόμορφη κατανομή των ροπών στη μονή σήραγγα, η οποία παρουσιάζεται σε παραπάνω παράγραφο. Πρακτικά οι μεγάλες τιμές των λόγων αλληλεπίδρασης οφείλονται στις πολύ μικρές ροπές κάμψης στη μονή σήραγγα, μέγεθος το οποίο βρίσκεται στον παρονομαστή του κλάσματος. Και γι' αυτό το εντατικό μέγεθος πάντως ισχύει ότι η αλληλεπίδραση είναι πιο έντονη για  $H/D=4$ , καθώς και ότι παρουσιάζεται πιο έντονη διαφοροποίηση για  $p_{fs}/p_{ho}=0.25$ .



Διάγραμμα 4.37 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των ροπών κάμψης κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της πρώτης σήραγγας ανάμεσα στα δύο βάθη εκσκαφής. Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης μετώπου και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

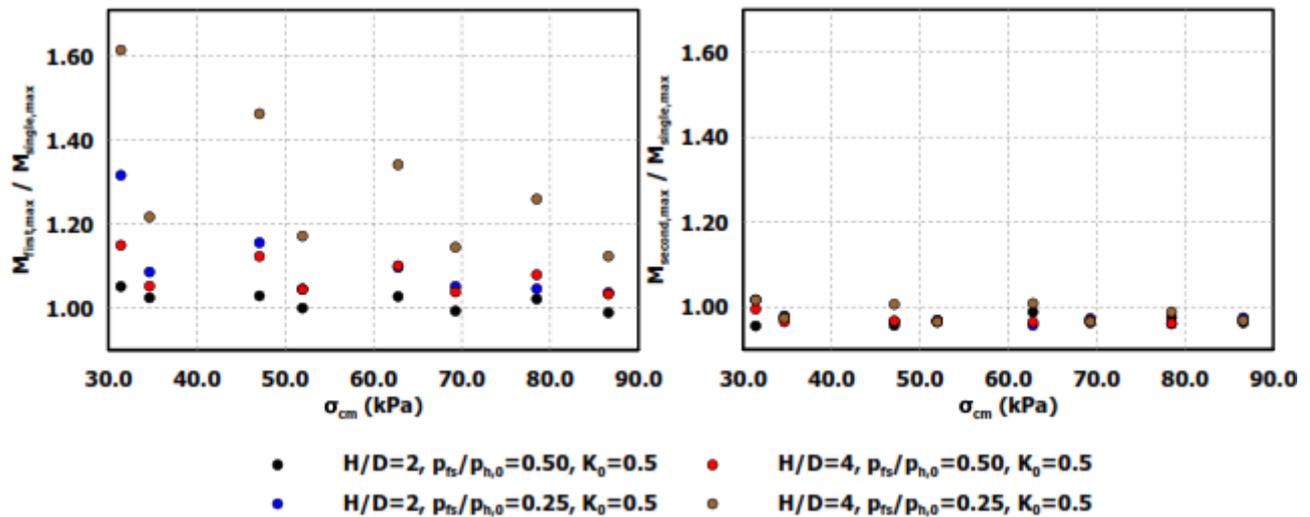


Διάγραμμα 4.38 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των ροπών κάμψης κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της δεύτερης σήραγγας ανάμεσα στα δύο βάθη εκσκαφής. Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης μετώπου και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Για τη δεύτερη, δεξιά, σήραγγα (Διαγρ. 4.38) η κατανομή της αλληλεπίδρασης στην περίμετρο είναι αρκετά πιο ομαλή, αν και ισχύουν επίσης σε γενικές τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω. Εδώ τα δύο βάθη δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές. Μάλιστα το μέτρο της

αλληλεπίδρασης είναι, και για τα τέσσερα μοντέλα που εξετάζονται, πολύ κοντά στη μονάδα, γεγονός που υποδηλώνει πολύ μικρή επιρροή της πρώτης σήραγγας πάνω στη δεύτερη.

Όσον αφορά τις μεταβολές των μέγιστων τιμών (Διαγρ. 4.39) η κατάσταση στην αριστερή σήραγγα είναι ακριβώς ίδια με τα προηγούμενα εντατικά μεγέθη. Στον δεύτερο κλάδο και για τα δύο βάθη σιράγγων και για τις δύο πιέσεις μετώπου η αλληλεπίδραση είναι πολύ μικρή. Πάντως οι διαφορές, όπως και η ένταση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, ελαττώνονται καθώς βελτιώνονται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του υλικού.

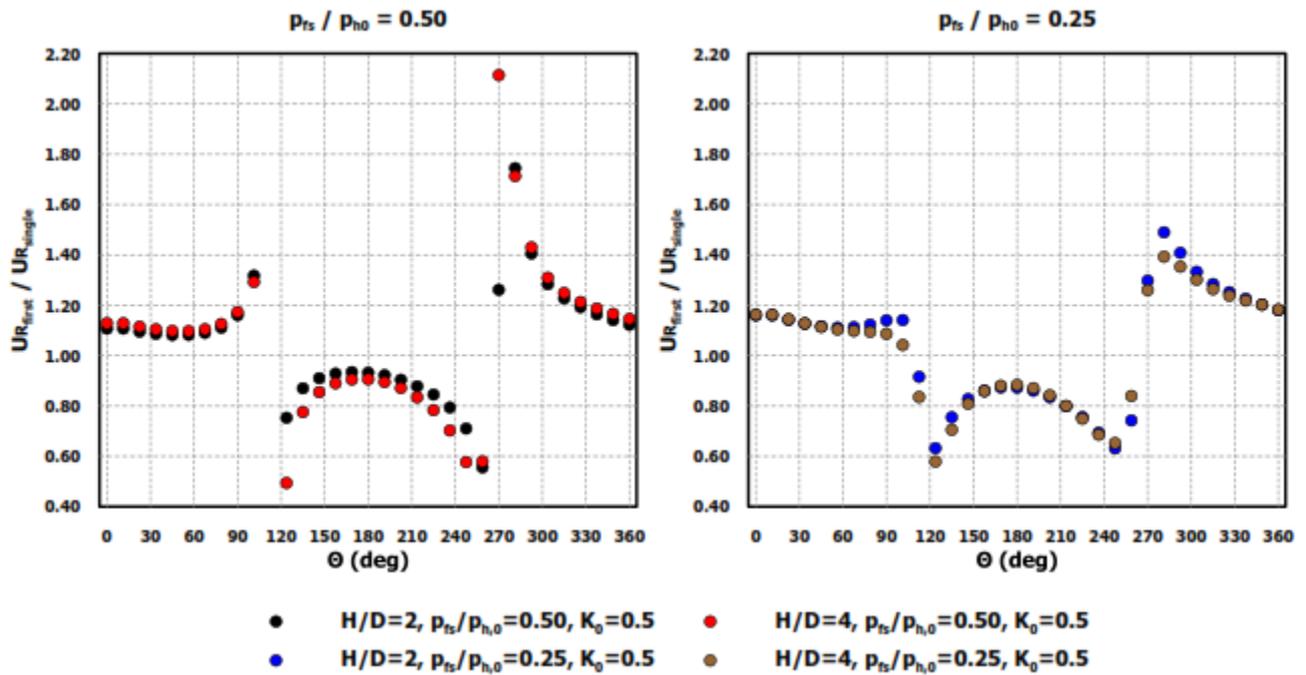


Διάγραμμα 4.39 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των ροπών κάμψης (σε όρους μέγιστων τιμών) για την πρώτη (αριστερά) και τη δεύτερη (δεξιά) σήραγγα ανάμεσα στα δύο βάθη εκσκαφής και για δύο τιμές της πίεσης στο μέτωπο.

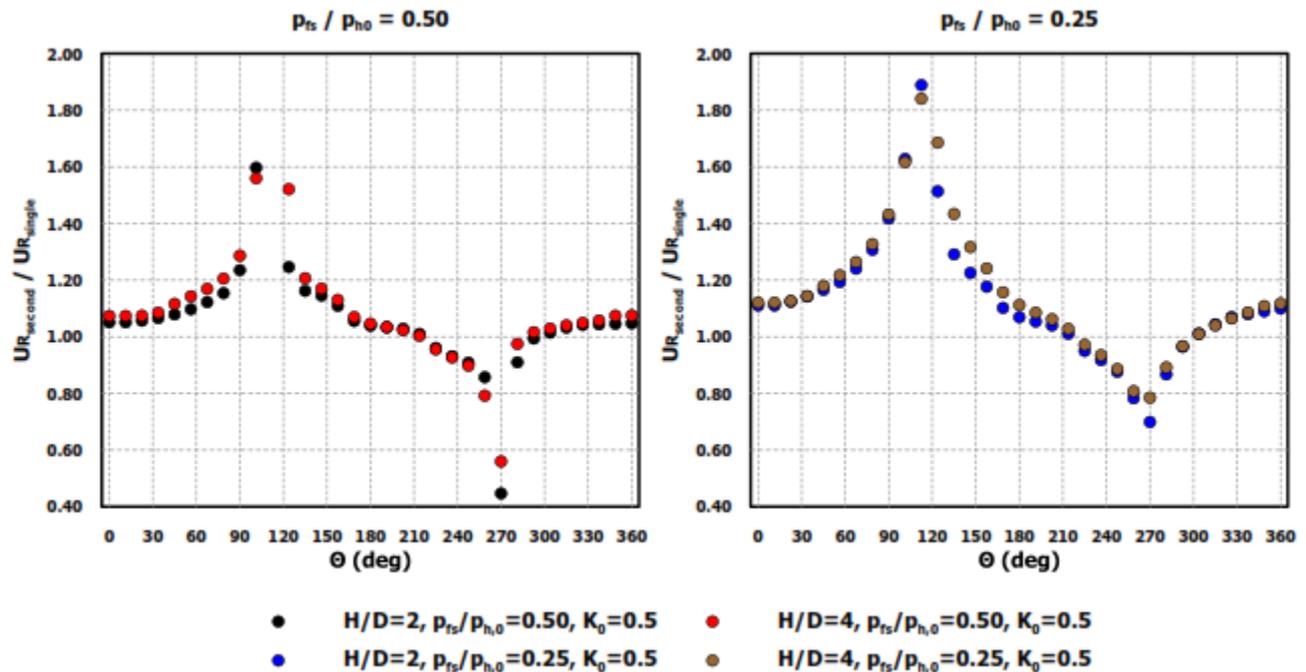
#### 4.3.2.4 ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Σχετικά με την αλληλεπίδραση που δέχεται η πρώτη σήραγγα σε όρους μετακινήσεων (συγκλίσεων των τοιχωμάτων της σήραγγας, Διαγρ. 4.40) οι διαφορές για τα δύο βάθη είναι αμελητέες, με την πιο βαθιά πάντως να επηρεάζεται περισσότερο. Σε αυτή την περίπτωση προέκυψαν λόγοι μικρότεροι του μηδενός για την κάτω ημιδιατομή, οι οποίοι υποδεικνύουν ανακούφιση των συγκλίσεων στο σημείο εκείνο. Αντίθετα, από τον οριζόντιο άξονα και πάνω η διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας αυξάνει τις μετατοπίσεις, ενώ το φαινόμενο μεγιστοποιείται στην εξωτερική παρειά.

Αντίθετα, η δεύτερη σήραγγα (Διαγρ. 4.41) επιβαρύνεται με πρόσθετες μετατοπίσεις σε σχέση με τη μονή σήραγγα. Μεγιστοποίηση της αλληλεπίδρασης έχουμε γύρω από τις  $\theta=110^\circ$ , ενώ εξαίρεση αποτελεί η εσωτερική παρειά, όπου οι λόγοι είναι μικρότεροι της μονάδας. Και εδώ οι διαφορές ανάμεσα στα δύο βάθη είναι αμελητέες.



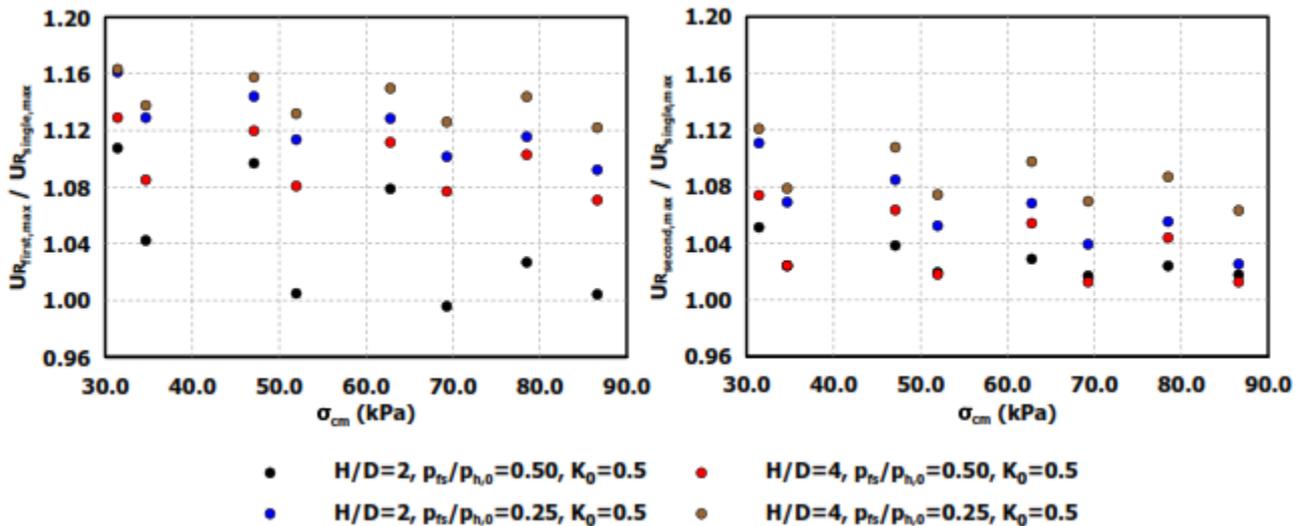
Διάγραμμα 4.40 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των μετακινήσεων κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της πρώτης σήραγγας ανάμεσα στα δύο βάθη εκσκαφής. Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης μετώπου και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.



Διάγραμμα 4.41 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των μετακινήσεων κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της δεύτερης σήραγγας ανάμεσα στα δύο βάθη εκσκαφής. Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης μετώπου και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Όσον αφορά τις μέγιστες τιμές (Διαγρ. 4.42), βλέπουμε ότι ακριβώς επισημάνθηκε και στα προηγούμενα μεγέθη, δηλαδή πιο έντονη αλληλεπίδραση στις βαθιές σήραγγες και για τους δύο κλάδους και μείωση της αλληλεπίδρασης με τη βελτίωση των ιδιοτήτων του εδάφους.

Εδώ όμως η διαφορά είναι εντονότερη για την ισχυρότερη πίεση στο μέτωπο  $p_{fs}/p_{ho}=0.50$ , σε αντίθεση με ότι έχει παρατηρηθεί προηγουμένως.



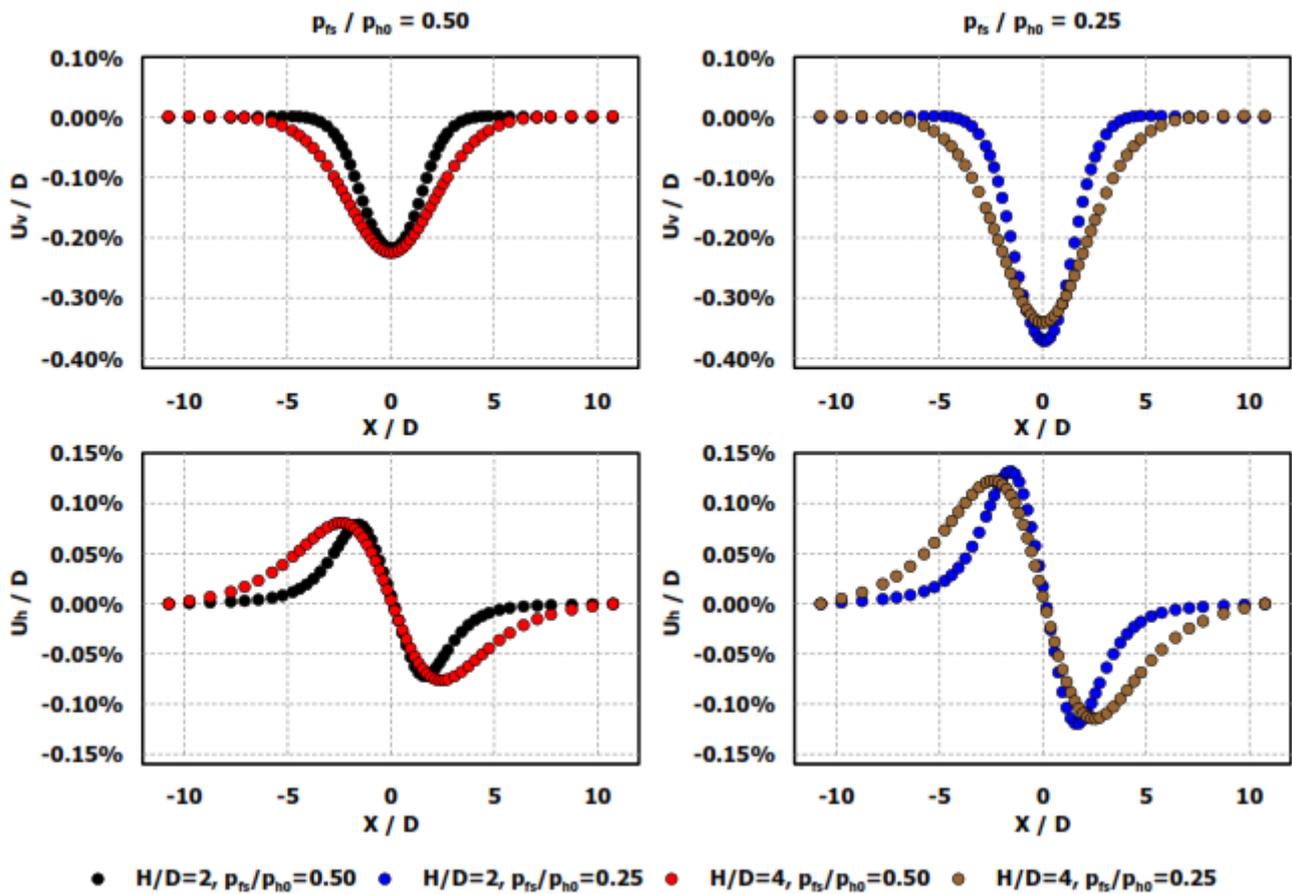
Διάγραμμα 4.42 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των μετακινήσεων (σε όρους μέγιστων τιμών) για την πρώτη (αριστερά) και τη δεύτερη (δεξιά) σήραγγα ανάμεσα στα δύο βάθη εκσκαφής και για δύο τιμές της πίεσης στο μέτωπο.

