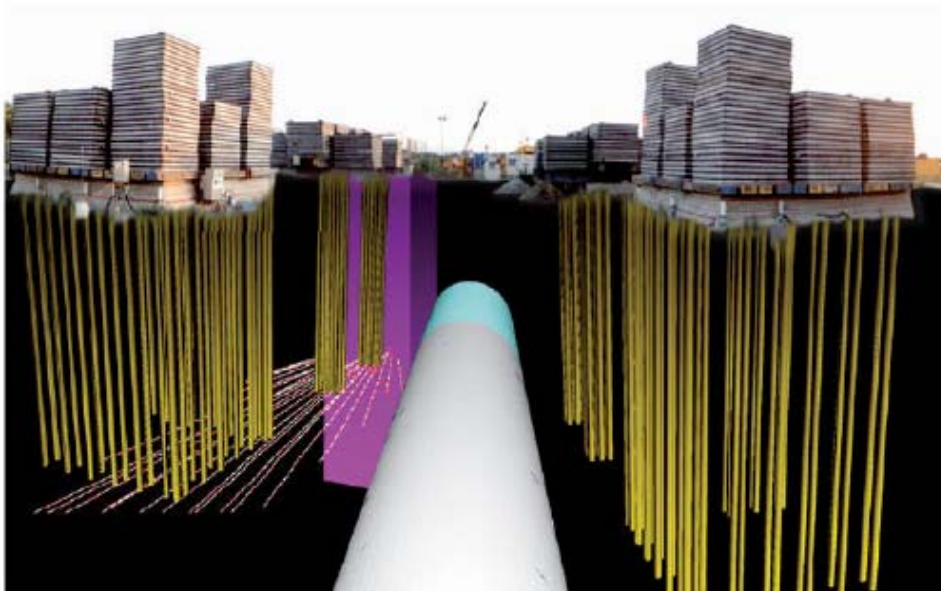




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Δ.Π.Μ.Σ. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΤΙΚΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΕΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ
ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΑΒΑΘΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**



ΑΓΓΕΛΙΚΗ Ν. ΚΟΝΤΟΥ
ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΜΙΧΑΛΗΣ ΚΑΒΒΑΔΑΣ
ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Δ.Π.Μ.Σ. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Τίτλος: Η Μέθοδος των Αντισταθμιστικών Τσιμεντενέσεων
κατά τη διάνοιξη Αβαθών Σηράγγων σε Αστικό
Περιβάλλον

Φοιτήτρια: Αγγελική Ν. Κόντου
Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων: Μιχάλης Καββαδάς
Αναπληρωτής Καθηγητής
Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Ακαδημαϊκό έτος: 2010-2011

Φωτογραφία Εξωφύλλου
van der Stoel (2007)

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2011

*Στον παππού μου,
που ήταν πάντα δίπλα μου σε όλα.*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Μ. Καββαδά, Αναπλ. Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τους συναδέλφους μου και κυρίως τον κ. Δ. Βακίρη, τον Δρ. Α. Γκιόλα και τον κ. Γ. Παπαχαραλάμπους για την αμέριστη και πολύτιμη βοήθειά τους κατά τη συγγραφή της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα να εκφράσω ακόμη τις θερμές μου ευχαριστίες στην εταιρία Keller Group plc. Καθοριστική υπήρξε η συμβολή των Δρ. C. Kummerer και κ. R. Thurner, της εταιρίας Keller, που με την ξενάγησή τους στο εργοτάξιο της εταιρείας στη Ρώμη και με την υλική υποστήριξη κατέστησαν δυνατή την περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τους φίλους μου, που με ανέχτηκαν αυτή την περίοδο της ζωής μου, που το άγχος και η κούραση με έκαναν απόμακρη.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διενεργήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Αν. Καθηγητή Μ. Καββαδά.

Σκοπός της εργασίας είναι η παρουσίαση της μεθόδου των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων κατά τη διάνοιξη αβαθών σηράγγων σε αστικό περιβάλλον.

Η χρήση της μεθόδου των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων έχει καθιερωθεί τα τελευταία χρόνια για τον περιορισμό των αναπτυσσόμενων καθιζήσεων (ολικών ή διαφορικών) σε επιτρεπτά όρια, στις κατασκευές που βρίσκονται εντός της ζώνης επιρροής των εργασιών διάνοιξης της σήραγγας.

Η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί για την προστασία σημαντικών ιστορικών κατασκευών, όπως είναι ο πύργος του Big Ben στο Λονδίνο και μια ιστορική σιδηροδρομική γέφυρα στη Ρώμη.

Λαμβάνοντας υπ' όψη την παγκόσμια τάση για επέκταση των δικτύων υπόγειων σηράγγων σε αστικές περιοχές και με δεδομένα τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της μεθόδου έναντι των παραδοσιακών μεθόδων τσιμεντενέσεων, εκτιμάται εξάπλωση της εφαρμογής της μεθόδου τα προσεχή χρόνια.

Η μεταπτυχιακή εργασία ασχολείται με την εφαρμογή της μεθόδου των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων κατά την κατασκευή αβαθών σηράγγων σε αστικό περιβάλλον, προκειμένου να μειωθούν οι συνέπειες της διάνοιξης της σήραγγας στο περιβάλλον και στις επηρεαζόμενες γειτονικές κατασκευές.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια μεθοδολογία εκτίμησης των συνεπειών της διάνοιξης της σήραγγας στο περιβάλλον έδαφος και στις υπερκείμενες κατασκευές και η αναγκαιότητα εφαρμογής αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων για την προστασία τους έναντι εκδήλωσης ανεπιθύμητων μετακινήσεων (ολικών ή διαφορικών). Παράλληλα περιγράφονται οι βασικές αρχές της μεθόδου των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων και πραγματοποιείται μια σύντομη ιστορική ανασκόπηση. Στο τέλος του κεφαλαίου πραγματοποιείται μια συνοπτική παρουσίαση των δύο μεθόδων εφαρμογής των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων, της μεθόδου της εδαφικής διάρρηξης και της μεθόδου ενεμάτωσης υπό πίεση.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στην εφαρμογή της μεθόδου της εδαφικής διάρρηξης για τον περιορισμό των διαφορικών καθιζήσεων κατά την εκτέλεση εργασιών διάνοιξης σηράγγων σε αστικές περιοχές. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ο μηχανισμός λειτουργίας και οι δυνατότητες εφαρμογής της μεθόδου, τα στοιχεία που απαιτούνται για το σχεδιασμό της, τα βασικά στάδια εκτέλεσής της, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση των τσιμεντενέσεων, καθώς και τα συστήματα παρακολούθησης και καταγραφής των προκαλούμενων μετακινήσεων και ο βαθμός αποτελεσματικότητας της μεθόδου.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος ενεμάτωσης υπό πίεση και συγκεκριμένα ο μηχανισμός λειτουργίας και οι δυνατότητες εφαρμογής της, τα στοιχεία που απαιτούνται για το σχεδιασμό της ενεμάτωσης και οι απαιτούμενες παράμετροι της ενεμάτωσης, καθώς και τα στάδια εκτέλεσης της ενεμάτωσης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται υπολογιστικά δεδομένα για τις μεθόδους ο μηχανισμός ροής του ενέματος στον εδαφικό σκελετό, αναλυτικές και εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης της απαιτούμενης μέγιστης πίεσης ενεμάτωσης (για κάθε μέθοδο χωριστά), καθώς και ένας ενδεικτικός τρόπος υπολογισμού των διαστάσεων της ρωγμάτωσης που δημιουργείται κατά την εισπίεση. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται συνοπτικά οι δύο μεθοδολογίες προσομοίωσης της εισπίεσης ενέματος στο σχηματισμό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων για τη βελτίωση του εδάφους και την ανύψωση κατασκευών για την προστασία τους έναντι εκδήλωσης καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη σηράγγων.

Το τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει μια παρουσίαση των γενικών συμπερασμάτων που εξήχθησαν στην παρούσα διπλωματική εργασία και επισημαίνεται η ανάγκη διεξαγωγής περαιτέρω έρευνας.

Λέξεις Κλειδιά: Αντισταθμιστικές Τσιμεντενέσεις, Εδαφική Διάρρηξη, Ενεμάτωση υπό Πίεση, Προ-ενεμάτωση, Ανύψωση, Καθιζήσεις, Διάνοιξη Αβαθούς Σήραγγας.

ABSTRACT

The thesis deals with the performance of compensation grouting during the construction of shallow tunnels in urban environment, in order to reduce the effects of tunneling to the environment and nearby constructions.

The first chapter presents a method to estimate the effects of tunneling in soft ground, an assessment on building damage due to tunneling and the necessity of building protection with the use of compensation grouting. Additionally a presentation of the concept of compensation grouting is given including the history review of its development. At the end of the chapter a short presentation of the two processes that are used to perform compensation grouting is made. The two methods are Soil Fracture Grouting and Compaction Grouting.

The second chapter refers to the application of Soil Fracturing to eliminate or minimize the differential settlements during tunneling in urban environment. The fracture mechanism of failure, the possible applications, the injection parameters, the grouting phases, the efficiency of the application and the necessary equipment as well as the measuring and monitoring systems of the deformation behavior of the structures and the injection parameters, are discussed.

The third chapter presents the method of Compaction Grouting and more specifically the concept of its use, the possible applications, the injection parameters that have to be estimated in the design and the grouting stages.

The fourth chapter presents some numerical approaches on the methods, like the cavity expansion theory as well as the fracture propagation process, analytical and empirical models to estimate the injection pressure and analytical and empirical formulae in order to estimate the width and the length of the fractures. At the end of the chapter two methods regarding the simulation and executions of finite element numerical analyses of compensation grouting are presented.

In the fifth chapter case histories are presented, where compensation grouting was used for ground improvement and for heaving of buildings, in order to protect them against settlements during tunnel driving.

The conclusions of this thesis and the identification of the necessity for further research are presented in the final chapter.

