

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Π. Μαρίνο, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το θέμα της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να εμβαθύνω στο γνωστικό αντικείμενο του σχεδιασμού των σηράγγων. Η βοήθεια, η καθοδήγησή του καθώς και οι πολύτιμες συμβουλές και παρατηρήσεις του συνέβαλλαν ουσιαστικά στην εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Επιπρόσθετα, οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τον Π. Φορτσάκη, Διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε σε επιστημονικό αλλά και σε οργανωτικό επίπεδο, για την αμέριστη συμπαράστασή του καθώς και για τον προσωπικό χρόνο που διέθεσε. Η συνεργασία μας ήταν αρμονική και η συμβολή του ήταν καθοριστική σε όλα τα στάδια της εργασίας.

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



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά τα τελευταία χρόνια η κατασκευή των δίδυμων σηράγγων είναι ευρέως διαδεδομένη, καθώς οι σήραγγες αποτελούν τεχνικά έργα με αυξημένες απαιτήσεις ασφάλειας και λειτουργικότητας. Η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων μια δίδυμης σήραγγας αποτελεί ένα σύνθετο φαινόμενο το οποίο καλείται να αντιμετωπίσει ο μελετητής μηχανικός κατά το στάδιο του σχεδιασμού του έργου.

Η μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται τη μελέτη της αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων των δίδυμων σηράγγων κατά τη διάνοιξη και κατ' επέκταση τον προσδιορισμό της κατάλληλης εγκάρσιας απόστασης η οποία θα εξασφαλίζει την ασφάλεια και τη λειτουργικότητα της κατασκευής.

Αρχικά πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική προσέγγιση του προβλήματος της αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων, έτσι ώστε να παρουσιαστούν συγκεντρωτικά όλες οι μέθοδοι (πειραματικές και αναλυτικές) που έχουν προταθεί στο παρελθόν αλλά και το εύρος όλων των γεωτεχνικών παραμέτρων που έχουν προσομοιωθεί. Στη συνέχεια παρατίθενται δυο περιστατικά διάνοιξης δίδυμων σηράγγων της Εγνατίας Οδού (σήραγγα Ανθοχωρίου και σήραγγα Δρίσκου) προκειμένου να φανεί η αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο κλάδων η οποία απεικονίζεται στις μετρηθείσες συγκλίσεις λόγω των πολύ δυσμενών γεωτεχνικών συνθηκών και των εκτεταμένων αστοχιών των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

Η αριθμητική προσέγγιση του προβλήματος που ακολουθεί, περιλαμβάνει την πραγματοποίηση παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων με τριδιάστατα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι απαλλαγμένα από τις παραδοχές των μεθόδων εκτίμησης της αποτόνωσης των τάσεων και των προσυγκλίσεων. Η προσομοίωση του προβλήματος πραγματοποιείται με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, ενώ η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων ποσοτικοποιείται σε όρους πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης και σε όρους μετακινήσεων στην περίμετρο της εκσκαφής. Στο πλαίσιο των παραμετρικών αναλύσεων μελετάται ο ρόλος των γεωτεχνικών συνθηκών, της εγκάρσιας απόστασης των δυο κλάδων (πλάτος πυλώνα), καθώς και του μέτρου ελαστικότητας.

Κλείνοντας, πραγματοποιείται συγκεντρωτικά μια σύνοψη των σημαντικότερων αποτελεσμάτων - συμπερασμάτων της εργασίας, και παρουσιάζονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα, καθώς το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των δίδυμων σηράγγων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.



## ABSTRACT

Over the past few years, twin tunnel construction has increased as tunnels are structures of high security and functionality standards. The interaction of the two branches of a twin tunnel is a complicated phenomenon that the engineer faces early from the design stage.

The present thesis investigates the interaction between the two branches of a twin tunnel during the excavation phase and determines the suitable pillar width that will ensure safety and functionality for the structure.

At first, a literature review is performed aiming to present all the previous methods (experimental and analytical) as well as the range of the geotechnical parameters which were used to simulate the problem. Then, two representative twin tunnel case studies of Egnatia Highway (Anthochori tunnel and Driskos tunnel) are described in order to illustrate the interaction between the two branches. The interaction is reflected in the significant tunnel convergence due to unfavourable geotechnical conditions and extensive failures of the immediate support measures.

The problem has been numerically investigated by perform three dimensional finite element parametric analyses so that the results are exempted from assumptions of the stress and pre-convergence estimation methods. The simulation of the problem is carried out with the aid of the finite element code ABAQUS while the interaction of the two branches is quantified in terms of pressure on the immediate support shell and displacements on the excavation perimeter. Within the parametric analyses frame, the importance of geotechnical conditions, pillar width and elastic deformation modulus, is studied.

Finally, the most important results and conclusions of this thesis are summarized and suggestions for further research are presented, as the twin tunnel interaction phenomenon appears to be of particular interest.



# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
1.1	ΓΕΝΙΚΑ .....	1
1.2	ΔΙΔΥΜΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ .....	3
1.3	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	5
1.4	ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	5
<b>2</b>	<b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....</b>	<b>7</b>
2.1	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ .....	7
2.1.1	Σύστημα RMR (Bieniawski).....	7
2.1.2	Σύστημα Q (NGI).....	8
2.1.3	Σύστημα GSI .....	9
2.2	ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ.....	10
2.2.1	Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown .....	10
2.2.2	Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.....	11
2.2.3	Συσχέτιση των κριτηρίων Hoek-Brown και Mohr-Coulomb .....	13
<b>3</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....</b>	<b>15</b>
3.1	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	15
3.1.1	Terzaghi H., 1942, Ward W.H. & Thomas H.S.H., 1965 (from Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W., 2004).....	15
3.1.2	Chaboussi J., Ranken R.E., 1977 (from Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W., 2004) .	16
3.1.3	Adachi T., Kimura M., & Osada H., 1993 (from Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W., 2004) .....	16
3.1.4	Fujita K.,1985, Fang Y.S, Lin J.S., & Su C.S., 1994, (from Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W., 2004) .....	17
3.1.5	Addenbrooke T.I., & Potts D.M., 1996 (from Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W., 2004) .....	17
3.1.6	Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C., 1996.....	18

3.1.7 Kim S.H., Burd H.J. & Miligan G.W.E., 1998 (from Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W., 2004) .....	20
3.1.8 Addenbrooke T.I., & Potts D.M., 2001 .....	21
3.1.9 Koungelis D.K & Augarde C. E., 2004.....	26
3.1.10 Kim S.H., 2004.....	30
3.1.11 Karakus M., Ozsan A. & Basarir H., 2007 .....	31
3.1.12 Chen S.I., Lee S.C., & Gui M.W., 2008.....	32
3.2 ΣΥΝΟΨΗ .....	36
<b>4 ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΤΗΣ ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ .....</b>	<b>41</b>
4.1 ΣΗΡΑΓΓΑ ΑΝΘΟΧΩΡΙΟΥ .....	41
4.1.1 Γεωλογικά – Γεωτεχνικά στοιχεία .....	42
4.1.2 Ιστορικό .....	45
4.2 ΣΗΡΑΓΓΑ ΔΡΙΣΚΟΥ.....	46
4.2.1 Γεωλογικά – Γεωτεχνικά στοιχεία .....	47
4.2.2 Ιστορικό .....	51
4.3 ΣΥΝΟΨΗ .....	53
<b>5 ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....</b>	<b>55</b>
5.1 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	56
5.1.1 Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων ANSYS .....	56
5.1.2 Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.....	56
5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΙΩΜΑΤΟΣ.....	57
5.2.1 Γεωμετρική απεικόνιση.....	57
5.2.2 Διακριτοποίηση του αριθμητικού προσομοιώματος και συνοριακές συνθήκες ...	59
5.2.3 Βήματα εκσκαφής .....	62
5.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ .....	67
5.3.1 Πλάτος πυλώνα W.....	67
5.3.2 Γεωτεχνικές παράμετροι .....	68
5.3.3 Παράμετροι άμεσης υποστήριξης.....	70



5.4	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....	71
5.5	ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ .....	73
5.5.1	Ποιοτική σύγκριση αποτελεσμάτων .....	74
5.5.2	Ποσοτική σύγκριση αποτελεσμάτων .....	76
<b>6</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....</b>	<b>85</b>
6.1	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ .....	85
6.1.1	Μελέτη των κατανομών των μεγεθών και σύγκριση αυτών με τις αντίστοιχες της μονής σήραγγας.....	86
6.1.2	Εξέλιξη των πιέσεων και των μετακινήσεων κατά τη διάρκεια της εκσκαφής σε μια διατομή .....	94
6.2	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ.....	97
6.2.1	Επίδραση των γεωτεχνικών συνθηκών – Ποιότητα βραχώμαζας.....	98
6.2.2	Αναλύσεις με διαφορετικές γεωτεχνικές συνθήκες και ίδιο πλάτος πυλώνα.....	102
6.3	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ.....	106
6.3.1	Αναλύσεις με διαφορετικό πλάτος πυλώνα και ίδιες γεωτεχνικές συνθήκες .....	107
6.3.2	Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων .....	119
6.4	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	122
6.4.1	Αναλύσεις με διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας και ίδιες γεωτεχνικές συνθήκες .....	123
6.4.2	Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων .....	126
6.5	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΙΣ ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΣΕΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ .....	128
<b>7</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....</b>	<b>131</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>135</b>







# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

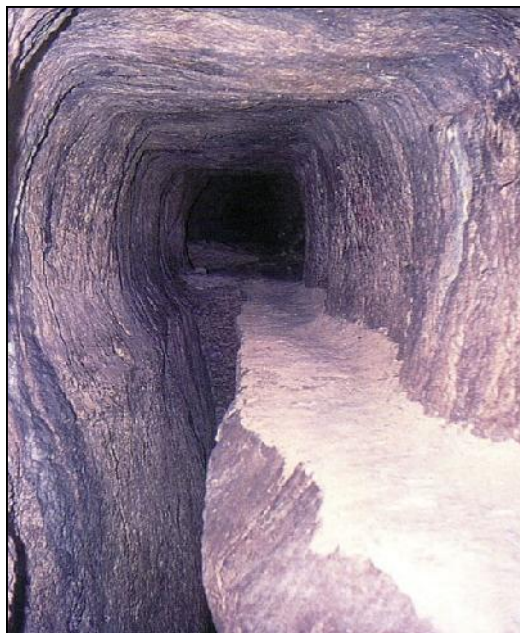
---

## 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

---

Τα υπόγεια έργα αποτελούν πλέον μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες έργων Πολιτικού Μηχανικού. Η κατασκευή τους έχει γίνει στις μέρες μας επιβεβλημένη, καθώς η αύξηση του πληθυσμού, η έλλειψη χώρου αλλά και οι σύγχρονες συνθήκες ζωής και εμπορίου επιβάλλουν την ολοένα ταχύτερη και ασφαλέστερη μετακίνηση ανθρώπων και αγαθών και επιπρόσθετα τη σύνδεση δυσπρόσιτων περιοχών. Οι παραπάνω παράγοντες οδηγούν στην ανάγκη ανάπτυξης της τεχνογνωσίας των υπογείων έργων και ιδιαίτερα των υπογείων έργων σύνδεσης όπως είναι οι σήραγγες.

Ήδη από την αρχαιότητα, ο άνθρωπος είχε συλλάβει την ιδέα των σηράγγων προκειμένου να καταφέρει να ξεπεράσει τα εμπόδια των ορεινών όγκων και να έχει πρόσβαση στο υπέδαφος. Η πρώτη σήραγγα στην Ιστορία, με μεγάλο τεχνικό ενδιαφέρον, ήταν το Ευπαλίνιο όρυγμα στη Σάμο που κατασκευάστηκε από τον Μεγαρίτη αρχιτέκτονα Ευπαλίνο, τον 6<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. για την ύδρευση της πόλης της Σάμου. Πρόκειται για σήραγγα μήκους 1040m και διατομής 3.5m<sup>2</sup> η οποία κατασκευάστηκε με ταυτόχρονη διάνοιξη και από τις δυο πλευρές, επιτυγχάνοντας μian απόκλιση μόνο 0.8m από τον άξονα της χάραξης, γεγονός αξιοσημείωτο για τα δεδομένα της εποχής. Άλλα σημαντικά υπόγεια έργα που σώζονται μέχρι σήμερα στην περιοχή του Ελλαδικού χώρου είναι τα μεταλλεία του Λαυρίου (κατασκευάστηκαν το 520 π.Χ.) καθώς και το Αδριάνειο υδραγωγείο στο λεκανοπέδιο Αθηνών ( κατασκευάστηκε περίπου το 2<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ.).



Σχήμα 1.1 Ευπαλίνιο Όρυγμα, Σάμος 6<sup>ος</sup> αιώνας π.Χ.

Με την πάροδο των χρόνων, η εξέλιξη της τεχνολογίας κατέστησε τα υπόγεια έργα όλο και περισσότερο γνώριμα και προσιτά στον κατασκευαστικό κόσμο. Στη συνέχεια ακολουθούν μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα που αποτέλεσαν σταθμό στην εξέλιξη της κατασκευής των σήραγγων και είναι δείγματα των σημερινών υπόγειων κατασκευαστικών δυνατοτήτων. Ένα από τα έργα αυτά είναι η σήραγγα που κατασκευάστηκε από τον Μ. Brunel, με τη χρήση ασπίδας, για τη διέλευση του ποταμού Τάμεση και αποτελεί την πρώτη σήραγγα που διέσχισε ποτάμι (ολοκληρώθηκε το 1842). Επιπρόσθετα, έργα με μεγάλο κατασκευαστικό ενδιαφέρον αποτελούν οι σήραγγες βάσεων μεγάλου μήκους (12-20km) που κατασκευάστηκαν στις Άλπεις, καθώς και η υποθαλάσσια σήραγγα της Μάγχης (Channel Tunnel) που ενώνει την Μ. Βρετανία με την ηπειρωτική Ευρώπη (ολοκληρώθηκε το 1994).



**Σχήμα 1.2 Σήραγγα Τάμεση, Λονδίνο 1842.**

Σημαντικό επίτευγμα αποτελεί το έργο ένωσης Σουηδίας-Δανίας (Øresund Crossing) που συνδυάζει σήραγγα μήκους 5km και τεχνητή γέφυρα. Επιπρόσθετα, στα έργα αυτά συγκαταλέγεται και η σήραγγα Seikan που ενώνει τα νησιά Hokkaido και Honshu στην Ιαπωνία, συνολικού μήκους 54km (εκ των οποίων τα 23 βρίσκονται κάτω από τη θάλασσα), καθώς και η σιδηροδρομική σήραγγα βάσης Gotthard στην Ελβετία η οποία είναι η μεγαλύτερη σήραγγα του κόσμου και διαθέτει μήκος 57km (η λειτουργία της αναμένεται το 2017). Τέλος, στην κατασκευή υπογείων σήραγγων στηρίχθηκε η δημιουργία μητροπολιτικών σιδηροδρόμων (metro) στις μεγάλες πόλεις των βιομηχανικών χωρών.



Σχήμα 1.3 (α) Είσοδος της σήραγγας ένωσης Σουηδίας - Δανίας, (β) Σήραγγα βάσης Gotthard, Ελβετία.

## 1.2 ΔΙΔΥΜΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

Πλέον οι σήραγγες κατασκευάζονται ευρέως όχι μόνο για οδική αλλά και για σιδηροδρομική και υδραυλική χρήση και συντελούν δραστικά στη δημιουργία ενός πιο ελκυστικού συγκοινωνιακού δικτύου προσφέροντας αξιοπιστία δρομολογίων υπό οποιεσδήποτε καιρικές και κυκλοφοριακές συνθήκες.

Κατά τα τελευταία χρόνια, οι σήραγγες συνήθως αποτελούνται από δυο κλάδους, έναν για κάθε κατεύθυνση. Στην επιλογή αυτή συντελούν κατασκευαστικοί λόγοι αλλά κυρίως λόγοι ασφαλείας. Αναφορικά με τους κατασκευαστικούς λόγους, είναι ευκολότερη η κατασκευή δυο διατομών μικρότερων διαστάσεων σε σχέση με μια διατομή μεγαλύτερης διαμέτρου, όταν βέβαια ο διατιθέμενος μηχανισμός εκσκαφής και οι ιδιότητες της βραχώμαζας το επιτρέπουν. Σχετικά με τους λόγους ασφαλείας, επιλέγεται η κατασκευή σηράγγων διπλού κλάδου, έτσι ώστε σε περίπτωση ατυχήματος στον ένα κλάδο να είναι δυνατή η διαφυγή στο δεύτερο μέσω της συνδετήριας σήραγγας.

Παράλληλα, η επικρατούσα νομοθεσία αποτελεί έναν επιπλέον λόγο που επιβάλλει την παγίωση της τακτικής των δίδυμων σηράγγων. Ανατρέχοντας στην ισχύουσα νομοθεσία, η αναγκαιότητα αυτή είναι εμφανής. Ενδεικτικά παρατίθενται στη συνέχεια τμήματα του υπ' αριθμ. 230 Προεδρικού Διατάγματος που εφαρμόζεται σε όλες της σήραγγες της Ελληνικής Επικράτειας που ανήκουν στο διευρωπαϊκό οδικό δίκτυο και αποσκοπεί στη διασφάλιση στοιχειώδους επιπέδου ασφαλείας στους χρήστες των σηράγγων, καθώς επίσης και τμήματα από τις Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ) που σχετίζονται με τις οδικές σήραγγες.

Τα κύρια κριτήρια για να αποφασιστεί αν η προς κατασκευή σήραγγα θα διαθέτει έναν ή δυο κλάδους είναι η προβολή του κυκλοφοριακού φόρτου και η ασφάλεια. Επίσης, λαμβάνονται υπόψη και άλλοι παράγοντες όπως το ποσοστό των βαρέων φορτηγών, η κλίση και το απαιτούμενο μήκος. Πιο συγκεκριμένα:

- «Σε κάθε περίπτωση, για τις σήραγγες στο στάδιο της μελέτης, εάν η πρόβλεψη για μια 15ετία δείχνει ότι ο κυκλοφοριακός φόρτος θα υπερβεί τα 10.000 οχήματα, θα προβλέπεται σήραγγα δυο κλάδων μονής κατεύθυνσης κυκλοφορίας ανά κλάδο, όταν ο κυκλοφοριακός φόρτος θα υπερβεί την τιμή αυτή.» (ΠΔ, Άρθρο 16. Παράρτημα Ι, Παράγραφος 2.1)
- «Εν πάσει περιπτώσει, στις νέες σήραγγες πρέπει να υπάρχουν έξοδοι κινδύνου όταν ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι μεγαλύτερος από 2000 οχήματα, ημερησίως.» (ΠΔ, Άρθρο 16. Παράρτημα Ι, Παράγραφος 2.3.6)
- «Στις υφιστάμενες σήραγγες μήκους άνω των 1000 μέτρων και των οποίων ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι μεγαλύτερος από 2000 οχήματα ημερησίως, πραγματοποιείται μελέτη για την εκτίμηση της σκοπιμότητας και της αποτελεσματικότητας της κατασκευής νέων εξόδων κινδύνου» (ΠΔ, Άρθρο 16. Παράρτημα Ι, Παράγραφος 2.3.7)
- «Όταν υπάρχουν έξοδοι κινδύνου, η απόσταση μεταξύ δυο εξόδων κινδύνου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 500 μέτρα.» (ΠΔ, Άρθρο 16. Παράρτημα Ι, Παράγραφος 2.3.8)
- «Η εξάπλωση του καπνού και της θερμότητας στις οδούς διαφυγής πίσω από την έξοδο κινδύνου, πρέπει να προλαμβάνεται με κατάλληλα μέσα, όπως θύρες, ούτως ώστε οι χρήστες της σήραγγας να μπορούν να φτάσουν ασφαλώς στον εξωτερικό χώρο και οι υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης να έχουν πρόσβαση στη σήραγγα.» (ΠΔ, Άρθρο 16. Παράρτημα Ι, Παράγραφος 2.3.9)
- «Σε σήραγγες, των οποίων το μήκος υπερβαίνει τα 700m, πρέπει να διατάσσονται εγκάρσιες έξοδοι διαφυγής περίπου ανά 350m, εφόσον το σύστημα εξαερισμού της σήραγγας σε περίπτωση πυρκαγιάς δεν παρέχει επαρκή ασφάλεια. Επιβάλλεται η σήμανσή τους ανά 50m σε ύψος 1.0m÷1.5m από το πεζοδρόμιο με ένδειξη της απόστασης. Σε σήραγγες διπλού κλάδου οι εγκάρσιες έξοδοι διαφυγής οδηγούν κατά κανόνα από την μία σήραγγα στην άλλη. Στις μονές σήραγγες διπλής κατεύθυνσης, εφόσον δεν είναι δυνατή η επικοινωνία των εγκάρσιων σηράγγων διαφυγής με τον εξωτερικό χώρο πρέπει να προβλέπεται διαμήκης σήραγγα διαφυγής, με την οποία θα συνδέονται οι αντίστοιχες εγκάρσιες. Σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να προτείνονται και άλλοι τρόποι διαφυγής.» (ΟΜΟΕ, ΤΕΥΧΟΣ ΟΔΙΚΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ, Άρθρο 5, Παράγραφος 5.4.3)

Καθώς λοιπόν οι σήραγγες είναι τμήματα οδών, με ιδιαίτερες απαιτήσεις όσον αφορά στην ασφάλεια της κυκλοφορίας και έχουν υψηλό κόστος κατασκευής, συντήρησης και λειτουργίας, πρέπει να μελετώνται με ιδιαίτερη προσοχή και επιμέλεια. Λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις



αυτές, κρίνεται σκόπιμη η τεχνικοοικονομική ανάλυση κόστους κατά το στάδιο του σχεδιασμού, η οποία συνηθέστατα οδηγεί στην επιλογή κατασκευής δίδυμων σηράγγων. Συνεπώς ενισχύεται η άποψη σχετικά με την αυξανόμενη ανάγκη σηράγγων με κλάδους περισσότερους του ενός.

### 1.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

---

Η εκσκαφή κάθε σήραγγας προκαλεί τη δημιουργία μιας ζώνης διαταραχής στον περιβάλλοντα χώρο. Στην περίπτωση των δίδυμων σηράγγων είναι σημαντική η εκτίμηση του μεγέθους της διαταραχής που προκαλεί στον προπορευόμενο κλάδο η έλευση του δεύτερου αλλά και η εκτίμηση της συμπεριφοράς του δεύτερου κλάδου κατά τη διάνοιξη συγκριτικά με την περίπτωση σήραγγας μονού κλάδου. Ο βαθμός αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων εξαρτάται κυρίως από την εγκάρσια απόσταση μεταξύ τους (πλάτος πυλώνα), από το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα στη διάνοιξη των δυο κλάδων, καθώς και από το σύστημα άμεσης υποστήριξης που εφαρμόζεται.

Οι βασικότεροι παράγοντες που επιδρούν στον καθορισμό της τιμής της εγκάρσιας απόστασης των δυο κλάδων είναι οι ιδιότητες της υφιστάμενης βραχώμαζας και οι απαιτήσεις της οδοποιίας. Καθώς, όμως, η γνώση σχετικά με το αντικείμενο αυτό δεν είναι διευρυμένη, συνήθως η επιλογή του πλάτους του πυλώνα γίνεται εμπειρικά. Σύμφωνα με τα παραπάνω, εμφανίζεται επιτακτική η ανάγκη περεταίρω διερεύνησης του φαινομένου προκειμένου να αποφεύγεται η υπερδιαστασιολόγηση και συνεπώς να μειώνεται το κόστος του έργου χωρίς όμως να μειώνεται η αξιοπιστία της κατασκευής.

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι να συμβάλει στη γνώση σχετικά με την κατάλληλη απόσταση μεταξύ των δυο κλάδων μιας δίδυμης σήραγγας έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια και η λειτουργικότητα της κατασκευής χωρίς άσκοπες δαπάνες. Για το σκοπό αυτό, με τη βοήθεια λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων εκτελούνται παραμετρικές αναλύσεις, για ένα εύρος γεωτεχνικών συνθηκών και για μεταβαλλόμενα πλάτη πυλώνα. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών επιτρέπουν τη μελέτη της συμπεριφοράς των δυο κλάδων, καθώς και της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης σε συνάρτηση με την εγκάρσια απόσταση των κλάδων της δίδυμης σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η εξέλιξη των πιέσεων που αναπτύσσονται επί των κελυφών της άμεσης υποστήριξης και των μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τις διατομές, κατά τη διάρκεια της διάνοιξης.

### 1.4 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

---

Στην αρχή της εργασίας αυτής (Κεφάλαιο 2), γίνεται μια σύντομη αναφορά σε γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία στα οποία βασίστηκε η παρούσα διπλωματική. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται συνοπτικά οι γνωστές μέθοδοι ταξινόμησης της βραχώμαζας (σύστημα RMR,

σύστημα Q, σύστημα GSI), καθώς και τα κριτήρια αστοχίας που περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά αυτής (κριτήριο Hoek-Brown, κριτήριο Mohr-Coulomb). Στη συνέχεια (Κεφάλαιο 3), επιχειρείται μια προσπάθεια ανασκόπησης στη διεθνή βιβλιογραφία προκειμένου να αποτυπωθεί η επικρατούσα αντίληψη σχετικά με το θέμα που μελετάται. Παρουσιάζονται λοιπόν περιληπτικά όλες οι μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί (πειραματικές και αναλυτικές), οι γεωτεχνικές συνθήκες που προσομοιώνονται σε κάθε περίπτωση, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις έρευνες αυτές. Στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 4), παρουσιάζονται δυο πραγματικά περιστατικά διάνοιξης δίδυμων σηράγγων της Εγνατίας Οδού (σήραγγα Ανθοχωρίου και σήραγγα Δρίσκου), έτσι ώστε να μελετηθεί η εκδήλωση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας σε πραγματικές συνθήκες.

Στο κεφάλαιο που έπεται (Κεφάλαιο 5), περιγράφεται, αρχικά, η διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να σχεδιαστούν τα αριθμητικά προσομοιώματα με τη βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ANSYS και στη συνέχεια η διαδικασία εκτέλεσης των αριθμητικών αναλύσεων με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται η γεωμετρία του αριθμητικού μοντέλου, το εύρος των γεωτεχνικών συνθηκών που προσομοιώθηκαν, ο τύπος των τριδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του προβλήματος, καθώς και οι παραδοχές που υιοθετήθηκαν ώστε να εκτελεστούν οι αναλύσεις. Επιπρόσθετα, το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει τους ελέγχους αξιοπιστίας που πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να εξεταστεί η αξιοπιστία των αριθμητικών προσομοιωμάτων και συνεπώς η ορθότητα των αποτελεσμάτων.

Ύστερα από τη διενέργεια των αριθμητικών αναλύσεων, ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων (Κεφάλαιο 6). Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η εξέλιξη των πιέσεων που αναπτύσσονται επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης καθώς και των μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τις εκσκαφές, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Μελετάται επίσης η κατάλληλη εγκάρσια απόσταση στην οποία οι δυο κλάδοι δεν αλληλεπιδρούν. Τέλος, παρατίθενται συγκετρωτικά όλα τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα (ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7).

## 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

---

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται και επεξηγούνται όλες οι βασικές θεωρητικές έννοιες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι μέθοδοι ταξινόμησης της βραχόμαζας, καθώς και τα κριτήρια αστοχίας που υιοθετήθηκαν κατά τις αναλύσεις.

### 2.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

---

Η τεχνική διάνοιξης των σηράγγων κρίνει απαραίτητη την ταξινόμηση της βραχόμαζας, τόσο κατά το σχεδιασμό όσο και κατά την κατασκευή του έργου. Προκειμένου λοιπόν να πραγματοποιηθεί σωστά αφενός η μελέτη και αφετέρου η κατασκευή, απαιτείται να ποσοτικοποιηθούν οι ιδιότητες της βραχόμαζας που θα συναντηθούν κατά μήκος της σήραγγας. Αυτό πραγματοποιείται με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις γεωτεχνικές έρευνες που πραγματοποιούνται και έπειτα η βραχόμαζα κατατάσσεται σε κατηγορίες σύμφωνα με τα γνωστά συστήματα ταξινόμησης. Στη συνέχεια γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των συστημάτων αυτών (RMR, Q, GSI).

#### 2.1.1 Σύστημα RMR (Bieniawski)

---

Σύμφωνα με το σύστημα RMR (Rock Mass Rating), το οποίο προτάθηκε από τον Bieniawski (1974, και τροποποίηση 1979), η ταξινόμηση της βραχόμαζας πραγματοποιείται με τον ορισμό έξι παραμέτρων. Κάθε μια από τις παραμέτρους αυτές λαμβάνει μια τιμή, το άθροισμα των οποίων αποτελεί την τιμή του δείκτη RMR.

Οι παράμετροι αυτές είναι οι εξής:

- Η αντοχή του συμπαγούς πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη ( $\sigma_{ci}$ ).
- Ο δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (RQD).
- Η συχνότητα και ο προσανατολισμός των ασυνεχειών (στρώσεις, διακλάσεις, σχιστότητα) σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου.
- Η κατάσταση των ασυνεχειών, όσον αφορά στο άνοιγμα, στην τραχύτητα των εκατέρωθεν επιφανειών και στο υλικό πληρώσεως.
- Το υπόγειο νερό και η εικαζόμενη επιρροή του επί της αντοχής και της αστάθειας της βραχόμαζας.

Με βάση την τιμή του δείκτη RMR η βραχόμαζα κατατάσσεται στις κατηγορίες του πίνακα που ακολουθεί.

**Πίνακας 2.1 Κατάταξη βραχώμαζας με βάση το σύστημα ταξινόμησης RMR.**

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ RMR
Πολύ καλή – I	81 - 100
Καλή – II	61 - 80
Μέτρια – III	41 - 60
Πτωχή – IV	21 - 40
Πολύ πτωχή – V	0 - 20

Για βραχώμαζες πτωχής ποιότητας (RMR<40) η μέθοδος κρίνεται ακατάλληλη, καθώς δε διαθέτει επαρκές εύρος τιμών. Για τον υπολογισμό των παραμέτρων της βραχώμαζας συνιστάται να γίνεται άθροιση όλων των παραμέτρων εκτός από την επιρροή του προσανατολισμού των ασυνεχειών σε σχέση με την φορά διάνοιξης του έργου, καθώς η επιρροή αυτή λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό της διάνοιξης και της άμεσης υποστήριξης του έργου.

### 2.1.2 Σύστημα Q (NGI)

Το σύστημα ταξινόμησης Q προτάθηκε από τους Barton et al. (1974), στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI), με σκοπό την εκτίμηση των χαρακτηριστικών της βραχώμαζας και των μέτρων άμεσης υποστήριξης κατά τη διάνοιξη σηράγγων που διανοίγονται με την “μέθοδο NATM”. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- Ο δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας (RQD).
- Ο δείκτης του αριθμού των συστημάτων των ασυνεχειών,  $J_n$
- Ο βαθμός τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών,  $J_r$ .
- Ο βαθμός εξαλλοίωσης των επιφανειών των ασυνεχειών,  $J_a$ .
- Ο συντελεστής επιρροής του υπόγειου νερού,  $J_w$
- Ο συντελεστής απομείωσης λόγω υψηλών τάσεων, SRF.

Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό του δείκτη Q με βάση τον τύπο:

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

Στην παραπάνω σχέση, ο πρώτος λόγος εκφράζει το μέσο μέγεθος των τεμαχών που συνιστούν την βραχώμαζα, ο δεύτερος λόγος εκφράζει τα χαρακτηριστικά της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών της βραχώμαζας και ο τελευταίος λόγος τις τάσεις που επικρατούν στην βραχώμαζα. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η ταξινόμηση της ποιότητας της βραχώμαζας κατά το σύστημα Q.

**Πίνακας 2.2 Κατάταξη βραχώμαζας με βάση το σύστημα ταξινόμησης Q.**

Q	ΚΛΑΣΗ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ
>400	Q-Ia	Εξαιρετικά καλή
100-400	Q-Ib	Πάρα πολύ καλή
40-100	Q-II	Πολύ καλή
10-40	Q-IIIa	Καλή
4-10	Q-IIIb	Μέτρια
1-4	Q-IVa	Πτωχή
0.1-1	Q-IVb	Πολύ πτωχή
0.01-0.1	Q-Va	Πάρα πολύ πτωχή
<0.01	Q-Vb	Εξαιρετικά πτωχή

### 2.1.3 Σύστημα GSI

Το σύστημα GSI (Geological Strength Index) αρχικά προτάθηκε από τον Hoek (1995) και στη συνέχεια ακολούθησαν βελτιώσεις από τους Hoek, Marinos & Benissi (1998 και 2000). Το σύστημα βασίζεται στον καθορισμό δύο παραμέτρων:

- Στη δομή της βραχώμαζας, που χαρακτηρίζει το βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχωδών τεμαχών.
- Στην κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής αντοχής τους.

Το GSI δίνει ιδιαίτερη έμφαση σε σχετικώς πτωχής ποιότητας βραχώμαζες με  $RMR < 40$  αλλά με λειτουργία αλληλεμπλοκής μεταξύ των βραχωδών τεμαχών, δηλαδή σε βραχώμαζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού. Σχεδιάστηκε έτσι ώστε να είναι γενικά συμβατό με το σύστημα RMR για βραχώμαζες με  $RMR > 40$ . Γενικά, δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Αν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρηνές εκσκαφής, όμως η συμπεριφορά της βραχώμαζας ως σύνολο δεν είναι κρίσιμη, τότε συνήθως αυτές καθορίζουν τη συμπεριφορά της βραχώμαζας. Τέλος, η διατμητική αντοχή των επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία είναι μειωμένη με την ύπαρξη νερού. Πιο συγκεκριμένα, η ύπαρξη νερού οδηγεί στην μείωση της τιμής GSI και μεταφορά στον πίνακα προς τα δεξιά.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται το βοηθητικό διάγραμμα ταξινόμησης της βραχώμαζας, σύμφωνα με το σύστημα GSI.

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) (E. Hoek, Π. Μορίνος, 2000)		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ				
Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών της βραχώδους εκτίμησης τη μέση τιμή του GSI από τις καμπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI = 35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γεωτονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθεις που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως διατημημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώδους. Η οντοχία ορισμένων βραχώδων μειώνεται από την παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς το δεξιά στις στήλες της μέτρησης, πτυχής και πολύ πτυχής κατάστασης ασυνεχειών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργιών τάσεων στους υπολογισμούς.		ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΠΤΥΧΗ	ΠΟΛΥ ΠΤΥΧΗ
		Πολύ τριχίλες, υγιείς, μη αποσπασθείσες επιφάνειες	Τριχίλες, ελαφρά αποσπασθείσες και αδύναμες επιφάνειες	Λύες, μετρίως αποσπασθείσες και εφελκυστικές επιφάνειες	Πολύ λύες, κατά περίπτωση αδιασπαστές επιφάνειες με συστηματική επιρροή από υλικό πλήρωσης με γυνιώδη θραύσματα	Πολύ αλυσοειδείς επιφάνειες ή πολύ αποσπασθείσες με μολακό σφηνικό υλικό πλήρωσης ή επιρροή
ΔΟΜΗ		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ				
	<b>ΑΡΡΗΚΤΗ</b> Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	90			N/A	N/A
	<b>ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ / ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ</b> Αδιάτακτη βραχώδης με πολύ καλό αλληλοκλειδίωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών	80				
	<b>ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ</b> Μερικώς διαταραγμένη βραχώδης με πολύλιερα γυνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών	70				
	<b>ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ/ΠΤΥΧΩΜΕΝΗ</b> Πτυχωμένη με γυνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμφάνιση στρώσης ή σχετιότητας	60		50		
	<b>ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ</b> Ισχυρά κερματισμένη βραχώδης με πτυχή αλληλοκλειδίωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γυνιώδων και αποστραγγυλιωμένων τεμαχίων	50		40		
	<b>ΦΥΛΛΩΔΗΣ / ΔΙΑΤΗΜΜΕΝΗ</b> Φυλλώδης ή σχετικοποιημένη και τεκτονικά διατημημένη ασθενής βραχώδης. Η φύλλωση επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γυνιώδων τεμαχίων (η κλίμακα σε αυτό το εικονίδιο δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονιδίων)	40		30		
	<b>ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ</b> Ισχυρά κερματισμένη βραχώδης με πτυχή αλληλοκλειδίωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γυνιώδων και αποστραγγυλιωμένων τεμαχίων	30		20		
	<b>ΦΥΛΛΩΔΗΣ / ΔΙΑΤΗΜΜΕΝΗ</b> Φυλλώδης ή σχετικοποιημένη και τεκτονικά διατημημένη ασθενής βραχώδης. Η φύλλωση επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γυνιώδων τεμαχίων (η κλίμακα σε αυτό το εικονίδιο δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονιδίων)	20		10		
	<b>ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ</b> Ισχυρά κερματισμένη βραχώδης με πτυχή αλληλοκλειδίωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γυνιώδων και αποστραγγυλιωμένων τεμαχίων	10				
		N/A	N/A			

Σχήμα 2.1 Κατάταξη βραχώδους με βάση το σύστημα ταξινόμησης GSI.

## 2.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα κριτήρια αστοχίας Hoek-Brown και Mohr-Coulomb τα οποία περιγράφονται στην ενότητα που ακολουθεί.

### 2.2.1 Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown

Οι βραχώδεις που συναντώνται στη φύση είναι κατά κύριο λόγο ρωγματομένες. Για το λόγο αυτό, προσομοιώνονται συνήθως μέσω του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown, το οποίο διαθέτει περιβάλλουσα καμπύλη αστοχίας.

Το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown αρχικά προτάθηκε από τους Hoek & Brown (1980) και κατέληξε ύστερα από τροποποιήσεις στην τελική του μορφή από τους Hoek et al. (2002). Η γενικευμένη μορφή του κριτηρίου Hoek-Brown περιγράφεται από την εξίσωση που ακολουθεί:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (\text{Hoek et al., 2002})$$

Όπου:

$\sigma_1$ : Η μέγιστη κύρια ενεργός τάση στην κατάσταση αστοχίας.

$\sigma_3$ : Η ελάχιστη κύρια ενεργός τάση στην κατάσταση αστοχίας.

$\sigma_{ci}$ : Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του πετρώματος. Προσδιορίζεται από τα πειράματα μονοαξονικής θλίψης σε δείγματα άρρηκτου βράχου.

$m_b$ : Σταθερά που χαρακτηρίζει την ποιότητα της βραχώμαζας. Υπολογίζεται από τη σχέση:

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

Στη σχέση αυτή, ο συντελεστής  $m_i$  εξαρτάται από το είδος του πετρώματος ενώ η παράμετρος  $D$  δηλώνει το βαθμό διαταραχής της βραχώμαζας λόγω χαλάρωσης ή χρήσης εκρηκτικών και κυμαίνεται από 0 έως 1. Η παράμετρος  $GSI$  αντιστοιχεί στην τιμή βαθμονόμησης της βραχώμαζας στο σύστημα  $GSI$  και εκτιμάται από τα αντίστοιχα διαγράμματα  $GSI$  ανάλογα με το γεωλογικό σχηματισμό.

$s$ : Σταθερά που χαρακτηρίζει την ποιότητα της βραχώμαζας. Υπολογίζεται από τη σχέση:

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

$\alpha$ : Σταθερά που χαρακτηρίζει την ποιότητα της βραχώμαζας. Υπολογίζεται από τη σχέση:

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

Με βάση το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown μπορεί να εκτιμηθεί η αντοχή της βραχώμαζας σε μονοαξονική θλίψη ( $\sigma_c = \sigma_1$  και  $\sigma_3 = 0$ ), σύμφωνα με τη σχέση:

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

Λόγω της έντονης καμπυλότητας του κριτηρίου Hoek-Brown σε πολύ μικρές τάσεις, οι τιμές που προκύπτουν από την ανωτέρω σχέση είναι γενικώς μικρότερες από τις μέσες αντοχές της βραχώμαζας σε μονοαξονική θλίψη. Για το λόγο αυτό η συνολική αντοχή της βραχώμαζας υπολογίζεται από την ακόλουθη εμπειρική σχέση:

$$\sigma_{cn} = 0.019 \sigma_{ci} \exp\left(\frac{GSI}{20}\right) \quad (\text{Hoek, 1999})$$

### 2.2.2 Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (1776) χρησιμοποιείται ευρέως στην Εδαφομηχανική και είναι εφαρμόσιμο σε εδαφικούς ή βραχώδεις σχηματισμούς. Με βάση τον νόμο τριβής του Coulomb καθορίζεται ο συνδυασμός της ορθής και της διατμητικής τάσης, ο οποίος θα έχει ως αποτέλεσμα την αστοχία του υλικού, ενώ με τον κύκλο του Mohr προσδιορίζεται το ζεύγος των κυρίων τάσεων,

οι οποίες θα οδηγήσουν στο συνδυασμό της ορθής και της διατμητικής τάσης που θα καταλήξουν στην αστοχία της βραχόμαζας, καθώς και στην διεύθυνση του επιπέδου κατά το οποίο η βραχόμαζα θα αστοχήσει.

Το κριτήριο αυτό είναι εφαρμόσιμο και στη Βραχομηχανική, για κερματισμένες βραχόμαζες ή για να εκφράσει την αστοχία σε επίπεδο ασυνέχειας. Ουσιαστικά περιγράφει τον συνδυασμό της μέγιστης διατμητικής τάσης κατά το επίπεδο αστοχίας και της μέγιστης ορθής τάσης κάθετα σε αυτό, σε ελαστικό χώρο.

Η μαθηματική διατύπωση του κριτηρίου αστοχίας σε όρους ορθής και διατμητικής τάσης είναι η ακόλουθη:

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

Όπου:

$\tau$ : Η διατμητική τάση κατά την αστοχία.

$\sigma$ : Η ορθή τάση κατά την αστοχία.

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

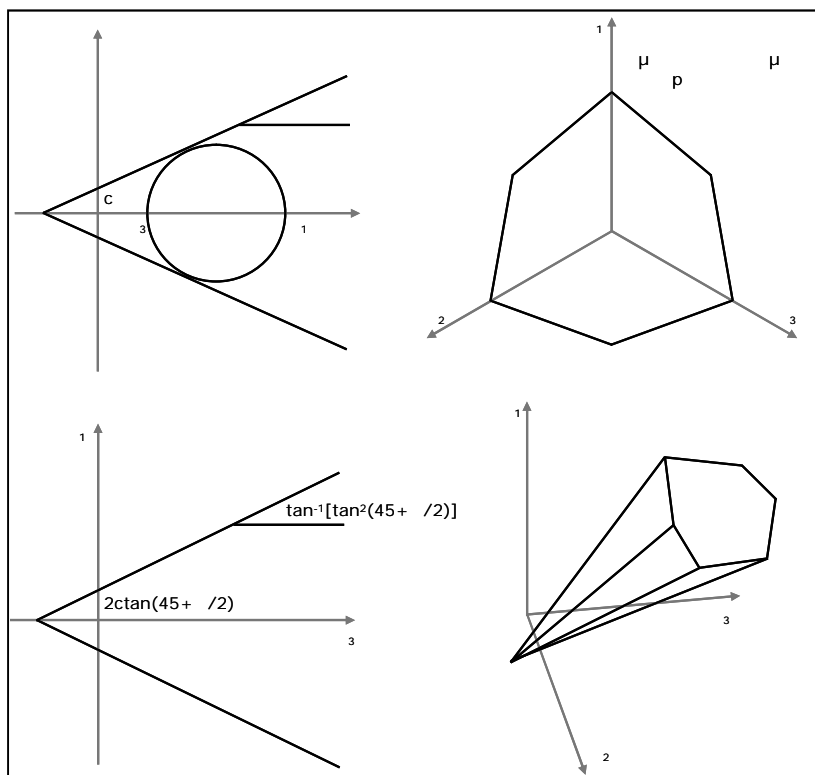
Το κριτήριο αυτό μπορεί να εκφραστεί και σε όρους τάσεων με την εξής μορφή:

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

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

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





Σχήμα 2.2 Γραφική απεικόνιση περιβάλλουσας αστοχίας Mohr-Coulomb.

### 2.2.3 Συσχέτιση των κριτηρίων Hoek-Brown και Mohr-Coulomb

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, προτιμάται η προσομοίωση της βραχώμαζας μέσω του κριτηρίου Hoek-Brown λόγω του ότι αυτό διαθέτει καμπύλη περιβάλλουσα αστοχίας η οποία είναι πλησιέστερη στην καμπύλη περιβάλλουσα των κύκλων Mohr που συνήθως διαθέτει η ρωγματωμένη βραχώμαζα κατά την αστοχία. Αρκετά προγράμματα, όμως, μη-γραμμικής ανάλυσης της συμπεριφοράς της βραχώμαζας γύρω από υπόγειες εκσκαφές δεν περιλαμβάνουν το κριτήριο Hoek-Brown αλλά το κριτήριο Mohr-Coulomb. Στις περιπτώσεις αυτές είναι χρήσιμη η συσχέτιση των δυο κριτηρίων.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται υπολογισμός των παραμέτρων αντοχής  $c$  και  $\phi$  του κριτηρίου Mohr-Coulomb που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων του κριτηρίου Hoek-Brown. Είναι προφανές ότι λόγω της διαφορετικής μορφής της περιβάλλουσας αστοχίας (καμπύλη περιβάλλουσα για το Hoek-Brown και ευθύγραμμη για το Mohr-Coulomb), η αντιστοιχία μεταξύ των δυο κριτηρίων αναφέρεται σε συγκεκριμένη περιοχή τάσεων όπου η καμπύλη περιβάλλουσα του κριτηρίου Hoek-Brown προσεγγίζεται με μια ευθεία (

Σχήμα 2.3).

Συνεπώς αναπτύσσεται μια μεθοδολογία υπολογισμού των ισοδύναμων παραμέτρων ( $c, \phi$ ) από τις παραμέτρους του κριτηρίου Hoek-Brown. Σύμφωνα με αυτή, ορίζεται μια ορθή τάση  $\sigma_{3max}$ , ο υπολογισμός της οποίας διαφέρει σε κάθε περίπτωση. Για τις σήραγγες προκύπτει ότι η σχέση που δίνει αυτή την ορθή τάση είναι η εξής:

$$\frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{cm}} = 0.47 \left( \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94}$$

Όπου:

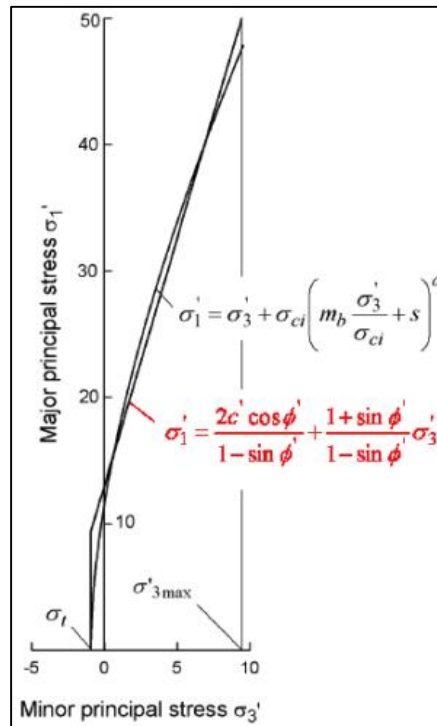
$\sigma_{cm}$ : Η αντοχή της βραχώμαζας.

$\gamma$ : Το ειδικό βάρος του εδάφους.

$H$ : Το ύψος των υπερκείμενων γαιών.

Η αντοχή της βραχώμαζας  $\sigma_{cm}$  δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} * ((m_b + 4s - a(m_b - 8s)) \left( \frac{m_b}{4} + s \right)^{a-1} / (2(1+a)(2+a)) \text{ (Hoek and Brown, 1997)}$$



Σχήμα 2.3 Συσχέτιση ελάχιστων και μέγιστων κυρίων τάσεων κριτηρίου Hoek-Brown και Mohr-Coulomb.

Τελικά η ισοδύναμη γωνία τριβής ( $\phi$ ) και η συνοχή ( $c$ ) υπολογίζονται από τις σχέσεις:

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

$$\phi = \sin^{-1} \left( \frac{6\alpha m_b(s + m_b\sigma_{3n})^{\alpha-1}}{2(\alpha + 1)(\alpha + 2) + 6\alpha m_b(s + m_b\sigma_{3n})^{\alpha-1}} \right), \text{ όπου } \sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{ci}}$$

### 3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

---

Προκειμένου να αποτυπωθεί η μέχρι τώρα επικρατούσα αντίληψη σχετικά με την απαιτούμενη απόσταση μεταξύ των παράλληλων κλάδων μιας δίδυμης σήραγγας (πλάτος πυλώνα), ανατρέξαμε στη διεθνή βιβλιογραφία. Αναζητήθηκαν έρευνες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν και εξετάζουν τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν μεταξύ τους οι δυο κλάδοι μιας δίδυμης σήραγγας, κατά τη διάνοιξή τους, και συνεπώς τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσονται οι συγκλίσεις, οι παραμορφώσεις αλλά και οι επιφανειακές καθιζήσεις, όταν πρόκειται για αβαθείς σήραγγες.

Συγκεντρώνοντας τα στοιχεία, παρατίθενται στο παρόν κεφάλαιο περιληπτικά και κατά χρονολογική σειρά οι έρευνες αυτές οι οποίες περιλαμβάνουν πειραματικές αλλά και αριθμητικές προσεγγίσεις. Παράλληλα, εξετάζονται οι βασικές παράμετροι (αλληλουχία εκσκαφών, γεωμετρία διατομής, σύστημα μέτρων άμεσης υποστήριξης) που σε συνδυασμό με το πλάτος του πυλώνα διαμορφώνουν το βαθμό αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται πραγματικά περιστατικά διάνοιξης σηράγγων, προβλήματα που εμφανίστηκαν κατά τη διάνοιξη αυτών, καθώς και τα μέτρα που ελήφθησαν ώστε να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα και τελικά να επιτευχθεί ευστάθεια της κατασκευής.

Στις παραγράφους που ακολουθούν υιοθετείται ενιαίος συμβολισμός των μεγεθών προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα που προκύπτουν σε κάθε περίπτωση. Έτσι, ως  $W$  λαμβάνεται η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των σηράγγων (πλάτος πυλώνα), ως  $L$  η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των σηράγγων, ως  $D$  η διάμετρος της σήραγγας και ως  $H$  το ύψος των υπερκείμενων γαιών (βάθος σήραγγας).

#### 3.1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

---

##### 3.1.1 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 δυο συγκεκριμένες εργασίες παρουσιάζονται μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιούνται σε υπάρχουσες δίδυμες σήραγγες πραγματικών διαστάσεων για δυο διαφορετικά εδαφικά υλικά, για την άργιλο του Σικάγου και για την άργιλο του Λονδίνου.

Στην πρώτη περίπτωση η απόσταση  $W$  μεταξύ των δυο κλάδων είναι ίση με  $0.425D$  ( $W=0.425D$ ), ενώ στη δεύτερη περίπτωση η αντίστοιχη απόσταση είναι ίση με  $0.6D$  ( $W=0.6D$ ). Σχετικά με την

αλληλουχία των εκσκαφών, και για τα δυο έργα, αρχικά ολοκληρώνεται η διάνοιξη της πρώτης σήραγγας και στη συνέχεια ακολουθεί ή εκσκαφή της δεύτερης.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων, διαπιστώνεται ότι η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων και για τα δυο περιστατικά είναι σημαντική. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούνται σημαντικές ακτινικές μετατοπίσεις στην επένδυση της πρώτης σήραγγας εξαιτίας της διάνοιξης της γειτονικής, της τάξεως του 0.1% και 0.12% της ακτίνας των σηράγγων του Σικάγου και του Λονδίνου αντίστοιχα.

### 3.1.2 Chaboussi J., Ranken R.E., 1977 (from Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W., 2004)

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

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

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

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

Η έρευνα των Adachi T., Kimura M., & Osada H. (1993) περιλαμβάνει μια σειρά εργαστηριακών πειραμάτων μικρής κλίμακας, προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά των αβαθών σηράγγων που διανοίγονται σε αμμώδη εδάφη.

Αναφέρουν ότι ο λόγος του ύψους των υπερκείμενων γαιών προς την απόσταση μεταξύ των σηράγγων ( $H/W$ , όπου  $H$  το βάθος της σήραγγας το οποίο μετράται από την επιφάνεια του εδάφους έως την οροφή της σήραγγας και  $W$  η απόσταση μεταξύ των δυο σηράγγων), αποτελεί μια χρήσιμη παράμετρος προκειμένου να εκτιμηθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ των πολλαπλών παράλληλων σηράγγων.

Διαπιστώνεται πως εάν το ύψος των υπερκείμενων γαιών παραμένει σταθερό, ο βαθμός αλληλεπίδρασης μεταξύ των σηράγγων αυξάνει με μείωση του πλάτους του πυλώνα. Αντίθετα, αν

το πλάτος διατηρείται σταθερό, η αλληλεπίδραση μεταξύ των παράλληλων σηράγγων εντείνεται με την αύξηση του πάχους των υπερκείμενων γαιών.

#### 3.1.4 Fujita K.,1985, Fang Y.S, Lin J.S., & Su C.S., 1994, (from Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W., 2004)

Στην περίπτωση αυτή, οι συγγραφείς βασιζόμενοι σε έρευνες του παρελθόντος που πραγματοποιήθηκαν από τον Peck (1969) αναπτύσσουν μια εμπειρική μέθοδο εκτίμησης των καθιζήσεων που δημιουργούνται εξαιτίας της διάνοιξης μιας σήραγγας μονού κλάδου.

Στη συνέχεια εξετάζοντας αποτελέσματα που προκύπτουν από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, που πραγματοποίησαν και δημοσίευσαν οι Hoyaux και Ladanyi (1970), συμπεραίνουν ότι η αρχή της επαλληλίας θα μπορούσε να εφαρμοστεί προκειμένου να εκτιμηθούν οι επιφανειακές καθιζήσεις που προκαλούνται από τη διάνοιξη δυο παράλληλων σηράγγων.

Σύμφωνα με τους μελετητές, η παραπάνω θεώρηση ισχύει μόνο στην περίπτωση όπου ο λόγος της απόστασης των αξόνων των δυο σηράγγων προς την διάμετρο αυτών είναι μεγαλύτερος από 2.7, ανεξαρτήτως του λόγου του πάχους των υπερκείμενων γαιών προς τη διάμετρο των σηράγγων. Στην περίπτωση αυτή οι δυο κλάδοι λαμβάνονται ως δυο ανεξάρτητες κατασκευές.

#### 3.1.5 Addenbrooke T.I., & Potts D.M., 1996 (from Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W., 2004)

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

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

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

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

### 3.1.6 Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C., 1996

Σκοπός της εργασίας των Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C. (1996) είναι να παρουσιάσουν τη θεώρηση τους σχετικά με το σχεδιασμό δίδυμων σηράγγων οι οποίες διανοίγονται σε μαλακούς σχηματισμούς.

Ο περιορισμός των παραμορφώσεων θεωρείται ο σημαντικότερος στόχος που πρέπει να επιτευχθεί ώστε να διασφαλιστεί η ευστάθεια της κατασκευής. Στον περιορισμό αυτό συμβάλουν η επιλογή του κατάλληλου πλάτους του πυλώνα, η εφαρμογή της ορθής αλληλουχίας των εκσκαφών και η έγκαιρη τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται, σύμφωνα με τους συγγραφείς, οι επικρατέστερες θεωρήσεις σχετικά με τις παραμέτρους αυτές. Επιπλέον, προκειμένου να τονίσουν τη σπουδαιότητα της επιλογής του κατάλληλου πλάτους του πυλώνα εξετάζουν ένα περιστατικό διάνοιξης δίδυμης σήραγγας στην Ταιβάν.

#### **Πλάτος πυλώνα**

Σχετικά με το πλάτος του πυλώνα, αναφέρουν ότι οι δυο κλάδοι της σήραγγας λαμβάνονται ως ανεξάρτητες κατασκευές αν αυτό είναι μεγαλύτερο των δυο διαμέτρων. Σύμφωνα με τη θεώρησή τους, η μέση τάση  $S_p$  που ασκείται στον πυλώνα μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

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

Όπου  $\gamma$  είναι το ειδικό βάρος της βραχώμαζας,  $H$  το ύψος των υπερκειμένων γαιών,  $B$  η διάμετρος της σήραγγας και  $W$  το πλάτος του πυλώνα.

Αντίστοιχα, η μονοαξονική αντοχή του πυλώνα  $\sigma_p$  μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

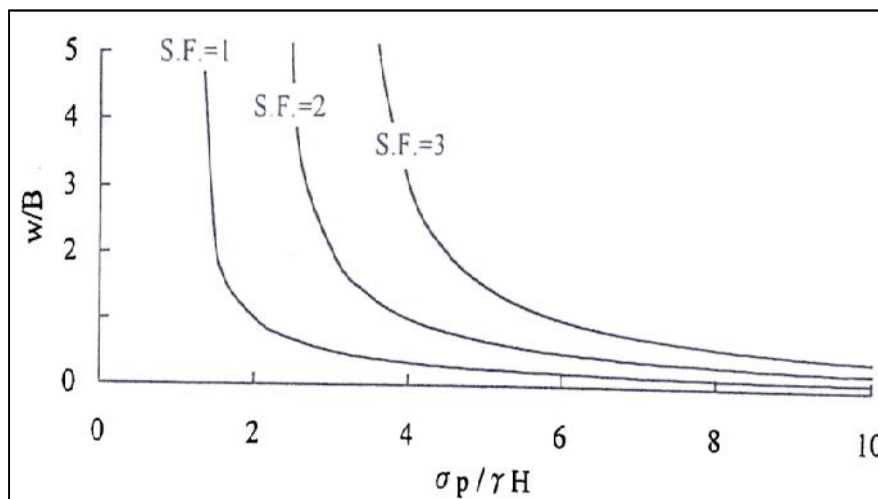
$$\sigma_p = \frac{2c \cos\varphi}{1 - \sin\varphi}$$

Όπου  $c$  και  $\varphi$  οι παράμετροι διατμητικής αντοχής της βραχώμαζας.

Συνεπώς ο συντελεστής ασφάλειας έναντι αστοχίας, ο οποίος κατά το σχεδιασμό απαιτείται να είναι αυξημένος, είναι ίσος με:

$$SF = \frac{\sigma_p}{S_p}$$

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο λόγος του πλάτους του πυλώνα προς την διάμετρο των σηράγγων ( $W/B$ ) σε συνάρτηση με την μονοαξονική αντοχή του πυλώνα κανονικοποιημένη ως προς τις γεωστατικές τάσεις ( $\sigma_p/\gamma H$ ), για κυμαινόμενο συντελεστή ασφαλείας από 1 έως 3.



**Σχήμα 3.1** Λόγος του πλάτους του πυλώνα σε σχέση με την μονοαξονική αντοχή του πυλώνα, κανονικοποιημένη ως προς τη γεωστατική τάση.

Από τα παραπάνω προκύπτει πως κατάλληλη απόσταση μεταξύ των δυο κλάδων των σηράγγων είναι εκείνη για την οποία ισχύει  $S_p < \sigma_p$ . Εάν η απόσταση αυτή δε μπορεί να επιτευχθεί για πρακτικούς λόγους, κυρίως εξαιτίας περιορισμών που επιβάλλει η οδοποιία, τότε θα πρέπει να εφαρμοστούν κατάλληλα μέτρα υποστήριξης. Για παράδειγμα, η βραχόμαζα που βρίσκεται μεταξύ των δυο κλάδων μπορεί να ενισχυθεί με τη χρήση προεντεταμένων αγκυριών τα οποία τοποθετούνται ταυτόχρονα και από τις δυο πλευρές του πυλώνα. Με τον τρόπο αυτό η αρχικά μονοαξονική φόρτιση μετατρέπεται σε τριαξονική.

### **Αλληλουχία εκσκαφών**

Σχετικά με την αλληλουχία των εκσκαφών, αναφέρεται πως η ολομέτωπη εκσκαφή προκαλεί την ταχύτερη φόρτιση της διατομής, συνεπώς και τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Για το λόγο αυτό δε κρίνεται κατάλληλη η εφαρμογή της σε μαλακούς σχηματισμούς. Στα εδάφη αυτά ο διαχωρισμός του μετώπου σε μικρότερα τμήματα αποτελεί τη πιο ορθή λύση η οποία θα εξασφαλίσει περιορισμό των παραμορφώσεων και συνεπώς ευστάθεια της κατασκευής.

Αναφέρεται παράλληλα, πως η πιο δημοφιλής μέθοδος εκσκαφής μπορεί να χωριστεί σε δυο υπομεθόδους, τη μέθοδο ορθού μετώπου και βαθμίδα και τη μέθοδο της πλευρικής προσβολής. Η μέθοδος διάνοιξης με πλευρικές στοές είναι κατάλληλη για μεγάλα ανοίγματα, για πτωχή ποιότητα βραχόμαζας και κυρίως για εκείνες τις σήραγγες όπου η εξέλιξη των μετακινήσεων θα πρέπει αυστηρά να ελέγχεται. Εμπειρικά, η χρήση της δεύτερης μεθόδου επιτρέπει σχεδόν την ανάπτυξη των μισών μετακινήσεων σε σχέση με αυτές που θα αναπτύσσονταν ύστερα από εφαρμογή της πρώτης μεθόδου.

Παράλληλα, αναφέρεται ότι η ταυτόχρονη εκσκαφή των δυο κλάδων δε συστήνεται, καθώς είναι πιθανό να προκληθεί αιφνίδια χαλάρωση της περιβάλλουσας βραχόμαζας, η οποία μπορεί να προκαλέσει μη αναμενόμενες και εκτεταμένες παραμορφώσεις. Έτσι, είναι προτιμότερο να επιλέγεται η διαδοχική εκσκαφή των δυο κλάδων.

### **Μέτρα υποστήριξης**

Κατά τη διάνοιξη δίδυμων σηράγγων σε μαλακούς σχηματισμούς υπό υψηλά πεδία τάσεων, οι παραμορφώσεις εμφανίζουν χαρακτηριστικά σύνθλιψης. Συνεπώς τα κλασικά μέτρα υποστήριξης (αγκύρια, πλέγμα, εκτοξευμένο σκυρόδεμα) δεν επαρκούν καθώς δεν μπορούν να παρέχουν την απαραίτητη δυσκαμψία και να εξασφαλίσουν ευστάθεια και περιορισμό των παραμορφώσεων. Για παράδειγμα τα αγκύρια είναι αποτελεσματικά για βραχώμαζες μέτρια ρωγατωμένες αλλά δε παρέχουν τον απαιτούμενο συντελεστή ασφαλείας για έντονα ρωγατωμένες και αποδομημένες βραχώμαζες. Στις περιπτώσεις αυτές κρίνεται σκόπιμη η τοποθέτηση δύσκαμπτης υποστήριξης.

### **Περιστατικό του παρελθόντος**

Προκειμένου να τονιστεί η σπουδαιότητα της επιλογής του κατάλληλου πλάτους του πυλώνα εξετάζεται στη μελέτη αυτή ένα περιστατικό του παρελθόντος. Πρόκειται για μια δίδυμη σήραγγα η οποία διανοίχθηκε στο βραχώδες υπόβαθρο της Ταιβάν.

Η σήραγγα διαθέτει μήκος 1.85Km, πεταλοειδή διατομή (πλάτος ίσο με 16m και ύψος ίσο με 11m) ενώ η διάνοιξή της πραγματοποιήθηκε παράλληλα από δυο μέτωπα εκσκαφής. Κατά τη διάνοιξη συναντήθηκαν σχιστόλιθος, συμπαγής ψαμμίτης με ενστρώσεις σχιστόλιθου, καθώς και μια έντονα διατμημένη ζώνη εξαιτίας ενός υφιστάμενου ρήγματος.

Η εκσκαφή ξεκίνησε να πραγματοποιείται σε τρεις φάσεις (top heading, bench and invert). Κατά τη διάνοιξη όμως σημειώθηκαν αρκετά μεγάλες, μη αποδεκτές παραμορφώσεις (μεγαλύτερες από 7% του ανοίγματος της εκσκαφής), καθώς το μέτωπο συνάντησε την έντονα διατμημένη ζώνη και τις γειτονικές περιοχές αυτής. Μόλις οι εκτεταμένες παραμορφώσεις έλαβαν χώρα, τοποθετήθηκαν επιπλέον αγκύρια και πραγματοποιήθηκαν τοπικές επιδιορθώσεις με τη χρήση σκυροδέματος, ενώ οι εργασίες εκσκαφής διακόπηκαν προσωρινά. Όπως είναι αναμενόμενο περιορίστηκε η εξάπλωση των παραμορφώσεων.

Στη συνέχεια, επιπλέον προεντεταμένα αγκύρια τοποθετήθηκαν στην οροφή, όπου η κάθε σειρά των αγκυρίων απέχει μεταξύ τους απόσταση ίση με 1.5m. Έτσι οι εκσκαφές πραγματοποιήθηκαν, μακριά από τη διατμημένη ζώνη. Παράλληλα, όμως, οι παραμορφώσεις συνέχιζαν να εξελίσσονται. Προκειμένου λοιπόν να ενισχυθεί ο πυλώνας, τοποθετήθηκαν τρεις σειρές αγκυρίων καθ' ύψος του πυλώνα σε όλο το μήκος του. Με τον τρόπο αυτό περιορίστηκαν οι μετακινήσεις και ολοκληρώθηκε με επιτυχία η διάνοιξη.

#### **3.1.7 Kim S.H., Burd H.J. & Miligan G.W.E., 1998 (from Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W., 2004)**

Κατά την έρευνά τους, οι Kim S.H., Burd H.J. & Miligan G.W.E. (1998) εκτελούν μια σειρά εργαστηριακών δοκιμών οι οποίες περιλαμβάνουν παράλληλες σήραγγες που διανοίγονται σε



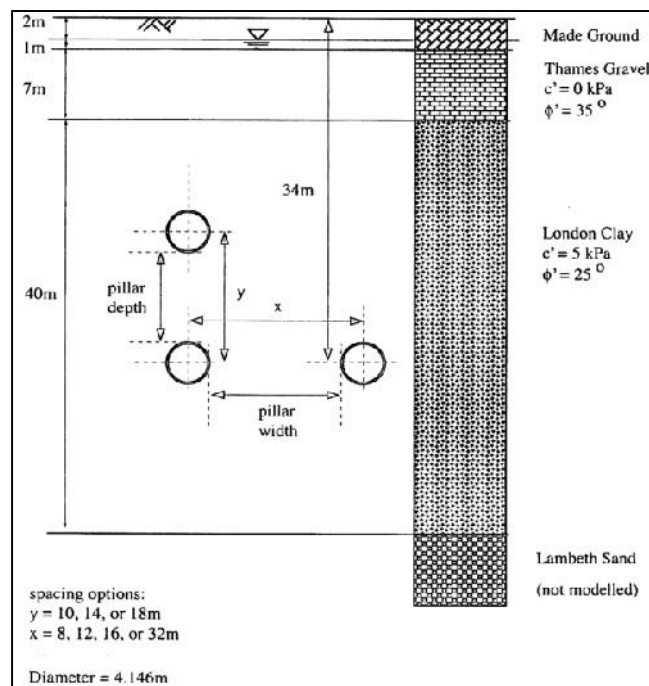
υπερστερεοποιημένη άργιλο. Κατασκευάζονται συνολικά τρεις σήραγγες, εκ των οποίων οι δυο μεταγενέστερες τοποθετούνται είτε παράλληλα είτε κάθετα στον άξονα της αρχικής.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προκύπτει ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των πολλαπλών κλάδων μιας σήραγγας οφείλεται στην ανακατανομή των τάσεων μέσα στο έδαφος η οποία προκαλείται από την παραμόρφωση της επένδυσης της πρώτης σήραγγας καθώς και από την απώλεια όγκου εδαφικού υλικού. Όλα τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο μηχανισμός της αλληλεπίδρασης αποτελεί ένα αρκετά περίπλοκο φαινόμενο. Παράλληλα αναφέρεται ότι σύμφωνα με τις πειραματικές δοκιμές για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο από  $1.5D$ , η αλληλεπίδραση μεταξύ των κλάδων της σήραγγας είναι αμελητέα.