#### 4.3.2.5 ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

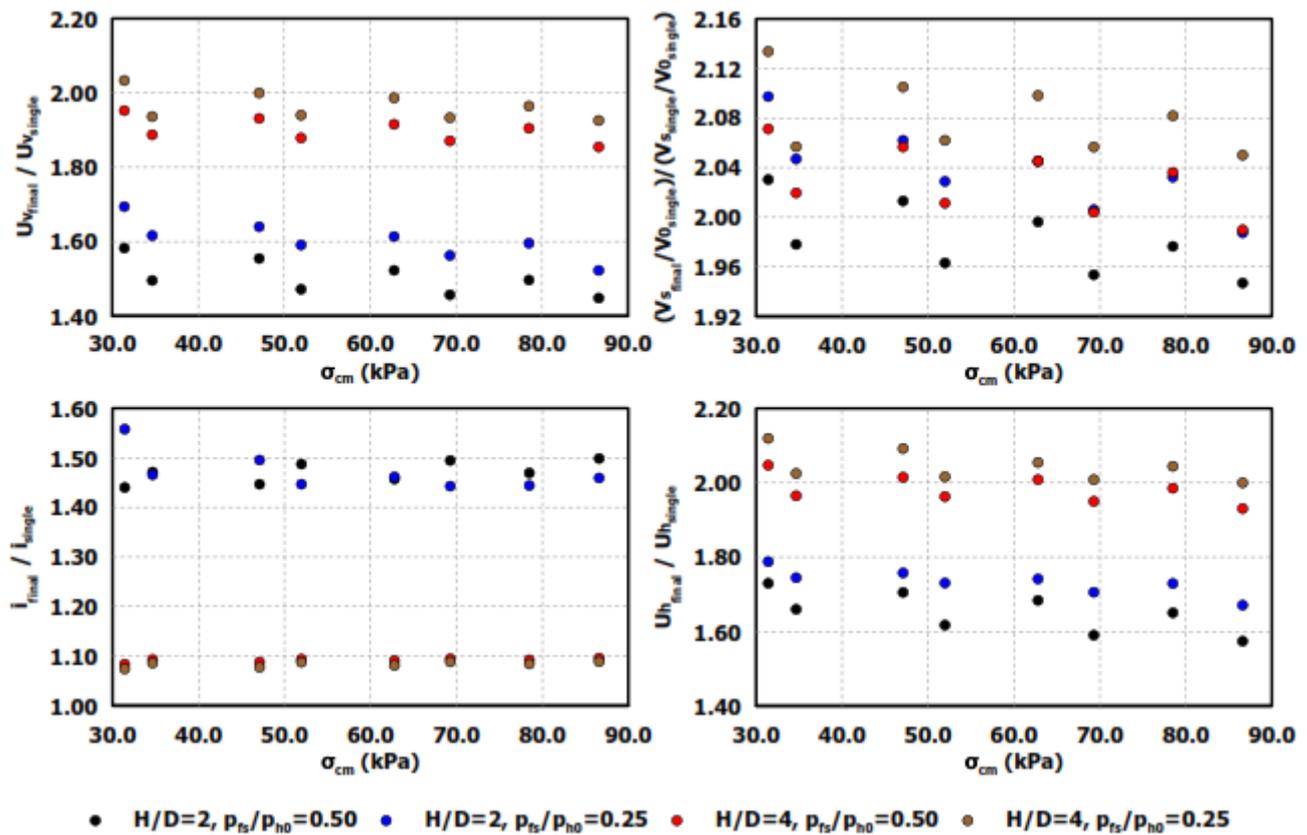
Τελευταίο μέγεθος που εξετάζεται είναι οι μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους που προκύπτουν από τη διάνοιξη των δίδυμων σηράγγων. Ενδεικτικό είναι το Διαγρ. 4.43 όπου παρουσιάζονται οι καμπύλες των καθιζήσεων για τα δύο βάθη και τις δύο πιέσεις μετώπου στην τελική τους μορφή, μετά τη διέλευση δηλαδή και των δύο κλάδων. Όπως γίνεται αντιληπτό η μορφή του διαγράμματος είναι ίδια με το αντίστοιχο γράφημα για τη μονή σήραγγα, τόσο για τις καθιζήσεις (Διαγρ. 4.9), όσο και για τις οριζόντιες μετακινήσεις (Διαγρ. 4.10). Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι για  $p_{fs}/p_{ho}=0.50$  η βαθιά σήραγγα ( $H/D=4$ ) παρουσιάζει πλέον μεγαλύτερη μέγιστη τιμή καθίζησης στο κέντρο της καμπύλης σε σχέση με τη ρηχή ( $H/D=2$ ).

Το γεγονός αυτό γίνεται εμφανές και μέσω του Διαγρ. 4.44, όπου παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των καθιζήσεων στην τελική τους μορφή προς τις αντίστοιχες τιμές για τη μονή σήραγγα. Είναι εμφανές ότι στις βαθιές σήραγγες επιδρά πολύ περισσότερο η αλληλεπίδραση όσον αφορά τη μέγιστη τιμή της καθίζησης, ανεξαρτήτως πίεσης μετώπου. Αντίστοιχη είναι η κατάσταση και στις μέγιστες τιμές της οριζόντιας μετακίνησης (απόλυτη τιμή,  $U_{hfinal}$ ) και στην απώλεια εδαφικού όγκου  $V_{sfinal}/V_0$ . Στον αντίποδα, πολύ πιο έντονη είναι η αύξηση του πλάτους της καμπύλης των καθιζήσεων στις πιο ρηχές σήραγγες ( $H/D=2$ ). Η εξήγηση οφείλεται κυρίως στη γεωμετρία της διατομής, μιας και η αύξηση του πλάτους του υπόγειου έργου μέσω της δεύτερης σήραγγας αντανακλάται στην επιφάνεια του εδάφους πιο άμεσα όταν το βάθος είναι μικρό.

Τέλος σημειώνεται πως και σε αυτό το μέγεθος, η ένταση της αλληλεπίδρασης μειώνεται όσο βελτιώνονται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος εδάφους.



Διάγραμμα 4.43 Σύγκριση της αλληλεπίδρασης των καθιζήσεων ανάμεσα στα δύο βάθη δίδυμων σηράγγων και για τις δύο τιμές της πίεσης στο μέτωπο. Επάνω: Κατακόρυφες μετακινήσεις, Κάτω: Οριζόντιες μετακινήσεις.



Διάγραμμα 4.44 Σύγκριση της αλληλεπίδρασης στις καθιζήσεις (κατακόρυφες και οριζόντιες μετακινήσεις, πλάτος καμπύλης, απώλεια όγκου) ανάμεσα στα δύο βάθη δίδυμων σηράγγων και για τις δύο τιμές πίεσης μετώπου.

### 4.3.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΟ ΜΕΤΩΠΟ

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες τα μηχανήματα διάνοιξης με κλειστό μέτωπο (EPB/Slurry TBM) δίνουν τη δυνατότητα για άσκηση πίεσης στο μέτωπο μέσω εδαφικού πολφού που βρίσκεται στη διεπιφάνεια εδάφους – κεφαλής. Με την τεχνική αυτή έχει καταστεί δυνατή η εκσκαφή σηράγγων εντός αστικών περιοχών, σε μικρά βάθη και διαμέσου εδαφών με πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά. Μάλιστα το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ασφάλεια που προσφέρει και η οποία σχετίζεται, εκτός απ' την ευστάθεια του μετώπου, με τις υπέργειες κατασκευές στην ευρύτερη περιοχή του έργου, οι οποίες κινδυνεύουν λόγω των καθιζήσεων που προκαλεί η διάνοιξη κάθε σήραγγας.

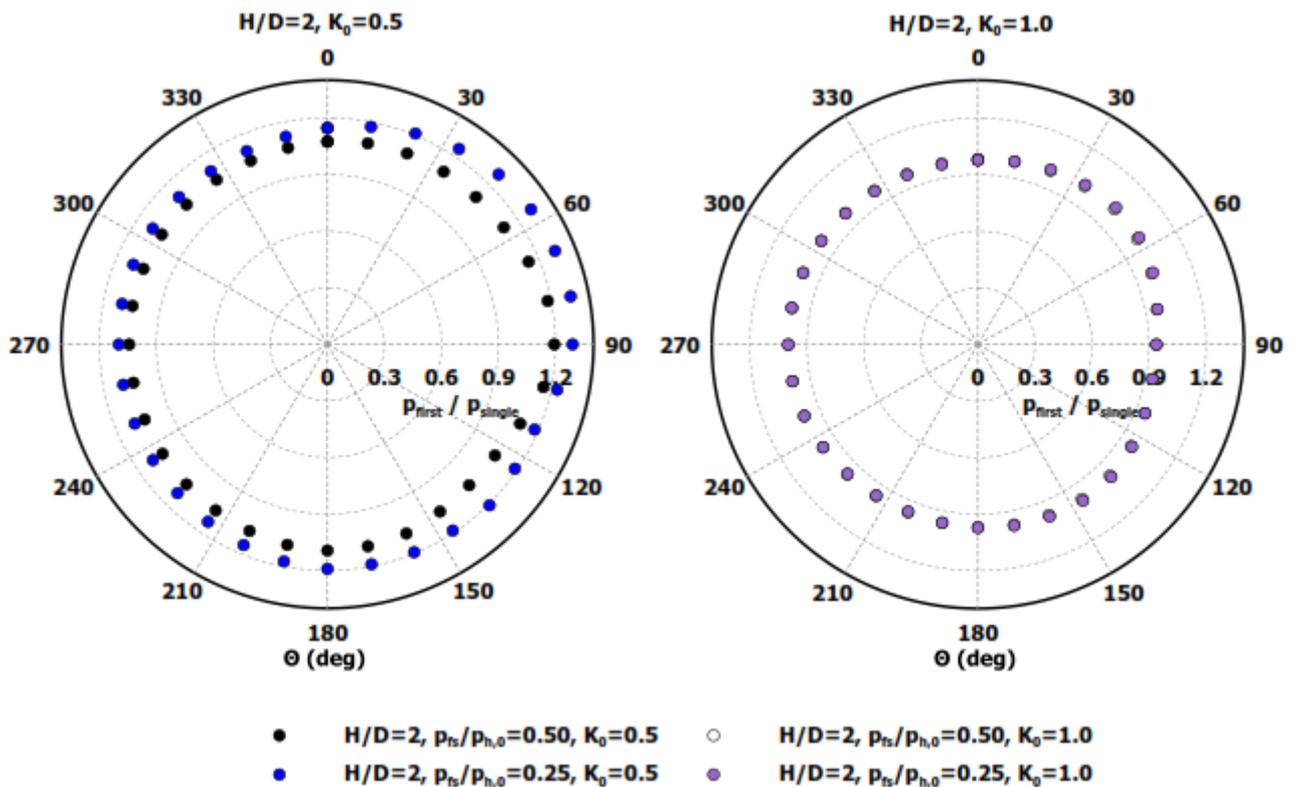
Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η επιρροή της πίεσης που ασκείται στο μέτωπο από το μηχανήμα ολομέτωπης κοπής. Το μέγεθος αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο καθώς η πίεση που ασκείται είναι δυνατόν να μεταβάλλεται εύκολα κατά μήκος της σήραγγας και να προσαρμόζεται στις εκάστοτε συνθήκες διάνοιξης, καθορίζοντας σε μεγάλο βαθμό την επιτυχία του έργου. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω εξετάζονται δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης μετώπου, ανηγμένες ως προς την οριζόντια γεωστατική τάση που επικρατεί σε κάθε περίπτωση. Η πρώτη αντιστοιχεί στο 50% της οριζόντιας τάσης ( $p_{fs}/p_{ho}=0.50$ ) και η δεύτερη στο 25% ( $p_{fs}/p_{ho}=0.25$ ), δηλαδή και οι δύο είναι τιμές που συναντώνται συχνά στα τεχνικά έργα. Η σύγκριση γίνεται για τέσσερεις διαφορετικούς συνδυασμούς βάθους σήραγγας και συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων ( $H/D=2 - K_0=0.5$ ,  $H/D=2 - K_0=1.0$ ,  $H/D=2 - K_0=1.5$ ,  $H/D=4 - K_0=0.5$ ), ενώ για όλους τους συνδυασμούς εξετάζονται οκτώ διαφορετικές τιμές των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του εδάφους.

#### 4.3.3.1 ΠΙΕΣΗ (ΦΟΡΤΙΟ) ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

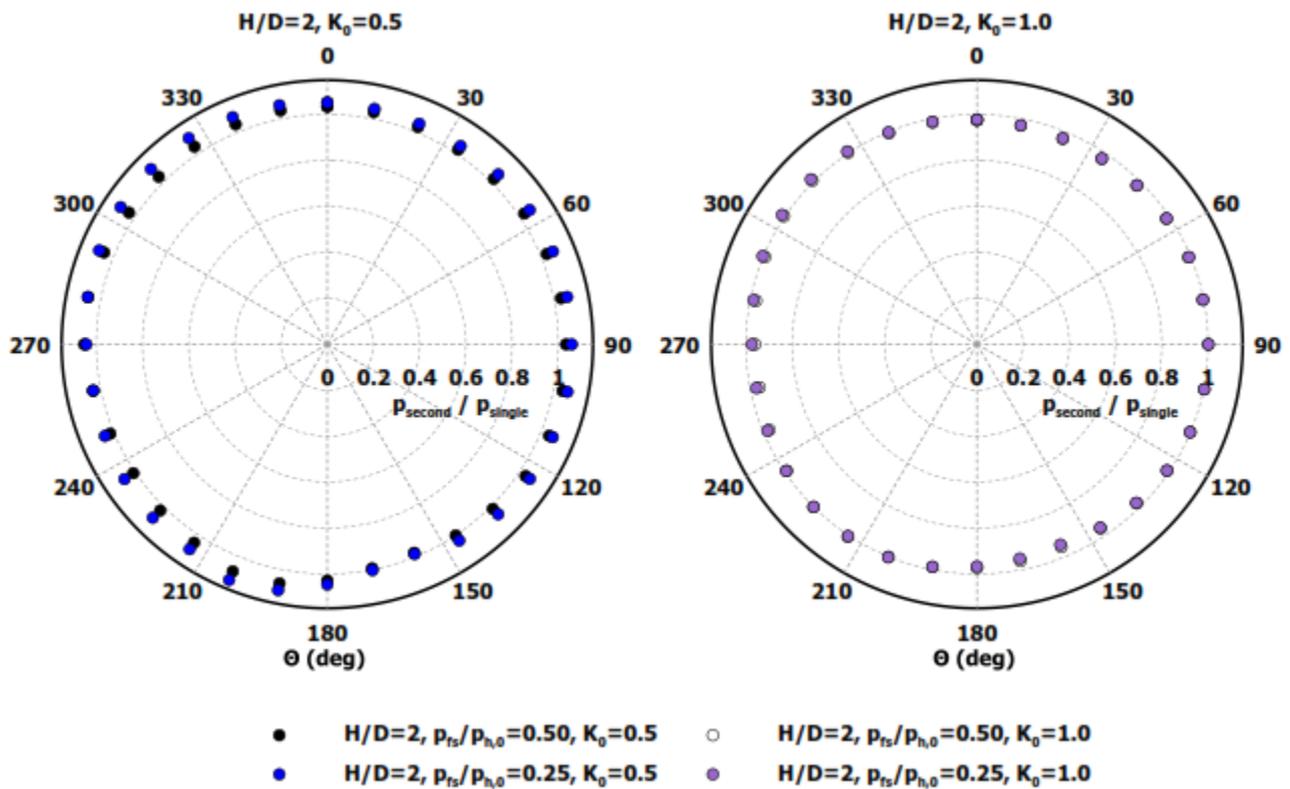
Αρχικά θα γίνει αναφορά στις πιέσεις επί της υποστήριξης. Στο Διαγρ. 4.45 παρουσιάζεται η αλληλεπίδραση σε όρους πιέσεων στην υποστήριξη για το βασικό μοντέλο και για την περίπτωση  $H/D=2-K_0=1.0$ . Παρατηρείται ότι για  $K_0=0.5$  η αλληλεπίδραση είναι πιο έντονη για τη μικρή πίεση μετώπου ( $p_{fs}/p_{h0}=0.25$ ). Το γεγονός εξηγείται ως εξής: κατά τη διάνοιξη της πρώτης σήραγγας η μικρή πίεση αυξάνει την αποτόνωση του εδάφους, με αποτέλεσμα, κατά τη διέλευση του δεύτερου κλάδου, περισσότερη από την επιπρόσθετη πίεση να καταλήγει στην επένδυση της πρώτης σήραγγας. Επίσης η μειωμένη πίεση κατά τη διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας αυξάνει τις παραμορφώσεις προς το εσωτερικό της, με συνέπεια την εντονότερη φόρτιση της δύσκαμπτης, ήδη εφαρμοσμένης, επένδυσης της πρώτης. Αντίστοιχα είναι τα αποτελέσματα και για την προσομοίωση της πιο βαθιάς σήραγγας ( $H/D=4 - K_0=0.5$ ).

Από όλα τα παραπάνω εξηγείται και το γεγονός ότι στην πρώτη σήραγγα η διαφοροποίηση ανάμεσα στις δύο τιμές πίεσης μετώπου είναι πιο έντονη στην εσωτερική παρειά της εκσκαφής, ενώ στη δεύτερη είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στην περίμετρο της σήραγγας. Επίσης είναι πιο έντονη για το μεγαλύτερο από τα δύο βάθη εκσκαφής.

Στις περιπτώσεις αυξημένης τιμής του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων (η  $K_0=1.0$  παρουσιάζεται στα γραφήματα, αλλά αντίστοιχα αποτελέσματα προέκυψαν και για  $K_0=1.5$ )



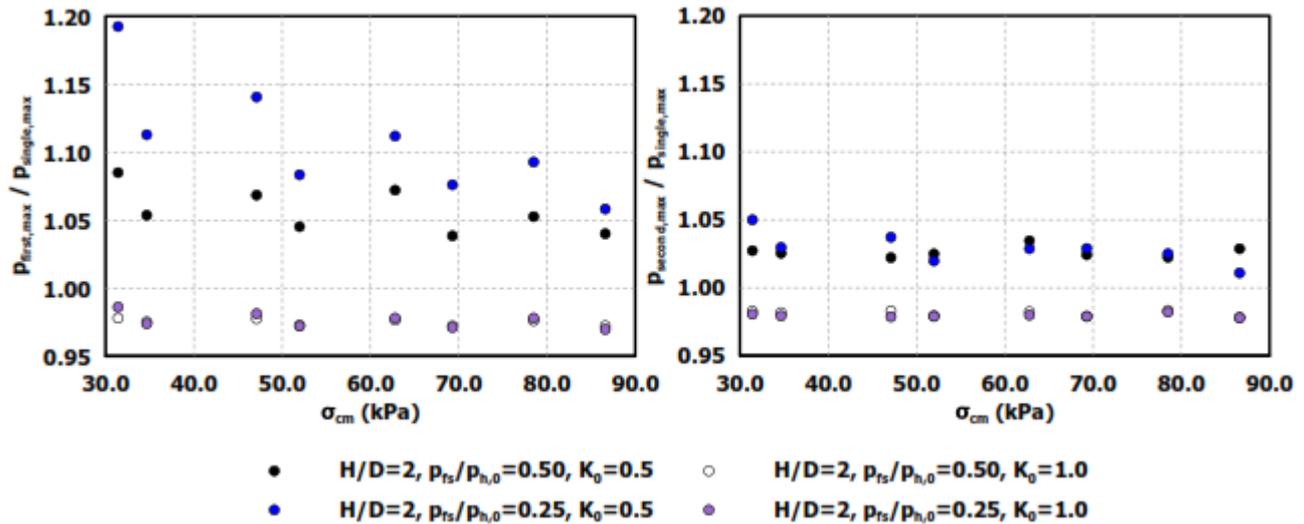
Διάγραμμα 4.45 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης της πίεσης επαφής κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της πρώτης σήραγγας ανάμεσα στις δύο τιμές πίεσης στο μέτωπο. Η σύγκριση πραγματοποιείται για  $H/D=2 - K_0=0.5$  (αριστερά),  $H/D=2 - K_0=1.0$  (δεξιά) και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.



Διάγραμμα 4.46 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης της πίεσης επαφής κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της δεύτερης σήραγγας ανάμεσα στις δύο τιμές πίεσης στο μέτωπο. Η σύγκριση πραγματοποιείται για  $H/D=2 - K_0=0.5$  (αριστερά),  $H/D=2 - K_0=1.0$  (δεξιά) και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

δεν παρατηρείται καμία διαφορά στα αποτελέσματα για τις δύο τιμές πίεσης μετώπου στην αριστερή σήραγγα. Αντίθετα στη δεύτερη (δεξιά) διατομή (Διαγρ. 4.46) διαπιστώνεται μικρή αύξηση της αλληλεπίδρασης γύρω από την εσωτερική παρειά ( $\theta=270^\circ$ ) μόνο για  $K_0=1.5$ .