Keywords: Compensation Grouting, Soil Fracturing, Compaction Grouting, Pre-heave, Heave, Settlements, Excavation of Shallow Tunnel

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<i>Πρόλογος</i>	iii
<i>Περίληψη</i>	iv
<i>Abstract</i>	vi
<i>Περιεχόμενα</i>	vii
<i>Κατάλογος Σχημάτων</i>	ix

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Εισαγωγή στη Μέθοδο των Αντισταθμιστικών Τσιμεντενέσεων κατά τη Διάνοιξη Σηράγγων σε Αστικό Περιβάλλον

1.1	Εισαγωγή.....	1
1.2	Εκτίμηση των Αναμενόμενων Καθιζήσεων σε Συνθήκες Ελεύθερου Πεδίου.....	2
1.3	Εκτίμηση του Κινδύνου Εκδήλωσης Ανεπιθύμητων Καθιζήσεων σε Κατασκευή..	4
1.4	Παρουσίαση της Μεθόδου των Αντισταθμιστικών Τσιμεντενέσεων.....	7
1.4.1	Εισαγωγή.....	7
1.4.2	Ορισμός.....	7
1.4.3	Ιστορική Ανασκόπηση.....	8
1.4.4	Μέθοδοι Εφαρμογής Αντισταθμιστικών Τσιμεντενέσεων.....	9
1.4.4.1	Σύντομη περιγραφή της Μεθόδου της Εδαφικής Διάρρηξης.....	10
1.4.4.2	Σύντομη περιγραφή της Μεθόδου Ενεμάτωσης υπό Πίεση.....	10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Μέθοδος Εδαφικής Διάρρηξης/Soil Fracture Grouting

2.1	Εισαγωγή.....	12
2.2	Ιστορική Ανασκόπηση.....	12
2.3	Μηχανισμός Λειτουργίας και Δυνατότητες Εφαρμογής.....	13
2.3.1	Μηχανισμός Αστοχίας.....	13
2.3.2	Διεύθυνση Ρωγμάτωσης.....	14
2.3.3	Πεδίο Εφαρμογής.....	17
2.4	Απαιτούμενα Στοιχεία για το Σχεδιασμό της Μεθόδου.....	18
2.5	Βασικά Στάδια Εκτέλεσης.....	19
2.6	Συστήματα Εκτέλεσης Τσιμεντενέσεων.....	20
2.6.1	Διάνοιξη Οπών-Εγκατάσταση Σωλήνων Ενεμάτωσης.....	20
2.6.2	Παρασκευή και Εισπίεση Ενέματος.....	23
2.6.3	Αντλίες Εισπίεσης.....	25
2.6.4	Διαδικασία Εκτέλεσης της Ενεμάτωσης.....	26
2.7	Η Τεχνολογία των Βαλβιδωτών Σωλήνων (T.A.M.).....	28
2.7.1	Διαδικασία Ρωγμάτωσης του Ενέματος μεταξύ των Σωλήνων και των Τοιχωμάτων των Οπών.....	31
2.7.2	Επιβαλλόμενη Πίεση Εισπίεσης.....	33
2.7.3	Αποτελεσματικότητα.....	35
2.8	Καταγραφές-Τροποποίηση Σχεδιασμού.....	38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Μέθοδος Ενεμάτωσης υπό Πίεση/Compaction Grouting

3.1	Εισαγωγή.....	43
3.2	Ιστορική Ανασκόπηση.....	44
3.3	Μηχανισμός Λειτουργίας και Δυνατότητες Εφαρμογής.....	47
3.3.1	Ορισμός.....	47
3.3.2	Τρόπος Λειτουργίας.....	48
3.3.3	Αποτελεσματικότητα.....	49
3.3.4	Ενδεδειγμένες Εδαφικές Συνθήκες Εφαρμογής.....	50
3.3.5	Περιπτώσεις Εφαρμογής.....	52

3.4	Σχεδιασμός Αντισταθμιστικών Τσιμεντενέσεων	54
3.4.1	Απαιτούμενα Στοιχεία για το Σχεδιασμό της Μεθόδου	54
3.4.2	Σχεδιασμός της Μεθόδου Ενεμάτωσης	55
3.4.3	Παράμετροι Σχεδιασμού της Ενεμάτωσης.....	55
3.4.4	Στάδια Εκτέλεσης Ενεμάτωσης	59
3.5	Καταγραφές-Τροποποίηση του Σχεδιασμού	63
3.6	Ποιοτικός Έλεγχος κατά την Εφαρμογή της Μεθόδου.....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: Αναλυτικές Σχέσεις και Μαθηματικά Μοντέλα Προσομοίωσης των Παραμέτρων Ενεμάτωσης		
4.1	Εισαγωγή.....	65
4.2	Πίεση Ροής του Ενέματος.....	66
4.3	Εκτίμηση της Μέγιστης Τάσης Εισπίεσης.....	68
4.3.1	Εκτίμηση Τάσης Εισπίεσης κατά την Εφαρμογή της Μεθόδου Εδαφικής Διάρρηξης.....	69
	▪ Μηχανισμός Ρωγμάτωσης Συνεκτικών (Αργιλικών) Σχηματισμών	69
	▪ Μηχανισμός Ρωγμάτωσης μη Συνεκτικών (Αμμώδη) Σχηματισμών	70
4.3.2	Εκτίμηση της Τάσης Εισπίεσης κατά την Εφαρμογή της Μεθόδου Ενεμάτωσης υπό Πίεση.....	73
4.4	Υπολογισμός της Έκτασης των Ρωγμών	73
4.5	Προσομοίωση του Προβλήματος με Πεπερασμένα Στοιχεία.....	74
4.5.1	Σχεδίαση του Προβλήματος.....	75
4.5.2	Μεθοδολογία Προσομοίωσης της Ενεμάτωσης.....	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Παρουσίαση Έργων που Εφαρμόστηκε η Μέθοδος των Αντισταθμιστικών Τσιμεντενέσεων		
5.1	Εισαγωγή.....	79
5.2	Προστασία του Big Ben κατά την Κατασκευή της Επέκτασης της Γραμμής Μετρό Jubilee στο Λονδίνο.....	80
5.2.1	Παρουσίαση Έργου	80
5.2.2	Ο πύργος του Big Ben.....	80
5.2.3	Στοιχεία Κατασκευής του Σταθμού Westminster	81
5.2.4	Εδαφικές Συνθήκες	83
5.2.5	Κίνδυνος Στροφής.....	83
5.2.6	Εφαρμογή Αντισταθμιστικών Τσιμεντενέσεων για τον περιορισμό της Στροφής του Big Ben.....	84
5.2.7	Στάδια Εκτέλεσης Ενεμάτωσης-Καταγραφές	85
5.3	Προστασία Κατασκευών κατά την Επέκταση της Γραμμής Μετρό Β1 στη Ρώμη.....	88
5.3.1	Παρουσίαση Έργου	88
5.3.2	Εδαφικές Συνθήκες	88
5.3.3	Σχεδιασμός Αντισταθμιστικών Τσιμεντενέσεων	89
5.3.4	Δοκιμαστικές Ενεματώσεις σε Φυσική Κλίμακα.....	90
5.3.5	Εκτέλεση Αντισταθμιστικών Τσιμεντενέσεων	91
5.4	Κατασκευή της Σήραγγας Smart Tunnel στην Kuala Lumpur της Μαλαισίας.. ...	94
5.4.1	Παρουσίαση Έργου	94
5.4.2	Εδαφικές Συνθήκες	94
5.4.3	Εφαρμογή Ενεμάτωσης υπό Πίεση	95
5.4.4	Ποιοτικός Έλεγχος.....	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: Συμπεράσματα		
6.1	Εισαγωγή.....	99
6.2	Μέθοδοι Εκτέλεσης Αντισταθμιστικών Τσιμεντενέσεων	100
6.3	Συνέχιση της έρευνας-Εξέλιξη των Μεθόδων.....	102
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		
		103

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Καμπύλη Gauss:Κατανομή των καθιζήσεων.....	3
Σχήμα 1.2 Διάγραμμα συσχέτισης της θέσης εμφάνισης της μέγιστης κλίσης της καμπύλης καθιζήσεων από τον άξονα της σήραγγας, με το βάθος διάνοιξης (O' Reilly και New ,1982)	4
Σχήμα 1.3 Διαχωρισμός της καμπύλης κατανομής των καθιζήσεων σε περιοχές που στρέφουν τα κοίλα άνω και κάτω (G. Giardina, M.Rots, 2008)	6
Σχήμα 1.4 Η μέθοδος των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων (corrective grouting) (Kummerer,2003).....	7
Σχήμα 1.5 Επιλογή πρώιμων εφαρμογών της εφαρμογής της μεθόδου αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων (Chambosse, Otterbein, 2002).	9
Σχήμα 1.6 Δημιουργία σκελετού αποτελούμενου από φλέβες ενέματος και έδαφος λόγω της εισπίεσης ενέματος στον εδαφικό σχηματισμό.....	10
Σχήμα 1.7 Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής της μεθόδου ενεμάτωσης υπό πίεση (Ενημερωτικό φυλλάδιο της εταιρείας Hayward Baker)	10
Σχήμα 2.1 Διεύθυνση ρωγμάτωσης ανάλογη της διεύθυνσης της ελάχιστης κύριας τάσης (Ed. Suthan, S.Suthersan,1999).....	14
Σχήμα 2.2 Διεύθυνση ρωγμάτωσης ανάλογη της διεύθυνσης της ελάχιστης κύριας τάσης (Hockx)	15
Σχήμα 2.3 Σχηματική απεικόνιση της εκτέλεσης της μεθόδου εδαφικής διάρρηξης για την αντιστάθμιση διαφορικών καθιζήσεων σε θεμελίωση κτιρίου (Ενημερωτικό φυλλάδιο της Hayward Baker).....	16
Σχήμα 2.4 Σκελετός στήριξης αποτελούμενος από φλέβες ενέματος και έδαφος (E. Falk, Ground Improvement,2004)	16
Σχήμα 2.5 Προβλεπόμενες καμπύλες καθιζήσεων κάτω από τα κτίρια στον κεντρικό σταθμό Antwerpen.....	19
Σχήμα 2.6 Σχηματική απεικόνιση των βασικών σταδίων εκτέλεσης αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων με τη μέθοδο της εδαφικής διάρρηξης (Ενημερωτικό φυλλάδιο της Keller)	20
Σχήμα 2.7 Σχηματική απεικόνιση της εγκατάστασης οριζόντιων αγωγών από φρέαρ για την ενεμάτωση της περιοχής κάτω από τη θεμελίωση κτιρίου	21
Σχήμα 2.8 Φρέατα εγκατάστασης σωλήνων ενεμάτωσης στα πλαίσια εκτέλεσης αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων κατά την επέκταση Μετρό της Ρώμης.....	22
Σχήμα 2.9 Γεωτρύπανο εγκατεστημένο στον πυθμένα φρέατος για την τοποθέτηση σωλήνων στα πλαίσια κατασκευής μετρο στην πολιτεία της Νεβάδα	23
Σχήμα 2.10 Μονάδα παραγωγής ενέματος στην πλατεία Bologna της Ρώμης, στα πλαίσια επέκτασης του Μετρό	25
Σχήμα 2.11 Σχηματική απεικόνιση της εφαρμογής της μεθόδου εδαφικής διάρρηξης για τον περιορισμό των αναμενόμενων καθιζήσεων (R. Mair, G. Viggiani, C. Vekiti, 2009).....	27
Σχήμα 2.12 Στάδια μεταβολής της κατανομής των καθιζήσεων (Ενημερωτικό φυλλάδιο της Keller)	28
Σχήμα 2.13 Άποψη των βαλβιδωτών σωλήνων που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή της μεθόδου στα πλαίσια της επέκτασης του Μετρό της Ρώμης.....	29
Σχήμα 2.14 Τύποι διπλών παρεμβυσμάτων (Ενημερωτικό φυλλάδιο της ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε.).....	30
Σχήμα 2.15 Σχηματική απεικόνιση της εισπίεσης ενέματος με χρήση βαλβιδωτών σωλήνων (Ενημερωτικό φυλλάδιο της ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε.).....	30
Σχήμα 2.16 Διάγραμμα πίεσης ενέματος (G. Chambosse, R. Otterbein, 2002)	31
Σχήμα 2.17 Μορφή ρωγμάτωσης ισχνού ενέματος	31
Σχήμα 2.18 Ρωγμάτωση επιδερμικού σκυρόδεματος (G. Chambosse, R. Otterbein, 2002)..	32
Σχήμα 2.19 Εφαρμογή επαναλαμβανόμενων εισπίεσεων από θέσεις ενεμάτωσης στις οποίες δεν αναπτυσσόταν η επιθυμητή πίεση, στον Κεντρικό Σταθμό Antwerp στο Βέλγιο (G. Chambosse, R. Otterbein, 2002).....	35
Σχήμα 2.20 Επίδραση του OCR στο βαθμό αποτελεσματικότητας της μεθόδου σε αργιλικούς σχηματισμούς (Soga et al. In Van Vilet)	37