### 3.1.8 Addenbrooke T.I., & Potts D.M., 2001

Στην περίπτωση αυτή, οι συγγραφείς πραγματοποιούν διδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να εξεταστεί η εξέλιξη των εδαφικών καθιζήσεων και των παραμορφώσεων κατά τη διάνοιξη μιας δίδυμης σήραγγας. Παράγοντες όπως η θέση διάνοιξης της σήραγγας, το πλάτος του πυλώνα, η αλληλουχία των εκσκαφών και η χρονική περίοδος που μεσολαβεί μεταξύ της εκσκαφής των δυο κλάδων, επιδρούν σημαντικά στο βαθμό αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων.

Αναλυτικότερα, πραγματοποιούν μια σειρά αναλύσεων οι οποίες χρησιμοποιούν δυο μοντέλα, διαφορετικής γεωμετρίας. Η πρώτη γεωμετρία περιλαμβάνει δυο σήραγγες των οποίων ο άξονας είναι παράλληλος κατά την οριζόντια διεύθυνση (side-by-side tunnels), ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει δυο σήραγγες των οποίων ο άξονας είναι παράλληλος κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (piggyback tunnels). Οι δυο αυτές γεωμετρίες παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



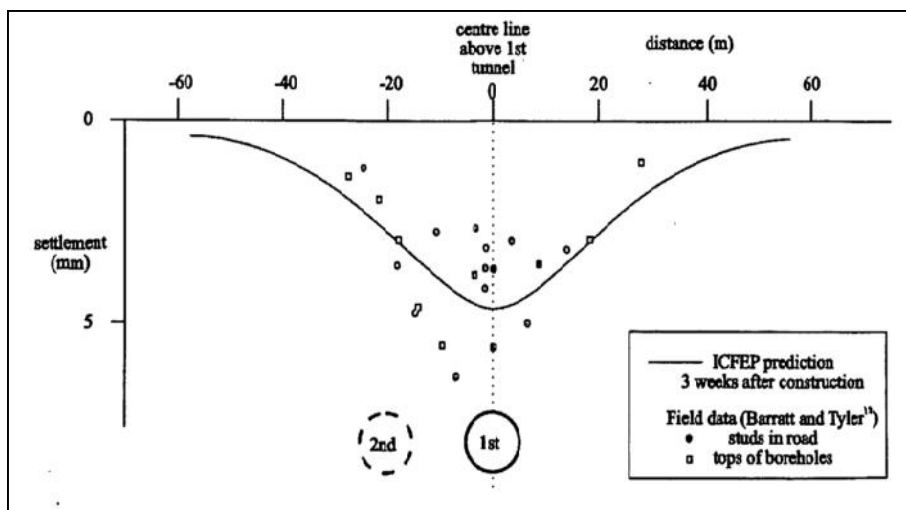
Σχήμα 3.2 Διαφορετικές γεωμετρίες των αριθμητικών προσομοιωμάτων.

Στη συνέχεια ακολουθεί περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των προσομοιωμάτων, καθώς και τα αποτελέσματα των αναλύσεων για κάθε μια από τις δυο γεωμετρίες.

**Παράλληλοι άξονες της σήραγγας κατά την οριζόντια διεύθυνση (side-by-side geometry):**

Στην περίπτωση αυτή, η διάμετρος των σηράγγων είναι ίση με 4.146m (D=4.146m) ενώ το ύψος των υπερκείμενων γαιών λαμβάνεται ίσο με 34m (H=34m). Η οριζόντια απόσταση μεταξύ των αξόνων των δυο σηράγγων μεταβάλλεται (W=8, 12, 16, 32m), έτσι ώστε να μελετηθεί σε κάθε περίπτωση η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων.

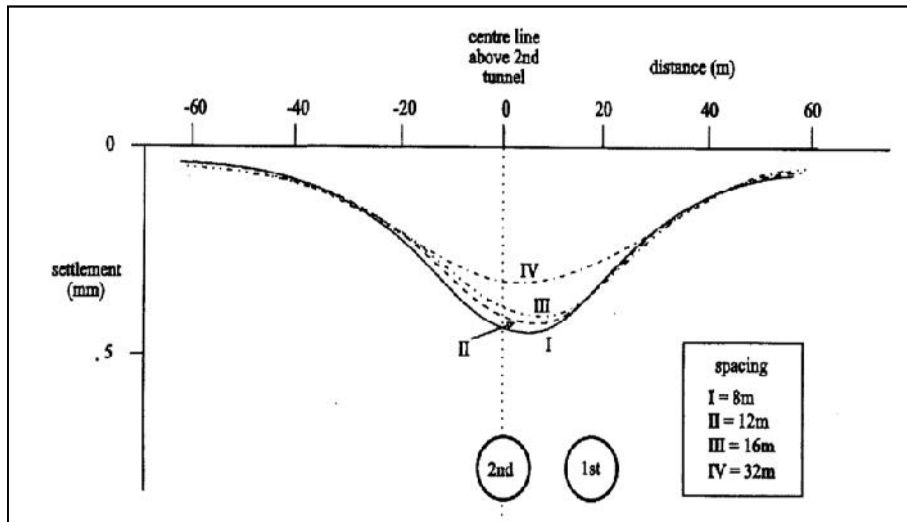
Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν οι παραδοχές των αναλύσεων είναι ρεαλιστικές, πραγματοποιήθηκε σύγκριση του προφίλ των καθιζήσεων του πρώτου κλάδου της σήραγγας, αμέσως πριν την κατασκευή του δεύτερου, όπως προκύπτει από τις αναλύσεις και του προφίλ των καθιζήσεων όπως διαμορφώνεται από τις επιτόπου μετρήσεις του πεδίου που ελήφθησαν από το Regent’s Park κατά τη διάρκεια της κατασκευής της Fleet Line Stage (D=4.146m, H=34m).



**Σχήμα 3.3 Προφίλ των εδαφικών καθιζήσεων που δημιουργούνται κατά της διάνοιξης της πρώτης σήραγγας, για βάθος σήραγγας H=34m.**

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται μια διασπορά των επιτόπου μετρήσεων, ο μέσος όρος όμως αυτών προσεγγίζει τη καμπύλη που προκύπτει από τις αναλύσεις. Συνεπώς παρατηρείται ότι υπάρχει καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων και των επιτόπου μετρήσεων.

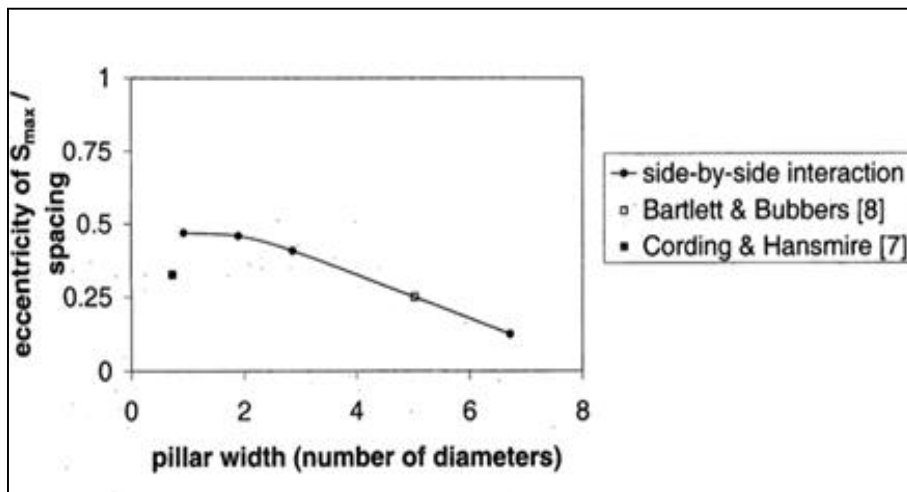
Στο επόμενο διάγραμμα εμφανίζεται η καμπύλη των καθιζήσεων όπως διαμορφώνεται μετά τη διάνοιξη των δυο σηράγγων για τα τέσσερα διαφορετικά πλάτη πυλώνων.



Σχήμα 3.4 Προφίλ των εδαφικών καθιζήσεων που δημιουργούνται κατά της διάνοιξης της δεύτερης σήραγγας.

Παρατηρείται ότι και οι τέσσερις καμπύλες έχουν διαφορετική εκκεντρότητα (ως εκκεντρότητα ορίζεται η απόσταση μεταξύ του άξονα της δεύτερης σήραγγας και της μέγιστης τιμής της καμπύλης των καθιζήσεων). Το γεγονός αυτό αποδεικνύει πως για διαφορετικά πλάτη πυλώνα ποικίλει και ο βαθμός αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων.

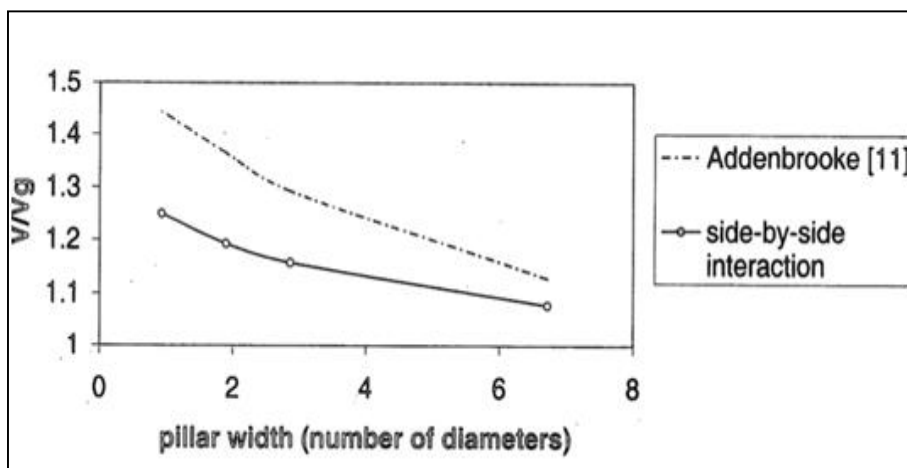
Στο ακόλουθο διάγραμμα εμφανίζεται ο λόγος της εκκεντρότητας προς τη απόσταση των σηράγγων σε σχέση με το πλάτος του πυλώνα. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει ότι ο λόγος αυτός τείνει στο μηδέν καθώς το πλάτος του πυλώνα αυξάνεται.



Σχήμα 3.5 Μεταβολή της εκκεντρότητας της μέγιστης καθιζήσης της δεύτερης σήραγγας σε συνάρτηση με το πλάτος του πυλώνα.

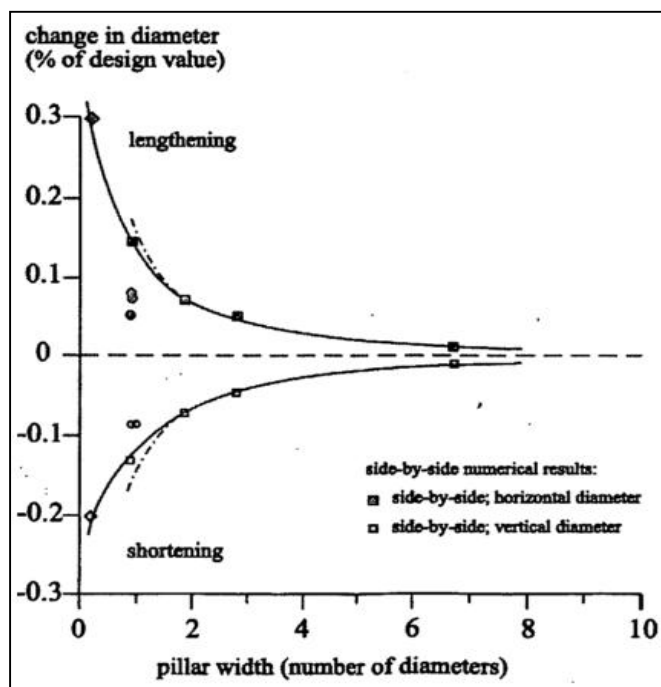
Γενικά, παρατηρώντας τα δυο παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο των επτά διαμέτρων η επίδραση της υπάρχουσας σήραγγας είναι αμελητέα και το προφίλ των καθιζήσεων είναι πρακτικά συμμετρικό ως προς τον άξονα της δεύτερης σήραγγας. Επιπλέον παρατηρείται πως καθώς το πλάτος του πυλώνα τείνει στο μηδέν, ο λόγος τείνει να είναι σταθερός και ίσος με 0.5. Αυτό σημαίνει πως όσο κοντά και αν διανοίγονται οι σήραγγες η μέγιστη καθιζήση θα εμφανίζεται πάντα πιο κοντά στον άξονα της δεύτερης σήραγγας.

Στη συνέχεια συσχετίζεται η απώλεια όγκου του εδαφικού υλικού σε σχέση με το πλάτος του πυλώνα. Τιμή του λόγου ίση με τη μονάδα, δηλώνει μηδενική αλληλεπίδραση των γειτονικών κλάδων. Παρατηρείται πως αν και η μείωση της εδαφικής απώλειας με την αύξηση του πλάτους του πυλώνα δεν είναι ταχεία, για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο των επτά διαμέτρων σταματά να υφίσταται επίδραση. Παράλληλα, σημειώνεται πως η απώλεια του όγκου είναι μεγαλύτερη κατά τη δεύτερη εκσκαφή, καθώς η διάνοιξη της πρώτης σήραγγας έχει προκαλέσει χαλάρωση του περιβάλλοντος εδάφους.



Σχήμα 3.6 Απώλεια όγκου εδαφικού υλικού για τη δεύτερη σήραγγα σε συνάρτηση με το πλάτος του πυλώνα.

Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση της διάνοιξης της δεύτερης σήραγγας στην εξέλιξη των παραμορφώσεων της επένδυσης της υφιστάμενης σήραγγας. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η επιμήκυνση της οριζόντιας διαμέτρου και η βράχυνση της κατακόρυφης διαμέτρου.



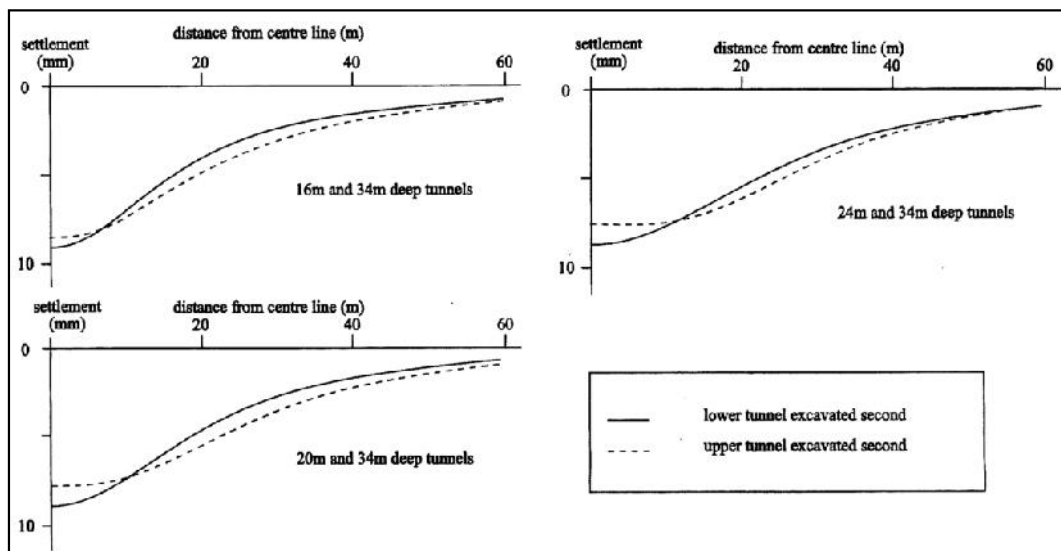
Σχήμα 3.7 Παραμόρφωση της επένδυσης της υφιστάμενης σήραγγας εξαιτίας της διάνοιξης της δεύτερης σήραγγας (side-by-side geometry).

Είναι φανερό πως καθώς το πλάτος του πυλώνα αυξάνει, μειώνονται οι παραμορφώσεις. Παράλληλα, όπως και στην περίπτωση των επιφανειακών καθιζήσεων, η παραμόρφωση της επένδυσης και συνεπώς η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων είναι αμελητέα για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο των επτά διαμέτρων.

**Παράλληλοι άξονες της σήραγγας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (riggy-back geometry):**

Στην περίπτωση αυτή, η διάμετρος των σηράγγων λαμβάνεται ίση με 4.146m ( $D=4.146m$ ) ενώ το ύψος των υπερκείμενων γαιών για την χαμηλότερη σήραγγα είναι ίσο με 34m ( $H=34m$ ). Η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των αξόνων των σηράγγων λαμβάνεται ίση με 16, 20 και 24m. Για τη γεωμετρία αυτή εξετάζονται δυο περιπτώσεις, η άνω σήραγγα να διανοίγεται πρώτη και η κάτω σήραγγα να διανοίγεται πρώτη.

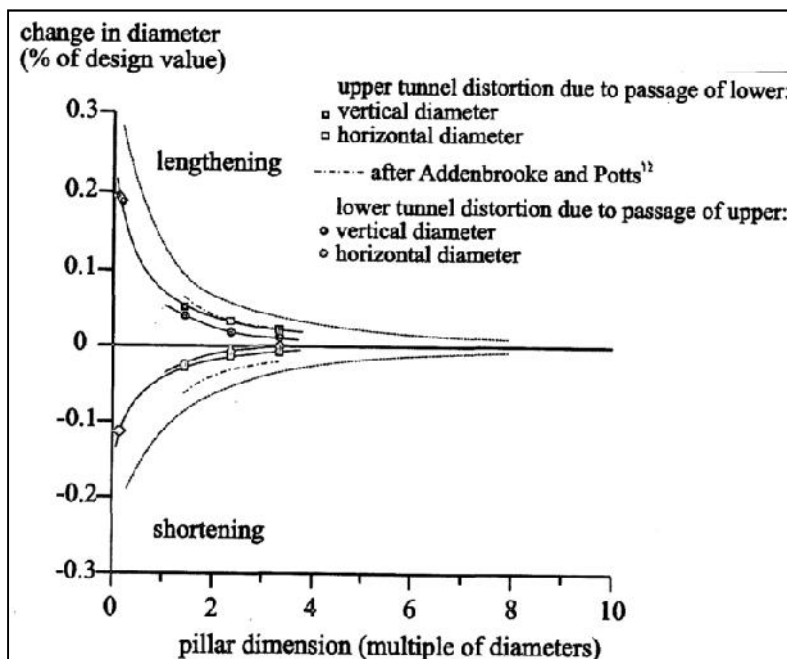
Ακολουθως παρουσιάζεται το προφίλ των επιφανειακών καθιζήσεων όπως διαμορφώνεται μετά τη διάνοιξη και της δεύτερης σήραγγας, για τρεις διαφορετικές αποστάσεις σηράγγων και για διαφορετική σειρά διάνοιξης (η άνω σήραγγα να εκσκάπτεται πρώτη και η κάτω σήραγγα να εκσκάπτεται πρώτη).



**Σχήμα 3.8 Προφίλ εδαφικών καθιζήσεων αμέσως μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής και των δυο κλάδων.**

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι στην περίπτωση όπου η δεύτερη σήραγγα εκσκάπτεται κάτω από την υφιστάμενη οι καθιζήσεις είναι λιγότερο έντονες.

Στο επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 3.9) εμφανίζονται οι παραμορφώσεις στην επένδυση της πρώτης σήραγγας εξαιτίας της διάνοιξης της δεύτερης.



Σχήμα 3.9 Παραμόρφωση της επένδυσης της υφιστάμενης σήραγγας εξαιτίας της διάνοιξης της δεύτερης σήραγγας (piggyback tunnels).

Διαπιστώνεται ότι όσο μικρότερη είναι η απόσταση των δυο σηράγγων, τόσο μεγαλύτερες είναι οι παραμορφώσεις για την πρώτη σήραγγα. Παράλληλα, σε όλες τις αναλύσεις, η επιμήκυνση της κάθετης διαμέτρου είναι μεγαλύτερη από τη βράχυνση της οριζόντιας. Οι παραμορφώσεις που παράγονται τελικά στην περίπτωση αυτή είναι λιγότερο έντονες σε σχέση με αυτές που δημιουργούνται για σήραγγες οι οποίες διανοίγονται παράλληλα κατά την οριζόντια έννοια, για αντίστοιχες αποστάσεις σηράγγων.

Συγκεντρωτικά, οι παραμορφώσεις και οι μετακινήσεις στη επένδυση της ήδη υπάρχουσας σήραγγας είναι μεγαλύτερες εάν η δεύτερη σήραγγα διανοίγεται κάτω από την πρώτη σε σχέση με το αν διανοίγεται πάνω από αυτήν. Για την περίπτωση όπου η δεύτερη σήραγγα διανοίγεται πάνω από την πρώτη η αλληλεπίδραση είναι αμελητέα για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο των τριών διαμέτρων.

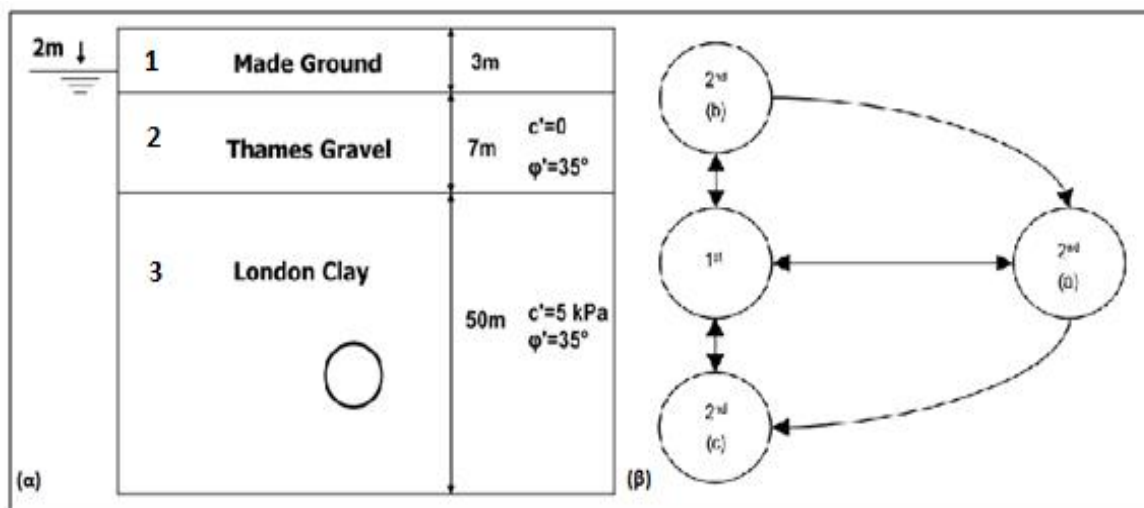
### 3.1.9 Koungelis D.K & Augarde C. E., 2004

Σκοπός της έρευνάς των Koungelis & Augarde (2004) είναι η βελτίωση της πρόβλεψης σχετικά με την ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση μεταξύ πολλαπλών, αβαθών σηράγγων που διανοίγονται σε μαλακά εδάφη, ώστε να διασφαλίζεται η ευστάθεια κατά το στάδιο της διάνοιξης αλλά και της λειτουργίας της κατασκευής. Για τη διερεύνηση του προβλήματος πραγματοποιούνται διδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος Plaxis.

Αναλυτικότερα, εκτελούνται παραμετρικές αναλύσεις κατά τη διάρκεια των οποίων η στρωματογραφία και η διάμετρος D των σηράγγων (D=4.174m) διατηρούνται σταθερές. Το πρώτο εδαφικό στρώμα (Made Ground) προσομοιάζεται ως γραμμικά ελαστικό με τη στάθμη του

υδροφόρου ορίζοντα να βρίσκεται σε βάθος 2m. Η συμπεριφορά του δεύτερου (Thames Gravel) και του τρίτου (London Clay) εδαφικού στρώματος θεωρείται ελαστική - τέλεια πλαστική, ενώ υιοθετείται το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

Αναφορικά με την αλληλουχία των εκσκαφών, σε όλες τις περιπτώσεις, πρώτα ολοκληρώνεται η διάνοιξη της πρώτης σήραγγας και στη συνέχεια ακολουθεί η διάνοιξη της δεύτερης.



Σχήμα 3.10 (α) Στρωματογραφία εδάφους (β) Τρεις εναλλακτικές θέσης της δεύτερης διανοιγόμενης σήραγγας.

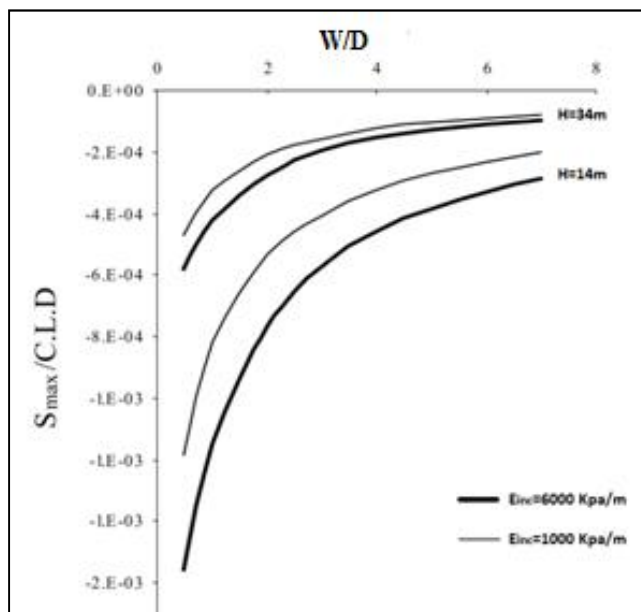
Εξετάστηκαν λοιπόν τρεις ομάδες αριθμητικών αναλύσεων, όπου σε κάθε περίπτωση μεταβάλλεται η γεωμετρία του μοντέλου. Παρακάτω περιγράφονται οι τρεις διαφορετικές γεωμετρίες και παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε κάθε περίπτωση.

#### **Παράλληλοι άξονες της σήραγγας κατά την οριζόντια διεύθυνση (side-by-side geometry):**

Στην περίπτωση αυτή (Γεωμετρία 1) οι αναλύσεις πραγματοποιούνται για δυο διαφορετικά πάχη υπερκείμενων γαιών  $H$  ( $H=14\text{m}$  και  $H=34\text{m}$ ), ενώ το πλάτος  $W$  του πυλώνα μεταξύ των δυο σηράγγων κυμαίνεται από  $0.5D$  έως  $7D$  ( $W=0.5D \div 7D$ ).

Στη μελέτη αυτή εξετάζονται οι καθιζήσεις που οφείλονται μόνο στη διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας, καθώς οι καθιζήσεις που δημιουργούνται από τη διάνοιξη της πρώτης λαμβάνονται ως μηδενικό σημείο αναφοράς.

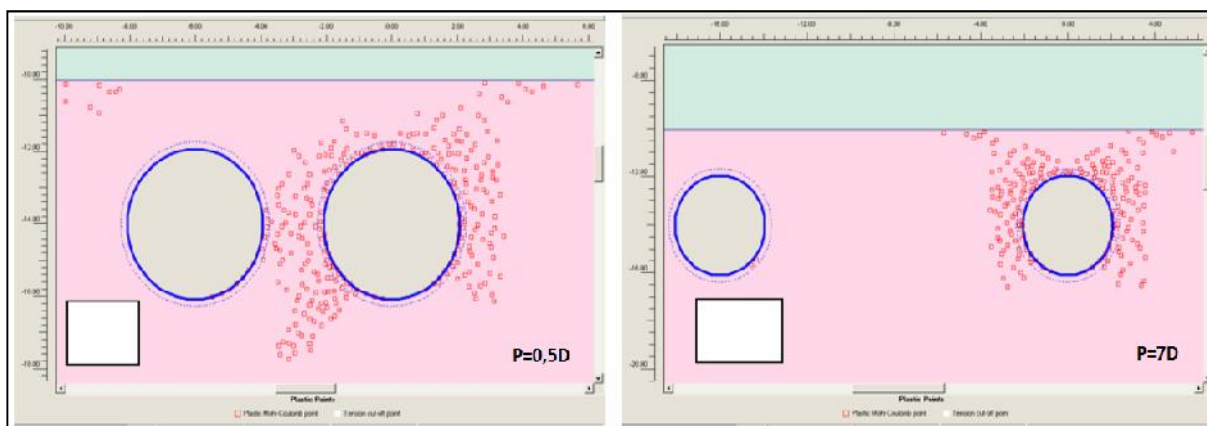
Στο διάγραμμα που ακολουθεί, απεικονίζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα μιας παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε για την περίπτωση αυτή.



**Σχήμα 3.11** Εξέλιξη των επιφανειακών καθιζήσεων σε συνάρτηση με το λόγο πλάτους πυλώνα – διαμέτρου διατομής, για διαφορετικά πάχη υπερκείμενων γαιών και για διαφορετικές δυσκαμψίες εδάφους.

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

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



**Σχήμα 3.12** Πλαστική ζώνη γύρω από τη δεύτερη διανοιγόμενη σήραγγα αμέσως μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής: α) Για πλάτος πυλώνα ίσο με 0.5D β) Για πλάτος πυλώνα ίσο με 7D.



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

**Παράλληλοι άξονες της σήραγγας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (riggy-back geometry):**

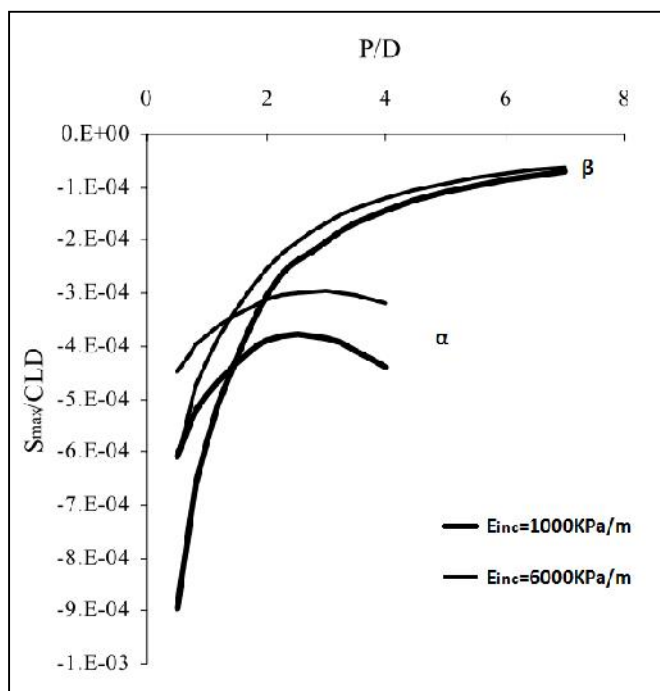
*α. Η δεύτερη σήραγγα διανοίγεται πάνω από την ήδη υπάρχουσα (Γεωμετρία 2α).*

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

*β. Η δεύτερη σήραγγα διανοίγεται κάτω από την ήδη υπάρχουσα (Γεωμετρία 2β).*

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

Το διάγραμμα που ακολουθεί είναι ανάλογο του διαγράμματος της πρώτης γεωμετρίας και παρουσιάζει ενδεικτικά αποτελέσματα για τις περιπτώσεις όπου οι άξονες της σήραγγας είναι παράλληλοι κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (Γεωμετρίες 2α και 2β).



**Σχήμα 3.13 Εξέλιξη των επιφανειακών καθιζήσεων καθώς μεταβάλλεται το πλάτος του πυλώνα, για διαφορετικές δυσκαμψίες εδάφους.**

Και στις περιπτώσεις αυτές, όσο σκληρότερο είναι το εδαφικό υλικό, τόσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος των καθιζήσεων. Για τη γεωμετρία 2β, παρατηρείται ότι οι καθιζήσεις τείνουν να μειωθούν με την αύξηση του πλάτους του πυλώνα, αναλογικά με την περίπτωση της Γεωμετρίας 1. Ένα άλλο χαρακτηριστικό που αξίζει να επισημανθεί είναι ότι για μικρό πλάτος πυλώνα οι καθιζήσεις για τη Γεωμετρία 2β είναι αρκετά μεγάλες σε σχέση με τη Γεωμετρία 2α. Καθώς, όμως, το πλάτος του πυλώνα αυξάνει οι καθιζήσεις για την περίπτωση 2α είναι εντονότερες σε σχέση με αυτές για τη 2β.

Ανακεφαλαιώνοντας, από την έρευνα αυτή προκύπτει ότι:

- i. Δυο σήραγγες που εκσκάπτονται διαδοχικά μέσα στο χώρο και οι άξονες τους είναι παράλληλοι κατά την οριζόντια διεύθυνση παύουν να αλληλεπιδρούν για μεταξύ τους απόσταση μεγαλύτερη από τρεις ή τέσσερις διαμέτρους.
- ii. Δυο σήραγγες που εκσκάπτονται διαδοχικά μέσα στο χώρο, οι άξονες τους είναι παράλληλοι κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και η δεύτερη σήραγγα εκσκάπτεται πάνω από την ήδη υπάρχουσα, παρουσιάζουν μικρή αλληλεπίδραση όταν η απόσταση των αξόνων είναι ίση με μια διάμετρο. Για απόσταση μεγαλύτερη των τριών διαμέτρων η αλληλεπίδραση φαίνεται να είναι αμελητέα.
- iii. Δυο σήραγγες που εκσκάπτονται διαδοχικά μέσα στο χώρο, οι άξονες τους είναι παράλληλοι κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και η δεύτερη σήραγγα εκσκάπτεται κάτω από την ήδη υπάρχουσα, συνεχίζουν να αλληλεπιδρούν ακόμα και όταν η απόσταση των αξόνων είναι αρκετά μεγάλη.

#### 3.1.10 Kim S.H., 2004

Σκοπός της έρευνάς του είναι να μελετηθούν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στην επένδυση μιας υπάρχουσας σήραγγας μονού κλάδου εξαιτίας της διάνοιξης μια νέας, γειτονικής.

Για το σκοπό αυτό κατασκευάζεται μια πειραματική διάταξη και πραγματοποιούνται εργαστηριακές δοκιμές μικρής κλίμακας ώστε να προσδιοριστεί το βέλτιστο πλάτος του πυλώνα για το οποίο οι δυο κατασκευές δεν αλληλεπιδρούν. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται διδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτών με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές. Με τον τρόπο αυτό διερευνάται εάν οι παράμετροι που υιοθετούνται για τις αριθμητικές αναλύσεις παράγουν αξιόπιστα αποτελέσματα.

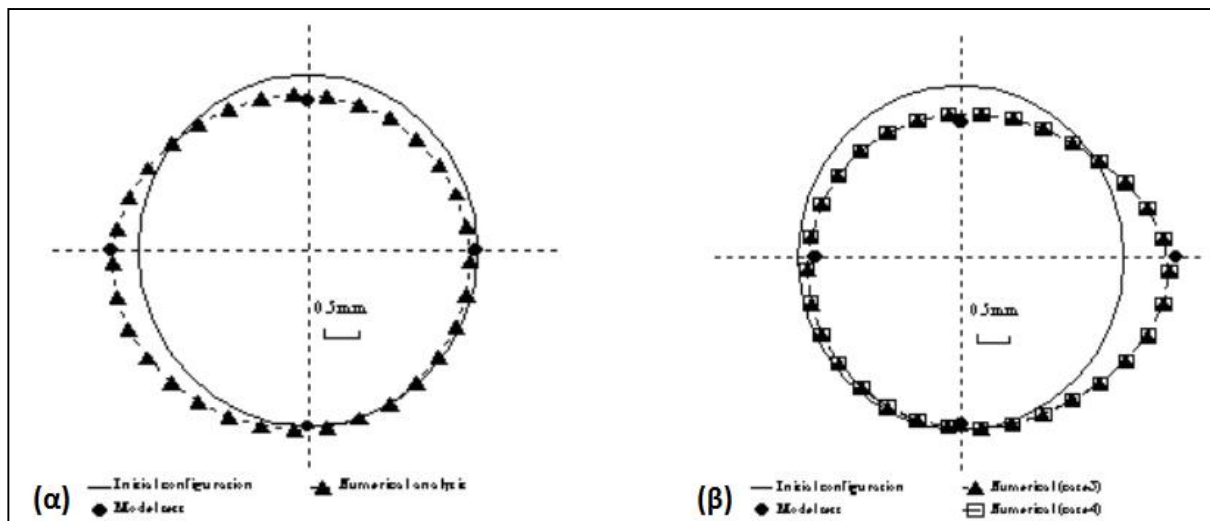
#### **Πειραματική διάταξη**

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

#### **Αριθμητικές αναλύσεις**

Η αλληλεπίδραση των δυο σήραγγων αποτελεί σύνθετο μηχανισμό, συνεπώς η προσομοίωση του φαινομένου με πειραματικές διατάξεις δεν είναι απόλυτα ρεαλιστική. Για το λόγο αυτό εκτελούνται αριθμητικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας τις διαστάσεις του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν και παραπάνω. Πραγματοποιούνται αναλύσεις για δυο διαφορετικά πλάτη πυλώνα.

Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα των μετακινήσεων της επένδυσης της υφιστάμενης σήραγγας εξαιτίας της διάνοιξης της γειτονικής σήραγγας αφενός σε απόσταση ίση με δυο διαμέτρους ( $W=2D$ ) και αφετέρου σε απόσταση ίση με  $1.4D$  ( $W=1.4D$ ), τόσο για τις εργαστηριακές δοκιμές όσο και για τις αριθμητικές αναλύσεις.



**Σχήμα 3.14** Μετακινήσεις στην επένδυση της υφιστάμενης σήραγγας (α) Λόγω της διάνοιξης σήραγγας σε απόσταση  $W=2D$ , στα αριστερά της υφιστάμενης (β) Λόγω της διάνοιξης σήραγγας σε απόσταση  $W=1.4D$ , στα δεξιά της υφιστάμενης.

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

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

### 3.1.11 Karakus M., Ozsan A. & Basarir H., 2007

Εξετάζουν το περιστατικό της διάνοιξης μιας δίδυμης σήραγγας που αποτελεί τμήμα του μητροπολιτικού σιδηρόδρομου της Άγκυρας στην Τουρκία. Παρουσιάζουν τις μετρήσεις των συγκλίσεων που καταγράφηκαν κατά την κατασκευή και στη συνέχεια τα αποτελέσματα διδιάστατων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποίησαν ώστε να εξεταστεί περαιτέρω η εξέλιξη των συγκλίσεων για το περιστατικό αυτό.

Η διάμετρος  $D$  των δίδυμων σηράγγων είναι ίση με 7m ( $D=7m$ ) ενώ η μεταξύ τους απόσταση διατηρείται σταθερή και ίση με 15m. Η εκσκαφή, η οποία πραγματοποιείται σε μικρό βάθος, συναντά σε όλο της το μήκος ελαφρώς υπερστερεοποιημένη άργιλο (Ankara clay).

Σχετικά με την αλληλουχία των εκσκαφών, αρχικά εκσκάπτεται το άνω τμήμα της πρώτης σήραγγας και αμέσως σκυροδετείται με εκτοξευμένο σκυρόδεμα πάχους 30mm. Έπειτα τοποθετούνται πλέγμα, μεταλλικά πλαίσια και μια επιπλέον στρώση εκτοξευμένου σκυροδέματος πάχους 170mm. Στη συνέχεια εκσκάπτεται το κάτω τμήμα της διατομής και τοποθετούνται ανάλογα τα αντίστοιχα μέτρα υποστήριξης. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ευστάθεια, το βήμα της εκσκαφής διατηρείται σταθερό και ίσο με 1 - 1.5m, ενώ το άνω τμήμα προπορεύεται του κατωτέρου κατά 6m, το μέγιστο, ώστε να αποτρέπεται η δημιουργία παραμενουσών παραμορφώσεων. Ανάλογα πραγματοποιείται και η διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας.

Κατά τη διάρκεια της εκσκαφής οι μετακινήσεις καταγράφονται με τη βοήθεια τοπογραφικών μεθόδων, ενώ στη συνέχεια αυτές συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις διδιάστατες αναλύσεις. Κατά τη σύγκριση, προκύπτει ότι τα αποτελέσματα των κατακόρυφων μετακινήσεων είναι σύμφωνα και για τις δυο μεθόδους, ενώ τα αποτελέσματα των οριζόντιων μετακινήσεων παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις. Όμως τα αποτελέσματα των επιτόπου μετρήσεων πιθανόν να είναι λανθασμένα, συνεπώς αποδεικνύεται ότι απαιτείται η εφαρμογή ενός πιο αξιόπιστου συστήματος παρακολούθησης των μετακινήσεων για τα μαλακά εδάφη.

Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι κατά τη διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας ύστερα από την ολοκλήρωση της πρώτης, τόσο οι οριζόντιες όσο και οι κατακόρυφες παραμορφώσεις της δεύτερης είναι περίπου 2 έως 3 φορές μεγαλύτερες από αυτές της πρώτης. Αυτό αποδεικνύει ότι η ύπαρξη της πρώτης σήραγγας συμβάλει σημαντικά στην εξέλιξη των παραμορφώσεων. Πιθανώς το γεγονός αυτό να οφείλεται στο μικρό πλάτος του πυλώνα μεταξύ των σηράγγων το οποίο συμβάλει στη δημιουργία εκτεταμένης πλαστικής ζώνης γύρω από την πρώτη σήραγγα.

### 3.1.12 Chen S.I., Lee S.C., & Gui M.W., 2008

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση της επίδρασης του πλάτους του πυλώνα στην αλληλεπίδραση γειτονικών παράλληλων σηράγγων κατά τη διάνοιξή τους. Για το λόγο αυτό εξετάζεται το περιστατικό διάνοιξης της οδικής σήραγγας XueShan Tunnel στην Ταιβάν. Προκειμένου να εξεταστεί αναλυτικότερα η εξέλιξη του φαινομένου, πραγματοποιούνται διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος Plaxis.

#### Γενικά στοιχεία

ο σχεδιασμός του έργου προέβλεπε σήραγγα η οποία θα αποτελούταν από δυο κύριους κλάδους και μια πιλοτική σήραγγα που θα παρεμβαλλόταν μεταξύ αυτών. Η διάνοιξη της πιλοτικής σήραγγας

θα προπορευόταν, προκειμένου να λαμβάνονται στοιχεία για τις επικρατούσες γεωλογικές συνθήκες της περιοχής. Ο σχεδιασμός προέβλεπε επίσης διάνοιξη της σήραγγας με μηχανικά μέσα (TBM) σχεδόν σε όλο της το μήκος, εκτός από την περιοχή των στομιών όπου η εκσκαφή θα γινόταν με συμβατικά μέσα.

Κατά την κατασκευή όμως, το TBM παγιδεύτηκε εξαιτίας μιας αιφνίδιας κατάπτωσης. Προκειμένου λοιπόν να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα μια επιπλέον εκσκαφή πραγματοποιήθηκε μεταξύ της μιας κύριας σήραγγας και της πιλοτικής. Έτσι, κατά μήκος της υπόγειας κατασκευής, δημιουργήθηκε ουσιαστικά ένα δίκτυο τριών και τεσσάρων παράλληλων σηράγγων.

Στις περιοχές των στομιών όμως, εξαιτίας των περιορισμών που επέβαλλε η οδοποιία, είναι δυνατή μόνο η κατασκευή των δυο κύριων κλάδων σε πολύ μικρή μεταξύ τους απόσταση. Έτσι στο στάδιο αυτό μελετάται η συμπεριφορά δίδυμων σηράγγων για μεταβαλλόμενο πλάτος πυλώνων.

### **Γεωμετρικά στοιχεία**

Πρόκειται για σήραγγα συνολικού μήκους 12.9Km. Οι γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης ήταν αρκετά περίπλοκες. Το μέγιστο ύψος υπερκείμενων γαιών λήφθηκε ίσο με 750m ενώ κατά τη διάνοιξη συναντήθηκαν έξι κύρια ρήγματα, αρκετές διατμημένες ζώνες και υψηλές πιέσεις υπόγειων υδάτων. Όπως ήταν αναμενόμενο, κατά την κατασκευή προέκυψαν πολυάριθμα προβλήματα εξαιτίας εισροών των υδάτων και καταπτώσεων που λάμβαναν χώρα συνεχώς.

Η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιήθηκε τόσο με συμβατικά όσο και με μηχανικά μέσα (TBM). Η διατομή που παράγεται με τη χρήση των συμβατικών μεθόδων είναι πεταλοειδής ενώ το εμβαδόν της είναι ίσο με 110m<sup>2</sup> και 18 m<sup>2</sup> για την κύρια και για την πιλοτική σήραγγα αντίστοιχα. Με τη χρήση του TBM κατασκευάζεται κυκλική διατομή, η διάμετρος της οποίας είναι ίση με 12m και 5m για την κύρια και για την πιλοτική σήραγγα αντίστοιχα. Η γεωμετρία των διατομών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις αναλύσεις είναι διαφορετική από αυτή που κατασκευάζεται στην πραγματικότητα.

Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση του πλάτους πυλώνων στην εξέλιξη των παραμορφώσεων για τα τρία διαφορετικά τμήματα της σήραγγας.

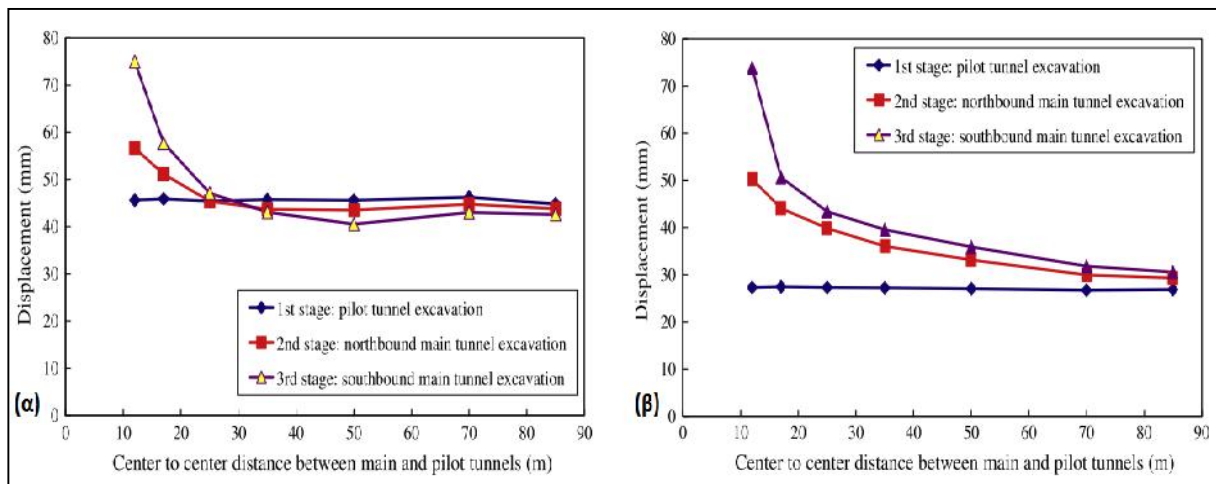
### **Τρεις παράλληλοι κλάδοι**

Κατά την κατασκευή, η αρχική απόσταση μεταξύ των δυο κύριων σηράγγων ήταν ίση με 60m, σταδιακά όμως μειώθηκε έως τα 42m, εξαιτίας περιορισμών που επέβαλε η οδοποιία. Το ύψος των υπερκείμενων γαιών λήφθηκε ίσο με 300m ενώ η βραχόμαζα χαρακτηρίζεται πτωχής ποιότητας. Σχετικά με την αλληλουχία των εκσκαφών, αρχικά διανοίχθηκε η πιλοτική σήραγγα και στη συνέχεια διαδοχικά οι δυο κύριες.

Για το στάδιο αυτό πραγματοποιήθηκαν διδιάστατες αναλύσεις προκειμένου να διερευνηθεί η εξέλιξη των παραμορφώσεων στις επενδύσεις των τριών σηράγγων, για μεταβαλλόμενα πλάτη

πυλώννα. Κατά τις αναλύσεις το ύψος των υπερκείμενων γαιών εξακολουθεί να θεωρείται ίσο με 300m, αλλά η απόσταση  $W$  μεταξύ της κύριας και της πιλοτικής σήραγγας κυμαίνεται από 12m ( $W=0.41B$ , όπου  $B$  είναι το άθροισμα των διαμέτρων της κύριας και της πιλοτικής σήραγγας) έως 85m ( $W=9B$ ). Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για δυο σχήματα διατομών, για κυκλική και για πεταλοειδή διατομή.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η εξέλιξη των μετακινήσεων και για τους τρεις κλάδους καθώς μεταβάλλεται το πλάτος του πυλώννα, για κυκλική και για πεταλοειδή διατομή.



**Σχήμα 3.15** Εξέλιξη των μετακινήσεων των τριών κλάδων για μεταβαλλόμενο πλάτος πυλώννα: (α) Για πεταλοειδή διατομή (β) Για κυκλική διατομή.

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι:

- i. Η κατασκευή κυκλικής διατομής προκαλεί μικρότερες παραμορφώσεις σε σχέση με την πεταλοειδή κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων της εκσκαφής. Παρόλα αυτά, η αλληλεπίδραση μεταξύ των γειτονικών σηράγγων κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων της εκσκαφής, όταν πρόκειται για κυκλική διατομή, είναι πιο εμφανής σε σχέση με την πεταλοειδή.
- ii. Για πεταλοειδή διατομή και για πλάτος πυλώννα μεγαλύτερο των 30m ( $W=2B$ ), η επίδραση μεταξύ των σηράγγων δεν είναι σημαντική. Αντίθετα για κυκλική διατομή, η αλληλεπίδραση μεταξύ των κλάδων δείχνει να είναι αμελητέα για πλάτος μεγαλύτερο των 60m ( $W=4B$ ).

**Τέσσερις παράλληλοι κλάδοι**

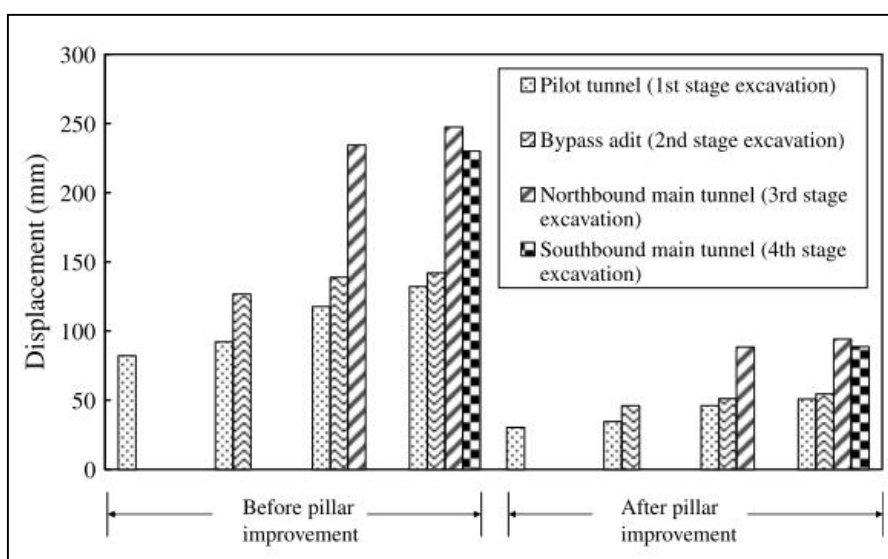
Εξαιτίας της παγίδευσης του TBM, διανοίχθηκε και τέταρτη σήραγγα ανάμεσα στην κύρια και την πιλοτική. Διερευνάται εδώ λοιπόν η αλληλεπίδραση των τεσσάρων σηράγγων.

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

Υπό αυτές τις συνθήκες πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις οι οποίες δίνουν μη αποδεκτά ποσοστά παραμορφώσεων. Η μέγιστη μετατόπιση που καταγράφηκε για την πιλοτική σήραγγα ήταν ίση με 82mm. Στην περίπτωση που η εκσκαφή θα συνεχιζόταν χωρίς να υποστηριχθεί η βραχώμαζα, οι μέγιστες μετακινήσεις για τους δυο κλάδους θα ήταν ίσες με 247mm και 230mm.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, πραγματοποιήθηκε βελτίωση της βραχώμαζας με ενεμάτωση και εφαρμόστηκαν αποστραγγιστικές μέθοδοι. Μετά την παρέμβαση αυτή τα ποσοστά των παραμορφώσεων μειώθηκαν σημαντικά και κυμάνθηκαν σε αποδεκτά επίπεδα (94mm και 89mm για τους δυο κύριους κλάδους αντίστοιχα).

Στο διάγραμμα που ακολουθεί εμφανίζονται οι μετακινήσεις των τεσσάρων κλάδων σε όλα τα στάδια της εκσκαφής, πριν και μετά τη λήψη των μέτρων βελτίωσης της βραχώμαζας.



**Σχήμα 3.16 Μέγιστες μετακινήσεις για κάθε έναν από τους τέσσερις κλάδους της σήραγγας κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων εκσκαφής.**

Είναι φανερό, ότι μετά τη βελτίωση της βραχώμαζας οι εδαφικές μετακινήσεις μειώθηκαν σημαντικά. Ενδεικτικά παρατηρούμε ότι αμέσως μετά το στάδιο της ολοκλήρωσης και του τετάρτου κλάδου οι μετακινήσεις ύστερα από τη λήψη των προστατευτικών μέτρων μειώθηκαν κατά 60% σε σχέση με αυτές που αναπτύσσονταν πριν από τη βελτίωση του πυλώνα.

### Δυο παράλληλες σήραγγες

Εξαιτίας περιορισμών που επέβαλε η οδοποιία αλλά και για περιβαλλοντικούς λόγους, στην περιοχή του στομίου της σήραγγας κατασκευάστηκαν μόνο οι δυο κύριοι κλάδοι της σήραγγας σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους. Λόγω των δυσμενών γεωλογικών συνθηκών που επικρατούσαν (χαμηλά υπερκείμενα, αποσαθρωμένη και τεμαχισμένη βραχώμαζα) αναμενόταν σοβαρή αστάθεια του μετώπου. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα αστάθειας, εφαρμόστηκε μια όχι και τόσο διαδεδομένη μέθοδος (central-pillar-gallery tunneling method), η οποία περιλαμβάνει την ολική αντικατάσταση της βραχώμαζας που αποτελεί τον πυλώνα.



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

Για το τμήμα αυτό της σήραγγας, διενεργήθηκαν αναλύσεις για την περίπτωση όπου δεν έχει πραγματοποιηθεί αντικατάσταση του υλικού του πυλώνα και στη συνέχεια αναλύσεις για το βελτιωμένο πυλώνα.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μετακινήσεις που μετρήθηκαν πριν και μετά τη βελτίωση του πυλώνα. Όπως ήταν αναμενόμενο οι μετακινήσεις και για τους δυο κλάδους μειώθηκαν ύστερα από τη βελτίωση του πυλώνα.

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

**Σχήμα 3.17** Μετακινήσεις στους δυο κύριους κλάδους της σήραγγας πριν και μετά την αντικατάσταση του υλικού του πυλώνα.

Τελικά, από την παραπάνω έρευνα συμπεραίνουμε πως η επιλογή του κατάλληλου πλάτους πυλώνα αποτελεί σημαντικό παράγοντα που συμβάλει στον περιορισμό των παραμορφώσεων. Εάν για λόγους οδοποιίας δε μπορεί να διατηρηθεί το απαιτούμενο πλάτος, προτείνονται λύσεις όπως ενεμάτωση της βραχώμαζας, τοποθέτηση εκτοξευμένου σκυροδέματος και αγκυρίων ή ακόμα και ολική αντικατάσταση της βραχώμαζας για το τμήμα που θα αποτελέσει τον πυλώνα ώστε να επιτευχθεί η ευστάθεια.

### 3.2 ΣΥΝΟΨΗ

Συνοψίζοντας, παρατηρούμε πως το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των κλάδων μιας δίδυμης σήραγγας είναι αρκετά περίπλοκο και καθορίζεται από πολλές παραμέτρους, η βασικότερη των οποίων είναι η εγκάρσια απόσταση των δυο κλάδων.

Από τα παραπάνω, παρατηρούμε πως αν και η απόσταση μεταξύ των δυο κλάδων αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα κατά τον σχεδιασμό, δεν υπάρχει μια ενιαία θεώρηση καθώς, για την επιλογή του



κατάλληλου πλάτους απαιτείται να ληφθούν υπόψη παράμετροι όπως η κατάσταση της βραχόμαζας, η θέση διάνοιξης της σήραγγας, η γεωμετρία της διατομής. Οι παράμετροι αυτές διαφοροποιούνται για κάθε περιστατικό διάνοιξης. Συνεπώς απαιτείται περεταίρω διερεύνηση του προβλήματος.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα όλων των ερευνών που αναφέρθηκαν παραπάνω, ώστε να είναι εύκολα συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που θα ακολουθήσουν στην παρούσα εργασία.

Πίνακας 3.1 Σύνοψη της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ	ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ	ΣΧΟΛΙΑ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
Terzaghi H. (1942), Ward W.H. & Thomas H.S.H. (1965)	Chicago clay London clay	W=0.425D W=0.6D	Τα αποτελέσματα προκύπτουν από μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε υπάρχουσες σήραγγες στο Σικάγο και στο Λονδίνο.	Για τα συγκεκριμένα πλάτη πυλώνα $W=0,425D$ και $W=0,6D$ ο βαθμός αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων είναι σημαντικός, καθώς παρατηρούνται αυξημένες ακτινικές μετατοπίσεις (0.1%D και 0.12%D αντίστοιχα).
Chaboussi J. & Ranken R.E. (1977)	-	-	Πραγματοποιούνται διδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για διδυμη σήραγγα.	Για $W>2D$ η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων της διδυμης σήραγγας είναι αμελητέα.
Adachi T., Kimura M., & Osada H. (1993)	Αμμώδες έδαφος	-	Πραγματοποιούνται διδιάστατες εργαστηριακές δοκιμές μικρής κλίμακας.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Για σταθερό ύψος υπερκείμενων γαιών, η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων εντείνεται με τη μείωση του πλάτους του πυλώνα.</li> <li>Για σταθερό πλάτος πυλώνα η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων εντείνεται με τη αύξηση του ύψους των υπερκείμενων γαιών.</li> </ul>
Fujita K. (1985), Fang Y.S, Lin J.S., & Su C.S. (1994)	-	-	Αναπτύσσεται μια εμπειρική μέθοδος εκτίμησης των επιφανειακών καθιζήσεων.	Για $W>2.7D$ δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο κλάδων της διδυμης σήραγγας.
Addenbrooke T.I., & Potts D.M. (1996)	London clay	Κυκλική διατομή	Πραγματοποιούνται διδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για διδυμη σήραγγα.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Για <math>W&lt;D</math> η αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο κλάδων είναι σημαντική.</li> <li>Για <math>W&gt;D</math> η αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο κλάδων αρχίζει να είναι αμελητέα.</li> </ul>
Chang C.T., Lee M.C. & Hou P.C. (1996)	Ψαμμίτης, Σχιστόλιθος	Πεταλοειδής διατομή (πλάτος 16m, ύψος 11m)	Εξετάζουν περιστατικό διάνοιξης διδυμης σήραγγας στην Ταϊβάν.	Για $W\approx 2.5D$ ο βαθμός αλληλεπίδρασης των κλάδων είναι σημαντικός καθώς σημειώνονται μη αποδεκτές παραμορφώσεις.
Kim S.H., Burd H.J. & Milligan G.W.E. (1998)	Υπερστερεοποιημένη άργιλος	-	Πραγματοποιούνται διδιάστατες εργαστηριακές δοκιμές μικρής κλίμακας.	Για $W>1.5D$ η αλληλεπίδραση των κλάδων της διδυμης σήραγγας είναι αμελητέα.

Πίνακας 3.1 Σύνοψη της βιβλιογραφικής ανασκόπησης (συνέχεια).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ	ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ	ΣΧΟΛΙΑ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
Addenbrooke T.I., & Potts D.M. (2001)	Thames Gravel (c=0Kpa, φ=35°), London clay (c=5KPa, φ=25°)	D=4.146m H=34m W=8, 12, 16, 32m	Πραγματοποιούνται διδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για διδυμη σήραγγα.	Για $W>7D$ η αλληλεπίδραση των κλάδων της διδυμης σήραγγας είναι αμελητέα.
Koungelis D.K. & Augarde C.E. (2004)	Thames gravel (c=0, φ=35°), London gravel (c=5Kpa, φ=35°)	D=4.174m H=14.36m W=0.5D÷7D	Πραγματοποιούνται διδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για διδυμη σήραγγα.	Για $W>3÷4D$ η αλληλεπίδραση των κλάδων της διδυμης σήραγγας είναι αμελητέα.
Sang-Hwan Kim (2004)	Άργιλος (Su=20KPa)	D=70mm W=1.4÷2D	Πραγματοποιούνται διδιάστατες εργαστηριακές δοκιμές μικρής κλίμακας. Πραγματοποιούνται διδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για διδυμη σήραγγα.	Για $W>2D$ η αλληλεπίδραση των κλάδων της διδυμης σήραγγας είναι αμελητέα.
Karakus M., Ozsan A. & Basarir H. (2007)	Ankara clay (c=10KPa, φ=35°)	D=7m W=15m	Εξετάζουν ένα πραγματικό περιστατικό διάνοιξης διδυμης σήραγγας (Άγκυρα, Τουρκία).	Για διάμετρο σηράγγων 7m και πλάτος πυλώνα ίσο με 15m ( $W≈2D$ ) παρατηρούνται προβλήματα παραμορφώσεων κατά τη διάνοιξη που πιθανώς να οφείλονται στο μικρό πλάτος πυλώνα.
Chen S.I., Lee S.C., & Gui M.W. (2008)	Εναλλαγές ψαμμίτη και σχιστόλιθου (c=340KPa, φ=24°)	Κυκλική διατομή (D1=12m, D2=5m) Πεταλοειδής διατομή (A1=110m <sup>2</sup> , A2=18m <sup>2</sup> ) H=300m W=12÷85m	Πραγματοποιούνται διδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για διδυμη σήραγγα.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Για πεταλοειδή διατομή και για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο των 30m (<math>W&gt;2B^*</math>) η επίδραση μεταξύ των σηράγγων είναι αμελητέα.</li> <li>Για κυκλική διατομή και για πλάτος πυλώνα μεγαλύτερο των 60m (<math>W&gt;4B</math>) η αλληλεπίδραση μεταξύ των κλάδων είναι αμελητέα.</li> </ul> <p>* B=Το άθροισμα των διαμέτρων των δυο σηράγγων</p>



## 4 ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΤΗΣ ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ

---

Στο κεφάλαιο αυτό επιλέγεται να παρουσιαστούν πραγματικά περιστατικά διάνοιξης δίδυμων σηράγγων προκειμένου μελετηθεί η εξέλιξη του φαινομένου της αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων στην πράξη. Η αλληλεπίδραση αυτή εκδηλώνεται, κατά τη διάνοιξη, με εκτεταμένες αστοχίες των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται στοιχεία από δυο σήραγγες διπλού κλάδου οποίες αποτελούν τμήμα ενός σύγχρονου έργου που κατασκευάστηκε στον ελλαδικό χώρο, την Εγνατία Οδό. Η Εγνατία Οδός είναι ένας σύγχρονος αυτοκινητόδρομος δυο λωρίδων ανά κλάδο, με διαχωριστική νησίδα και δεξιά Λωρίδα Έκτακτης Ανάγκης (ΛΕΑ). Εκτείνεται από την Ηγουμενίτσα του νομού Θεσπρωτίας μέχρι τους Κήπους του νομού Έβρου και το συνολικό της μήκος είναι ίσο με 670km. Κατά μήκος της Εγνατίας Οδού έχουν κατασκευαστεί 73 σήραγγες μέγιστου μήκους 4.8km και συνολικού μήκους 49.5 km περίπου ή 99km σε μονές.

Από τις σήραγγες αυτές επιλέχθηκε να παρουσιαστούν η σήραγγα του Ανθοχωρίου και η σήραγγα του Δρίσκου, οι οποίες παρουσιάζουν ιδιαίτερο κατασκευαστικό ενδιαφέρον. Κατά τη φάση της εκσκαφής και την άμεσης υποστήριξης εμφανίστηκαν προβλήματα εκτεταμένων μετακινήσεων εξαιτίας των δυσμενών γεωλογικών συνθηκών, καθώς και της αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων. Είναι χαρακτηριστικό και για τις δυο σήραγγες, ότι τα κατασκευαστικά στοιχεία διαφοροποιούνται σε σημαντικό βαθμό από αυτά που προέβλεπε η αρχική μελέτη.

### 4.1 ΣΗΡΑΓΓΑ ΑΝΘΟΧΩΡΙΟΥ

---

Η σήραγγα του Ανθοχωρίου βρίσκεται μεταξύ των χωριών Βοτονοσίου και Ανθοχωρίου στην περιοχή της Ηπείρου, απέχει 10km από το Μέτσοβο και ενώνεται με τη σήραγγα Βοτονοσίου μέσω της γέφυρας Βοτονοσίου. Πρόκειται για σήραγγα πεταλοειδούς διατομής, με δυο κλάδους, με μια συνδετήρια σήραγγα περίπου 200m από την πλευρά της εισόδου. Το συνολικό της μήκος είναι ίσο με 710m (μήκος αριστερού κλάδου: 706m και μήκος δεξιού κλάδου: 717m), ενώ η απόσταση των δυο κλάδων παραμένει πρακτικά σταθερή και περίπου ίση με 25m. Το μέγιστο ύψος υπερκείμενων γαιών που καταγράφεται είναι ίσο με 90m. Ο άξονας της σήραγγας έχει γενική διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ, αναπτύσσεται οριζοντιογραφικά σε καμπύλα τμήματα και η κατά μήκος κλίση της ερυθράς είναι της τάξεως του 5%. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ευρύτερη περιοχή στην οποία τοποθετείται η σήραγγα.



Σχήμα 4.1 Αεροφωτογραφία της περιοχής της σήραγγας Ανθοχωρίου (Πηγή: Ιστότοπος [www.ktimatologio.gr](http://www.ktimatologio.gr), Περίοδος φωτοληψίας 2007-2009)

#### 4.1.1 Γεωλογικά – Γεωτεχνικά στοιχεία

##### Γεωτεχνικές συνθήκες

Αναφορικά με τη γεωλογία της περιοχής, η σήραγγα Ανθοχωρίου διανοίχθηκε εντός του σχηματισμού του Πινδικού φλύσχη. Στην περιοχή, ο φλύσχος της ενότητας της Πίνδου είναι επωθημένος πάνω στο φλύσχη της Ιόνιας ενότητας. Πιο συγκεκριμένα, οι σχηματισμοί που εντοπίστηκαν στη ζώνη διέλευσης του έργου ήταν οι εξής:

**Παχυστρωματώδεις ψαμμίτες:** Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται κυρίως από στρώσεις ψαμμίτη μέγιστου πάχους 2m, γκριζου χρώματος, λεπτόκοκκοι έως μεσόκοκκοι. Μεταξύ των πάγκων των ψαμμιτών παρεμβάλλονται ιλυολιθικές ενδιαστρώσεις ή και ιλυολιθικές στρώσεις σημαντικού πάχους. Ο τεκτονισμός τους είναι μέτριος έως έντονος με χαρακτηριστικές ζώνες διάτμησης σε διάφορα βάθη.

**Ερυθροπηλίτες:** Ο σχηματισμός αποτελείται από ιυολίθους τεφρού και ερυθρού χρώματος. Σε ορισμένα σημεία παρεμβάλλονται λεπτές ψαμμιτικές στρώσεις. Οι ερυθροπηλίτες παρουσιάζονται τοπικά έντονα τεκτονημένοι.