Παρόμοια είναι τα συμπεράσματα και από τα διαγράμματα για τις μέγιστες τιμές της πίεσης (Διαγρ. 4.47), αφού και εδώ είναι φανερή η αυξημένη αλληλεπίδραση στη μικρή πίεση μετώπου για  $K_0=0.5$ . Επίσης φαίνεται ότι για  $K_0=1.0$  (και κατά προέκταση για  $K_0=1.5$ ) η πίεση στο μέτωπο ελάχιστο ρόλο διαδραματίζει στην αλληλεπίδραση.

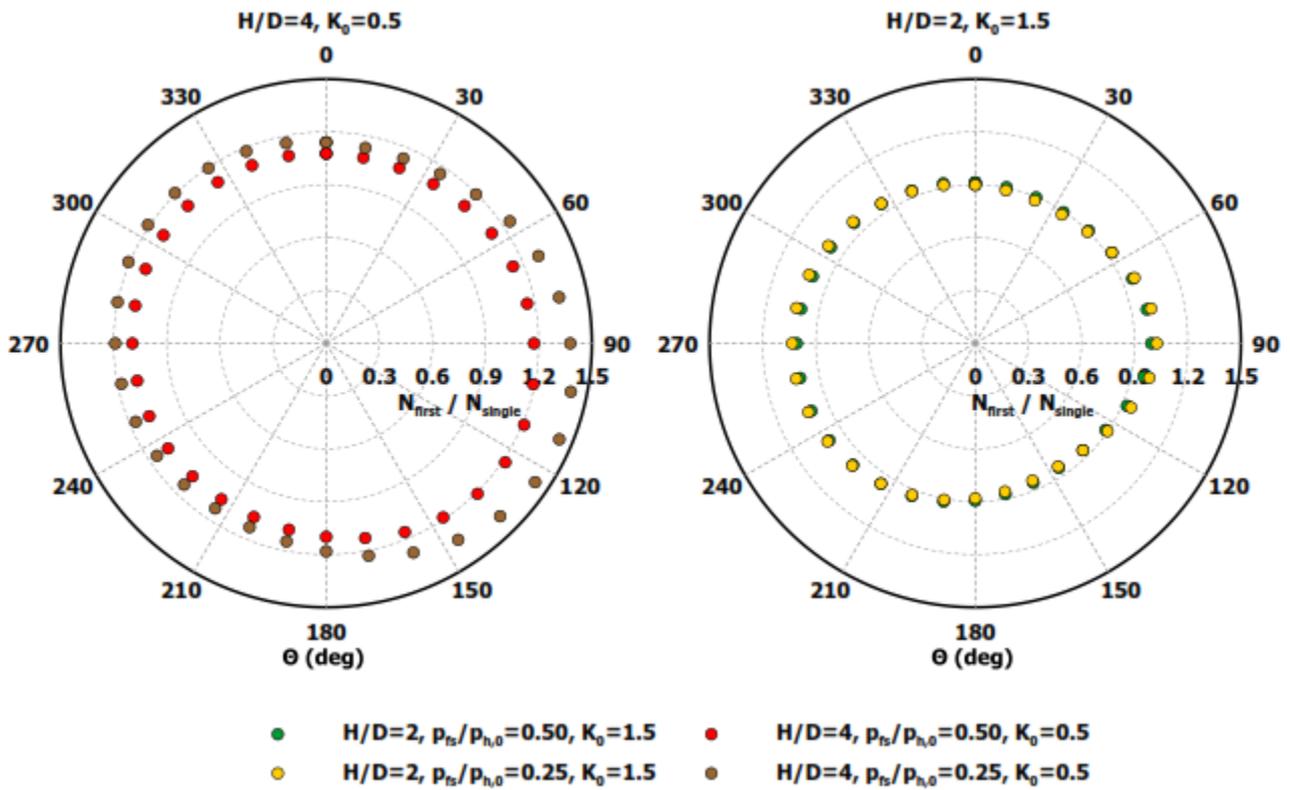


Διάγραμμα 4.47 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης της πίεσης επαφής (σε όρους μέγιστων τιμών) για την πρώτη (αριστερά) και τη δεύτερη (δεξιά) σήραγγα ανάμεσα στις δύο τιμές πίεσης μετώπου για τις περιπτώσεις  $H/D=2 - K_0=0.5$  και  $H/D=2 - K_0=1.0$ .

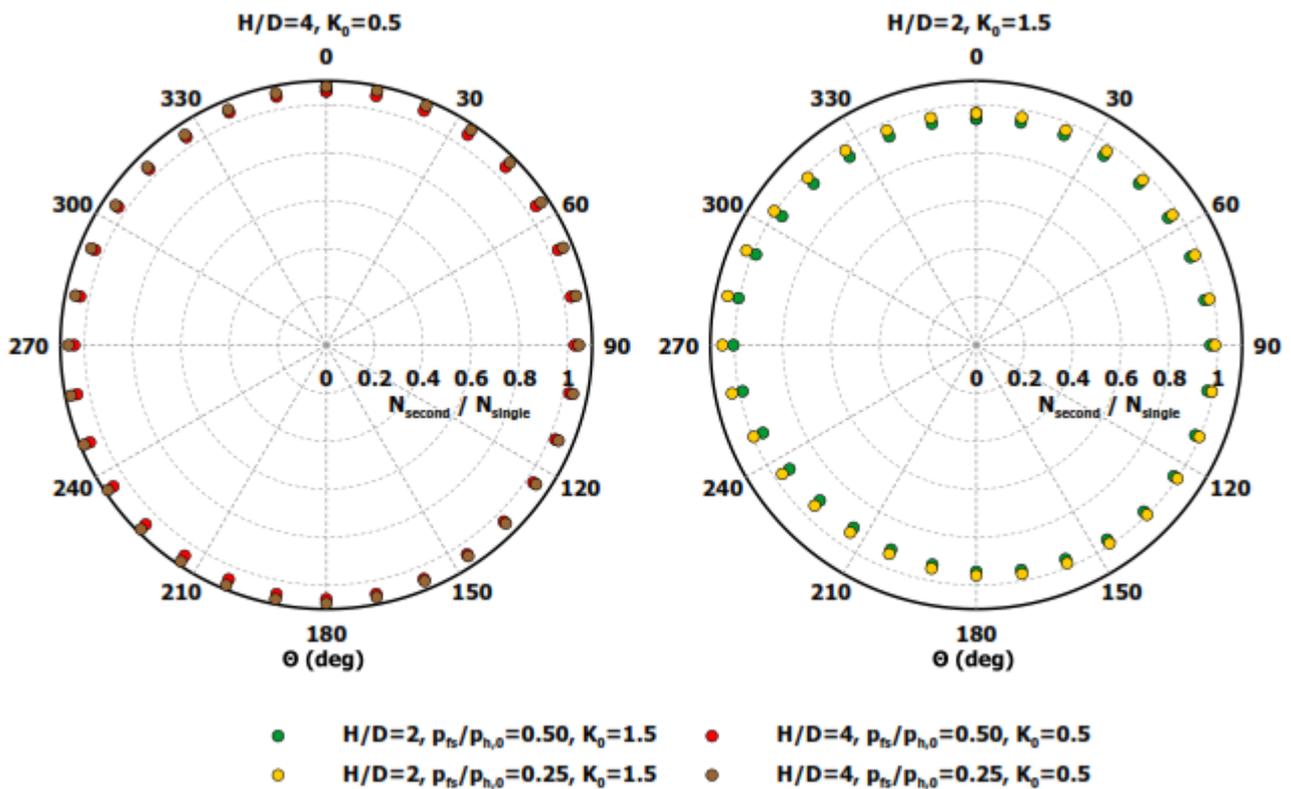
#### 4.3.3.2 ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

Τα συμπεράσματα για την μεταβολή των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση λόγω της αλληλεπίδρασης συμπίπτουν απόλυτα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για τις πιέσεις. Εδώ επιλέχθηκε να παρουσιασθούν αποτελέσματα από τα αριθμητικά μοντέλα με  $H/D=4 - K_0=0.5$  και  $H/D=2 - K_0=1.5$ . Για το πρώτο (Διαγρ. 4.48 αριστερά) παρατηρείται αύξηση της αλληλεπίδρασης για μειωμένη πίεση μετώπου στην πρώτη σήραγγα και ιδιαίτερος στην εσωτερική παρειά ( $\Theta=90^\circ$ ). Αντίστοιχα συμπεριφέρεται και το βασικό μοντέλο  $H/D=2 - K_0=0.5$ . Όμως, για το δεύτερο αριθμητικό μοντέλο φαίνεται ότι ελάχιστο ρόλο παίζει η αλλαγή της πίεσης στο μέτωπο, ενώ παρόμοια είναι τα αποτελέσματα για  $K_0=1.0$ .

Όσον αφορά τη δεύτερη κατά σειρά εκσκαφής διατομή, η αλληλεπίδραση είναι σαφώς μικρότερη, όπως μικρότερες είναι και οι διαφορές ανάμεσα στις δύο πιέσεις μετώπου. Η αύξηση της αλληλεπίδρασης για  $p_{fs}/\rho_{h,0}=0.25$  εστιάζεται και στα δύο μοντέλα του Διαγρ. 4.49 στην εσωτερική παρειά ( $\Theta=270^\circ$ ). Αντίστοιχα συμπεριφέρεται το βασικό μοντέλο, ενώ για  $K_0=1.0$  οι διαφοροποιήσεις είναι αμελητέες.

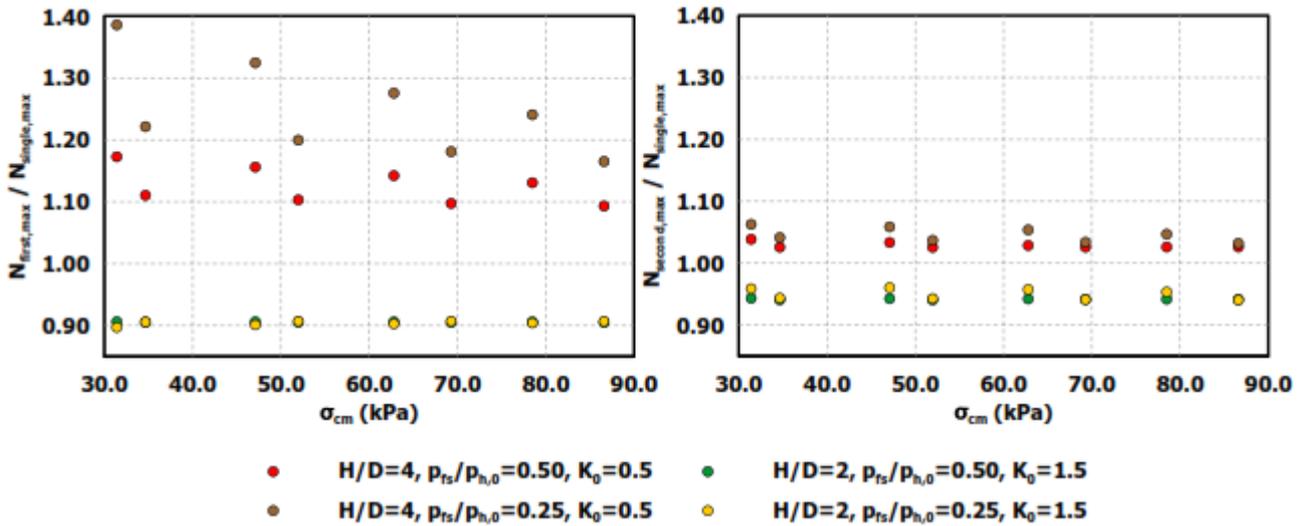


Διάγραμμα 4.48 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της πρώτης σήραγγας ανάμεσα στις δύο τιμές πίεσης στο μέτωπο. Η σύγκριση πραγματοποιείται για  $H/D=4 - K_0=0.5$  (αριστερά),  $H/D=2 - K_0=1.5$  (δεξιά) και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.



Διάγραμμα 4.49 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της δεύτερης σήραγγας ανάμεσα στις δύο τιμές πίεσης στο μέτωπο. Η σύγκριση πραγματοποιείται για  $H/D=4 - K_0=0.5$  (αριστερά),  $H/D=2 - K_0=1.5$  (δεξιά) και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

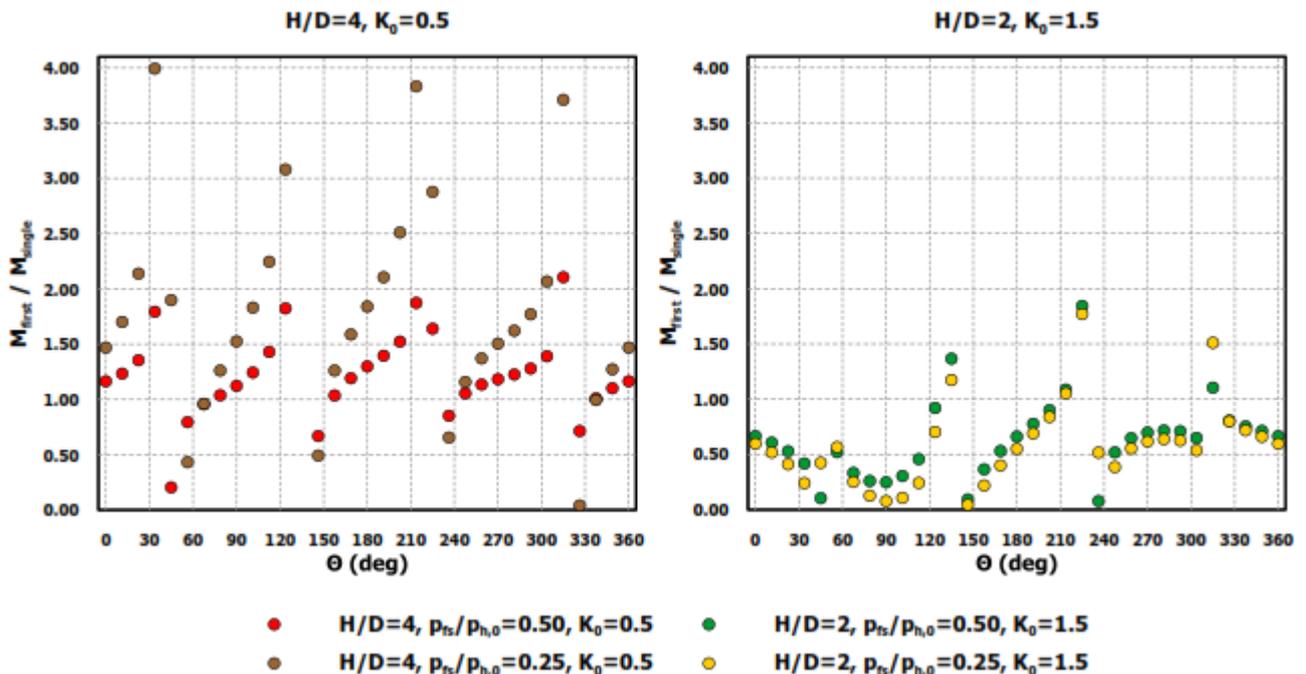
Σε παρόμοια συμπεράσματα καταλήγουμε από την εξέταση της αλληλεπίδρασης σε όρους μέγιστων τιμών των αξονικών δυνάμεων (Διαγρ. 4.50).



Διάγραμμα 4.50 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των αξονικών δυνάμεων (σε όρους μέγιστων τιμών) για την πρώτη (αριστερά) και τη δεύτερη (δεξιά) σήραγγα ανάμεσα στις δύο τιμές πίεσης μετώπου για τις περιπτώσεις  $H/D=4 - K_0=0.5$  και  $H/D=2 - K_0=1.5$ .

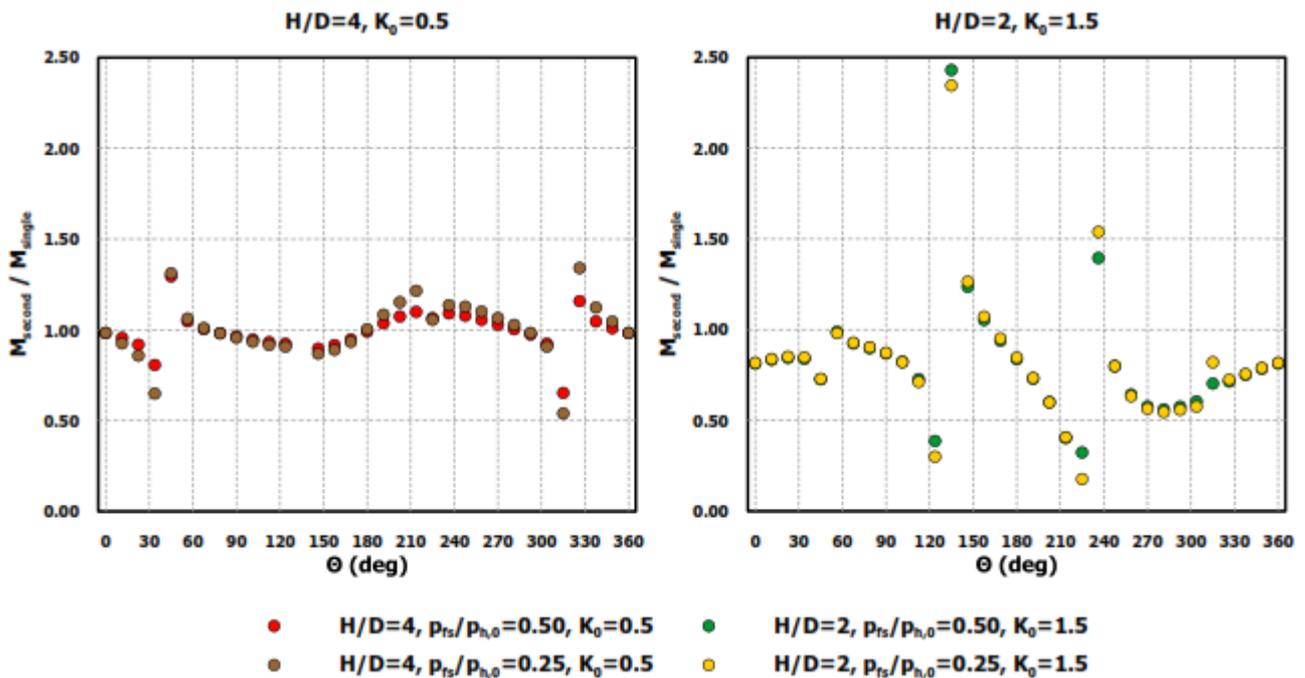
### 4.3.3.3 ΡΟΠΕΣ ΚΑΜΨΗΣ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

Στην παρούσα ενότητα θα διερευνηθεί η επίδραση της πίεσης στο μέτωπο ως προς τη μεταβολή των ροπών κάμψης εξαιτίας της αλληλεπίδρασης. Στα Διαγρ. 4.51-4.53 παρουσιάζονται

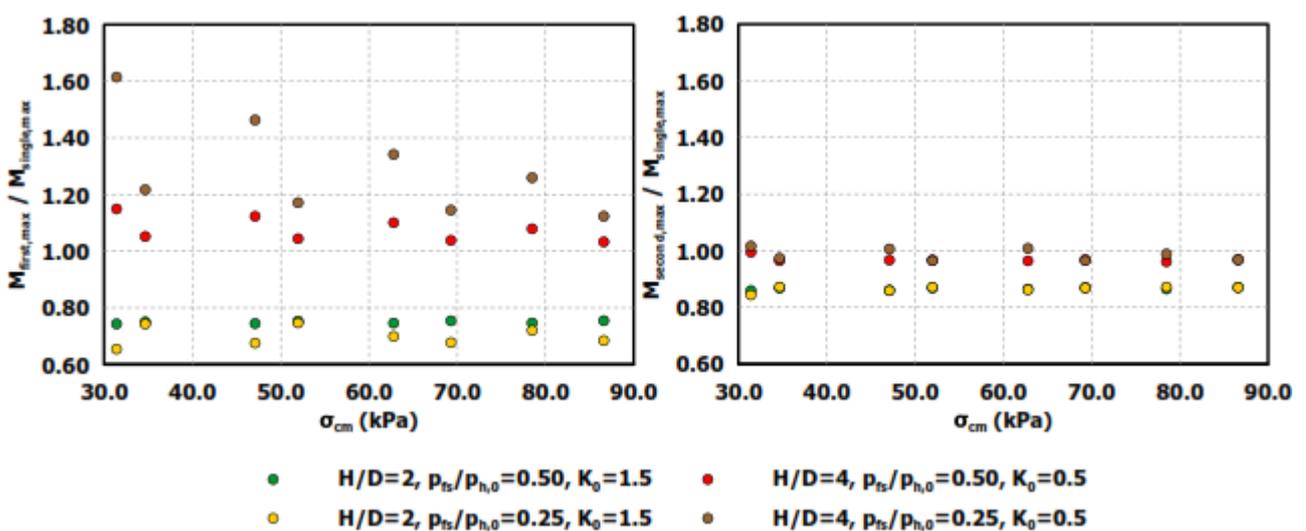


Διάγραμμα 4.51 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των ροπών κάμψης κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της πρώτης σήραγγας ανάμεσα στις δύο τιμές πίεσης στο μέτωπο. Η σύγκριση πραγματοποιείται για  $H/D=4 - K_0=0.5$  (αριστερά),  $H/D=2 - K_0=1.5$  (δεξιά) και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