Σχήμα 2.21 Αύξηση της ακαμψίας του υπό-βελτίωση σχηματισμού στη φάση προ-ενεμάτωσης (Falk)	38
Σχήμα 2.22 Ενδεικτικό Διάγραμμα Μεταβολής Μετατόπισης με το χρόνο σε ένα σημείο παρακολούθησης.....	39
Σχήμα 2.23 Θέσεις τοποθέτησης κυλινδρικών δοχείων με νερό για τη μέτρηση της παραμόρφωσης κτιρίων κατά την εφαρμογή της μεθόδου αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων στα πλαίσια κατασκευής νέας γραμμής Μετρό στη Ρώμη.....	40
Σχήμα 2.24 Αρχή Λειτουργίας Μετρητικού Συστήματος Ανύψωσης Νερού της εταιρείας Ge-Tec.....	41
Σχήμα 2.25 Εγκατεστημένο υδραυλικό σύστημα για την παρακολούθηση των μετακινήσεων μιας ιστορικής σιδηροδρομικής γέφυρας κατά την επέκταση της γραμμής Μετρό στη Ρώμη.....	41
Σχήμα 3.1 Σχηματική απεικόνιση της εφαρμογής ενέσεων για την ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας επιφανειακής χαλαρής εδαφικής στρώσης (Ενημερωτικό φυλλάδιο της εταιρείας Keller)	43
Σχήμα 3.2 Σχηματική απεικόνιση της εφαρμογής ενέσεων σταθεροποίησης κατά τη διάνοιξη σήραγγας σε αστικό περιβάλλον, πάνω από την περιοχή προχώρησης του μετώπου (R.Rubright & S.Bandimere, 2004).....	45
Σχήμα 3.3 Σχηματική Απεικόνιση δολίνης στην πολιτεία της Φλόριντα (R.Rubright & S.Bandimere, 2004).....	46
Σχήμα 3.4 Εφαρμογή ενεμάτωσης με πίεση για την ανύψωση κατασκευής (R.Rubright & S.Bandimere, 2004).....	46
Σχήμα 3.5 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας συμπύκνωσης του εδάφους κατά την εκτέλεση ενέσεων συμπύκνωσης (Chan Man Piu, 2005).....	47
Σχήμα 3.6 Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας των ενέσεων συμπύκνωσης.....	48
Σχήμα 3.7 Περιορισμένη διείσδυση του ενέματος στη ρωγμάτωση που προκλήθηκε κατά την ενεμάτωση λόγω του υψηλού ιξώδους (Komiya, Soga, Jafari, Bolton, 2001).....	49
Σχήμα 3.8 α & β Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής ενεμάτωσης υπό πίεση για την ενίσχυση της θεμελίωσης κτιρίων (Ενημερωτικό φυλλάδιο της εταιρείας Keller)	52
Σχήμα 3.9 α. Εφαρμογή της μεθόδου σε υπόγειο κτιρίου (περιορισμένο ύψος εργασίας) β. εφαρμογή της μεθόδου για την ενίσχυση της θεμελίωσης κατασκευής (Ενημερωτικό φυλλάδιο της εταιρείας Keller)	54
Σχήμα 3.10 Τοποθέτηση αγωγού ενεμάτωσης υπό κεκλιμένη διεύθυνση (Ενημερωτικό Φυλλάδιο της Εταιρείας Keller).....	56
Σχήμα 3.11 Διάταξη εφαρμογής της μεθόδου κατά τη διάνοιξη της σήραγγας Smart Tunnel στο Kuala Lumpur.....	57
Σχήμα 3.12 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας ενεμάτωσης κατά ανιόντα στάδια	59
Σχήμα 3.13 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας ενεμάτωσης με πίεση κατά ανιόντα στάδια (ενημερωτικό φυλλάδιο Keller)	61
Σχήμα 3.14 α. Δημιουργία κυλίνδρου ενέματος στο χαλαρό εδαφικό σχηματισμό β. Σειρές κυλίνδρων ενέματος (Ενημερωτικό φυλλάδιο της εταιρείας Keller).....	62
Σχήμα 3.15 Πραγματοποίηση τσιμεντενέσεων υπό κλίση 27° σε έργο του Μετρό στην Kuala Lumpur.....	62
Σχήμα 3.16 Σχηματική απεικόνιση πραγματοποίησης ενέσεων συμπύκνωσης υπό κλίση (Ενημερωτικό φυλλάδιο της εταιρείας Keller)	63
Σχήμα 3.17 Δοκιμή κάθισης για τον έλεγχο της καταλληλότητας του εισπνεζόμενου ενέματος (Ενημερωτικό φυλλάδιο της εταιρείας Keller)	64
Σχήμα 4.1 Σταδιακή αύξηση της πίεσης ενεμάτωσης, υπό σταθερό ρυθμό εισπίεσης, μέχρι τη ρωγμάτωση του σχηματισμού και διατήρηση μιας σταθερής τιμής της πίεσης κατά τη διάδοση του ενέματος στη ρωγμάτωση (R. Grotenhuis, 2004)	66
Σχήμα 4.2 Καθορισμός της απαιτούμενης πίεσης ροής ενέματος εντός της ρωγμής (R. Grotenhuis, 2004)	67
Σχήμα 4.3 Γραφική απεικόνιση του πλαστικού μοντέλου Bingham, (R. Grotenhuis, 2004) ...	68
Σχήμα 4.4 Πειραματική Σχέση Υπολογισμού της απαιτούμενης πίεσης ρωγμάτωσης μη συνεκτικών σχηματισμών (De Pater et al.).....	71
Σχήμα 4.5 Σχηματική απεικόνιση της διαστολής κοιλότητας	72
Σχήμα 4.6 Παράδειγμα διδιάστατου μοντέλου προσομοίωσης της μεθόδου εδαφικής διάρρηξης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων	75
Σχήμα 4.7 Προσομοίωση των θέσεων εισπίεσης α. με τη μέθοδο ενεμάτωσης υπό πίεση, β. με τη μέθοδο εδαφικής διάρρηξης	76

Σχήμα 4.8 Διδιάστατο Μοντέλο Προσομοίωσης της μεθόδου Εδαφικής Διάρρηξης με χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων, με τη μεθοδολογία επιβαλλόμενων παραμορφώσεων.....	77
Σχήμα 4.9 Διδιάστατο Μοντέλο Προσομοίωσης της μεθόδου Εδαφικής Διάρρηξης με χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων με τη μεθοδολογία επιβαλλόμενων τάσεων	78
Σχήμα 5.1 Άποψη του Big Ben και του παλατιού του Westminster (J. Burland, 2002)	81
Σχήμα 5.2 Σχέδιο του σταθμού Westminster και της επέκτασης της γραμμής Μετρό Jubilee line (R. Mair, D.Harris)	82
Σχήμα 5.3 Κατά μήκος τομή στην περιοχή κατασκευής του σταθμού Westminster, που δείχνει τη γεινίαση του Big Ben με τις νέες σήραγγες (R. Mair, D.Harris)	82
Σχήμα 5.4 Τομή στην περιοχή του σταθμού Westminster, στην οποία φαίνεται το εδαφικό προφίλ (R. Mair, D.Harris)	83
Σχήμα 5.5 Διάταξη βαλβιδωτών σωλήνων (φρέαρ εγκατάστασης 4/6 Bridge Street) και προσομοίωση του συνηθέστερου προγράμματος ενεμάτωσης (R. Mair, D.Harris).....	85
Σχήμα 5.6 Χρονική εξέλιξη της μεταβολής της στροφής του πύργου Big Ben, κατά τη χρονική περίοδο 1994-2000. (Burland et al, 2001).....	87
Σχήμα 5.7 Σχηματική απεικόνιση του τύπου θεμελίωσης «rozzi e barulle»	89
Σχήμα 5.8 Άποψη του φρέατος για την εγκατάσταση σωλήνων για τη δοκιμαστική ενεμάτωση σε φυσική κλίμακα (C. Kummerer et al, 2011)	90
Σχήμα 5.9 Κάτοψη του σχεδίου ενεμάτωσης για την προστασία των κτιρίων στο πλαίσιο κατασκευής της νέας γραμμής μετρό B1 (Καταγραφή εταιρείας Keller κατά την εκτέλεση των εργασιών ενεμάτωσης).....	91
Σχήμα 5.10 Τυπική κατά μήκος τομή με μεταλλικούς σωλήνες ενεμάτωσης και σωλήνες από fiber glass (C. Kummerer et al, 2011).....	92
Σχήμα 5.11 Εγκατάσταση σωλήνων ενεμάτωσης υπό κεκλιμένη διεύθυνση, στην περιοχή του φρέατος εξόδου του TBM (C. Kummerer et al, 2011)	92
Σχήμα 5.12 Ημερήσιες καταγραφές του εισπνεζόμενου όγκου ενέματος από τους σωλήνες που εγκαταστάθηκαν από το φρέαρ στη θέση της piazza Bologna (Καταγραφή εταιρείας Keller κατά την εκτέλεση των εργασιών ενεμάτωσης).....	93
Σχήμα 5.13 Συνολικά εισπνεζόμενος όγκος ενέματος (C. Kummerer et al, 2011)	94
Σχήμα 5.14 Εδαφικό Προφίλ της περιοχής διάνοιξης (V. Raju, I. Yee, 2006)	95
Σχήμα 5.15 Εφαρμογή ενεμάτωσης υπό πίεση κάτω από το σιδηρόδρομο για περιορισμό των καθιζήσεων (V. Raju, I. Yee, 2006)	96
Σχήμα 5.16 Σχηματική απεικόνιση της πλήρωσης κοιλότητας (V. Raju, I. Yee, 2006)	97
Σχήμα 5.17 Εφαρμογή αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων με τη μέθοδο ενεμάτωσης υπό πίεση κατά την κατασκευή του Smart Tunnel (V. Raju, I. Yee, 2006)	97
Σχήμα 5.18 Τυπικά αποτελέσματα δοκιμής πρότυπης διείσδυσης πριν και μετά την εκτέλεση ενεμάτωσης υπό πίεση στην Kuala Lumpur κατά τη διάνοιξη της σήραγγας Smart Tunnel (V. Raju, I. Yee, 2006)	98
Σχήμα 6.1 Σύγκριση της απαιτούμενης τάσης εισπίεσης των δύο μεθόδων εκτέλεσης αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων (R. Essler, E. Droof, E. Falk, (2000))	101