**Εναλλαγές λεπτοστρωματωδών έως μεσοστρωματωδών ψαμμιτών και ιυολίθων:** Αποτελείται από τεφρούς λεπτόκοκκους ψαμμίτες και τεφρούς ιυολίθους. Ο τεκτονισμός του σχηματισμού είναι μέτριος έως έντονος.

**Υλικά επώθησης:** Η δημιουργία του σχηματισμού αυτού οφείλεται στην επώθηση της ενότητας της Πίνδου πάνω στην Ιόνια. Αποτελείται από γκριζοπράσινους ή ερυθρούς κατακερματισμένους ιυολίθους και τεμάχια ψαμμιτών, ασβεστολίθων, αργιλικών σχιστολίθων διαφόρων διαστάσεων. Ο

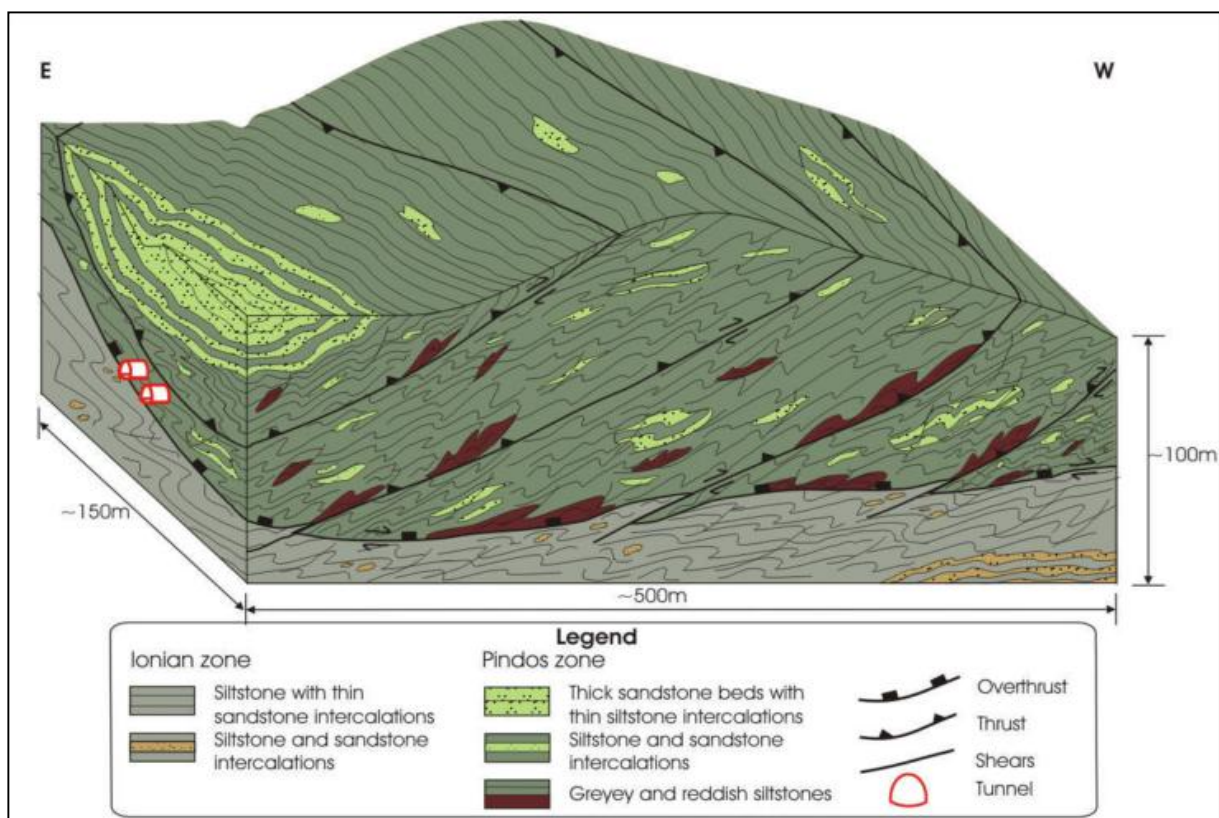


σχηματισμός έχει υποστεί έντονη τεκτονική καταπόνηση. Παρά τον έντονο κερματισμό, όμως, των πετρωμάτων, παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλες τιμές του δείκτη RQD.

**Υλικά κατολισθήσεων:** Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται από καστανοπράσινα υλικά αργιλοϊλυώδους σύστασης με διάσπαρτες λατύπες. Έχει χαλαρή δομή και τοπικά παρουσιάζονται επιφανειακός ερπυσμός και εδαφικές θραύσεις.

**Υλικά μανδύα αποσάθρωσης:** Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται από καστανοπράσινα αμμοϊλυώδη υλικά με ψαμμιτικά και ιλυολιθικά τεμάχια. Το μέγιστο πάχος του είναι περίπου 11.5m.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα τριδιάστατο γεωλογικό προσομοίωμα το οποίο συνοψίζει την εκτίμηση των Marinis et al. (2006) και Μαρίνος (2007) για το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής.



**Σχήμα 4.2** Εκτίμηση του τριδιάστατου γεωλογικού προσομοιώματος της ευρύτερης περιοχής της σήραγγας Ανθοχωρίου (Marinis et al., 2006, Μαρίνος, 2007).

### Ταξινόμηση βραχώμαζας

Για την ταξινόμηση της βραχώμαζας, στο πλαίσιο της κατασκευής, στη σήραγγα Ανθοχωρίου χρησιμοποιήθηκε το σύστημα ταξινόμησης RMR. Οι τιμές του RMR δεν είχαν μεγάλη διακύμανση και περιορίστηκαν γενικά κάτω του 20 λόγω της πολύ πτωχής ποιότητας βραχώμαζας που συναντήθηκε. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται, ανά σχηματισμό, οι βαθμονομήσεις της βραχώμαζας όπως προέκυψαν από τις χαρτογραφήσεις και τα πρωτόκολλα κατάταξης, ύστερα από την κατασκευή.

**Πίνακας 4.1 Σήραγγα Ανθοχωρίου. Ταξινομήσεις βραχώμαζας. (Στοιχεία κατασκευής, Πηγή: ΤΙΑΣ, Μαρίνος et al., 2006).**

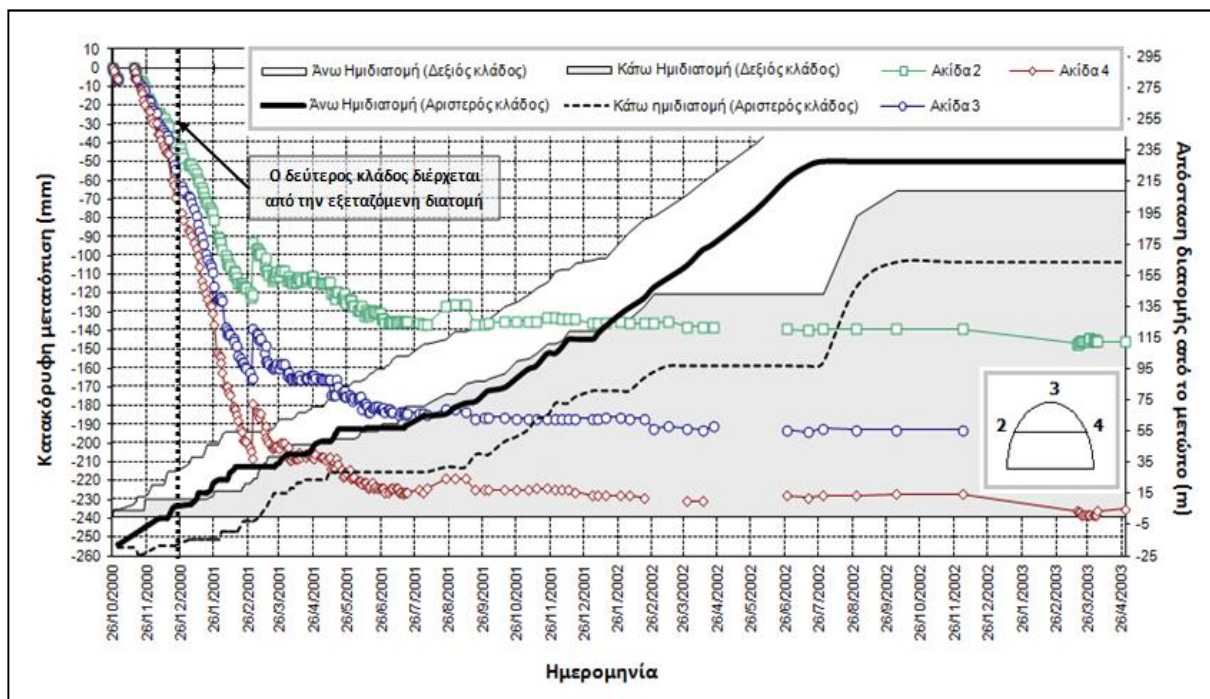
Γεωλογικός σχηματισμός	RMR (Εύρος Τιμών)
Ερυθροπηλίτης χαοτικής δομής με εγκλείσματα ψαμμίτη. Ιλυολιθική-ερυθροπηλιτική χαοτική μάζα με τεμάχη ψαμμίτη.	9 - 25
Εναλλαγές λεπτοστρωματώδους έως μεσοστρωματώδους ψαμμίτη, ιλυολίθου (ίσες αναλογίες).	29 - 34
Ιλυόλιθος με ενστρώσεις ψαμμίτη.	25 - 30
Τεκτονικό μείγμα	17 - 25
Μεσοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης ψαμμίτης με ενστρώσεις ιλυολίθου	19 - 29

**Συγκλίσεις**

Η σήραγγα Ανθοχωρίου αποτελεί μια δίδυμη σήραγγα που παρουσιάζει ιδιαίτερο κατασκευαστικό ενδιαφέρον, αφού λόγω των δυσμενών γεωτεχνικών συνθηκών σημειώθηκαν εκτεταμένες συγκλίσεις και παραμορφώσεις κατά τη διάνοιξη. Χαρακτηριστικό είναι ότι προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι παραμορφώσεις, η διάνοιξη ολοκληρώθηκε με τη χρήση διατομών που περιλαμβάνουν υποστήριξη μετώπου σε όλο το μήκος της σήραγγας, οι οποίες διέφεραν σημαντικά από τις διατομές που προβλεπόταν στην αρχική μελέτη. Οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις στο θόλο μετρήθηκαν για τον αριστερό κλάδο στη Χ.Θ. 5+642.96 (249mm) και για το δεξιό κλάδο στη Χ.Θ. 5+686.596 (293mm).

Στο Σχήμα 4.3 που ακολουθεί, παρουσιάζεται ενδεικτικά η χρονική εξέλιξη των εκτεταμένων μετατοπίσεων όπως καταγράφηκαν στη Χ.Θ.5+655.593 για το άνω τμήμα του νότιου κλάδου, καθώς και η προχώρηση των φάσεων εκσκαφής των δυο κλάδων. Επισημαίνεται ότι με βάση τη σύμβαση της Εγνατίας Οδού ο νότιος κλάδος είναι ο δεξιός, καθώς οι κλάδοι ονομάζονται με θεώρηση φοράς από Δύση προς Ανατολή.





Σχήμα 4.3 Μετρήσεις κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά τη φάση κατασκευής της σήραγγας Ανθοχωρίου στο σταθμό μέτρησης στη Χ.Θ.5+655.593 του νότιου κλάδου (Πηγή: Εγνατία Οδός).

#### 4.1.2 Ιστορικό

Η αρχική μελέτη εκσκαφής και άμεσης υποστήριξης προέβλεπε πέντε διατομές άμεσης υποστήριξης, ανάλογα με την κατηγορία βραχώμαζας. Οι πρώτες εργασίες εκσκαφής στα στόμια ξεκίνησαν το χειμώνα του 2000 (πρώτα για το στόμιο του αριστερού και στη συνέχεια για το στόμιο του δεξιού κλάδου) και ακολούθησαν στη συνέχεια οι εργασίες της υπόγειας διάνοιξης (αντίστοιχα με την αλληλουχία των εργασιών των στομίων). Οι δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες που απαντήθηκαν από τα πρώτα μέτρα της εκσκαφής κατέστησαν αναγκαία τη χρήση της πιο βαριάς διατομής που είχε προβλεφτεί από τη μελέτη, καθώς και παραλλαγές αυτής. Η ανάπτυξη όμως σημαντικών μετακινήσεων οδήγησαν στην εφαρμογή πρόσθετων μέτρων σε ορισμένα τμήματα.

Τον Μάιο του 2001 ξεκίνησε νέα μελέτη για τον επανασχεδιασμό των διατομών της άμεσης υποστήριξης. Στο μεταξύ, η διάνοιξη συνεχιζόταν υιοθετώντας κάποιες τροποποιήσεις στις αρχικές διατομές. Η μελέτη επανασχεδιασμού προέβλεπε τρεις κατηγορίες διατομών άμεσης υποστήριξης (N1, N2, N3) με βασικά στοιχεία: κελύφος εκτοξευμένου σκυροδέματος πάχους 30cm, μεταλλικά πλαίσια Lattice Girder, αγκύρια, ελαφρές δοκούς προπορείας μήκους 6m. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ισοδύναμη διάμετρος της διατομής N3 ήταν περίπου ίση με 13.2m ( $W \approx 2D$ ).

Οι νέες διατομές ξεκίνησαν να εφαρμόζονται τον Μάρτιο του 2002, χωρίς, όμως, να οδηγούν στον περιορισμό του φαινομένου, καθώς η διάνοιξη πραγματοποιούταν σε εξαιρετικά δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες. Η συνεχιζόμενη αύξηση των συγκλίσεων και οι αστοχίες του κελύφους (Σχήμα 4.4) οδήγησαν το Σεπτέμβριο του ίδιου έτους στην απόφαση επανεπίχωσης τμήματος της σήραγγας μήκους περίπου 70m, ώστε να περιοριστούν οι συγκλίσεις.

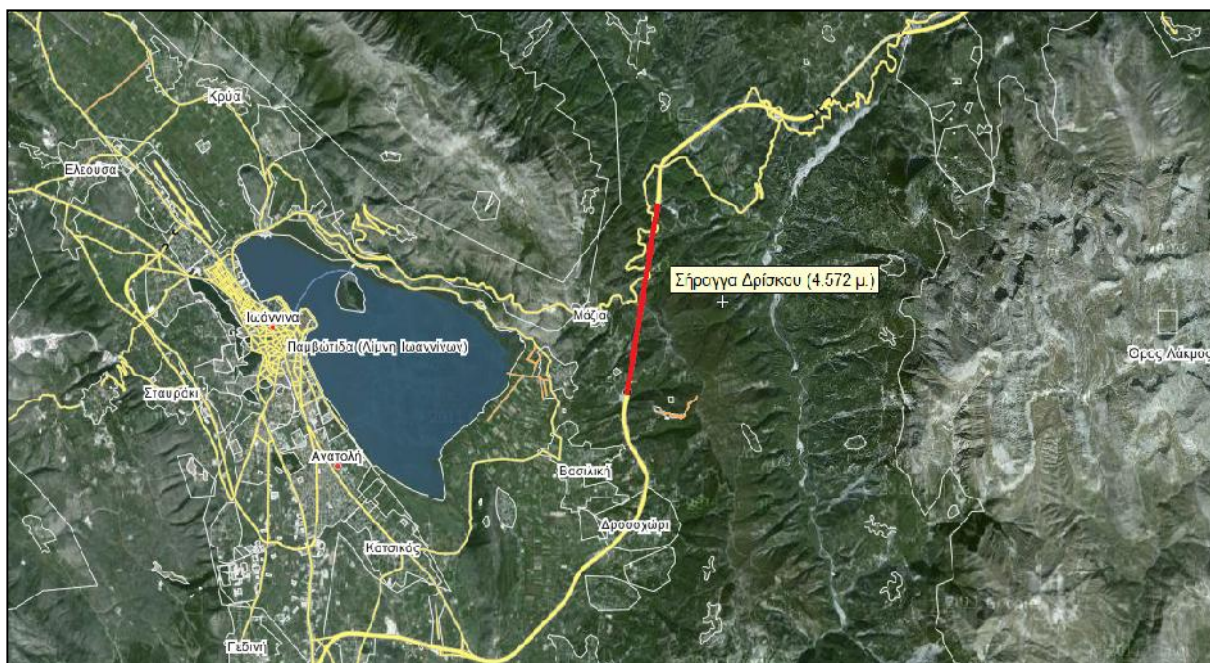


**Σχήμα 4.4** Αστοχία των πλαισίων Lattice Girder στη σήραγγα Ανθοχωρίου λόγω υπερφόρτισης του κελύφους της υποστήριξης (Πηγή: TIAS, Μαρίνος et al., 2006, Μαρίνος Β., 2007, Marinos et al., 2010).

Τελικά η διάνοιξη ολοκληρώθηκε με την εφαρμογή της διατομής R που προτάθηκε από μια νέα μελέτη εκσκαφής και άμεσης υποστήριξης, η οποία έπρεπε να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά τις υψηλές απαιτήσεις πιέσεων, σε ένα ήδη διαταραγμένο γεωυλικό. Βασικά στοιχεία της διατομής ήταν το μικρό βήμα προχώρησης, η τοποθέτηση αγκυρίων σε όλη την περίμετρο, η χρήση έντονα δύσκαμπτου πλαισίου HEA240 και η τοποθέτηση δοκών προπορείας και αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο. Αξίζει να σημειωθεί η εφαρμογή εκτοξευμένου σκυροδέματος συνολικού πάχους 50cm στη διατομή, καθώς και έγχυτου σκυροδέματος πάχους 1m στον πυθμένα, το οποίο χρησιμοποιήθηκε και ως στοιχεία της τελικής επένδυσης, αυξάνοντας τη δυσκαμψία της διατομής.

## 4.2 ΣΗΡΑΓΓΑ ΔΡΙΣΚΟΥ

Η δίδυμη οδική σήραγγα του Δρίσκου βρίσκεται στο τμήμα 2.3 «Δροσοχώρι – Άραχθος» της Εγνατίας Οδού, στην περιοχή της Ηπείρου, νοτιοανατολικά της πόλης των Ιωαννίνων. Πρόκειται για σήραγγα πεταλοειδούς διατομής, με ημικυκλικό θόλο ακτίνας εσωραχίου τελικής επένδυσης 5.5m και μέγιστο ελεύθερο πλάτος 11m. Το συνολικό της μήκος είναι ίσο με 4572m (μήκος αριστερού κλάδου: 4581m και μήκος δεξιού κλάδου: 4563m), ενώ η απόσταση των δυο κλάδων ήταν περίπου ίση με 18m ( $W \approx 1.5D$ ). Το μέγιστο ύψος υπερκείμενων γαιών που καταγράφεται είναι ίσο με 220m. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ευρύτερη περιοχή στην οποία τοποθετείται η σήραγγα.



Σχήμα 4.5 Άποψη της περιοχής της σήραγγας Δρίσκου (Πηγή: Ιστότοπος [www.wikimapia.org](http://www.wikimapia.org) ).

#### 4.2.1 Γεωλογικά – Γεωτεχνικά στοιχεία

##### Γεωτεχνικές συνθήκες

Αναφορικά με τη γεωλογία, η σήραγγα του Δρίσκου διήλθε από σχηματισμούς του Ιόνιου φλύσχη. Λιθολογικά αποτελείται από εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολίθων, στις οποίες κυριαρχεί τότε ο ψαμμίτης και τότε ο ιλυόλιθος. Όπου υπάρχει ερυθροπηλίτης φλύσχης παρουσιάζει περεταίρω πτυχώσεις και έχει δημιουργήσει πολύ πτωχής ποιότητας βραχώμαζες. Πιο συγκεκριμένα, οι σχηματισμοί που εντοπίστηκαν στη ζώνη διέλευσης του έργου ήταν οι εξής:

**Ιλυόλιθοι:** Οι σχηματισμοί αυτοί περιέχουν ερυθροπηλίτη υλικό σε ποσοστό μεγαλύτερο από 80%. Τα ψαμμιτικά υλικά περιορίζονται σε λεπτές σποραδικές ενστρώσεις με πάχος μικρότερο από 10cm. Είναι έντονα καταπονημένοι τεκτονικά, αποτελούν περίπου το 8% των σχηματισμών της περιοχής και εντοπίζονται κυρίως στο κεντρικό και βόρειο τμήμα της ζώνης διέλευσης της σήραγγας.

**Λεπτοστρωματώδεις εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών:** Οι σχηματισμοί αποτελούνται από λεπτοστρωματώδεις έως μεσοστρωματώδεις εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολίθων με ποσοστό ιλυολιθικού υλικού από 50% έως 80%. Οι επιφάνειες στρώσεις των σχηματισμών είναι πολύ καλά διαμορφωμένες και συχνά διατμημένες. Αποτελούν το 52% των σχηματισμών της περιοχής και εντοπίζονται κυρίως στο νότιο ήμισυ τμήμα της ζώνης διέλευσης της σήραγγας.

**Μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις ψαμμίτες και λεπτοστρωματώδεις ιλυόλιθοι:** Οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούνται από εναλλαγές μεσοστρωματωδών έως παχυστρωματωδών ψαμμιτών και λεπτοστρωματωδών ιλυολίθων με ποσοστό ψαμμιτικού υλικού 50% έως 80%. Οι επιφάνειες στρώσης είναι καλά διαμορφωμένες και παρουσιάζουν μεγάλη ανάπτυξη. Αποτελούν το

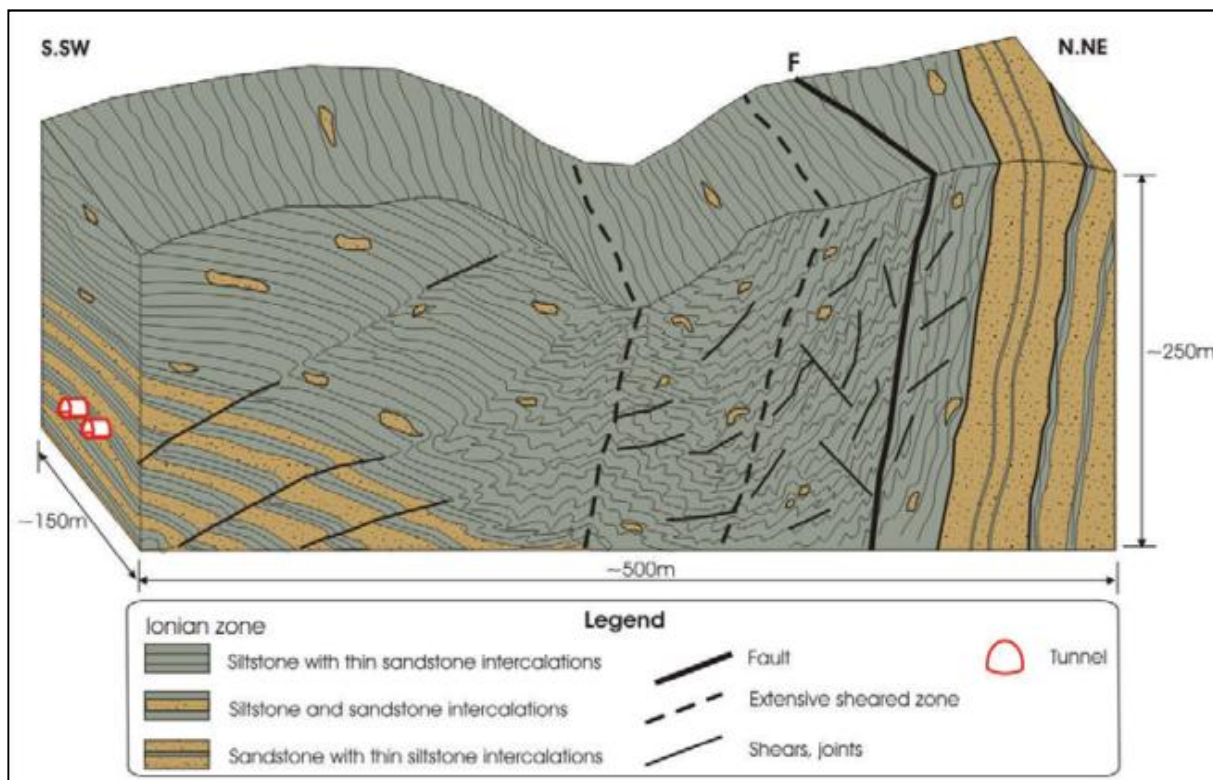
28% των σχηματισμών της περιοχής και εντοπίζονται κυρίως στο μεσαίο τμήμα διέλευσης της σήραγγας.

**Παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με ενστρώσεις λεπτοστρωματωδών ιλυολίθων:** Οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούνται από ιλυόχους ψαμμίτες, σε ποσοστό μεγαλύτερο από 80% και λεπτές, αραιές στρώσεις ιλυολίθων. Οι ψαμμίτες αναπτύσσονται σε στρώματα και πάγκους, αποσαθρώνονται σφαιρικά και σχηματίζουν συγκεντρικούς φλοιούς με διαφορετικό βαθμό αποσάθρωσης. Είναι ελάχιστα τεκτονισμένοι, με ασυνέχειες, οι οποίες είναι συχνά ανοιχτές και παρουσιάζουν υδροφορία. Αποτελούν το 3% περίπου των σχηματισμών της περιοχής και εντοπίζονται σε μεμονωμένες θέσεις στο βόρειο τμήμα της ζώνης διέλευσης της σήραγγας.

**Κροκαλοπαγείς – μικροκροκαλοπαγείς σχηματισμοί:** Οι κροκαλοπαγείς σχηματισμοί περιέχουν κροκάλες και συνδετικό υλικό. Ανάλογα με το είδος του συνδετικού υλικού χαρακτηρίζονται από μικρή, μέτρια και μεγάλη σκληρότητα. Το συνδετικό υλικό είναι ιλυοαργιλώδες, ιλυοψαμμιτικό και εν μέρει ψαμμιτοανθρακικό. Κατά θέσεις ο σχηματισμός αποτελείται από μεγάλο ποσοστό συνδετικού υλικού με μικρό ποσοστό κροκάλων και μεταπίπτει προοδευτικά σε μικροκροκαλοπαγείς και στη συνέχεια σε χονδρόκοκκους ψαμμίτες, αμμούχους ιλυόλιθους και ιλυόλιθους. Δεν έχουν επιφάνειες στρώσης ή πάγκων. Είναι ελάχιστα τεκτονισμένοι με αραιές ασυνέχειες οι οποίες είναι συνήθως ανοιχτές. Αποτελούν το 4% των σχηματισμών της περιοχής και εντοπίζονται στο βορειότερο τμήμα της ζώνης διέλευσης της σήραγγας.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα τριδιάστατο γεωλογικό προσομοίωμα το οποίο συνοψίζει την εκτίμηση των Marinos et al. (2006) και Μαρίνος (2007) για το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής.





Σχήμα 4.6 Εκτίμηση του τριδιάστατου γεωλογικού προσομοιώματος της ευρύτερης περιοχής της σήραγγας Δρίσκου (Marinos et al., 2006, Μαρίνος, 2007).

**Ταξινόμηση βραχώμαζας**

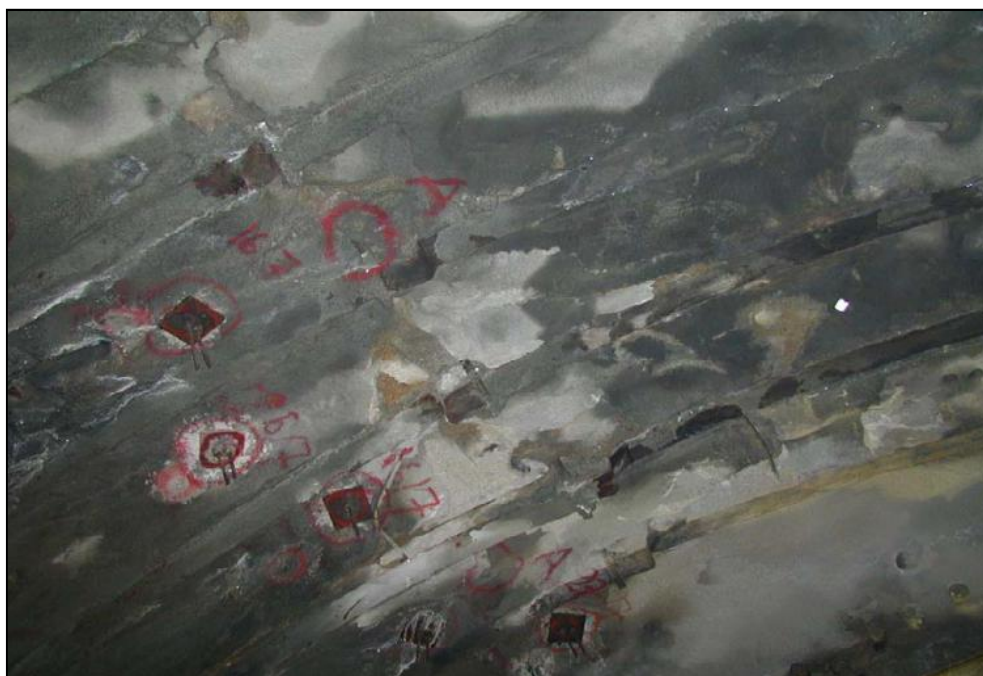
Για την ταξινόμηση της βραχώμαζας, στα πλαίσια της κατασκευής, στη σήραγγα Δρίσκου χρησιμοποιήθηκε το σύστημα ταξινόμησης GSI και RMR. Η ποιότητα των σχηματισμών σε γενικές γραμμές ήταν στα πλαίσια της μελέτης όσον αφορά την βαθμονόμησή τους. Εξαιρεση αποτελεί το τμήμα από 8+500 έως 8+800, όπου οι σχηματισμοί των ιλυολίθων με ενστρώσεις ψαμμιτών εμφανίστηκαν έντονα διατμημένοι και βαθμονομήθηκαν κάτω από 20. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται, ανά σχηματισμό, οι βαθμονομήσεις της βραχώμαζας όπως προέκυψαν από τις χαρτογραφήσεις και τα πρωτόκολλα κατάταξης, ύστερα από την κατασκευή.

Πίνακας 4.2 Σήραγγα Δρίσκου. Ταξινομήσεις βραχώμαζας (Στοιχεία κατασκευής, Πηγή TIAS, Μαρίνος et al., 2006).

Γεωλογικός σχηματισμός	RMR (Εύρος Τιμών)
Εναλλαγές λεπτοστρωματώδους έως μεσοστρωματώδους ψαμμίτη, ιλυόλιθου (ίσες αναλογίες)	18 -31
Μεσοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης ψαμμίτης με ενστρώσεις ιλυόλιθου	30 - 55
Ιλυόλιθος με ενστρώσεις ψαμμίτη	18 - 29
Κροκαλοπαγές με ενστρώσεις ιλυόλιθου ή/και ψαμμίτη	45 - 50
Εναλλαγές μαργαϊκού ασβεστόλιθου, ιλυόλιθου	35 - 50

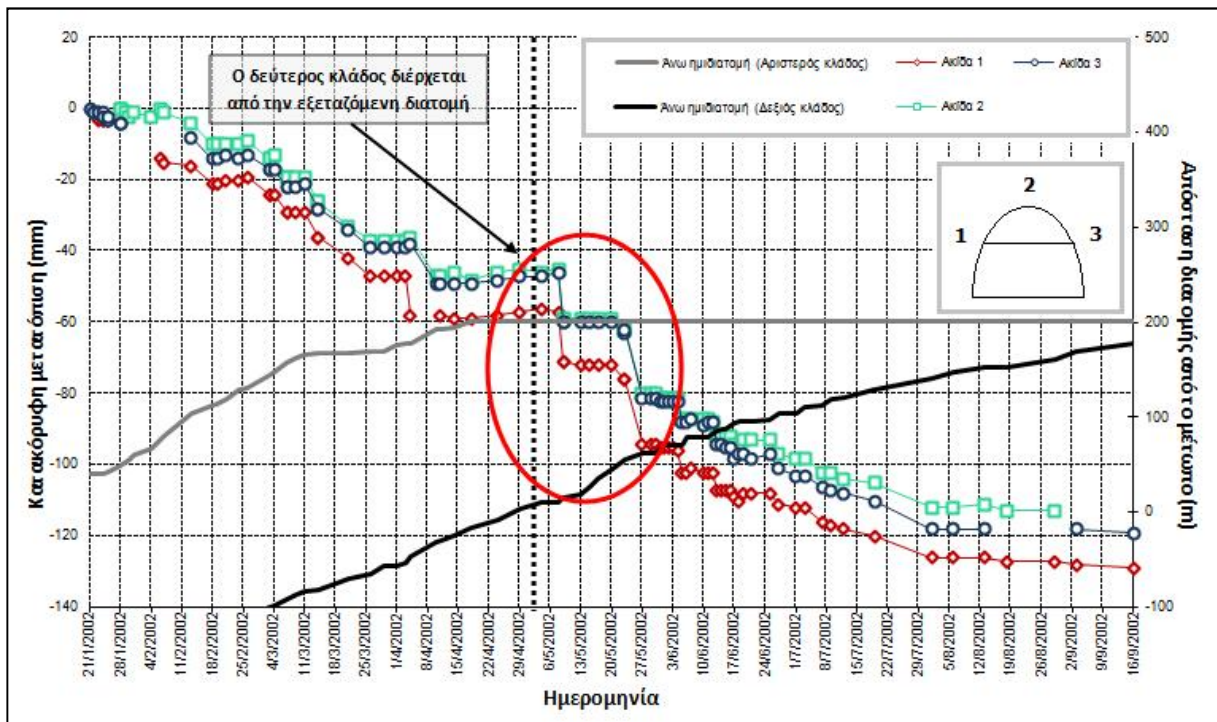
### Συγκλίσεις

Η σήραγγα του Δρίσκου αποτελεί έργο με ιδιαίτερο κατασκευαστικό ενδιαφέρον, καθώς κατά τη διάνοιξη της εκδηλώθηκαν εκτεταμένες συγκλίσεις. Χαρακτηριστικό είναι ότι για τη διάνοιξη της πραγματοποιήθηκαν τρεις μελέτες, οι οποίες πρότειναν διαφορετικές διατομές άμεσης υποστήριξης με διαφορετικά τμήματα εφαρμογής. Αναλυτικότερα, παρατηρήθηκαν συγκλίσεις μεγαλύτερες των 50mm στο θόλο της σήραγγας σε πολλές θέσεις κατά μήκος και των δυο κλάδων. Συγκλίσεις μεγαλύτερες των 100mm μετρήθηκαν στη Χ.Θ. 6+693 (139mm) και στα τμήματα με Χ.Θ 8+100 - 8+180 και Χ.Θ. 8+500 - 8+750 (<130 mm) του δεξιού κλάδου καθώς και στο τμήμα με Χ.Θ. 6+750 - 6+790 (180-260mm) και με Χ.Θ. 8+500 - 8+750 (105-310 mm) του αριστερού κλάδου. Χαρακτηριστική εμφάνιση του υπερφορτισμένου κελύφους στην περιοχή των μεγάλων συγκλίσεων παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



**Σχήμα 4.7** Σήραγγα Δρίσκου. Υπερφορτισμένο κέλυφος σε τμήμα με σημαντικές συγκλίσεις. (Πηγή: ΤΙΑΣ, Μαρίνος et al., 2006, Μαρίνος Β., 2007, Marinos et al., 2010).

Στο Σχήμα 4.8 που εμφανίζεται στη συνέχεια, παρουσιάζεται ενδεικτικά η χρονική εξέλιξη των εκτεταμένων μετατοπίσεων όπως καταγράφηκαν στη Χ.Θ.8+629 για το άνω τμήμα του βόρειου κλάδου, καθώς και η προχώρηση των φάσεων εκσκαφής του άνω τμήματος των δυο κλάδων. Επισημαίνεται ότι με βάση τη σύμβαση της Εγνατίας Οδού ο βόρειος κλάδος είναι ο αριστερός, καθώς οι κλάδοι ονομάζονται με θεώρηση φοράς από Δύση προς Ανατολή.



**Σχήμα 4.8** Μετρήσεις κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά τη φάση κατασκευής της σήραγγας Δρίσκου στο σταθμό μέτρησης στη Χ.Θ.8+629 του βόρειου κλάδου (Πηγή: Εγνατία Οδός).

Στο διάγραμμα αυτό είναι εμφανής η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων και συγκεκριμένα η καταπόνηση του πρώτου κλάδου (αριστερού) εξαιτίας της διάνοιξης του δεύτερου (δεξιού). Παρατηρούμε ότι όταν το μέτωπο του πρώτου κλάδου διέρχεται από την εξεταζόμενη διατομή οι μετακινήσεις αυξάνονται μέχρι τη στιγμή που το μέτωπο απομακρύνεται (απόσταση ίση με 150m περίπου) και οι μετακινήσεις τείνουν να σταθεροποιηθούν. Καθώς, όμως, το μέτωπο του δεύτερου κλάδου διέρχεται δίπλα από την εξεταζόμενη διατομή, παρατηρείται σημαντική αύξηση των μετακινήσεων. Οι μετακινήσεις συνοδεύονται από αστοχία της άμεσης υποστήριξης. Αν η υποστήριξη ήταν πολύ πιο βαριά, τότε θα είχαμε μικρή μεταβολή των συγκλίσεων αλλά αύξηση των πιέσεων.

#### 4.2.2 Ιστορικό

Για τη διάνοιξη της σήραγγας του Δρίσκου πραγματοποιήθηκαν τρεις μελέτες εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης. Σύμφωνα με την αρχική μελέτη, διαστασιολογήθηκαν πέντε τυπικές διατομές (II, III, IV, Va, Vb), οι οποίες προέβλεπαν την εφαρμογή εκτοξευμένου σκυροδέματος, μεταλλικών δικτυωτών πλαισίων και αγκυρίων μήκους 3-4m για τις κατηγορίες II και III, το συνδυασμό εκτοξευμένου σκυροδέματος, μεταλλικών δικτυωτών πλαισίων και αγκυρίων 4-6m για την κατηγορία IV, το συνδυασμό εκτοξευμένου σκυροδέματος, χαλύβδινων πλαισίων τύπου HEA160 ή HEB180, αγκυρίων μήκους 5-6m και κλείσιμο του πυθμένα για τις κατηγορίες Va και Vb. Η εκσκαφή ξεκίνησε το 2000 και η αρχική μελέτη κρίθηκε ικανοποιητική, καθώς στα πρώτα τμήματα δεν προκλήθηκαν προβλήματα κατά τη διάνοιξη.



Όταν στο τμήμα διάνοιξης που βρίσκεται κοντά στο δυτικό μέτωπο ξεκίνησε η ανάπτυξη συγκλίσεων μεγαλύτερων από τα αποδεκτά όρια που έθετε η μελέτη, η ομάδα εμπειρογνομόνων, που είχε κληθεί για την παρακολούθηση της εξέλιξης του έργου, σε έκθεσή της έκρινε το γεγονός ανησυχητικό σε συνδυασμό με τις ρωγματώσεις που παρουσιάστηκαν στο εκτοξευμένο σκυρόδεμα. Τα μέτρα που χρησιμοποιήθηκαν στα συγκεκριμένα τμήματα κρίθηκαν ανεπαρκή.

Τον Οκτώβριο του 2000 παρουσιάστηκαν προβλήματα υπερφόρτισης του κελύφους της άμεσης υποστήριξης σε ορισμένα τμήματα της σήραγγας και μεγάλων συγκλίσεων σε ορισμένα άλλα. Τα μέτρα της άμεσης υποστήριξης κρίθηκαν ανεπαρκή και προτάθηκε η χρήση επιπλέον αγκυρίων και η διάνοιξη πρόσθετων αποστραγγιστικών οπών. Η δημιουργία του προβλήματος οφειλόταν στην υπερεκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων του γεωυλικού. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αστοχιών στα τμήματα όπου παρατηρήθηκε η υπερφόρτιση του κελύφους παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



**Σχήμα 4.9 Σήραγγα Δρίσκου. Αστοχία σκυροδέματος σε περιοχή κοντά σε μεταλλικό πλαίσιο και παραμορφωμένη πλάκα αγκυρίου εξαιτίας της υπερφόρτισης της υποστήριξης.**

Στη συνέχεια, στη νέα μελέτη που κατατέθηκε από το μελετητή του αναδόχου, επαναπροσδιορίστηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι μέσω ανάστροφων αναλύσεων, ενώ παράλληλα προτάθηκε η πραγματοποίηση τσιμεντενέσεων ως μέτρα θεραπείας για τα τμήματα που παρατηρήθηκαν εκτεταμένες αστοχίες. Ωστόσο για την αντιμετώπιση του προβλήματος είχαν ήδη τοποθετηθεί στο βλαμμένο τμήμα προεντεταμένα καλώδια. Τελικά η ομάδα εμπειρογνομόνων κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η κάτω ημιδιατομή του αριστερού κλάδου μπορεί να εκσκαφτεί δίχως προβλήματα, στη συνέχεια όμως της διάνοιξης είναι αναγκαία η κατασκευή του προσωρινού ανάστροφου τόξου πολύ κοντά το μέτωπο εκσκαφής, η τοποθέτηση πλέγματος για την προστασία



των εργαζομένων, καθώς και η τοποθέτηση δυο προεντεταμένων αγκυρίων στην οροφή της άνω ημιδιατομής.

### 4.3 ΣΥΝΟΨΗ

---

Οι δίδυμες οδικές σήραγγες του Ανθοχωρίου και του Δρίσκου αποτελούν έργα της Εγνατίας Οδού που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς κατά τη διάνοιξη τους παρατηρήθηκαν σε ορισμένα τμήματα αυτών εκτεταμένες συγκλίσεις, μεγαλύτερες από τις αποδεκτές συγκλίσεις που όριζε η αρχική μελέτη. Κατ' επέκταση σημειώθηκαν σημαντικές αστοχίες στα μέτρα της άμεσης υποστήριξης. Εκτιμάται ότι η ανάπτυξη των συγκλίσεων οφείλεται αφενός στις επικρατούσες δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες και αφετέρου στην αλληλεπίδραση των δυο γειτονικών κλάδων. Τα δυο αυτά περιστατικά, λοιπόν, ενισχύουν την αναγκαιότητα μελέτης του μηχανισμού ανάπτυξης των φορτίσεων κατά την εκσκαφή δίδυμων σηράγγων, καθώς επίσης και της κατάλληλης εγκάρσιας απόστασης των δυο κλάδων.



## 5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

---

Κατά το στάδιο του σχεδιασμού δίδυμων σηράγγων, οι τρεις βασικές παράμετροι που απαιτείται να λαμβάνονται υπόψη προκειμένου να καθορίζεται ο βαθμός αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων είναι η κατασκευαστική αλληλουχία, η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των διατομών καθώς και το σύστημα άμεσης υποστήριξης που θα επιλεγεί. Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι να ασχοληθεί με τη διερεύνηση μιας εκ των τριών αυτών παραμέτρων, και συγκεκριμένα να συμβάλλει στη γνώση σχετικά με την επιλογή της κατάλληλης απόστασης μεταξύ των κλάδων της δίδυμης σήραγγας (πλάτος πυλώνα). Βασική επιδίωξη είναι η εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων σχετικά με την ανάπτυξη των πιέσεων και των μετακινήσεων σε συνάρτηση με το πλάτος του πυλώνα.

Για την επίτευξη του στόχου αυτού πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις με τη βοήθεια κατάλληλων λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS, ABAQUS). Επιλέχθηκε η προσομοίωση του μοντέλου μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων, καθώς αυτές πλεονεκτούν σε σχέση με τις διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις. Η διδιάστατη μέθοδος σχεδιασμού λαμβάνει τη σήραγγα στις δύο διαστάσεις και σε κάθε ανάλυση εξετάζεται μια συγκεκριμένη διατομή. Το βασικότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι τα συμπεράσματα που εξάγονται αφορούν μια μεμονωμένη διατομή εντός της κοιλότητας της σήραγγας, αγνοώντας την επίδραση των τάσεων στις γειτονικές της, και επιπρόσθετα εξαρτώνται από τη μέθοδο εκτίμησης των προσυγκλίσεων. Συνεπώς, δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τις παραμορφώσεις μπροστά και πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής. Αντίθετα, μέσω των τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων γίνεται θεώρηση των πραγματικών διαστάσεων της υπό μελέτη σήραγγας και εξάγονται συμπεράσματα για κάθε σημείο της αλληλουχίας της εκσκαφής. Επιπρόσθετα, επιτυγχάνεται ρεαλιστική προσομοίωση της εξώθησης του μετώπου καθώς και των προσυγκλίσεων. Τέλος, βασικό πλεονέκτημα των τριδιάστατων αναλύσεων είναι ότι τα αποτελέσματα είναι απαλλαγμένα από τις παραδοχές που υιοθετούν οι μέθοδοι αποτόνωσης, η χρήση των οποίων είναι απαραίτητη κατά την εκτέλεση των διδιάστατων αναλύσεων.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού θα παρουσιαστούν τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων που εφαρμόστηκαν, καθώς και οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την πραγματοποίηση των αναλύσεων. Επιπρόσθετα θα γίνει πλήρης περιγραφή του αριθμητικού προσομοιώματος και θα ακολουθήσει έλεγχος της αξιοπιστίας αυτού.

## 5.1 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

---

Για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS και ABAQUS, ώστε να είναι υλοποιήσιμες όλες οι αριθμητικές αναλύσεις που απαιτήθηκαν να πραγματοποιηθούν προκειμένου να γίνει ρεαλιστική προσομοίωση του προβλήματος. Τα εν λόγω λογισμικά θεωρούνται κατάλληλα για την προσομοίωση σύνθετων προβλημάτων και την εκτέλεση απαιτητικών αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία.

### 5.1.1 Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων ANSYS

---

Για τους σκοπούς της εργασίας αυτής, το λογισμικό πρόγραμμα ANSYS χρησιμοποιήθηκε, στη φάση προσχεδιασμού (preprocessor), για το σχεδιασμό της γεωμετρίας και του καννάβου των μοντέλων προσομοίωσης καθώς και για τη διακριτοποίηση αυτών σε πεπερασμένα στοιχεία.

Στη συνέχεια, οι κόμβοι και τα στοιχεία που προέκυψαν από τη δημιουργία του μοντέλου στο ANSYS εισήχθησαν μέσω ενός φακέλου δεδομένων (input file) στο λογισμικό ABAQUS, κάνοντας την κατάλληλη μετατροπή με τη βοήθεια του προγράμματος Microsoft Excel. Το «input file» περιείχε τους κόμβους (nodes), τα στοιχεία (elements), τα υλικά (material definition), καθώς και κάθε άλλο στοιχείο που απαιτείται για τον καθορισμό του μοντέλου.

### 5.1.2 Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS

---

Το λογισμικό πρόγραμμα ABAQUS χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα και να εξαχθούν χρήσιμα αριθμητικά και γραφικά αποτελέσματα. Θεωρείται ένα από τα πιο εξελιγμένα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων με δυνατότητες πραγματοποίησης απαιτητικών αναλύσεων και προσομοίωσης πολύπλοκων γραμμικών και μη γραμμικών προβλημάτων που αφορούν το μηχανικό.

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

## 5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

---

Στην ενότητα αυτή θα περιγραφεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να κατασκευαστούν τα αριθμητικά μοντέλα, μέσω των οποίων έγινε προσπάθεια να προσομοιωθεί όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά το φυσικό πρόβλημα. Συγκεκριμένα, δίνονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες που αφορούν στη γεωμετρική απεικόνιση του αριθμητικού προσομοιώματος, στη διακριτοποίησή του σε πεπερασμένα στοιχεία, στις συνοριακές συνθήκες που το διέπουν καθώς και στα βήματα εκσκαφής. Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι η περιγραφή που πραγματοποιείται στις παραγράφους που ακολουθούν αντιστοιχεί σε ένα τυπικό προσομοίωμα, εκ των τριών που κατασκευάστηκαν, που διαθέτει πλάτος πυλώνα  $W=D=10\text{m}$ . Ανάλογη είναι η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τα υπόλοιπα.

### 5.2.1 Γεωμετρική απεικόνιση

---

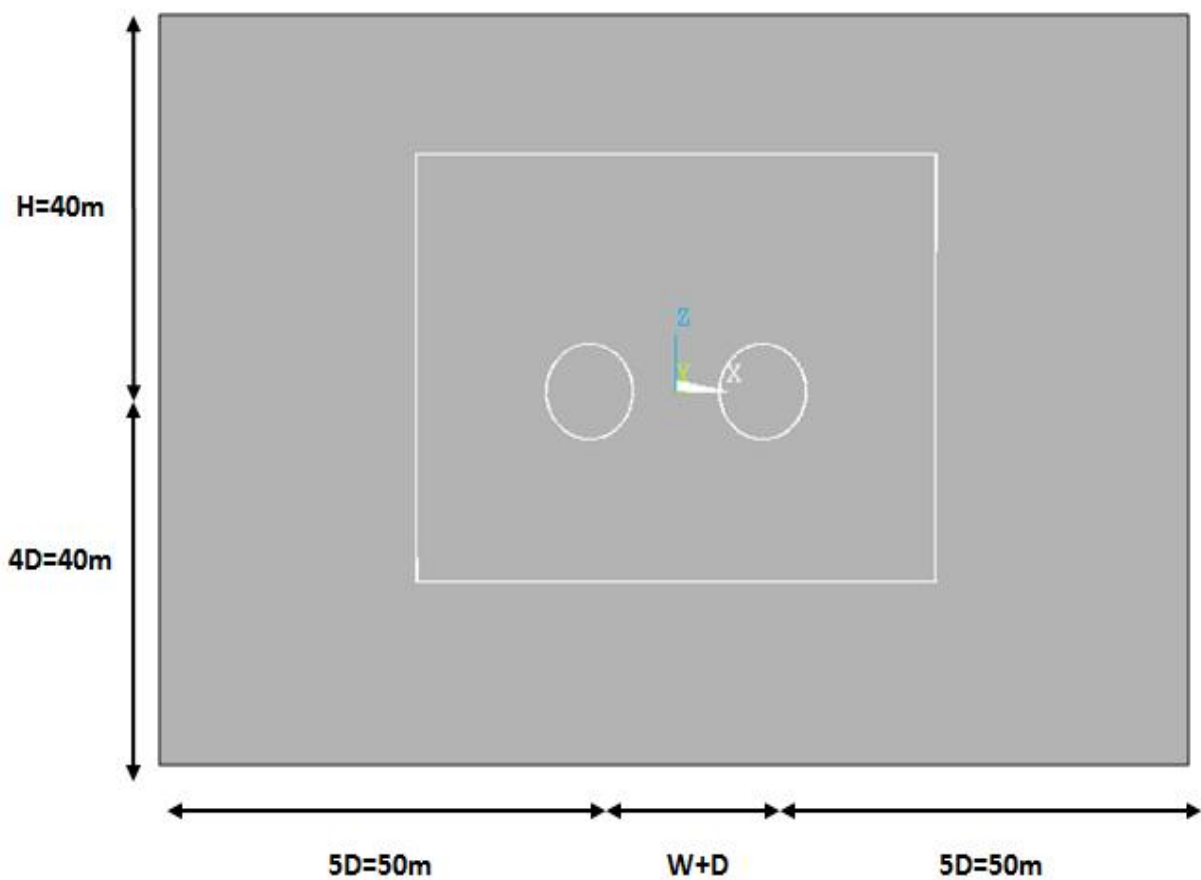
Όπως ήδη αναφέρθηκε, το φυσικό πρόβλημα που μελετάται μέσω των αριθμητικών αναλύσεων είναι η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων μιας δίδυμης σήραγγας κατά την εκσκαφή, σε συνάρτηση με τη μεταξύ τους απόσταση. Για λόγους γενικότητας των αποτελεσμάτων, επιλέχθηκαν για όλα τα προσομοιώματα σήραγγες κυκλικής διατομής και διαμέτρου  $D=10\text{m}$ , ενώ η διάνοιξη πραγματοποιείται με ολομέτωπη εκσκαφή σε ομοιογενή σχηματισμό. Επιπρόσθετα, η άμεση υποστήριξη αποτελείται μόνο από κέλυφος εκτοξευμένου σκυροδέματος. Η βασική παράμετρος διαφοροποίησης των προσομοιωμάτων είναι η απόσταση  $W$  μεταξύ των δυο κλάδων (μετράται από παρειά σε παρειά). Στη συνέχεια ακολουθεί περιγραφή ενός τυπικού αριθμητικού προσομοιώματος.

Οι διαστάσεις του προσομοιώματος καθορίστηκαν έπειτα από τη διενέργεια παραμετρικών αναλύσεων. Οι διαστάσεις θα πρέπει αφενός να είναι οι βέλτιστες ώστε να συνδυάζουν χαμηλή χρονική διάρκεια αναλύσεων και ορθότητα των αποτελεσμάτων και αφετέρου να τηρούν ορισμένους βασικούς περιορισμούς ώστε τα αποτελέσματα των αναλύσεων να θεωρούνται αξιόπιστα.

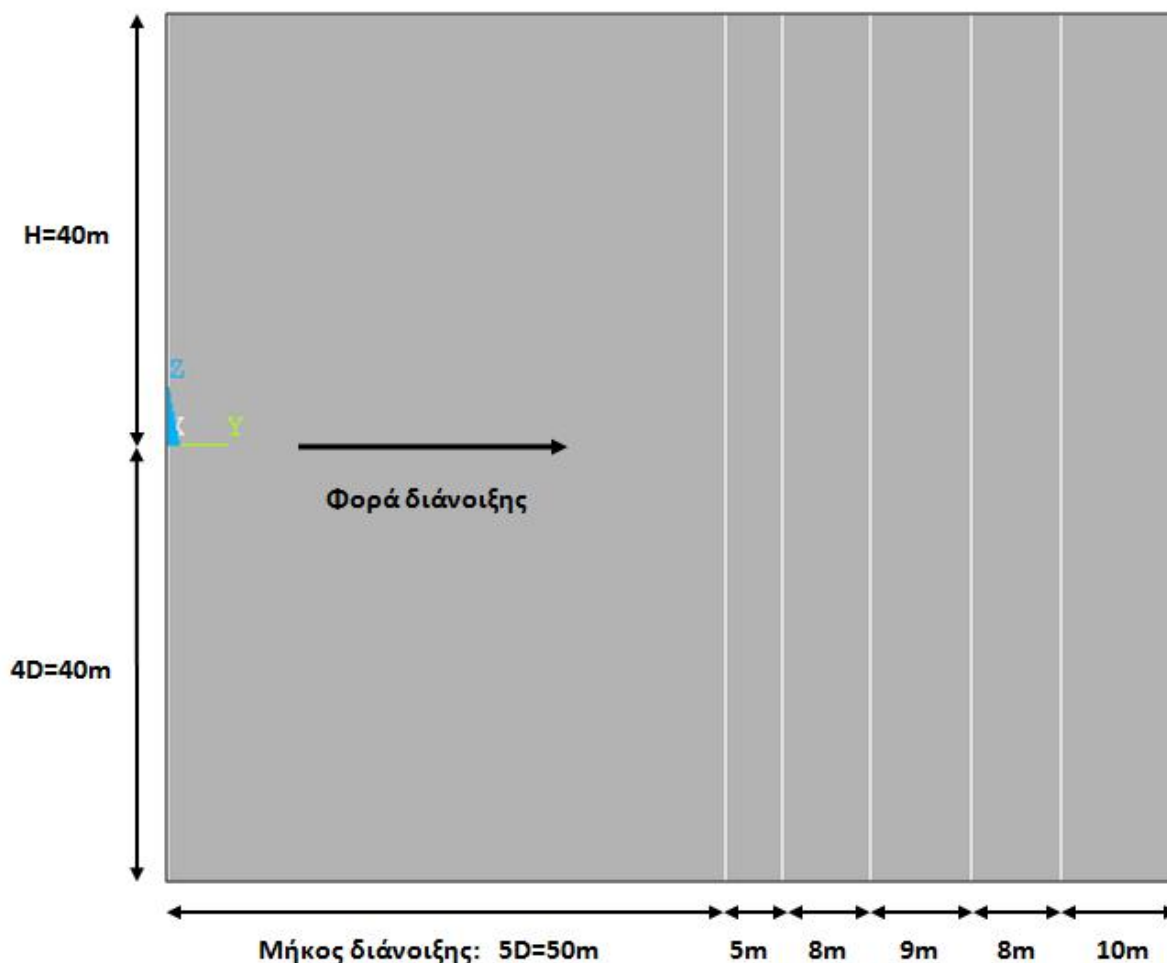
Πιο συγκεκριμένα, για τον καθορισμό των ορίων του προσομοιώματος λήφθηκε υπόψη πως ανάμεσα στους δυο κλάδους και στα όρια του προσομοιώματος θα πρέπει να παρεμβάλλονται αρκετά μέτρα εδαφικού υλικού, ώστε να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων από τις συνοριακές συνθήκες. Παράλληλα, το μήκος της σήραγγας κατά τη φορά διάνοιξης θα πρέπει να είναι τόσο ώστε στην περιοχή του ενδιαφέροντός μας, όπου λαμβάνονται τα αποτελέσματα, να έχει ολοκληρωθεί η αποτόνωση των τάσεων και τα αποτελέσματα να είναι απαλλαγμένα από την επίδραση των πλευρικών ορίων του προσομοιώματος. Η κατανομή των ολικών τάσεων μετά την εκσκαφή πρέπει να είναι ομοιόμορφη ως προς το οριζόντιο επίπεδο και σε αυτό επιδρά σημαντικά

η απόσταση της σήραγγας από το κάτω όριο. Επιπλέον, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην επιλογή της απόστασης της σήραγγας από το πλευρικό όριο, ώστε η κατανομή των τάσεων κοντά σε αυτό να εμφανίζεται σχεδόν ομοιόμορφη ως προς το οριζόντιο επίπεδο και με όσον το δυνατόν μικρότερη τιμή.

Με βάση λοιπόν τους ανωτέρω περιορισμούς, η γεωμετρία ενός τυπικού μοντέλου ( $W=D=10\text{m}$ ) που κατασκευάστηκε για τη εκτέλεση των αναλύσεων, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1 και Σχήμα 5.2 που ακολουθούν (εγκάρσια και διαμήκης όψη της γεωμετρίας του προσομοιώματος, όπως λαμβάνεται από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS).



Σχήμα 5.1 Εγκάρσια όψη του αριθμητικού προσομοιώματος , για  $W=D=10\text{m}$  (Λογισμικό ANSYS).



**Σχήμα 5.2 Διαμήκης όψη του αριθμητικού προσομοιώματος, για  $W=D=10m$  (Λογισμικό ANSYS).**

Το ύψος των υπερκείμενων γαιών λήφθηκε ίσο με  $H=40m$ . Η απόσταση του κάτω ορίου της εκσκαφής από το επίπεδο που ορίζει η ευθεία που ενώνει τα κέντρα των δυο κυκλικών σηράγγων (άξονας z-z) θεωρήθηκε ίση με  $4D=40m$ . Το αριστερό πλευρικό όριο (άξονας x-x) σχεδιάστηκε σε απόσταση  $5D=50m$  από το κέντρο της κυκλικής διατομής του αριστερού κλάδου. Αντίστοιχα λήφθηκε και η απόσταση για το δεξί πλευρικό όριο. Ως  $W$  ορίζεται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η οριζόντια απόσταση μεταξύ των δυο κλάδων, η οποία μετράται από παρειά σε παρειά και λαμβάνει τιμές  $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ , για τα τρία διαφορετικά προσομοιώματα που κατασκευάστηκαν. Το μήκος κατά τη διεύθυνση εκσκαφής (άξονας y-y) λήφθηκε ίσο με  $90m(=9D)$ , ενώ η εκσκαφή πραγματοποιήθηκε για τα πρώτα  $50m(=5D)$ .

### 5.2.2 Διακριτοποίηση του αριθμητικού προσομοιώματος και συνωριακές συνθήκες

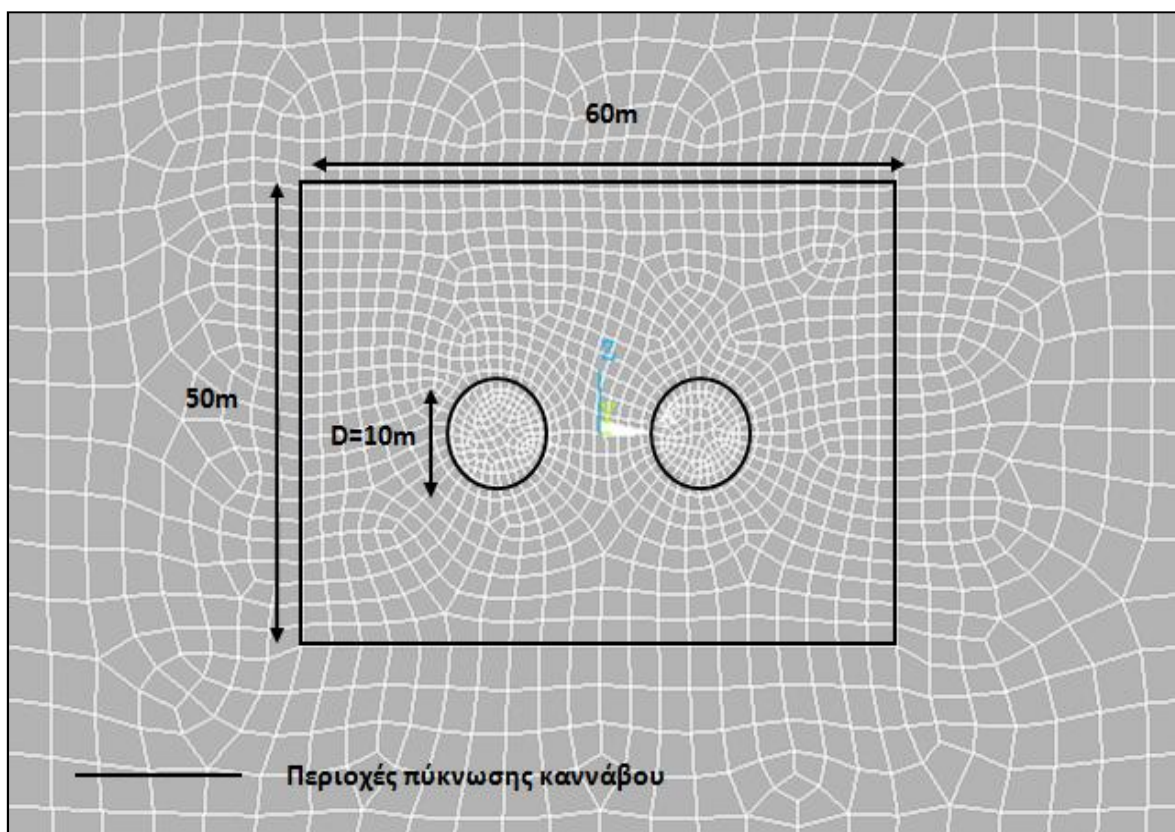
Κατά το σχεδιασμό, για την προσομοίωση του περιβάλλοντος γεωυλικού χρησιμοποιήθηκαν τριδιάστατα εξαπλευρικά οκτακομβικά πεπερασμένα στοιχεία μειωμένου πλήθους σημείων ολοκλήρωσης με hourglass control (C3D8R), ενώ για τη προσομοίωση του κελύφους εκτοξευμένου σκυροδέματος επιλέχθηκαν τετραπλευρικά τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία (S4R5) με πέντε βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο.

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

Κατά μήκος της διάνοιξης της σήραγγας, τα στοιχεία είχαν πάχος 1m για τα πρώτα 50m του μοντέλου, γεγονός που επιβαλλόταν λόγω του μικρού βήματος εκσκαφής και της ανάγκης για αυξημένη ακρίβεια αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια ορίστηκαν στοιχεία πάχους 1m για τα επόμενα 5m, στοιχεία πάχους 2m για τα επόμενα 4m, στοιχεία πάχους 3m για τα επόμενα 3m, στοιχεία πάχους 4m για τα επόμενα 2m και τέλος στοιχεία πάχους 5m για το επόμενο 1m.

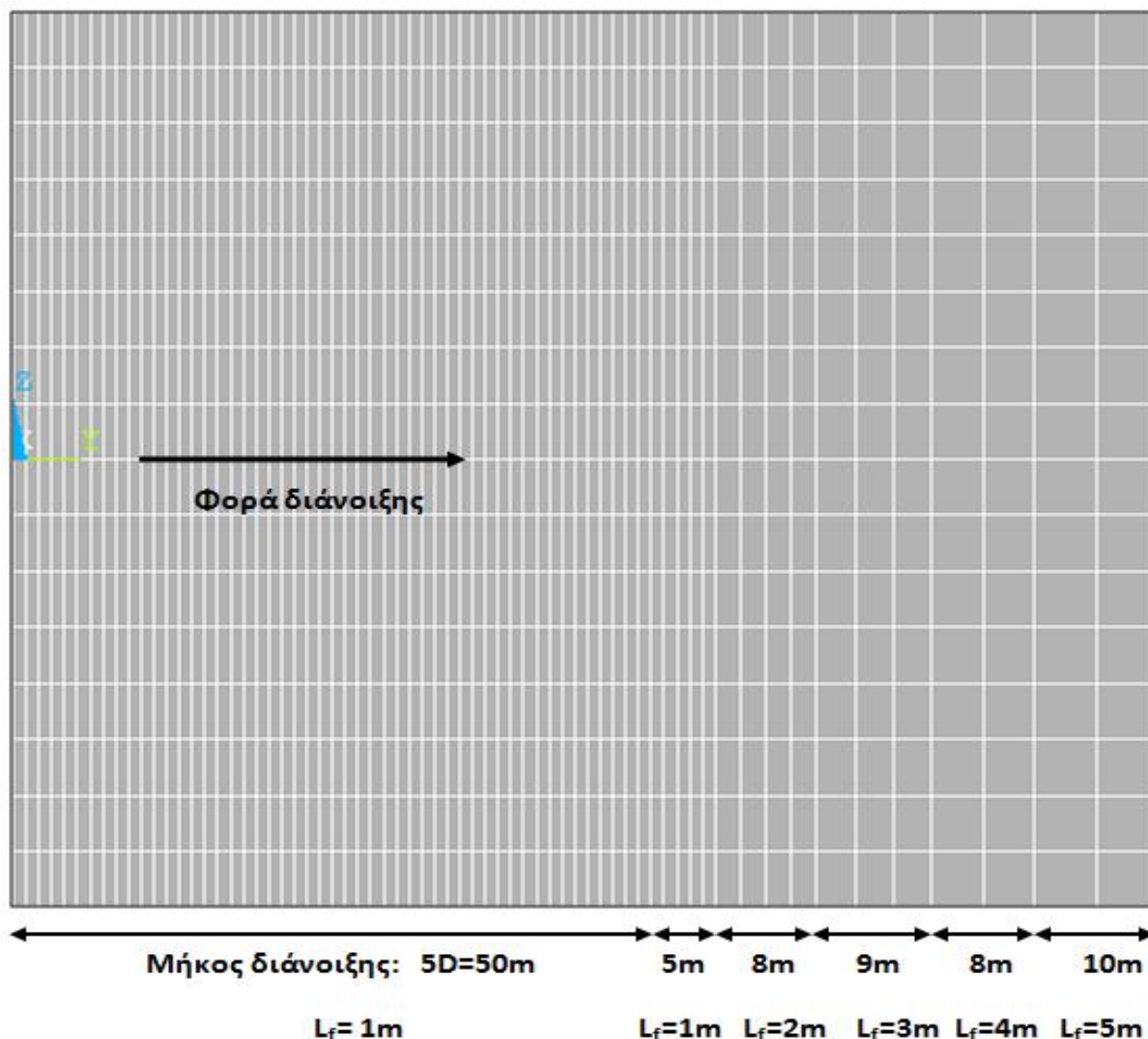
Κατά την εγκάρσια διεύθυνση, στο άνω πλευρικό όριο η διάσταση των στοιχείων λήφθηκε ίση με 4m ενώ στα υπόλοιπα τρία πλευρικά όρια ίση με 5m. Έπειτα κατασκευάστηκε ορθογωνική επιφάνεια μήκους 60m και ύψους 50m η οποία περικλείει τους δυο κλάδους της σήραγγας. Στην περιοχή αυτή, που είναι κρίσιμη για τα αποτελέσματα, πραγματοποιήθηκε πύκνωση του καννάβου και η διάσταση των στοιχείων ορίστηκε ίση με 2m. Τέλος στα όρια της εκσκαφής η διάσταση των πεπερασμένων στοιχείων ήταν ίση με 1m.