ζονται αποτελέσματα για τα αριθμητικά προσομοιώματα με  $H/D=4 - K_0=0.5$  και  $H/D=2 - K_0=1.5$ . Όπως φαίνεται, η ελάττωση της πίεσης στο μέτωπο κατά την εκσκαφή αυξάνει τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης και για τους δύο κλάδους, στις περιπτώσεις όπου ο συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων ισούται με  $K_0=0.5$ . Για  $K_0=1.5$  στην πρώτη σήραγγα η αποτόνωση των ροπών είναι πιο έντονη για  $p_{fs}/p_{h0}=0.25$ , ενώ στον δεύτερο κλάδο οι διαφορές είναι ασήμαντες. Το βασικό μοντέλο ( $H/D=2 - K_0=0.5$ ) συμπεριφέρεται κατ' απόλυτη αντιστοιχία



Διάγραμμα 4.52 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των ροπών κάμψης κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της δεύτερης σήραγγας ανάμεσα στις δύο τιμές πίεσης στο μέτωπο. Η σύγκριση πραγματοποιείται για  $H/D=4 - K_0=0.5$  (αριστερά),  $H/D=2 - K_0=1.5$  (δεξιά) και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

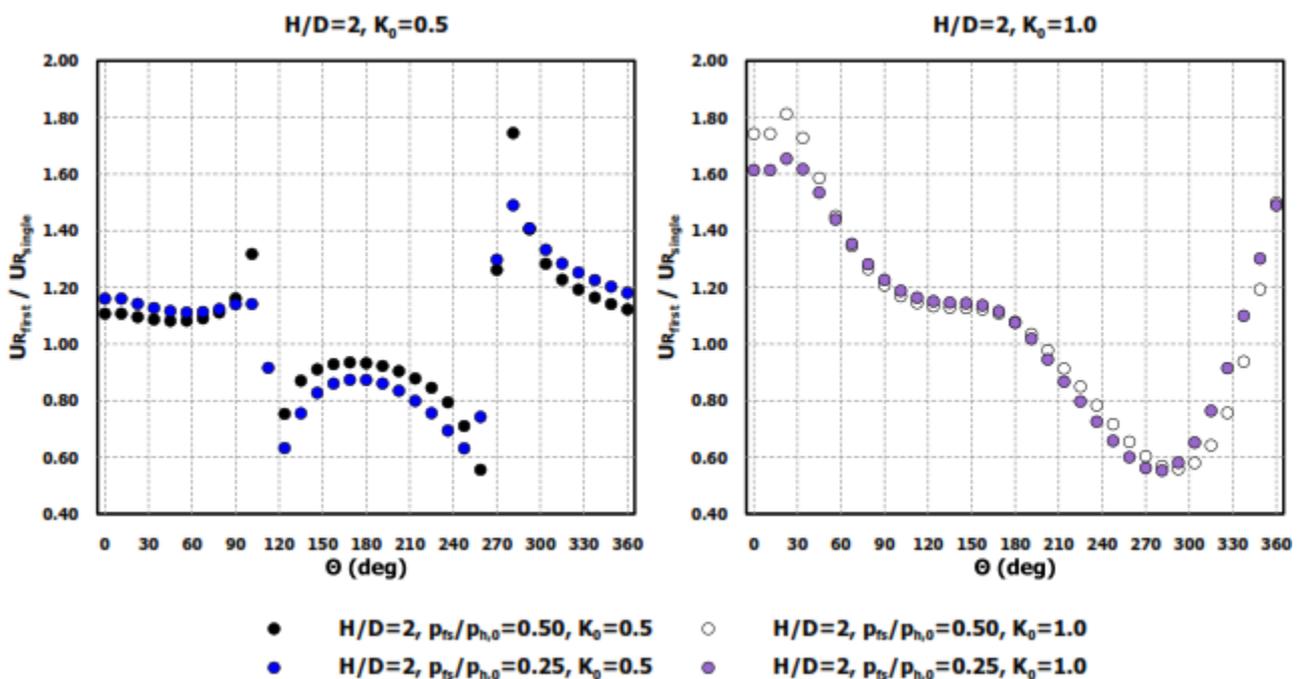


Διάγραμμα 4.53 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των ροπών κάμψης (σε όρους μέγιστων τιμών) για την πρώτη (αριστερά) και τη δεύτερη (δεξιά) σήραγγα ανάμεσα στις δύο τιμές πίεσης μετώπου για τις περιπτώσεις  $H/D=4 - K_0=0.5$  και  $H/D=2 - K_0=1.5$ .

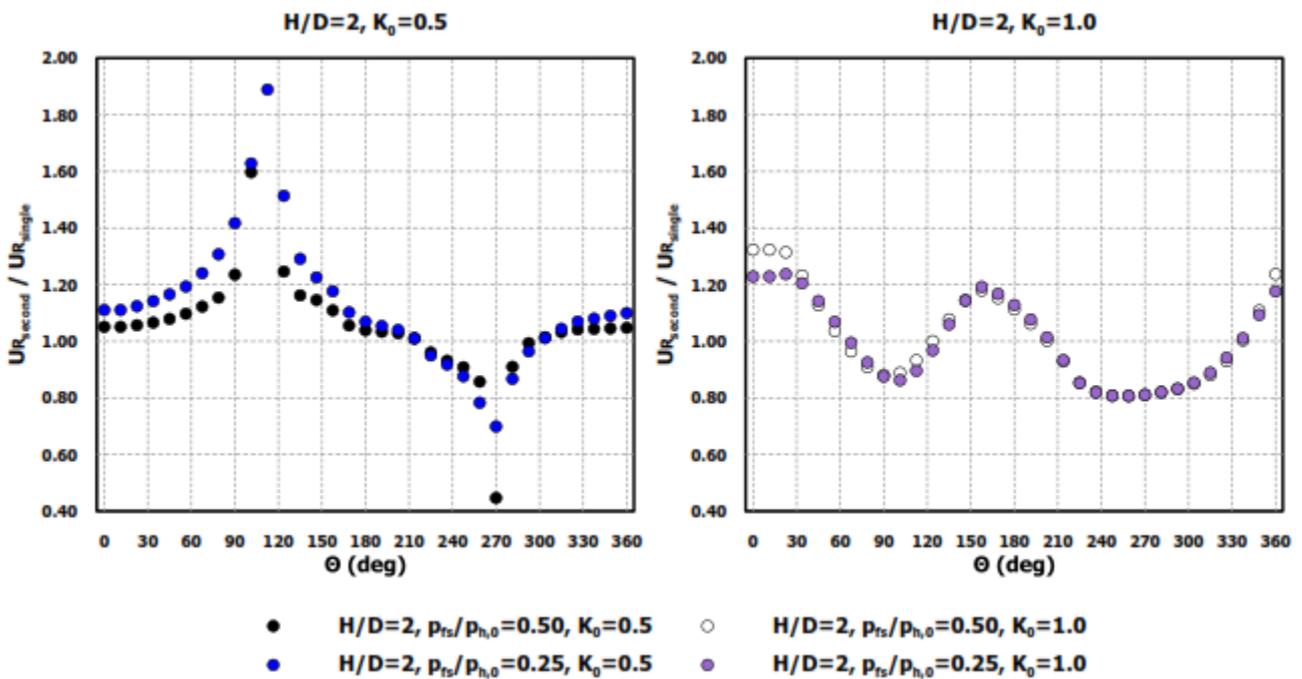
με αυτό της βαθιάς σήραγγας ( $H/D=4 - K_0=0.5$ ). Τέλος, για  $K_0=1.0$  οι διαφοροποιήσεις για τις δύο τιμές πίεσης μετώπου είναι αμελητέες και εξαρτώνται κυρίως από τα γεωτεχνικά δεδομένα. Εξάλλου, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, στη συγκεκριμένη περίπτωση οι ροπές κάμψης δεν είναι κρίσιμες για το σχεδιασμό, μιας και στη μονή σήραγγα αναπτύσσονται πολύ μικρές τιμές του συγκεκριμένου εντατικού μεγέθους.

#### 4.3.3.4 ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

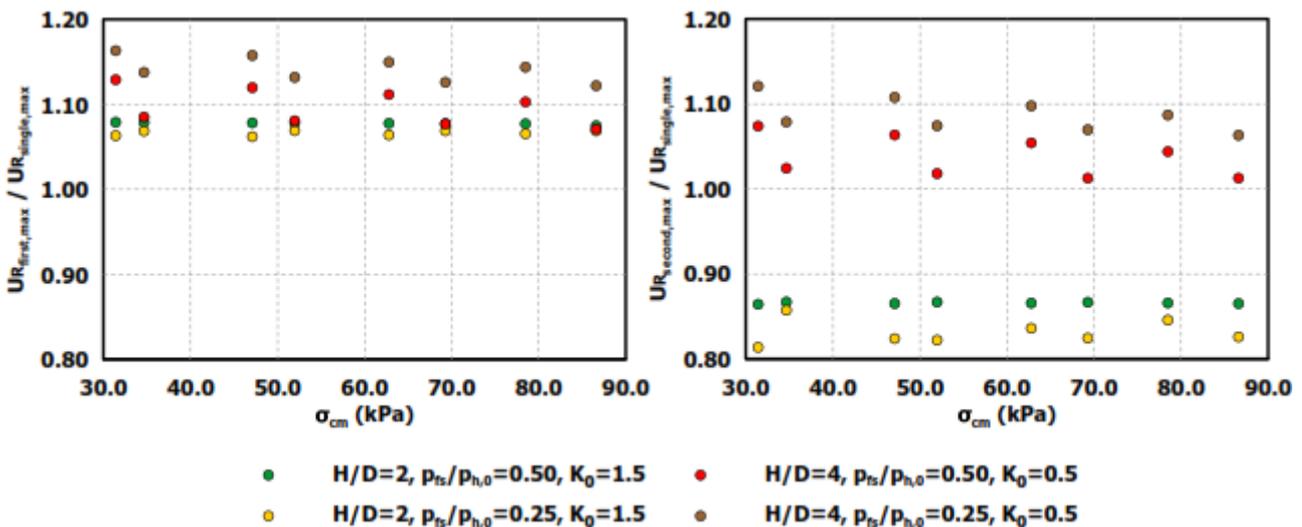
Επόμενο μέγεθος που θα διερευνηθεί είναι οι συγκλίσεις των τοιχωμάτων (Διαγρ. 5.54-4.55). Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν το βασικό μοντέλο ( $H/D=2 - K_0=0.5$ ) και την περίπτωση  $H/D=2 - K_0=1.0$ . Αντίστοιχα με το βασικό μοντέλο συμπεριφέρεται και η προσομοίωση πιο βαθιάς σήραγγας ( $H/D=4 - K_0=0.5$ ). Για  $K_0=0.5$  παρατηρούμε μικρή αλλά συστηματική αύξηση της αλληλεπίδρασης (επαύξηση των λόγων που έχουν τιμή μεγαλύτερη της μονάδας και ελάττωση αυτών με τιμή μικρότερη του ένα) και στους δύο κλάδους καθώς μειώνεται η πίεση στο μέτωπο, χωρίς έντονη διακύμανση της διαφοροποίησης σε συσχέτιση με το ύψος των υπερκειμένων. Αντίθετα, για  $K_0=1.0$  παρατηρείται μικρή αύξηση της αλληλεπίδρασης μόνο στην πρώτη σήραγγα, όχι στην δεύτερη. Επίσης, για  $K_0=1.5$  (Διαγρ. 4.56), στην αριστερή διατομή διαπιστώθηκε μείωση της αλληλεπίδρασης σε ότι έχει να κάνει με τις μέγιστες τιμές, ενώ αντίθετα στη δεύτερη σήραγγα έχουμε ξεκάθαρη αύξηση της αλληλεπίδρασης (η οποία εκφράζεται ως μείωση των συγκλίσεων μιας και η ύπαρξη του πρώτου κλάδου προκαλεί αποτόνωση των μετακινήσεων σε αυτή την περίπτωση).



Διάγραμμα 4.54 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των μετακινήσεων κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της πρώτης σήραγγας ανάμεσα στις δύο τιμές πίεσης στο μέτωπο. Η σύγκριση πραγματοποιείται για  $H/D=2 - K_0=0.5$  (αριστερά),  $H/D=2 - K_0=1.0$  (δεξιά) και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.



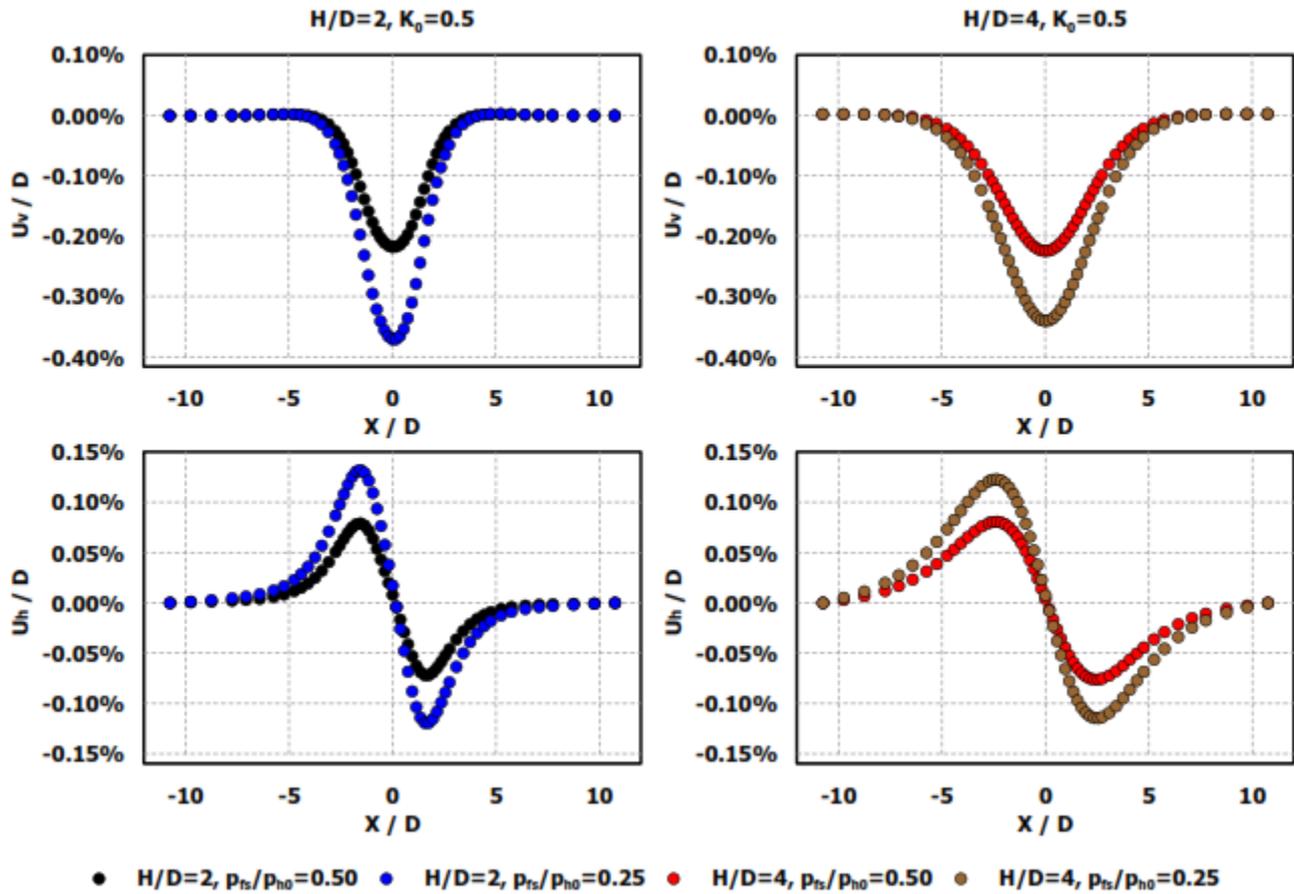
Διάγραμμα 4.55 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των μετακινήσεων κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της δεύτερης σήραγγας ανάμεσα στις δύο τιμές πίεσης στο μέτωπο. Η σύγκριση πραγματοποιείται για  $H/D=2 - K_0=0.5$  (αριστερά),  $H/D=2 - K_0=1.0$  (δεξιά) και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.



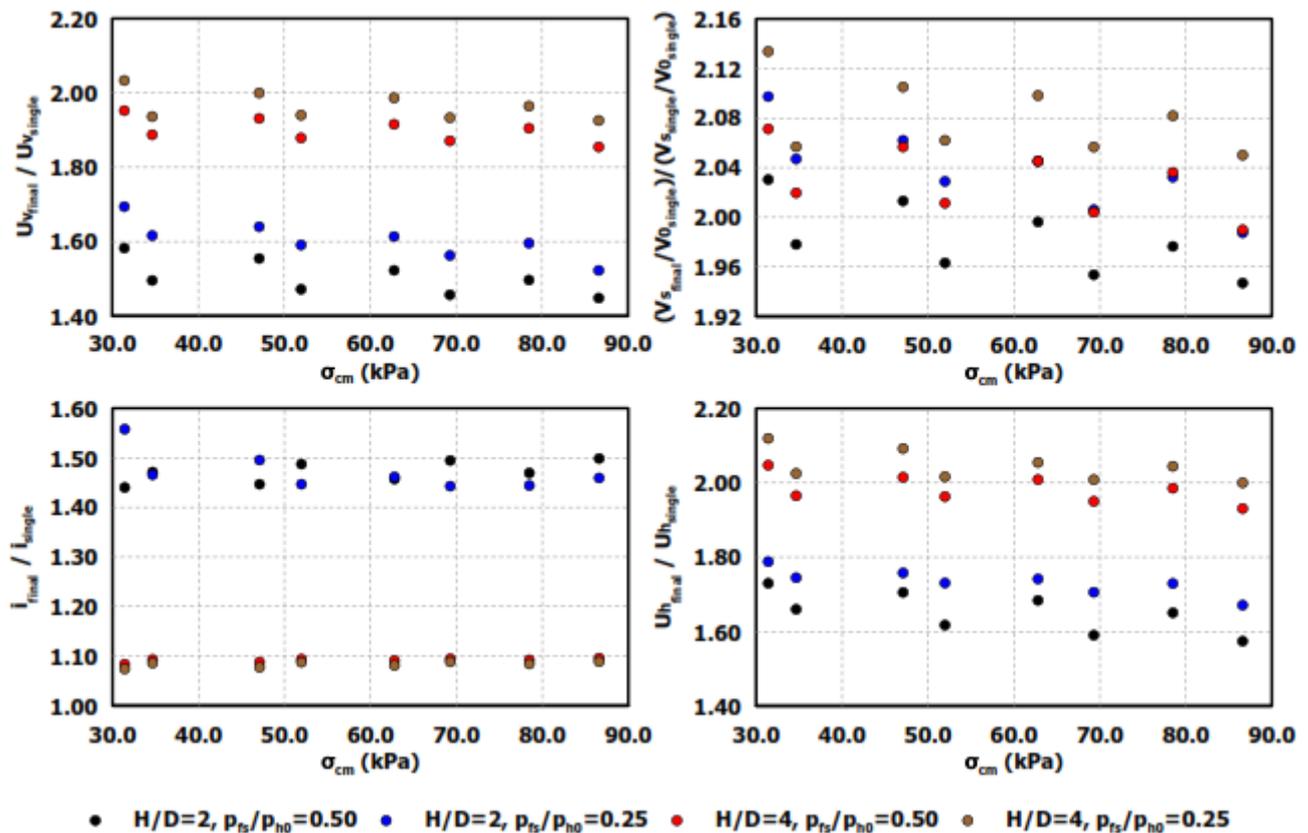
Διάγραμμα 4.56 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των μετακινήσεων (σε όρους μέγιστων τιμών) για την πρώτη (αριστερά) και τη δεύτερη (δεξιά) σήραγγα ανάμεσα στις δύο τιμές πίεσης μετώπου για τις περιπτώσεις  $H/D=4 - K_0=0.5$  και  $H/D=2 - K_0=1.5$ .