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΤΙΚΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΕΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σύγχρονη ανάπτυξη των αστικών κέντρων σε συνδυασμό με τις αυξημένες ανάγκες μετακίνησης, έχουν οδηγήσει τόσο στην επέκταση των υφιστάμενων δικτύων υπόγειων συγκοινωνιών όσο και στην κατασκευή νέων.

Κατά τη διάνοιξη των σηράγγων προκαλούνται εδαφικές μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους και κατ' επέκταση στις υπερκείμενες κατασκευές. Το μέγεθος των προκαλούμενων μετακινήσεων (καθιζήσεων-στροφής) εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως είναι το βάθος και η έκταση του υπόγειου έργου, οι εδαφικές συνθήκες, η θέση και ο τύπος της θεμελίωσης των υπερκείμενων κατασκευών.

Οι προκαλούμενες μετακινήσεις (ολικές ή διαφορικές), δεν είναι σταθερές αλλά μεταβάλλονται κατά μήκος της ζώνης επιρροής της εκσκαφής (περιοχή εκδήλωσης μετακινήσεων). Ο υπολογισμός τους βασίζεται στην προσομοίωση της καμπύλης κατανομής των καθιζήσεων, κατά κανόνα με την κατανομή Gauss (§1.2).

Οι αναπτυσσόμενες μετακινήσεις μπορεί να έχουν σημαντικές συνέπειες στη λειτουργικότητα και ευστάθεια των υπερκείμενων κατασκευών και συχνά απαιτείται η λήψη ειδικών μέτρων περιορισμού τους σε επιτρεπτά όρια.

Για τον καθορισμό των κατασκευών στις οποίες θα απαιτηθεί η λήψη μέτρων περιορισμού των αναμενόμενων καθιζήσεων λόγω της διάνοιξης της σήραγγας, ακολουθείται η διαδικασία εκτίμησης του κινδύνου εκδήλωσης ανεπιθύμητων μετακινήσεων σε κάθε κατασκευή που βρίσκεται στη ζώνη επιρροής της διάνοιξης, στις περισσότερες περιπτώσεις σύμφωνα με τη μεθοδολογία των Mair, Taylor και Burland (§1.3).

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας πρόβλεψης των πιθανών αστοχιών και τον καθορισμό των κατασκευών που πρέπει να προστατευθούν έναντι εκδήλωσης ανεπιθύμητων μετακινήσεων, εξετάζονται τα δυνατά μέτρα που μπορούν να εφαρμοστούν.

Κατά τον Harris (2001), διακρίνονται τρεις κατηγορίες διαθέσιμων μέτρων προστασίας:

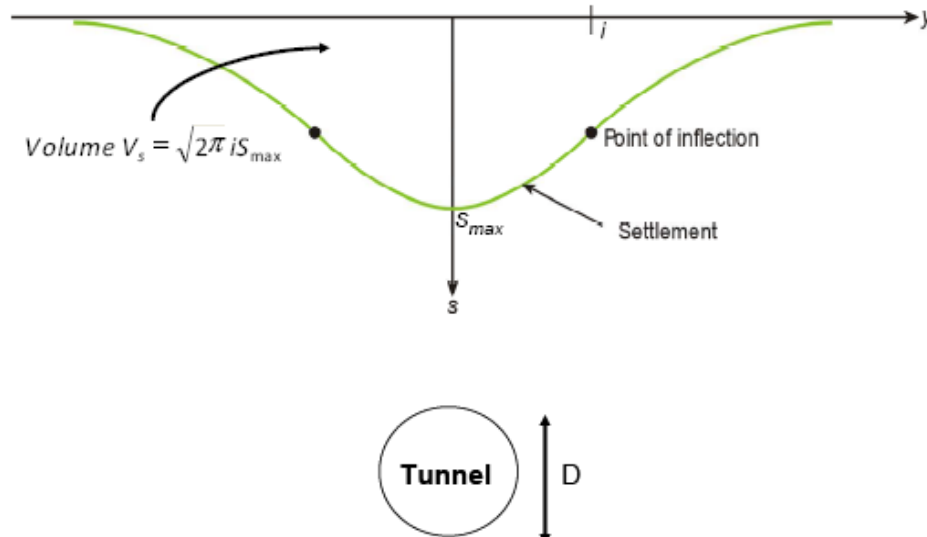
- Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα μέτρα που λαμβάνονται από το εσωτερικό της σήραγγας, για τον περιορισμό των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων (π.χ. επένδυση σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια, πλαίσια, foerpoling και άλλα)
- Στη δεύτερη κατηγορία, περιλαμβάνονται όλες οι μέθοδοι που δύναται να εφαρμοστούν για τη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδαφικού σχηματισμού, με στόχο τη μείωση των προκαλούμενων εδαφικών μετακινήσεων κατά την πραγματοποίηση της διάνοιξης μέσω της βελτίωσης της απόκρισης του υπό-βελτίωση σχηματισμού (π.χ. jet grouting, δονητική συμπύκνωση, αντισταθμιστικές τσιμεντενέσεις, ψύξη εδάφους).
- Στην τρίτη κατηγορία ανήκουν τα μέτρα που λαμβάνονται (δομικά-στατικά) στην ανωδομή και στοχεύουν στον περιορισμό των συνεπειών των προκαλούμενων μετατοπίσεων μέσω της αύξησης της ικανότητας της κατασκευής να ανθίσταται στη μετακίνηση.

Συχνά λόγω της πολυπλοκότητας των κατασκευών και της συνθετότητας των εδαφικών σχηματισμών, εφαρμόζεται συνδυασμός διαφορετικών μέτρων περιορισμού.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζεται η χρήση της μεθόδου των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων για τον περιορισμό των ανεπιθύμητων καθιζήσεων (ολικών ή διαφορικών), κατά τη διάνοιξη αβαθών σηράγγων σε αστικό περιβάλλον.

1.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Από την πραγματοποίηση επί τόπου καταγραφών των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων σε εδαφικούς σχηματισμούς, σε μια σειρά έργων διάνοιξης σηράγγων, έχει διαπιστωθεί ότι η κατανομή των καθιζήσεων μπορεί να προσομοιωθεί με την κατανομή Gauss (Peck(1969a), Rankin (1988), Mair Taylor (1977)), βάσει της ακόλουθης σχέσης:



Σχήμα 1.1 Καμπύλη Gauss:κατανομή των καθιζήσεων

$$S = S_{max} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right) \quad (1), \text{ όπου:}$$

S: η κατακόρυφη μετακίνηση (καθίζηση) σε θέση που απέχει οριζόντια απόσταση y από το κέντρο της σήραγγας

S_{max} : καθίζηση του σημείου που βρίσκεται ακριβώς πάνω από το κέντρο της σήραγγας

y : οριζόντια απόσταση του σημείου που προσδιορίζονται οι αναμενόμενες καθιζήσεις από το κέντρο της σήραγγας

i : παράμετρος που προσδιορίζει το πλάτος της κατανομής των καθιζήσεων και ορίζεται ως η απόσταση του σημείου με τη μέγιστη κλίση (point of inflection) από τον άξονα της σήραγγας.

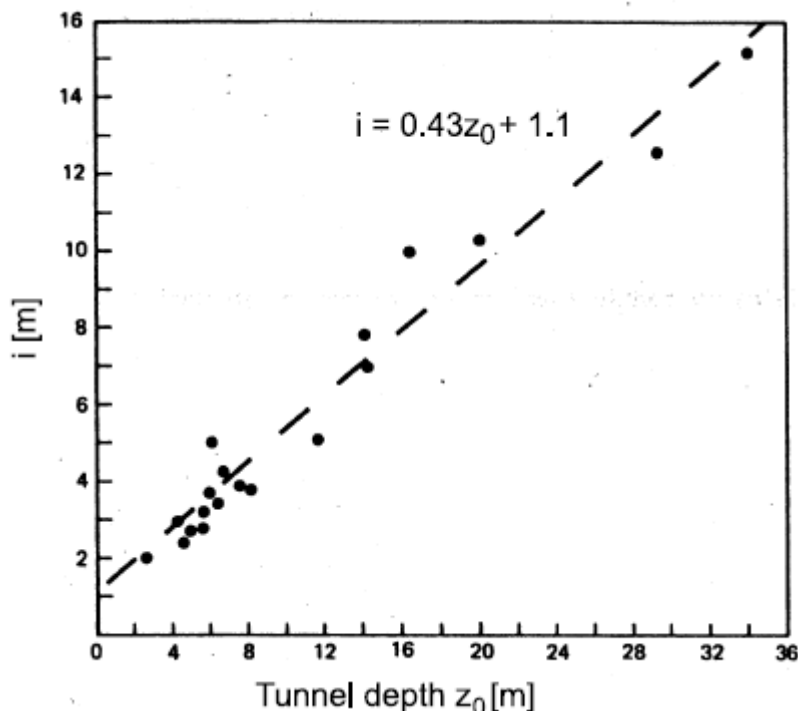
Οι O' Reilly και New (1982), συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα από δεκαεννέα έργα στα οποία πραγματοποιήθηκε διάνοιξη σήραγγων σε αργιλικούς σχηματισμούς, πρότειναν μια σχέση εκτίμησης της παραμέτρου i , σε σχέση με το βάθος διάνοιξης της σήραγγας (z_o), (Σχήμα 1.2):

$$i = 0.43 \cdot z_o + 1.1 \quad (2)$$

Από το διάγραμμα συμπεράναν ότι η γραμμική παλινδρόμηση προσεγγίζει ικανοποιητικά τα σημεία που υπολογίστηκαν από τις δεκαεννιά εφαρμογές και για αυτό θεώρησαν ότι μπορεί να εφαρμοστεί, για τον υπολογισμό της παραμέτρου i , η απλοποιητική σχέση, $i = K \cdot z_o$ (3).