Στα σχήματα που ακολουθούν διακρίνονται οι περιοχές στις οποίες διαφοροποιείται η πυκνότητα του καννάβου.



Σχήμα 5.3 Εγκάρσια όψη του αριθμητικού προσομοιώματος, για  $W=D=10m$ , όπου διακρίνονται οι περιοχές διαφορετικής πυκνότητας των πεπερασμένων στοιχείων (Λογισμικό ANSYS).





Σχήμα 5.4 Διαμήκης όψη του αριθμητικού προσομοιώματος, για  $W=D=10m$ , όπου διακρίνονται οι περιοχές διαφορετικής πυκνότητας των πεπερασμένων στοιχείων –  $L_f$ : Μήκος πεπερασμένου στοιχείου κατά τη διαμήκη έννοια (Λογισμικό ANSYS).

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

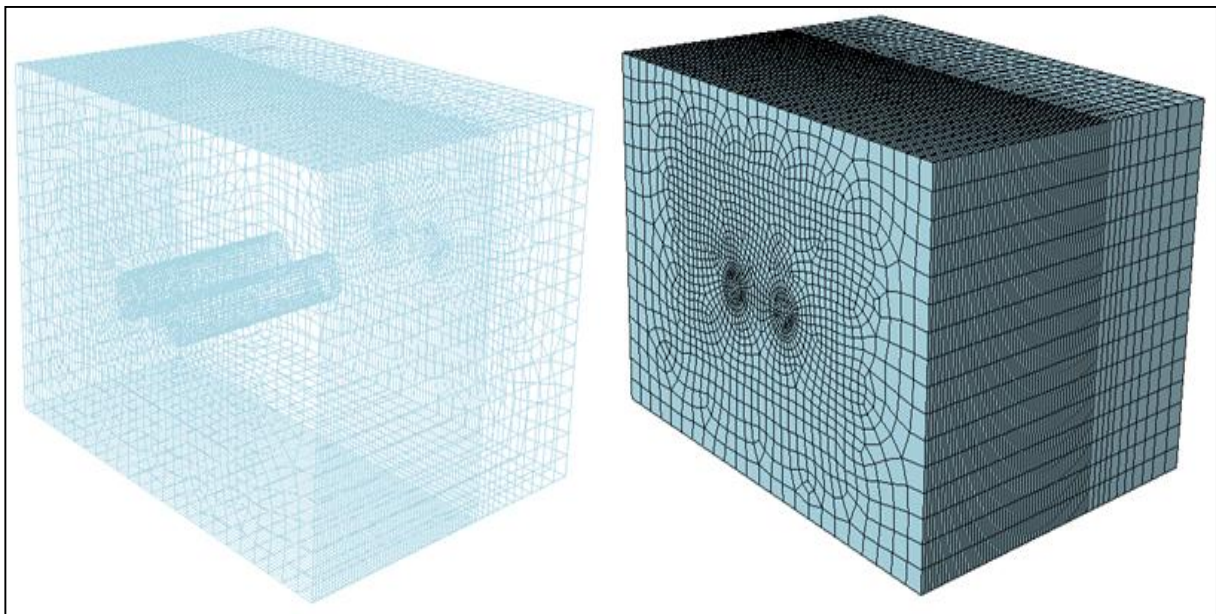
Συνολικά για το τυπικό μοντέλο προσομοίωσης που περιγράφεται στην παρούσα ενότητα, στο οποίο η «καθαρή» απόσταση  $W$  μεταξύ των δυο κλάδων είναι ίση με  $10m$ , δημιουργήθηκαν 109328 στοιχεία εδάφους και 110416 κόμβοι.

Αναφορικά με τις συνοριακές συνθήκες, επιλέχθηκε η παρεμπόδιση των οριζόντιων μετακινήσεων στα πλευρικά όρια του προσομοιώματος και η παρεμπόδιση των οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων στο κάτω όριο. Τα άνω όριο παρέμεινε ελεύθερο στις μετακινήσεις. Για το λόγο αυτό στο δεξί, στο αριστερό, στο εμπρός και στο πίσω όριο του μοντέλου τοποθετήθηκαν κυλίσεις, ώστε

να επιτρέπονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις χωρίς την ανάπτυξη διατμητικών τάσεων. Στο κάτω όριο του προσομοιώματος χρησιμοποιήθηκαν χωρικές αρθρώσεις, οι οποίες δεσμεύουν τις μετακινήσεις προς οποιαδήποτε κατεύθυνση.

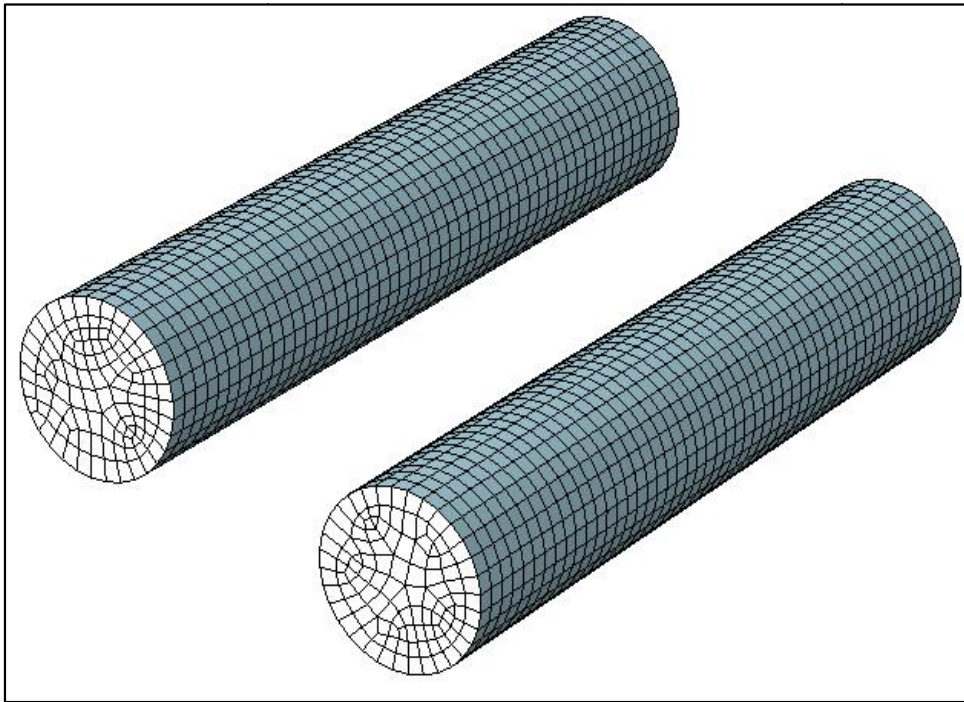
### 5.2.3 Βήματα εκσκαφής

Όλα τα παραπάνω στοιχεία που σχετίζονται με τη γεωμετρία του μοντέλου, με τη διακριτοποίηση αυτού σε πεπερασμένα στοιχεία καθώς και με τις συνοριακές συνθήκες που επιλέχθηκαν, μεταφέρθηκαν, με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην ενότητα 3.1.1, στο «input file» του λογισμικού ABAQUS. Στη συνέχεια ακολούθησε καθορισμός των βημάτων εκσκαφής. Η επιλογή των βημάτων εκσκαφής δεν ήταν τυχαία, καθώς τα βήματα εκσκαφής καθορίζουν το ρυθμό με τον οποίο εξελίσσεται η εξόρυξη και εξαρτώνται από τη δυνατότητα αυτοϋποστήριξης του γεωυλικού και την οικονομία στα μέτρα άμεσης υποστήριξης. Στο Σχήμα 5.5 απεικονίζεται το τριδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα, όπως λαμβάνεται από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

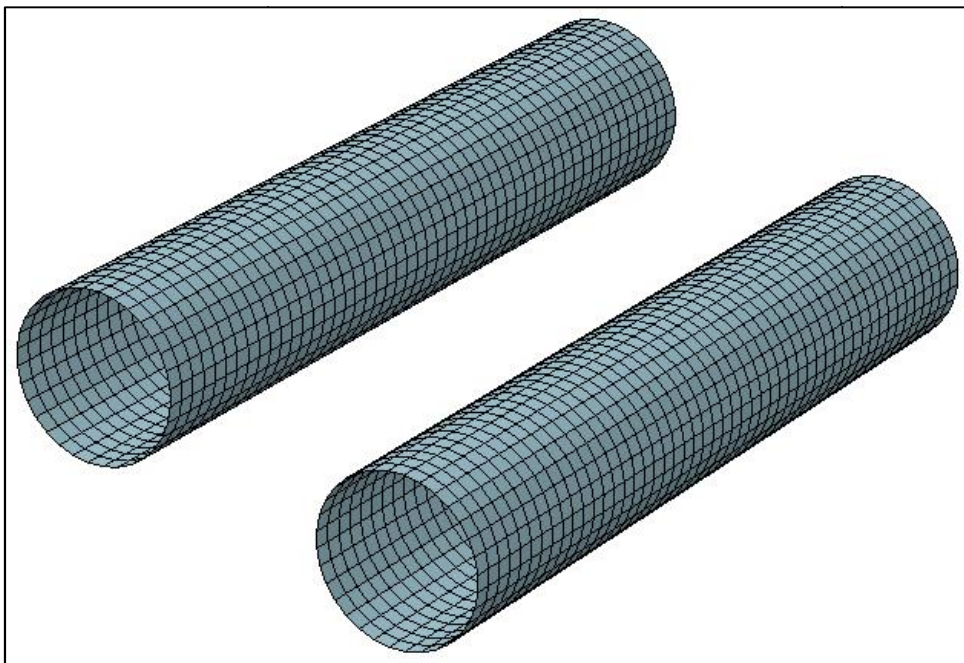


**Σχήμα 5.5 Τριδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα για πλάτος πυλώνα  $W=D=10\text{m}$  (Λογισμικό ABAQUS).**

Για όλες τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε βήμα εκσκαφής  $\beta=1\text{m}$ , παραδοχή η οποία κρίνεται εύλογη σύμφωνα με τη συνήθη κατασκευαστική πρακτική. Υπενθυμίζεται πως σε όλες τις αναλύσεις θεωρήθηκε ολομέτωπη εκσκαφή κυκλικής διατομής διαμέτρου  $D=10\text{m}$ , ενώ η διάνοιξη πραγματοποιήθηκε και για τους δυο κλάδους με φορά από  $\gamma=0\text{m}$  έως  $\gamma=50\text{m}$ .



**Σχήμα 5.6** Πεπερασμένα στοιχεία εντός των διατομών εκσκαφής, τα οποία αφαιρούνται κατά τα διαδοχικά στάδια προσομοίωσης (Λογισμικό ABAQUS).



**Σχήμα 5.7** Πεπερασμένα στοιχεία του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, τα οποία ενεργοποιούνται κατά τα διαδοχικά στάδια της προσομοίωσης (Λογισμικό ABAQUS).

Αναφορικά με την αλληλουχία των εκσκαφών, κρίθηκε σκόπιμη η επιλογή της διαδοχικής εκσκαφής των δυο κλάδων. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά ξεκινά να εξελίσσεται η εκσκαφή του αριστερού κλάδου και ύστερα από την ολοκλήρωση αυτής ακολουθεί η εκσκαφή του δεξιού κλάδου. Η πρακτική αυτή προτιμάται από την ταυτόχρονη εκσκαφή των δυο κλάδων, καθώς επιδιώκεται να διερευνηθεί η επίδραση της διάνοιξης του δεύτερου κλάδου στον αρχικό.

Συνολικά λοιπόν η κάθε ανάλυση αποτελείται από 99 βήματα τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια:

– **Βήμα 1<sup>ο</sup>**

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

– **Βήμα 2<sup>ο</sup>**

Εκσκαφή των δυο πρώτων μέτρων του αριστερού/πρώτου κλάδου της σήραγγας και τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης από εκτοξευμένο σκυρόδεμα στο πρώτο μέτρο της εκσκαφής. Κατά τη διάρκεια της όρυξης, πάντα η εκσκαφή θα προπορεύεται κατά ένα μέτρο της τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης.

– **Βήμα 3**

Εκσκαφή του επόμενου μέτρου του αριστερού/πρώτου κλάδου της σήραγγας, με δεδομένη προχώρηση ανά 1m, και ενεργοποίηση της υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα του μέτρου που διανοίχθηκε στο προηγούμενο βήμα.

– **Βήμα 4<sup>ο</sup> έως Βήμα 49<sup>ο</sup>**

Όμοια με το προηγούμενο βήμα.

– **Βήμα 50<sup>ο</sup>**

Ολοκλήρωση της εκσκαφής και του αριστερού/πρώτου κλάδου της σήραγγας (50<sup>ο</sup> μέτρο) και τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης από εκτοξευμένο σκυρόδεμα στο ανυποστήρικτο τμήμα που διανοίχθηκε στο προηγούμενο βήμα. Με τον τρόπο αυτό, μετά το πέρας της εκσκαφής του αριστερού/πρώτου κλάδου το τελευταίο μέτρο της εκσκαφής παραμένει ανυποστήρικτο.

– **Βήμα 51<sup>ο</sup>**

Εκσκαφή των δυο πρώτων μέτρων του δεξιού/δεύτερου κλάδου της σήραγγας και τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης από εκτοξευμένο σκυρόδεμα στο πρώτο μέτρο της εκσκαφής. Κατά τη διάρκεια της όρυξης, πάντα η εκσκαφή θα προπορεύεται κατά ένα μέτρο της τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης.

– **Βήμα 52<sup>ο</sup>**

Εκσκαφή του επόμενου μέτρου του δεξιού/δεύτερου κλάδου της σήραγγας, με δεδομένη προχώρηση ανά 1m, και ενεργοποίηση της υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα του μέτρου που διανοίχθηκε στο προηγούμενο βήμα.

– **Βήμα 53<sup>ο</sup>-98<sup>ο</sup>**

Όμοια με το προηγούμενο βήμα.

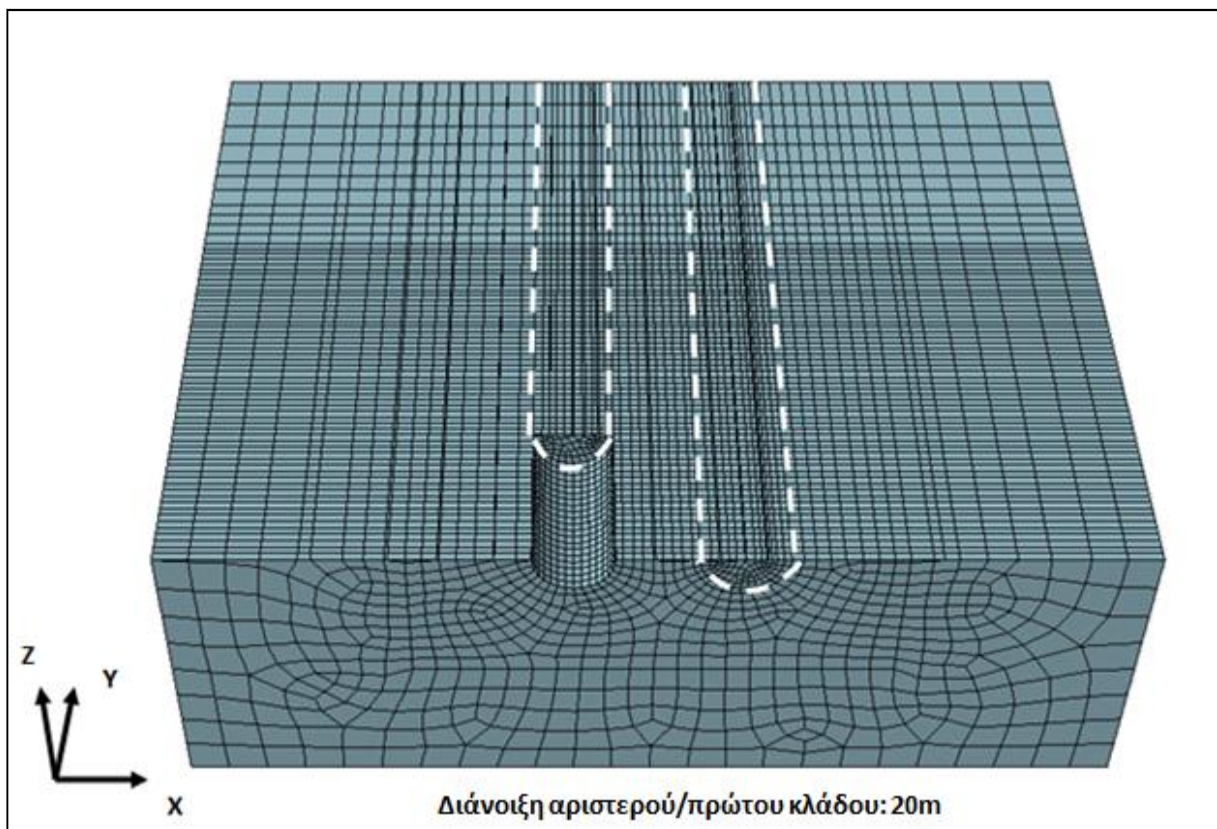


– **Βήμα 99°**

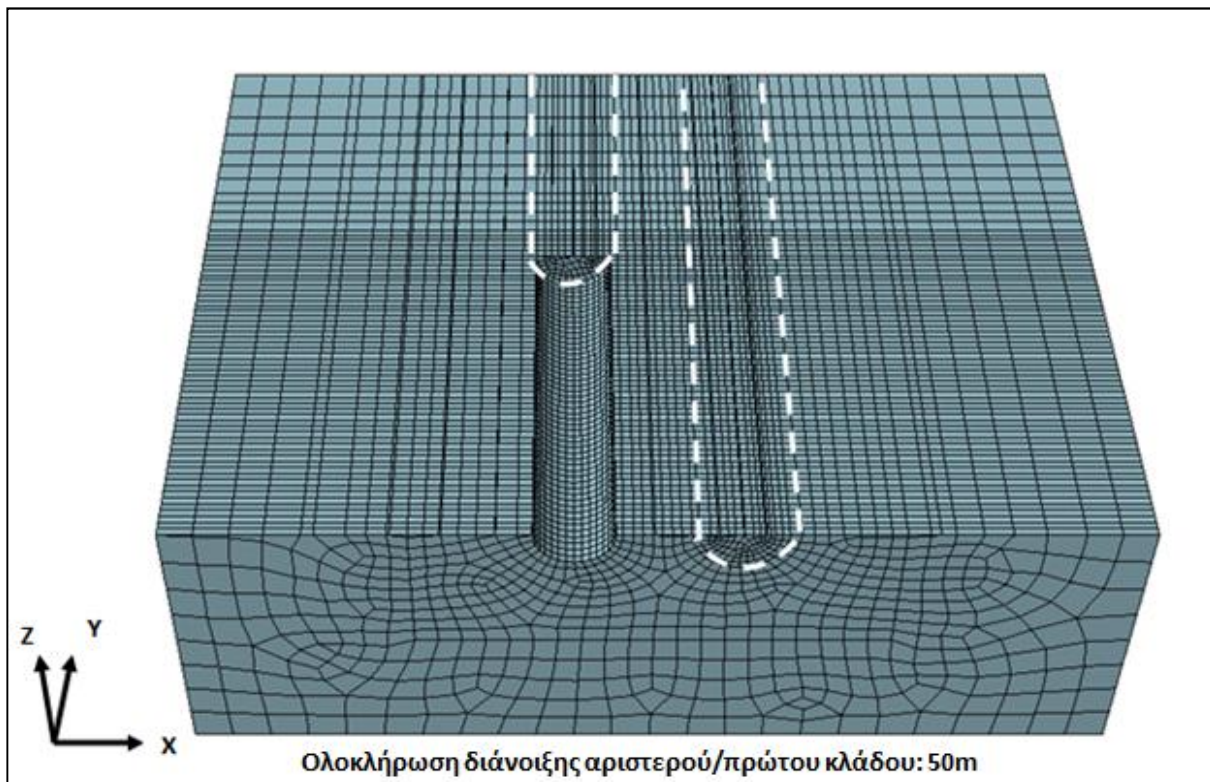
Ολοκλήρωση της εκσκαφής και του δεξιού/δεύτερου κλάδου της σήραγγας (50° μέτρο) και τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης από εκτοξευμένο σκυρόδεμα στο ανυποστήρικτο τμήμα που διανοίχθηκε στο προηγούμενο βήμα. Με τον τρόπο αυτό, μετά το πέρας της εκσκαφής του δεξιού/δεύτερου κλάδου το τελευταίο μέτρο της εκσκαφής παραμένει ανυποστήρικτο.

Σε καθένα από τα παραπάνω βήματα μπορούν να εξαχθούν αποτελέσματα για τις τάσεις, τις παραμορφώσεις και της πλαστικές ζώνες που αναπτύσσονται στο περιβάλλον γεωυλικό των σηράγγων. Παράλληλα, για το εκτοξευμένο σκυρόδεμα μπορούν να παρουσιαστούν τα εντατικά μεγέθη που δέχεται κάθε στοιχείο του κελύφους από τις συγκλίσεις της σήραγγας.

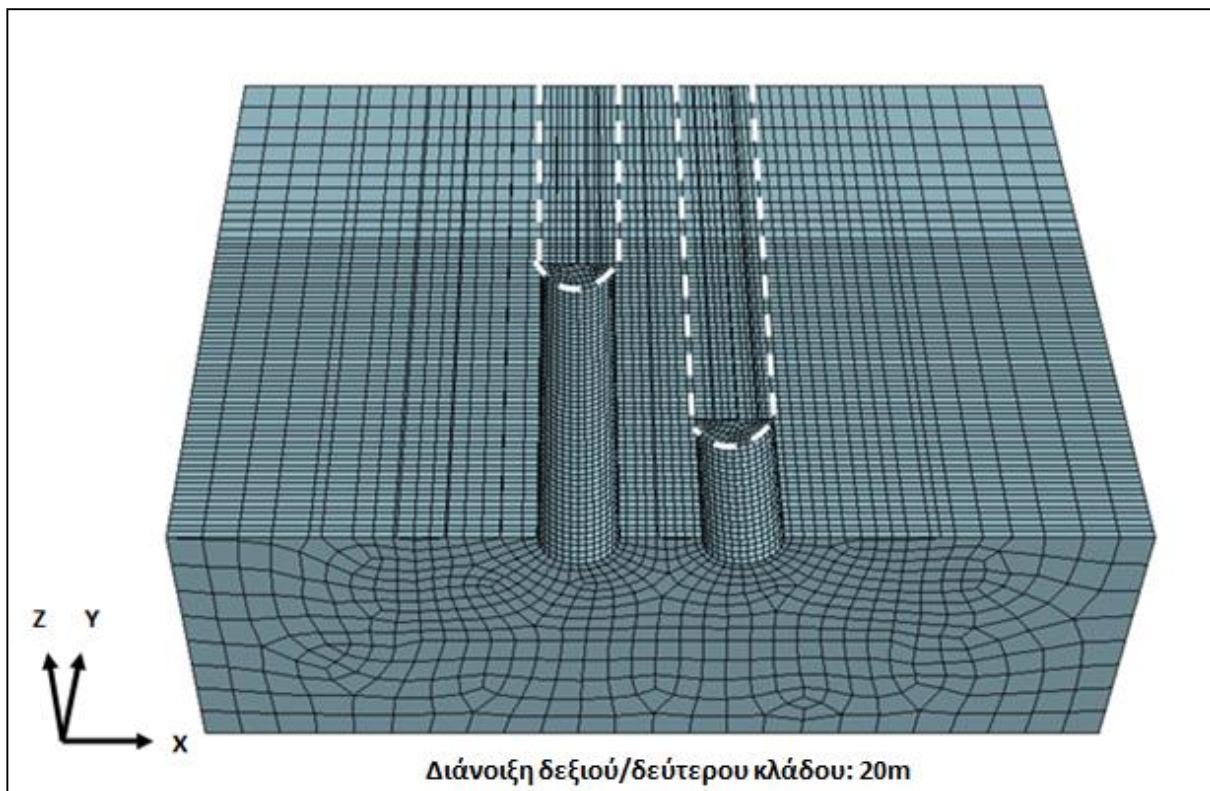
Στις τομές που ακολουθούν στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται χαρακτηριστικά στιγμιότυπα στα οποία φαίνεται η σταδιακή πρόοδος της διάνοιξης των δυο κλάδων, με την αφαίρεση των πεπερασμένων στοιχείων εντός της διατομής της εκσκαφής και την προσθήκη του κελύφους της άμεσης υποστήριξης (τομές κατά  $x-x'$ , με οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται από το κέντρο των σηράγγων).



Σχήμα 5.8 Προσομοίωση της διαδικασίας εκσκαφής με σταδιακή αφαίρεση των πεπερασμένων στοιχείων εντός τη διατομής εκσκαφής (Βήμα 20° – Τομή προσομοιώματος με οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται από το κέντρο των σηράγγων).

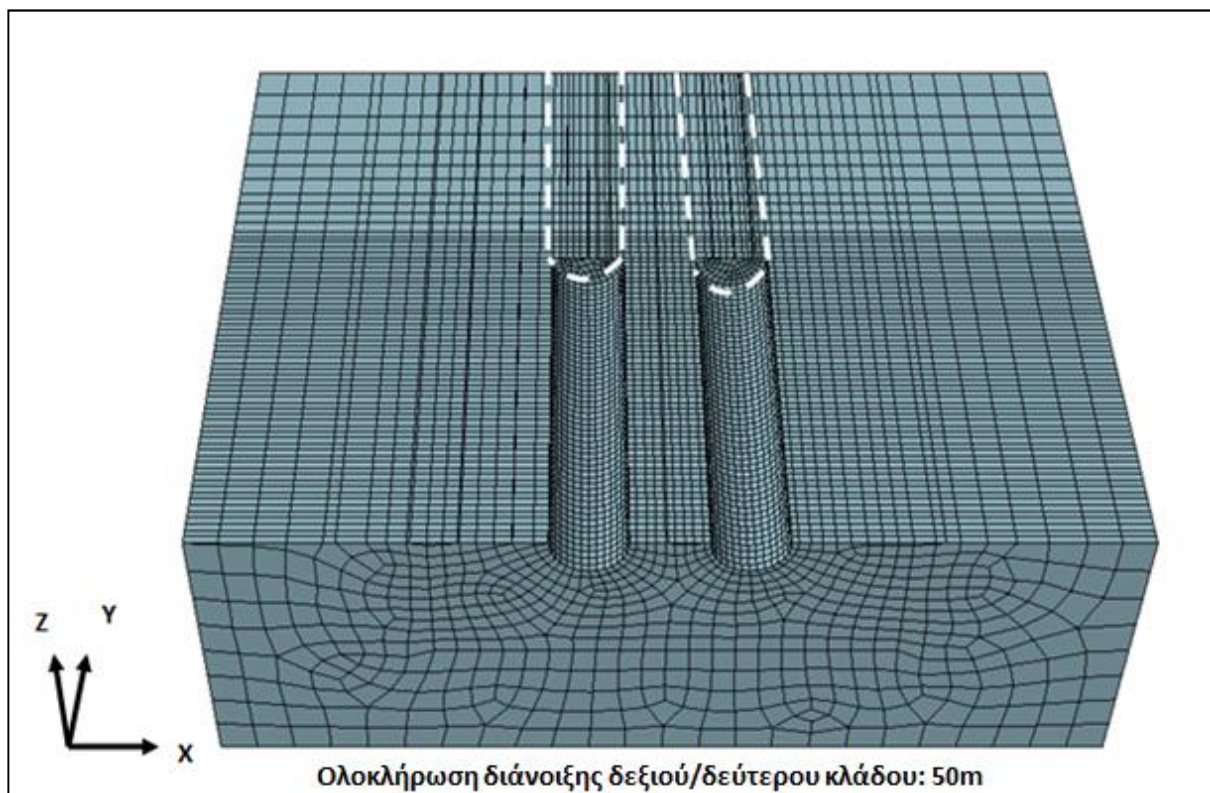


Σχήμα 5.9 Προσομοίωση της διαδικασίας εκσκαφής με σταδιακή αφαίρεση των πεπερασμένων στοιχείων εντός τη διατομής εκσκαφής (Βήμα 50° - Τομή προσομοιώματος με οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται από το κέντρο των σηράγγων).



Σχήμα 5.10 Προσομοίωση της διαδικασίας εκσκαφής με σταδιακή αφαίρεση των πεπερασμένων στοιχείων εντός τη διατομής εκσκαφής (Βήμα 69° - Τομή προσομοιώματος με οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται από το κέντρο των σηράγγων).





Σχήμα 5.11 Προσομοίωση της διαδικασίας εκσκαφής με σταδιακή αφαίρεση των πεπερασμένων στοιχείων εντός τη διατομής εκσκαφής (Βήμα  $100^\circ$  - Τομή με οριζόντιο επίπεδο στο κέντρο των σηράγγων).

### 5.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά των δυο κλάδων μιας δίδυμης σήραγγας, κατά τη διάνοιξη, σε συνάρτηση με την μεταξύ τους απόσταση, κατασκευάστηκαν τρία αριθμητικά προσομοιώματα, διαφορετικής γεωμετρίας. Η βασική παράμετρος διαφοροποίησης των μοντέλων είναι το πλάτος του πυλώνα  $W$ . Στην ενότητα αυτή περιγράφονται όλες οι παραδοχές που έγιναν κατά το σχεδιασμό, καθώς και όλες βασικές παράμετροι που υπεισέρχονται στις τριδιάστατες αναλύσεις.

#### 5.3.1 Πλάτος πυλώνα $W$

Ως πλάτος πυλώνα  $W$  ορίζεται η οριζόντια απόσταση μεταξύ των δυο κλάδων μιας δίδυμης σήραγγας. Η απόσταση αυτή μετράται από την παρειά της μιας εκσκαφής έως την παρειά της δεύτερης και ουσιαστικά αντιπροσωπεύει το «καθαρό ψαχνό» της βραχώμαζας που παρεμβάλλεται μεταξύ των δυο κλάδων. Η συγκεκριμένη παράμετρος καθορίζει σημαντικά το βαθμό αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων.

Προκειμένου λοιπόν να μελετηθεί η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων σε συνάρτηση με το πλάτος του ενδιάμεσου πυλώνα, κατασκευάστηκαν τρία αριθμητικά προσομοιώματα στα οποία

διαφοροποιείται η απόσταση μεταξύ των δυο κλάδων. Πιο συγκεκριμένα, για τη διερεύνηση του προβλήματος επιλέχθηκαν οι τιμές  $W=0.5D=5\text{m}$ ,  $W=D=10\text{m}$ , και  $W=2D=20\text{m}$ .

### 5.3.2 Γεωτεχνικές παράμετροι

Για κάθε ένα από τα αριθμητικά προσομοιώματα που κατασκευάστηκαν, πραγματοποιήθηκε μια σειρά αναλύσεων. Στις αναλύσεις αυτές διαφοροποιούνται ορισμένες από τις βασικές παραμέτρους της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας του γεωυλικού, οι οποίες αποτελούν ουσιαστικά την ταυτότητα αυτού και καθορίζουν τη συμπεριφορά του κατά την κατασκευή των τεχνικών έργων. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν όλες οι γεωτεχνικές παράμετροι που επιδρούν στα αποτελέσματα των αναλύσεων, αλλά και οι τιμές ή τα εύρη τιμών που επιλέχθηκαν για αυτές.

Το ύψος των υπερκείμενων γαιών  $H$  που καθορίζει την επίδραση του γεωστατικού πεδίου, καθώς και η διάμετρος της κυκλικής διατομής  $D$  επιλέχθηκε να διατηρηθούν σταθερά για όλες της αριθμητικές αναλύσεις ( $H=40\text{m}$  και  $D=10\text{m}$ , αντίστοιχα). Επιπρόσθετα, για το συντελεστή οριζόντιων τάσεων  $K_0$ , ο οποίος επηρεάζει το μέσο εντατικό πεδίο αλλά και την κατανομή των διεκτροπικών τάσεων, επιλέχθηκε μια ρεαλιστική τιμή ίση με 0.7 για όλες τις σειρές των αναλύσεων ( $K_0=0.7$ ). Το ειδικό βάρος του γεωυλικού λήφθηκε ίσο με  $0.025\text{MN/m}^3$ .

Οι γεωτεχνικές παράμετροι της περιβάλλουσας βραχώμαζας ποσοτικοποιήθηκαν αρχικά μέσω του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown, έτσι ώστε να είναι εύκολη η εποπτεία και η αντιστοίχιση με πραγματικά γεωυλικά. Το συγκεκριμένο κριτήριο αστοχίας απαιτεί την εισαγωγή των εξής παραμέτρων:

– **Γεωλογικός δείκτης GSI**

Για την καλύτερη προσέγγιση του προβλήματος, επιλέχθηκε να προσομοιωθούν βραχώμαζες σχετικά πτωχής έως καλής ποιότητας. Για το λόγο αυτό ο γεωλογικός δείκτης GSI κυμαίνεται από 10 έως 40.

– **Αντοχή άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη  $\sigma_{ci}$**

Για την αντοχή του άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη επιλέχθηκε ένα εύρος τιμών, από 8MPa έως 20 MPa. Το εύρος αυτό αντιστοιχεί σε ασθενή έως μέτρια ισχυρά πετρώματα.

– **Σταθερά υλικού για άρρηκτο βράχο  $m_i$**

Η σταθερά  $m_i$ , η οποία εξαρτάται από το είδος του πετρώματος, έλαβε την τιμή 6 σε όλες τις αναλύσεις. Η τιμή αυτή δηλώνει μέτριο αλληλοκλείδωμα και μέτρια χαρακτηριστικά τριβής μεταξύ των τεμαχίων.



– **Συντελεστής διατάραξης της βραχόμαζας D**

Αναφορικά με τον παράγοντα αυτό, για βαθιές σήραγγες, όπου η δομή είναι σφιχτή, συνήθως επιλέγεται τιμή ίση με το μηδέν. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις (αβαθείς σήραγγες, πρηνή και θεμελιώσεις) απαιτείται να γίνεται εκτίμηση του D. Για την περίπτωση που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία (H=40m), ο συντελεστής διατάραξης της βραχόμαζας θεωρήθηκε μηδενικός (D=0).

– **Αντοχή βραχόμαζας  $\sigma_{cm}$**

Έχοντας θέσει τις τιμές για τις παραπάνω παραμέτρους, υπολογίστηκε η αντοχή της βραχόμαζας  $\sigma_{cm}$  σύμφωνα με τον τύπο:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} * ((m_b + 4s - a(m_b - 8s)) \left(\frac{m_b}{4} + s\right)^{a-1} / (2(1+a)(2+a)) \quad (\text{Hoek and Brown, 1997})$$

Συνεπώς το εύρος των τιμών της αντοχής της βραχόμαζας κυμάνθηκε από 0.31MPa έως 2.17MPa.

Το υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία δεν περιλαμβάνει το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown, αλλά το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Για το λόγο αυτό, ύστερα από την ποσοτικοποίηση των γεωτεχνικών παραμέτρων σε όρους του κριτηρίου Hoek-Brown ακολούθησε η συσχέτιση αυτού με το κριτήριο Mohr-Coulomb. Το ελαστοπλαστικό αυτό μοντέλο, περιλαμβάνει τις εξής παραμέτρους:

– **Μέτρο ελαστικότητας E**

Ο ρόλος του μέτρου ελαστικότητας εξετάζεται εκτενέστερα στη συνέχεια, και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του οι σχέσεις που προτείνονται από τους Hoek et al. (2002) και Hoek & Diederichs (2006).

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

$$E_m = MR * \sigma_{ci} * \left(0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left(\frac{60+15D-GSI}{11}\right)}}\right) \quad (\text{Hoek & Diederichs, 2006})$$

Κατά τον υπολογισμό του  $E_m$  σύμφωνα με τους Hoek and Diederichs χρησιμοποιείται η σταθερά MR, η τιμή της οποίας λήφθηκε ίση με 350.

– **Λόγος Poisson ν της βραχόμαζας**

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

– **Ισοδύναμες παράμετροι διατμητικής αντοχής (c, φ)**

Ύστερα από το συσχετισμό του κριτηρίου Hoek-Brown με το κριτήριο Mohr-Coulomb προκύπτουν για κάθε μια από τις γεωτεχνικές παραμέτρους που έχουμε ορίσει οι τιμές των ισοδύναμων

παραμέτρων διατμητικής αντοχής. Το εύρος των τιμών της ισοδύναμης συνοχής της βραχώμαζας κυμαίνεται από 0.039MPa έως 0.170MPa, ενώ το εύρος της ισοδύναμης γωνίας τριβής από 23° έως 42°.

– **Γωνία διαστολικότητας  $\delta$**

Η διαστολικότητα του περιβάλλοντος γεωυλικού ελήφθη σε κάθε ανάλυση ίση με  $\phi/6$  ( $\delta = \phi/6$ ).

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα εύρη των παραμέτρων καθώς και οι μεθοδολογίες που υιοθετήθηκαν για την εκτίμησή τους, κατά την εκτέλεση των παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων.

**Πίνακας 5.1 Γεωτεχνικές παράμετροι αριθμητικών αναλύσεων .**

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

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 96 αριθμητικές αναλύσεις, για τις τρεις τιμές του πλάτους του πυλώνα και για το εύρος των γεωτεχνικών παραμέτρων που έχουν αναφερθεί. Σημειώνεται ότι ο υπολογιστικός χρόνος της κάθε ανάλυσης ήταν κατά μέσο όρο περίπου ίσος με 32 ώρες, για έναν τυπικό υπολογιστή (I7, 10 G RAM).

### 5.3.3 Παράμετροι άμεσης υποστήριξης

Η άμεση υποστήριξη κατασκευάζεται προκειμένου να αποτραπεί η εξέλιξη των μετακινήσεων κοντά στο μέτωπο της εκσκαφής και να εξασφαλιστεί η συνέχιση των έργων με ασφάλεια. Η γεωμετρία

της άμεσης υποστήριξης καθορίζεται σε κάθε περίπτωση από τις επικρατούσες γεωτεχνικές συνθήκες, από την αναμενόμενη συμπεριφορά του γεωυλικού κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, καθώς και από τα φορτία που καλείται να αναλάβει. Τα συνήθη μέτρα άμεσης υποστήριξης είναι τα ακύρια και το εκτοξευμένο σκυρόδεμα.

Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία, θεωρήθηκε ότι η άμεση υποστήριξη αποτελείται μόνον από κέλυφος εκτοξευμένου σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα θεωρήθηκε ότι παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά, με μέτρο ελαστικότητας  $E=20000\text{MPa}$  και λόγο Poisson  $\nu=0.2$ . Το πάχος του εκτοξευμένου σκυροδέματος λήφθηκε ίσο με  $d_{sh}=0.20\text{m}$ , ενώ το ειδικό βάρος του ίσο με  $\gamma_{sh}=0.025\text{MN/m}^3$ . Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι παράμετροι της άμεσης υποστήριξης.

**Πίνακας 5.2** Παράμετροι εκτοξευμένου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης.

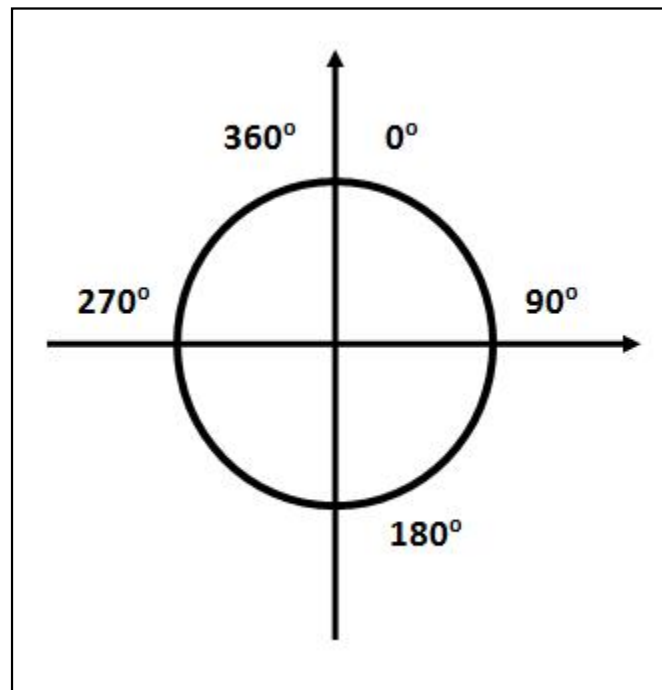
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΑΔΕΣ
Πάχος εκτοξευμένου σκυροδέματος	$d_{sh}$	0.20	m
Μέτρο ελαστικότητας εκτοξευμένου σκυροδέματος	$E_{sh}$	20000	MPa
Λόγος Poisson εκτοξευμένου σκυροδέματος	$\nu_{sh}$	0.2	-
Ειδικό βάρος εκτοξευμένου σκυροδέματος	$\gamma_{sh}$	0.025	$\text{MN/m}^3$

#### 5.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Σκοπός της ενότητας αυτής είναι η παρουσίαση και η επεξήγηση των βασικών εννοιών και παραδοχών που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια κατά την επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων, αλλά και του τρόπου με τον οποίο καθορίζονται οι αντιπροσωπευτικές τιμές του φορτίου για κάθε ανάλυση.

Αρχικά, λαμβάνονται οι τιμές των πιέσεων που ασκούνται σε όλη την παράπλευρη επιφάνεια του κελύφους του εκτοξευμένου σκυροδέματος. Στη συνέχεια υπολογίζεται η ελάχιστη, η μέση και η μέγιστη τιμή για κάθε διατομή και κατόπιν η μηκοτομική κατανομή αυτών. Ως χαρακτηριστική λαμβάνεται η τρίτη διατομή στην οποία παρατηρείται συνεχής ποσοστιαία μεταβολή τόσο της μέσης όσο και της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής μικρότερη από 0.5%. Στη θέση αυτή πρακτικά θεωρείται ότι το σύστημα γεωυλικό-υποστήριξη έχει ισορροπήσει λόγω της προχώρησης του μετώπου.

Για τη μελέτη της κατανομής των πιέσεων στη χαρακτηριστική διατομή ορίζεται εντός του επιπέδου η γωνία  $\theta$ , η οποία έχει θετική φορά την ωρολογιακή και το μηδέν αντιστοιχεί στην κλείδα. Ο ορισμός αυτός απεικονίζεται γραφικά στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 5.12 Γραφική απεικόνιση του ορισμού της γωνίας  $\theta$ .

Στη συνέχεια λαμβάνονται οι μετακινήσεις που ασκούνται σε όλη την παράπλευρη επιφάνεια του εκτοξευμένου σκυροδέματος. Στη περίπτωση αυτή λαμβάνονται οι τρεις συνιστώσες  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$  οι οποίες είναι η οριζόντια κάθετη στον άξονα συνιστώσα, η οριζόντια παράλληλα στον άξονα συνιστώσα και η κατακόρυφη συνιστώσα αντίστοιχα. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η σύγκλιση της διατομής, λαμβάνεται από τις παραπάνω συνιστώσες η συνισταμένη των  $u_1$  και  $u_3$  και στη συνέχεια ακολουθείται διαδικασία όμοια με εκείνη που προηγήθηκε για το μέγεθος των πιέσεων.

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

- $p_o$ : Κατακόρυφη γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας,  $p_o = \gamma H$ .
- $s$ : Η απόσταση της χαρακτηριστικής διατομής από το μέτωπο.
- $p$ : Πίεση στο κέλυφος της άμεσης υποστήριξης.
- $u$ : Μετακίνηση των στοιχείων περί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης.
- $u_r$ : Συνισταμένη δύναμη των συνιστωσών  $u_1$  και  $u_3$ .
- $u_1$ : Συνιστώσα της μετακίνησης που είναι οριζόντια και κάθετη στον άξονα της σήραγγας.
- $u_2$ : Συνιστώσα της μετακίνησης που είναι οριζόντια και παράλληλη στον άξονα της σήραγγας.
- $u_3$ : Συνιστώσα της μετακίνησης που είναι κατακόρυφη.
- $p_m$ ,  $u_m$ : Ο δείκτης «m» συμβολίζει τη μέση τιμή και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα μεγέθη που έχουν παρουσιαστεί.
- $p_{min}$ ,  $u_{min}$ : Ο δείκτης «min» συμβολίζει την ελάχιστη τιμή και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα μεγέθη που έχουν παρουσιαστεί.

- $p_{roof}$ ,  $u_{roof}$ : Ο δείκτης «roof» συμβολίζει το σημείο στην οροφή της διατομής και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα μεγέθη που έχουν παρουσιαστεί.
- $p_{90}$ ,  $u_{90}$ : Ο δείκτης «90» συμβολίζει το σημείο στην παρειά της διατομής, σύμφωνα με τον ορισμό της γωνίας  $\theta$  που αναφέρθηκε παραπάνω, και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα μεγέθη που έχουν παρουσιαστεί.
- $p_{270}$ ,  $u_{270}$ : Ο δείκτης «270» συμβολίζει το σημείο στην παρειά της διατομής, σύμφωνα με τον ορισμό της γωνίας  $\theta$  που αναφέρθηκε παραπάνω, και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα μεγέθη που έχουν παρουσιαστεί.
- $p_f$ ,  $u_f$ : Ο δείκτης “f” συμβολίζει την τιμή που αναφέρεται στον κλάδο που εκσκάπτεται πρώτος (first), δηλαδή τον αριστερό, και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα μεγέθη που έχουν παρουσιαστεί.
- $p_s$ ,  $u_s$ : Ο δείκτης “s” συμβολίζει την τιμή που αναφέρεται στον κλάδο που εκσκάπτεται δεύτερος (second), δηλαδή το δεξιό, και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα μεγέθη που έχουν παρουσιαστεί.
- $p_{single}$ ,  $u_{single}$ : Ο δείκτης “single” συμβολίζει την τιμή που αναφέρεται σε σήραγγα μονού κλάδου και μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα μεγέθη που έχουν παρουσιαστεί.

Σημειώνεται ότι στο εξής χάριν απλότητας, όπου απαιτείται η αναφορά των συμβόλων  $p_{m,f}$ ,  $p_{m,s}$ ,  $p_{m,single}$  τα οποία συμβολίζουν τη μέση πίεση για τον πρώτο, το δεύτερο και το μονό κλάδο, αυτά θα αντικαθιστούνται με τα σύμβολα  $p_f$ ,  $p_s$ ,  $p_{single}$ . Αντίστοιχα για τις μετακινήσεις, τα σύμβολα  $u_{r,f}$ ,  $u_{r,s}$ ,  $u_{r,single}$  θα αντικαθίστανται από τα σύμβολα  $u_f$ ,  $u_s$ ,  $u_{single}$ .

## 5.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

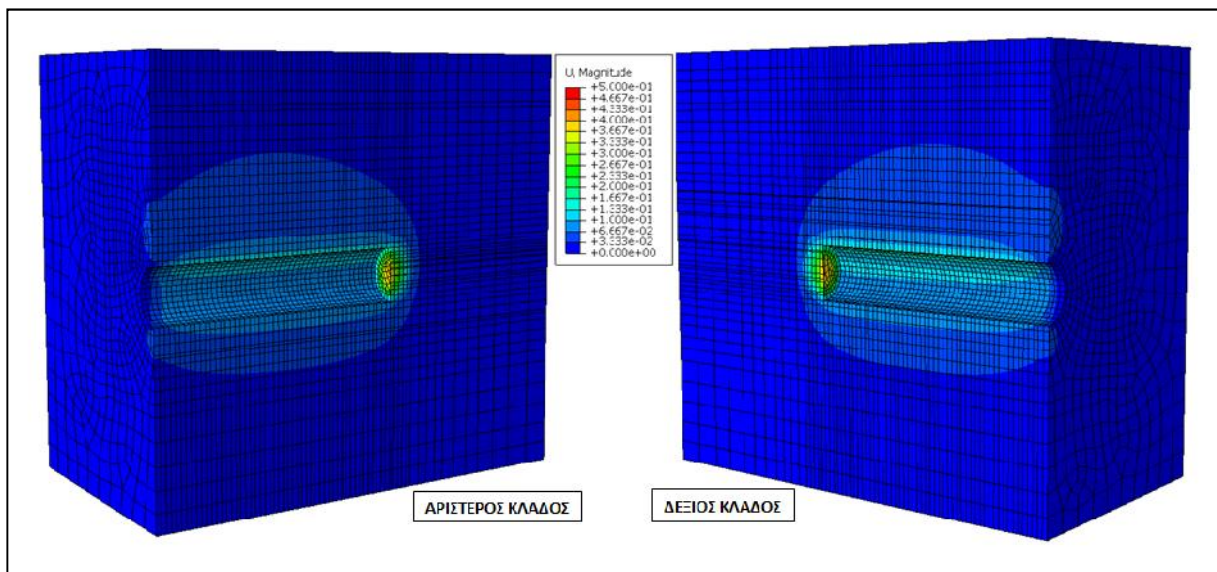
Πριν από την εκτέλεση των αριθμητικών αναλύσεων πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι αξιοπιστίας των προσομοιωμάτων οι οποίοι παρατίθενται στην ενότητα αυτή. Βασικός άξονας για το σχεδιασμό των προσομοιωμάτων ήταν η εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής ακρίβειας στους υπολογισμούς δίχως ασύμμετρα μεγάλη αύξηση του υπολογιστικού χρόνου, για τη δεδομένη υπολογιστική δυνατότητα που υπήρχε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Σημειώνεται επίσης, ότι οι έλεγχοι επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν σε δυσμενείς γενικά γεωτεχνικές συνθήκες. Επομένως, στις υπόλοιπες αναλύσεις οι έλεγχοι αξιοπιστίας θα οδηγούσαν σε αντίστοιχα ή και ευμενέστερα αποτελέσματα όσον αφορά στην επάρκεια των αριθμητικών προσομοιωμάτων. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν επιπλέον αριθμητικές αναλύσεις.

Αρχικά για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του κάθε προσομοιώματος (κατασκευάστηκαν τρία προσομοιώματα με διαφορετικό πλάτος πυλώνα  $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ ) πραγματοποιήθηκε ένα ζεύγος αναλύσεων, όπου κατά την πρώτη ανάλυση εκσκάπτεται μόνο ο αριστερός κλάδος, ενώ κατά τη δεύτερη μόνο ο δεξιός. Σκοπός της διαδικασίας αυτής ήταν η

σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δυο περιπτώσεις και συνεπώς στη συνέχεια ο έλεγχος της ορθότητας του προσομοιώματος. Στις υποενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το ζεύγος των αναλύσεων για το αριθμητικό προσομοίωμα με πλάτος πυλώνα  $W=D=10m$ , έτσι ώστε να εξετάσουμε τη μέση περίπτωση εκ των τριών που διατίθενται. Αντίστοιχα ήταν τα αποτελέσματα που προέκυψαν και για τα υπόλοιπα αριθμητικά προσομοιώματα, στα οποία διαφοροποιείται το πλάτος του πυλώνα.

### 5.5.1 Ποιοτική σύγκριση αποτελεσμάτων

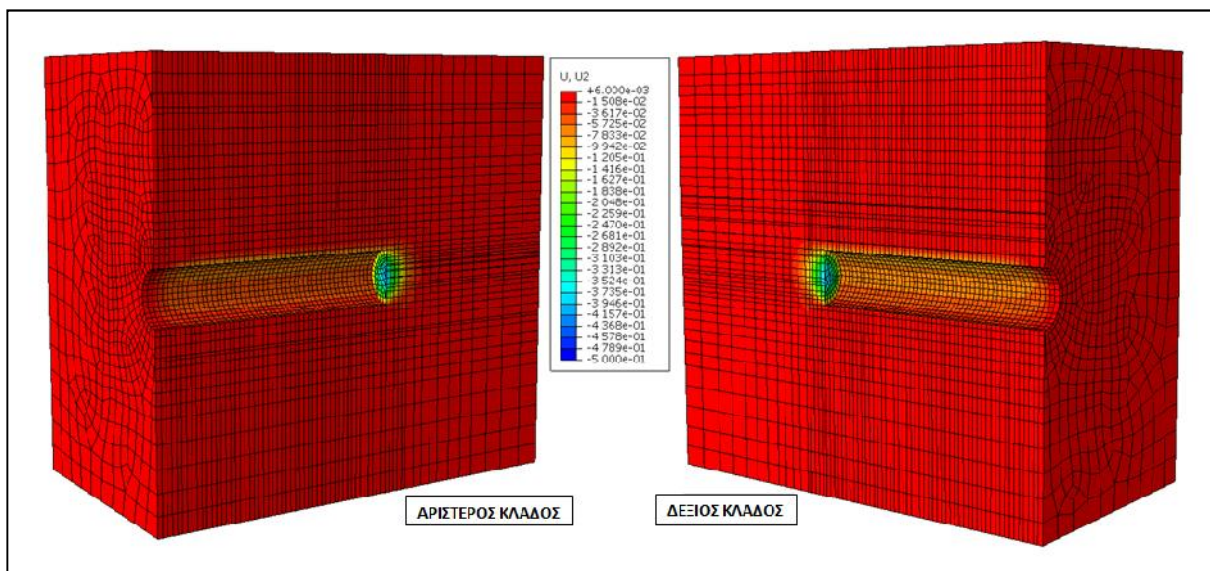
Στην παράγραφο αυτή πραγματοποιείται ποιοτική σύγκριση των αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων και των πλαστικών παραμορφώσεων για τις περιπτώσεις όπου εκσκάπτεται μόνο ο αριστερός και μόνο ο δεξιός κλάδος. Στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 5.13, Σχήμα 5.14, Σχήμα 5.15) παρουσιάζονται ενδεικτικές εικόνες από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, όπου φαίνεται η κατανομή των αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων, τόσο των μέσων όσο και των συνιστωσών  $u_2$ ,  $u_3$ .



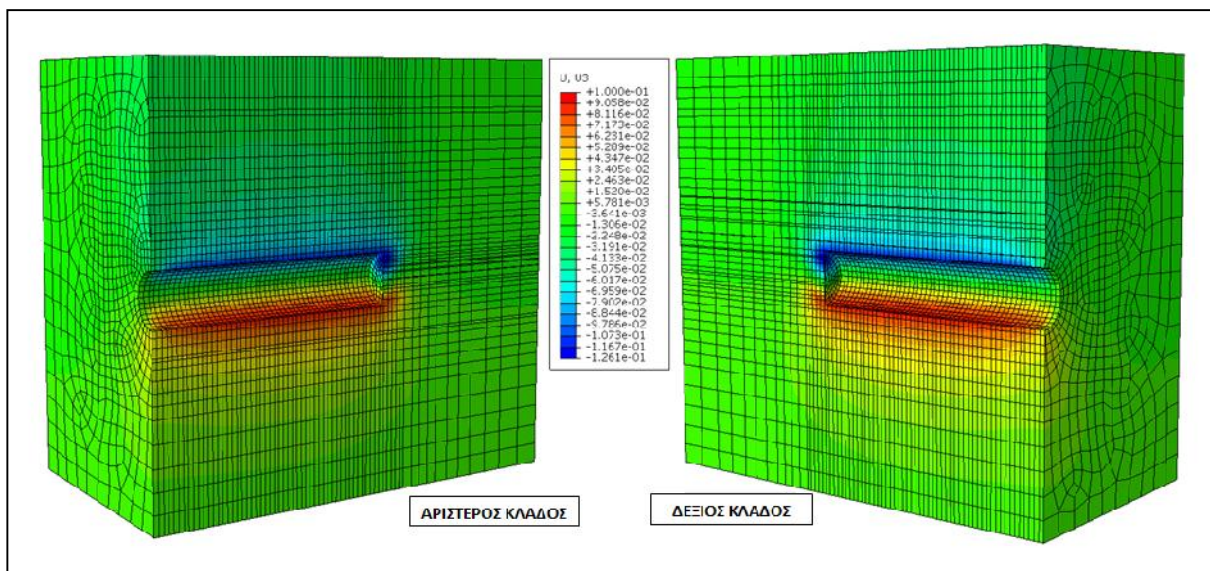
**Σχήμα 5.13 Σύγκριση των αναπτυσσόμενων μέσων μετατοπίσεων ( $umag$ ) για τους δυο κλάδους του προσομοιώματος που διαθέτει  $W=D=10m$ .**

Σημειώνεται ότι επιλέγεται να παρουσιαστούν τα τμήματα του κελύφους της σήραγγας που είναι συμμετρικά ως προς τον άξονα  $z$ , καθώς ο κάρναβος των πεπερασμένων στοιχείων είναι συμμετρικός προς τον άξονα αυτό. Συνεπώς είναι ορθότερη η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων κατ' αυτόν τον τρόπο.





Σχήμα 5.14 Σύγκριση των αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων για τους δυο κλάδους του προσομοιώματος που διαθέτει  $W=D=10m$  ( $u_2$ : συνιστώσα της μετακίνησης, οριζόντια και παράλληλη στον άξονα της σήραγγας).

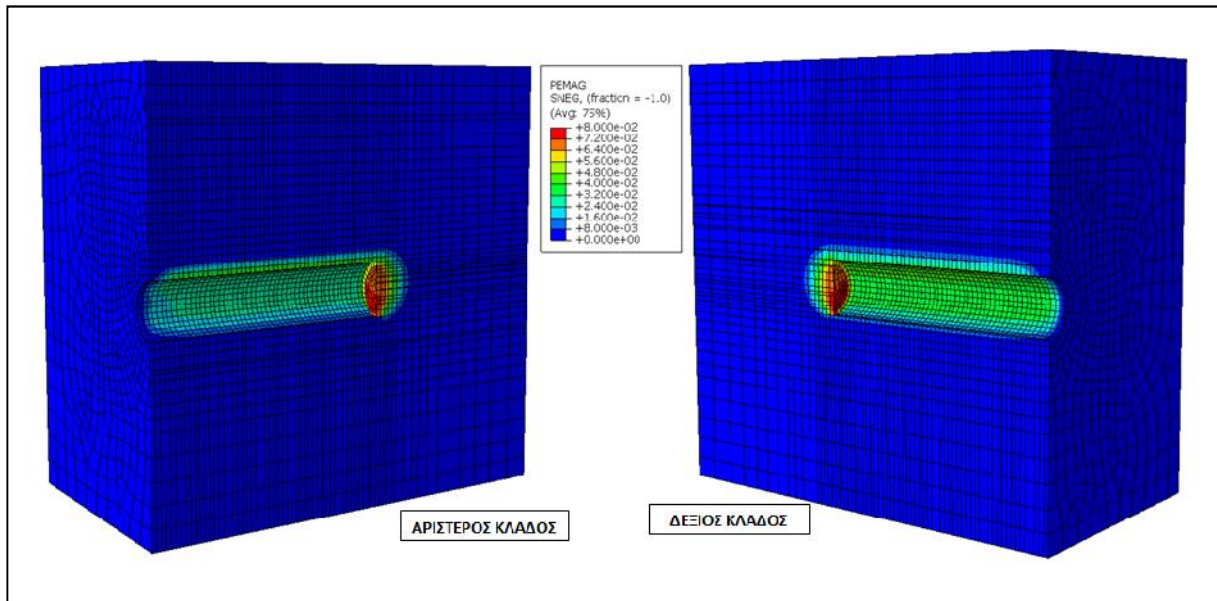


Σχήμα 5.15 Σύγκριση των αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων για τους δυο κλάδους του προσομοιώματος που διαθέτει  $W=D=10m$  ( $u_3$ : συνιστώσα της μετακίνησης, κατακόρυφη και κάθετη στον άξονα της σήραγγας).

Από την παραπάνω σύγκριση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι οι κατανομές των μετακινήσεων είναι πρακτικά όμοιες και για τις δύο περιπτώσεις, στις οποίες εκσκάπτονται μεμονωμένα ο αριστερός και ο δεξιός κλάδος.

Κατόπιν, στο Σχήμα 5.16, παρουσιάζονται οι κατανομές των πλαστικών παραμορφώσεων των δυο αριθμητικών προσομοιωμάτων. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων οδηγεί σχεδόν σε ταύτιση αυτών.

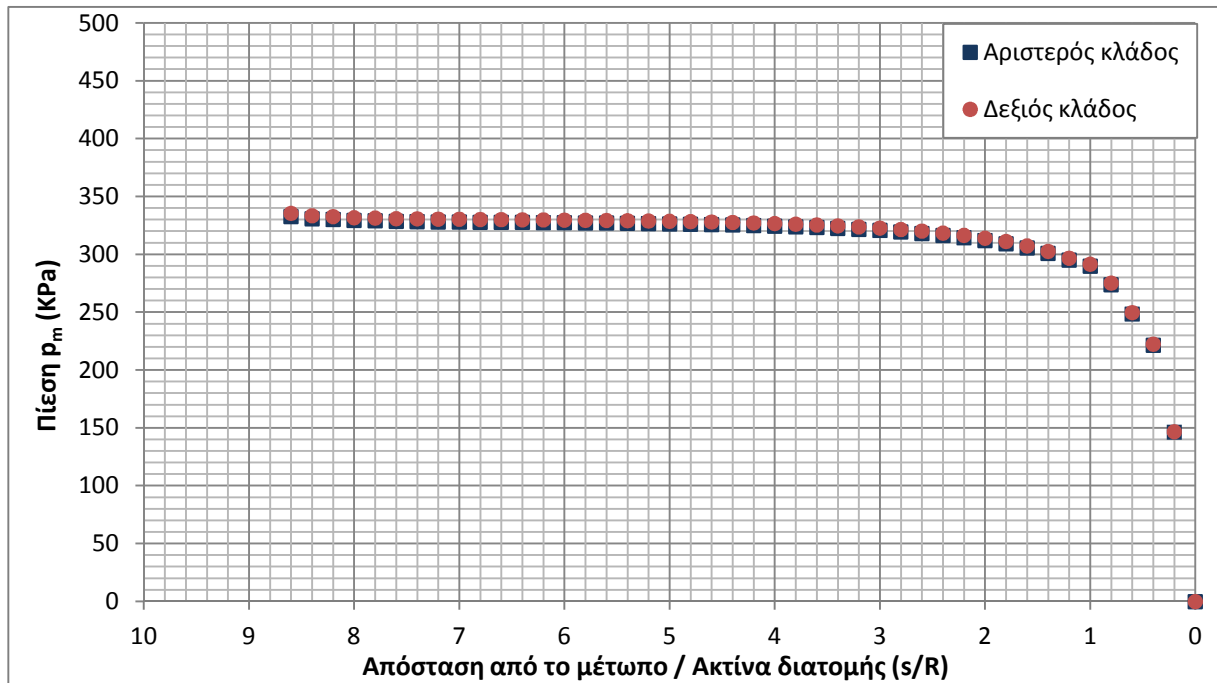




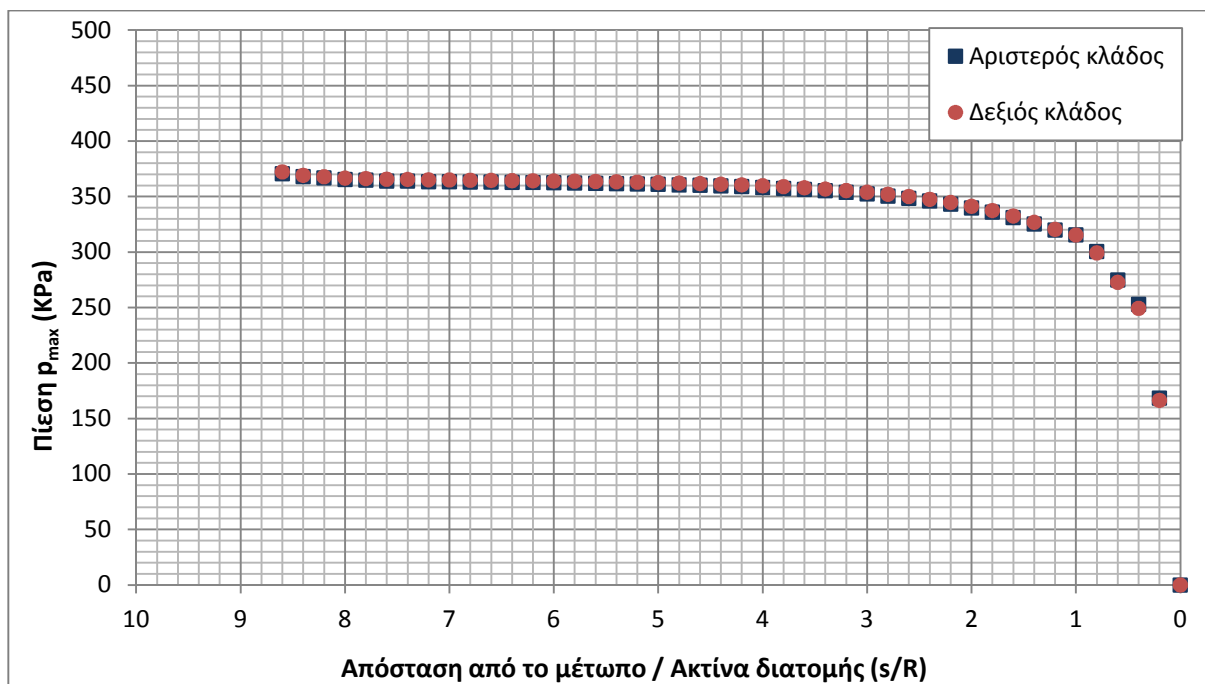
Σχήμα 5.16 Ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων για τους δυο κλάδους του προσομοιώματος που διαθέτει  $W=D=10m$ .

### 5.5.2 Ποσοτική σύγκριση αποτελεσμάτων

Στην παρούσα παράγραφο πραγματοποιείται ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων. Για το σκοπό αυτό, αρχικά παρουσιάζεται διαγραμματικά η κατανομή των μέσων και των μέγιστων πιέσεων που αναπτύσσονται σε όλο το μήκος του κελύφους της άμεσης υποστήριξης (Σχήμα 5.17, Σχήμα 5.18).