#### 4.3.3.5 ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Τελευταίο υπό εξέταση παραμορφωσιακό μέγεθος είναι οι μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους (Διαγρ. 4.57-4.58). Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, στις περιπτώσεις μειωμένης πίεσης μετώπου  $p_{fs}/\rho_{h0}=0.25$  αναπτύσσονται πιο έντονες καθιζήσεις, γεγονός που εκφράζεται σε όλα τα μεγέθη που σχετίζονται με το φαινόμενο (μέγιστη οριζόντια και κατα-



Διάγραμμα 4.57 Σύγκριση της αλληλεπίδρασης των καθιζήσεων ανάμεσα στις δύο τιμές πίεσης μετώπου και για τα δύο βάθη δίδυμων σηράγγων. Επάνω: Κατακόρυφες μετακινήσεις, Κάτω: Οριζόντιες μετακινήσεις.



Διάγραμμα 4.58 Σύγκριση της αλληλεπίδρασης στις καθιζήσεις (κατακόρυφες και οριζόντιες μετακινήσεις, πλάτος καμπύλης, απώλεια όγκου) ανάμεσα στις δύο τιμές πίεση μέτωπου και για τα δύο βάθη δίδυμων σηράγγων.

κόρυφη μετακίνηση, πλάτος καμπύλης καθιζήσεων, απώλεια εδαφικού όγκου). Παρόμοια είναι τα συμπεράσματα όταν συγκρίνουμε τα μεγέθη ανηγμένα ως προς τις τιμές για την αντίστοιχη μονή σήραγγα. Η αύξηση των καθιζήσεων είναι πιο έντονη εξαιτίας της διέλευσης του δεύτερου κλάδου όταν η πίεση που ασκείται στο μέτωπο κατά τη διάνοιξη της σήραγγας είναι μικρή. Αυτό γίνεται φανερό σε όλα τα σχετικά παραμορφωσιακά μεγέθη, όπως μαρτυρούν και τα Διαγρ. 4.58, με εξαίρεση μόνο το πλάτος της καμπύλης των καθιζήσεων όπου οι διαφορές δεν είναι σημαντικές.

#### 4.3.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΩΘΗΣΕΩΝ

Όπως παρουσιάστηκε και στο κεφάλαιο που αφορούσε τη μονή σήραγγα, ο συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων είναι το μέγεθος που επηρεάζει περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο τη μορφή και τις τιμές των αποτελεσμάτων, τόσο σε όρους δυνάμεων όσο και σε όρους μετακινήσεων. Ο λόγος που ο συντελεστής αυτός έχει τόσο μεγάλη επιρροή είναι ότι μεταβάλλει το γεωστατικό εντατικό πεδίο, εξισώνοντας την τις οριζόντιες με τις κατακόρυφες τάσεις για  $K_0=1.0$  και μετατρέποντας την οριζόντια συνιστώσα σε κύρια τάση για  $K_0=1.5$ . Όπως είναι φυσικό, οι αλλαγές έχουν άμεση επίπτωση σε οποιοδήποτε τεχνικό έργο διανοίγεται εντός του γεώδους σχηματισμού.

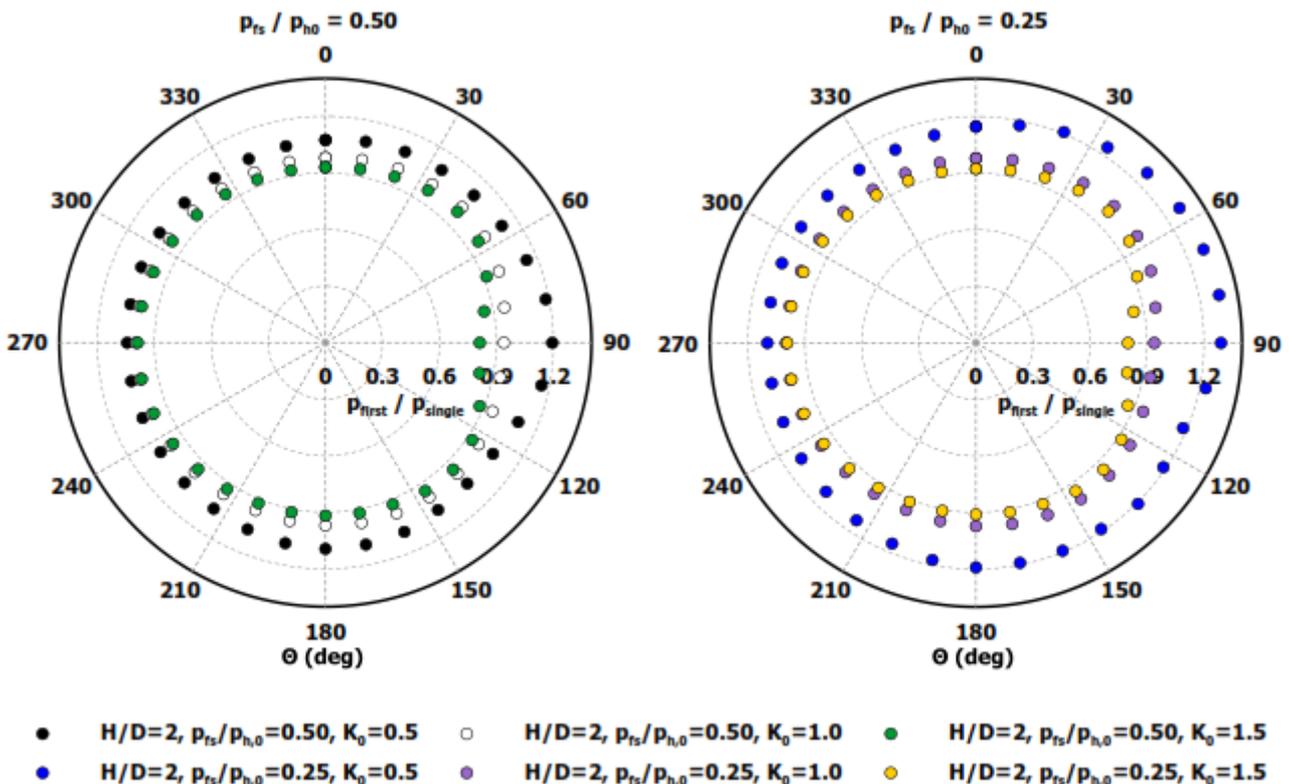
Στην ενότητα αυτή θα εξετασθεί η επιρροή του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων. Η σύγκριση θα πραγματοποιηθεί για ύψος υπερκειμένων  $H/D=2$  και για δύο διαφορετικές τιμές ασκούμενης κατά την

εκσκαφή πίεσης στο μέτωπο ( $p_{fs}/p_{ho}=0.50$  και  $p_{fs}/p_{ho}=0.25$ ), ενώ για κάθε περίπτωση εξετάζονται οκτώ ζεύγη γεωτεχνικών παραμέτρων.

#### 4.3.4.1 ΠΙΕΣΗ (ΦΟΡΤΙΟ) ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

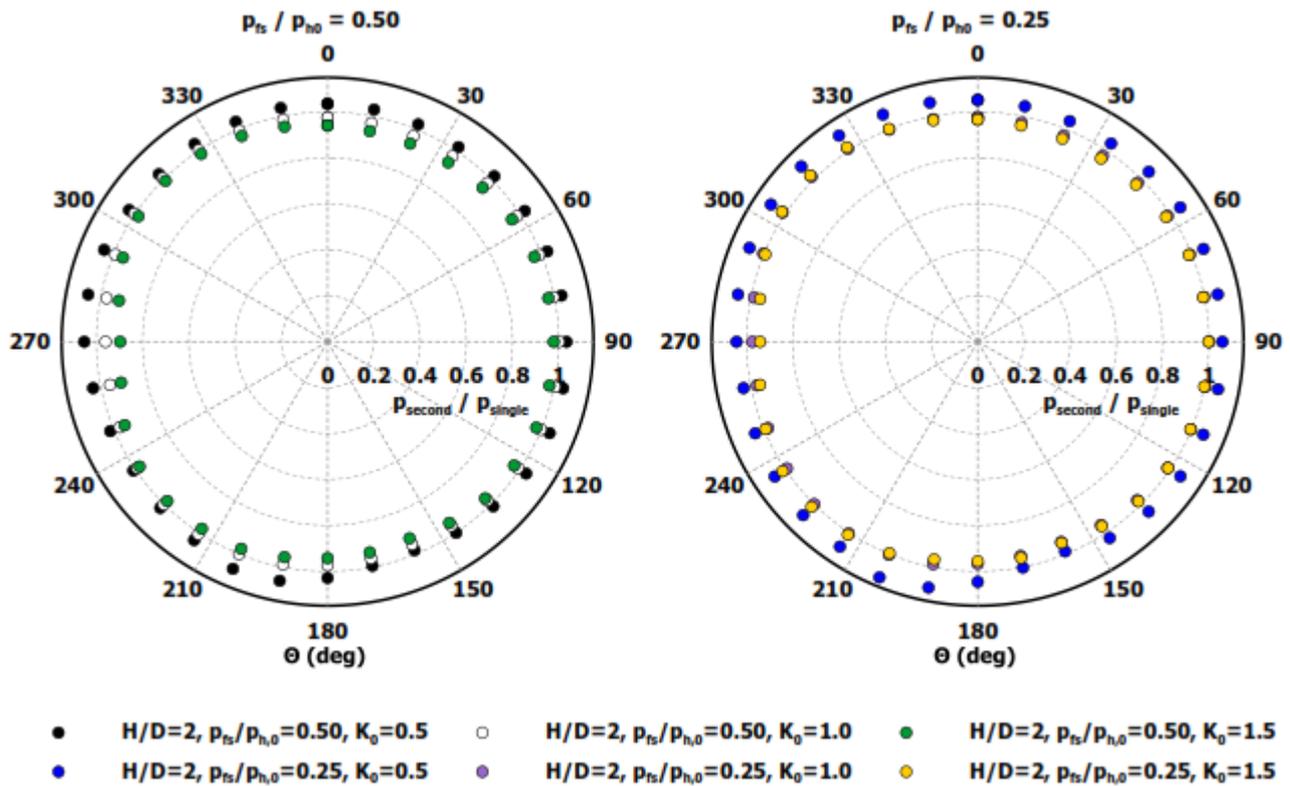
Όπως φαίνεται στο Διαγρ. 4.59 για τις πιέσεις της αριστερής (πρώτης) σήραγγας, η μεταβολή του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων είναι καθοριστική για την αλληλεπίδραση των δύο κλάδων. Ενώ στο βασικό μοντέλο ( $K_0=0.5$ ,  $p_{fs}/p_{ho}=0.50$ ) η αλληλεπίδραση προκαλεί επιπλέον πιέσεις (κυρίως στην εσωτερική παρειά), στις άλλες δύο περιπτώσεις η διέλευση της δεύτερης σήραγγας λειτουργεί ευεργετικά για την επένδυση της πρώτης. Για  $K_0=1.0$ , στην εσωτερική παρειά ( $\Theta=90^\circ$ ) παρατηρείται σημαντική μείωση των τάσεων, ενώ στην υπόλοιπη περιφέρεια οι λόγοι  $p_{first}/p_{single}$  είναι ελαφρώς μικρότεροι της μονάδας. Ακριβώς ίδια είναι η συμπεριφορά και για  $K_0=1.5$ , με τη διαφορά ότι η ελάττωση των τάσεων είναι ακόμα εντονότερη στην εσωτερική παρειά. Στα αντίστοιχα μοντέλα με μειωμένη πίεση μετώπου  $p_{fs}/p_{ho}=0.25$  η μορφή των αποτελεσμάτων είναι παρόμοια, μόνο που εδώ οι διαφοροποιήσεις είναι μεγαλύτερες.

Αντίστοιχη είναι η εικόνα και για τη δεξιά (δεύτερη) σήραγγα (Διαγρ. 4.60). Και εδώ η αύξηση του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων συντελεί στην αποφόρτιση της επένδυσης, η οποία γίνεται πιο έντονη στην εσωτερική παρειά ( $\Theta=270^\circ$ ). Επίσης, μικρότερες τιμές του λόγου  $p_{second}/p_{single}$  προκύπτουν, όπως και στην πρώτη σήραγγα, για  $K_0=1.5$ . Αντίθετα για  $K_0=0.5$



Διάγραμμα 4.59 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης της πίεσης επαφής κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της πρώτης σήραγγας ανάμεσα στις τρεις τιμές του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων. Η σύγκριση

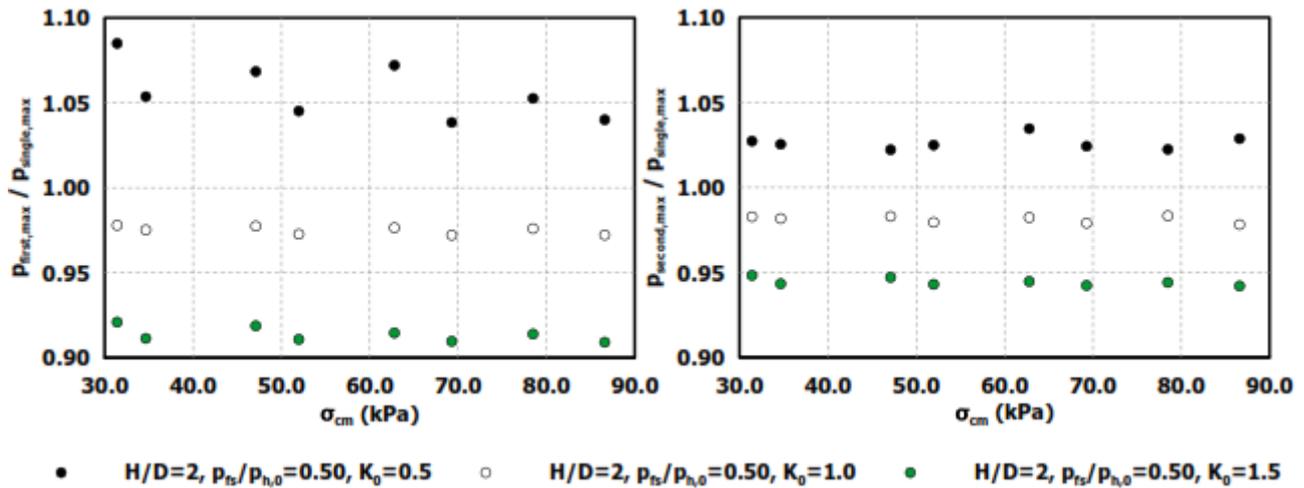
πραγματοποιείται για τις δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης μετώπου και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.



Διάγραμμα 4.60 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης της πίεσης επαφής κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της δεύτερης σήραγγας ανάμεσα στις τρεις τιμές του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων. Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης μετώπου και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

προκύπτει μικρή αύξηση των τάσεων, κυρίως στην εσωτερική παρειά. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η αλληλεπίδραση (μείωση των τάσεων) για  $K_0=1.0$  και  $K_0=1.5$  είναι πιο έντονη για τη μεγάλη πίεση μετώπου ( $p_{fs}/p_{ho}=0.50$ ).

Στο Διάγρ. 4.61 παρουσιάζεται η αλληλεπίδραση σε όρους μέγιστων τιμών του φορτίου επί της επένδυσης προς τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές για τη μονή σήραγγα. Μέσω των γραφημάτων αυτών επιβεβαιώνονται τα σχόλια που παρατέθηκαν παραπάνω για τα κυκλικά διαγράμματα. Τα αποτελέσματα από τα αριθμητικά προσομοιώματα για τη μειωμένη πίεση μετώπου παραλείπονται εδώ καθώς έρχονται σε απόλυτη συμφωνία με τα παρόντα για  $p_{fs}/p_{ho}=0.50$ .

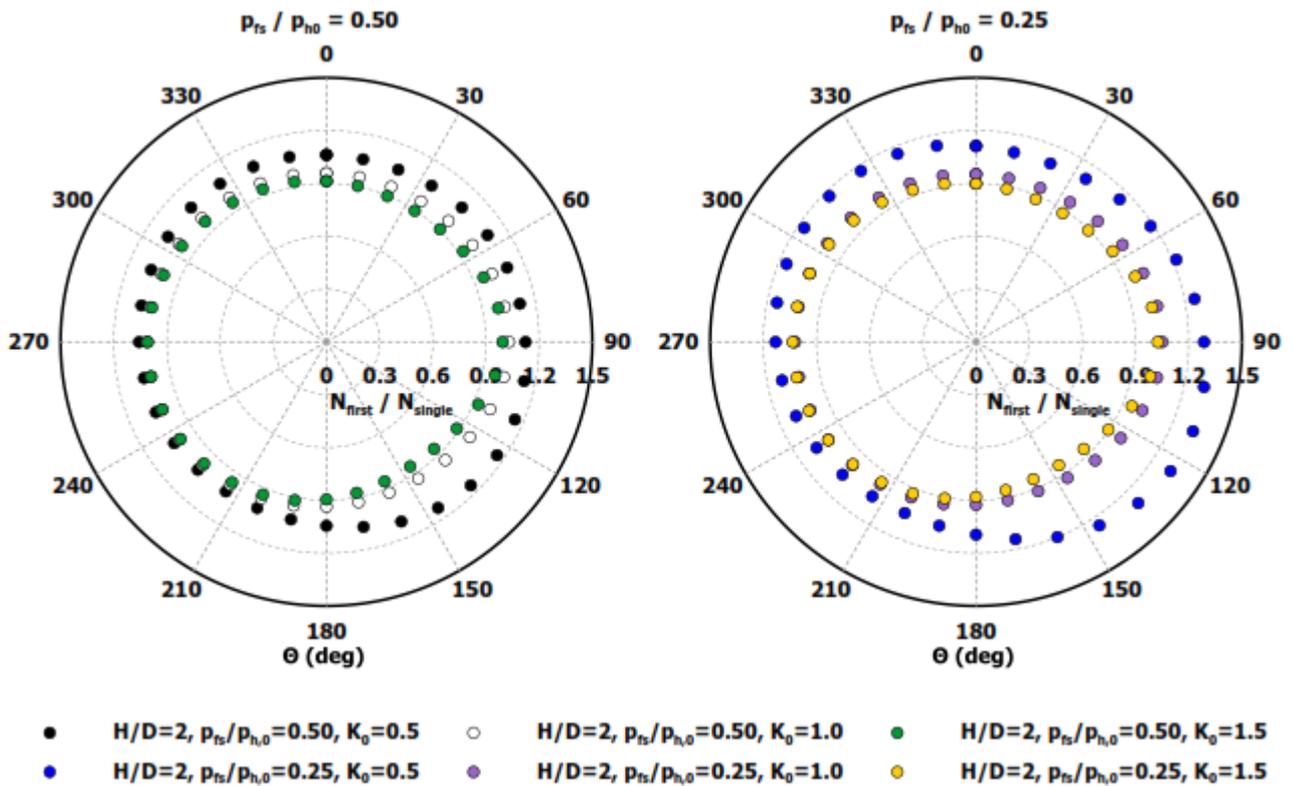


Διάγραμμα 4.61 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης της πίεσης επαφής (σε όρους μέγιστων τιμών) για την πρώτη (αριστερά) και τη δεύτερη (δεξιά) σήραγγα ανάμεσα στις τρεις τιμές του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων και για πίεση στο μέτωπο ίση με  $\rho_{fs}/\rho_{ho}=0.50$