Η παράμετρος K διαφέρει ανάλογα με το είδος του εδαφικού σχηματισμού που πραγματοποιείται η διάνοιξη, σε κοκκώδη εδάφη κυμαίνεται μεταξύ 0.2 και 0.3, σε

στιφρές αργίλους μεταξύ 0.4 και 0.5 και σε μαλακές ιλυο-αργίλους συνήθως λαμβάνεται ίσο με 0.7.



Σχήμα 1.2 Διάγραμμα συσχέτισης της θέσης εμφάνισης της μέγιστης κλίσης της καμπύλης καθιζήσεων από τον άξονα της σήραγγας, με το βάθος διάνοιξης (O' Reilly και New ,1982)

Από την ολοκλήρωση της σχέσης (1), υπολογίζεται ο όγκος της καθίζησης ανά μέτρο μήκους προχώρησης της σήραγγας.

$$V_s = \sqrt{2\pi i S_{\max}} \quad (4)$$

Η μείωση του όγκου του σχηματισμού λόγω της διάνοιξης της σήραγγας χαρακτηρίζεται ως το ποσοστό του όγκου της καθίζησης προς τον όγκο της σήραγγας που διανοίγεται.

$$V_L = \frac{V_s}{(\pi \cdot D^2 / 4)} \quad (5), \text{ όπου:}$$

D: η διάμετρος της σήραγγας, με ιδεατή προσομοίωση της σήραγγας με κύκλο.

1.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΑΝΕΠΙΘΥΜΗΤΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Η εκτίμηση του κινδύνου εκδήλωσης καθιζήσεων πέραν των επιτρεπτών ορίων σε κατασκευές που βρίσκονται στην περιοχή διάνοιξης σηράγγων, μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη μεθοδολογία που περιγράφουν οι Mair, Burland και Taylor.

Βάσει της εν λόγω μεθοδολογίας η εκτίμηση του κινδύνου μιας κατασκευής πραγματοποιείται σε τρία στάδια.

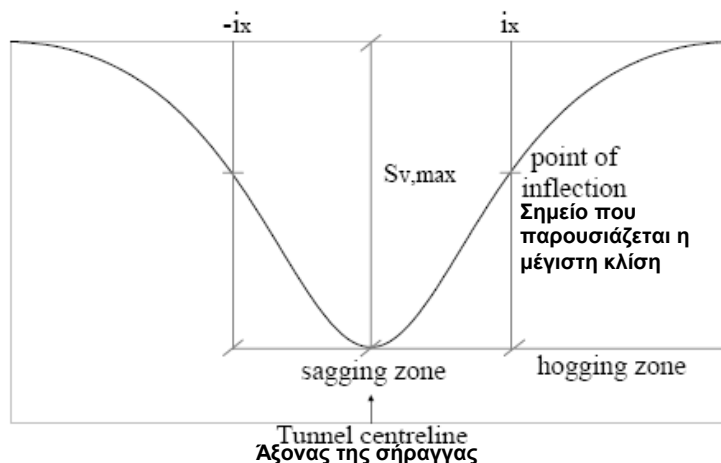
Στο πρώτο στάδιο υπολογίζονται οι αναμενόμενες καθιζήσεις με την παραδοχή ότι επικρατούν συνθήκες ελεύθερου πεδίου (αγνοείται η επίδραση της θεμελίωσης της κατασκευής ή άλλης υποδομής). Οι καθιζήσεις μπορούν να εκτιμηθούν από την εξίσωση (1).

Σε περίπτωση που οι εκτιμώμενες καθιζήσεις (S) είναι μικρότερες από 10mm και η στροφή μικρότερη του 1:500, ο κίνδυνος είναι ασήμαντος και η διαδικασία ολοκληρώνεται για τη συγκεκριμένη κατασκευή. Σε αντίθετη περίπτωση εφαρμόζεται το δεύτερο στάδιο της μεθόδου.

Στο δεύτερο στάδιο επιβάλλονται στην υπό έλεγχο κατασκευή οι παραμορφώσεις (καθιζήσεις) που εκτιμήθηκαν στο πρώτο στάδιο. Αρχικά με τη συντηρητική παραδοχή ότι η κατασκευή συμπεριφέρεται ελαστικά και συνεπώς η ακαμψία της δεν επηρεάζει την απόκρισή της. Ανάλογα με το μέγεθος των εφελκυστικών παραμορφώσεων (ϵ) που υπολογίζονται, διακρίνονται έξι κατηγορίες αναμενόμενων βλαβών στην κατασκευή:

- Κατηγορία 0(ϵ :0.0-0.05%): ασήμαντες, με εκτιμώμενο άνοιγμα ρωγμής <0.1mm
- Κατηγορία 1(ϵ :0.05-0.075%):πολύ ελαφριές, με εκτιμώμενο άνοιγμα ρωγμής <1mm
- Κατηγορία 2 (ϵ :0.075-0.15%):ελαφριές, με εκτιμώμενο άνοιγμα ρωγμής <5mm
- Κατηγορία 3(ϵ :0.15-0.3%): μέτριες, με εκτιμώμενο άνοιγμα ρωγμής <15mm
- Κατηγορία 4(ϵ >0.3%): σημαντικές έως πολύ σημαντικές, με εκτιμώμενο άνοιγμα ρωγμής >25mm

Για την ταξινόμηση της κατασκευής σε μια κατηγορία βλαβών, χωρίζεται η κατασκευή σε τμήματα τα οποία βρίσκονται στην περιοχή που η καμπύλη κατανομής των καθιζήσεων στρέφει τα κοίλα άνω (sagging) και στην περιοχή στην οποία τα στρέφει κάτω (hogging), (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3 Διαχωρισμός της καμπύλης κατανομής των καθιζήσεων σε περιοχές που στρέφουν τα κοίλα άνω και κάτω (G. Giardina, M.Rots, 2008)

Σε κάθε ζώνη υπολογίζεται η μέση τιμή των οριζόντιων (ϵ_h), διαγώνιων (ϵ_d) και καμπτικών (ϵ_b) παραμορφώσεων. Οι οριζόντιες και οι καμπτικές παραμορφώσεις προστίθενται απευθείας, $\epsilon_{bt} = \epsilon_h + \epsilon_b$. Η διαγώνια παραμόρφωση (ϵ_{dt}) υπολογίζεται ως συνδυασμός των οριζόντιων και καμπτικών παραμορφώσεων βάσει του κύκλου του Mohr των παραμορφώσεων (Mair, Taylor Burland, (1996)).

Η ταξινόμηση της κατασκευής στην κατηγορία βλαβών, πραγματοποιείται με χρήση της μέγιστης εκ των δύο παραμορφώσεων σε κάθε ζώνη.

Σε περίπτωση που η κατασκευή ταξινομείται με βάση το κριτήριο των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών παραμορφώσεων μεταξύ των κατηγοριών 0 έως 2, η διαδικασία ολοκληρώνεται, σε αντίθετη περίπτωση πραγματοποιείται το τρίτο στάδιο της διαδικασίας εκτίμησης.

Στο τρίτο στάδιο πραγματοποιείται λεπτομερής εκτίμηση των αναμενόμενων βλαβών λόγω των καθιζήσεων που αναμένεται να εκδηλωθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, λαμβάνοντας υπ' όψιν την ακαμψία της κατασκευής. Η θεώρηση της ακαμψίας, συνήθως οδηγεί σε πιο πλατιές και επίπεδες κατανομές καθιζήσεων σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου.

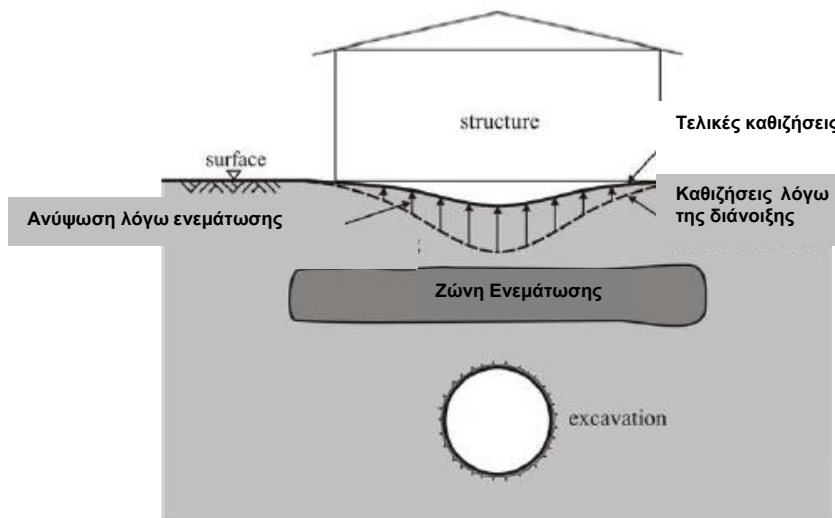
Σε περίπτωση που εκτιμηθεί κίνδυνος εκδήλωσης καθιζήσεων πέραν των επιτρεπτών ορίων, μετά την ολοκλήρωση και του τελευταίου σταδίου κρίνεται απαραίτητη η λήψη ειδικών μέτρων περιορισμού τους, όπως είναι στην περίπτωσή μας η εφαρμογή αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων.