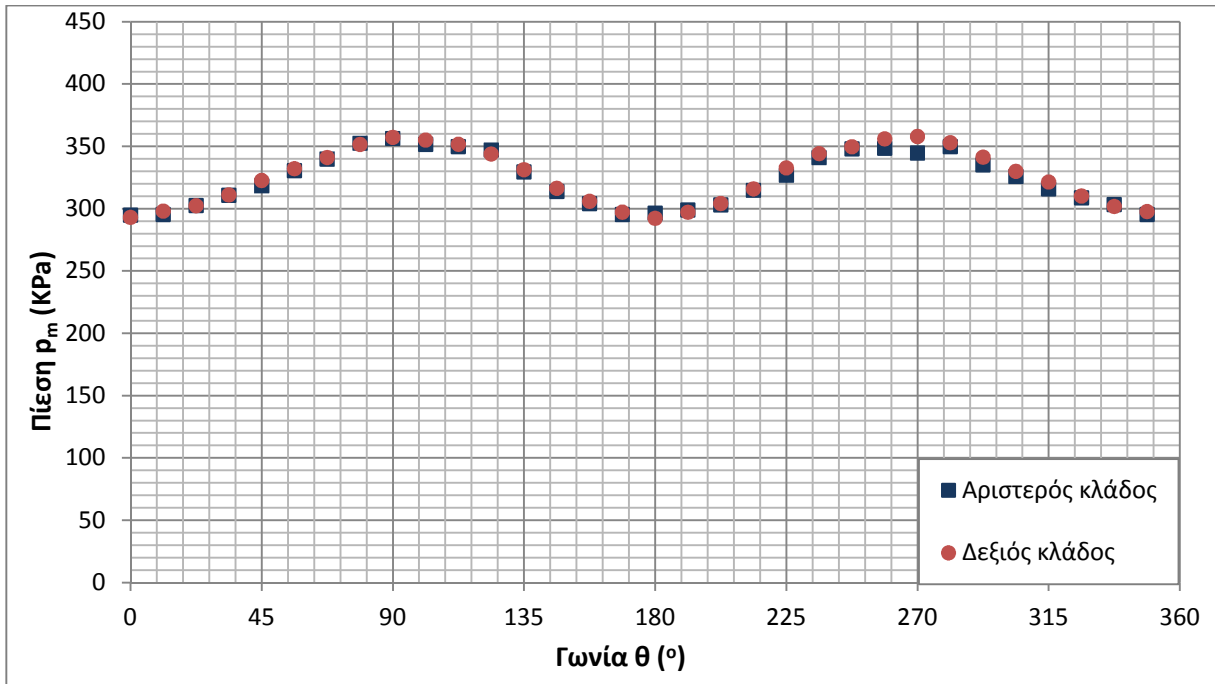
Σχήμα 5.17 Σύγκριση των αναπτυσσόμενων μέσων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, για τους δυο κλάδους του προσομοιώματος που διαθέτει  $W=D=10m$ .



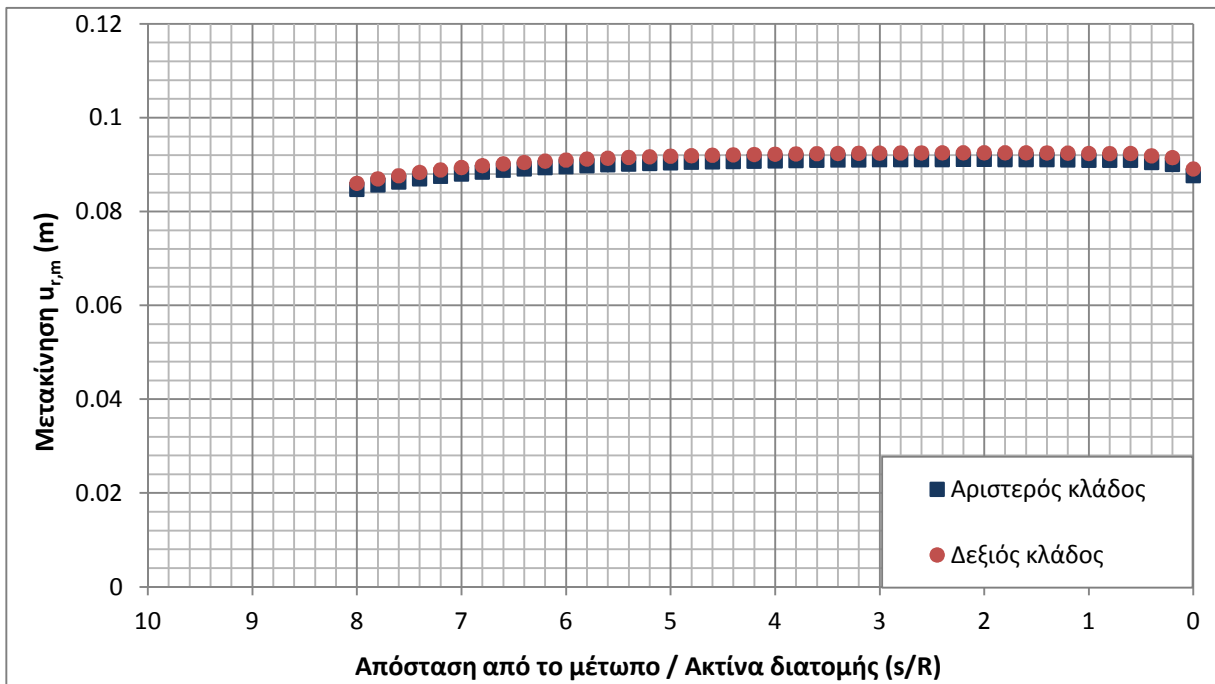
Σχήμα 5.18 Σύγκριση των αναπτυσσόμενων μεγίστων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, για τους δυο κλάδους του προσομοιώματος που διαθέτει  $W=D=10m$ .

Στη συνέχεια, για τη μελέτη της κατανομής των φορτίων εν διατομή, επιλέγουμε να εξετάσουμε τα μεγέθη της χαρακτηριστικής διατομής. Ως χαρακτηριστική διατομή λαμβάνεται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η τρίτη κατά σειρά διατομή στην οποία παρατηρείται μεταβολή των μεγεθών μικρότερη από 0.5%.

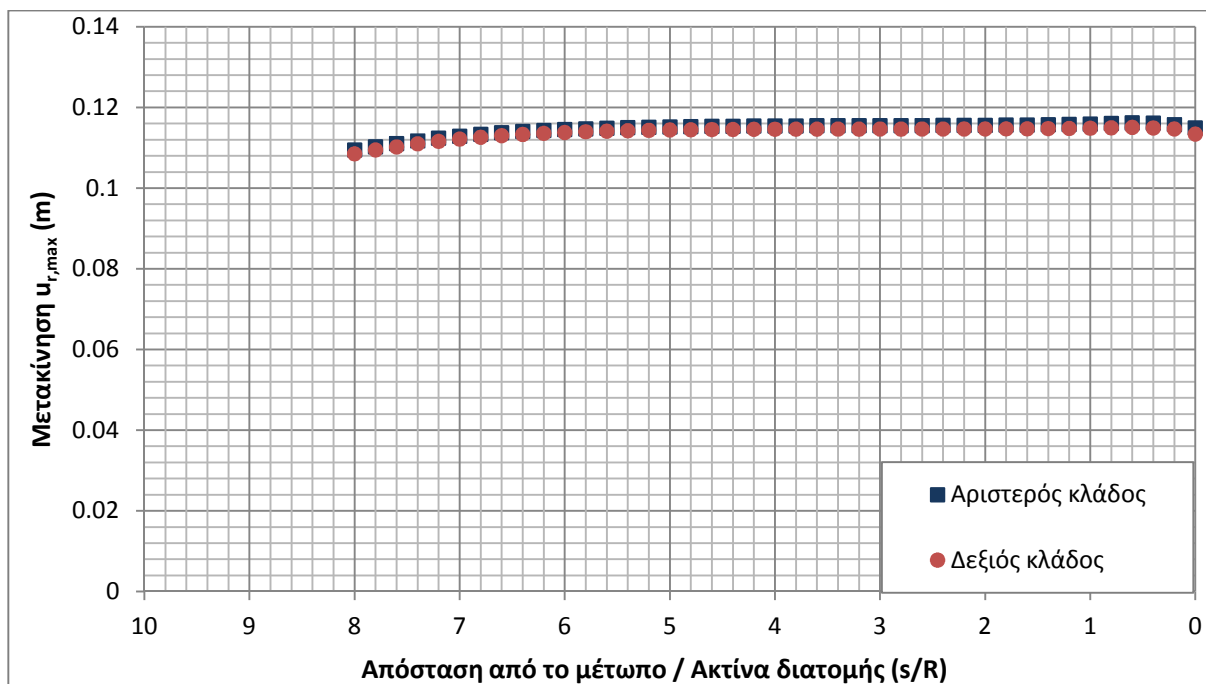
Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει μια σημαντική παρατήρηση. Η σήμανση της γωνίας  $\theta$  πραγματοποιήθηκε με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω και για τις δυο σήραγγες. Στην περίπτωση που εξετάζεται επιλέχθηκε να η σήραγγα που εκσκάπτεται πρώτη να είναι η αριστερή, συνεπώς η παρειά των  $90^\circ$  να είναι δυσμενέστερη για την πρώτη σήραγγα και κατ' επέκταση η παρειά των  $270^\circ$  να είναι η δυσμενέστερη για τη δεύτερη σήραγγα. Στην αντίθετη περίπτωση όμως (η διάνοιξη της δεξιάς σήραγγας να προηγείται της αριστερής) η παρειά των  $270^\circ$  και των  $90^\circ$  θα ήταν οι δυσμενέστερες για την πρώτη και τη δεύτερη σήραγγα αντιστοίχως. Προκειμένου λοιπόν τα αποτελέσματα να είναι απαλλαγμένα από την αλληλουχία των εκσκαφών και η σύγκριση των αποτελεσμάτων να είναι ορθή, δε θα πρέπει τα μεγέθη του αριστερού κλάδου αντιστοιχούν στις τιμές της γωνίας  $\theta$  ( $0^\circ$ - $360^\circ$ ) να συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του δεξιού, αλλά με τα αντιδιαμετρικά αυτών ( $360^\circ$ - $0^\circ$ ).



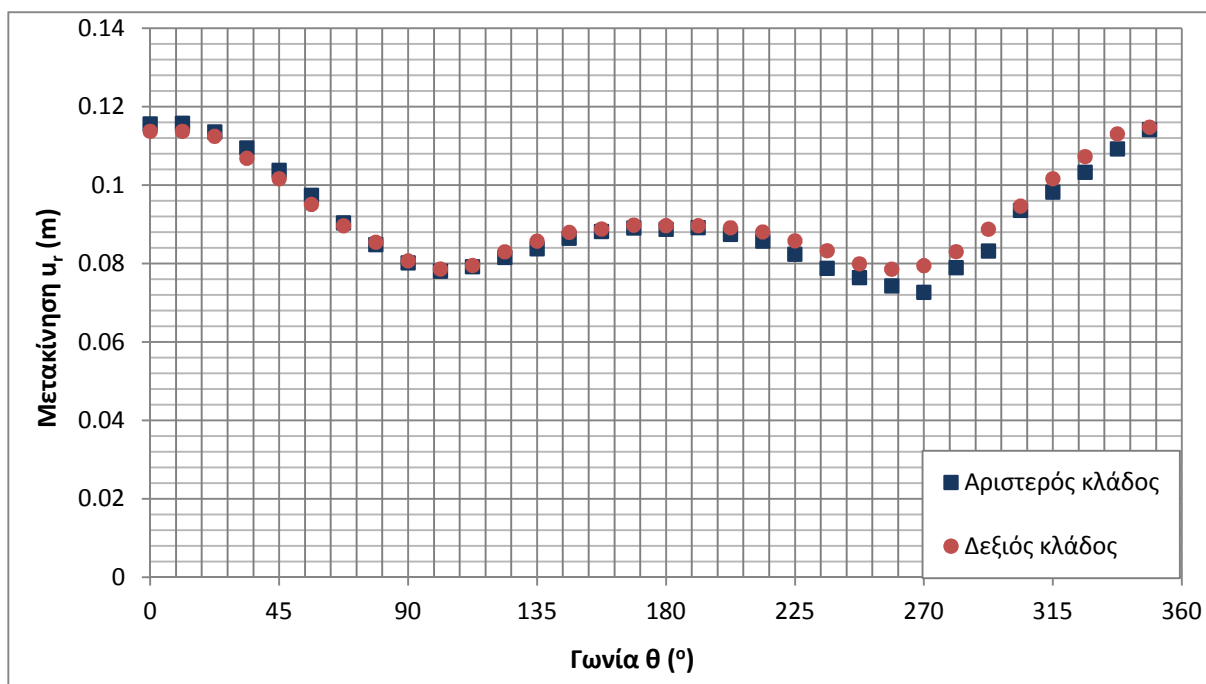
Σχήμα 5.19 Σύγκριση των αναπτυσσόμενων μέσων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, περί τη χαρακτηριστική διατομή, για τους δυο κλάδους του προσομοιώματος που διαθέτει  $W=D=10m$ .



Σχήμα 5.20 Σύγκριση των αναπτυσσόμενων μέσων μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν την εκσκαφή, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, για τους δυο κλάδους του προσομοιώματος που διαθέτει  $W=D=10m$ .



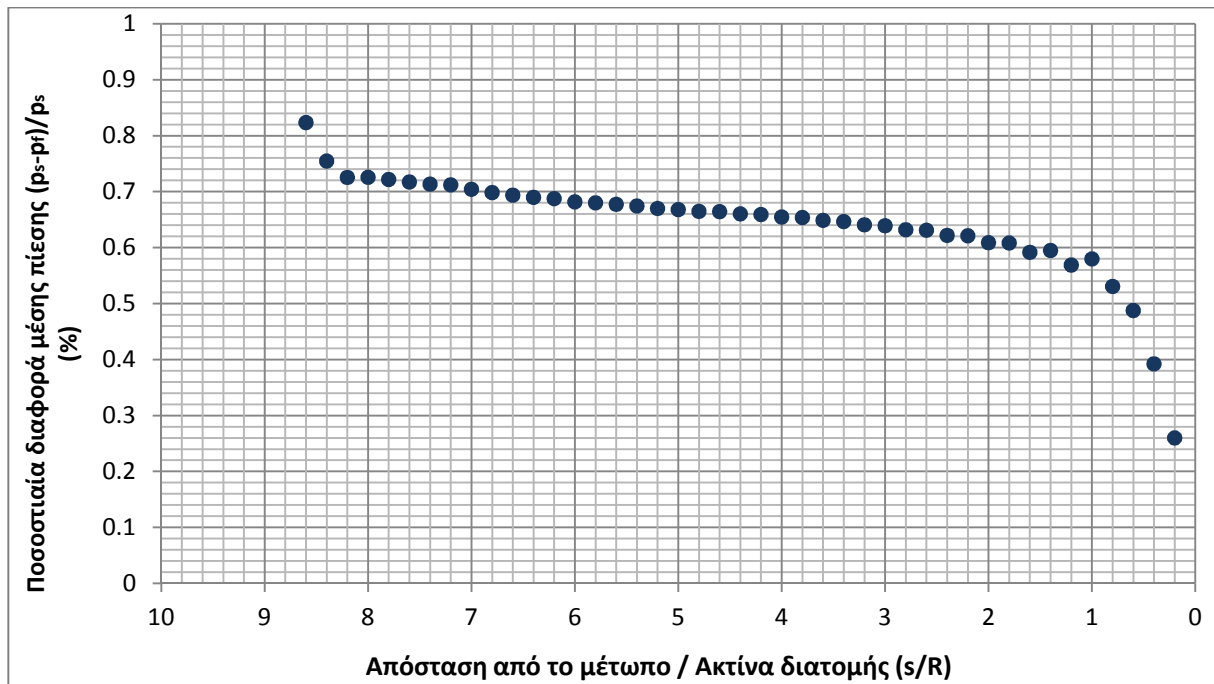
Σχήμα 5.21 Σύγκριση των αναπτυσσόμενων μεγίστων μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν την εκσκαφή, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, για τους δυο κλάδους του προσομοιώματος που διαθέτει  $W=D=10m$ .



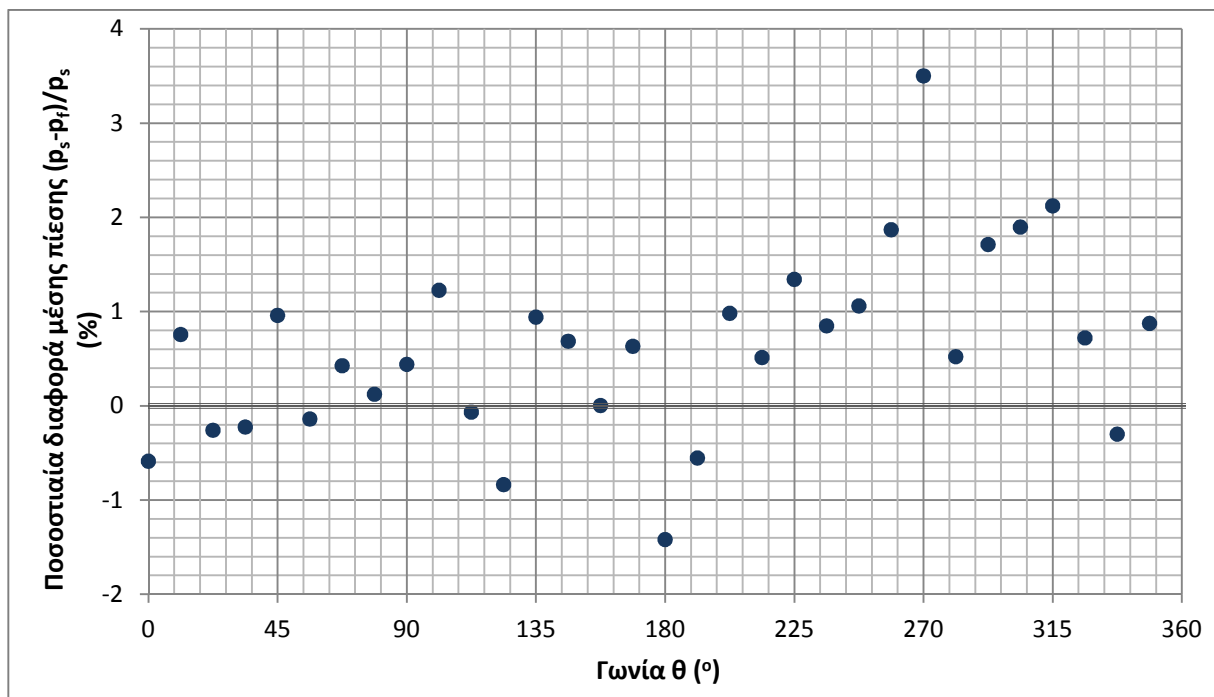
Σχήμα 5.22 Σύγκριση των αναπτυσσόμενων μέσων μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν την εκσκαφή, περί τη χαρακτηριστική διατομή, για τους δυο κλάδους του προσομοιώματος που διαθέτει  $W=D=10m$ .

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει πρακτικά πλήρης ταύτιση των αποτελεσμάτων και για τις δυο περιπτώσεις, γεγονός που επιβεβαιώνει την θεώρηση συμμετρικού καννάβου.

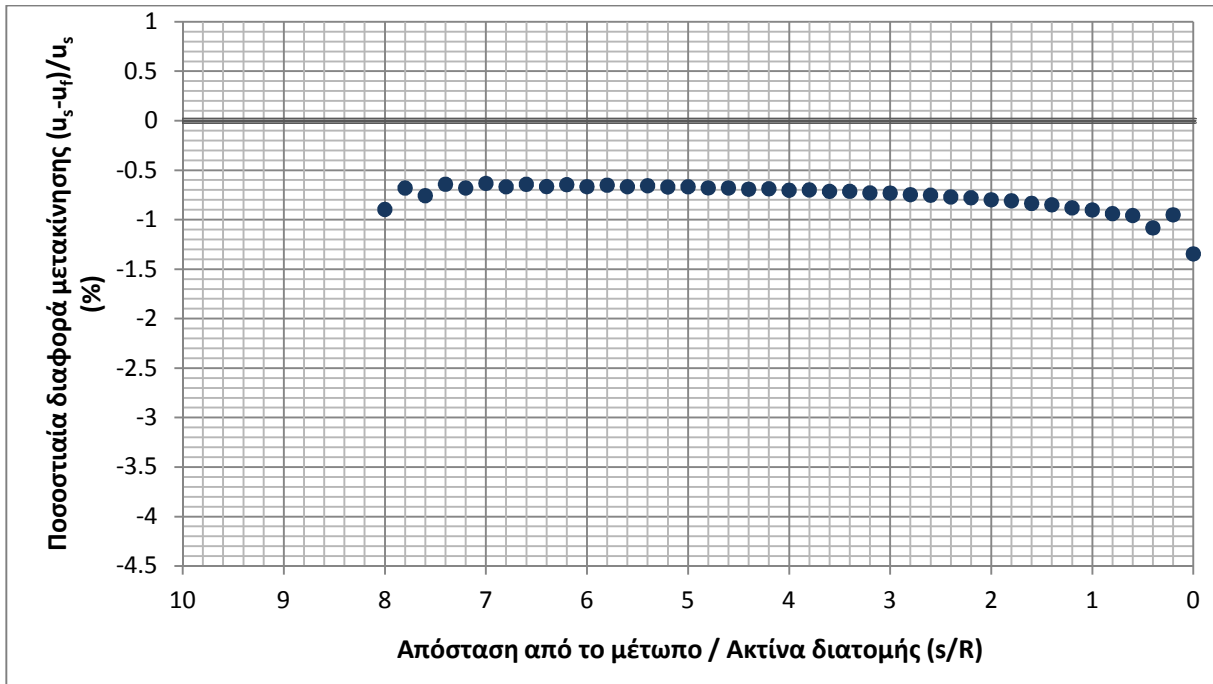
Στα επόμενα, παρουσιάζονται η κατανομές της ποσοστιαίας διαφοράς των αναπτυσσόμενων πιέσεων και μετακινήσεων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάνοιξη, τόσο κατά το μήκος διάνοιξης όσο και περί τη χαρακτηριστική διατομή.



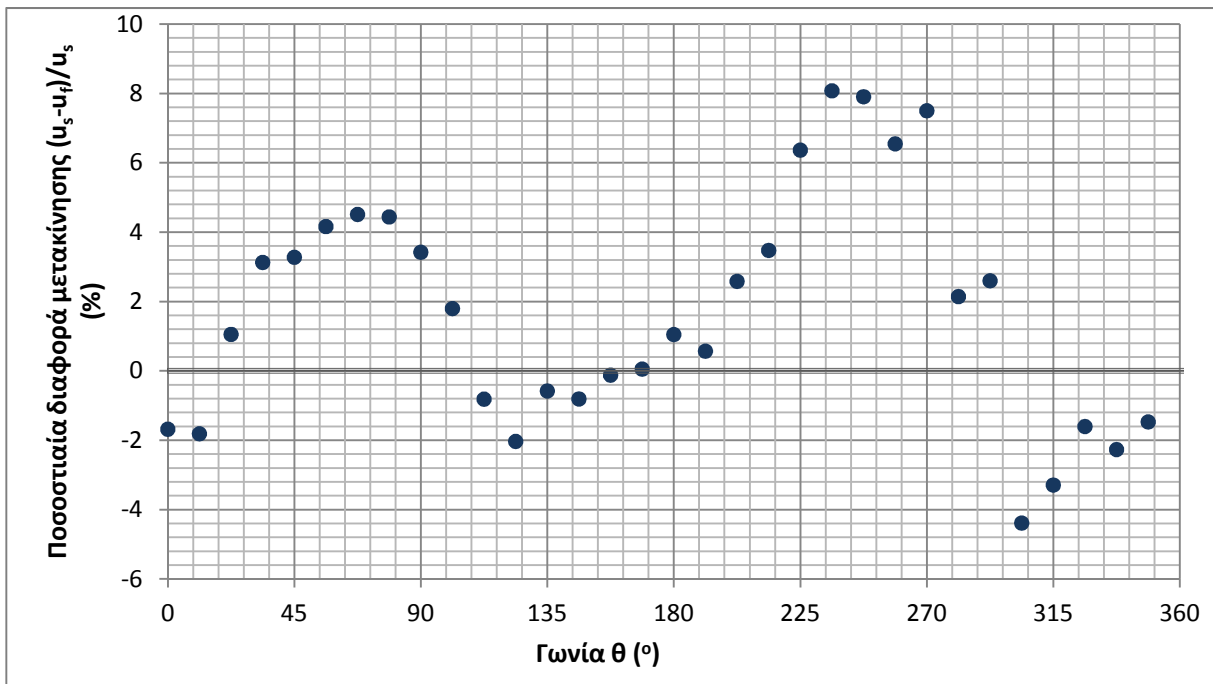
Σχήμα 5.23 Κατανομή της ποσοστιαίας διαφοράς των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, για τους δυο κλάδους του προσομοιώματος που διαθέτει  $W=D=10m$ . Στην περιοχή ενδιαφέροντος η μέγιστη ποσοστιαία διαφορά είναι περίπου ίση με 0.8%.



Σχήμα 5.24 Κατανομή της ποσοστιαίας διαφοράς των αναπτυσσόμενων πιέσεων, περί τη χαρακτηριστική διατομή, για τους δυο κλάδους του προσομοιώματος που διαθέτει  $W=D=10m$ . Στην περιοχή ενδιαφέροντος η μέγιστη ποσοστιαία διαφορά είναι περίπου ίση με 3.5%.



Σχήμα 5.25 Κατανομή της ποσοστιαίας διαφοράς των αναπτυσσόμενων μέσων μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν την εκσκαφή, περί τη χαρακτηριστική διατομή, για τους δυο κλάδους του προσομοιώματος που διαθέτει  $W=D=10m$ . Στην περιοχή ενδιαφέροντος η μέγιστη ποσοστιαία διαφορά είναι περίπου ίση με 4%.

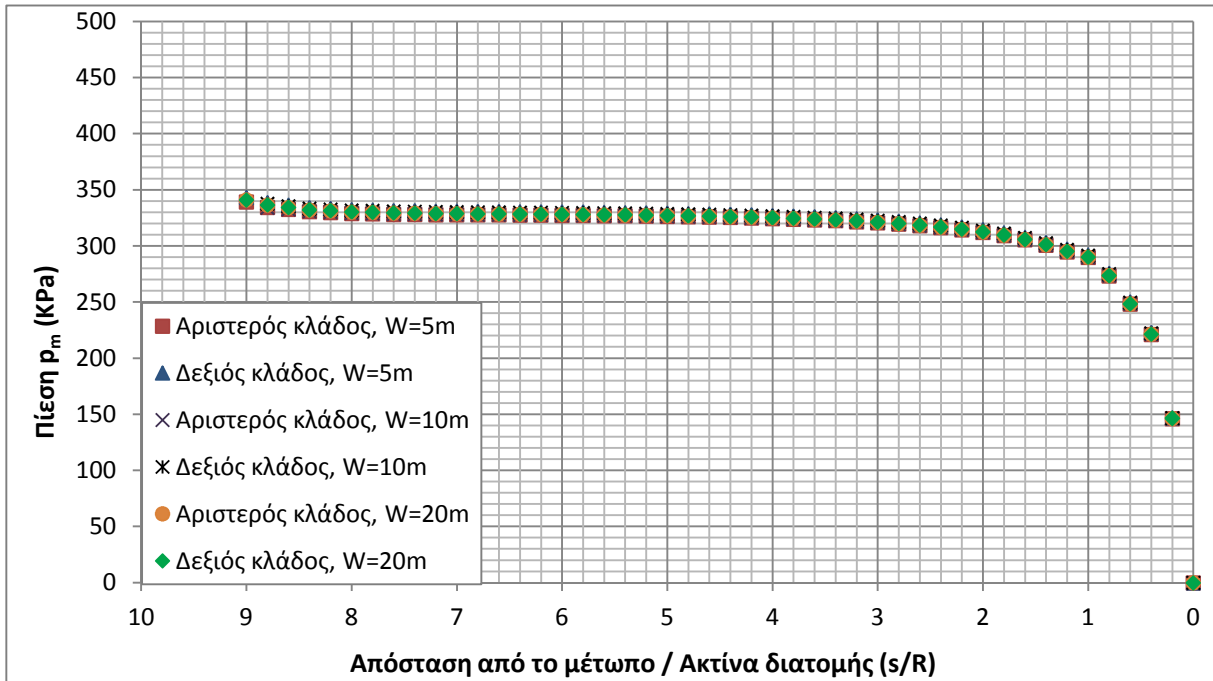


Σχήμα 5.26 Κατανομή της ποσοστιαίας διαφοράς των αναπτυσσόμενων μέσων μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν την εκσκαφή, περί τη χαρακτηριστική διατομή, για τους δυο κλάδους του προσομοιώματος που διαθέτει  $W=D=10m$ . Στην περιοχή ενδιαφέροντος η μέγιστη ποσοστιαία διαφορά είναι περίπου ίση με 8%.

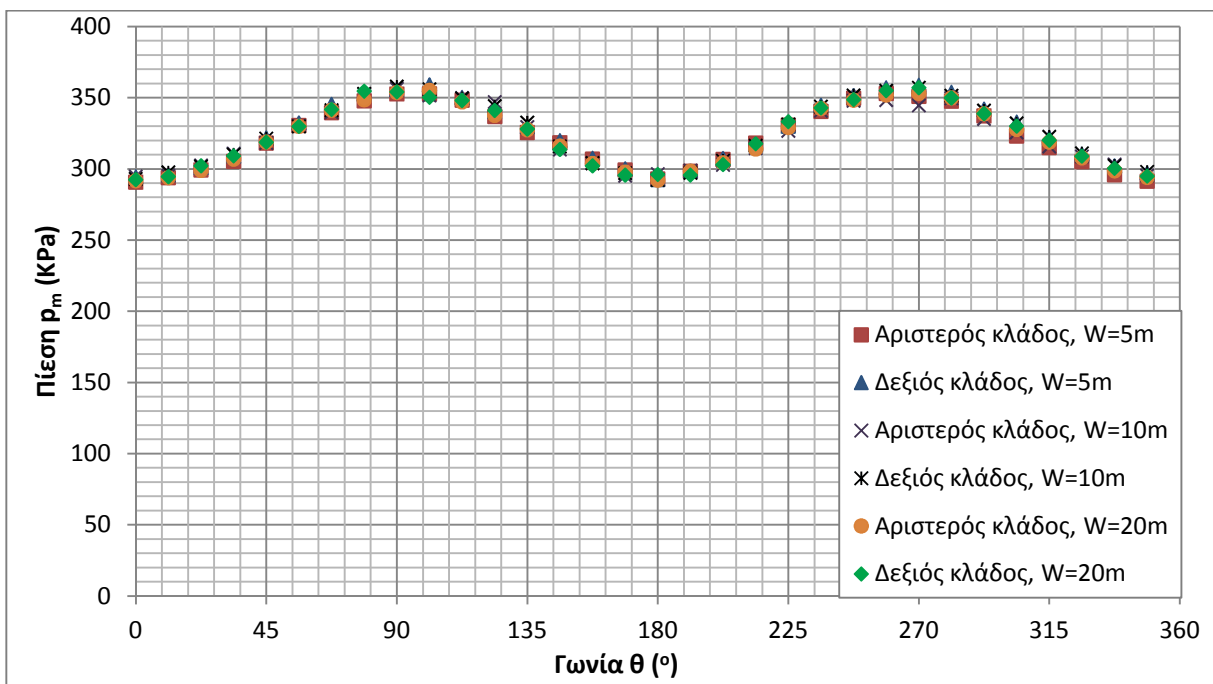
Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της ενότητας, τα παραπάνω διαγράμματα αναφέρονται στο αριθμητικό προσομοίωμα το οποίο κατασκευάστηκε έτσι ώστε να διαθέτει πλάτος πυλώνα ίσο με 10m. Ανάλογες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν και για τα υπόλοιπα προσομοιώματα. Προκειμένου να αποκτήσουμε μια εποπτεία των αποτελεσμάτων, στα διαγράμματα που ακολουθούν

παρουσιάζονται συνολικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις αυτές και για τα τρία αριθμητικά προσομοιώματα.

Σε αντιστοιχία με τα προηγούμενα διαγράμματα, αυτά που ακολουθούν απεικονίζουν την κατανομή των αναπτυσσόμενων πιέσεων και μετατοπίσεων για την μεμονωμένη εκσκαφή κάθε κλάδου της δίδυμης σήραγγας ξεχωριστά, και για τα τρία αριθμητικά προσομοιώματα.

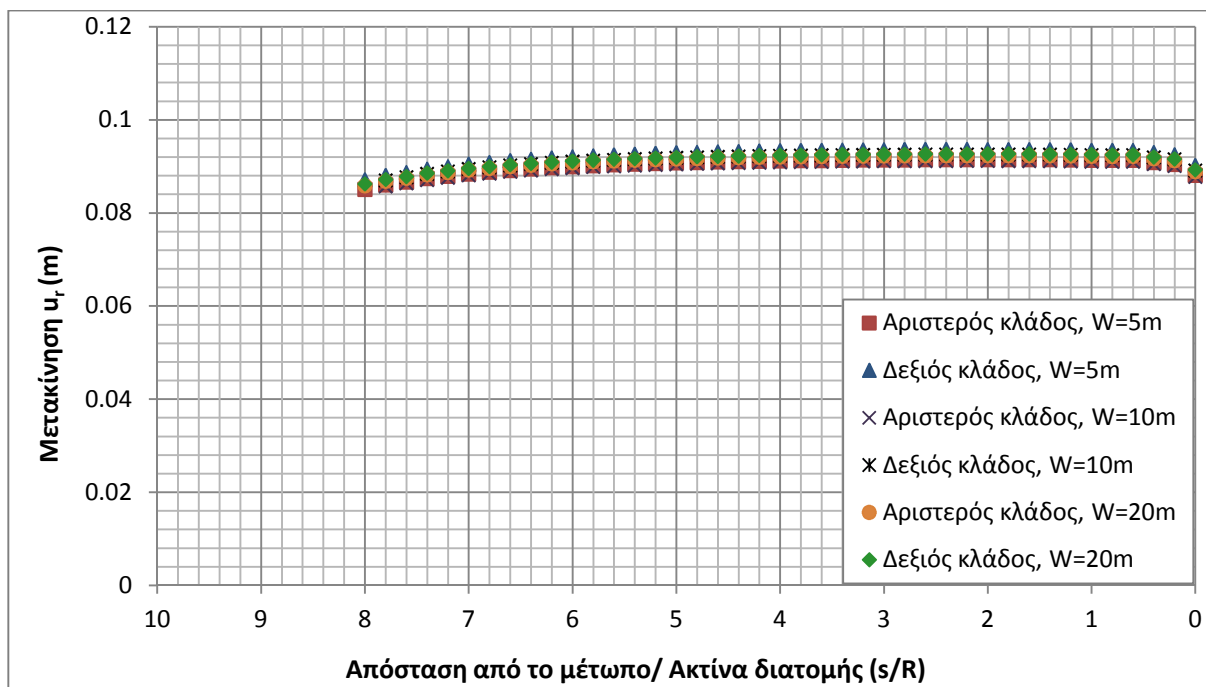


Σχήμα 5.27 Σύγκριση των μέσων αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, για τους δυο κλάδους των τριών διαφορετικών προσομοιωμάτων.

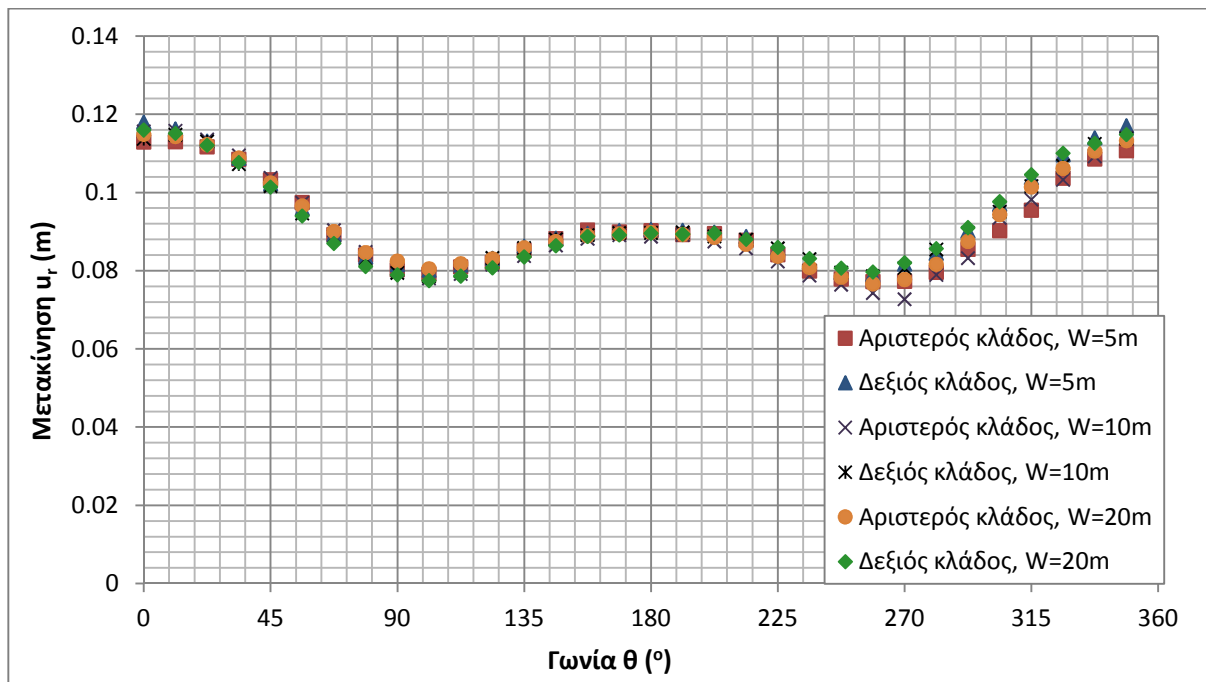


Σχήμα 5.28 Σύγκριση των μέσων αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, περί τη χαρακτηριστική διατομή, για τους δυο κλάδους των τριών διαφορετικών προσομοιωμάτων.





Σχήμα 5.29 Σύγκριση των αναπτυσσόμενων μέσων μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν την εκσκαφή, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, για τους δυο κλάδους των τριών διαφορετικών προσομοιωμάτων.



Σχήμα 5.30 Σύγκριση των αναπτυσσόμενων μέσων μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν την εκσκαφή, περί τη χαρακτηριστική διατομή, για τους δυο κλάδους των τριών διαφορετικών προσομοιωμάτων.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των αναλύσεων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, διαπιστώνουμε ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι αρκετά ικανοποιητική, καθώς οι κατανομές των φορτίσεων όλων των κλάδων, όλων των προσομοιωμάτων σχεδόν ταυτίζονται. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι η πυκνότητα του καννάβου που επιλέχθηκε είναι ικανή να δώσει

αξιόπιστα αποτελέσματα, για τα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Προφανές είναι ότι η ακρίβεια των αναλύσεων μπορεί να βελτιώνεται συνεχώς αυξάνοντας, ωστόσο, τον υπολογιστικό χρόνο.

## 6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

---

Έχοντας περιγράψει στο κεφάλαιο που προηγήθηκε τη διαδικασία και τα βήματα που ακολουθήθηκαν προκειμένου να σχεδιαστεί το αριθμητικό προσομοίωμα, σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν. Σε πρώτο επίπεδο, σκοπός των αναλύσεων είναι η κατανόηση του μηχανισμού εξέλιξης των φορτίσεων και συγκεκριμένα των πιέσεων που αναπτύσσονται επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, καθώς και του μηχανισμού εξέλιξης των μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τις εκσκαφές, κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της δίδυμης σήραγγας. Στη συνέχεια, επιδιώκεται να εξαχθούν κάποια πρωτογενή συμπεράσματα αναφορικά με το φαινόμενο της επίδρασης της μεταβολής των γεωτεχνικών συνθηκών, του πλάτους του πυλώνα και του μέτρου ελαστικότητας στην εξέλιξη των μεγεθών αυτών.

Η επεξήγηση του ρόλου της κάθε παραμέτρου βασίζεται στην παρουσίαση εξαγόμενων από των κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS εικόνων, έτσι ώστε να είναι αντιληπτή η κατανομή των μεγεθών στο χώρο, στην παρουσίαση διαγραμμάτων κατανομής πιέσεων και μετακινήσεων κατά το μήκος της διάνοιξης αλλά και περί τη χαρακτηριστική διατομή και, τέλος, σε συνολικά διαγράμματα μεταβολής των πιέσεων και των μετακινήσεων ως προς τις γεωμετρικές και γεωτεχνικές παραμέτρους του προβλήματος.

Επισημαίνεται ότι εξαιτίας του μεγάλου εύρους των παραμέτρων δεν είναι δυνατό να παρουσιαστούν εικόνες και διαγράμματα για όλες τις περιπτώσεις, συνεπώς η επιλογή γίνεται έτσι ώστε να δοθεί μια αντιπροσωπευτική εικόνα στο πλαίσιο του κεφαλαίου.

### 6.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ

---

Στην παράγραφο αυτή επιχειρείται η κατανόηση του μηχανισμού εξέλιξης των αναπτυσσόμενων πιέσεων και των μετακινήσεων κατά τη διάρκεια της διαδοχικής εκσκαφής των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας. Για το σκοπό αυτό αρχικά παρουσιάζονται, τόσο κατά μήκος της εκσκαφής όσο και περί τη χαρακτηριστική διατομή, οι κατανομές των μεγεθών όπως έχουν διαμορφωθεί στο τέλος της εκσκαφής των δυο κλάδων. Έπειτα, επιλέγεται μια τυχαία διατομή και μελετάται η εξέλιξη των μεγεθών σε κάθε βήμα της εκσκαφής.

Οι εικόνες και τα διαγράμματα που επιλέχθηκε να παρουσιαστούν αντιστοιχούν σε ανάλυση η οποία διαθέτει πλάτος πυλώνα ίσο 5m. Οι γεωτεχνικές συνθήκες αυτής είναι γενικά δυσμενείς, καθώς οι υπόλοιπες αναλύσεις έδωσαν αντίστοιχα ή ευμενέστερα αποτελέσματα.

**Πίνακας 6.1 Τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων μιας αντιπροσωπευτικής ανάλυσης για  $W=0.5D=5m$ .**

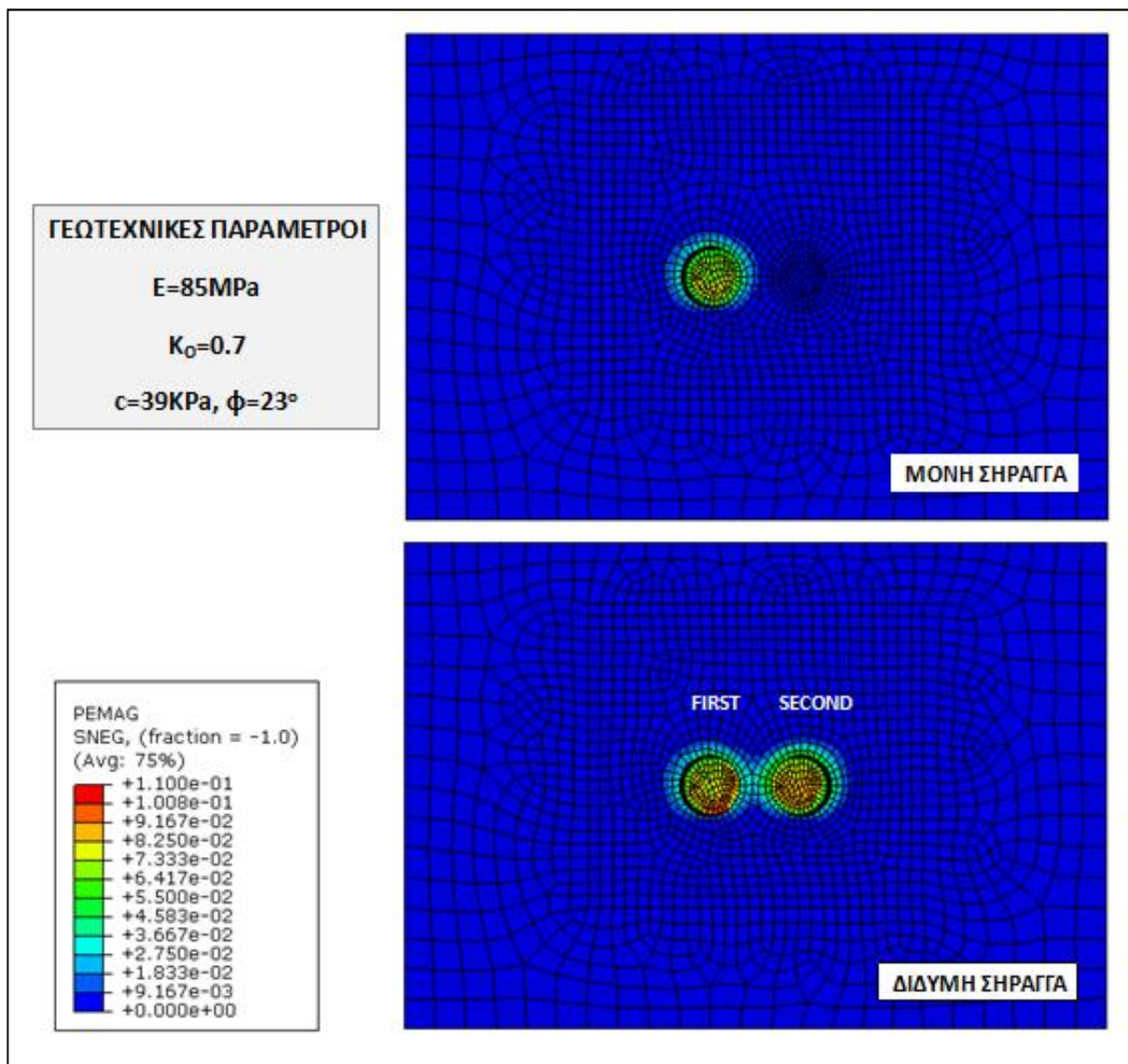
Γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI	10
Ισοδύναμη συνοχή $c$ (KPa)	39
Ισοδύναμη γωνία τριβής $\phi$ (°)	23
Μέτρο ελαστικότητας $E$ (MPa)	85
$\sigma_{cm}/\rho_o$	0.37
$\sigma_c/\rho_o$	0.12

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

Στην ενότητα αυτή επιχειρείται η κατανόηση των κατανομών των αναπτυσσόμενων πιέσεων και μετακινήσεων, όπως διαμορφώνονται μετά το πέρας της εκσκαφής, με την παρουσίαση σχετικών εικόνων και διαγραμμάτων, ενώ παράλληλα κρίνεται σκόπιμη η ποσοτική σύγκριση των μεγεθών αυτών με τα αντίστοιχα που αναπτύσσονται κατά την εκσκαφή σήραγγας μονού κλάδου. Για το σκοπό αυτό τοποθετούνται σε κοινά διαγράμματα οι κατανομές που αντιστοιχούν στον πρώτο κλάδο, στον δεύτερο κλάδο, καθώς και στην περίπτωση μονής σήραγγας σε ίδιες γεωτεχνικές συνθήκες.

Αρχικά παρουσιάζεται ποιοτικά η κατανομή των εξεταζόμενων μεγεθών με τη βοήθεια εικόνων που ελήφθησαν από το χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Στα σχήματα που ακολουθούν εμφανίζονται οι κατανομές των πλαστικών παραμορφώσεων, των συνολικών μετακινήσεων καθώς και της συνιστώσας των κατακόρυφων μετακινήσεων ( $u_3$ ) που αναπτύσσονται περί τη χαρακτηριστική διατομή. Για κάθε ένα από τα μεγέθη, στο πρώτο σχήμα απεικονίζεται η κατανομή του για την περίπτωση εκσκαφής σήραγγας μονού κλάδου (single), ενώ στο δεύτερο για την περίπτωση εκσκαφής δίδυμης σήραγγας.

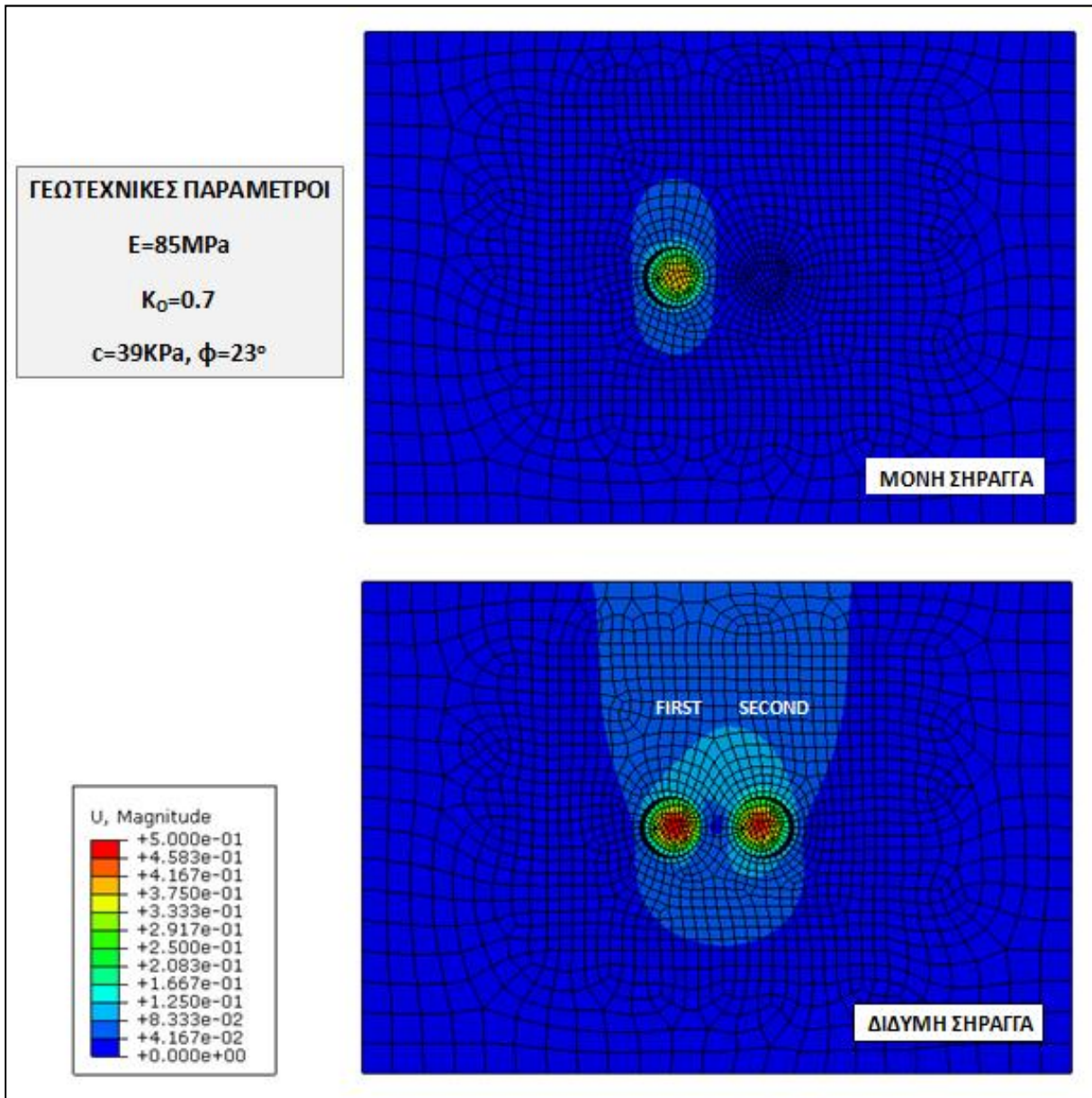
Στο Σχήμα 6.1 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων. Για τη δίδυμη σήραγγα, διαπιστώνουμε ότι οι δυο κλάδοι αλληλεπιδρούν, καθώς οι πλαστικές ζώνες που αναπτύσσονται περί των διατομών των δυο κλάδων αλληλεπικαλύπτονται. Ουσιαστικά έχει επέλθει πλήρης πλαστικοποίησης του ενδιάμεσου πυλώνα. Επιπρόσθετα, εξετάζοντας μεμονωμένα τον πρώτο ή τον δεύτερο κλάδο της δίδυμης σήραγγας, είναι εμφανές ότι η πλαστική ζώνη που αναπτύσσεται ύστερα από την ολοκλήρωση της εκσκαφής είναι πιο εκτεταμένη σε σχέση με αυτή που θα αναπτυσσόταν στην περίπτωση εκσκαφής σήραγγας μονού κλάδου. Συνεπώς διαπιστώνεται η έντονη αλληλεπίδραση των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας.



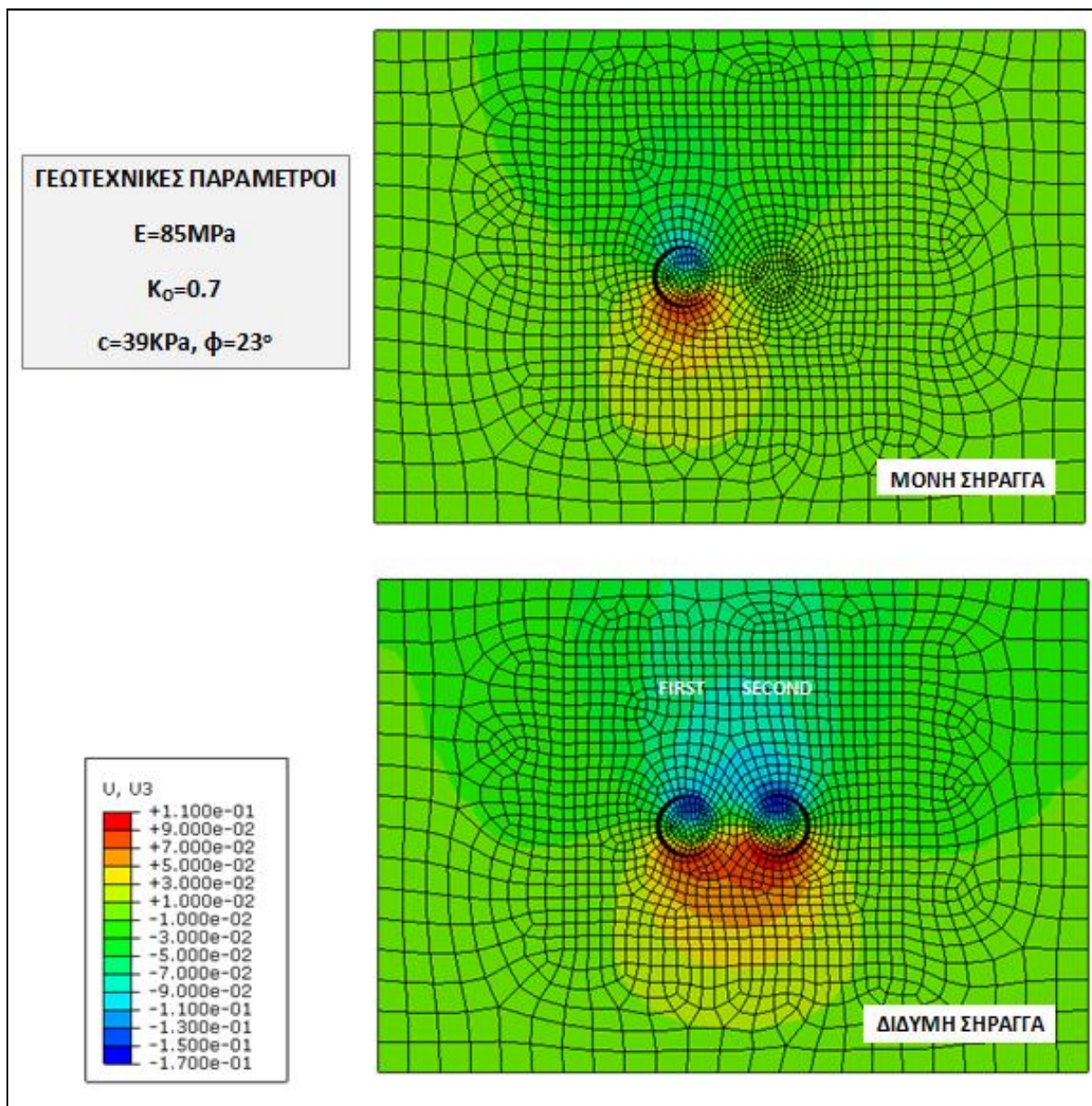
Σχήμα 6.1 Παρουσίαση των αναπτυσσόμενων πλαστικών παραμορφώσεων, περί τη χαρακτηριστική διατομή: α) Για την περίπτωση διάνοιξης σήραγγας μονού κλάδου, β) Για την περίπτωση διάνοιξης δίδυμης σήραγγας, για  $W=0.5D=5\text{m}$  (τομή αριθμητικού προσομοιώματος εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας,  $\gamma=33\text{m}$ ).

Εξετάζοντας το Σχήμα 6.2 και στη συνέχεια το Σχήμα 6.3, διαπιστώνεται για ακόμα μια φορά η σημαντική αλληλεπίδραση των δυο κλάδων. Σημειώνεται ότι ενώ για την περίπτωση της μονής σήραγγας οι κατανομές των μετακινήσεων είναι συμμετρικές, για την περίπτωση της δίδυμης σήραγγας η συμμετρία των κατανομών καταργείται. Επιπλέον, παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση τόσο των τιμών όσο και των μορφών των κατανομών για τις δυο περιπτώσεις. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι μετακινήσεις των εδαφικών στοιχείων της οροφής των δυο σηράγγων είναι πιο εκτεταμένες σε σχέση με τα υπόλοιπα στοιχεία που περιβάλλουν την εκσκαφή, καθώς ο συντελεστής οριζοντίων τάσεων είναι μικρότερος της μονάδας ( $K=0.7$ ). Στο τμήμα αυτό οι κατανομές των δυο κλάδων αλληλεπικαλύπτονται και έτσι σχηματίζεται ένας «θόλος» εδαφικών στοιχείων που είναι πιο έντονα καταπονημένα σε σχέση με τα υπόλοιπα.





Σχήμα 6.2 Παρουσίαση των αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων των εδαφικών στοιχείων, περί τη χαρακτηριστική διατομή: α) Για την περίπτωση διάνοιξης σήραγγας μονού κλάδου, β) Για την περίπτωση διάνοιξης δίδυμης σήραγγας, για  $W=0.5D=5\text{m}$  (τομή αριθμητικού προσομοιώματος εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας,  $\gamma=45\text{m}$ ).



**Σχήμα 6.3** Παρουσίαση των αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων, περί τη χαρακτηριστική διατομή: α) Για την περίπτωση διάνοιξης σήραγγας μονού κλάδου, β) Για την περίπτωση δίδυμης σήραγγας, για  $W=0.5D=5m$  (τομή αριθμητικού προσομοιώματος εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας,  $\gamma=45m$ ).

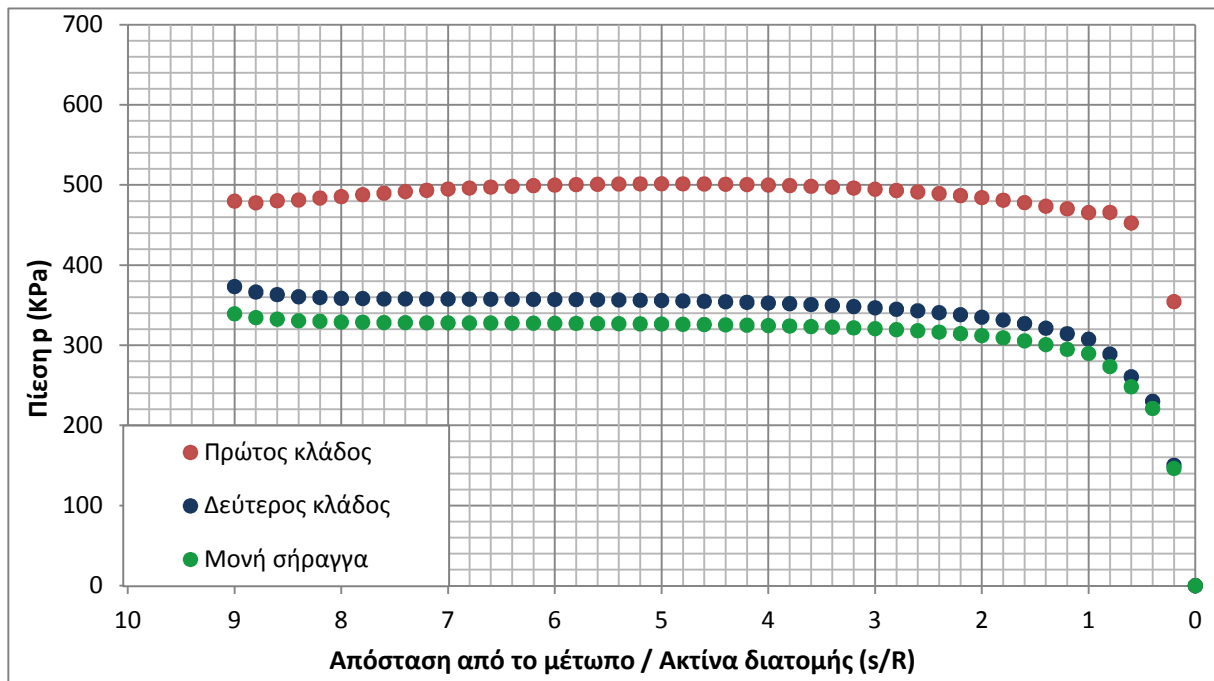
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι κατανομές, κατά το μήκος της διάνοιξης, των μέσων πιέσεων που ασκούνται επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης και των μέσων μετακινήσεων (υπενθυμίζεται ότι λαμβάνεται η συνισταμένη  $u_r$  των  $u_1$  και  $u_2$ ) των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν το κέλυφος, για τον κλάδο μονής σήραγγας αλλά και για τους δυο κλάδους της δίδυμης σήραγγας. Για κάθε μέγεθος από αυτά παρουσιάζονται επιπρόσθετα και οι κατανομές περί τη χαρακτηριστική διατομή της εκσκαφής.

Μελετώντας το Σχήμα 6.4, διαπιστώνουμε ότι οι πιέσεις επί των κελυφών της άμεσης υποστήριξης αυξάνονται σταδιακά μέχρι τη χαρακτηριστική διατομή του κάθε κλάδου, όπου και σταθεροποιούνται. Σημειώνεται ότι οι τιμές των πιέσεων που αντιστοιχούν στα πρώτα μέτρα της



εκσκαφής δεν παρουσιάζονται στο διάγραμμα, καθώς αποκλίνουν αρκετά από την πραγματικότητα εξαιτίας της επίδρασης των συνοριακών συνθηκών.

Παρατηρείται ότι οι πιέσεις που αναπτύσσονται επί των κελυφών της άμεσης υποστήριξης των κλάδων της δίδυμης σήραγγας είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές της σήραγγας μονού κλάδου, όπως ήταν αναμενόμενο. Διαπιστώνεται επίσης, ότι οι πιέσεις που αναπτύσσονται επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου της δίδυμης σήραγγας είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες που ασκούνται στο κέλυφος του δεύτερου. Το φαινόμενο αυτό είναι εύλογο, καθώς κατά την εκσκαφή του δεύτερου κλάδου έχει ήδη τοποθετηθεί η άμεση υποστήριξη σε όλο το μήκος του πρώτου. Συνεπώς, όπως είναι λογικό, κατά την εκσκαφή του δεύτερου κλάδου τα στοιχεία που περιβάλλουν τον πρώτο τείνουν να μετακινηθούν. Κατ' επέκταση, το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης που αποτελείται από εκτοξευμένο σκυρόδεμα τείνει και αυτό να παραμορφωθεί, αφού οι δυο εκατέρωθεν πλευρές της διεπιφάνειας εδαφικού υλικού - κελύφους άμεσης υποστήριξης θεωρήθηκαν δεσμευμένες μεταξύ τους. Καθώς όμως το κέλυφος της υποστήριξης είναι κυκλικό και αποτελείται από ελαστικό υλικό, αντιστέκεται λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας του στην παραμόρφωση με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε αύξηση των πιέσεων γύρω από αυτό.



**Σχήμα 6.4 Σύγκριση, κατά το μήκος διάνοιξης, των πιέσεων που αναπτύσσονται επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου της δίδυμης σήραγγας ( $W=0.5D=5m$ ), του δεύτερου κλάδου αυτής, καθώς και της σήραγγας μονού κλάδου.**

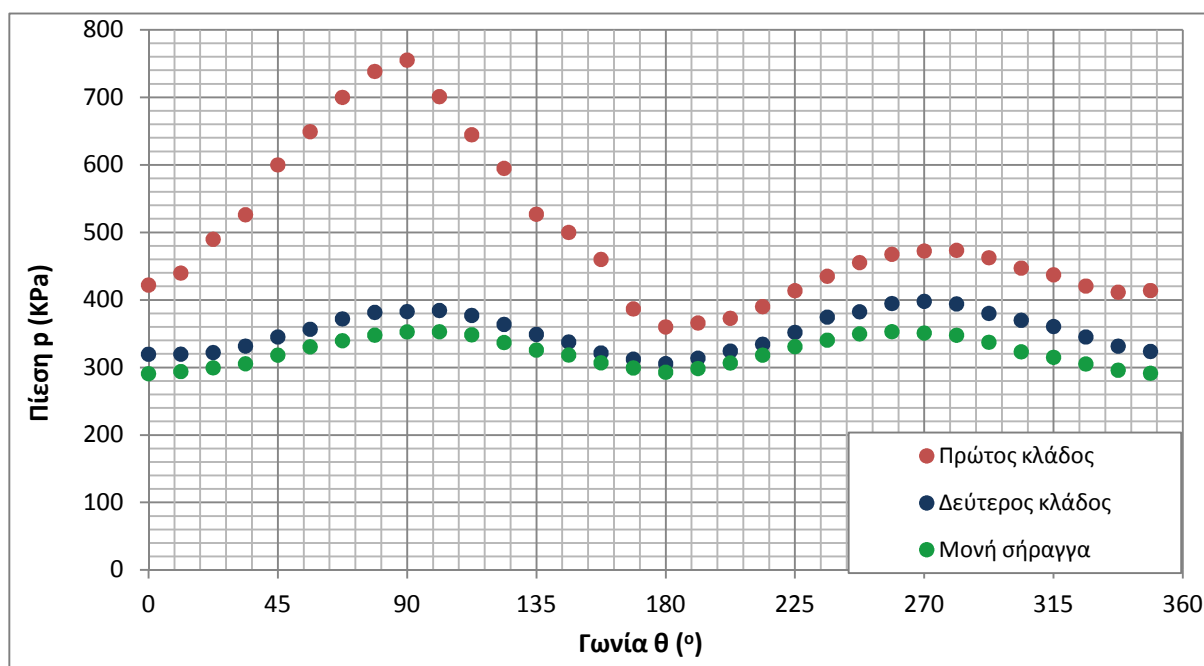
Τελικά, η καταπόνηση του κελύφους του πρώτου κλάδου εξαιτίας της διάνοιξης του δεύτερου, αποδεικνύει την αλληλεπίδραση των δυο κλάδων που οφείλεται στο μικρό πλάτος πυλώνα που διατίθεται. Ενδεικτικά, στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται οι τιμές των πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης στη θέση των χαρακτηριστικών διατομών.

**Πίνακας 6.2** Τιμές της μέσης αναπτυσσόμενης πίεσης επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, για τις χαρακτηριστικές διατομές μονής και δίδυμης σήραγγας.

	Μέση πίεση επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης (KPa)
Σήραγγα μονού κλάδου	323
Πρώτος κλάδος δίδυμης σήραγγας	497
Δεύτερος κλάδος δίδυμης σήραγγας	351

Σημειώνεται ότι οι πιέσεις του πρώτου κλάδου στη θέση της χαρακτηριστικής διατομής είναι αυξημένες κατά 35% περίπου σε σχέση με τις αντίστοιχες της μονής σήραγγας, ενώ οι πιέσεις του δεύτερου κλάδου είναι αυξημένες περίπου κατά 7.9%.