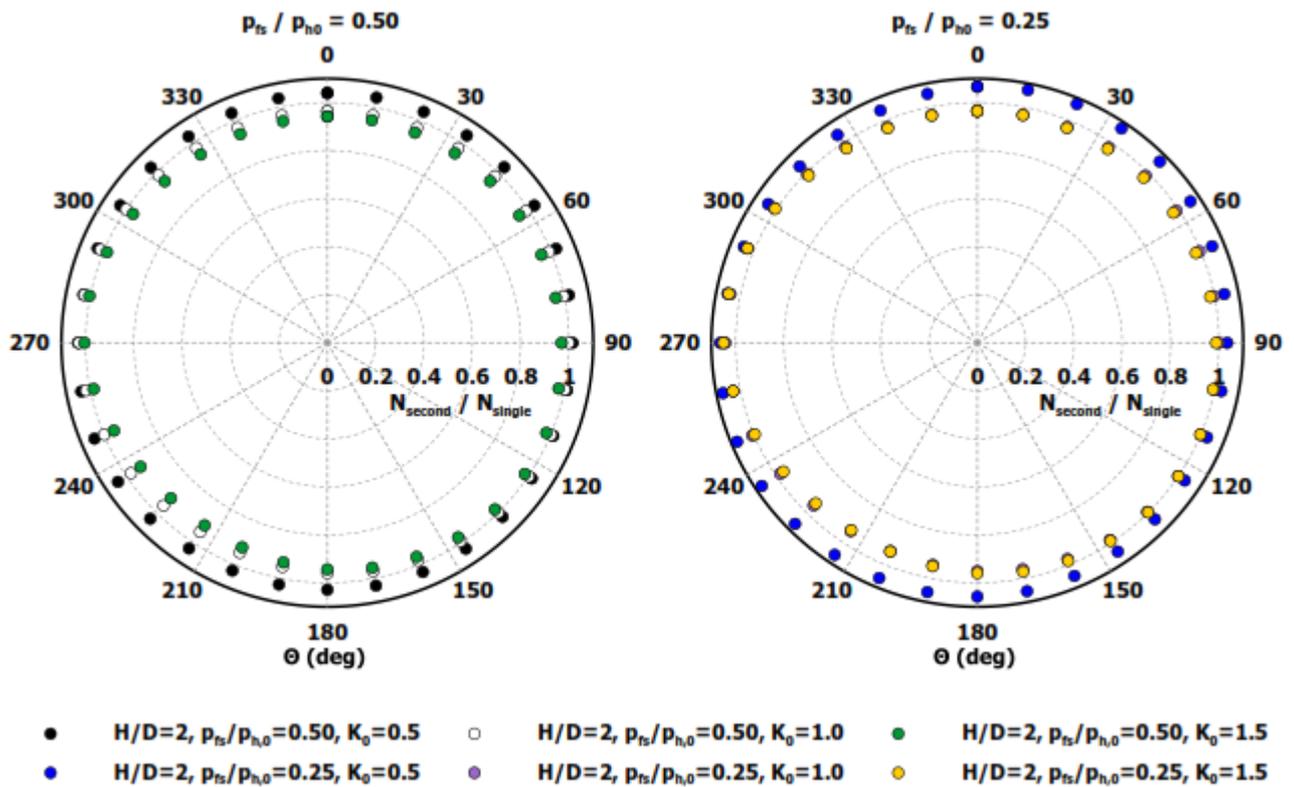
#### 4.3.4.2 ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

Παρόμοια εικόνα με τις πιέσεις έχουμε στην πρώτη σήραγγα και για τις αξονικές δυνάμεις (Διαγρ. 4.62). Για  $K_0=1.0$  και  $K_0=1.5$  παρατηρούμε μείωση των δυνάμεων (πιο έντονη για  $K_0=1.5$ ) στην στέψη και τον πυθμένα ( $\theta=360^\circ$  και  $\theta=180^\circ$  αντίστοιχα) λόγω της διέλευσης του δεύτερου κλάδου. Στις δύο παρειές όμως έχουμε τιμές του λόγου  $N_{first}/N_{single}$  οριακά μεγαλύτερες από τη μονάδα. Επίσης για την μικρή πίεση μετώπου ( $\rho_{fs}/\rho_{ho}=0.25$ ) οι διαφορές στην αλληλεπίδραση είναι εντονότερες, σε σύγκριση πάντα με το βασικό μοντέλο (συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων  $K_0=0.5$ ).

Αρκετά διαφοροποιημένη είναι η εικόνα στη δεύτερη σήραγγα (Διαγρ. 4.63). Για  $K_0=1.0$ , και σε σύγκριση με το βασικό μοντέλο, παρατηρούμε παρόμοιους (μεγαλύτερους της μονάδας) λόγους  $N_{second}/N_{single}$  στην εσωτερική παρειά, και ελαφρώς μικρότερους στην εξωτερική. Όμως, στην υπόλοιπη διατομή, για  $K_0=1.0$  η αλληλεπίδραση οδηγεί σε αποτόνωση των δυνάμεων, εντείνοντας έτσι τις διαφορές με το βασικό μοντέλο, κυρίως στον πυθμένα και τη στέψη της σήραγγας. Για  $K_0=1.5$ , η αλληλεπίδραση μειώνει ακόμα περισσότερο τις αξονικές δυνάμεις στην επένδυση (κυρίως ανάμεσα σε πυθμένα και εσωτερική παρειά,  $\theta=210^\circ$ ), με εξαίρεση την εσωτερική παρειά όπου ο λόγος είναι ίσος με τη μονάδα. Για μειωμένη πίεση με-



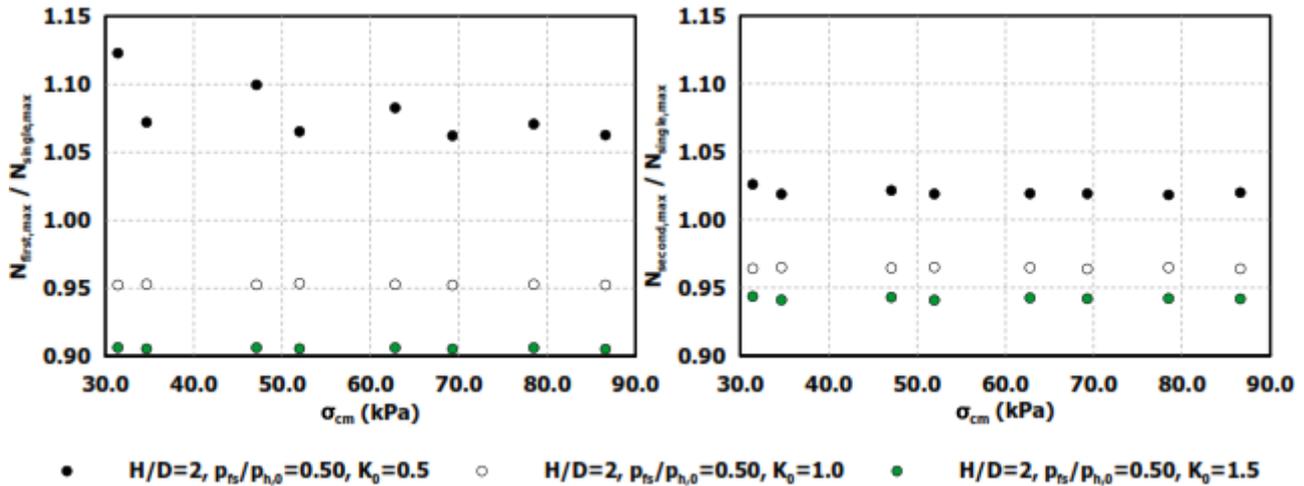
Διάγραμμα 4.62 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της πρώτης σήραγγας ανάμεσα στις τρεις τιμές του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων. Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης μετώπου και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.



Διάγραμμα 4.63 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της δεύτερης σήραγγας ανάμεσα στις τρεις τιμές του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων. Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης μετώπου και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

τώπου ( $p_{fs}/p_{ho}=0.25$ ) και για  $K_0=1.0$  η αλληλεπίδραση γίνεται ελαφρώς πιο έντονη, ενώ για  $K_0=1.5$  παρατηρείται γενική αύξηση των λόγων (δηλαδή αίρεται εν μέρη η αποφόρτιση που προαναφέρθηκε).

Στο Διαγρ. 4.64 όπου παρουσιάζονται οι λόγοι αλληλεπίδρασης για τις μέγιστες τιμές γίνεται εμφανής η μεγάλη διαφορά στη συμπεριφορά του βασικού μοντέλου ( $K_0=0.5$ ) σε σχέση με τα δύο προσομοιώματα με τον αυξημένο συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων.



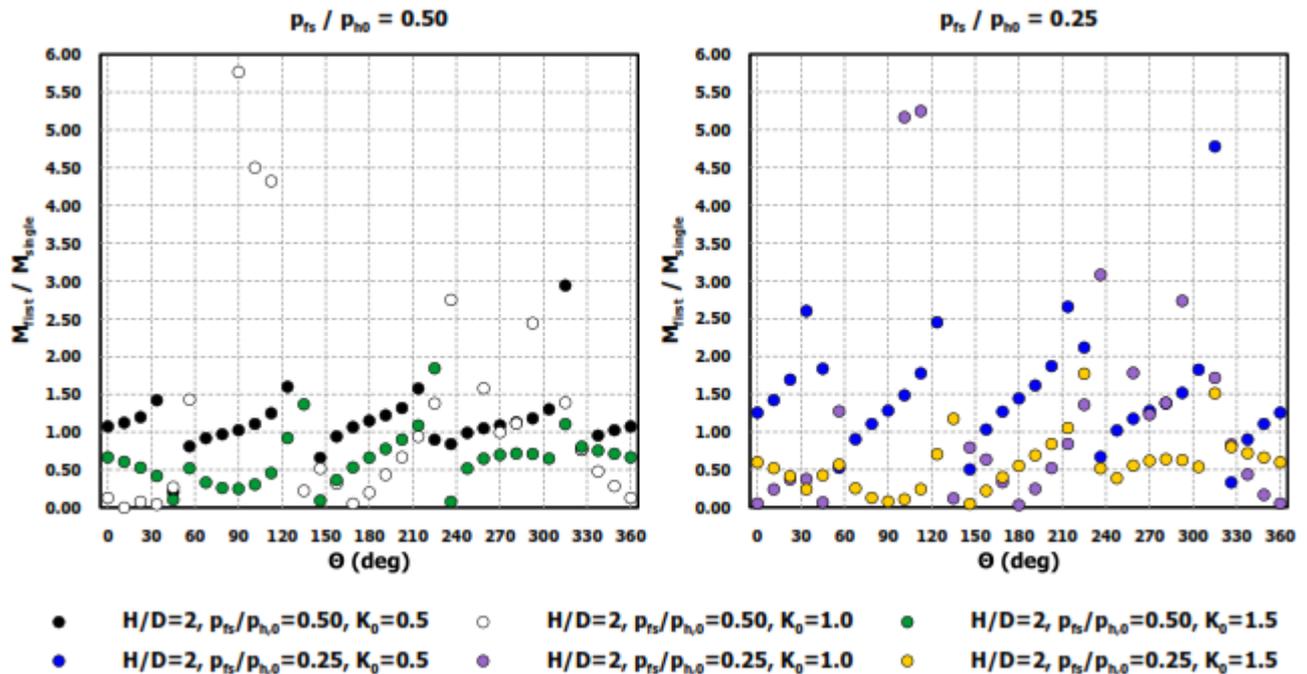
Διάγραμμα 4.64 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των αξονικών δυνάμεων (σε όρους μέγιστων τιμών) για την πρώτη (αριστερά) και τη δεύτερη (δεξιά) σήραγγα ανάμεσα στις τρεις τιμές του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων και για πίεση στο μέτωπο ίση με  $p_{fs}/p_{ho}=0.50$

#### 4.3.4.3 ΡΟΠΕΣ ΚΑΜΨΗΣ ΣΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

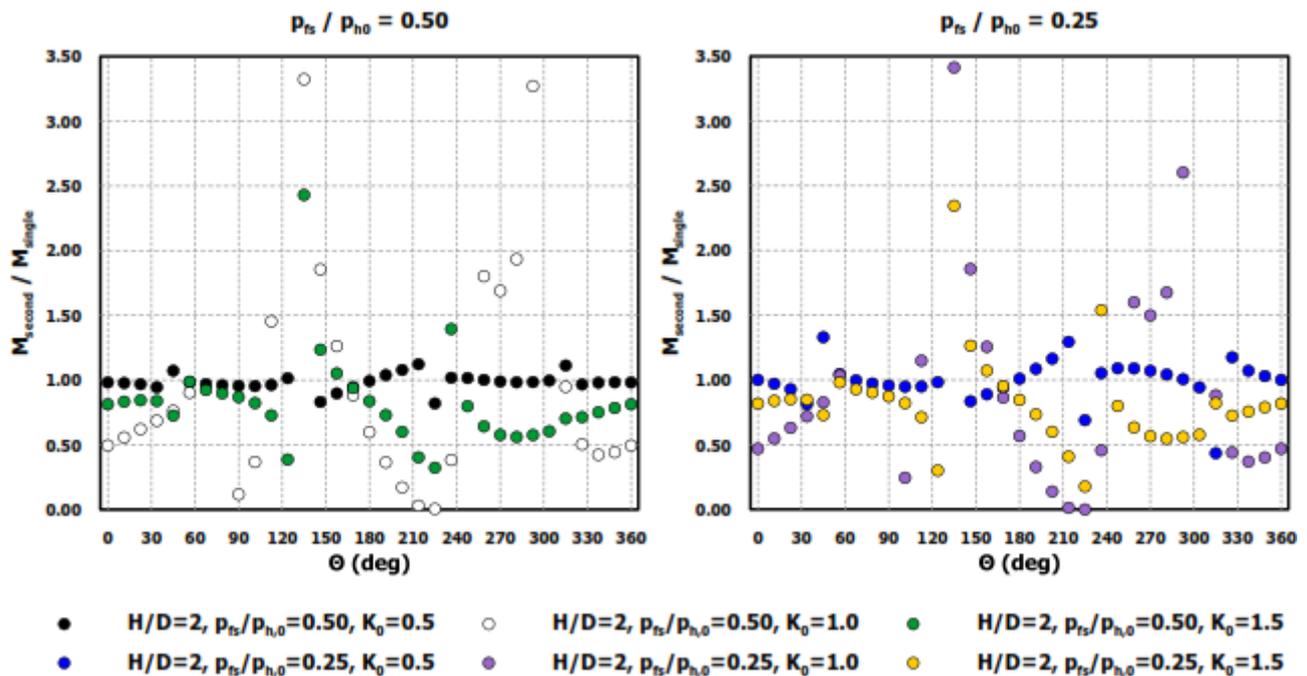
Οι λόγοι της αλληλεπίδρασης στις ροπές κάμψης επηρεάζονται έντονα από την ανομοιόμορφη κατανομή των ροπών στη περιφέρεια της μονής σήραγγας. Η μορφή των αποτελεσμάτων είναι παρόμοια και για τις τρεις τιμές του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων (Διαγρ. 4.65), δηλαδή υπάρχουν συγκεκριμένες γωνίες στις οποίες οι λόγοι παίρνουν πολύ μεγάλες τιμές (εξαιτίας της μικρής ροπής στη μονή σήραγγα στο αντίστοιχο σημείο). Στα υπόλοιπα σημεία, για  $K_0=1.0$  οι λόγοι  $M_{first}/M_{single}$  είναι εν γένει μικρότεροι της μονάδας (δηλαδή η αλληλεπίδραση είναι ευεργετική για την επένδυση) και σίγουρα μικρότεροι από ότι για  $K_0=0.5$ . Αντίστοιχα, για  $K_0=1.5$  στην πλειονότητα των σημείων της περιφέρειας προκύπτει ευεργετική αλληλεπίδραση (μείωση δηλαδή των ροπών). Τέλος, για μειωμένη πίεση μετώπου ( $p_{fs}/p_{ho} = 0.25$ ) η αλληλεπίδραση και για τους τρεις συντελεστές οριζόντιων ωθήσεων είναι αυξημένη (δηλαδή αύξηση των λόγων όταν είναι μεγαλύτεροι της μονάδας και αντίστοιχα μείωση όταν είναι μικρότεροι της μονάδας).

Όσον αφορά τη δεύτερη σήραγγα, όπως φαίνεται στο Διαγρ. 4.66, για  $K_0=0.5$  οι λόγοι  $M_{second}/M_{single}$  παίρνουν σε γενικές γραμμές τιμές γύρω από τη μονάδα. Για  $K_0=1.0$  τα περισσότερα σημεία της περιφέρειας δέχονται μείωση των ροπών εξαιτίας της ύπαρξης της πρώτης σήραγγας. Εντούτοις, υπάρχουν μεμονωμένα σημεία, κυρίως γύρω από την εσωτερική παρειά, όπου προκύπτουν λόγοι σημαντικά μεγαλύτεροι της μονάδας. Αντίστοιχα, για  $K_0=1.5$  η αλληλεπίδραση είναι επίσης ευεργετική στα περισσότερα σημεία, λιγότερο όμως

απ' ότι για  $K_0=1.0$ . Επίσης, κατά την εξέταση της διάνοιξης με μειωμένη πίεση μετώπου προκύπτουν λόγοι αλληλεπίδρασης α) για  $K_0=0.5$  μεγαλύτεροι, β) για  $K_0=1.0$  μικρότεροι και γ) για  $K_0=1.5$  παρόμοιοι συγκριτικά με τις αντίστοιχες περιπτώσεις διάνοιξης με πίεση  $p_{fs}/p_{h0}=0.50$ .



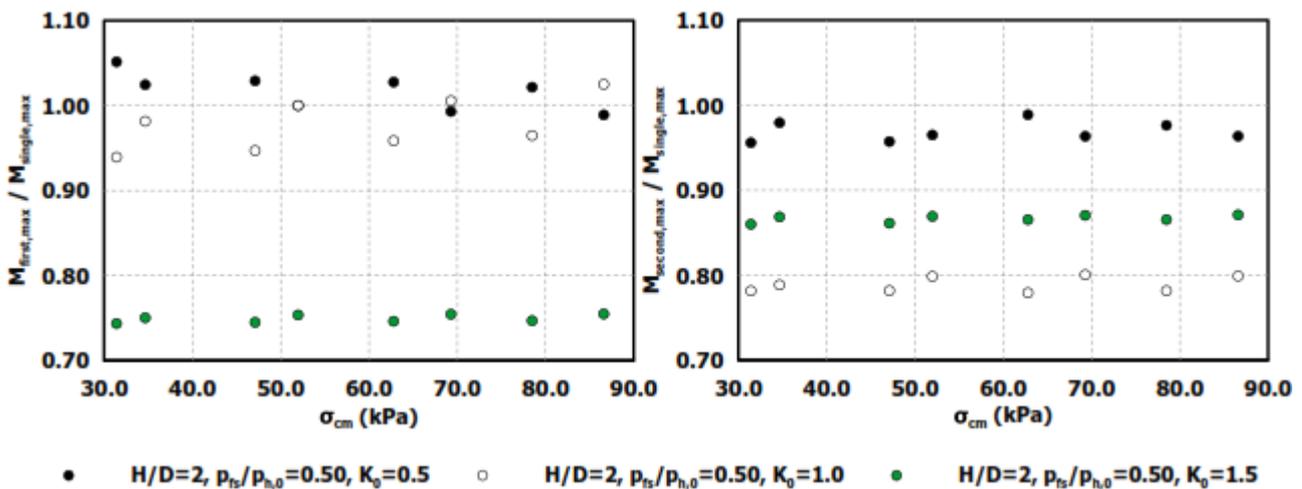
Διάγραμμα 4.65 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των ροπών κάμψης κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της πρώτης σήραγγας ανάμεσα στις τρεις τιμές του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων. Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης μετώπου και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.