1.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΤΙΚΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΕΣΕΩΝ

1.4.1 Εισαγωγή

Η εφαρμογή αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων (compensation grouting) αποσκοπεί στην ανάπτυξη ελεγχόμενων μετακινήσεων στον εδαφικό σχηματισμό (ανύψωσης) μέσω μιας διαδικασίας εισπίεσης ενέματος.

Η μέθοδος πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των εργασιών διάνοιξης και εκσκαφής (Σχήμα 1.4)(σε πραγματικούς χρόνους).



Σχήμα 1.4 Η μέθοδος των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων (compensation grouting) (Kummerer,2003)

Σε αυτό το στάδιο είναι χρήσιμο να γίνει διαχωρισμός μεταξύ της μεθόδου εφαρμογής διορθωτικών (corrective grouting) και αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων, καθώς και με την εκτέλεση διορθωτικών τσιμεντενέσεων επιτυγχάνεται ανύψωση. Σε αντίθεση με τη μέθοδο των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων, οι διορθωτικές εφαρμόζονται για να αντισταθμίσουν-αναιρέσουν μετακινήσεις που έχουν ήδη προκληθεί από την πραγματοποίηση εκσκαφών ή από άλλους λόγους.

1.4.2 Ορισμός

Πλήθος δημοσιεύσεων επιχειρεί να περιγράψει τη μέθοδο εφαρμογής αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων (Rawilings et al, 1998) για την προστασία κατασκευών από βλάβες που προκύπτουν από την ανάπτυξη υπερβολικών (πέρα των επιτρεπτών ορίων) καθιζήσεων (ολικών ή διαφορικών) κατά τη διάνοιξη αβαθών σηράγγων σε αστικό περιβάλλον.

Συνοπτικά, η μέθοδος βασίζεται στη σταδιακή εισπίεση ενέματος στον υπό βελτίωση σχηματισμό, με στόχο την τοπική αύξηση του όγκου του (στην περιοχή

εισπίεσης), η οποία θα οδηγήσει είτε στη συμπίκνωση του σχηματισμού είτε στη διάρρηξη του. Η παραπάνω διαδικασία θα έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση του εδάφους και την επίτευξη της επιδιωκόμενης αντιστάθμισης των καθιζήσεων.

1.4.3 Ιστορική Ανασκόπηση

Η χρήση της μεθόδου εφαρμογής αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων και γενικότερα η χρήση τεχνικών ενεμάτωσης με σκοπό τον περιορισμό ή ακόμα και την ανάρτηση των καθιζήσεων του εδαφικού σχηματισμού κατά την πραγματοποίηση υπόγειων εκσκαφών και κυρίως κατά τη διάνοιξη σηράγγων σε αστικό περιβάλλον, έχει εδραιωθεί τα τελευταία χρόνια.

Ο Mair (1994) αναφέρει ότι ο όρος των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων (compensation grouting) επινοήθηκε από τον D.W.Hight, χωρίς όμως να αναφέρεται σε κάποια συγκεκριμένη ημερομηνία. Βάσει των στοιχείων της δημοσίευσης υπολογίζεται ότι ο όρος επινοήθηκε στα τέλη του 1980 προς τις αρχές του 1990. Έκτοτε μια πληθώρα δημοσιεύσεων έχει επιχειρήσει να περιγράψει θεωρητικά αυτή τη διαδικασία ενεμάτωσης (Rawlings et al, 1998).

Ο Littlejohn (2003) κάνει μια ενδιαφέρουσα αναδρομή στην ιστορία της μεθόδου, σύμφωνα με την οποία, η πρώτη εφαρμογή της, πραγματοποιήθηκε στην Iowa των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής το 1930 για την υποστήριξη της Εθνικής Οδού. Η εφαρμογή αποσκοπούσε στην ανύψωση και επανατοποθέτηση της πλάκας του οδοστρώματος. Το χρησιμοποιούμενο ένεμα είχε λόγο νερού προς τσιμέντο ίσο με 0,45, αρκετά μεγάλο ποσοστό στερεών στο ένεμα, συγκριτικά με την αναλογία στα ενέματα που χρησιμοποιούνται σήμερα. Η εισαγωγή του ενέματος γινόταν με χρήση χειροκίνητης αντλίας και με πίεση που δεν ξεπερνούσε τα 3,5bar. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή της μεθόδου επιτεύχθηκε ανύψωση που κυμαινόταν μεταξύ 75 έως 380mm σε 3km μήκος αυτοκινητοδρόμου.

Η τεχνική εφαρμόστηκε το 1934 για τη διόρθωση των διαφορικών καθιζήσεων που είχαν εκδηλωθεί σε μια δεξαμενή αποθήκευσης, που ήταν θεμελιωμένη σε γενική κοιτόστρωση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιτεύχθη ανύψωση 127mm.

Ο Littlejohn αναφέρει ότι στη Γερμανία, ο Pleithner και ο Bernazik (1953) ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν τον όρο αντιστάθμιση (compensation) σε σχέση με τη χρήση ενέματος για τον έλεγχο των μετακινήσεων μιας κατασκευής.

Συγκεκριμένα αναφέρουν την ανύψωση μιας υψικαμίνου λιθάνθρακα, κοντά στην περιοχή Essen, και ενός σταθμού ενέργειας για το φράγμα «Hessigheim am Neckar».

Η εφαρμογή της μεθόδου των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων σε συνδυασμό με τη διάνοιξη σηράγγων πρωτοεφαρμόστηκε το 1974, μετά την κατάρρευση ενός

μήματος 23m μιας παλιάς σιδηροδρομικής σήραγγας κάτω από ένα κτίριο που ανήκε στο Πανεπιστήμιο του Kent στο Canterbury της Αγγλίας. Σε αυτή τη περίπτωση η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για τη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σχηματισμού ώστε να αποτραπεί η περαιτέρω καθίζησή του.

Η πρώτη εφαρμογή της μεθόδου που είχε σαν στόχο την παρεμπόδιση των παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια της διάνοιξης σηράγγων πραγματοποιήθηκε στη Βαλτιμόρη της Αμερικής κατά την κατασκευή του Μετρό στο διάστημα 1977-1980.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένες από τις πρώιμες εφαρμογές της μεθόδου των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων.

Περιοχή-Έργο	Χρονολογία	Σκοπός
Essen, coke oven	1949	Μεταλλευτικές δραστηριότητες
Hessingheim, Διώρυγα	1951	Απώλεια εδάφους
Wien, Νοσοκομείο	1967	Μαλακός Σχηματισμός
Bockum, Εκκλησία	1977	Μαλακός Σχηματισμός
Essen, AEG Kanis	1986	Σήραγγα ΜΕΤΡΟ

Σχήμα 1.5 Επιλογή πρώιμων εφαρμογών της εφαρμογής της μεθόδου αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων (Chambosse, Otterbein, 2002).

Από τη σύντομη αυτή ιστορική αναδρομή της μεθόδου, εύκολα μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι η μέθοδος έχει περάσει από το στάδιο διερεύνησης στην εδραίωσή της ως μέθοδος περιορισμού των αναμενόμενων καθιζήσεων του εδαφικού σχηματισμού κατά τη διάνοιξη σηράγγων σε αστικό περιβάλλον. Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε πολύ σημαντικά έργα, όπως είναι η επέκταση της γραμμής Μετρό Jubilee line στο Λονδίνο για την προστασία του πύργου του Big Ben, για την προστασία πολλών κατασκευών κατά την κατασκευή νέων γραμμών Μετρό στη Ρώμη και στη Λισσαβόνα, καθώς και σε πλήθος άλλων έργων.

1.4.4 Μέθοδοι Εφαρμογής Αντισταθμιστικών Τσιμεντενέσεων

Οι αντισταθμιστικές τσιμεντενέσεις κατά τη διάνοιξη σηράγγων, πραγματοποιούνται με δύο διαφορετικές μεθόδους:

- Τη μέθοδο της εδαφικής διάρρηξης (Soil Fracturing)
- Τη μέθοδο ενεμάτωσης υπό πίεση (Compaction Grouting)

Οι δύο μέθοδοι παρουσιάζονται αναλυτικά στα κεφάλαια 2 και 3 αντιστοίχως. Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή τους.

1.4.4.1 Σύντομη περιγραφή της Μεθόδου της Εδαφικής Διάρρηξης

Η μέθοδος της εδαφικής διάρρηξης βασίζεται στη δημιουργία και διάδοση ρωγμών εντός του εδαφικού σχηματισμού, μέσω της σταδιακής εισπίεσης ενέματος χαμηλού ιξώδους.

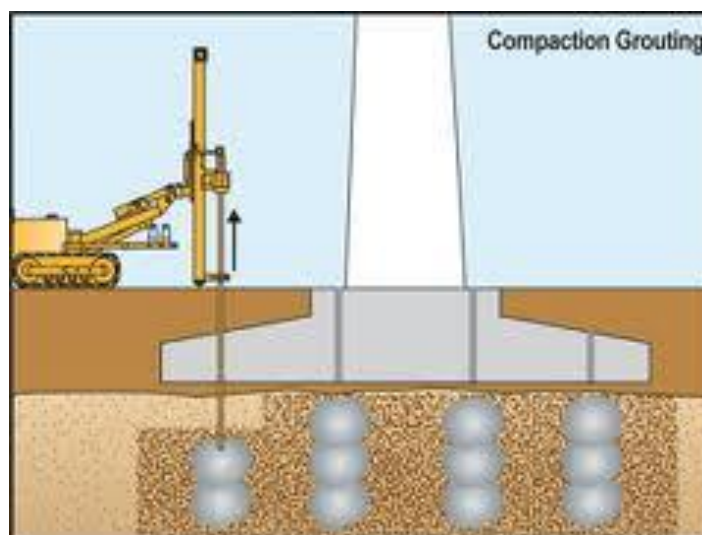
Στόχος της μεθόδου είναι η δημιουργία ενός σκελετού αποτελούμενου από φλέβες ενέματος και έδαφος, ο οποίος καθώς θα συνεχίζεται η εισπίεση ενέματος θα πιέζει το υπερκείμενο έδαφος, επιτυγχάνοντας την ανύψωσή του.