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

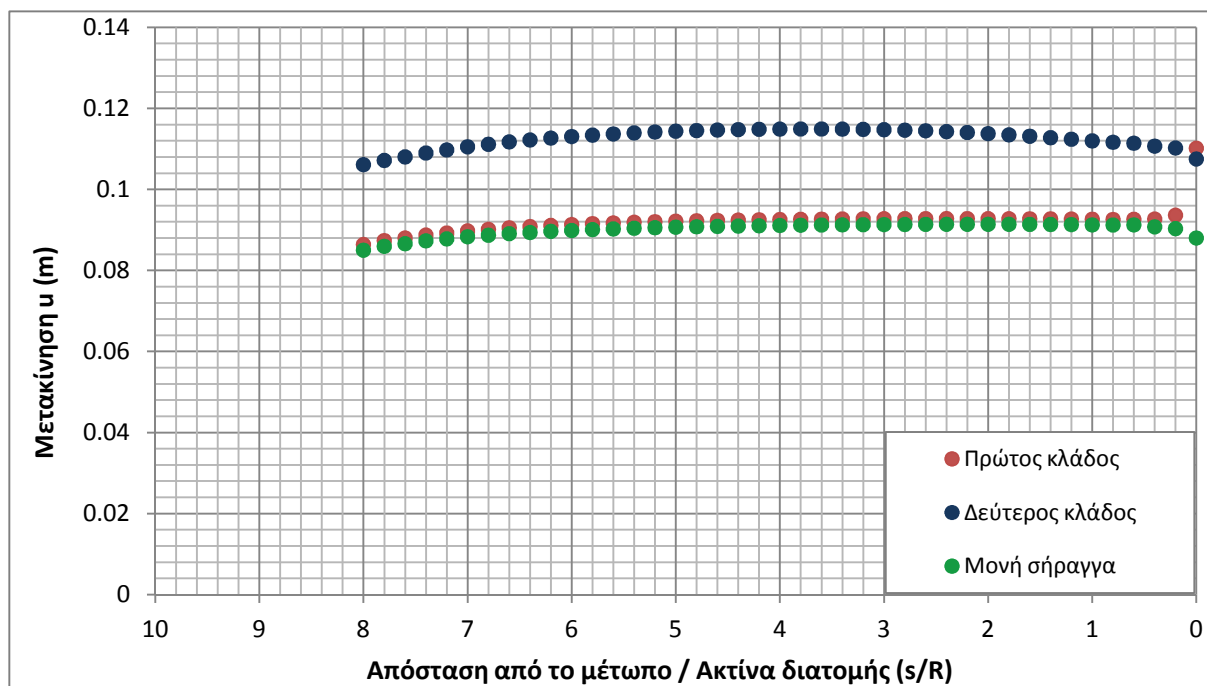


**Σχήμα 6.5** Σύγκριση, περί τη χαρακτηριστική διατομή, των πιέσεων που αναπτύσσονται επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου της δίδυμης σήραγγας ( $W=0.5D=5m$ ), του δεύτερου κλάδου αυτής, καθώς και της σήραγγας μονού κλάδου.

Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση των κατανομών των μέσων μετακινήσεων. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει ένας σχολιασμός σχετικά με τις τιμές των μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που λαμβάνονται από το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων. Όπως είναι γνωστό κατά τη διάρκεια της εκσκαφής μιας σήραγγας οι μετακινήσεις που απασχολούν τον κατασκευαστή μηχανικό και καλείται να αντιμετωπίσει είναι εκείνες που εκδηλώνονται στο μέτωπο και συνεχίζουν να εξελίσσονται κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Οι τιμές όμως των μετακινήσεων που λαμβάνονται από το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων δεν αντιστοιχούν στις τιμές των «καθαρών» αυτών μετακινήσεων που καθορίζουν το είδος της άμεσης υποστήριξης που απαιτείται να τοποθετηθεί. Για να γίνει πιο κατανοητό το πρόβλημα αυτό εξετάζουμε ένα εδαφικό στοιχείο που βρίσκεται στη περιβάλλουσα βραχώμαζα του πρώτου κλάδου. Η μετακίνηση που λαμβάνεται για το στοιχείο αυτό μετά το πέρας της εκσκαφής αποτελεί το άθροισμα της μετακίνησης που οφείλεται στην αποτόνωση των τάσεων (προσύγκλιση), καθώς το μέτωπο πλησιάζει τη θέση του στοιχείου, και της μετακίνησης που πραγματοποιείται από τη στιγμή που το μέτωπο ξεπερνά τη θέση αυτή και έπειτα. Για ένα αντίστοιχο στοιχείο τώρα του δεύτερου κλάδου, η μετακίνηση αποτελεί το άθροισμα τριών συνιστωσών. Η πρώτη είναι η μετακίνηση που προκαλεί η εκσκαφή του πρώτου κλάδου σε αυτό, εξαιτίας της χαλάρωσης της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Η δεύτερη είναι η μετακίνηση που οφείλεται στην αποτόνωση των τάσεων (προσύγκλιση), καθώς το δεύτερο μέτωπο πλησιάζει στη θέση του εξεταζόμενου εδαφικού στοιχείου, ενώ, τέλος, η τρίτη είναι εκείνη που προκαλείται από την εκσκαφή του δεύτερου κλάδου. Συνεπώς συμπεραίνουμε ότι οι μετακινήσεις στους κόμβους του αριθμητικού προσομοιώματος έχουν συνεχή εξέλιξη κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Επομένως κατά την επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων απαιτείται προσεκτική χρήση των συνιστωσών μετακινήσεων.

Εξετάζοντας τις κατανομές των μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.6, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι μετακινήσεις του πρώτου κλάδου, όπως λαμβάνονται αμέσως μετά το πέρας της συνολικής εκσκαφής, παρουσιάζουν πολύ μικρή διαφοροποίηση σε σχέση με τις αντίστοιχες που αναπτύσσονται κατά την εκσκαφή της μονής σήραγγας. Η συμπεριφορά αυτή των μετακινήσεων μπορεί να εξηγηθεί αν λάβουμε υπόψη το ρόλο της άμεσης υποστήριξης, η οποία τοποθετείται αμέσως μετά από κάθε βήμα εκσκαφής. Έτσι ύστερα από τη διάνοιξη ενός μέτρου του πρώτου κλάδου, τοποθετείται η άμεση υποστήριξη του αμέσως προηγούμενου βήματος η οποία περιορίζει την ανάπτυξη εκτεταμένων μετακινήσεων. Ουσιαστικά οι μετακινήσεις των εδαφικών στοιχείων που καταγράφονται είναι εκείνες που έχουν πραγματοποιηθεί πριν την εκσκαφή, εξαιτίας της χαλάρωσης του μετώπου. Τελικά, μετά το πέρας της εκσκαφής του πρώτου κλάδου οι μετακινήσεις που έχουν σημειωθεί είναι αντίστοιχες των μετακινήσεων που σημειώθηκαν στη μονή σήραγγα. Έπειτα, καθώς ξεκινά και εξελίσσεται η διάνοιξη του δεύτερου κλάδου, οι μετακινήσεις των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τον πρώτο τείνουν να αυξηθούν. Το φαινόμενο αυτό όμως δεν εκδηλώνεται, καθώς περιορίζεται από τη

δύσκαμπτη άμεση υποστήριξη. Η καταπόνηση του πρώτου κλάδου εξαιτίας της διάνοιξης του δεύτερου εκδηλώνεται με εκτεταμένη αύξηση των πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, όπως καταγράφηκε στα διαγράμματα που προηγήθηκαν.



Σχήμα 6.6 Σύγκριση, κατά το μήκος διάνοιξης, των αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τον πρώτο κλάδο της δίδυμης σήραγγας (W=0.5D=5m), το δεύτερο κλάδο αυτής, καθώς και τη σήραγγα μονού κλάδου.

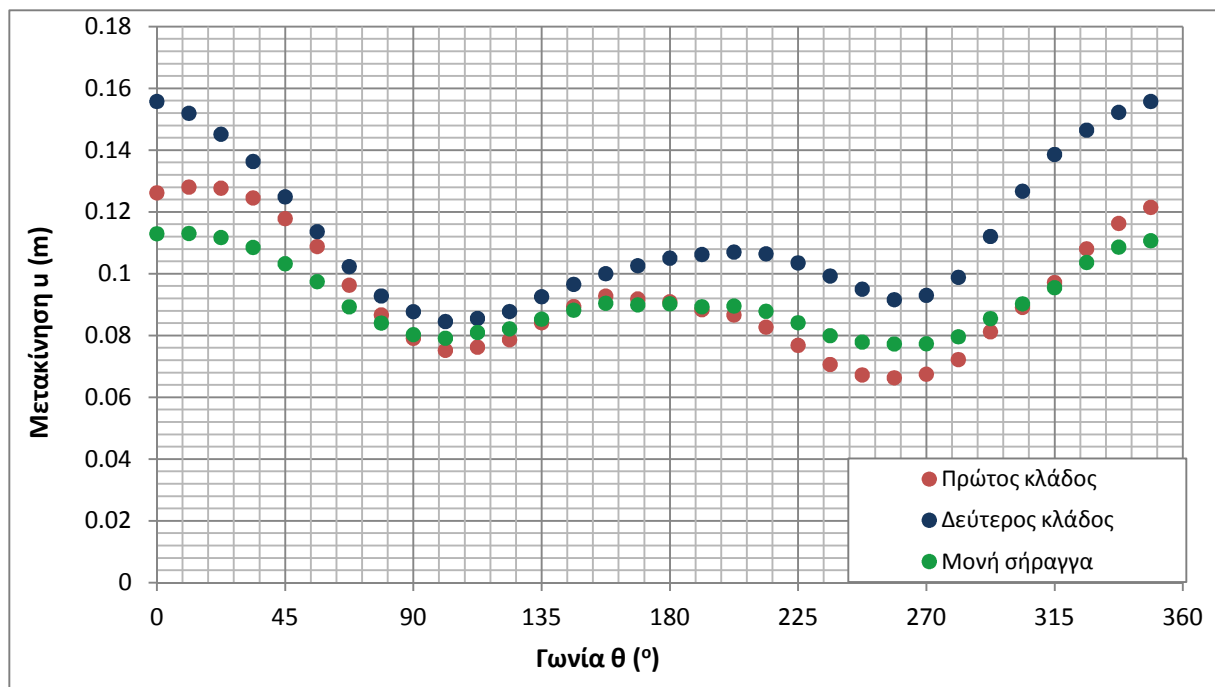
Παράλληλα, από το διάγραμμα των μετακινήσεων διαπιστώνουμε ότι τα στοιχεία που περιβάλλουν τον δεύτερο κλάδο εκσκαφής μετακινούνται περισσότερο σε σχέση με τα αντίστοιχα του πρώτου κλάδου. Το φαινόμενο αυτό είναι λογικό, καθώς η εκσκαφή του πρώτου κλάδου διαταράσσει την περιβάλλουσα βραχώμαζα. Εξαιτίας αυτής της διαταραχής αλλά και της μικρής απόστασης μεταξύ των κλάδων παρατηρείται ανάπτυξη πρωτογενών μετακινήσεων ακόμα και στα στοιχεία του δεύτερου κλάδου, πριν καν να ξεκινήσει η εκσκαφή. Στη συνέχεια, η εκσκαφή του δεύτερου κλάδου επιβάλλει εκ νέου μετακινήσεις στα στοιχεία της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Η μέγιστη μετακίνηση του κάθε στοιχείου καταγράφεται τη στιγμή που το μέτωπο πλησιάζει τη θέση του σημείου αυτού. Μετά την εκσκαφή, η τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης περιορίζει την ανάπτυξη επιπλέον μετακινήσεων. Ενδεικτικά, στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται οι τιμές των μετακινήσεων των στοιχείων που περιβάλλουν την άμεση υποστήριξη, για τις χαρακτηριστικές διατομές.

Πίνακας 6.3 Τιμές της μέσης αναπτυσσόμενης μετακίνησης των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τις χαρακτηριστικές διατομές της μονής και της δίδυμης σήραγγας.

	Μέση μετακίνηση (m)
Σήραγγα μονού κλάδου	$9.14 \cdot 10^{-2}$
Πρώτος κλάδος δίδυμης σήραγγας	$9.27 \cdot 10^{-2}$
Δεύτερος κλάδος δίδυμης σήραγγας	$11.24 \cdot 10^{-2}$

Σημειώνεται ότι οι μετακινήσεις του πρώτου κλάδου στη θέση της χαρακτηριστικής διατομής είναι αυξημένες μόλις κατά 1.4% σε σχέση με τις αντίστοιχες της μονής σήραγγας, ενώ οι μετακινήσεις του δεύτερου κλάδου είναι αυξημένες κατά 19% περίπου.

Στο Σχήμα 6.7 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η εν διατομή κατανομή των μετακινήσεων. Παρατηρείται ότι η φόρτιση είναι συμμετρική για την περίπτωση της εκσκαφής μονής σήραγγας, ενώ η συμμετρία της κατανομής διαταράσσεται στην περίπτωση της εκσκαφής της δίδυμης σήραγγας. Είναι εμφανές ότι η μεγαλύτερη επίδραση παρατηρείται στην οροφή της σήραγγας, δηλαδή στις θέσεις όπου η γωνία  $\theta$  λαμβάνει τιμές από  $0^\circ$  έως  $30^\circ$  και από  $300^\circ$  έως  $360^\circ$ , αφού έχει θεωρηθεί  $K=0.7 < 1$ .



Σχήμα 6.7 Σύγκριση, περί τη χαρακτηριστική διατομή, των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων, για τον πρώτο κλάδο της δίδυμης σήραγγας ( $W=0.5D=5m$ ), το δεύτερο κλάδο αυτής, καθώς και τη σήραγγα μονού κλάδου.

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

Μια από τις δυνατότητες του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των αναλύσεων είναι η καταγραφή της χρονοϊστορίας του κάθε κόμβου. Στην περίπτωση που εξετάζουμε, η ικανότητα αυτή μεταφράζεται σε ικανότητα καταγραφής των αναπτυσσόμενων φορτίσεων και μετακινήσεων ενός κόμβου από την αρχή έως το τέλος της εκσκαφής των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας. Προκειμένου να κατανοηθεί σε βάθος η εξέλιξη των μεγεθών αυτών κατά τη διάρκεια εκσκαφής δίδυμης σήραγγας, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη λειτουργία.

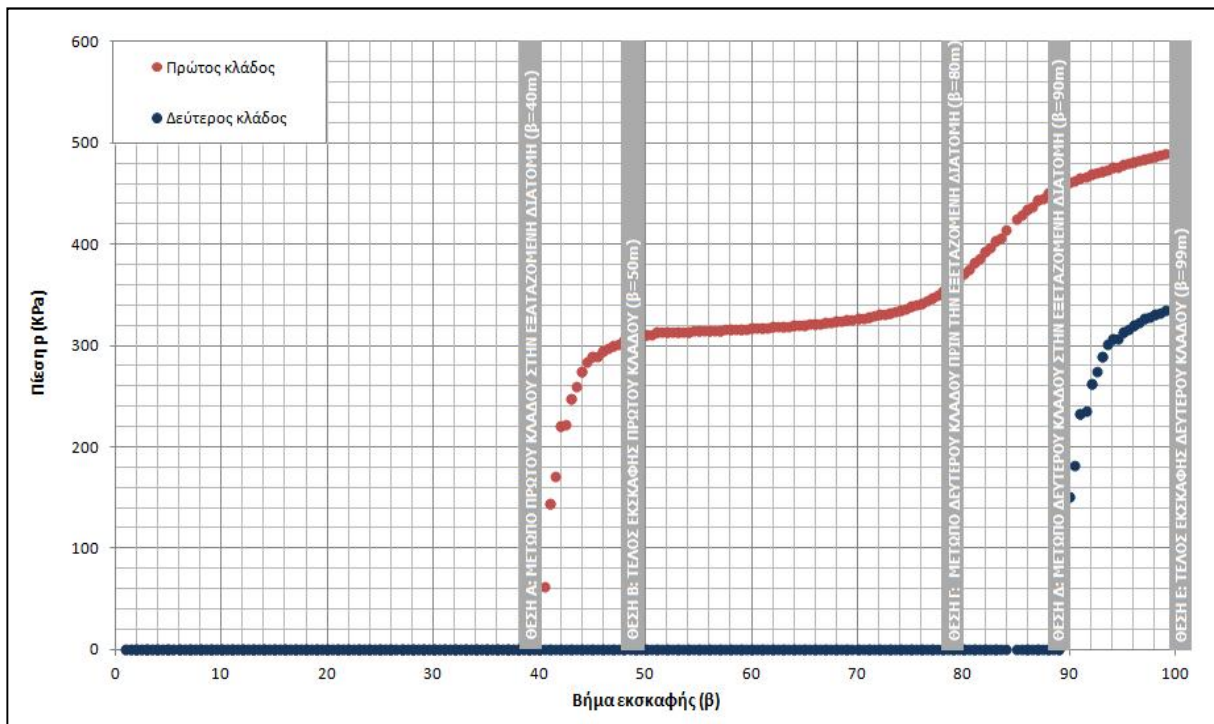
Επιλέγεται λοιπόν για τον πρώτο κλάδο μια διατομή (Διατομή Α), και συγκεκριμένα εκείνη η οποία απέχει απόσταση ίση με 40m ( $y=40m$ ) από την είσοδο της σήραγγας. Επιλέχθηκε η διατομή αυτή, που βρίσκεται σε απόσταση σχετικά μεγάλη από το σημείο έναρξης της εκσκαφής, έτσι ώστε να είναι βέβαιο ότι δεν επηρεάζεται από τις συνοριακές συνθήκες. Η συγκεκριμένη διατομή αντιστοιχεί στο  $40^\circ$  βήμα εκσκαφής ( $\beta=40$ ). Για τον δεύτερο κλάδο επιλέχθηκε η αντίστοιχη διατομή που απέχει 40m από το στόμιο της σήραγγας (Διατομή Β) και αντιστοιχεί στο  $90^\circ$  βήμα εκσκαφής ( $\beta=90$ ). Σημειώνεται ότι καθώς οι διατομές απέχουν απόσταση ίση με  $10m=D$  από το μέτωπο δεν έχει ολοκληρωθεί η εξέλιξη των μεγεθών και αυτά δεν έχουν λάβει τις τελικές τους τιμές.

Με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ελήφθησαν σε κάθε βήμα της εκσκαφής οι αναπτυσσόμενες πιέσεις και μετακινήσεις των κόμβων της οροφής, των παρειών και του πυθμένα των εξεταζόμενων διατομών. Υπολογίζοντας τον μέσο όρο των τεσσάρων αυτών τιμών, κατασκευάζονται τα διαγράμματα που ακολουθούν. Στα διαγράμματα αυτά, συνεπώς, απεικονίζονται οι μέσες τιμές των φορτίσεων και των μετακινήσεων των εξεταζόμενων διατομών των δυο κλάδων, σε κάθε στάδιο της εκσκαφής.

Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζεται η εξέλιξη των μέσων αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης κατά τη διάρκεια της εκσκαφής των δυο κλάδων, για τις διατομές Α και Β. Μελετώντας την καμπύλη που αντιστοιχεί στον πρώτο κλάδο, παρατηρούμε ότι το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης αρχικά αναλαμβάνει τις αναπτυσσόμενες πιέσεις αμέσως μετά τη τοποθέτηση του (Θέση Α). Μέχρι το πέρας της εκσκαφής του πρώτου κλάδου (Θέση Β), παρατηρείται αύξηση των αναπτυσσόμενων πιέσεων, καθώς η υποστήριξη περιορίζει την ανάπτυξη των μετακινήσεων των γύρω κόμβων που προκαλεί η προχώρηση του μετώπου. Στα τα επόμενα βήματα ( $50^\circ-70^\circ$ ), όπου το μέτωπο της δεύτερης εκσκαφής βρίσκεται μακριά από την εξεταζόμενη διατομή του πρώτου κλάδου, οι τιμή της μέσης πίεσης είναι πρακτικά σταθερή. Καθώς, όμως, η δεύτερη εκσκαφή πλησιάζει σημειώνεται αύξηση της πίεσης, γεγονός που μαρτυρά την επίδραση της δεύτερης εκσκαφής στη πρώτη. Η επίδραση αυτή εκδηλώνεται ήδη από τη στιγμή που το δεύτερο μέτωπο βρίσκεται  $20m=2D$  πίσω από τη διατομή Α. Αξιοσημείωτη είναι η επίδραση του δεύτερου κλάδου στον πρώτο από τη στιγμή που το δεύτερο μέτωπο βρίσκεται  $10m=D$  πριν τη διατομή (Θέση Γ) μέχρι τη στιγμή που περνάει δίπλα από τη διατομή (Θέση Δ). Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι στην περιοχή αυτή η έντονη μεταβολή του μεγέθους προκαλεί διπλή μεταβολή της καμπυλότητας του διαγράμματος. Από τη στιγμή που το μέτωπο προσπερνά τη διατομή Α και για τα επόμενα 10 βήματα (Τέλος της εκσκαφής - Θέση Δ) ο ρυθμός μεταβολής του μεγέθους μειώνεται και τείνει να λάβει την τελική του τιμή.

Η μέση πίεση που αντιστοιχεί στην εξεταζόμενη διατομή του δεύτερου κλάδου ξεκινά να αυξάνεται αμέσως μετά τη διέλευση του μετώπου και την τοποθέτηση του κελύφους της υποστήριξης.



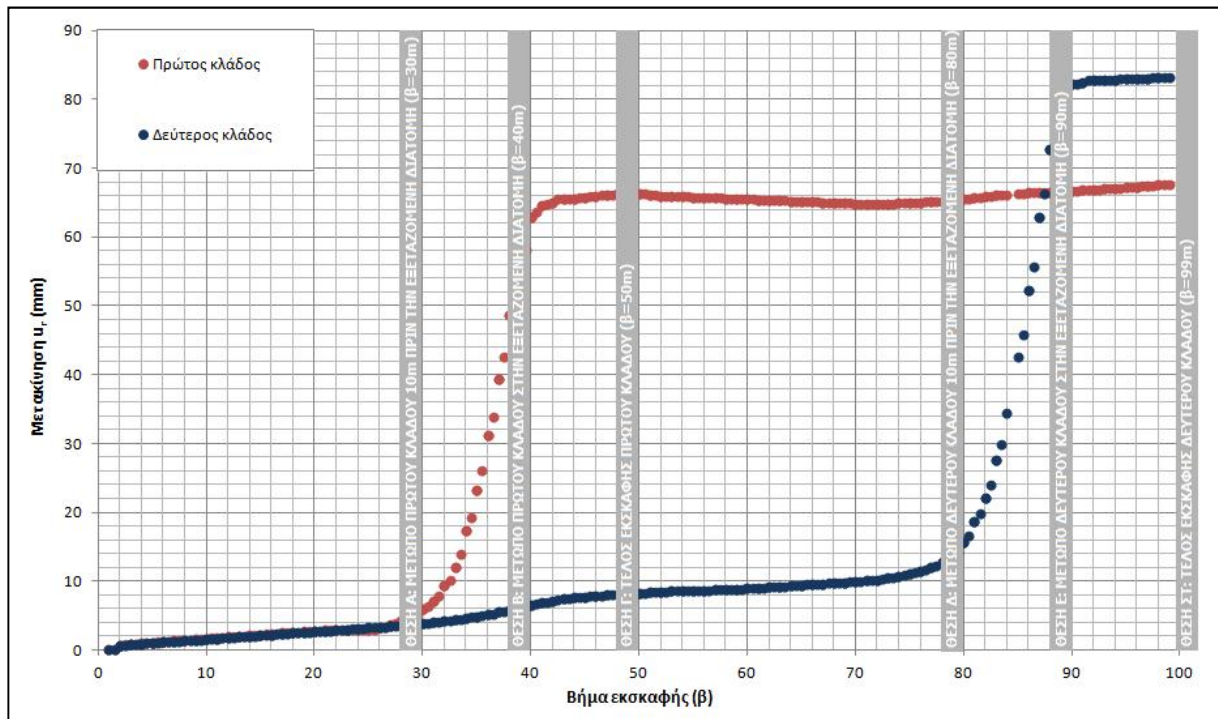


**Σχήμα 6.8** Εξέλιξη των αναπτυσσόμενων μέσων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, κατά τη συνολική διάρκεια της εκσκαφής, για διατομές των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας που βρίσκονται σε απόσταση 40m από την είσοδο της σήραγγας και για  $W=0.5D=5m$ .

Στο ακόλουθο διάγραμμα, παρουσιάζεται η εξέλιξη της μέσης συνισταμένης μετατόπισης (λαμβάνεται το άθροισμα της συνιστώσας της οριζόντιας, κάθετης στον άξονα μετακίνησης και της συνιστώσας της κατακόρυφης μετακίνησης και στη συνέχεια η μέση τιμή των τεσσάρων καταγραφών) κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, για τις εξεταζόμενες διατομές.

Παρατηρώντας την κατανομή περί τη διατομή του πρώτου κλάδου, διαπιστώνεται ότι τα στοιχεία που βρίσκονται σε απόσταση 40 μέτρων από την είσοδο της σήραγγας αρχίζουν να επηρεάζονται σχεδόν αμέσως μετά την έναρξη της εκσκαφής. Η διάνοιξη προκαλεί χαλάρωση του μετώπου η οποία με τη σειρά της προκαλεί αύξηση της μέσης μετακίνησης της εξεταζόμενης διατομής ακόμα και όταν το μέτωπο βρίσκεται σε αρκετά μεγάλη απόσταση από αυτή ( $40m=4D$ ). Βέβαια η μετακίνηση που παρατηρείται στη φάση αυτή είναι αμελητέα. Καθώς η προχώρηση του μετώπου συνεχίζεται, η χαλάρωση του γίνεται εντονότερη με χαρακτηριστικό σημείο εκείνο στο οποίο η εκσκαφή βρίσκεται  $10m=D$  πίσω από την διατομή Α που λαμβάνουμε ως σημείο αναφοράς (Θέση Α). Από τη θέση εκείνη και έπειτα, παρατηρείται ραγδαία αύξηση των μετακινήσεων έως τη στιγμή που το μέτωπο φτάνει στη θέση της διατομής Α ( $40^\circ$  βήμα) και τοποθετείται το εκτοξευμένο σκυρόδεμα (Θέση Β). Στη συνέχεια η συνιστώσα των μετακινήσεων συνεχίζει να αυξάνεται με μικρό ρυθμό έως την ολοκλήρωση της εκσκαφής του πρώτου κλάδου (Θέση Γ). Κατά τη διάρκεια της εκσκαφής του δεύτερου κλάδου ( $50^\circ$  έως  $99^\circ$  βήμα) η τιμή του εξεταζόμενου μεγέθους παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Συνεπώς η εκσκαφή του δεύτερου κλάδου δε δείχνει να επιδρά έντονα στις μετακινήσεις του πρώτου, καθώς όπως έχει αναφερθεί το κυκλικό σχήμα της άμεσης υποστήριξης

που έχει ήδη τοποθετηθεί και η μεγάλη δυσκαμψία αυτής εμποδίζει την ανάπτυξη των μετακινήσεων. Έτσι, η αλληλεπίδραση εκφράζεται με εκτεταμένη αύξηση των πιέσεων.



**Σχήμα 6.9** Εξέλιξη, κατά τη συνολική διάρκεια της εκσκαφής, των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τις διατομές των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας, οι οποίες βρίσκονται σε απόσταση 40m από την είσοδο της σήραγγας, για  $W=0.5D=5m$ .

Παρατηρώντας την εξέλιξη της τιμής της συνισταμένης μετατόπισης στο δεύτερο κλάδο, διαπιστώνεται ότι πρόκειται για ένα πιο σύνθετο φαινόμενο. Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, η διάνοιξη του πρώτου κλάδου προκαλεί διατάραξη και χαλάρωση της περιβάλλουσας βραχώμαζας και συνεπώς μετακινήσεις των εδαφικών στοιχείων. Καθώς η εγκάρσια απόσταση των δυο σηράγγων είναι μικρή, η ζώνη αυτή διαταραχής περιλαμβάνει και τα εδαφικά στοιχεία του δεύτερου κλάδου. Για το λόγο αυτό η μέση μετατόπιση της διατομής Β είναι μηδενική, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, ήδη από την αρχή της εκσκαφής του πρώτου κλάδου. Καθώς το μέτωπο του πρώτου κλάδου πλησιάζει τη διατομή του δεύτερου (Θέση Α) η διατάραξη εντείνεται και συνεπώς αυξάνεται και η τιμή της μετακίνησης. Ο ρυθμός αύξησης είναι σταθερός μέχρι το πέρας της εκσκαφής του πρώτου κλάδου. Στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια της εκσκαφής του δεύτερου κλάδου, παρατηρούμε ότι η κατανομή των μετακινήσεων στην εξεταζόμενη διατομή είναι πανομοιότυπης μορφής με την αντίστοιχη του πρώτου κλάδου, αυξημένη σε κάθε βήμα κατά την τιμή που σημειώθηκε στο τέλος της εκσκαφής του πρώτου κλάδου (Θέση Γ).

## 6.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Αναμφισβήτητα οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων καθορίζουν τη συμπεριφορά της βραχώμαζας κατά τη διάρκεια της εκσκαφής μιας δίδυμης σήραγγας. Προκειμένου να μελετηθεί η

επίδραση των γεωτεχνικών συνθηκών στην εξέλιξη των πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, αλλά και στην εξέλιξη των μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, για κάθε ένα από τα τρία προσομοιώματα που κατασκευάστηκαν, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις για ένα εύρος γεωτεχνικών συνθηκών.

Στις παραγράφους που ακολουθούν πραγματοποιείται αρχικά σύγκριση των αναπτυσσόμενων φορτίσεων για τις βέλτιστες και τις χειρίστες γεωτεχνικές συνθήκες που εξετάστηκαν, ενώ στη συνέχεια μελετάται η συμπεριφορά των φορτίσεων για όλο το εύρος των γεωτεχνικών συνθηκών.

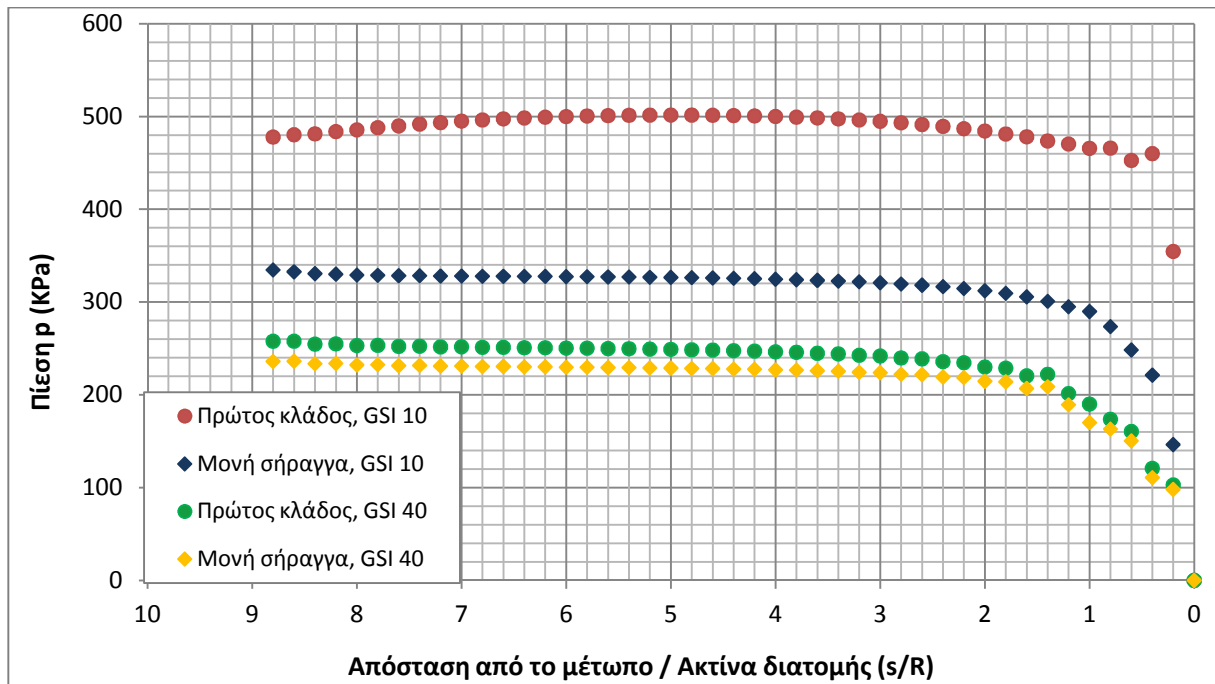
### 6.2.1 Επίδραση των γεωτεχνικών συνθηκών – Ποιότητα βραχώμαζας

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζεται η σύγκριση δυο αριθμητικών αναλύσεων με ίδιο πλάτος πυλώνα ( $W=0.5D=5m$ ), για ευμενείς (Ανάλυση I) και δυσμενείς (Ανάλυση II) γεωτεχνικές συνθήκες. Παράλληλα, σε κοινά διαγράμματα τοποθετούνται και οι κατανομές των εξεταζόμενων μεγεθών που αντιστοιχούν σε μονές σήραγγες που διανοίγονται σε βραχώμαζα με αντίστοιχες γεωτεχνικές συνθήκες. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση των γεωτεχνικών συνθηκών στη διαμόρφωση των τιμών των υπό μελέτη μεγεθών. Οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων για τις δυο αυτές αναλύσεις παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

**Πίνακας 6.4 Τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων δυο ακραίων αναλύσεων, για αριθμητικό προσομοίωμα που διαθέτει πλάτος πυλώνα  $W=0.5D=5m$ .**

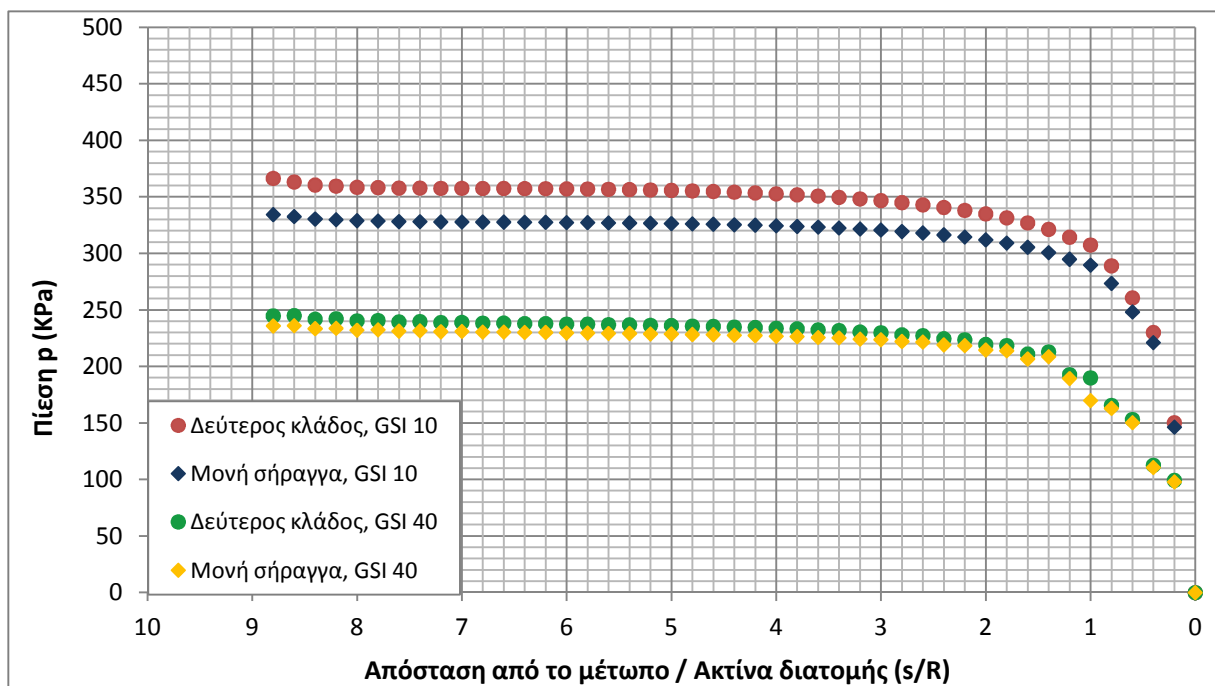
	Ανάλυση I	Ανάλυση II
Γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI	40	10
Ισοδύναμη συνοχή $c$ (KPa)	170	40
Ισοδύναμη γωνία τριβής $\phi$ ( $^{\circ}$ )	43	23
Μέτρο ελαστικότητας $E$ (MPa)	1117	85
$\sigma_{cm}/\rho_o$	2.56	0.37
$\sigma_c/\rho_o$	0.78	0.12

Μελετώντας τις κατανομές των πιέσεων για τους δυο κλάδους της σήραγγας και για τις δυο διαφορετικές περιπτώσεις γεωτεχνικών συνθηκών (Σχήμα 6.10 και Σχήμα 6.11) διαπιστώνουμε την εμφανή επίδραση της ποιότητας της βραχώμαζας στην ανάπτυξη των φορτίσεων. Αρχικά συγκρίνοντας τις κατανομές των πιέσεων του πρώτου κλάδου για τις δυο διαφορετικές καταστάσεις της βραχώμαζας παρατηρούμε, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι μείωση της ποιότητας αυτής οδηγεί σε αύξηση των φορτίσεων. Επιπρόσθετα, διαπιστώνεται ότι η επίδραση του δεύτερου κλάδου στον πρώτο είναι πιο έντονη για τις δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες καθώς στην περίπτωση αυτή η διάνοιξη του δεύτερου κλάδου προκαλεί αύξηση των πιέσεων επί του κελύφους της υποστήριξης του πρώτου κατά 40% περίπου. Η αντίστοιχη αύξηση για τις βελτιωμένες γεωτεχνικές συνθήκες (GSI=40) είναι της τάξεως του 8%.



Σχήμα 6.10 Κατανομή, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, για  $W=0.5D=5m$  και για δυο διαφορετικές ποιότητες βραχώμαζας ( $GSI=10$  και  $GSI=40$ ).

Ανάλογα είναι τα συμπεράσματα που προκύπτουν και από τη μελέτη των κατανομών του δεύτερου κλάδου (Σχήμα 6.11).



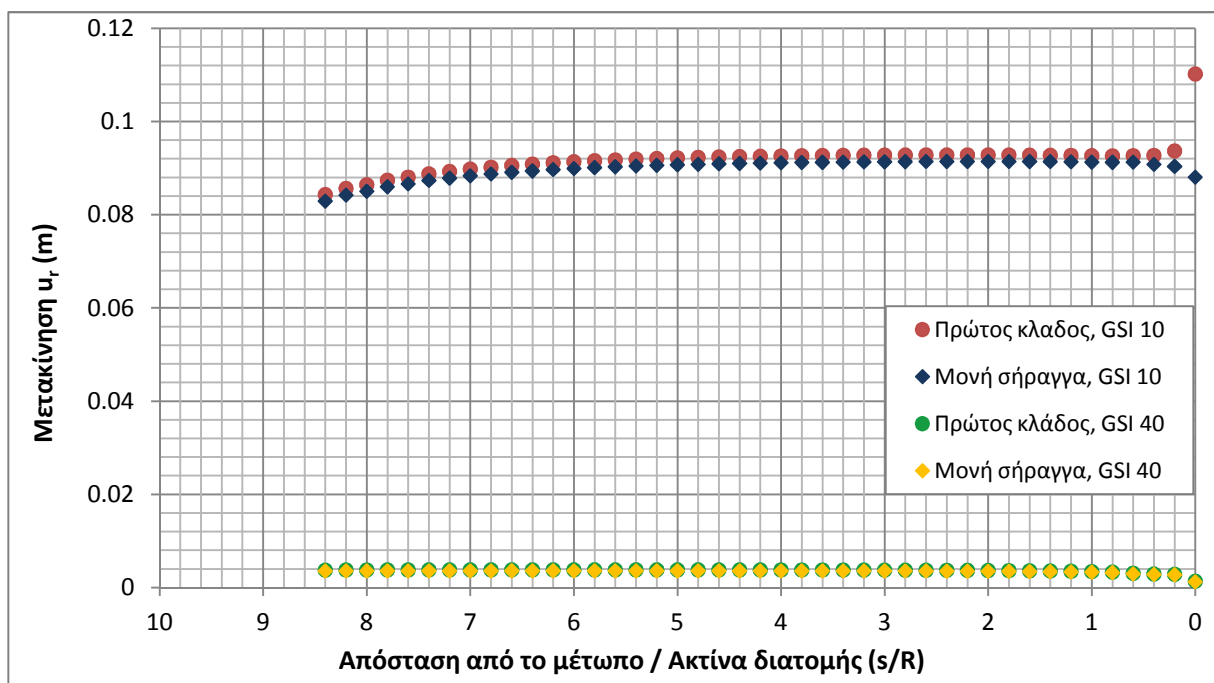
Σχήμα 6.11 Κατανομή, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του δεύτερου κλάδου, για  $W=0.5D=5m$  και για δυο διαφορετικές ποιότητες βραχώμαζας ( $GSI=10$  και  $GSI=40$ ).

Πίνακας 6.5 Επίδραση των γεωτεχνικών παραμέτρων στις αναπτυσσόμενες μέσες φορτίσεις, των χαρακτηριστικών διατομών της δίδυμης σήραγγας.

Ποιότητα βραχώμαζας	Πίεση $p$ (Kpa)			Ποσοστιαία μεταβολή (%)	
	Μονή σήραγγα (single)	Πρώτος κλάδος δίδυμης σήραγγας (f)	Δεύτερος κλάδος δίδυμης σήραγγας (s)	$(p_f - p_{single})/p_f$	$(p_s - p_{single})/p_s$
GSI=10	323	497	352	35	8.2
GSI=40	227	246	234	7.7	3

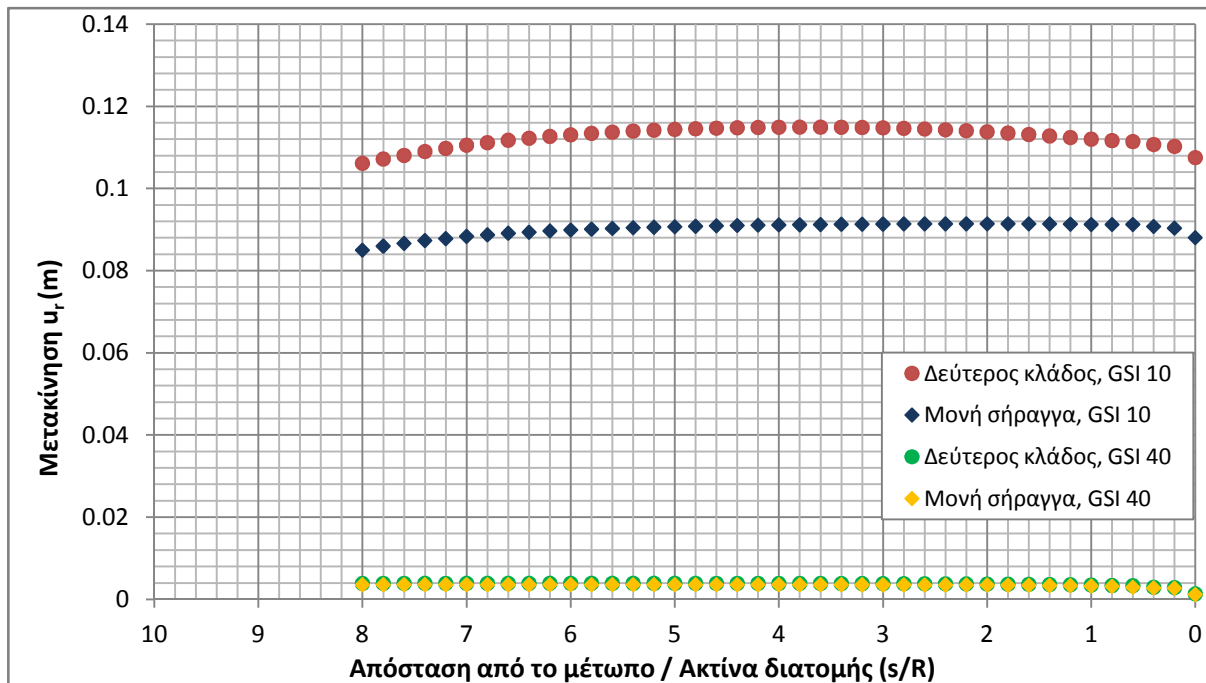
Ο Πίνακας 6.5 περιέχει τις τιμές των μέσων πιέσεων για τις χαρακτηριστικές διατομές της μονής σήραγγας, του πρώτου κλάδου και του δεύτερου κλάδου, για τις δυο εξεταζόμενες αναλύσεις. Η ποσοστιαία μεταβολή της πίεσης του πρώτου κλάδου και της μονής σήραγγας για χαμηλή ποιότητα βραχώμαζας (ίση με 35%) είναι αρκετά αυξημένη σε σύγκριση με την αντίστοιχη μεταβολή που αναφέρεται στην περίπτωση διάνοιξης σήραγγας σε βραχώμαζα βελτιωμένης ποιότητας (ίση με 7.7%). Τα ποσοστά των μεταβολών για το δεύτερο κλάδο είναι αρκετά μειωμένα, καθώς όπως είναι πλέον γνωστό δεν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση των πιέσεων του δεύτερου κλάδου. Διαπιστώνεται λοιπόν ότι για βελτιωμένες γεωτεχνικές συνθήκες μειώνεται η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας.

Αναφορικά με τις μετακινήσεις, σημειώνεται ότι η διαφοροποιήσεις αυτών για τον πρώτο κλάδο είναι μηδενικές και ανεξάρτητες των γεωτεχνικών συνθηκών λόγω της δύσκαμπτης άμεσης υποστήριξης που εμποδίζει την εκδήλωσή τους.



Σχήμα 6.12 Κατανομή, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, των αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, για  $W=0.5D=5m$  και για δυο διαφορετικές ποιότητες βραχώμαζας (GSI=10 και GSI=40).

Σχετικά με το δεύτερο κλάδο της εκσκαφής, για αρκετά δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες (GSI=10) ο βαθμός αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων είναι έντονος καθώς παρατηρείται αύξηση των μετατοπίσεων κατά 18% περίπου. Όσο όμως οι γεωτεχνικές συνθήκες βελτιώνονται, τόσο η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων τείνει να εξαλειφτεί.



Σχήμα 6.13 Κατανομή, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, των αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης του δεύτερου κλάδου, για  $W=0.5D=5m$  και για δυο διαφορετικές ποιότητες βραχώμαζας (GSI=10 και GSI=40).

Ο Πίνακας 6.6 που περιέχει τις ποσοστιαίες μεταβολές των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων του πρώτου και του δεύτερου κλάδου σε σχέση με αυτές τη μονής σήραγγας, για τις δυο εξεταζόμενες αναλύσεις. Καθώς ο δεύτερος κλάδος παρουσιάζει μεγαλύτερες μετακινήσεις, εξετάζουμε μόνον τις ποσοστιαίες μεταβολές που αναφέρονται σε αυτόν. Μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε ότι οι δυο κλάδοι αλληλεπιδρούν έντονα στην περίπτωση που διανοίγονται σε βραχώμαζα χαμηλής ποιότητας (GSI=10). Αντίθετα, βελτίωση της ποιότητας της βραχώμαζας συνεπάγεται μείωση των εδαφικών μετακινήσεων.

Πίνακας 6.6 Επίδραση των γεωτεχνικών παραμέτρων στις αναπτυσσόμενες μετακινήσεις των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τις χαρακτηριστικές διατομές της δίδυμης σήραγγας.

Ποιότητα βραχώμαζας	Μετακίνηση u (mm)			Ποσοστιαία μεταβολή (%)	
	Μονή σήραγγα (single)	Πρώτος κλάδος δίδυμης σήραγγας (f)	Δεύτερος κλάδος δίδυμης σήραγγας (s)	$(u_f - u_{single})/u_f$	$(u_s - u_{single})/u_s$
GSI=10	91.4	92.7	112.45	1.4	18.7
GSI=40	3.59	3.79	3.9	5.2	7.9



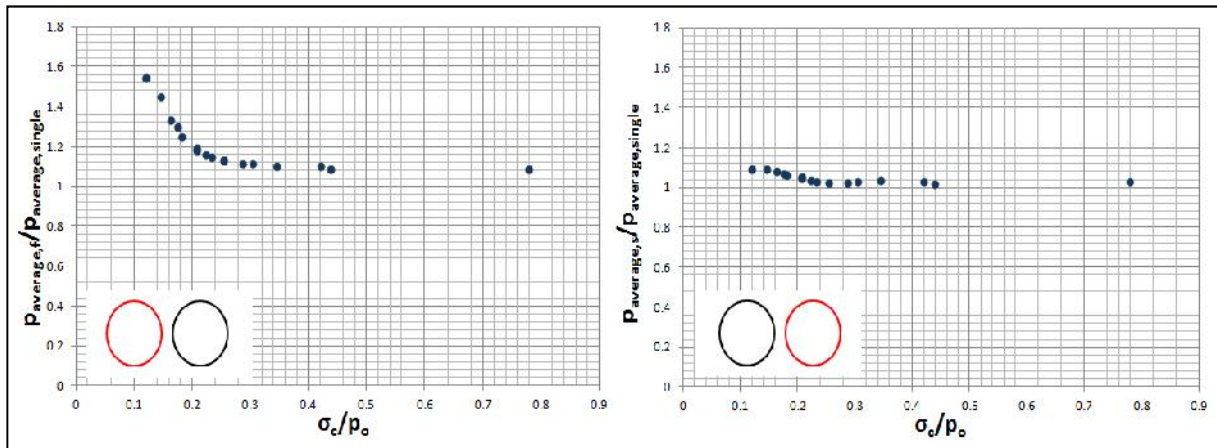
### 6.2.2 Αναλύσεις με διαφορετικές γεωτεχνικές συνθήκες και ίδιο πλάτος πυλώνα

Για τη καλύτερη κατανόηση του φαινομένου που εξετάζουμε, παρατίθενται στη συνέχεια συνολικά διαγράμματα στα οποία απεικονίζεται η φόρτιση και των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας ανηγμένη ως προς την αντίστοιχη φόρτιση της μονής σήραγγας συναρτήσεως των γεωτεχνικών συνθηκών ( $\sigma_c/\rho_o$ ). Στα διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν για το προσομοίωμα που διαθέτει πλάτος πυλώνα ίσο με 5m. Ποιοτικά αντίστοιχα ήταν τα αποτελέσματα και για τις περιπτώσεις όπου  $W=D=10m$  και  $W=2D=20m$ , τα οποία θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά στη συνέχεια. Σημειώνεται ότι για την καλύτερη ερμηνεία του φαινομένου επιλέχθηκε η χρήση του λόγου  $\sigma_c/\rho_o$  αντί του λόγου  $\sigma_{cm}/\rho_o$ , καθώς η διασπορά των σημείων μειώνεται σημαντικά. Αυτό συμβαίνει γιατί, αν και η πρωτογενής αντιστοίχιση ιδιοτήτων στα γεωυλικά έχει γίνει σε όρους Hoek-Brown, οι αναλύσεις εκτελούνται με το γραμμικό κριτήριο Mohr-Coulomb.

Σημειώνεται ότι ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας για της αναλύσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί με τον τύπο που προτείνεται από τους Hoek & Diederichs (2006), καθώς δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα.

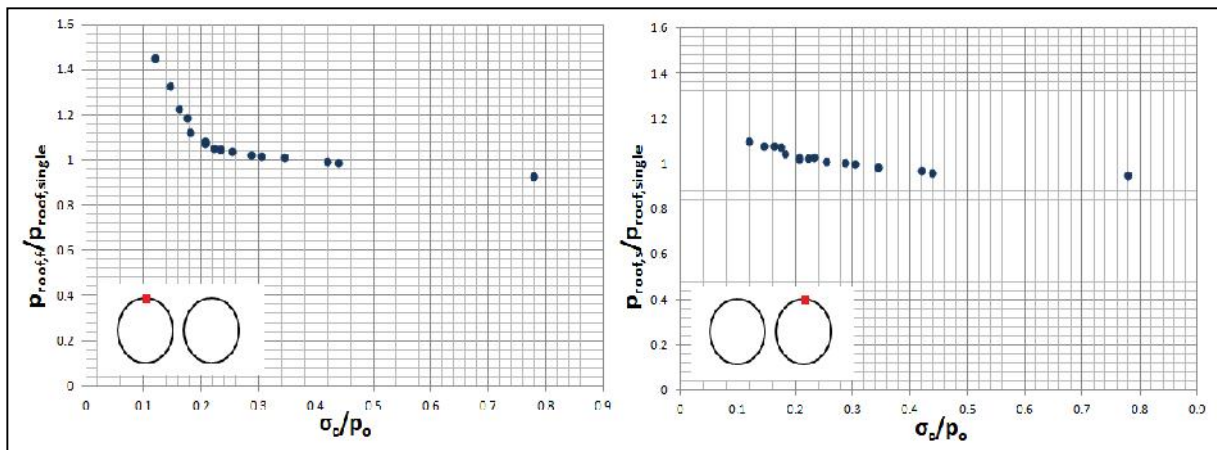
Ξεκινώντας λοιπόν με το μέγεθος των πιέσεων, στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζονται οι μέσες πιέσεις της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου, όλων των αναλύσεων, ανηγμένες στις αντίστοιχες πιέσεις της μονής σήραγγας σε συνάρτηση με το λόγο ποσοτικοποίησης της βραχόμαζας. Στη συνέχεια ακολουθούν τα ανάλογα διαγράμματα για τις πιέσεις που έχουν καταγραφεί στην οροφή και στις παρειές της σήραγγας.

Συγκρίνοντας τις κατανομές των μέσων πιέσεων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.14 διαπιστώνουμε ότι η μορφή της καμπύλης που αντιστοιχεί στον πρώτο κλάδο είναι εκθετική με μειούμενο ρυθμό μείωσης ενώ αντίθετα η καμπύλη που αντιστοιχεί στον δεύτερο κλάδο προσεγγίζει την ευθεία γραμμή. Όπως ήταν αναμενόμενο, ότι οι βελτιωμένες γεωτεχνικές συνθήκες οδηγούν σε μείωση του λόγου των πιέσεων και συνεπώς σε μείωση των αναπτυσσόμενων φορτίσεων. Όσο οι γεωτεχνικές συνθήκες βελτιώνονται τόσο ο λόγος των πιέσεων τείνει στη μονάδα. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει πως καθώς η ποιότητα της βραχόμαζας βελτιώνεται, η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων τείνει να εκλείψει και συνεπώς αυτοί να λαμβάνονται ως δυο ανεξάρτητες κατασκευές. Επιπρόσθετα, η μεγαλύτερη διασπορά των σημείων του πρώτου διαγράμματος (η μέγιστη τιμή του λόγου των πιέσεων είναι ίση με 1.6) σε σύγκριση με αυτά του δεύτερου (η μέγιστη τιμή του λόγου είναι ίση με 1.1), μαρτυρούν την μεγαλύτερη καταπόνηση λόγω πιέσεων του πρώτου κλάδου συγκριτικά με το δεύτερο. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε και αιτιολογήθηκε σε προηγούμενη παράγραφο.



**Σχήμα 6.14** Κατανομή ανηγμένης μέσης πίεσης επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου  $P_{average,(f/s)}/P_{single}$  ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\rho_0$  ( $\sigma_c$ : αντοχή σε μονοαξονική θλίψη κατά Mohr-Coulomb με βάση τις ισοδύναμες τιμές συνοχής και γωνίας τριβής), για  $W=0.5D=5m$ .

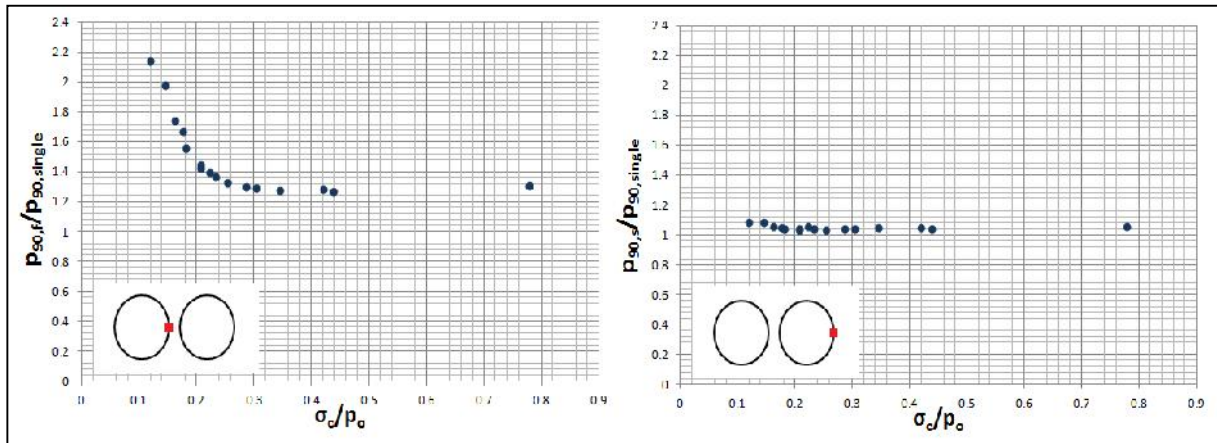
Ανάλογες είναι και οι κατανομές των πιέσεων που καταγράφηκαν στην οροφή του πρώτου και του δεύτερου κλάδου και παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.15. Και στην περίπτωση αυτή, οι πιέσεις που αναπτύσσονται στον πρώτο κλάδο, όταν η αλληλεπίδραση των δυο είναι ακόμα σημαντική, είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του δεύτερου.



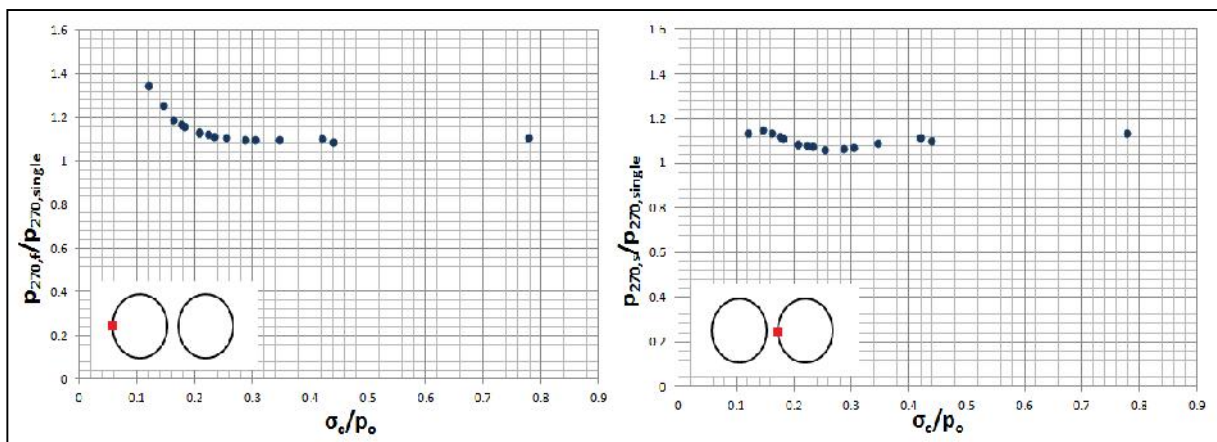
**Σχήμα 6.15** Κατανομή ανηγμένης πίεσης της οροφής της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου  $P_{roof,(f/s)}/P_{roof,single}$  ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\rho_0$ , για  $W=0.5D=5m$ .

Στα επόμενα ακολουθούν οι κατανομές των πιέσεων που αναπτύσσονται στην δεξιά και στην αριστερή παρειά της διατομής (Σχήμα 6.16 και Σχήμα 6.17 αντίστοιχα). Αναφορικά με το λόγο των πιέσεων για τις παρειές της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου κλάδου, είναι φανερό ότι η διασπορά των σημείων για τη δεξιά παρειά των  $90^\circ$  είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με την αριστερή των  $270^\circ$ . Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή του λόγου για τη δεξιά παρειά είναι ίση με 2.1 περίπου, ενώ η αντίστοιχη της αριστερής παρειάς είναι ίση με 1.4. Το γεγονός αυτό είναι λογικό, καθώς η πρώτη αποτελεί την εσωτερική παρειά, περιβάλλεται από βραχώμαζα που είναι πιο έντονα καταπονημένη και συνεπώς δέχεται μεγαλύτερη φόρτιση.

Για τον δεύτερο κάδο, οι πιέσεις που αντιστοιχούν στην παρειά των 90° έχουν σχεδόν μηδενικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες πιέσεις του μονού κλάδου, καθώς για όλο το εύρος των γεωτεχνικών συνθηκών ο λόγος τείνει σε μια σταθερή τιμή. Η τάση αυτή είναι εύκολο να εξηγηθεί, αφού όπως έχει αναφερθεί οι αναπτυσσόμενες πιέσεις στο δεύτερο κλάδο της δίδυμης σήραγγας δεν επηρεάζονται από την ύπαρξη του πρώτου κλάδου. Παράλληλα, η παρειά των 90° αποτελεί την εξωτερική παρειά, συνεπώς η βραχόμαζα είναι λιγότερο καταπονημένη. Για την παρειά των 270°, η οποία είναι η εσωτερική για τον δεύτερο κλάδο, οι διαφοροποιήσεις των πιέσεων είναι πιο εμφανείς με τις τιμές των λόγων να κυμαίνονται από 1 έως 1.2, χωρίς όμως η κατανομή να ακολουθεί μια γενικευμένη τάση. Παρατηρούμε επιπρόσθετα, ότι και για τις δυο περιπτώσεις οι λόγοι των πιέσεων τείνουν σε μια σταθερή τιμή που είναι λίγο μεγαλύτερη της μονάδας. Ουσιαστικά το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι ο δεύτερος κλάδος διανοίγεται σε βραχόμαζα «πτωχότερης ποιότητας» σε σχέση με την αρχικά προβλεπόμενη, καθώς αυτή έχει διαταραχθεί από τη διάνοιξη του πρώτου κλάδου.

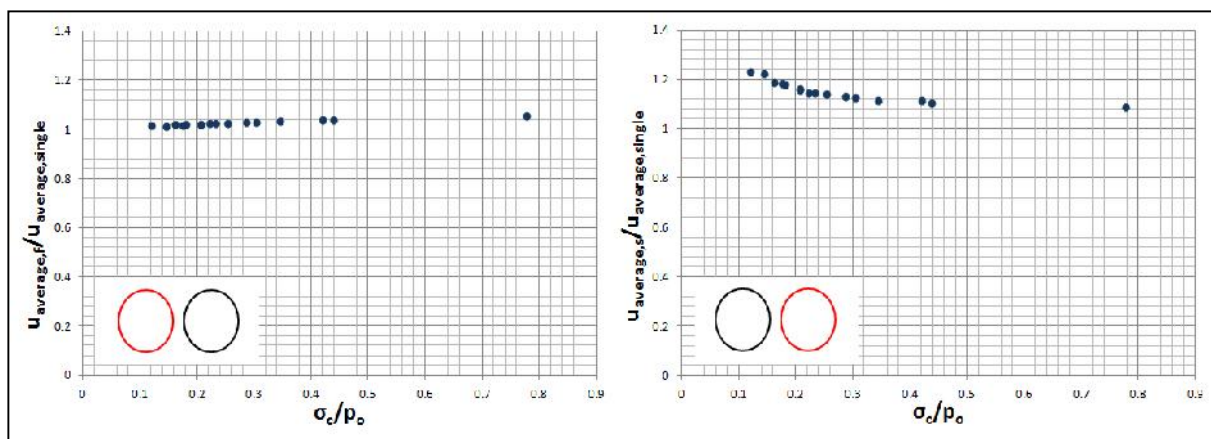


Σχήμα 6.16 Κατανομή ανηγμένης πίεσης της δεξιάς παρειάς ( $\theta=90^\circ$ ) της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου  $p_{90,(f/s)}/p_{90, \text{single}}$ , ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\rho_0$ , για  $W=0.5D=5m$ .

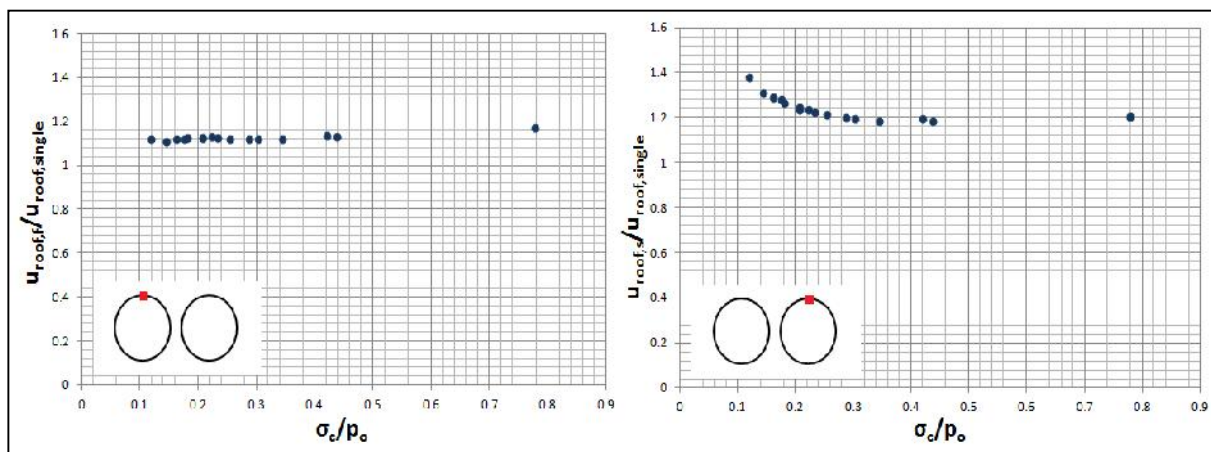


Σχήμα 6.17 Κατανομή ανηγμένης πίεσης της αριστερής παρειάς ( $\theta=270^\circ$ ) της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου  $p_{270,(f/s)}/p_{270, \text{single}}$ , ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\rho_0$ , για  $W=0.5D=5m$ .

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, οι τιμές των μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τις δυο εκσκαφές δε μπορούν να μας δώσουν μια απόλυτα αντιπροσωπευτική εικόνα για την εξέλιξη των μεγεθών. Παρόλα αυτά, παρατίθενται στη συνέχεια ενδεικτικά, τα διαγράμματα των μέσων μετακινήσεων και των μετακινήσεων που καταγράφηκαν στην οροφή των χαρακτηριστικών διατομών (Σχήμα 6.18 και Σχήμα 6.19). Η μετακίνηση είναι και στην περίπτωση αυτή η συνισταμένη της οριζόντιας, κάθετης στον άξονα μετακίνησης ( $u_1$ ) και της κατακόρυφης, κάθετης στον άξονα ( $u_3$ ) μετακίνησης.



Σχήμα 6.18 Κατανομή ανηγμένης μέσης μετακίνησης των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τη χαρακτηριστική διατομή του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη μετακίνηση του μονού κλάδου  $u_{average,(f/s)}/u_{average,single}$ , ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\rho_0$ , για  $W=0.5D=5m$ .



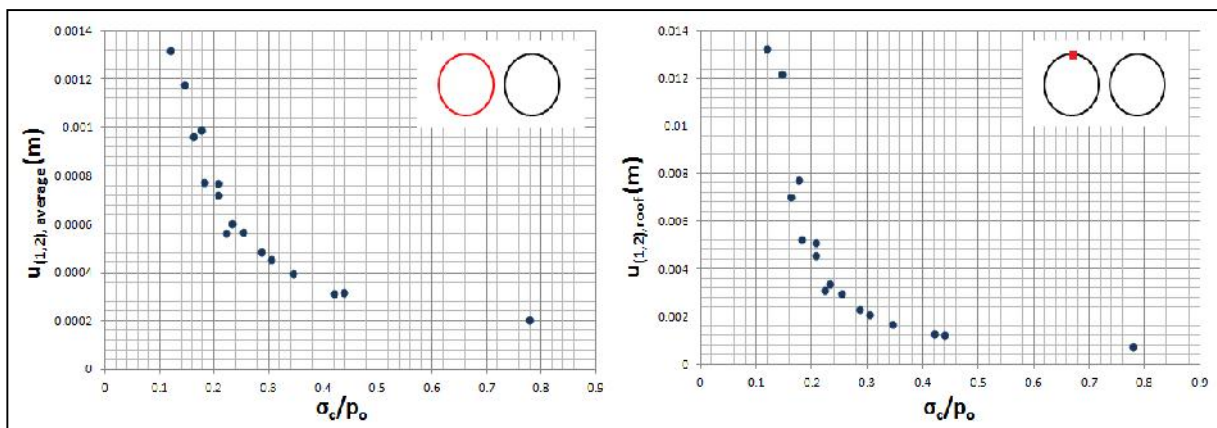
Σχήμα 6.19 Κατανομή ανηγμένης μέσης μετακίνησης των εδαφικών στοιχείων της οροφής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη μετακίνηση του μονού κλάδου  $u_{average,(f/s)}/u_{average,single}$ , ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\rho_0$ , για  $W=0.5D=5m$ .