Διάγραμμα 4.66 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των ροπών κάμψης κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της δεύτερης σήραγγας ανάμεσα στις τρεις τιμές του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων. Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης μετώπου και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι όλοι οι λόγοι αλληλεπίδρασης για την περίπτωση  $K_0=1.0$  δεν είναι ιδιαίτερα αξιόπιστοι και ενδεικτικοί της όλης κατάστασης, μιας και οι ροπές κάμψης για τη συγκεκριμένη περίπτωση στην μονή σήραγγα παρουσιάζουν πολύ μικρές τιμές, όπως είδαμε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Επίσης, εξαιτίας της ανομοιομορφίας που παρουσιάζει η κατανομή του συγκεκριμένου εντατικού μεγέθους στην περιφέρεια της υποστήριξης, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη η εξέταση της αλληλεπίδρασης μέσω των μέγιστων τιμών των ροπών (Διαγρ. 4.67). Στον αριστερό κλάδο παρατηρούμε αύξηση των ροπών κατά τη διέλευση του δεύτερου κλάδου για  $K_0=0.5$ , μείωση για  $K_0=1.5$ , ενώ για  $K_0=1.0$  οι τιμές παραμένουν περίπου σταθερές. Μάλιστα, οι διαφορές ανάμεσα στους τρεις συντελεστές οριζόντιων ωθήσεων αμβλύνονται για τι μικρότερη τιμή της πίεσης μετώπου.



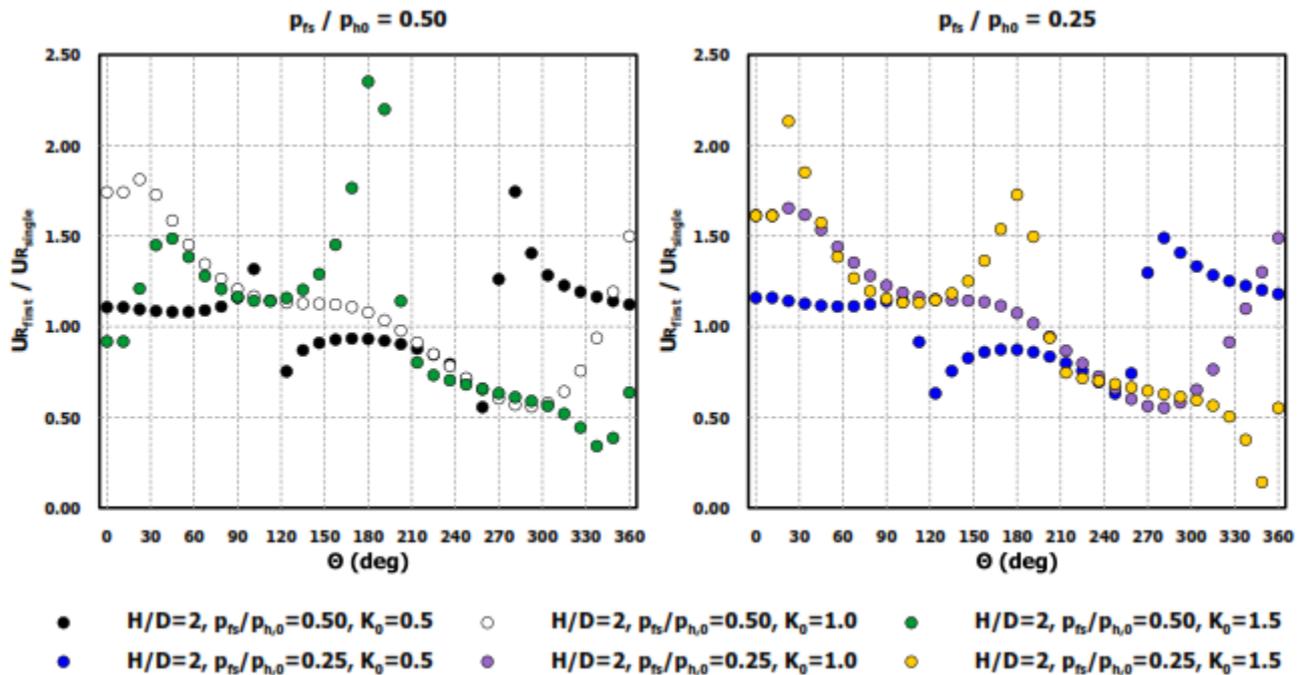
Διάγραμμα 4.67 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των ροπών κάμψης (σε όρους μέγιστων τιμών) για την πρώτη (αριστερά) και τη δεύτερη (δεξιά) σήραγγα ανάμεσα στις τρεις τιμές του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων και για πίεση στο μέτωπο ίση με  $\rho_{fs}/\rho_{n0}=0.50$

Στην δεύτερη σήραγγα, και για τις τρεις περιπτώσεις οι λόγοι  $M_{second}/M_{single}$  είναι μικρότεροι της μονάδας. Πιο συγκεκριμένα για  $K_0=1.0$  κυμαίνονται γύρω από το 0.80, για  $K_0=1.5$  συναντάμε τιμές γύρω στο 0.85, ενώ για  $K_0=0.5$  οι λόγοι είναι ελαφρώς μικρότεροι της μονάδας. Για το συγκεκριμένο εντατικό μέγεθος στον δεύτερο κλάδο η πίεση στο μέτωπο δεν δείχνει να παίζει σημαντικό ρόλο.

#### 4.3.4.4 ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Τελευταίο μέγεθος που θα εξετασθεί στην παρούσα ενότητα είναι οι συγκλίσεις των τοιχωμάτων των σηράγγων. Όσον αφορά τον αριστερά (πρώτο) κλάδο και την τιμή του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων  $K_0=1.0$ , παρατηρούμε στο Διάγρ. 4.68 ότι στην εσωτερική ημιδιατομή ( $\theta=0^\circ-180^\circ$ ) η διέλευση της δεύτερης σήραγγας αυξάνει τις μετατοπίσεις προς το εσωτερικό της διατομής, κυρίως μάλιστα στη στέψη αυτής. Αντίθετα, στην υπόλοιπη

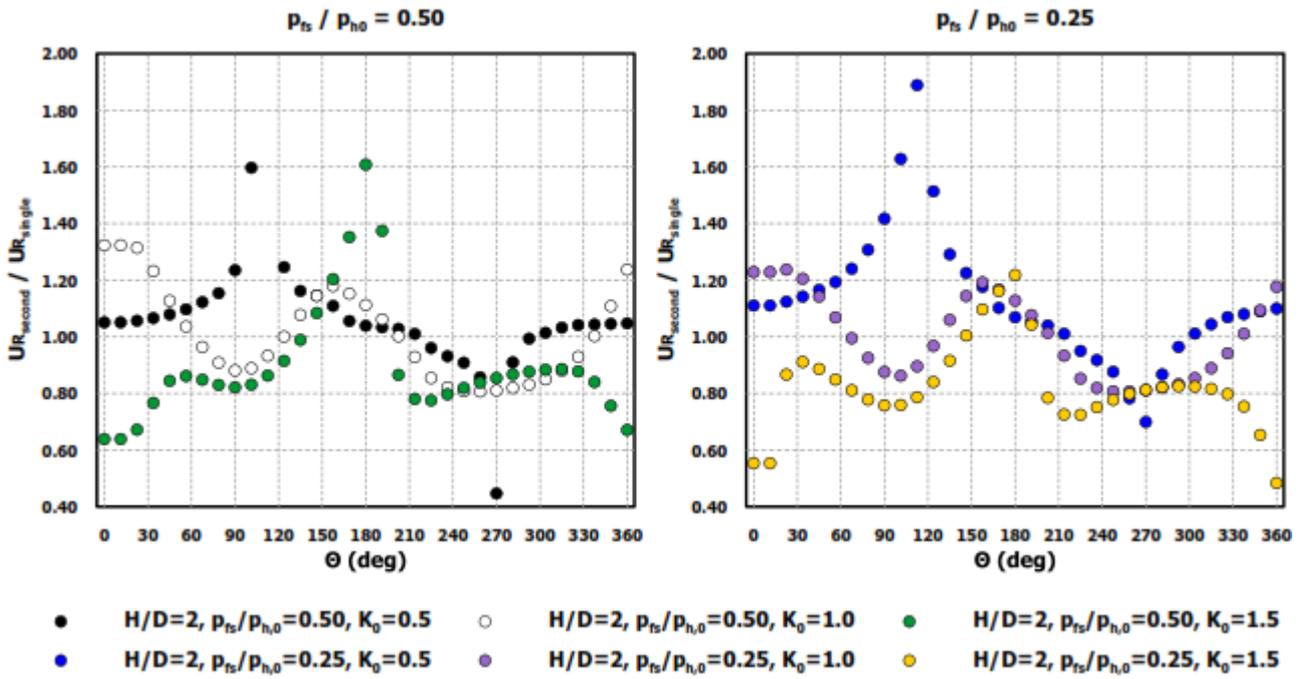
(εξωτερική) ημιδιατομή οι συγκλίσεις είναι μικρότερες σε σχέση με τη μονή σήραγγα. Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα και για  $K_0=1.5$ , με τη διαφορά ότι εδώ η μέγιστη αλληλεπίδραση προκύπτει στον πυθμένα αντί για τη στέψη. Για  $K_0=0.5$ , όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω παρατηρείται μείωση των συγκλίσεων στον πυθμένα και αύξηση στην υπόλοιπη διατομή κατά την διέλευση του δεύτερου κλάδου. Όμως, για μειωμένη πίεση μετώπου, ενώ για  $K_0=1.0$  παρατηρείται απλά μια μικρή μείωση της αλληλεπίδρασης, για  $K_0=1.5$  αυξάνεται σημαντικά ο λόγος  $U_{R,first}/U_{R,single}$  στη στέψη της σήραγγας και μειώνεται στον πυθμένα. Σημειώνεται ότι για  $K_0=0.5$  οι τιμές του λόγου παραμένουν γύρω από τη μονάδα, με εξαίρεση την εξωτερική παρειά ( $\Theta=270^\circ$ ) όπου σημειώνεται σημαντική αύξηση.



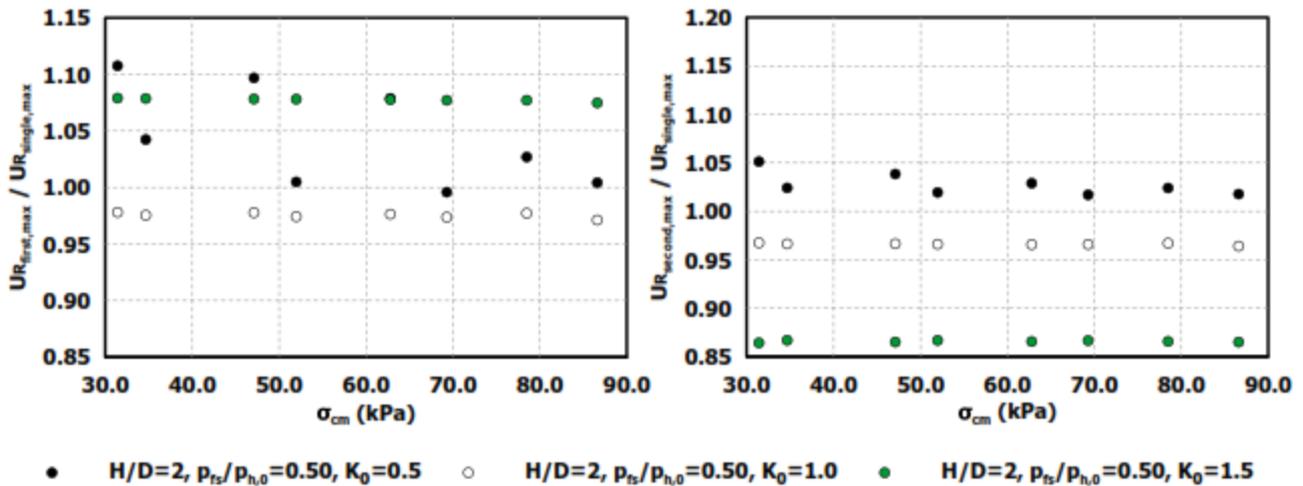
Διάγραμμα 4.68 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των μετακινήσεων κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της πρώτης σήραγγας ανάμεσα στις τρεις τιμές του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων. Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης μετώπου και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Στη δεύτερη (δεξιά) σήραγγα (Διάγρ. 4.69) παρατηρούμε μείωση των συγκλίσεων από την ύπαρξη του πρώτου κλάδου στις δύο παρειές για  $K_0=1.0$ , με ταυτόχρονη αύξησή τους στον πυθμένα και κυρίως στη στέψη της διατομής. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με ότι είχαμε δει για  $K_0=0.5$ , όπου το σύνολο σχεδόν της διατομής παραλαμβάνει αυξημένες μετατοπίσεις, ειδικότερα δε στην εξωτερική παρειά όπου λόγος  $U_{R,second}/U_{R,single}$  φτάνει το 1.6. Στην περίπτωση του  $K_0=1.5$  ο πυθμένας φορτίζεται με σημαντικά βεβαρυμμένες μετατοπίσεις, ενώ η υπόλοιπη περίμετρος συγκλίνει λιγότερο απ' ό,τι η μονή σήραγγα. Τέλος, για τη μειωμένη πίεση μετώπου και για  $K_0=0.5$  η αλληλεπίδραση αυξάνεται, ενώ αντίθετα για τις άλλες δυο περιπτώσεις συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων μειώνεται. Ειδικότερα σημαντική μείωση του λόγου παρατηρείται στον πυθμένα της διατομής για  $K_0=1.5$ .

Όλα τα παραπάνω φαίνονται και στο Διαγρ. 4.70 όπου πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις διάφορες τιμές του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων με βάση την αλληλεπίδραση σε όρους μέγιστων συγκλίσεων των διατομών.



Διάγραμμα 4.69 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των μετακινήσεων κατά μήκος της περιφέρειας της επένδυσης της δεύτερης σήραγγας ανάμεσα στις τρεις τιμές του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων. Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης μετώπου και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.



Διάγραμμα 4.70 Σύγκριση των λόγων αλληλεπίδρασης των μετακινήσεων (σε όρους μέγιστων τιμών) για την πρώτη (αριστερά) και τη δεύτερη (δεξιά) σήραγγα ανάμεσα στις τρεις τιμές του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων και για πίεση στο μέτωπο ίση με  $p_{fs}/p_{h0}=0.50$

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Η συστηματική ανάπτυξη των υπόγειων έργων που συντελείται τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει στην ανάγκη για ολοένα και αυξανόμενη κατασκευή δίδυμων σιδηρόδρομων. Κινούμενη μέσα σε αυτά τα πλαίσια, η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης δίδυμων σιδηρόδρομων, εκσκαπτόμενων με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με πίεση στο μέτωπο (EPB/Slurry TBM), σε μικρό βάθος από την επιφάνεια και εντός εδαφικού υλικού με ασθενή μηχανικά και παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά. Η έρευνα πραγματοποιείται μέσω τριδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων που αναπτύχθηκαν στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Κυριότερα χαρακτηριστικά των αναλύσεων είναι η χρήση του καταστατικού μοντέλου Mohr – Coulomb, η διάμετρος της σήραγγας  $D=6\text{m}$ , το πλάτος του πυλώνα (από παρειά σε παρειά)  $W=0.5D$ , η εφαρμογή ομοιόμορφης πίεσης στο μέτωπο, η απουσία υποστήριξης για ένα βήμα μετά την εκσκαφή και στη συνέχεια η εγκατάσταση δύσκαμπτης επένδυσης από σκυρόδεμα και τέλος η απουσία νερού από τον εδαφικό όγκο.

Μέσω των τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων εξετάζεται η επίδραση μερικών από τις βασικότερες παραμέτρους στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σιδηρόδρομων. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν είναι: (i) το ύψος των υπερκειμένων, (ii) η οριζόντια απόσταση των μετώπων, (iii) ο συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων, (iv) η ασκούμενη από το μηχάνημα πίεση στο μέτωπο και (v) τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Τα μεγέθη μέσω των οποίων διερευνάται η αλληλεπίδραση είναι (1) η πίεση επαφής (φορτίο) στην επένδυση από οπλισμένο σκυρόδεμα, (2) οι αξονικές δυνάμεις, (3) οι ροπές κάμψης στην επένδυση, (4) οι μετακινήσεις στην περιφέρεια των διατομών, (5) οι μετακινήσεις στο μέσο του πυλώνα, (6) οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

Για την καλύτερη εποπτεία του φαινομένου της αλληλεπίδρασης αρχικά παρουσιάστηκαν αποτελέσματα σχετικά με τη μονή σήραγγα, με σκοπό να περιγραφεί η επιρροή της κάθε παραμέτρου στα μεγέθη που εξετάστηκαν. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση του βάθους προκαλεί μείωση της πίεσης επαφής στην υποστήριξη, των αξονικών δυνάμεων και ροπών (τα μεγέθη είναι ανηγμένα ως προς τη μέση γεωστατική τάση στον άξονα της σήραγγας, ώστε να παρουσιασθούν αδιαστατοποιημένα), αυξάνει όμως τις μετατοπίσεις στην περιφέρεια της διατομής. Παρόμοια αποτελέσματα προκαλεί και η μείωση της πίεσης στο μέτωπο. Η βελτίωση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών έχει ως συνέπεια την μικρή αύξηση των πιέσεων και των αξονικών δυνάμεων, ενώ αντιθέτως προκαλεί μείωση των ροπών κάμψης και των μετακινήσεων. Όσον αφορά τις καθιζήσεις, η αύξηση του βάθους μειώνει τις μετακινήσεις στην επιφάνεια (οριζόντιες και κατακόρυφες) αλλά αυξάνει σημαντικά το πλάτος της καμπύλης και την απώλεια όγκου. Η μεγαλύτερη πίεση στο μέτωπο μειώνει όλα τα μεγέθη των καθιζήσεων (λιγότερο επηρεάζεται ο παράγοντας του πλάτους  $i$ ). Τέλος, βελτιωμένα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά οδηγούν σε περιορισμό των μετακινήσεων στην επιφάνεια και της απώλειας όγκου, ενώ δεν επηρεάζεται σημαντικά το πλάτος της καμπύλης.

Ο συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων παρουσιάζει την μεγαλύτερη επιρροή καθώς μεταβάλλει, όχι μόνο τις τιμές, αλλά και την κατανομή των μεγεθών στην περίμετρο της διατομής. Σε σύγκριση με την περίπτωση  $K_0=0.5$  η πίεση επαφής αυξάνεται για  $K_0=1.0$ , ενώ ελάχιστα

μεταβάλλεται για  $K_0=1.5$ . Η αύξηση του  $K_0$  οδηγεί σε μείωση των αξονικών δυνάμεων στις παρειές και ταυτόχρονη αύξηση στη στέψη και τον πυθμένα. Για  $K_0=1.0$  παρατηρήθηκε σημαντική μείωση των ροπών κάμψης και των μετακινήσεων στην περίμετρο. Ομοίως για  $K_0=1.5$  οι τιμές των δύο μεγεθών μειώνονται, σε μικρότερο όμως βαθμό. Επίσης σημειώθηκε αντιστροφή των προσήμων στις ροπές κάμψης και μετατόπιση του διαγράμματος των μετακινήσεων κατά  $90^\circ$ .