Σχήμα 1.6 Δημιουργία σκελετού αποτελούμενου από φλέβες ενέματος και έδαφος λόγω της εισπίεσης ενέματος στον εδαφικό σχηματισμό

1.4.4.2 Σύντομη περιγραφή της Μεθόδου Ενεμάτωσης υπό Πίεση

Η μέθοδος βασίζεται στην εισπίεση ενέματος υψηλού ιξώδους και χαμηλής κάθισης εντός του εδαφικού σκελετού, ούτως ώστε να μην είναι δυνατή η διείσδυση του ενέματος στα κενά του σχηματισμού κατά την εισπίεση, αλλά να σχηματίζεται μια ομοιογενής μάζα ενέματος, η οποία κατά την εξέλιξη της διαδικασίας ενεμάτωσης θα ασκεί πιέσεις στο περιβάλλον έδαφος, προκαλώντας ελεγχόμενες μετακινήσεις.



Σχήμα 1.7 Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής της μεθόδου ενεμάτωσης υπό πίεση (Ενημερωτικό φυλλάδιο της εταιρείας Hayward Baker)

Η επιβολή μετακινήσεων έχει ως αποτέλεσμα τη συμπύκνωση και την ανύψωση του σχηματισμού. Με αυτή την τεχνική επιτυγχάνεται ελεγχόμενη τοπική ανύψωση.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ *SOIL FRACTURE GROUTING*

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος της εδαφικής διάρρηξης, είναι μια από τις δύο μεθόδους που εφαρμόζονται για τον περιορισμό των διαφορικών καθιζήσεων κατά την εκτέλεση εργασιών διάνοιξης σηράγγων σε αστικές περιοχές. Η μέθοδος χρησιμοποιείται για τη βελτίωση των εδαφικών χαρακτηριστικών. Τόσο η φέρουσα ικανότητα όσο και η διαπερατότητα, ενός κοκκώδους ή ενός συνεκτικού σχηματισμού, μπορούν να τροποποιηθούν μέσω της εισπίεσης τσιμεντενέματος σε αυτόν, με σκοπό τη δημιουργία ρωγματώσεων, οι οποίες εν συνεχεία πληρώνονται με ένεμα, δημιουργώντας έναν στερεό σκελετό. Η πιο εντυπωσιακή εφαρμογή της είναι η αντιστάθμιση της καθίζησης κατασκευών, με πολύ διαφορετικά συστήματα θεμελίωσης, που προκαλείται κατά τη διάνοιξη σηράγγων στο υπέδαφος. Για την εφαρμογή της απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό και εξοπλισμός.

Τα τελευταία χρόνια έχει διαδοθεί σε αρκετές χώρες της Ευρώπης, στην Αμερική και στον Καναδά.

2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Το φαινόμενο της υδραυλικής εδαφικής διάρρηξης παρατηρήθηκε κατά την εφαρμογή «κλασσικών» μεθόδων τσιμεντένεσης. Η μη ελεγχόμενη διάδοση εδαφικών ρωγμών και η άμεση πλήρωσή τους με εγχυόμενο ένεμα είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της αποτελεσματικότητά τους, καθώς δεν επιτυγχανόταν ομοιόμορφη πλήρωση των κενών του διαταραγμένου εδάφους.

Αρχικά η μέθοδος της εδαφικής διάρρηξης εφαρμόστηκε στην πετρελαϊκή βιομηχανία. Η ρωγμάτωση του υπεδάφους αποσκοπούσε στην αύξηση της διαπερατότητάς του με στόχο τη δημιουργία διαδρομών ροής του πετρελαίου προς την πηγή απόληψής του. Η εφαρμογή αυτή, έδωσε ώθηση για την περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου.

Το 1951, εφαρμόστηκε για πρώτη φορά ως μέτρο προστασίας κατασκευής. Συγκεκριμένα, στην πόλη Essen της Γερμανίας, με την εφαρμογή της μεθόδου επιτεύχθηκε η επιθυμητή ανύψωση σε μια υψικάμινο λιθάνθρακα που είχε υποστεί καθιζήσεις.

Ουσιαστικά βήματα για τη βελτίωση της μεθόδου και τη διεύρυνση των εφαρμογών της έγιναν με την υιοθέτηση, περί το 1970, της τεχνολογίας βαλβιδωτών σωλήνων ενεμάτωσης και με την ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων παρακολούθησης και καταγραφής των μετακινήσεων σε πραγματικούς χρόνους.

Η πρώτη εφαρμογή της μεθόδου για την εξασφάλιση υφιστάμενης κατασκευής έναντι μετακινήσεων πραγματοποιήθηκε το 1985 από την εταιρεία Keller κατά τις εργασίες διάνοιξης της σήραγγας του Μετρό στην περιοχή Ruhr της Γερμανίας.

Σύντομα η μέθοδος διαδόθηκε και άρχισε να εφαρμόζεται σε χώρες όπως η Γερμανία, η Ιταλία, η Αυστρία, η Ολλανδία, η Πορτογαλία, η Ισπανία, το Βέλγιο, η Αγγλία, η Αμερική, ο Καναδάς και το Πουέρτο Ρίκο.

2.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

2.3.1 Μηχανισμός Αστοχίας

Η μέθοδος της εδαφικής διάρρηξης βασίζεται στη δημιουργία και διάδοση ρωγμών εντός του εδαφικού σχηματισμού.

Από τη βιβλιογραφία συμπεραίνεται ότι δεν είναι ξεκάθαρος ο μηχανισμός αστοχίας, που προκαλεί τη ρωγμάτωση. Ορισμένοι ερευνητές αναφέρουν ότι οι ρωγμές σχηματίζονται εξαιτίας της εισπίεσης ενέματος με τάσεις που υπερβαίνουν τη διατμητική αντοχή του σχηματισμού και ορισμένοι από την εισπίεση με τάσεις που υπερβαίνουν την εφελκυστική αντοχή του.

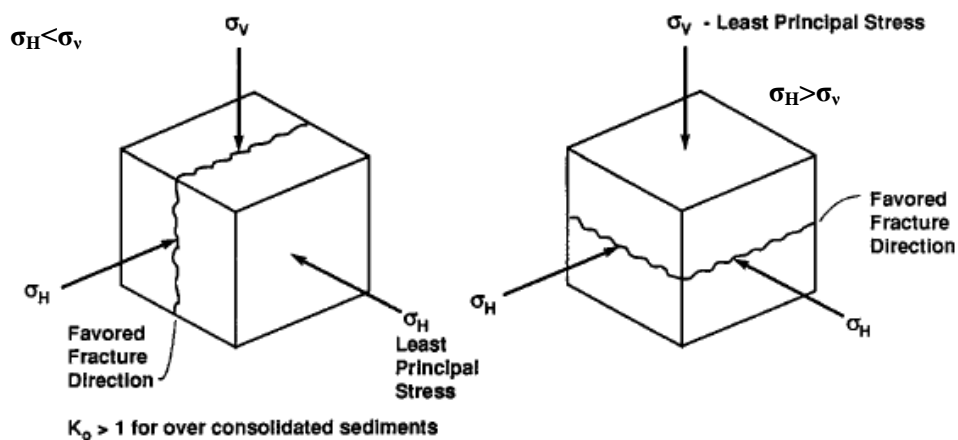
Ο Bjerrum αναφέρει ότι η ρωγμάτωση προκαλείται από την εφελκυστική αστοχία του σχηματισμού. Το ίδιο αναφέρουν και οι Andersen και λοιποί, οι οποίοι έφτιαξαν ένα πολύπλοκο μαθηματικό μοντέλο υποθέτοντας ότι ο σχηματισμός συμπεριφέρεται μη γραμμικά ελαστικά. Ο Fukushima συμπέρανε ότι στα συνεκτικά εδάφη η εφελκυστική αντοχή είναι ασήμαντη και ο μηχανισμός αστοχίας μπορεί να προσομοιωθεί με το κριτήριο Mohr Coulomb.

Οι Lockner και Byerlee υπέδειξαν ότι η υδραυλική ρωγμάτωση πραγματοποιείται είτε λόγω εφελκυστικής είτε λόγω διατμητικής αστοχίας. Ο De Pater και λοιποί πραγματοποιώντας μια σειρά πειραμάτων σε αμμώδη εδάφη, συμπέραναν ότι η αστοχία οφείλεται στην υπέρβαση της διατμητικής και όχι της εφελκυστικής αντοχής.

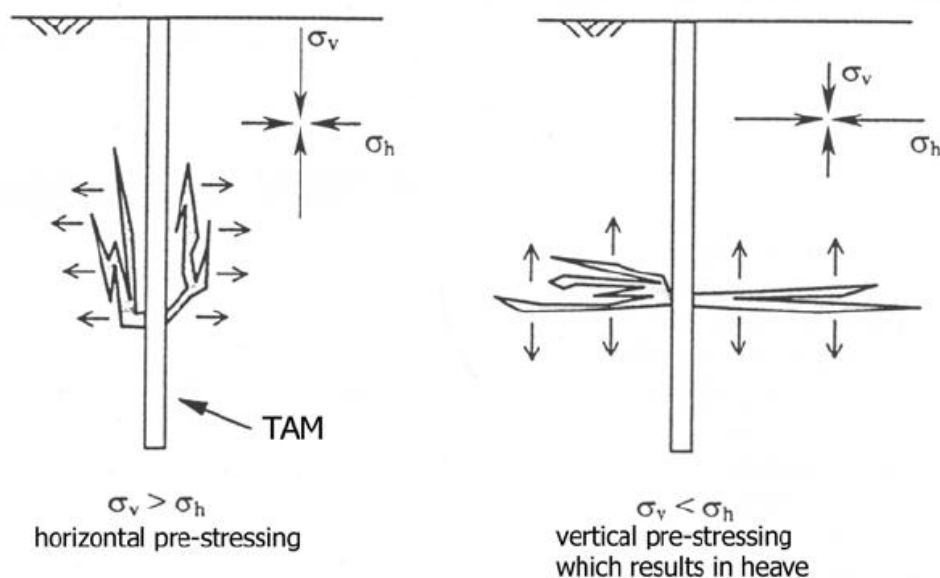
2.3.2 Διεύθυνση Ρωγμάτωσης

Η έγχυση ενέματος στον εδαφικό σχηματισμό οδηγεί στην παραμόρφωση του. Η διεύθυνση διάδοσης του αιωρήματος εξαρτάται κυρίως από την ομοιομορφία του σχηματισμού, παρόλα αυτά, από στατιστικής απόψεως, μπορεί να θεωρηθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος του εγχυόμενου όγκου οδηγεί σε παραμορφώσεις με κατεύθυνση ανάλογη των αναπτυσσόμενων κύριων τάσεων. Μόνο ένα μικρό μέρος του ποσοστού των μετακινήσεων οφείλεται στη συμπίεση του εδάφους κι αυτό γιατί η μέγιστη τάση εισπίεσης δεν υπερβαίνει κατά πολύ τη μέγιστη υπάρχουσα τάση στο σχηματισμό.