Παρατηρούμε από τα παραπάνω σχήματα ότι οι κατανομές των μέσων μετακινήσεων και των μετακινήσεων της οροφής είναι της ίδιας μορφής και για του δυο κλάδους. Για τον πρώτο κλάδο, ο λόγος των μετακινήσεων είναι σταθερός, καθώς οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στον πρώτο κλάδο δεν επηρεάζονται από την εκσκαφή του δεύτερου κλάδου. Αντίθετα, ο λόγος των μετακινήσεων για τον δεύτερο κλάδο τείνει να μειώνεται καθώς βελτιώνεται η ποιότητα της βραχώμαζας. Παρατηρείται ότι ο λόγος των μετακινήσεων δεν τείνει στη μονάδα όπως θα ήταν



αναμενόμενο. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τιμές των μετακινήσεων για μεγάλους λόγους  $\sigma_c/\rho_o$  λαμβάνουν μικρές τιμές και συνεπώς ακόμα και μικρή διαφοροποίηση αυτών μπορεί να δώσει αυξημένους λόγους.

Στη προσπάθεια μας να αποκτήσουμε μια πιο σαφή εικόνα σχετικά με το μέγεθος των μετακινήσεων, κατασκευάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 6.20) που αναφέρονται στο πρώτο κλάδο εκσκαφής και παρουσιάζουν την κατανομή της μετακίνησης που προκαλεί ο δεύτερος κλάδος στα στοιχεία που περιβάλλουν τον πρώτο ( $u_{(1,2)}$ ) σε συνάρτηση με το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών. Οι τιμές της μετακίνησης αυτής ελήφθησαν με αφαίρεση των μετακινήσεων της μονής σήραγγας από τις μετακινήσεις που λαμβάνονται για τον πρώτο κλάδο της σήραγγας. Έτσι ήταν δυνατό να απομονωθούν οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στο πρώτο κατά τη διάνοιξη του δεύτερου. Σημειώνεται ότι οι τιμές των μετακινήσεων είναι αρκετά μικρές, καθώς οι μετακινήσεις του πρώτου κλάδου δεν επηρεάζονται έντονα από τη διάνοιξη του δεύτερου. Για το λόγο αυτό, αξίζει μόνο η ποιοτική μελέτη του φαινομένου. Η αντίστοιχη διαδικασία δεν ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί για το δεύτερο κλάδο της σήραγγας.



**Σχήμα 6.20 Κατανομή των μετακινήσεων του πρώτου κλάδου εξαιτίας της διάνοιξης του δεύτερου ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\rho_o$ , για  $W=0.5D=5m$ .**

Παρατηρούμε ότι αύξηση της ποιότητας της βραχώμαζας τείνει να μειώσει την επίδραση του δεύτερου κλάδου στον πρώτο.

### 6.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ

Σκοπός της παρούσας παραγράφου είναι η μελέτη της επίδρασης του πλάτους του πυλώνα στην ανάπτυξη των πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, καθώς επίσης και στην ανάπτυξη των μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης. Για το σκοπό πραγματοποιείται σύγκριση των αναπτυσσόμενων μεγεθών για τα τρία διαφορετικά πλάτη πυλώνα που εξετάστηκαν ( $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ ). Ύστερα από τη διαδικασία αυτή, είμαστε σε θέση να εξάγουμε κάποια πρώτα συμπεράσματα σχετικά με την ελάχιστη

εγκάρσια απόσταση των δυο κλάδων που απαιτείται, ώστε να μην υπάρχει καμία αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών.

### 6.3.1 Αναλύσεις με διαφορετικό πλάτος πυλώνα και ίδιες γεωτεχνικές συνθήκες

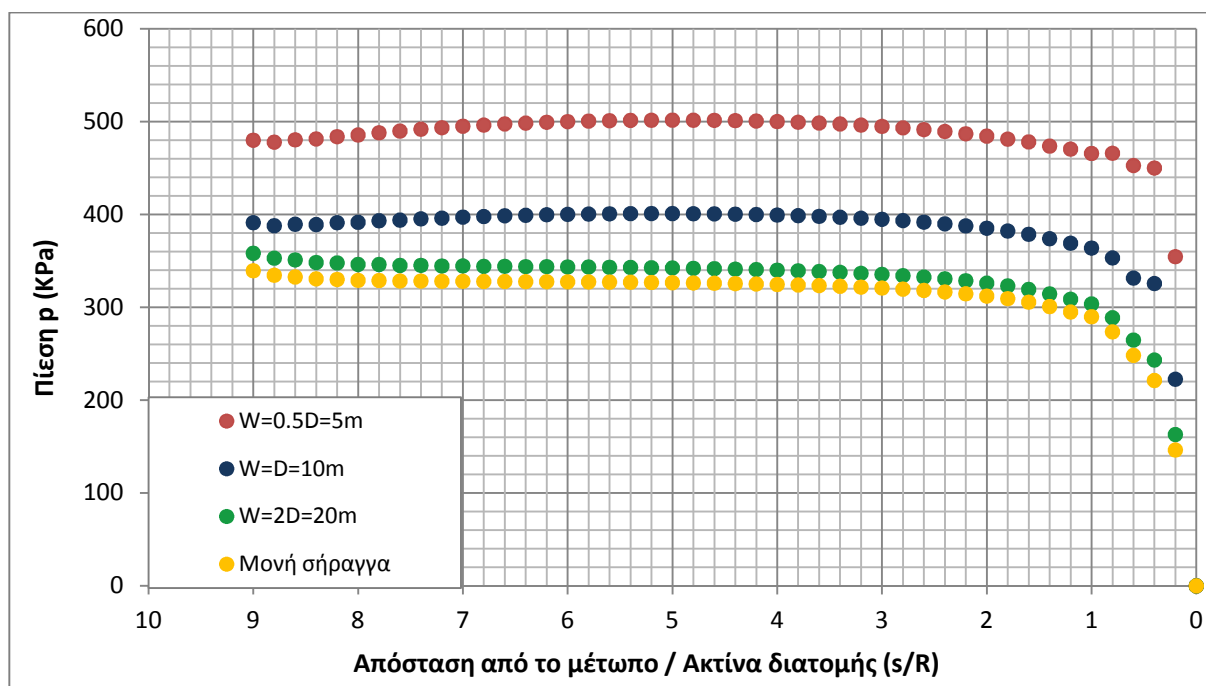
Στην παράγραφο αυτή, επιχειρείται να μελετηθεί η επίδραση της τιμής του πλάτους του πυλώνα στην εξέλιξη των μεγεθών των πιέσεων και των μετακινήσεων, όταν οι γεωτεχνικές παράμετροι παραμένουν αμετάβλητες. Η ανάλυση η οποία επιλέχθηκε να εξεταστεί διαθέτει τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες από το εύρος όσων μελετήθηκαν ( $c=40\text{KPa}$ ,  $\phi=23^\circ$ ,  $E=85\text{MPa}$ ,  $GSI=10$ ,  $\sigma_{ci}=8\text{MPa}$ ).

Σε κοινά διαγράμματα, τοποθετούνται οι κατανομές των φορτίσεων και των μετακινήσεων για τα τρία διαφορετικά πλάτη. Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμη η σύγκριση των αναπτυσσόμενων πιέσεων και μετατοπίσεων του κάθε κλάδου των τριών προσομοιωμάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που θα προέκυπταν στην περίπτωση όπου η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων θα ήταν μηδενική. Για το σκοπό αυτό στα παρακάτω διαγράμματα προστίθενται τα αποτελέσματα των φορτίσεων όπως προκύπτουν από τη διάνοιξη μονής σήραγγας, καθώς η περίπτωση αυτή θεωρείται ισοδύναμη με την περίπτωση όπου δεν υπάρχει καμία αλληλεπίδραση μεταξύ των κλάδων και αυτοί λαμβάνονται ως δυο ανεξάρτητες κατασκευές.

Εξετάζοντας το Σχήμα 6.21, όπου παρουσιάζονται οι κατανομές των πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, παρατηρούμε ότι για πλάτος πυλώνα  $W=0.5D=5\text{m}$  οι τιμές των αναπτυσσόμενων πιέσεων είναι αυξημένες σε σχέση με τις υπόλοιπες δυο περιπτώσεις. Το γεγονός αυτό είναι λογικό, καθώς το πλάτος του πυλώνα που διατίθεται είναι αρκετά μικρό και η βραχόμαζα που παρεμβάλλεται μεταξύ των κλάδων είναι αρκετά καταπονημένη. Συνεπώς, η διάνοιξη του δεύτερου κλάδου επιδρά έντονα στην ανάπτυξη των πιέσεων του πρώτου. Στη συνέχεια διαπιστώνεται ότι αύξηση της εγκάρσιας απόστασης των δυο κλάδων οδηγεί σε μείωση των τιμών των αναπτυσσόμενων πιέσεων. Επομένως, αύξηση της τιμής του πλάτους του πυλώνα συνεπάγεται σαφή μείωση της αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων.

Για πλάτος πυλώνα ίσο με  $2D$  η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων τείνει να ελαχιστοποιηθεί, καθώς οι τιμές των πιέσεων τείνουν να προσεγγίσουν εκείνες της μονής σήραγγας, παρόλα αυτά όμως δε μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.





**Σχήμα 6.21 Κατανομή των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, για τα τρία διαφορετικά προσομοιώματα ( $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ ).**

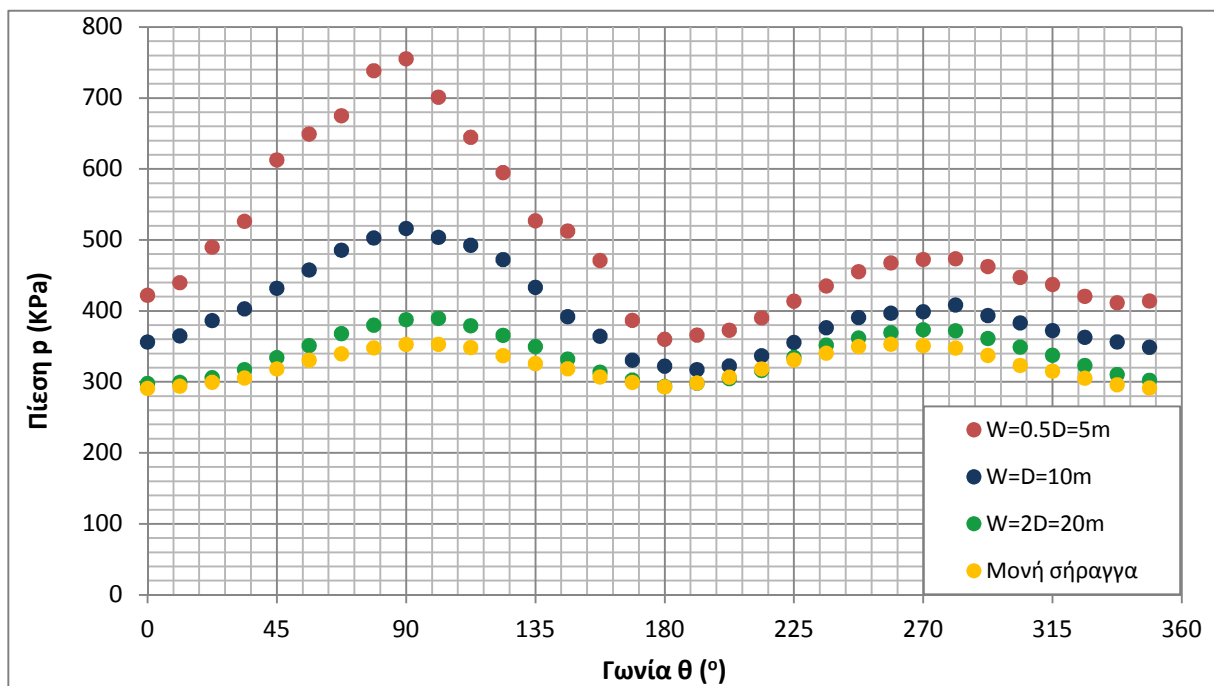
Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές της μέσης πίεσης της χαρακτηριστικής διατομής για κάθε ένα από τα διαφορετικά πλάτη πυλώνα. Ταυτόχρονα υπολογίζεται και η ποσοστιαία αύξηση αυτών σε σχέση με τη μέση πίεση που θα αναπτυσσόταν στην περίπτωση όπου δε θα υπήρχε καμία αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο κλάδων. Με τον τρόπο αυτό επιχειρείται να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της τιμής της εγκάρσιας απόστασης των δυο κλάδων.

**Πίνακας 6.7 Τιμές της μέσης πίεσης της χαρακτηριστικής διατομής για διαφορετικά πλάτη πυλώνα και για σταθερές γεωτεχνικές παραμέτρους.**

	Πίεση $p$ (KPa)	Αύξηση της μέσης πίεσης εξαιτίας της εκσκαφής δίδυμης σήραγγας (%)
$W=0.5D=5m$	497	35
$W=D=10m$	398	18
$W=2D=20m$	338	4.4
Μονή σήραγγα	323	-

Στην περίπτωση λοιπόν που η απόσταση των δυο κλάδων είναι αρκετά μικρή ( $W=0.5D=5m$ ) η μέση πίεση που αναπτύσσεται για τη χαρακτηριστική διατομή είναι ιδιαίτερα αυξημένη κατά 35% σε σχέση με την αντίστοιχη που θα αναπτυσσόταν όταν δε θα υπήρχε καμία αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο κλάδων. Το αντίστοιχο ποσοστό για  $W=2D=20m$  είναι ίσο με 4.4%. Πρακτικά δηλαδή, όταν η εγκάρσια απόσταση των δυο κλάδων είναι ίση με δυο διαμέτρους, τότε αυτοί μπορούν να λαμβάνονται ως δυο μεμονωμένες κατασκευές και ο σχεδιασμός τους να γίνεται σύμφωνα με τα φορτία που προβλέπεται να αναπτυχθούν σε μια σήραγγα μονού κλάδου, για τις δεδομένες γεωτεχνικές συνθήκες.

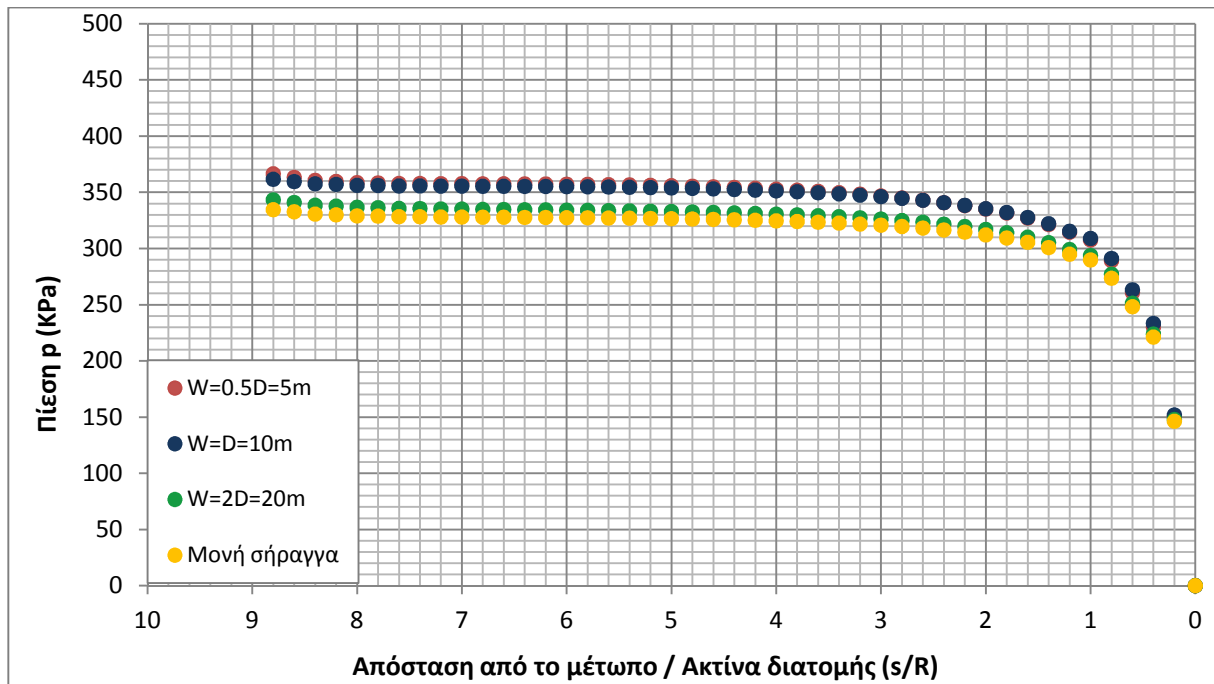
Όμοια είναι η τάση που επικρατεί και στην περίπτωση που εξετάζεται η κατανομή των αναπτυσσόμενων πιέσεων περί τη χαρακτηριστική διατομή του πρώτου κλάδου (Σχήμα 6.22). Παρατηρείται η έντονη ασυμμετρία της φόρτισης στην περίπτωση που το πλάτος του πυλώνα λαμβάνει την ελάχιστη από τις εξεταζόμενες τιμές ( $W=0.5D=5m$ ). Με αύξηση του πλάτους οι τιμές των αναπτυσσόμενων φορτίσεων τείνουν να λάβουν τις τιμές των αντίστοιχων πιέσεων της μονής σήραγγας και επιπρόσθετα η κατανομή της φόρτισης τείνει να γίνει απόλυτα συμμετρική. Τα φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα, καθώς αύξηση του πλάτους του πυλώνα συνεπάγεται μικρότερη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας κατά τη διάνοιξη και συνεπώς μικρότερη αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο κλάδων.



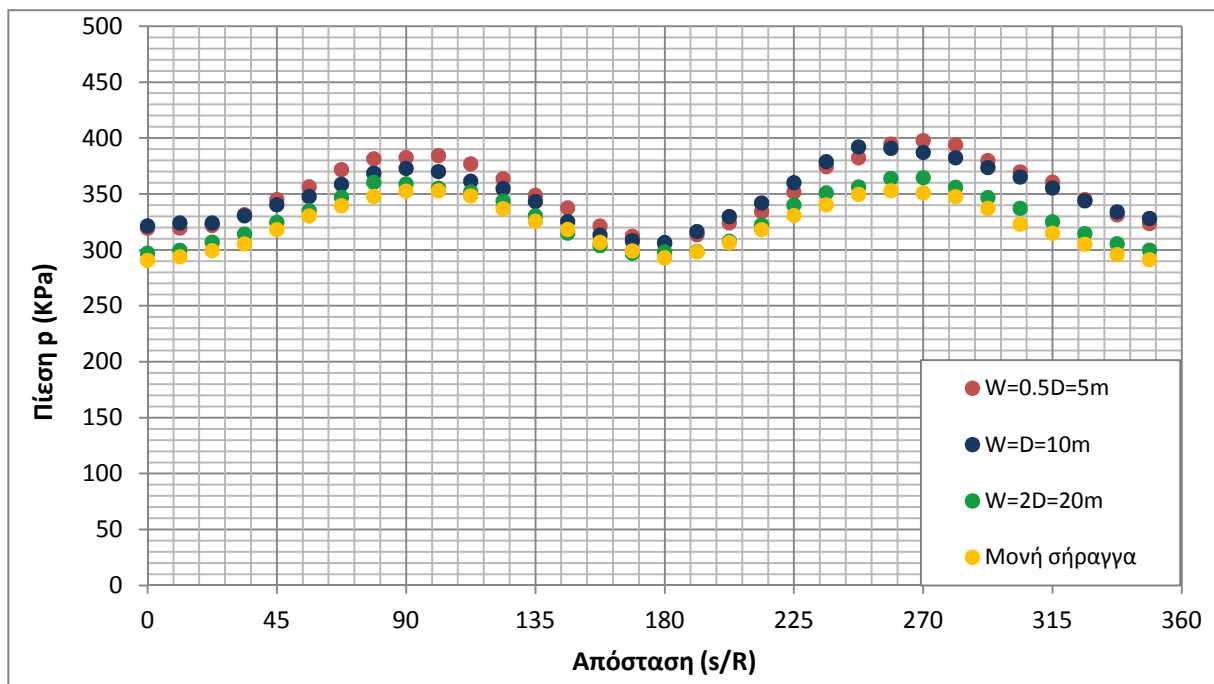
**Σχήμα 6.22** Κατανομή των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, περί τη χαρακτηριστική διατομή, για τα τρία διαφορετικά προσομοιώματα ( $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ ).

Παρατηρώντας στα ακόλουθα σχήματα την κατανομή των πιέσεων για τον δεύτερο κλάδο διάνοιξης, διαπιστώνεται ότι οι αναπτυσσόμενες πιέσεις επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης είναι σχεδόν ανεξάρτητες του πλάτους του πυλώνα, καθώς οι διαφοροποιήσεις για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις είναι αμελητέες. Αυτό συμβαίνει καθώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αλληλεπίδραση του πρώτου κλάδου στον δεύτερο εκφράζεται κυρίως σε όρους μετατοπίσεων.

Συνεπώς σύμφωνα με τα παραπάνω, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο πρώτος κλάδος απαιτεί την τοποθέτηση βαρύτερης άμεσης υποστήριξης σε σχέση με το δεύτερο όσο μειώνεται το πλάτος του πυλώνα, καθώς όπως φαίνεται για τις δεδομένες γεωτεχνικές συνθήκες το φαινόμενο της καταπόνησης του πρώτου κλάδου εξαιτίας της διάνοιξης του δεύτερου είναι εντονότερο από το φαινόμενο της διάνοιξης σήραγγας σε διαταραγμένη βραχώμαζα, πράγμα το οποίο υποθέτουμε ότι συμβαίνει κατά τη διάνοιξη του δεύτερου κλάδου.



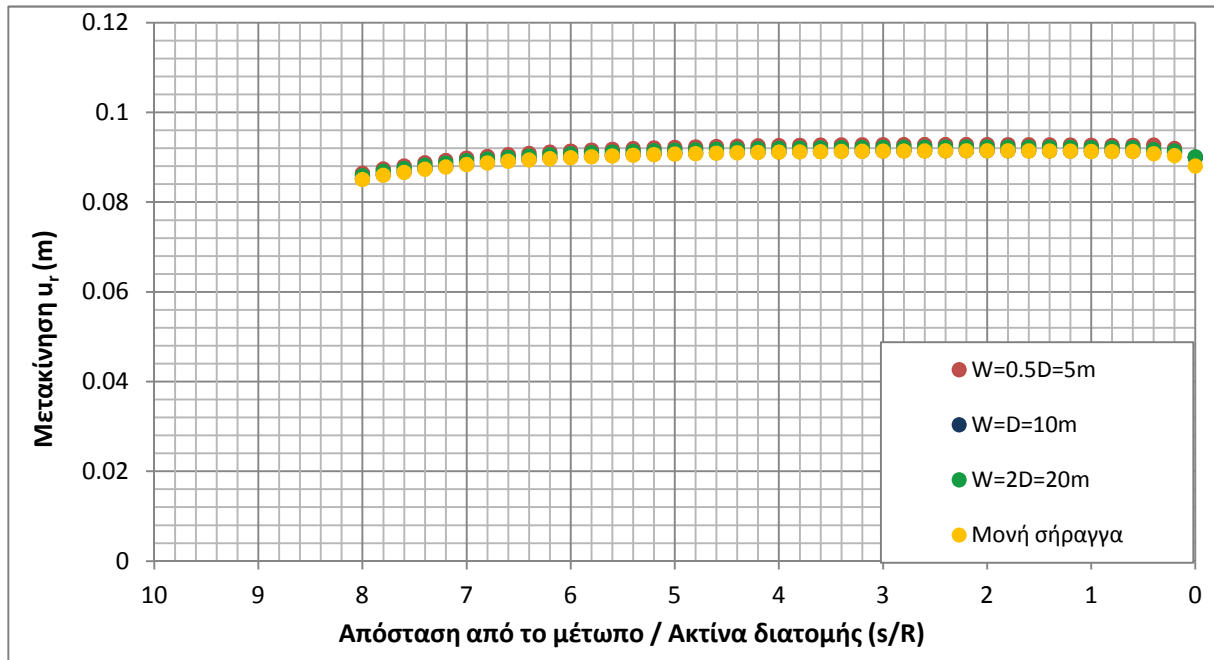
Σχήμα 6.23 Κατανομή των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του δεύτερου κλάδου, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, για τα τρία διαφορετικά προσομοιώματα ( $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ ).



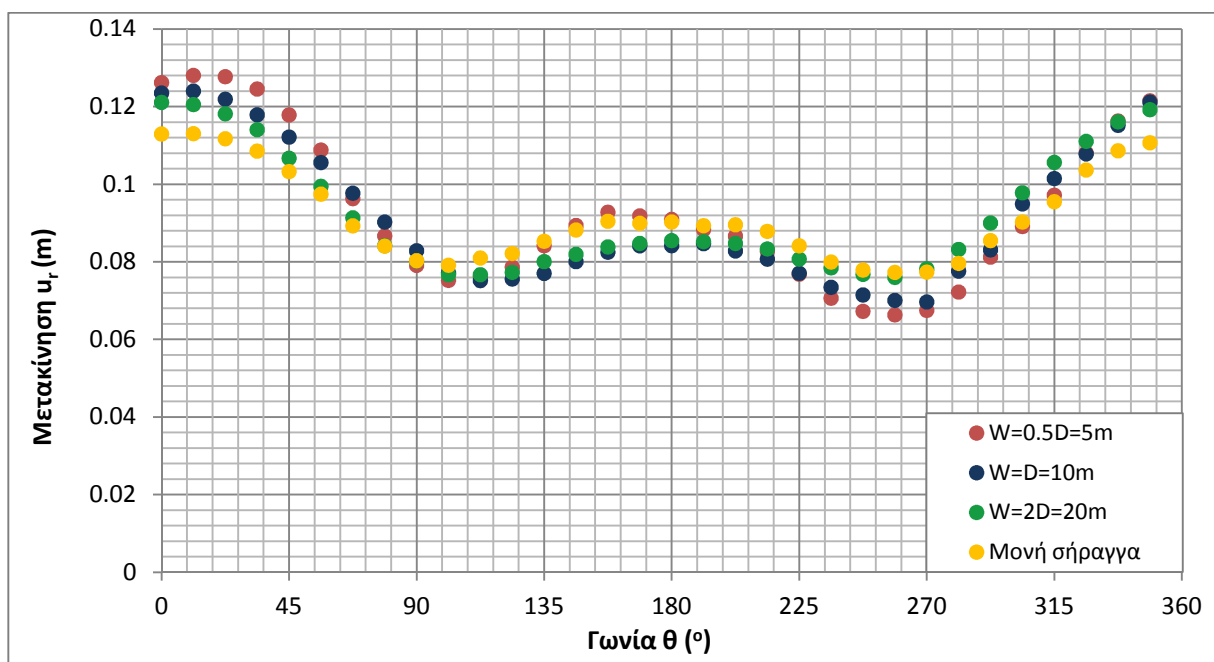
Σχήμα 6.24 Κατανομή των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του δεύτερου κλάδου, περί τη χαρακτηριστική διατομή, για τα τρία διαφορετικά προσομοιώματα ( $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ ).

Αναφορικά με το μέγεθος των μετακινήσεων, διαπιστώθηκε κατά τη μελέτη του μηχανισμού εξέλιξης των φορτίσεων για διάνοιξη δίδυμης σήραγγας, ότι για τον πρώτο κλάδο διάνοιξης το μέγεθος αυτό δεν επηρεάζεται έντονα από τη διάνοιξη του δεύτερου, καθώς η άμεση υποστήριξη εμποδίζει την εκτεταμένη ανάπτυξη των μετακινήσεων. Το φαινόμενο αυτό επιβεβαιώνεται και από τη μελέτη των διαγραμμάτων που ακολουθούν (Σχήμα 6.25 και Σχήμα 6.26). Στα διαγράμματα αυτά

παρουσιάζονται οι κατανομές των μετακινήσεων που αναπτύσσονται στο κέλυφος της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, τόσο μηκοτομικά όσο και εν διατομή. Οι αναπτυσσόμενες μετακινήσεις και για τα τρία διαφορετικά εξεταζόμενα πλάτη πυλώνα λαμβάνουν σχεδόν ίσες τιμές με αυτές που αναπτύσσονται κατά τη διάνοιξη μονής σήραγγας. Εξάγεται συνεπώς το συμπέρασμα ότι οι αναπτυσσόμενες μετακινήσεις του πρώτου κλάδου είναι πρακτικά ανεξάρτητες από την εγκάρσια απόσταση των δυο κλάδων.

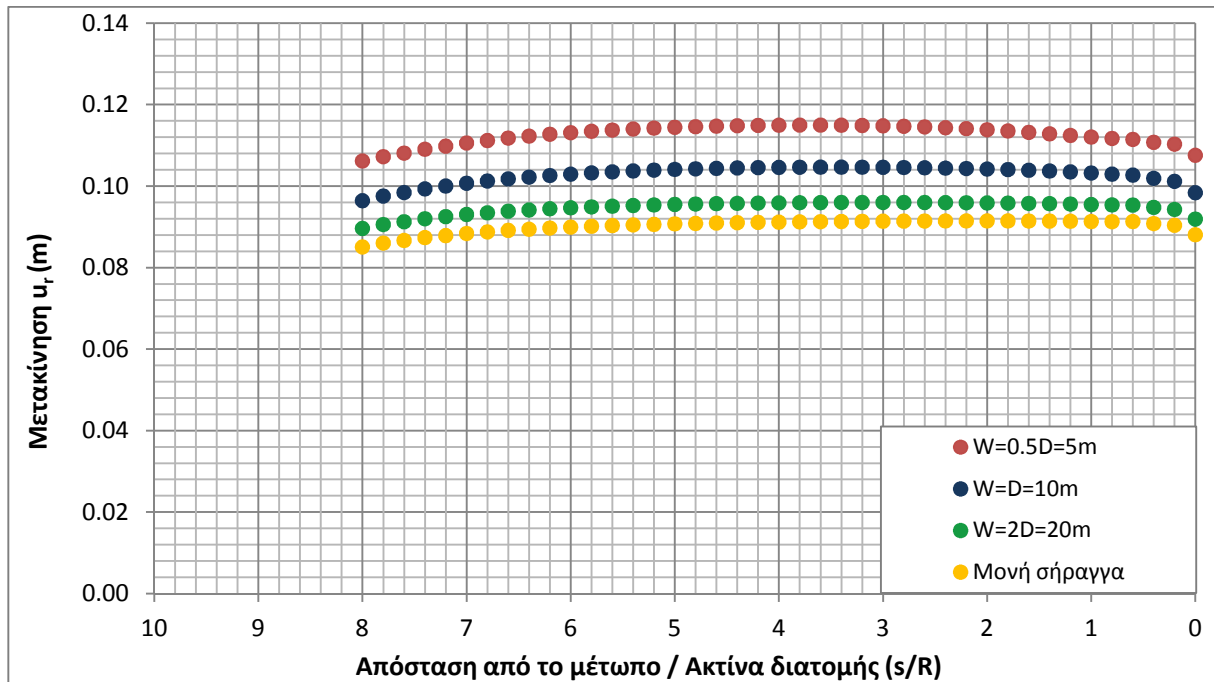


Σχήμα 6.25 Κατανομή, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, των αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων των στοιχείων που περιβάλλουν το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, για τα τρία διαφορετικά προσομοιώματα ( $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ ).



Σχήμα 6.26 Κατανομή, περί τη χαρακτηριστική διατομή, των αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων των στοιχείων που περιβάλλουν το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, για τα τρία διαφορετικά προσομοιώματα ( $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ ).

Αντίθετα για τον δεύτερο κλάδο διάνοιξης η επίδραση του πλάτους του πυλώνα στην ανάπτυξη των μετακινήσεων είναι εμφανής, καθώς οι τιμές των μετακινήσεων συμπεριλαμβάνουν, όπως έχει αναφερθεί, τις μετακινήσεις των στοιχείων που οφείλονται στην εκσκαφή του πρώτου κλάδου και δημιουργούνται πριν καν ξεκινήσει η εκσκαφή του δεύτερου. Όπως είναι λογικό, μείωση του πλάτους του πυλώνα αυξάνει αυτή τη συνιστώσα των μετακινήσεων και κατ' επέκταση και τις συνολικές μετακινήσεις. Η τάση αυτή αποτυπώνεται στο Σχήμα 6.27 που ακολουθεί.



Σχήμα 6.27 Κατανομή, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, των αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων των στοιχείων που περιβάλλουν το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης του δεύτερου κλάδου, για τα τρία διαφορετικά προσομοιώματα ( $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ ).

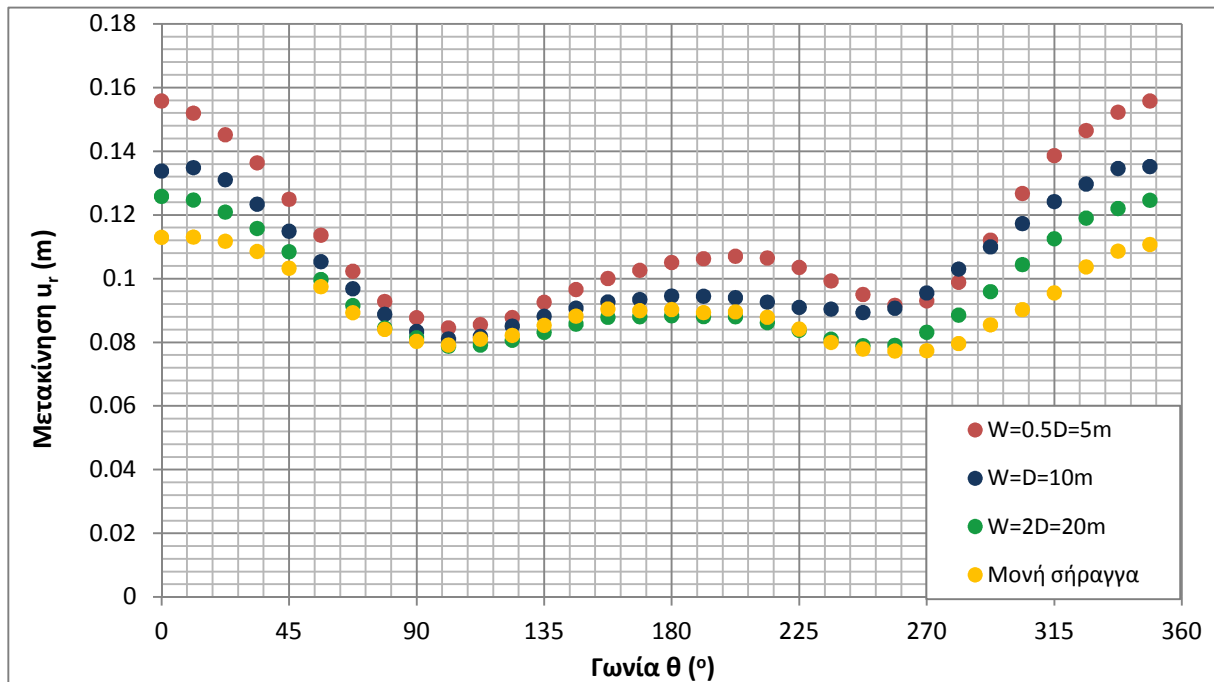
Μελετώντας τον παρακάτω πίνακα, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι, και από τη σκοπιά του μεγέθους των μετακινήσεων, για εγκάρσια απόσταση ίση με δυο διαμέτρους δεν υπάρχει πρακτικά καμία αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο κλάδων.

Πίνακας 6.8 Τιμές της μέσης μετακίνησης των εδαφικών στοιχείων της χαρακτηριστικής διατομής, για διαφορετικά πλάτη πυλώνα και σταθερές γεωτεχνικές παραμέτρους.

	Μετακίνηση $u$ (mm)	Αύξηση της μέσης πίεσης εξαιτίας της εκσκαφής δίδυμης σήραγγας (%)
$W=0.5D=5m$	112	18.8
$W=D=10m$	103	11.7
$W=2D=20m$	96	5.2
Μονή σήραγγα	91	-

Όπως παρατηρείται στο ακόλουθο διάγραμμα, η κατανομή των μετακινήσεων περί τη χαρακτηριστική διατομή παρουσιάζει έντονη ασυμμετρία καθώς το πλάτος του πυλώνα μειώνεται. Η ασυμμετρία αυτή είναι περισσότερο έντονη στην παρειά των 270°, αφού στη θέση αυτή η

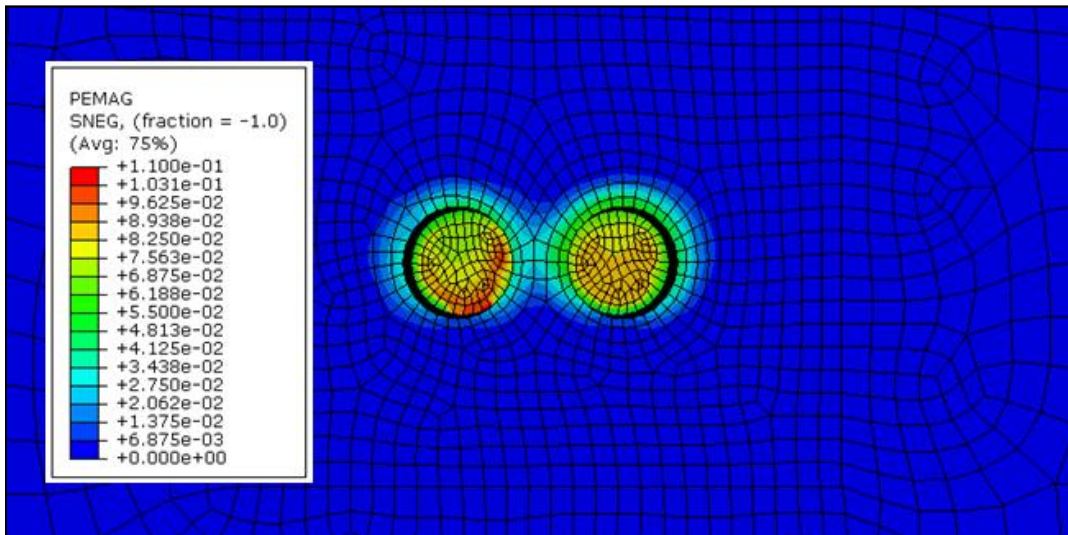
βραχόμαζα έχει καταπονηθεί εντονότερα από τη διάνοιξη του πρώτου κλάδου, σε σχέση με την παρειά των  $90^\circ$ .



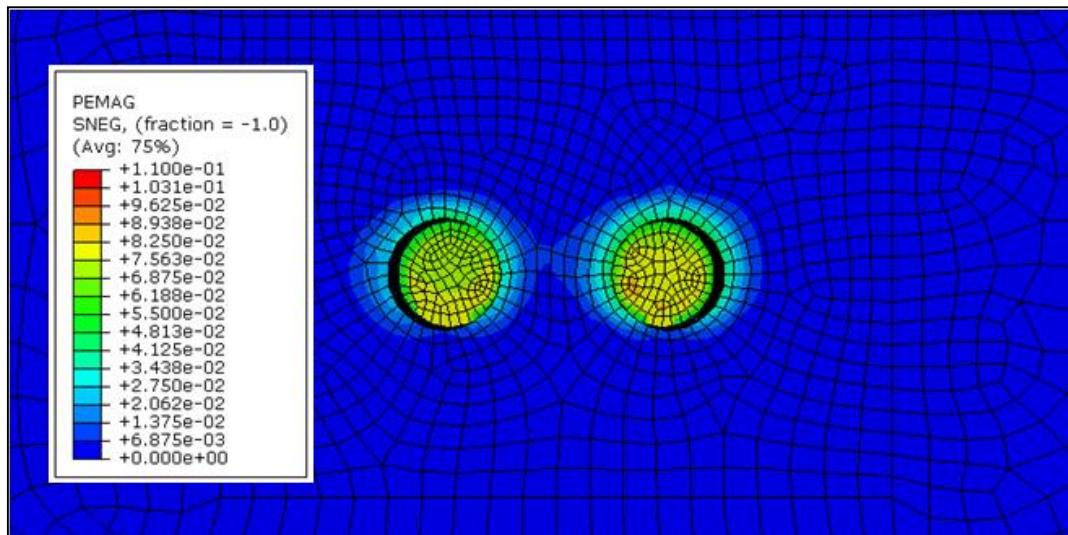
**Σχήμα 6.28 Κατανομή, περί τη χαρακτηριστική διατομή, των αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων των στοιχείων που περιβάλλουν το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης του δεύτερου κλάδου, για τα τρία διαφορετικά προσομοιώματα ( $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ ).**

Στο σημείο αυτό αξίζει να πραγματοποιηθεί μια σύγκριση του εύρους των πλαστικών ζωνών που αναπτύσσονται περί των διατομών της δίδυμης σήραγγας και για τα τρία πλάτη πυλώνα. Εξετάζοντας τα ακόλουθα σχήματα διαπιστώνουμε ότι για  $W=0.5D$  οι αναπτυσσόμενες πλαστικές ζώνες των δυο κλάδων αλληλεπικαλύπτονται και συνεπώς ο βαθμός αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων είναι σημαντικός. Αύξηση του πλάτους του πυλώνα ( $W=D$ ) οδηγεί στη μείωση του βαθμού αλληλεπίδρασης, παρόλα αυτά όμως παρατηρείται ότι ένα τμήμα των πλαστικών ζωνών είναι κοινό και για τους δυο κλάδους. Τέλος, περαιτέρω αύξηση του πλάτους ( $W=2D$ ) καθιστά τους δυο κλάδους δυο ανεξάρτητες κατασκευές.

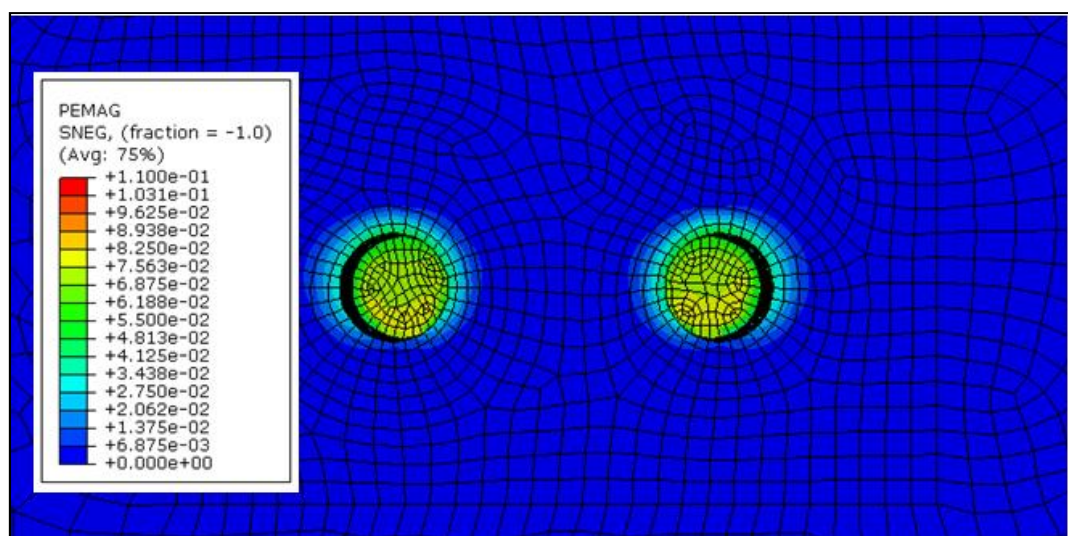




Σχήμα 6.29 Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων γύρω από τους κλάδους της δίδυμης σήραγγας για  $W=0.5D=5m$ .



Σχήμα 6.30 Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων γύρω από τους κλάδους της δίδυμης σήραγγας για  $W=D=10m$ .

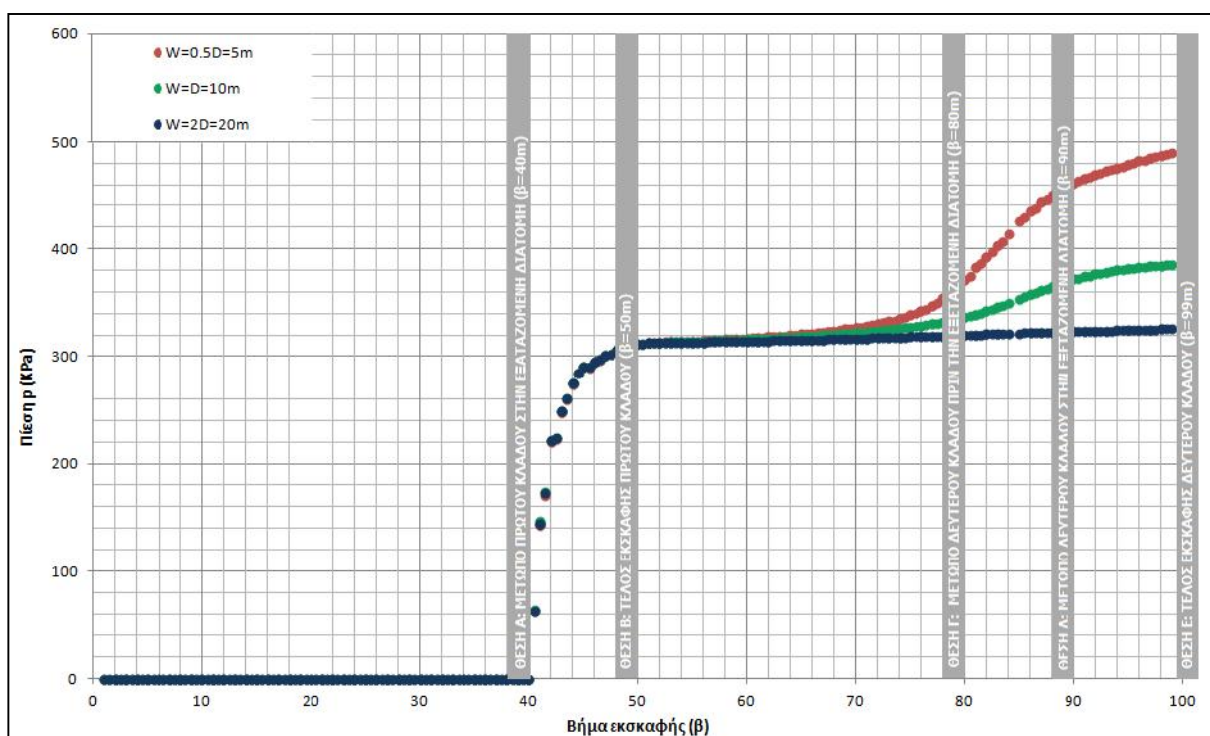


Σχήμα 6.31 Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων γύρω από τους κλάδους της δίδυμης σήραγγας για  $W=2D=20m$ .

Στη συνέχεια, για την καλύτερη ερμηνεία του φαινομένου, επιλέχθηκε η παρουσίαση της εξέλιξης των εξεταζόμενων φορτίσεων για μια συγκεκριμένη διατομή, κατά τη διάρκεια της εκσκαφής και για τα τρία αριθμητικά προσομοιώματα. Οι διατομές που επιλέχθηκαν απέχουν απόσταση ίση με 40m από την είσοδο της σήραγγας (όμοια με την Παράγραφο 5.1.2). Η διατομή του πρώτου κλάδου αντιστοιχεί στο 40° βήμα εκσκαφής (Διατομή Α), ενώ αυτή του δεύτερου στο 90° βήμα (Διατομή Β).

Στα διαγράμματα λοιπόν που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των πιέσεων και οι μέσες τιμές των μετακινήσεων (συνισταμένη των μετακινήσεων  $u_1$  και  $u_2$ ) σε συνάρτηση με τα βήματα της εκσκαφής, για κάθε κλάδο ξεχωριστά και για τα τρία αριθμητικά μοντέλα.

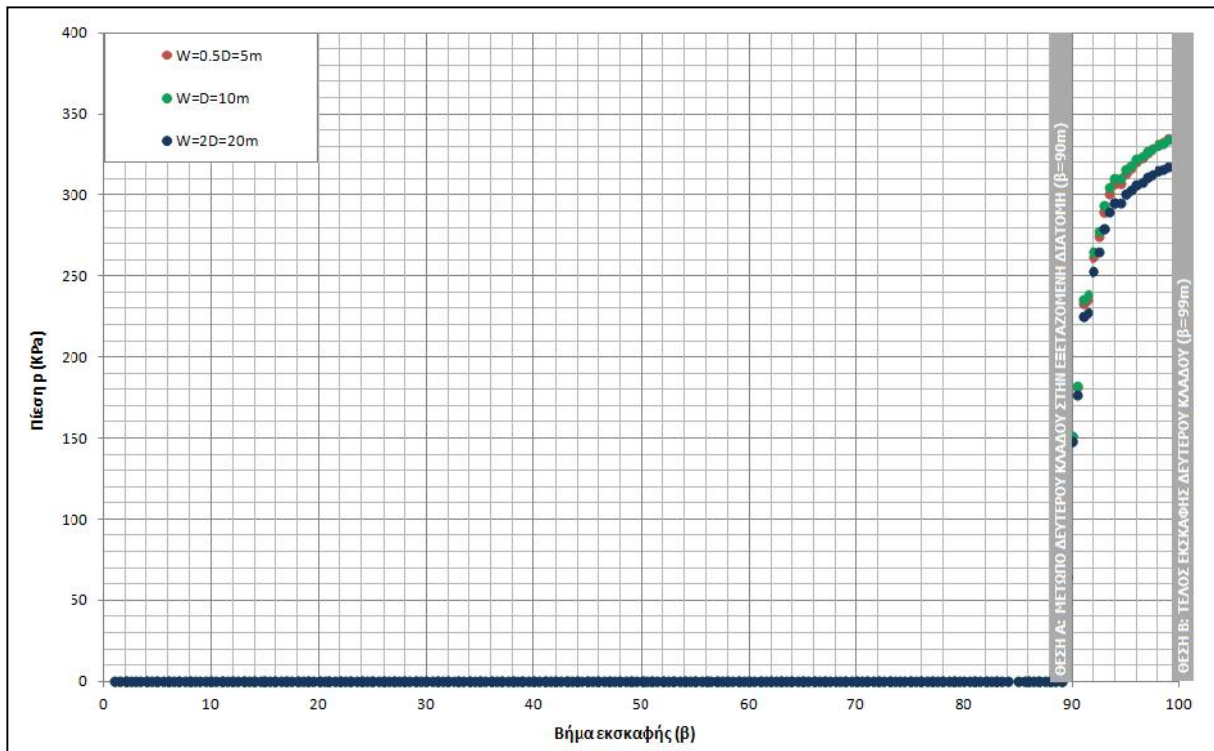
Για τη διατομή του πρώτου κλάδου (Σχήμα 6.32), παρατηρείται ότι ενώ η πορεία της φόρτισης είναι ποιοτικά ίδια, ποσοτικά παρατηρούνται μεγάλες διαφοροποιήσεις. Μείωση του πλάτους του πυλώνα συνεπάγεται αύξηση των τιμών της μέσης πίεσης σε κάθε στάδιο της εκσκαφής. Ιδιαίτερα έντονη είναι η επίδραση του πλάτους του πυλώνα στο μέγεθος των πιέσεων αν παρατηρήσουμε τις καμπύλες στο τμήμα που παρεμβάλλεται μεταξύ των θέσεων Γ και Δ. Διαπιστώνουμε ότι τη στιγμή που η εκσκαφή του δεύτερου κλάδου πλησιάζει την εξεταζόμενη διατομή του πρώτου, η αύξηση στην τιμή των πιέσεων είναι αξιοσημείωτη για την περίπτωση όπου ισχύει  $W=0.5D=5m$ , ενώ αντίθετα σχεδόν αμελητέα για την περίπτωση όπου ισχύει  $W=2D=20m$ . Συνεπώς διαπιστώνουμε πως για  $W>2D$  οι δυο κλάδοι μπορούν να θεωρηθούν πλέον ως δυο ανεξάρτητες κατασκευές.



**Σχήμα 6.32** Εξέλιξη της αναπτυσσόμενης μέσης πίεσης επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, κατά τη συνολική διάρκεια εκσκαφής, για διατομή η οποία βρίσκεται σε απόσταση 40m από την είσοδο της σήραγγας και για  $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ .

Όπως έχει ήδη διαπιστωθεί, η μεταβολή του πλάτους του πυλώνα έχει αμελητέα επίδραση στην ανάπτυξη των πιέσεων του δεύτερου κλάδου εκσκαφής της δίδυμης σήραγγας. Για το λόγο αυτό οι

τελικές τιμές της μέσης πίεσης της διατομής Β παρουσιάζουν αμελητέα διαφοροποίηση για μεταβολή της τιμής της εγκάρσιας απόστασης των δυο κλάδων. Ωστόσο παρατηρείται ότι οι τελικές τιμές των πιέσεων είναι ελαφρώς αυξημένες σε σχέση με αυτές της πρώτης διατομής που κατεγράφησαν, στο προηγούμενο διάγραμμα, κατά το τέλος της εκσκαφής του πρώτου κλάδου (Θέση Β). Το γεγονός αυτό μαρτυρά την έντονη καταπόνηση της βραχόμαζας στην οποία διανοίγεται ο δεύτερος κλάδος, εξαιτίας της διάνοιξης της πρώτης. Ουσιαστικά μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο δεύτερος κλάδος διανοίγεται σε βραχόμαζα «πτωχότερης ποιότητας».

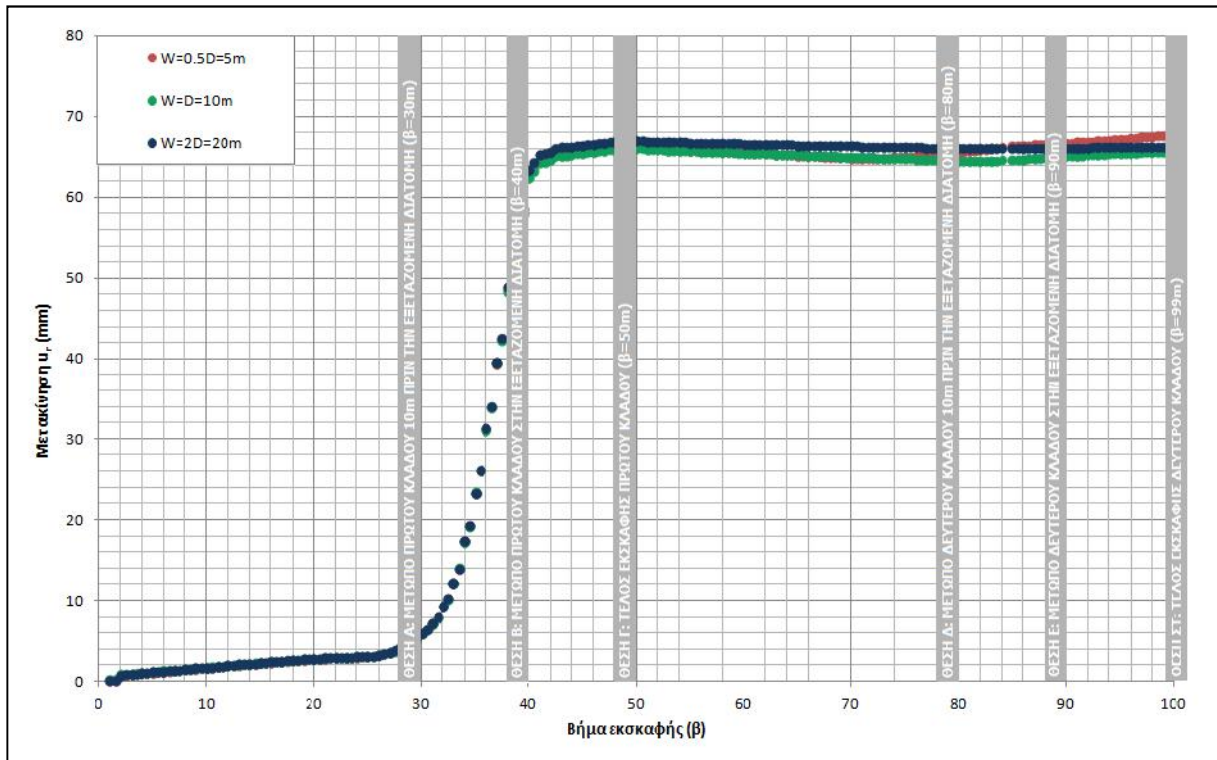


**Σχήμα 6.33** Εξέλιξη της αναπτυσσόμενης μέσης πίεσης επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του δεύτερου κλάδου, κατά τη συνολική διάρκεια εκσκαφής, για διατομή η οποία βρίσκεται σε απόσταση 40m από την είσοδο της σήραγγας και για  $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ .

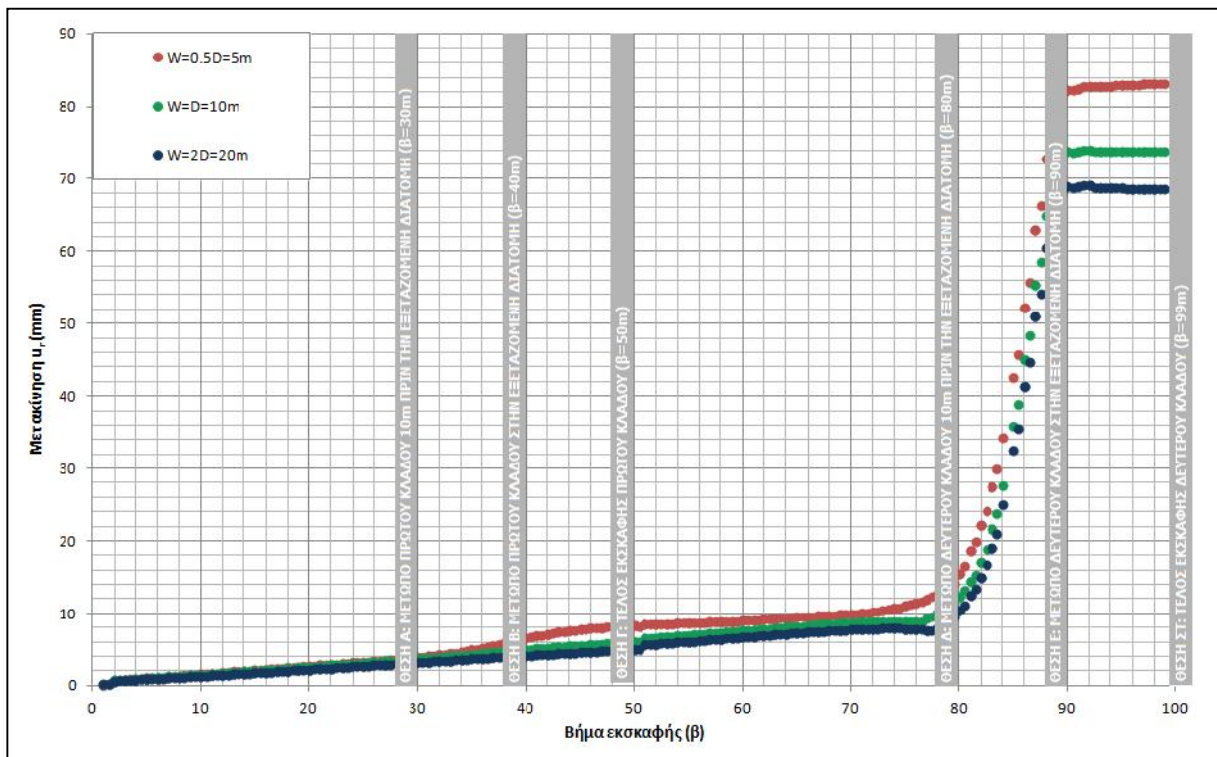
Αναφορικά με το μέγεθος των μετακινήσεων, όπως έχει ήδη διαπιστωθεί, οι αναπτυσσόμενες μετακινήσεις του πρώτου κλάδου δεν επηρεάζονται από τη διέλευση του δεύτερου. Για το λόγο αυτό, όπως είναι προφανές και στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 6.34), η εξέλιξη της τιμής της μέσης μετακίνησης της διατομής Α είναι σχεδόν ανεξάρτητη από το πλάτος του πυλώνα.

Αντίθετα, οι αναπτυσσόμενες μετακινήσεις του δεύτερου κλάδου διαφοροποιούνται με μεταβολή του πλάτους του πυλώνα (Σχήμα 6.35), καθώς όσο μικρότερη είναι η εγκάρσια απόσταση των δυο κλάδων τόσο πιο διαταραγμένη είναι και η βραχόμαζα στην οποία διανοίγεται ο δεύτερος. Έτσι ακόμα και από τη στιγμή που ο πρώτος κλάδος προσεγγίζει τη διατομή Β (Θέση Α) αρχίζει να γίνεται εμφανής η επίδραση της τιμής του πλάτους του πυλώνα στην εξέλιξη της μέσης μετακίνησης. Η επίδραση αυτή συνεχίζει να υφίσταται και να γίνεται πιο έντονη με την ολοκλήρωση της εκσκαφής.





Σχήμα 6.34 Εξέλιξη, κατά τη συνολική διάρκεια εκσκαφής, της μέσης μετακίνησης των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τη διατομή του πρώτου κλάδου που βρίσκεται σε απόσταση 40m από την είσοδο της σήραγγας, για  $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ ..

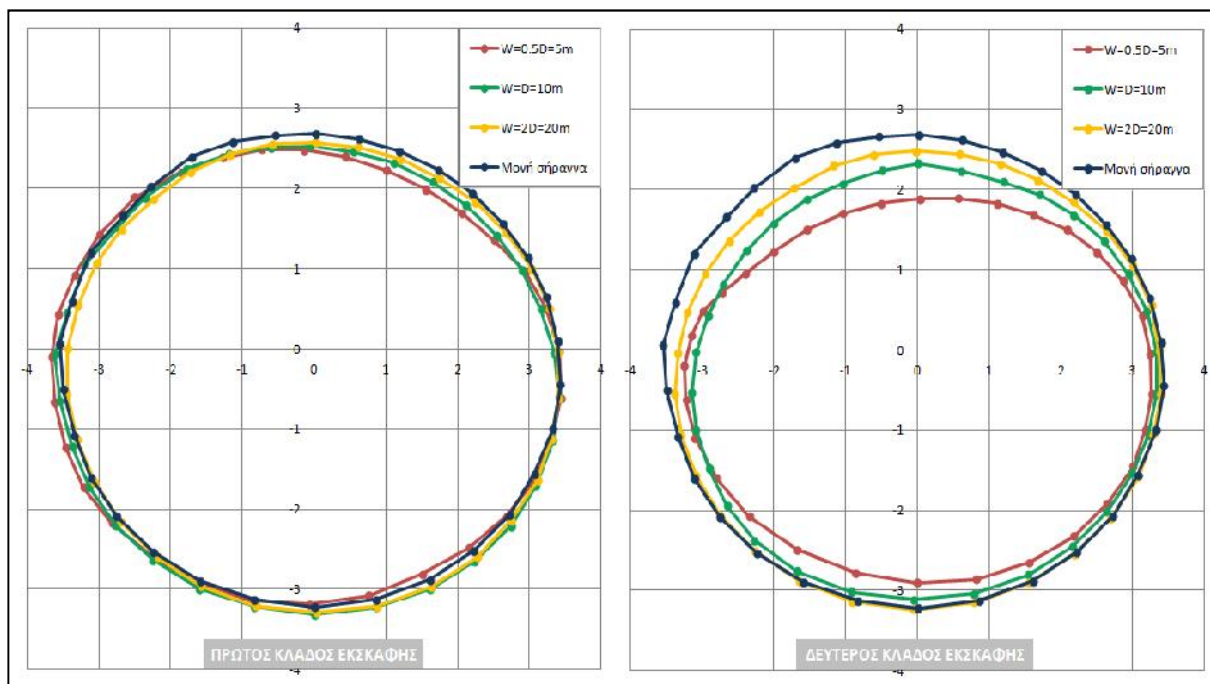


Σχήμα 6.35 Εξέλιξη, κατά τη συνολική διάρκεια εκσκαφής, της μέσης μετακίνησης των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τη διατομή του δεύτερου κλάδου που βρίσκεται σε απόσταση 40m από την είσοδο της σήραγγας, για  $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ .

Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται η παραμόρφωση των χαρακτηριστικών διατομών των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας αμέσως μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής της, για τις δεδομένες γεωτεχνικές συνθήκες και για τα τρία εξεταζόμενα πλάτη πυλώνα. Σε κοινό διάγραμμα εμφανίζεται και η παραμόρφωση της χαρακτηριστικής διατομής της μονής σήραγγας, έτσι ώστε να είναι πιο εμφανής η επίδραση της εγκάρσιας απόστασης των δυο κλάδων στην παραμόρφωση των διατομών. Προκειμένου η παραμόρφωση να είναι πιο ευδιάκριτη, οι παραμορφωμένες διατομές σχεδιάστηκαν υπό κλίμακα.

Για τον πρώτο κλάδο εκσκαφής, παρατηρείται ότι η τιμή της εγκάρσιας απόστασης επιδρά ελάχιστα στην παραμόρφωση της διατομής. Οι παραμορφωμένες διατομές που αντιστοιχούν στον πρώτο κλάδο της δίδυμης σήραγγας χάνουν τη συμμετρία τους και διαφοροποιούνται από την παραμορφωμένη διατομή που αντιστοιχεί στη μονή σήραγγα, ωστόσο η διαφοροποίηση αυτή δεν είναι σημαντική. Το φαινόμενο αυτό είναι εύλογο, καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί το κλειστό κέλυφος της δύσκαμπτης υποστήριξης παρεμποδίζει την ανάπτυξη των μετακινήσεων που τείνουν να προκληθούν από την εκσκαφή του δεύτερου κλάδου. Η τιμή του συντελεστή των οριζοντίων τάσεων ( $K=0.7 < 1$ ) δικαιολογεί την εντονότερη καταπόνηση της οροφής της διατομής.

Αντίθετα για τον δεύτερο κλάδο εκσκαφής, παρατηρείται ότι η τιμή της εγκάρσιας απόστασης επιδρά έντονα στην παραμόρφωση της διατομής. Αναλυτικότερα, για μικρή εγκάρσια απόσταση των δυο κλάδων ( $W=0.5D=5m$ ) η παραμόρφωση της διατομής είναι αισθητά αυξημένη σε σχέση με την αντίστοιχη της μονής σήραγγας. Η εντονότερη καταπόνηση σημειώνεται στην οροφή της διατομής, καθώς ο συντελεστής οριζοντίων τάσεων είναι ίσος με 0.7 ( $K=0.7 < 1$ ). Επιπρόσθετα, τα εδαφικά στοιχεία της εσωτερικής παρειάς ( $\theta=270^\circ$ ) εκδηλώνουν μεγαλύτερες μετακινήσεις σε σχέση με αυτά της αριστερής, καθώς η βραχώμαζα που περιβάλλει την εσωτερική παρειά είναι εντονότερα καταπονημένη και διαταραγμένη από τη διάνοιξη του πρώτου κλάδου. Αύξηση του πλάτους του πυλώνα ( $W=D=10m$ ) συνεπάγεται μείωση της σύγκλισης της διατομής, χωρίς όμως η παραμόρφωση να είναι αμελητέα. Περεταίρω αύξηση του πλάτους του πυλώνα ( $W=2D=20m$ ) οδηγεί σε μείωση του βαθμού αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων και συνεπώς η σύγκλιση της διατομής τείνει να γίνει συμμετρική και όμοια με αυτή που θα σημειωνόταν στην περίπτωση που ο βαθμός αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων θα ήταν μηδενικός (περίπτωση μονής σήραγγας).



Σχήμα 6.36 Παραμόρφωση της χαρακτηριστικής διατομής των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας, για  $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ .

### 6.3.2 Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στη παράγραφο αυτή επιχειρείται η καλύτερη ερμηνεία του φαινομένου της επίδρασης του πλάτους του πυλώνα στην αλληλεπίδραση των δυο κλάδων κατά τη διάνοιξη της δίδυμης σήραγγας. Για το σκοπό αυτό παρατίθενται τα ακόλουθα διαγράμματα, στα οποία απεικονίζεται το μέγεθος των πιέσεων και των μετακινήσεων των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας ( $p, u$ ) ανηγμένα ως προς το αντίστοιχο μέγεθος της μονής σήραγγας συναρτήσει του λόγου ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών ( $\sigma_c/\rho_0$ ), και για τις τρεις διαφορετικές τιμές του πλάτους του πυλώνα που εξετάσαμε.

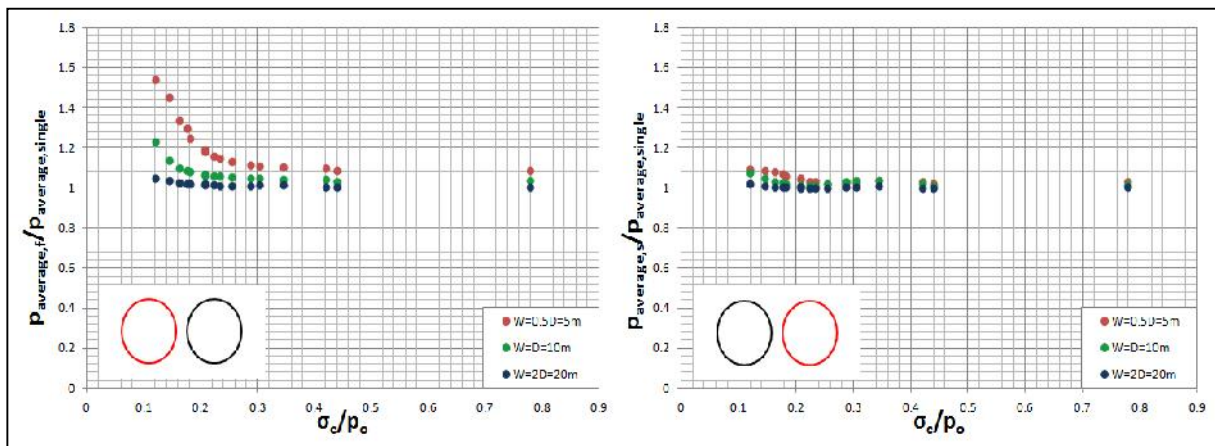
Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας για της αναλύσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε με τον τύπο που προτείνεται από τους Hoek & Diederichs (2006), καθώς αυτός δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα.

Μελετώντας τις κατανομές των λόγων των μέσων πιέσεων (Σχήμα 6.40), είναι προφανές ότι μείωση του πλάτους της βραχόμαζας που παρεμβάλλεται μεταξύ των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας προκαλεί αύξηση των τιμών των πιέσεων που αναπτύσσονται περί των κελυφών της άμεσης υποστήριξης. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή του λόγου των πιέσεων για  $W=2D$  είναι περίπου ίση με 1.05 (η τιμή αυτή δηλώνει πολύ μικρή αλληλεπίδραση), ενώ η αντίστοιχη τιμή για την περίπτωση όπου ισχύει  $W=0.5D$  είναι περίπου ίση με 1.6 (τιμή που δηλώνει σημαντική αλληλεπίδραση των δυο κλάδων). Παρατηρείται, επιπρόσθετα, ότι οι λόγοι των μέσων πιέσεων για τα τρία διαφορετικά πλάτη διαφοροποιούνται λιγότερο έντονα και τείνουν να λάβουν την τιμή της μονάδας, καθώς η ποιότητα της περιβάλλουσας βραχόμαζας βελτιώνεται. Το φαινόμενο αυτό είναι φυσιολογικό,



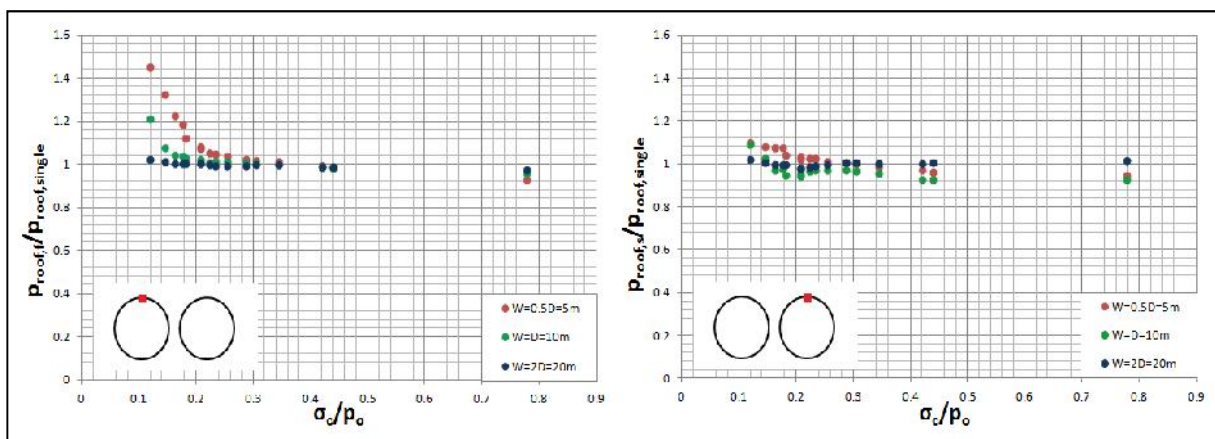
καθώς βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών συνεπάγεται μείωση της διατάραξης της βραχώμαζας κατά τη διάνοιξη. Συνοψίζοντας, διαπιστώνεται ότι η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων γίνεται λιγότερο έντονη καθώς αυξάνεται η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των δυο κλάδων και καθώς βελτιώνεται η ποιότητα της βραχώμαζας στην οποία πραγματοποιείται η διάνοιξη.

Σε όλα τα διαγράμματα αυτής της κατηγορίας, παρατηρείται ότι το εύρος του λόγου των πιέσεων του πρώτου κλάδου είναι πιο διευρυμένο σε σχέση με το αντίστοιχο του δεύτερου, γεγονός που επιβεβαιώνει για ακόμα μια φορά την εντονότερη καταπόνηση του κελύφους του πρώτου κλάδου, από άποψη πιέσεων.



Σχήμα 6.37 Κατανομή ανηγμένης μέσης πίεσης επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου  $P_{average,(f/s)}/P_{average,single}$ , ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\rho_o$ , για  $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ .

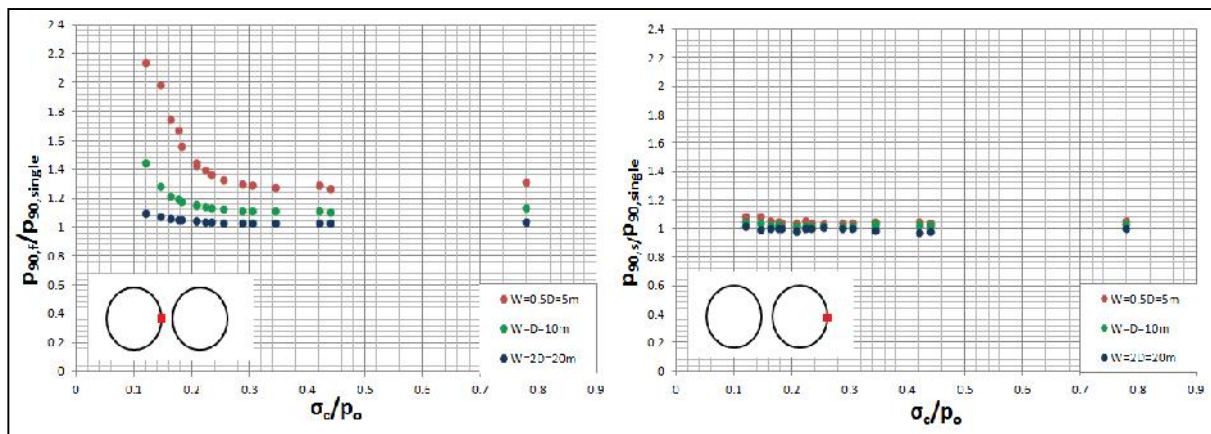
Ανάλογες με τις κατανομές των μέσων πιέσεων παρουσιάζονται και οι κατανομές των πιέσεων που αναπτύσσονται στην οροφή των διατομών (Σχήμα 6.38).



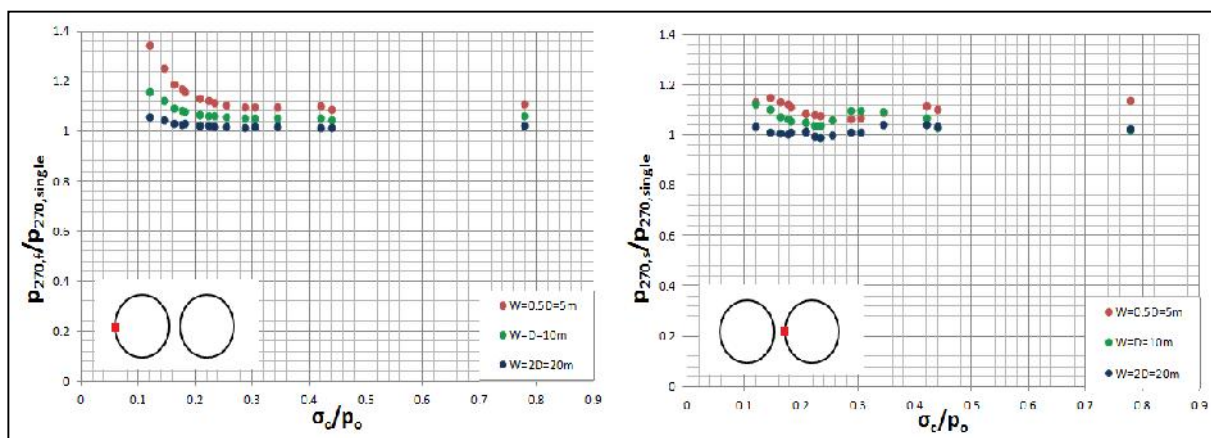
Σχήμα 6.38 Κατανομή ανηγμένης πίεσης της οροφής της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου  $P_{roof,(f/s)}/P_{roof,single}$ , ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\rho_o$ , για  $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ .

Εξετάζοντας τώρα τις κατανομές των πιέσεων στην δεξιά παρειά των κλάδων ( $\theta=90^\circ$ ), είναι αξιοσημείωτο να αναφερθεί ότι ο λόγος των πιέσεων στη παρειά των  $90^\circ$  του πρώτου κλάδου λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με τους αντίστοιχους λόγους της μέσης πίεσης, της οροφής

και της παρειάς των 270°. Το φαινόμενο αυτό είναι εύλογο, αφού η παρειά αυτή είναι η εσωτερική του πρώτου κλάδου, συνεπώς καταπονείται περισσότερο κατά τη διάνοιξη του δεύτερου. Το ανάλογο φαινόμενο σε μικρότερη όμως κλίμακα παρατηρείται για την παρειά των 270° της διατομής του δεύτερου κλάδου (Σχήμα 6.40).



Σχήμα 6.39 Κατανομή ανηγμένης πίεσης της δεξιάς παρειάς ( $\theta=90^\circ$ ) της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου  $P_{90,(f/s)}/P_{90,single}$ , ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\rho_0$ , για  $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ .

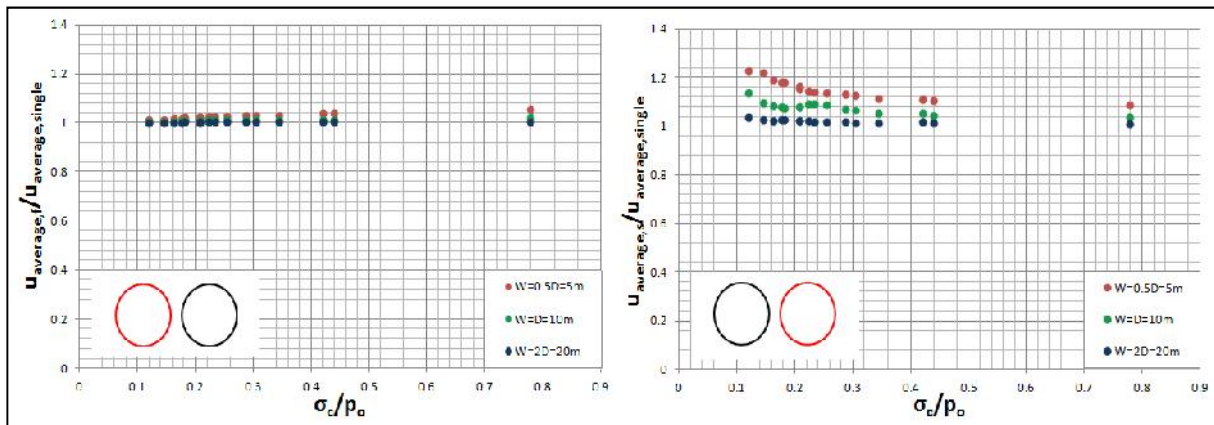


Σχήμα 6.40 Κατανομή ανηγμένης πίεσης της αριστερής παρειάς της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου  $P_{270,(f/s)}/P_{270,single}$ , ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\rho_0$ , για  $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ .

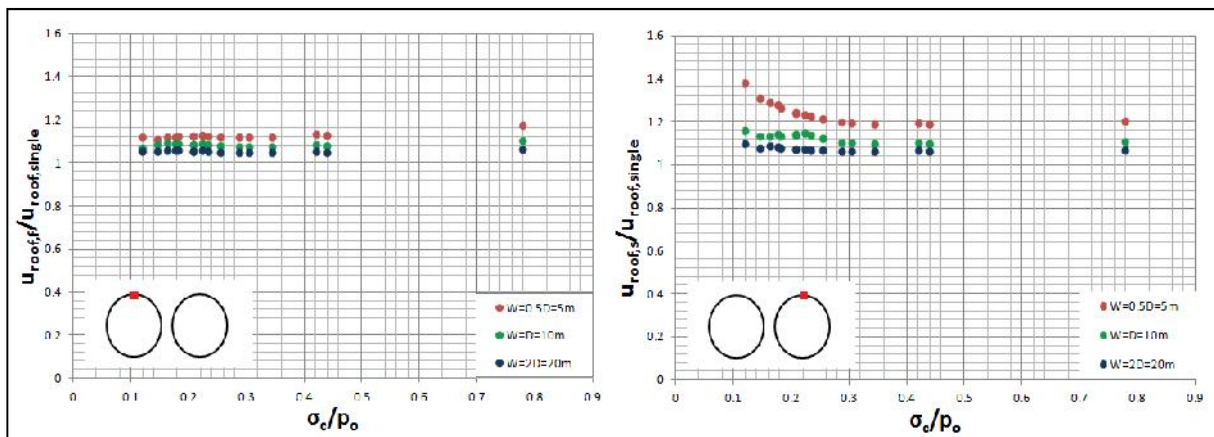
Σχετικά με την επίδραση της τιμής του πλάτους του πυλώνα στην ανάπτυξη των μετακινήσεων δεν μπορούμε να εξάγουμε σαφή συμπεράσματα, καθώς όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνουμε από το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων τα αποτελέσματα των μετακινήσεων για τον ένα κλάδο δε μας βοηθά να διαχωρίσουμε τις μετακινήσεις που δημιουργούνται εξαιτίας της εκσκαφής του ίδιου και του γειτονικού του.

Παρόλα αυτά επικρατεί η τάση της μείωσης των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων με αύξηση της εγκάρσιας απόστασης των δυο κλάδων. Στη συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικά τα διαγράμματα της ανοιγμένης μέσης μετατόπισης και της ανηγμένης μετατόπισης στην οροφή των χαρακτηριστικών διατομών σε συνάρτηση με το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών για τα τρία πλάτη

πυλώνα. Σημειώνεται ότι το πλάτος του πυλώνα επιδρά μόνο στην εξέλιξη των μετακινήσεων του δεύτερου κλάδου.



Σχήμα 6.41 Κατανομή ανηγμένης μέσης μετακίνησης των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τη χαρακτηριστική διατομή του πρώτου κλάδου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη μετακίνηση του μονού κλάδου  $u_{\text{average}(f,s)}/u_{\text{average,single}}$ , ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\rho_0$ , για  $W=0.5D=5\text{m}$ ,  $W=D=10\text{m}$ ,  $W=2D=20\text{m}$ .



Σχήμα 6.42 Κατανομή ανηγμένης μετακίνησης των εδαφικών στοιχείων που βρίσκονται στην οροφή της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου κλάδου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη μετακίνηση του μονού κλάδου  $u_{\text{roof}(f,s)}/u_{\text{roof,single}}$ , ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\rho_0$ , για  $W=0.5D=5\text{m}$ ,  $W=D=10\text{m}$ ,  $W=2D=20\text{m}$ .

#### 6.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Όπως είναι γνωστό, η σημασία της τιμής του μέτρου ελαστικότητας είναι ιδιαίτερη, λόγω μικρών αστοχιών που ενδέχεται να λάβουν χώρα κατά τη διάνοιξη. Σημειώνεται πως αρκετές είναι οι εξισώσεις που έχουν προταθεί για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας. Κάποιες από αυτές οδηγούν σε υπερεκτίμηση της τιμής της παραμέτρου, ενώ άλλες οδηγούν σε μια πιο συντηρητική θεώρηση αυτής.

Προκειμένου να μελετήσουμε την επίδραση του μέτρου ελαστικότητας στην εξέλιξη των φορτίσεων και των μετακινήσεων, κατά την εκσκαφή δίδυμης σήραγγας, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός της παραμέτρου αυτής σύμφωνα με τους τύπους που έχουν προταθεί από τους Hoek

(2002) και Hoek & Diederichs (2006). Ο δεύτερος παράγει συνδυασμούς παραμέτρων με μικρότερες τιμές, συγκριτικά με τον πρώτο.

Έτσι για κάθε ένα από τα ζεύγη των γεωτεχνικών παραμέτρων που μελετήθηκαν ( $c'$ ,  $\phi'$ ) πραγματοποιήθηκαν δυο αναλύσεις για τις οποίες ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας πραγματοποιήθηκε με τις δυο εξισώσεις στις οποίες έγινε αναφορά.

#### 6.4.1 Αναλύσεις με διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας και ίδιες γεωτεχνικές συνθήκες

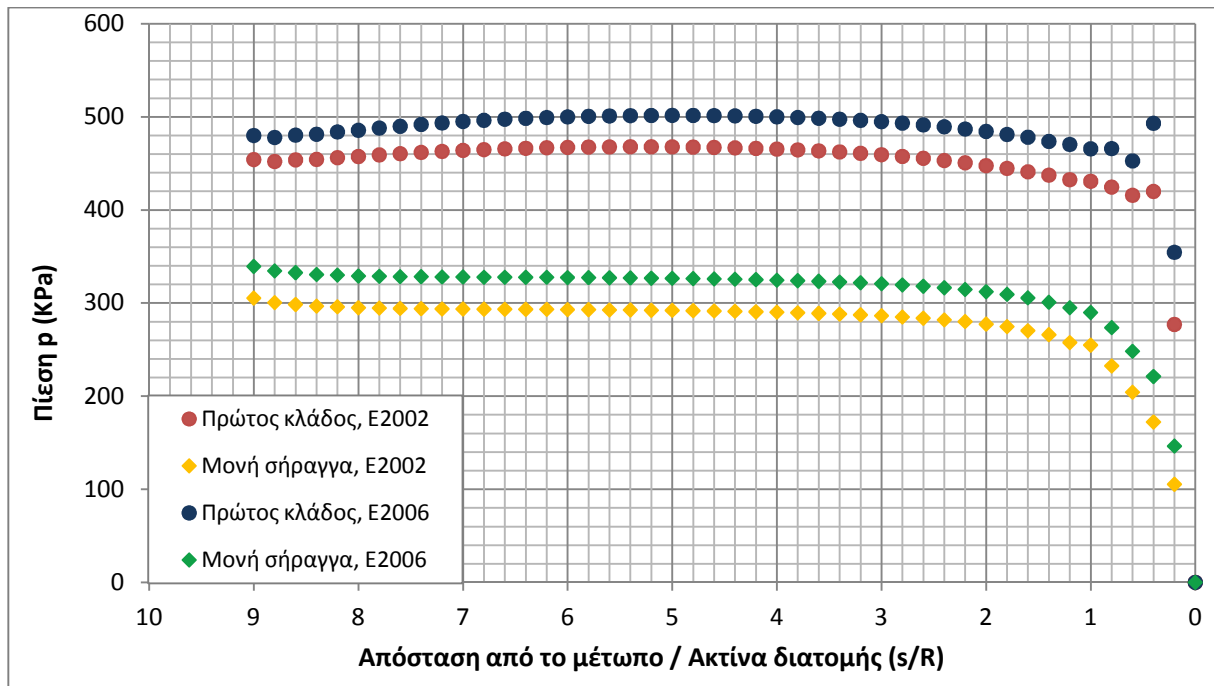
Σε πρώτο στάδιο, κρίθηκε σκόπιμη η παρουσίαση των κατανομών των πιέσεων και των μετακινήσεων δυο αναλύσεων για τις οποίες διατηρούνται σταθερές οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων ( $c=40\text{Kpa}$  και  $\phi=23^\circ$ ) και μεταβάλλεται το μέτρο ελαστικότητας ( $E=282\text{MPa}$  κατά Hoek και  $E=85\text{MPa}$  κατά Hoek & Diederichs). Οι αναλύσεις αντιστοιχούν σε αριθμητικό προσομοίωμα που διαθέτει πλάτος πυλώνα ίσο με  $5m=0.5D$ .

**Πίνακας 6.9 Τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων των δυο αναλύσεων που διαθέτουν διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.**

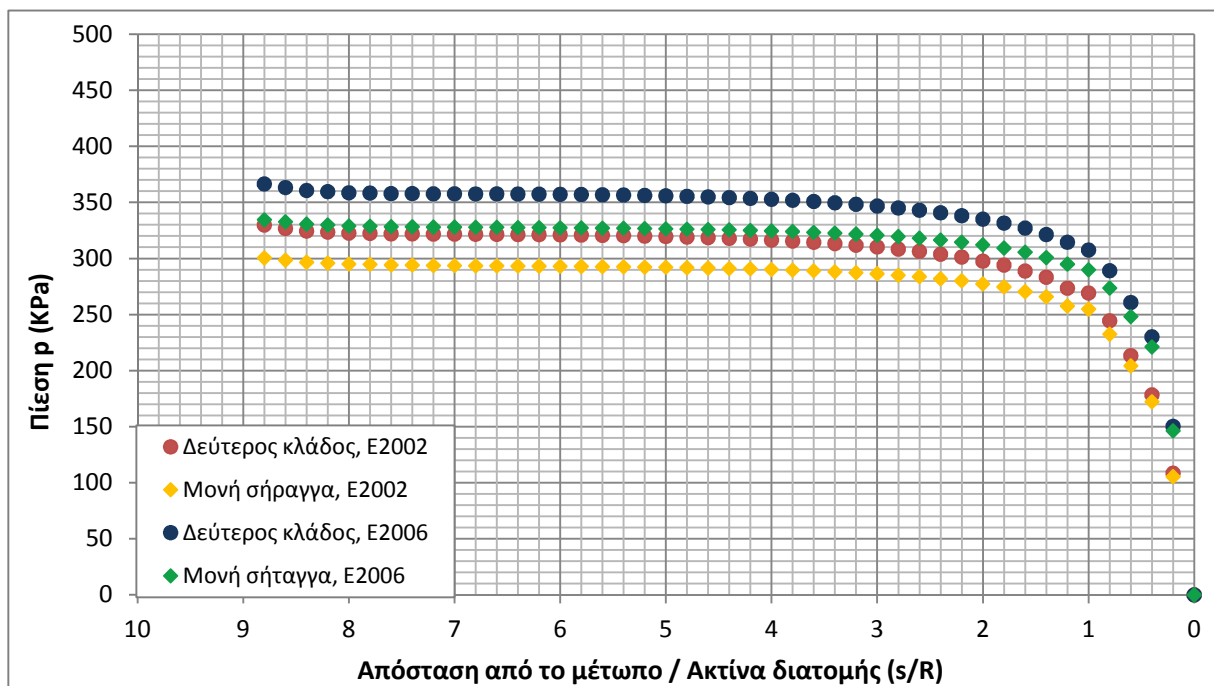
	Ανάλυση I	Ανάλυση II
Γεωλογικός δείκτης ανοχής GSI	10	10
Ισοδύναμη συνοχή $c$ (Kpa)	40	40
Ισοδύναμη γωνία τριβής $\phi$ ( $^\circ$ )	23	23
Μέτρο ελαστικότητας $E$ (MPa)	282	85
$\sigma_{cm}/\rho_o$	0.37	0.37
$\sigma_c/\rho_o$	0.12	0.12

Στο Σχήμα 6.43 παρουσιάζονται οι κατανομές του πρώτου κλάδου για τις δυο αναλύσεις με διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας. Σε κοινό διάγραμμα παρατίθενται και οι κατανομές των μεγεθών που αντιστοιχούν στην περίπτωση μονής σήραγγας, για τις δυο αντίστοιχες περιπτώσεις. Συγκρίνοντας έτσι τις τιμές του πρώτου κλάδου με τις τιμές της μονής σήραγγας και για τις δυο αναλύσεις, ποσοτικοποιείται η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας στη ανάπτυξη των πιέσεων. Στη συνέχεια, το Σχήμα 6.44 απεικονίζει τις κατανομές των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του δεύτερου κλάδου.





Σχήμα 6.43 Σύγκριση των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου διάνοιξης, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, για  $W=5m$ , ίδιες γεωτεχνικές συνθήκες και διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.



Σχήμα 6.44 Σύγκριση των αναπτυσσόμενων πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του δεύτερου κλάδου διάνοιξης, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, για  $W=5m$ , ίδιες γεωτεχνικές συνθήκες και διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.

Μελετώντας τα παραπάνω σχήματα διαπιστώνεται, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι οι αναπτυσσόμενες πιέσεις επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης για μειωμένο μέτρο ελαστικότητας είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που αναφέρονται σε μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται, και για τα δυο διαφορετικά μέτρα

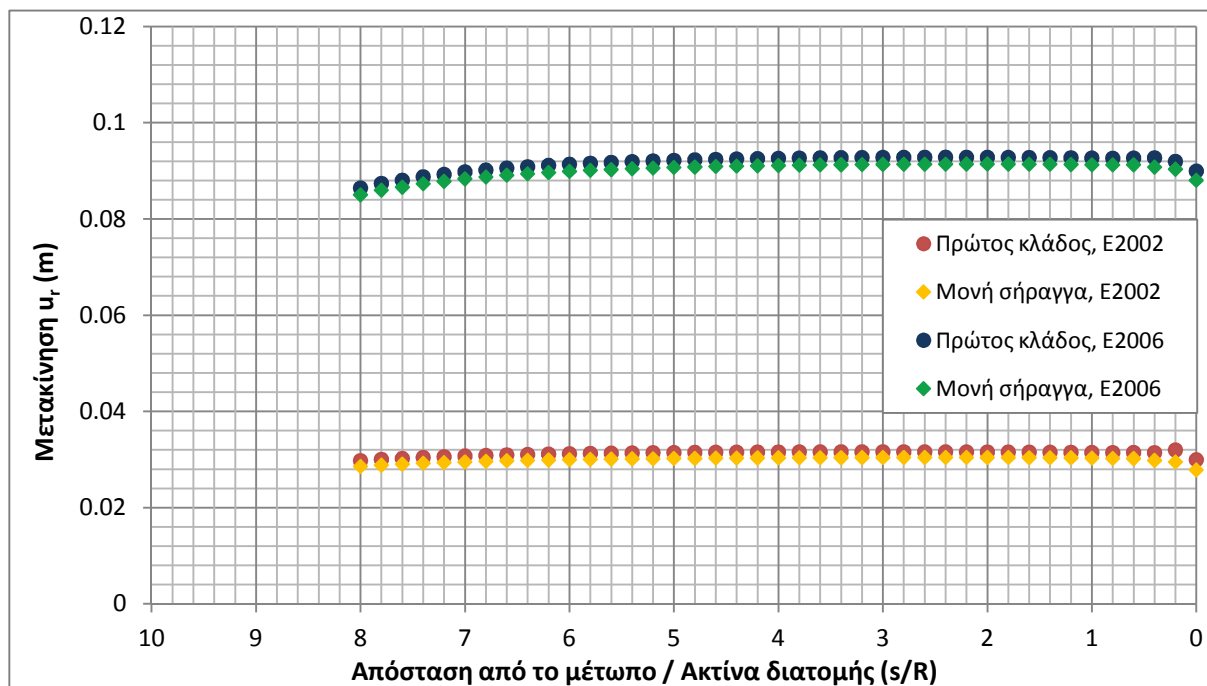
ελαστικότητας, οι τιμές των μέσων πιέσεων των χαρακτηριστικών διατομών του πρώτου και του δεύτερου κλάδου, καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή αυτών και της τιμής της πίεσης για τη χαρακτηριστική διατομή μονής σήραγγας.

**Πίνακας 6.10 Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας στις αναπτυσσόμενες μέσες φορτίσεις, των χαρακτηριστικών διατομών της δίδυμης σήραγγας.**

Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	Πίεση $p$ (Kpa)			Ποσοστιαία μεταβολή (%)	
	Μονή σήραγγα (single)	Πρώτος κλάδος δίδυμης σήραγγας (f)	Δεύτερος κλάδος δίδυμης σήραγγας (s)	$(p_f - p_{single})/p_f$	$(p_s - p_{single})/p_s$
282	289	462	316	37	8.5
85	323	497	351	35	8

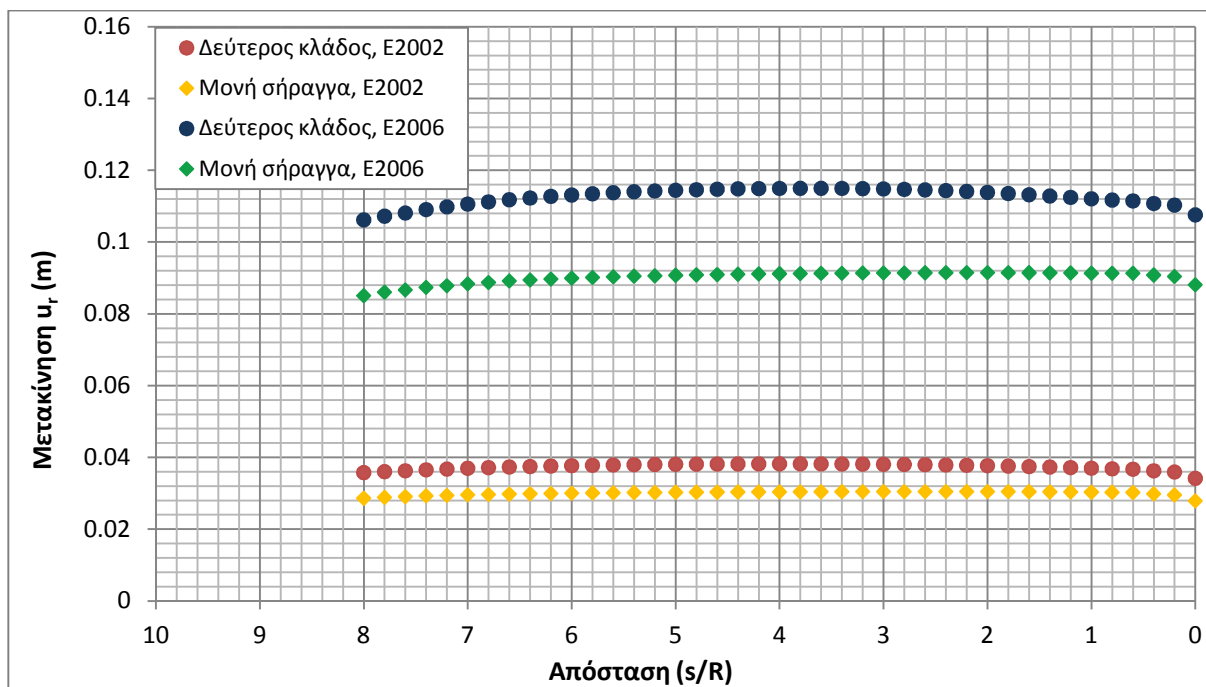
Παρατηρούμε ότι μείωση του μέτρου ελαστικότητας κατά 70% δεν επιφέρει τεράστιες ποσοστιαίες μεταβολές, καθώς οι τιμές των πιέσεων της μονής σήραγγας αυξάνονται σχεδόν ανάλογα με αυτές που αντιστοιχούν στους δυο κλάδους της δίδυμης σήραγγας. Μπορούμε λοιπόν να συμπεράνουμε ότι το μέτρο ελαστικότητας δεν αποτελεί μια τόσο ευαίσθητη παράμετρο για το μέγεθος των πιέσεων.

Στη συνέχεια (Σχήμα 6.45 και Σχήμα 6.46) παρουσιάζονται οι μετακινήσεις των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τον πρώτο και τον δεύτερο κλάδο για τις δυο αναλύσεις που διαθέτουν ίδιες γεωτεχνικές παραμέτρους και διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.



**Σχήμα 6.45 Σύγκριση, κατά μήκος του διανοιχθέντος τμήματος, των μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τον πρώτο κλάδο διάνοιξης, για  $W=5m$ , ίδιες γεωτεχνικές συνθήκες και διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.**





Σχήμα 6.46 Σύγκριση των μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν το δεύτερο κλάδο διάνοιξης, για W=5m, ίδιες γεωτεχνικές συνθήκες και μεταβαλλόμενο μέτρο ελαστικότητας.

Εξετάζοντας τις ποσοστιαίες μεταβολές που παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί, διαπιστώνουμε πως μείωση του μέτρου ελαστικότητας κατά 70% δεν επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις στις μετακινήσεις που αναπτύσσονται στην περίπτωση της μονής και στην περίπτωση της δίδυμης σήραγγας. Συνεπώς και για το μέγεθος των μετακινήσεων το μέτρο ελαστικότητας δεν αποτελεί ευαίσθητη παράμετρο.

Πίνακας 6.11 Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας στις μετακινήσεις των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τις χαρακτηριστικές διατομές της δίδυμης σήραγγας.

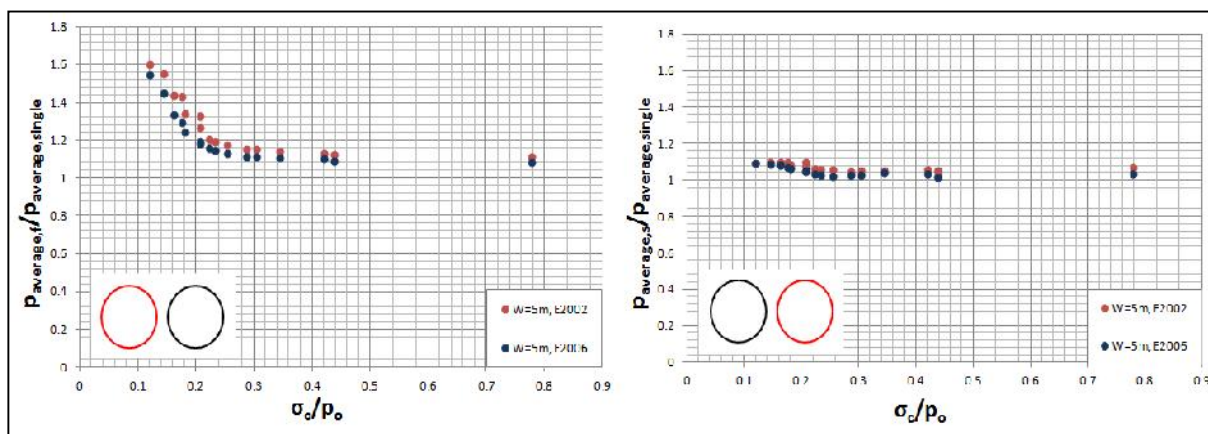
Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	Μετακίνηση u (mm)			Ποσοστιαία μεταβολή (%)	
	Μονή σήραγγα (single)	Πρώτος κλάδος δίδυμης σήραγγας (f)	Δεύτερος κλάδος δίδυμης σήραγγας (s)	$(p_f - p_{single})/p_f$	$(p_s - p_{single})/p_s$
282	30	32	37	6	19
85	91	93	112	2	19

### 6.4.2 Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στη παράγραφο αυτή επιχειρείται η καλύτερη ερμηνεία του φαινομένου της επίδρασης του μέτρου ελαστικότητας στην ανάπτυξη των φορτίσεων των δυο κλάδων. Για το σκοπό αυτό παρατίθενται τα ακόλουθα διαγράμματα στα οποία απεικονίζεται το μέγεθος των πιέσεων των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας ανηγμένο ως προς το αντίστοιχο μέγεθος της μονής σήραγγας συναρτήσει του λόγου ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών ( $\sigma_c/\rho_o$ ), για W=0.5D=5m και για τα δυο διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας.

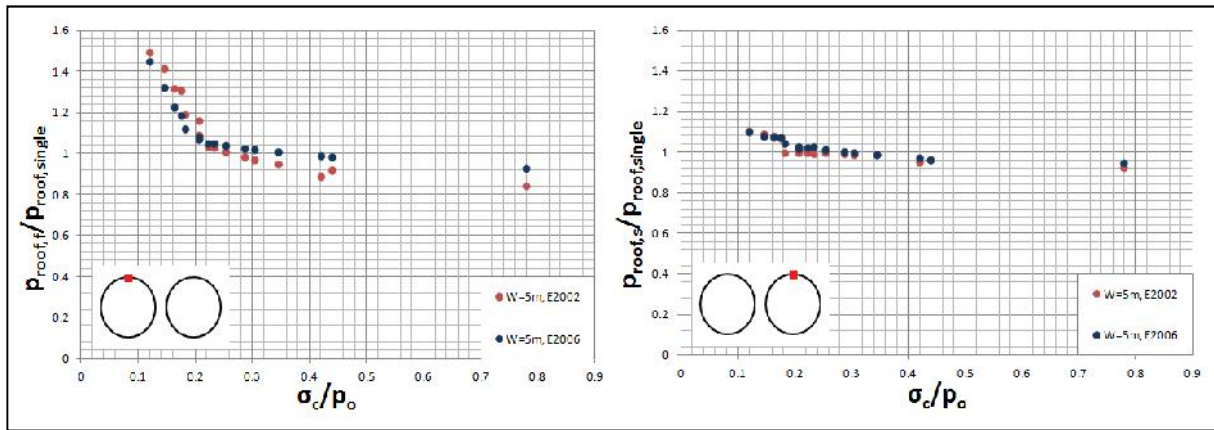
Μελετώντας τις κατανομές των μέσων πιέσεων στο Σχήμα 6.47 παρατηρούμε ότι καθώς κινούμαστε προς τις βελτιωμένες γεωτεχνικές συνθήκες και κατ' επέκταση προς αυξημένο μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος των πιέσεων τείνει στη μονάδα, αφού μικραίνει ο βαθμός αλληλεπίδρασης και οι δυο κλάδοι τείνουν να λαμβάνονται ως δυο ανεξάρτητες κατασκευές.

Επιπρόσθετα, διαπιστώνεται ότι η καμπύλη του μέτρου ελαστικότητας κατά Hoek (2002) βρίσκεται υψηλότερα από την αντίστοιχη κατά Hoek and Diederichs (2006), παρόλο που ο δεύτερος τύπος παράγει μικρότερες τιμές. Το γεγονός αυτό μαρτυρά την περιπλοκότητα του φαινομένου, παρόλα αυτά όμως μπορεί να αιτιολογηθεί, καθώς αύξηση του μέτρου ελαστικότητας προκαλεί αύξηση της μέσης πίεσης των κλάδων της δίδυμης σήραγγας αλλά ταυτόχρονα και αύξηση των μέσων πιέσεων της μονής σήραγγας. Η αύξηση του παρονομαστή είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση που το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο του 2006, συνεπώς ο λόγος είναι μικρότερος παρά το γεγονός ότι αναμέναμε τα αντίστροφα αποτελέσματα.



**Σχήμα 6.47** Κατανομή ανηγμένης μέσης πίεσης επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου  $P_{average,(f/s)}/P_{average,single}$  ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\rho_0$  ,για διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας και για  $W=0.5D=5m$ .

Οι κατανομές της ανηγμένης πίεσης της οροφής της χαρακτηριστικής διατομής (Σχήμα 6.48) μαρτυρούν ότι εξαιτίας της περιπλοκότητας του φαινομένου δεν επικρατεί μια σταθερή τάση των σημείων.



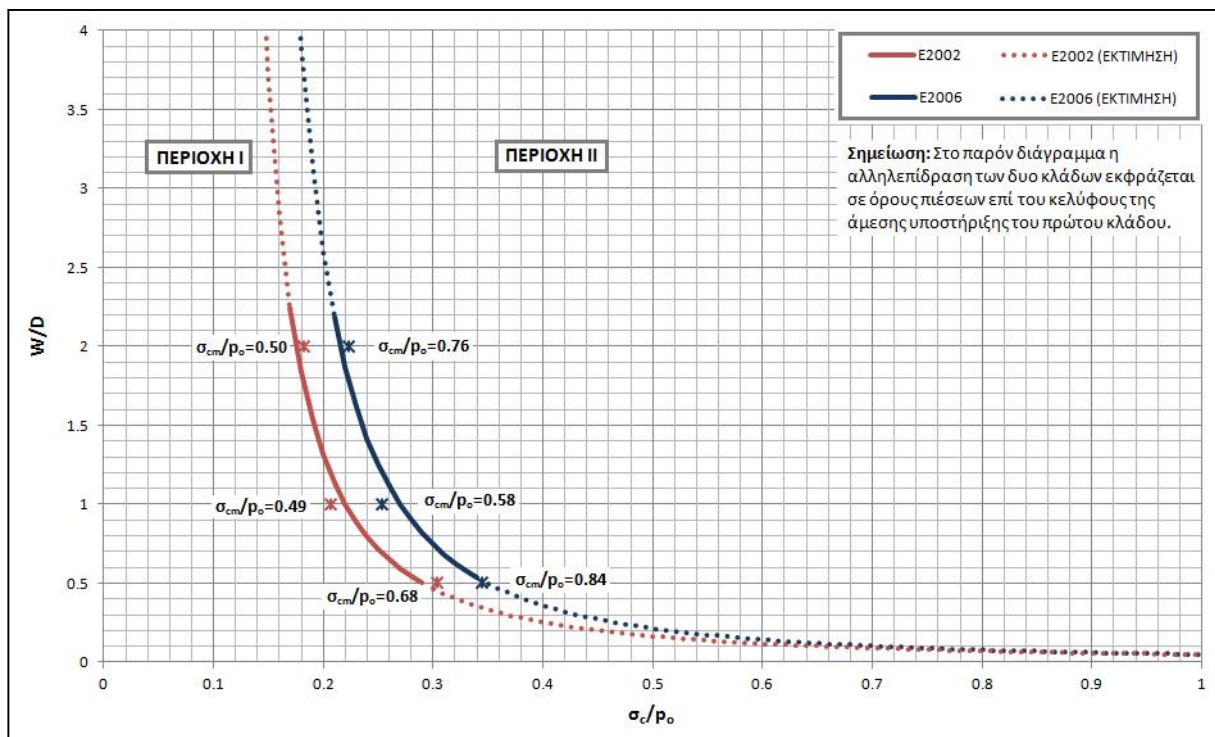
Σχήμα 6.48 Κατανομή ανηγμένης πίεσης της οροφής της χαρακτηριστικής διατομής του πρώτου και του δεύτερου κλάδου ως προς την αντίστοιχη πίεση του μονού κλάδου  $p_{\text{roof},(f/s)}/p_{\text{roof},\text{single}}$ , ως προς το λόγο ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\rho_o$ , για διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας και για  $W=0.5D=5\text{m}$ .

## 6.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΙΣ ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΣΕΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι παραμετρικές αναλύσεις που εκτελέστηκαν είχαν ως στόχο αφενός τη μελέτη του μηχανισμού ανάπτυξης των φορτίσεων των δυο κλάδων των δίδυμων σηράγγων και αφετέρου τον προσδιορισμό της κατάλληλης εγκάρσιας απόστασης των δυο κλάδων ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια αλλά και η λειτουργικότητα της κατασκευής. Προκειμένου η γνώση αυτή να εφαρμόζεται στην πράξη και η εκτίμηση να πραγματοποιείται με ευκολία από τον μελετητή μηχανικό, κρίνεται σκόπιμη η κατασκευή διαγραμμάτων, όπου ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της κατασκευής και με τις επικρατούσες γεωτεχνικές συνθήκες θα προσδιορίζεται η κατάλληλη τιμή της εγκάρσιας απόστασης. Σύμφωνα λοιπόν με τα αποτελέσματα των αναλύσεων που διατίθενται στην παρούσα εργασία κατασκευάζεται το διάγραμμα εκτίμησης της εγκάρσιας απόστασης, όπως εμφανίζεται στο ακόλουθο σχήμα.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι κατά την εκτέλεση των αναλύσεων υιοθετήθηκαν δυο βασικές παραδοχές: η κατασκευή κυκλικής διατομής και η τοποθέτηση δύσκαμπτης άμεσης υποστήριξης. Στην περίπτωση αυτή, όπως προέκυψε και από τα αποτελέσματα παραπάνω, η εξέλιξη των μετατοπίσεων είναι αμελητέα καθώς το κλειστό κέλυφος του ελαστικού σκυροδέματος δεν επιτρέπει την ανάπτυξή τους. Για το λόγο αυτό η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων εκφράζεται με αύξηση των πιέσεων επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης. Ιδιαίτερα αυξημένες παρουσιάζονται οι πιέσεις του πρώτου κλάδου. Στην περίπτωση, όμως, που οι παραδοχές είναι διαφορετικές (π.χ. πεταλοειδής διατομή) η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων εκφράζεται και με σημαντική ανάπτυξη επιπρόσθετων παραμορφώσεων. Συνεπώς το παρακάτω διάγραμμα αποτελεί χρήσιμο οδηγό μόνον για σήραγγες με κλειστό δύσκαμπτο κέλυφος άμεσης υποστήριξης.

Κριτήριο για την κατασκευή του διαγράμματος αποτέλεσαν οι τιμές των φορτίσεων του κελύφους της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου, καθώς πρόκειται για τη δυσμενέστερη κατάσταση. Το διάγραμμα διαθέτει δυο καμπύλες οι οποίες αντιστοιχούν σε περιπτώσεις διαφορετικής εκτίμησης του μέτρου ελαστικότητας (εκτίμηση κατά Hoek (2002) και εκτίμηση κατά Hoek & Diederichs (2006)). Η περιοχή αριστερά των καμπυλών (ΠΕΡΙΟΧΗ I) αντιστοιχεί σε περιπτώσεις έντονης αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων. Αντίθετα, στην περίπτωση που βρισκόμαστε στην περιοχή δεξιά των καμπυλών (ΠΕΡΙΟΧΗ II) η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων είναι αμελητέα και συνεπώς οι δυο σήραγγες μπορούν να ληφθούν ως δυο ανεξάρτητες κατασκευές. Τέλος, το συνεχές τμήμα της καμπύλης προκύπτει ύστερα από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στην παρούσα εργασία, ενώ το διακεκομμένο τμήμα αποτελεί αποτέλεσμα εκτιμήσεων. Είναι προφανές, ότι απαιτείται περεταίρω έρευνα προκειμένου το διάγραμμα να θεωρείται πλήρες και να είναι χρηστικό κατά την εφαρμογή.



Σχήμα 6.49 Διάγραμμα εκτίμησης του κατάλληλου πλάτους πυλώνα σύμφωνα με τις επικρατούσες γεωτεχνικές συνθήκες.



## 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

---

Οι σήραγγες αποτελούν τεχνικά έργα με αυξημένες απαιτήσεις ασφάλειας και λειτουργικότητας. Οι απαιτήσεις αυτές επιβάλλουν τη συνεχώς αυξανόμενη κατασκευή δίδυμων σηράγγων και κατ' επέκταση την κατανόηση του μηχανισμού εξέλιξης των φορτίσεων. Η μεταπτυχιακή εργασία, προκειμένου να συμβάλλει στην κατανόηση του φαινομένου, πραγματοποιείται την αλληλεπίδραση των δυο γειτονικών κλάδων. Η προσομοίωση του προβλήματος πραγματοποιείται με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων, ενώ η αλληλεπίδραση ποσοτικοποιείται σε όρους πιέσεων και μετατοπίσεων. Αναλυτικότερα, μελετάται η επίδραση των γεωτεχνικών συνθηκών, του πλάτους του ενδιάμεσου πυλώνα και του μέτρου ελαστικότητας στην εξέλιξη των εξεταζόμενων μεγεθών. Οι βασικές παραδοχές που υιοθετούνται στις αναλύσεις είναι ότι η διατομή της σήραγγας θεωρείται κυκλική με διάμετρο 10m και η άμεση υποστήριξη αποτελείται από εκτοξευμένο σκυρόδεμα με μέτρο ελαστικότητας  $E_{sh}=20000$  MPa.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν ύστερα από τον πρωτογενή έλεγχο και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων, όπως αυτά λαμβάνονται μετά το πέρας της εκσκαφής.

### **Μηχανισμός εξέλιξης των πιέσεων και των μετακινήσεων**

Αναφορικά με το μέγεθος των πιέσεων που αναπτύσσονται επί των κελυφών της άμεσης υποστήριξης, παρατηρούνται τα εξής:

- Το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης του πρώτου κλάδου της εκσκαφής καταπονείται εντονότερα σε σχέση με το κέλυφος του δεύτερου κλάδου. Για μια τυπική ανάλυση με δυσμενείς γενικά γεωτεχνικές συνθήκες ( $c=39$ Kpa,  $\phi=23^\circ$ ,  $\sigma_{cm}/\rho_o=0.37$ ) και εγκάρσια απόσταση ίση με  $5m=0.5D$ , σημειώνεται ότι η μέση πίεση του πρώτου κλάδου στη θέση της χαρακτηριστικής διατομής είναι αυξημένη κατά 35% περίπου σε σχέση με εκείνη που θα αναπτύσσονταν στην περίπτωση που οι δυο κλάδοι δεν αλληλεπιδρούν, ενώ η αντίστοιχη μέση πίεση του δεύτερου κλάδου είναι αυξημένη κατά περίπου 7.9%.
- Εξετάζοντας τη χρονοϊστορία των κόμβων μιας τυχαίας διατομής του πρώτου κλάδου, διαπιστώνεται ότι η δυσμενέστερη κατάσταση σημειώνεται τη στιγμή που ο δεύτερος προσεγγίζει τη διατομή. Από τη στιγμή που ο δεύτερος κλάδος βρίσκεται 10m πριν την εξεταζόμενη διατομή μέχρι τη στιγμή που διέρχεται δίπλα από αυτή, σημειώνεται σημαντική αύξηση των πιέσεων που ασκούνται στην άμεση υποστήριξη του πρώτου κλάδου. Καθώς το μέτωπο προσεγγίζει τη διατομή, προκαλείται χαλάρωση της περιβάλλουσας βραχώμαζας και τα εδαφικά στοιχεία τείνουν να εκδηλώσουν εκτεταμένες μετακινήσεις. Η δύσκαμπτη όμως άμεση υποστήριξη, που έχει ήδη



τοποθετηθεί στον πρώτο κλάδο, δεν επιτρέπει την ανάπτυξη των μετακινήσεων αυτών και τη σύγκλιση της διατομής. Συνεπώς η επίδραση της διάνοιξης του δεύτερου κλάδου στον πρώτο εκδηλώνεται με αύξηση των πιέσεων που ασκούνται στο κέλυφος του εκτοξευμένου σκυροδέματος.

Αναφορικά με το μέγεθος των μετακινήσεων των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τις δυο εκσκαφές, παρατηρούνται τα εξής:

- Οι μετακινήσεις των εδαφικών στοιχείων του πρώτου κλάδου διάνοιξης είναι αμελητέες, σε αντίθεση με τις αντίστοιχες του δεύτερου κλάδου. Το φαινόμενο αυτό είναι εύλογο, αν αναλογιστούμε ότι η δύσκαμπτη υποστήριξη του πρώτου κλάδου εμποδίζει την ανάπτυξη των μετακινήσεων που προκαλεί η εκσκαφή του δεύτερου. Συνεπώς οι μετακινήσεις που καταγράφονται στην περίμετρο της εκσκαφής του πρώτου κλάδου προκαλούνται αποκλειστικά από τη διάνοιξη αυτού. Αντίθετα, οι μετακινήσεις του δεύτερου κλάδου αποτελούν άθροισμα των μετακινήσεων που σημειώνονται κατά τη διάνοιξη του πρώτου (ουσιαστικά οι μετακινήσεις αυτές προκαλούν διατάραξη της βραχόμαζας και δεν εκδηλώνονται στο μέτωπο) και των μετακινήσεων που σημειώνονται κατά τη διάνοιξη του δεύτερου κλάδου. Για μια τυπική ανάλυση με δυσμενείς γενικά γεωτεχνικές συνθήκες ( $c=39\text{Kpa}$ ,  $\phi=23^\circ$ ,  $\sigma_{cm}/\rho_o=0.37$ ) και εγκάρσια απόσταση ίση με  $5m=0.5D$ , σημειώνεται ότι η μέση μετακίνηση των εδαφικών στοιχείων του πρώτου κλάδου στη θέση της χαρακτηριστικής διατομής είναι αυξημένη μόλις κατά 1.4% σε σύγκριση με εκείνη που θα αναπτύσσονταν στην περίπτωση που οι δυο κλάδοι δεν αλληλεπιδρούν, ενώ η αντίστοιχη μέση μετακίνηση για το δεύτερο κλάδο είναι αυξημένη κατά περίπου 19%.
- Εξετάζοντας τη χρονοϊστορία των κόμβων μιας τυχαίας διατομής του δεύτερου κλάδου, διαπιστώνεται ότι η δυσμενέστερη κατάσταση σημειώνεται από τη στιγμή που το μέτωπο βρίσκεται πίσω από τη διατομή σε απόσταση ίση με  $10m=D$  έως τη στιγμή που διέρχεται από την εκσκαφή. Καθώς το μέτωπο της εκσκαφής προσεγγίζει τη διατομή, προκαλείται χαλάρωση της βραχόμαζας και κατά συνέπεια σημειώνεται εκτεταμένη αύξηση των μετακινήσεων.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι τα συμπεράσματα που προκύπτουν για τα εξεταζόμενα μεγέθη αντιστοιχούν αποκλειστικά στις παραδοχές που υιοθετήθηκαν κατά τις αναλύσεις και αναφέρθηκαν παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, το κλειστό κέλυφος της δύσκαμπτης άμεσης υποστήριξης εμποδίζει την ανάπτυξη των μετακινήσεων με αποτέλεσμα η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων να εκδηλώνεται με ανάπτυξη των πιέσεων. Διαφορετικές παραδοχές (πχ. πεταλοειδής διατομή, χρήση εύκαμπτης υποστήριξης κλπ) θα οδηγούσαν σε διαφορετικό μηχανισμό ανάπτυξης των εξεταζόμενων μεγεθών. Στην περίπτωση αυτή, η απουσία κλειστού κελύφους θα οδηγούσε σε εκτεταμένη αύξηση των μετακινήσεων και συνεπώς σε σημαντική σύγκλιση των διατομών. Αναφορικά με το μέγεθος των πιέσεων, δε θα παρατηρούνταν σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σύγκριση με την περίπτωση διάνοιξης σήραγγας μονού κλάδου.

### Επίδραση των γεωτεχνικών συνθηκών

Για την μελέτη της επίδρασης των γεωτεχνικών συνθηκών στο βαθμό αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων κατασκευάστηκαν συνολικά διαγράμματα στα οποία απεικονίζεται η φόρτιση και η μετακίνηση και των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας ανηγμένη ως προς την αντίστοιχη φόρτιση και μετακίνηση της μονής σήραγγας συναρτήσει των γεωτεχνικών συνθηκών ( $\sigma_c/\rho_o$ ), για σταθερό πλάτος πυλώνα. Για τη δυσμενέστερη περίπτωση ( $W=0.5D=5m$ ) διαπιστώνεται ότι:

- Για το μέγεθος των πιέσεων, η καμπύλη που αντιστοιχεί στον πρώτο κλάδο παρουσιάζει εκθετική μορφή, με μειούμενο ρυθμό μείωσης. Βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών συνεπάγεται μείωση του βαθμού αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων. Για το εύρος των γεωτεχνικών παραμέτρων που εξετάστηκαν, οι δυσμενέστερες συνθήκες αντιστοιχούν σε λόγο μέσων πιέσεων ίσο με 1.6 (σημαντική αλληλεπίδραση των δυο κλάδων), ενώ όσο οι γεωτεχνικές συνθήκες βελτιώνονται ( $\sigma_c/\rho_o=0.4$ ) ο λόγος τείνει στη μονάδα (μηδενική αλληλεπίδραση των δυο κλάδων). Η καμπύλη που αντιστοιχεί στο δεύτερο κλάδο, προσεγγίζει την ευθεία γραμμή ( $\rho_{average,s}/\rho_{average,single}=1$ ), γεγονός που αποδεικνύει ότι η φόρτιση του δεύτερου κλάδου είναι ανεξάρτητη από την μεταβολή των γεωτεχνικών συνθηκών.
- Για το μέγεθος των μετακινήσεων, τα σημεία που αντιστοιχούν στον πρώτο κλάδο τείνουν να παραλληλιστούν με την ευθεία  $u_{average,i}/u_{average,single}=1$ , καθώς οι αναπτυσσόμενες μετακινήσεις είναι απαλλαγμένες από τις γεωτεχνικές συνθήκες. Αντίθετα, οι μετακινήσεις των εδαφικών στοιχείων που περιβάλλουν τον δεύτερο κλάδο εκσκαφής αυξάνονται καθώς αυξάνεται η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων (μείωση γεωτεχνικών συνθηκών). Σημειώνεται ότι η μέγιστη τιμή του λόγου για πτωχής ποιότητας βραχώμαζα είναι ίση με 1.2.

### Επίδραση του πλάτους του πυλώνα

Για την μελέτη της επίδρασης της εγκάρσιας απόστασης των δυο κλάδων στο βαθμό αλληλεπίδρασης αυτών, κατασκευάστηκαν συνολικά διαγράμματα στα οποία απεικονίζεται η φόρτιση και η μετακίνηση και των δυο κλάδων της δίδυμης σήραγγας ανηγμένη ως προς την αντίστοιχη φόρτιση και μετακίνηση της μονής σήραγγας συναρτήσει των γεωτεχνικών συνθηκών ( $\sigma_c/\rho_o$ ), για τρεις διαφορετικές τιμές της εγκάρσιας απόστασης ( $W=0.5D=5m$ ,  $W=D=10m$ ,  $W=2D=20m$ ).

- Αναφορικά με το μέγεθος των πιέσεων, παρατηρούμε ότι για μικρή εγκάρσια απόσταση ( $W=0.5D=5m$ ) η αλληλεπίδραση των δυο κλάδων είναι έντονη, καθώς ο λόγος των μέσων πιέσεων για τον πρώτο κλάδο κυμαίνεται από 1.6, για δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες ( $\sigma_c/\rho_o=0.1$ ), έως 1.1, για βελτιωμένη ποιότητα βραχώμαζας ( $\sigma_c/\rho_o=0.8$ ). Αύξηση του πλάτους του πυλώνα ( $W=D=10m$ ) προκαλεί μετατόπιση της καμπύλης σε χαμηλότερες τιμές, γεγονός που αποδεικνύει τη μείωση του βαθμού αλληλεπίδρασης. Για περεταίρω αύξηση της εγκάρσιας απόστασης ( $W=2D=20m$ ) οι δυο σήραγγες πρακτικά λαμβάνονται ως δυο ανεξάρτητες

κατασκευές, καθώς οι τιμές των λόγων τείνουν στη μονάδα, ανεξάρτητα από την ποιότητα της βραχώμαζας. Οι αναπτυσσόμενες πιέσεις επί του κελύφους του δεύτερου κλάδου διατηρούνται σταθερές και ανεξάρτητες του πλάτους του πυλώνα.

- Αναφορικά με το μέγεθος των μετακινήσεων, οι λόγοι που αντιστοιχούν στον πρώτο κλάδο τείνουν στη μονάδα, καθώς η άμεση υποστήριξη εμποδίζει την εξέλιξη αυτών. Για το δεύτερο κλάδο, όπως ήταν αναμενόμενο, αύξηση της εγκάρσιας απόστασης συνεπάγεται μείωση του βαθμού της αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων. Και από τη σκοπιά των μετακινήσεων, για πλάτος πυλώνα ίσο με  $W=2D=5m$ , ο βαθμός αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων είναι σχεδόν μηδενικός.

#### **Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας**

Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας στην αλληλεπίδραση των δυο κλάδων, για το εύρος των γεωτεχνικών συνθηκών που διατίθενται υπολογίζεται η τιμή του μέτρου ελαστικότητας σύμφωνα με τους τύπους που προτείνονται από τους Hoek (2002) και Hoek & Diederichs (2006). Εξαιτίας όμως της περιπλοκότητας του φαινομένου, καθώς υπεισέρχονται πολλά μεταβαλλόμενα μεγέθη, δεν είναι δυνατή η εξαγωγή σαφών συμπερασμάτων. Για το λόγο αυτό απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση.

Για το τέλος, θεωρείται σκόπιμη η παράθεση κάποιων προτάσεων σχετικά με την διενέργεια περαιτέρω έρευνας και παραμετρικών αναλύσεων βάσει των συμπερασμάτων που προέκυψαν, ώστε να γίνει ακόμα σωστότερη προσομοίωση του προβλήματος. Ιδιαίτερο λοιπόν ενδιαφέρον θα παρουσίαζε:

- Η μελέτη της αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων για μεγαλύτερο εύρος γεωτεχνικών παραμέτρων.
- Η εκτενής μελέτη της αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων για μεγαλύτερο εύρος γεωμετρικών παραμέτρων (ύψος υπερκείμενων γαιών, εγκάρσια απόσταση των δυο κλάδων).
- Η μελέτη της αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων για πεταλοειδείς διατομές και για τμηματική διάνοιξη.
- Η μελέτη της αλληλεπίδρασης των δυο κλάδων για μεγαλύτερο εύρος κατασκευαστικών παραμέτρων (πχ. βήμα προχώρησης).
- Η μελέτη της επίδρασης της εύκαμπτης υποστήριξης στην εξέλιξη των πιέσεων και των μετακινήσεων, κατά την εκσκαφή των δυο κλάδων.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

### Διεθνής βιβλιογραφία

- [1] ABAQUS 6.9 Documentation. (2009). 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 behaviour. *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] Addenbrooke, T.I., Potts, D.M. & Puzrin, A.M. 1997. The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of twin tunnel construction. *Geotéchnique*, 47 (3), pp. 693-712.
- [5] Addenbrooke, T.I. & Potts D.M. 2001. Twin tunnel interaction: Surface and Subsurface effects. *The International Journal of Geomechanics*, Vol. 1, No. 2, 2001, p.p. 249-271.
- [6] Chaboussi, J. & Ranken, R.E. 1977. Interaction between two parallel tunnels. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, No. 1, pp. 75-103.
- [7] Chang, C.T., Lee, M.C. & Hou, P.C. 1996. Design of twin-tube tunnel through soft rock. *Proceedings of the international symposium on geotechnical aspects of underground construction in soft ground*. London, UK, 15-17 April 1996, pp. 251-255
- [8] Chapman, D.N., Rogers, C.D.F. & Hunt D.V.L.. 2002. Prediction of settlement above closely spaced multiple tunnel constructions in soft ground. *In Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on the Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. Toulouse, 23-25 October 2002. A.A. Balkema, Roterdam, The Netherlands. pp. 299-304.
- [9] Chen, S.I., Lee, S.C., Gui, M.W. 2008. Effects of rock pillar width on the excavation behavior of parallel tunnels. *Tunneling and underground space technology*, 24(2009), pp. 148-154
- [10] Fang, Y.S., Lin, J.S. & Su, C.S. 1994. An estimation of ground settlement due to shield tunnelling by the Peck-Fujita method. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, pp. 431-433
- [11] Fujita, K. 1985. On the surface settlements caused by various methods of shield tunnelling. *In Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. San Francisco August 1985. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. Vol.4, pp. 609-610.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [12]Karakus, M., Ozsan, A., Basarir, H. 2007. Finite element analysis for the twin metro tunnel constructed in Ankara Clay, Turkey. *Bulleting of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 66, No. 1, 2007, pp. 71-79
- [13]Kim, S.H., Burd, H.J. & Miligan G.W.E. 1998. Model testing of closely spaced tunnels in clay. *Geotéchnique*, 48 (3), pp. 375-388.
- [14]Kim, S.H., 2004. Interaction behaviors between parallel tunnels in soft ground. *Tunneling and underground space technology*, Vol. 19, pp. 448-454
- [15]Koungelis, D.K. & Augarde, C.E. 2004. Interaction between multiple tunnels in soft ground. In Developments in mechanics of structures & materials: *Proceedings of the 18<sup>th</sup> Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*, Perth. Australia, 1-3 December 2004.
- [16]Ng, C.W.W., Lee, K.M. & Tang, D.K.W. 2002. Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunneling method (NATM) twin tunnel interactions. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, 2004, pp. 523-539
- [17]Soliman, E., Duddeck, H. & Ahrens, H. 1993. Two- and Three-dimensional Analysis of Closely Spaced Double-tube Tunnels. *Tunneling and underground space technology*, Vol. 8(1993), No. 1, pp. 13-18
- [18]Terzaghi, H. 1942. Liner-plate tunnels on the Chicago subway. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 68(6), pp. 862-899.
- [19]Ward, W.H. & Thomas, H.S.H. 1965. The development of earth loading and deformation in tunnel linings in London Clay. In *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Toronto, Ont. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. Vol. 2, pp. 432-436.

## Ελληνική βιβλιογραφία

- [1] Καββαδάς, Μ. (2005). *Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων*. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- [2] Μαρίνος, Π. (1993). *Κεφάλαια Γεωλογίας Μηχανικού*. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- [3] Μαρίνος, Π. (1998). *Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας Μηχανικού*. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- [4] Μαρίνος, Π. et al. (2006). *Ερευνητικό πρόγραμμα: Έρευνα επί της συμπεριφοράς γεωυλικών κατά την κατασκευή των σηράγγων της Εγνατίας Οδού και επί των παραγόντων διαμόρφωσης του τελικού κόστους κατασκευής*. ΕΜΠ, Τομέας γεωτεχνικής, Αθήνα.
- [5] Παπαδόπουλος, Β. (2004). *Στοιχεία του μαθήματος: Βραχομηχανική-Σήραγγες*. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- [6] Παπαδόπουλος, Β. (2010). *Στοιχεία του μαθήματος: Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων*. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

- [7] Φορτσάκης, Π. (2012). *Διερεύνηση της στατικής αλληλεπίδρασης του περιβάλλοντος εδάφους/βράχου και της τελικής επένδυσης σηράγγων*. Διδακτορική διατριβή. ΕΜΠ, Τομέας Γεωτεχνικής, Αθήνα, Ελλάδα.

 **Ηλεκτρονικές διευθύνσεις**

- [1] Ηλεκτρονική σελίδα Ελληνικής Επιτροπής Σηράγγων και Υπογείων Έργων:  
<http://www.eesyge.gr/index.pl/>
- [2] Ηλεκτρονική σελίδα ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. [www.ktimatologio.gr](http://www.ktimatologio.gr)
- [3] Ηλεκτρονική σελίδα Υπουργείου Υποδομών Μεταφορών και Δικτύων:  
<http://www.ggde.gr/index.php>