Στη συνέχεια της εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν την αλληλεπίδραση κατά τη διάνοιξη των δίδυμων σηράγγων στο βασικό μοντέλο ( $H/D=2$ ,  $K_0=0.5$ ,  $p_{fs}/p_{ho}=0.5$ , και  $F_{HD}/D=10$  και για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά δεδομένα). Υπενθυμίζεται ότι η ένταση της αλληλεπίδρασης εκφράζεται ως ο λόγος ενός εντατικού ή παραμορφωσιακού μεγέθους σε μία από τις δίδυμες σήραγγες προς την αντίστοιχη τιμή του μεγέθους στη μονή σήραγγα («single tunnel»). Η αριστερή από τις δύο σήραγγες εκσκάπτεται πρώτη και αναφέρεται ως «first tunnel» ή προϋπάρχουσα και η δεξιά εκσκάπτεται στη συνέχεια («second tunnel»). Επίσης, ο προσανατολισμός μέτρησης της γωνίας στις δύο σήραγγες είναι δεξιόστροφος και παρουσιάζεται στην Εικ. 5.1. Ως εσωτερικές παρειές θεωρούνται οι πλευρές με γωνία  $\theta=90^\circ$  για την πρώτη σήραγγα και  $\theta=270^\circ$  για τη δεύτερη.



Εικόνα 5.1 Προσανατολισμός μέτρησης της γωνίας για τις δύο σήραγγες.

Ως κυρίαρχη τάση παρατηρήθηκε ότι η αριστερή (πρώτη) διατομή δέχεται εντονότερα φαινόμενα αλληλεπίδρασης, τα οποία εκφράζονται ως αύξηση των πιέσεων, των εντατικών και των παραμορφωσιακών μεγεθών. Η επίδραση του φαινομένου είναι πιο έντονη στην εσωτερική παρειά της εκσκαφής. Αντίθετα η δεύτερη σήραγγα επηρεάζεται σαφώς λιγότερο σε σχέση με την πρώτη. Μάλιστα η εκσκαφή της προσεγγίζει περισσότερο τη διάνοιξη σήραγγας μονού κλάδου. Και εδώ πάντως πιο έντονα φαινόμενα αλληλεπίδρασης παρατηρούνται στην εσωτερική παρειά, κοντά δηλαδή στον δίδυμο κλάδο.

Στον Πίν. 5.1 παρουσιάζονται συνοπτικά εύρη τιμών για τους λόγους αλληλεπίδρασης όλων των μεγεθών που εξετάστηκαν, για την πρώτη και για τη δεύτερη σήραγγα. Οι υψηλότερες τιμές των λόγων αντιστοιχούν στις δυσμενέστερες γεωτεχνικές, καθώς όσο βελτιώνονται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά τόσο μειώνεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.

Τα συμπεράσματα που αναφέρθηκαν στην παραπάνω παράγραφο ισχύουν επ' ακριβώς για την πίεση επαφής και τις αξονικές δυνάμεις στην υποστήριξη. Στις ροπές κάμψης και τις

μετακινήσεις παρατηρήθηκε ότι υπάρχουν περιοχές στην περιφέρεια των σηράγγων στις οποίες το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης λειτουργεί ευεργετικά («ανακουφιστικά»), καθώς τα μεγέθη που αναπτύσσονται είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα της μονής σήραγγας. Όσον αφορά τις καθιζήσεις, η δεύτερη σήραγγα προκαλεί ελαφρώς μεγαλύτερες μετακινήσεις στην επιφάνεια σε σχέση με την πρώτη, με αποτέλεσμα η τελική καμπύλη να είναι μετατοπισμένη ελαφρώς προς τα δεξιά. Το πλάτος της καμπύλης των καθιζήσεων δεν παρουσιάζει διαφοροποιήσεις ανάμεσα στις δύο σήραγγες.

Πίνακας 5.1 Εύρη τιμών των λόγων αλληλεπίδρασης για το βασικό μοντέλο

Αλληλεπίδραση πρώτης σήραγγας		Αλληλεπίδραση δεύτερης σήραγγας	
$\rho_{\text{first},\theta=90^\circ}/\rho_{\text{single},\theta=90^\circ}$	1.11-1.19	$\rho_{\text{second},\theta=270^\circ}/\rho_{\text{single},\theta=90^\circ}$	1.03-1.05
$\rho_{\text{first,max}}/\rho_{\text{single,max}}$	1.04-1.09	$\rho_{\text{second,max}}/\rho_{\text{single,max}}$	1.02-1.03
$N_{\text{first},\theta=90^\circ}/N_{\text{single},\theta=90^\circ}$	1.06-1.12	$N_{\text{second},\theta=270^\circ}/N_{\text{single},\theta=90^\circ}$	1.03
$N_{\text{first,max}}/N_{\text{single,max}}$	1.06-1.12	$N_{\text{second,max}}/N_{\text{single,max}}$	1.02-1.03
$M_{\text{first},\theta=90^\circ}/M_{\text{single},\theta=90^\circ}$	0.94-1.03	$M_{\text{second},\theta=270^\circ}/M_{\text{single},\theta=90^\circ}$	0.96-0.99
$M_{\text{first,max}}/M_{\text{single,max}}$	0.99-1.05	$M_{\text{second,max}}/M_{\text{single,max}}$	0.96-0.99
$M_{\text{first},\theta=180^\circ}/M_{\text{single},\theta=180^\circ}$	1.06-1.15	$M_{\text{second},\theta=180^\circ}/M_{\text{single},\theta=180^\circ}$	0.99-1.04
$U_{R\text{first},\theta=90^\circ}/U_{R\text{single},\theta=90^\circ}$	1.16-1.24	$U_{R\text{second},\theta=270^\circ}/U_{R\text{single},\theta=90^\circ}$	0.74-1.17
$U_{R\text{first,max}}/U_{R\text{single,max}}$	1.00-1.11	$U_{R\text{second,max}}/U_{R\text{single,max}}$	1.02-1.05
$U_{R\text{first},\theta=180^\circ}/U_{R\text{single},\theta=180^\circ}$	0.94-0.98	$U_{R\text{second},\theta=180^\circ}/M_{\text{single},\theta=180^\circ}$	0.91-0.92
$U_{V\text{second}}/U_{V\text{single}}$	0.98-1.05	$U_{V\text{final}}/U_{V\text{single}}$	1.45-1.58
$i_{\text{second}}/i_{\text{single}}$	0.99-1.00	$i_{\text{final}}/i_{\text{single}}$	1.44-1.50

Στη συνέχεια της εργασίας εξετάστηκε η επιρροή διάφορων παραμέτρων στην αλληλεπίδραση των δίδυμων σηράγγων. Πρώτο μέγεθος που μελετήθηκε ήταν η οριζόντια (διαμήκης) απόσταση των μετώπων των δύο κλάδων. Παρατηρήθηκε ότι για απόσταση ίση με δέκα διαμέτρους ( $F_{HD}/D=10$ ) και για απόσταση ίση με 5 διαμέτρους ( $F_{HD}/D=5$ ) τα αποτελέσματα και για τις δύο σήραγγες είναι πρακτικά ταυτόσημα. Αντίθετα, κατά την ταυτόχρονη διάνοιξη ( $F_{HD}/D=0$ ) παρατηρείται μειωμένη αλληλεπίδραση στην πρώτη σήραγγα και αυξημένη στη δεύτερη, σε όρους πίεσης στην υποστήριξη και εσωτερικών εντατικών μεγεθών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει προεγκατεστημένη επένδυση στον πρώτο κλάδο η οποία καλείται να παραλάβει τα επιπλέον φορτία και τις μετακινήσεις που προκαλεί η δεύτερη διατομή. Λόγω συμμετρίας όμως, και οι δύο κλάδοι δέχονται ακριβώς την ίδια αλληλεπίδραση, συνεπώς κατά την παράλληλη διάνοιξη το φαινόμενο είναι εντονότερο στον δεξιά κλάδο σε σχέση με τη διαδοχική διάνοιξη (όπου εκεί η αλληλεπίδραση είναι σημαντικά περιορισμένη). Επίσης, στην περίπτωση  $F_{HD}/D=0$  οι μετακινήσεις και στους δύο κλάδους είναι αυξημένες, αφού οι δύο διατομές παραμένουν ανυποστηρικτές την ίδια χρονική στιγμή, επιτρέποντας στο περιβάλλον έδαφος να συγκλίνει

πιο έντονα. Κατά συνέπεια οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους είναι επίσης αυξημένες. Συμπερασματικά, κατά την ταυτόχρονη διάνοιξη μειώνεται η αλληλεπίδραση σε όρους πιέσεων και δυνάμεων στην πρώτη σήραγγα (η οποία είναι η δυσμενέστερη για το φαινόμενο), το «τίμημα» όμως είναι οι αυξημένες μετακινήσεις και κυρίως οι καθιζήσεις στην επιφάνεια πάνω από το τεχνικό έργο. Τα συμπεράσματα αυτά παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πιν. 5.2.

Πίνακας 5.2 Επίδραση της οριζόντιας απόστασης των μετώπων. Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$ ,  $p_{fs}/p_{ho}=0.50$  και  $K_0=0.50$ .

Longitudinal Distance	$p_{first,\theta=90deg}/p_{single,\theta=90deg}$	$N_{first,\theta=90deg}/N_{single,\theta=90deg}$	$M_{first,\theta=180deg}/M_{single,\theta=180deg}$	$U_{Rfirst,\theta=360deg}/U_{Rsingle,\theta=360deg}$	$U_{Vsecond}/U_{Vsingle}$
$F_{HD}/D=10$	1.11-1.19	1.06-1.12	1.06-1.15	1.07-1.11	0.98-1.05
$F_{HD}/D=5$	1.10-1.19	1.06-1.12	1.06-1.15	1.06-1.11	0.98-1.05
$F_{HD}/D=0$	1.1-1.16	1.03-1.07	0.99-1.02	1.10-1.17	1.00-1.08

Longitudinal Distance	$p_{second,\theta=270deg}/p_{single,\theta=90deg}$	$N_{second,\theta=270deg}/N_{single,\theta=90deg}$	$M_{second,\theta=180deg}/M_{single,\theta=180deg}$	$U_{Rsecond,\theta=360deg}/U_{Rsingle,\theta=360deg}$	$U_{Vfinal}/U_{Vsingle}$
$F_{HD}/D=10$	1.02-1.07	1.02-1.03	0.99-1.04	0.95-1.04	1.45-1.58
$F_{HD}/D=5$	1.02-1.07	1.02-1.03	0.99-1.03	0.95-1.04	1.45-1.57
$F_{HD}/D=0$	1.09-1.15	1.04-1.07	0.99-1.02	1.09-1.17	1.49-1.65

Επόμενη παράμετρος που εξετάστηκε είναι η τιμή της πίεσης που ασκεί το EPB TBM στο μέτωπο. Για μειωμένη πίεση μετώπου σημειώθηκε αύξηση της αλληλεπίδρασης και στους δύο κλάδους και σε όλα τα υπό εξέταση μεγέθη, η οποία οφείλεται στις αυξημένες μετακινήσεις που επιτρέπονται όταν η ασκούμενη πίεση είναι μόνο ένα μικρό ποσοστό της οριζόντιας γεωστατικής τάσης. Στον Πιν. 5.3 παρουσιάζονται τα εύρη τιμών των λόγων αλληλεπίδρασης για την αριστερή (πρώτη) σήραγγα, για  $H/D=2$  και  $K_0=0.5$ . Σημειώνεται ότι οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στις δύο τιμές πίεσης ελαττώνονται όσο βελτιώνονται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους και όσο αυξάνεται ο συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων  $K_0$ .

Πίνακας 5.3 Επίδραση της ασκούμενης πίεσης στο μέτωπο. Τα στοιχεία προέρχονται από το μοντέλο με  $H/D=2$  και  $K_0=0.5$  και αφορούν την πρώτη (αριστερή) διατομή.

Face Pressure	$p_{first,max}/p_{single,max}$	$N_{first,max}/N_{single,max}$	$M_{first,max}/M_{single,max}$	$U_{Rfirst,max}/U_{Rsingle,max}$	$U_{Vfinal}/U_{Vsingle}$
$p_{fs}/p_{ho}=0.50$	1.04-1.09	1.06-1.12	0.99-1.05	1.00-1.10	1.45-1.58
$p_{fs}/p_{ho}=0.25$	1.06-1.19	1.09-1.29	1.04-1.32	1.09-1.16	1.52-1.69

Στη συνέχεια εξετάστηκε η επιρροή του βάθους των δίδυμων σηράγγων. Παρατηρήθηκαν αυξημένες τιμές των λόγων αλληλεπίδρασης για το μεγαλύτερο από τα δύο ύψη υπερκειμένων (Πιν. 5.4.), τα οποία αφορούν όλα τα υπό εξέταση μεγέθη και για τις δύο σήραγγες. Η ερμηνεία του φαινομένου βασίζεται στο μεγαλύτερο φορτίο που καλείται να παραλάβει ο πυλώνας και η επένδυση των σηράγγων από το νεκρό βάρος των υπερκειμένων. Όπως συμβαίνει και για την πίεση μετώπου, και εδώ οι διαφορές αμβλύνονται για τα δυσμενέστερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και για τη μικρότερη πίεση μετώπου.

Πίνακας 5.4 Επίδραση του βάθους των σηράγγων. Τα στοιχεία προέρχονται από τα μοντέλα με  $p_f/p_{ho}=0.50$  και  $K_0=0.50$  και αφορούν την πρώτη (αριστερή) διατομή.

Tunnel Depth	$\rho_{first,max}/\rho_{single,max}$	$N_{first,max}/N_{single,max}$	$M_{first,max}/M_{single,max}$	$U_{Rfirst,max}/U_{Rsingle,max}$	$U_{Vfinal}/U_{Vsingle}$
H/D=2	1.04-1.09	1.06-1.12	0.99-1.05	1.00-1.10	1.45-1.58
H/D=4	1.14-1.20	1.09-1.17	1.03-1.15	1.07-1.13	1.85-1.95

Τελευταία αλλά σημαντικότερη παράμετρος που μελετήθηκε είναι ο συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων. Το μέγεθος αυτό αλλάζει εν γένει τη συμπεριφορά του εδάφους κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας, μεταβάλλοντας τα σημεία στην περιφέρεια όπου τα εντατικά μεγέθη παίρνουν τις μέγιστες τιμές τους. Συνεπώς είναι λογικό να παρατηρούνται σημαντικές διαφορές και στο ζήτημα της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων. Όσον αφορά την πίεση στην υποστήριξη και τις αξονικές δυνάμεις, η αύξηση του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων προκαλεί αποφόρτιση της επένδυσης (εντονότερη για  $K_0=1.5$ ) και στους δύο κλάδους σε σχέση με τη μονή σήραγγα. Ομοίως αποφόρτιση προκαλείται και στις ροπές κάμψης της επένδυσης της πρώτης σήραγγας (επίσης εντονότερη για  $K_0=1.5$ ), ενώ στον δεύτερο κλάδο εντείνεται η αποφόρτιση που ήδη έχει σημειωθεί για  $K_0=0.5$ . Η επιρροή της αλληλεπίδρασης στις μετακινήσεις της πρώτης σήραγγας αυξάνεται για  $K_0=1.5$ , ενώ για  $K_0=1.0$  σημειώνεται μείωση αυτών στην πρώτη σήραγγα. Τέλος ευεργετική επίδραση έχει το φαινόμενο στις μετακινήσεις της δεύτερης σήραγγας για τις μεγάλες τιμές του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων. Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πιν. 5.5. Επίσης παρατηρήθηκε ότι για  $K_0=1.0$  και  $1.5$  η μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών ελάχιστα επηρεάζει τα αποτελέσματα.

Πίνακας 5.5 Επίδραση του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων. Τα στοιχεία προέρχονται από τα μοντέλα με  $H/D=2$  και  $p_f/p_{ho}=0.50$

Lateral earth pressure factor	$\rho_{first,max}/\rho_{single,max}$	$N_{first,max}/N_{single,max}$	$M_{first,max}/M_{single,max}$	$U_{Rfirst,max}/U_{Rsingle,max}$
$K_0=0.5$	1.04-1.09	1.06-1.12	0.99-1.05	1.00-1.10
$K_0=1.0$	0.97-0.98	0.95	0.94-1.03	0.97-0.98
$K_0=1.5$	0.91-0.92	0.91	0.74-0.75	1.07-1.08



# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

## Διεθνής βιβλιογραφία

- [1] ABAQUS 6.11 Documentation. (2011). SIMULIA, United States of America.
- [2] Adachi, T., Kimura, M. & Osada, H. 1993. Interaction between multi-tunnels under construction. In Proceedings of the 11<sup>th</sup> Southeast Asian Geotechnical Conference, Singapore, May 1993. National University of Singapore and Nanyang Technological University, Singapore, pp. 51-60.
- [3] Addenbrooke, T.I. & Potts, D.M. 1996. Twin tunnel construction-ground movements and lining behavior. In proceedings of the 1<sup>st</sup> International Symposium on the Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. London, 15-17 April 1996. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 441-446.
- [4] Benson Bin-Chen, Hsiung & Kuan-Lin Lu, 2007. A bored tunnel ok Kaohsiung rapid transit system, Contract CR2 (Case Record). Journal of GeoEngineering, Vol 3, No. 1, pp. 33-40, April 2008.
- [5] Bowles, J.E., 1997. "Foundation Analysis and Design". 5<sup>th</sup> Edition, McGraw Hill.
- [6] Chapman, D.N., Rogers, C.D.F., Hunt, D.V.L., 2004. Predicting the Settlements above Twin Tunnels Constructed in Soft Ground. In Proceedings of the 30th ITA-AITES World Tunnel Congress 2004, Singapore, Paper C33 8pp.
- [7] Chen, R. P., Zhu J., Liu W., Tang X.W. 2011. Ground movement induced by parallel EPB tunnels in silty soils. Tunneling and Underground Space Technology 26 (2010) pp. 163-171.
- [8] Chortis, F., Kavvadas, M., 2015. Numerical Investigation of the Interaction between Twin Tunnels. Proceedings of the ITA WTC 2015 Congress and 41<sup>st</sup> General Assembly, May 22-28 2015, Dubrovnik, Croatia.
- [9] Do Ngoc-Anh, Dias Daniel, Oreste Pierpaolo, Djeran-Maigre Irini. 2014. Tunneling and Underground Space Technology 42 (2014) pp. 40-51.
- [10] Kim Sang-Hwan, 2004. Interaction behaviors between parallel tunnels in soft ground. Tunneling and Underground Space Technology, Vol 19, pp.448-454.
- [11] O' Reilly, M.P., New, B.M., 1982. Settlements above tunnels in the United Kingdom: their magnitude and prediction. In Proceedings of Tunnelling '82 Symposium, London, pp. 173-181.
- [12] Peck, R.B., 1969. Deep Excavation and Tunnelling in Soft Ground. State of the art volume. 7th International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering, Mexico, 1969. pp. 225-290.
- [13] Terzaghi, H. 1942. Liner-plate tunnels on the Chicago subway. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 68(6), pp. 862-899.

## Ελληνική Βιβλιογραφία

- [1] Αναγνωστόπουλος, Α., Μιχάλης, Η. (2004). Σημειώσεις αντιστηρίξεων και καθιζήσεων λόγω εκσκαφών. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- [2] Καββαδάς, Μ. (2005). Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- [3] Μαρίνος, Π. (1993). Κεφάλαια Γεωλογίας Μηχανικού. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- [4] Μαρίνος, Π. (1998). Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας Μηχανικού. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- [5] Μπεκρή Ε. (2012). Διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων. Μεταπτυχιακή Εργασία. ΕΜΠ, Τομέας Γεωτεχνικής, Αθήνα.
- [6] Παπαδόπουλος, Β. (2004). Στοιχεία του μαθήματος: Βραχομηχανική-Σήραγγες. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- [7] Παπαδόπουλος, Β. (2010). Στοιχεία του μαθήματος: Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- [8] Προυτζόπουλος, Γ. (2012). Διερεύνηση της ευστάθειας μετώπου εκσκαφής αβαθών σηράγγων. Διδακτορική διατριβή. ΕΜΠ, Τομέας Γεωτεχνικής, Αθήνα.

## Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις

- [1] Ηλεκτρονική σελίδα Ελληνικής Επιτροπής Σηράγγων και Υπογείων Έργων:  
[http://www.eesy.gr/index.pl/home\\_gr](http://www.eesy.gr/index.pl/home_gr)