Πολλοί ερευνητές (Jaworski et al., 1981; Mori and Tamura, 1987, Panah and Yanagisawa, 1989, Mori et al., 1990, Lo and Kaniaru, 1990, Mhach, 1991; Murdoch, 1993a,b, Yanagisawa and Ali, 1994) που ασχολήθηκαν με τον τρόπο διάδοσης της ρωγμάτωσης, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι ρωγμές προσανατολίζονται σχεδόν παράλληλα στη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης. Στα κανονικώς στερεοποιημένα εδάφη, στα οποία η οριζόντια τάση είναι μικρότερη, οι ρωγμές αρχικά έχουν κάθετο προσανατολισμό, ενώ στα υπερστερεοποιημένα οριζόντιο.



Σχήμα 2.1 Διεύθυνση ρωγμάτωσης ανάλογη της διεύθυνσης της ελάχιστης κύριας τάσης (Ed. Suthan, S.Suthersan, 1999)

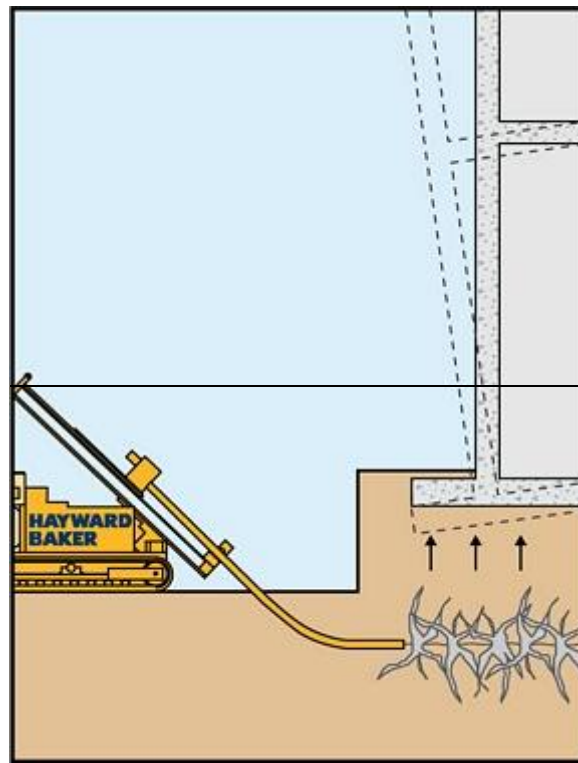


Σχήμα 2.2 Διεύθυνση ρωγμάτωσης ανάλογη της διεύθυνσης της ελάχιστης κύριας τάσης (Hockx)

Η πραγματοποίηση επαναλαμβανόμενων εγχύσεων (από τα ίδια σημεία εισπίεσης), οδηγεί σε σταδιακή αύξηση της μικρότερης τάσης και εντέλει στην εξίσωσή της με τη μεγαλύτερη. Όταν συμβεί αυτό, στα κανονικά στερεοποιημένα εδάφη δημιουργούνται οριζόντιες ρωγμές, η πλήρωση των οποίων με τσιμεντένεμα οδηγεί σε ανύψωση (Raabe and Esters, 1993).

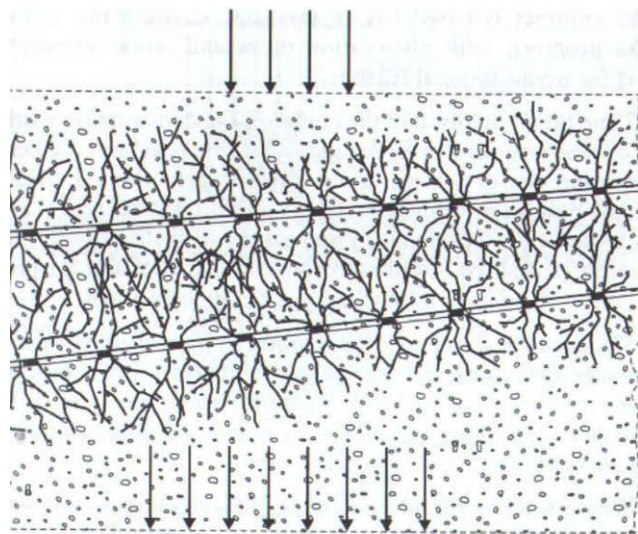
Ωστόσο, σύμφωνα με τους Massarsh (1978) και Lefebvre et al (1991), κατακόρυφη ρωγμάτωση δεν παρουσιάζεται μόνο όταν η οριζόντια κύρια τάση είναι μικρότερη, επιπλέον μπορεί να σημειωθεί και σε περιπτώσεις σχηματισμών όπου ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων K_0 είναι μεγαλύτερος της μονάδας.

Επιπροσθέτως, οι Fujisawa et al (1996) πραγματοποιώντας μια σειρά εργαστηριακών δοκιμών συμπέραναν ότι η ρωγμάτωση δε διαδίδεται μόνο κατά τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης, αλλά σε περίπτωση ύπαρξης ασθενέστερων ζωνών εντός του σχηματισμού θα κατευθυνθεί και προς αυτές.



Σχήμα 2.3 Σχηματική απεικόνιση της εκτέλεσης της μεθόδου εδαφικής διάρρηξης για την αντιστάθμιση διαφορετικών καθιζήσεων σε θεμελίωση κτιρίου (Ενημερωτικό φυλλάδιο της Hayward Baker)

Με την εισαγωγή μικρών ποσοτήτων αιωρήματος ανά στάδιο ενεμάτωσης και μέσω της επανάληψης της διαδικασίας σε κάθε θέση εισπίεσης, δημιουργείται ένας σκελετός στήριξης, αποτελούμενος από φλέβες ενέματος και έδαφος (Σχήμα 2.2), ο οποίος καθώς συνεχίζεται η διαδικασία ενεμάτωσης πιέζει τον υπερκείμενο σχηματισμό επιτυγχάνοντας την ανύψωσή του.



Σχήμα 2.4 Σκελετός στήριξης αποτελούμενος από φλέβες ενέματος και έδαφος (E. Falk, Ground Improvement,2004)

Για την ελεγχόμενη διάδοση της ρωγμάτωσης στο έδαφος, οι ποσότητες του εισπνεζόμενου αιωρήματος περιορίζονται αυστηρά και τα χαρακτηριστικά ροής των ενεμάτων ελέγχονται με τη χρήση επιταχυντών.

Από την εφαρμογή της μεθόδου έχει αποδειχτεί ότι ανάλογα με τον όγκο του υπό βελτίωση σχηματισμού, τίθεται ένα όριο ρυθμού (ταχύτητα) εισπνεύσης του ενέματος. Η εισπνεύση με μεγαλύτερη ταχύτητα θα οδηγήσει σε υπέρβαση των δυνάμεων συγκόλλησης του σχηματισμού και τη μείωση της αντίστασής του στη μετακίνηση, με αποτέλεσμα να απαιτηθεί η έγχυση σημαντικά μεγαλύτερης ποσότητας ενέματος για την επίτευξη της απαιτούμενης ανύψωσης. Κατά συνέπεια τυχόν απαίτηση επιτάχυνσης της διαδικασίας των τσιμεντενέσεων θα οδηγήσει σε αύξηση του αρχικά προβλεπόμενο όγκου ενέματος, με αντίστοιχη οικονομική επιβάρυνση.

Η μέθοδος της εδαφικής διάρρηξης μπορεί να εφαρμοστεί σχεδόν σε όλους τους εδαφικούς σχηματισμούς. Παρόλα αυτά η αποτελεσματικότητά της (§2.7.3) μειώνεται αισθητά σε συγκεκριμένες συνθήκες κάτω από τις οποίες η αρχική εντατική κατάσταση του εδάφους προσεγγίζει την κατάσταση αστοχίας. Από την εμπειρία έχει διαπιστωθεί ότι μαλακά έως πολύ μαλακά συνεκτικά εδάφη μπορούν να βελτιωθούν ελάχιστα. Σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα η εκτέλεση της μεθόδου σε τέτοιους σχηματισμούς κρίνεται αντιοικονομική.

2.3.3 Πεδίο Εφαρμογής

Σε περιπτώσεις στις οποίες οι κλασσικές μέθοδοι τσιμεντενέσεων δεν μπορούν να εφαρμοστούν για την βελτίωση-ενίσχυση του σχηματισμού που υπόκειται μιας κατασκευής καθώς και σε περιπτώσεις που απαιτείται ανύψωση ενός κτιρίου πραγματοποιείται χρήση της μεθόδου των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων.

Αναλυτικότερα η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή:

- Στην αποκατάσταση της θεμελίωσης κατασκευών που έχουν υποστεί διαφορικές καθιζήσεις ή/και στροφή των θεμελίων καθώς και στην ανύψωση κατασκευών που έχουν υποστεί καθίζηση (ή διαφορικές καθιζήσεις) μεγαλύτερη του επιτρεπτού ορίου λειτουργίας-ασφαλείας της κατασκευής.

Αφορά την εφαρμογή διορθωτικών τσιμεντενέσεων σε περιπτώσεις παραμόρφωσης του σχηματισμού που υπόκειται της ανωδομής λόγω επιβολής φορτίων που υπερβαίνουν στο σύνολο της επιφάνειας θεμελίωσης ή τοπικά τη φέρουσα ικανότητά του, εργασιών υπόγειων εκσκαφών (μεταλλευτικών κ.λ.π.), ή επιβολής σεισμικής φόρτισης.

- Στην προστασία κατασκευών από την εκδήλωση καθιζήσεων, σε πραγματικούς χρόνους.

Συγκεκριμένα μπορεί να εφαρμοστεί κατά τη διάνοιξη σηράγγων, φρεάτων (κατακορύφων ή και κεκλιμένων) καθώς και κατά την εκτέλεση μεταλλευτικών εργασιών, περιπτώσεις στις οποίες λαμβάνει χώρα ανακατανομή των τάσεων του εδάφους με αποτέλεσμα να εκδηλώνονται καθιζήσεις.

Η προστασία των κατασκευών στις παραπάνω περιπτώσεις πραγματοποιείται με χρήση αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία,-όπως έχει ήδη αναφερθεί- εξετάζεται η τελευταία περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου, που αποσκοπεί στη μείωση των επιπτώσεων της διάνοιξης σηράγγων με χρήση μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής (TBM), τόσο στο περιβάλλον όσο και στις παρακείμενες κατασκευές.

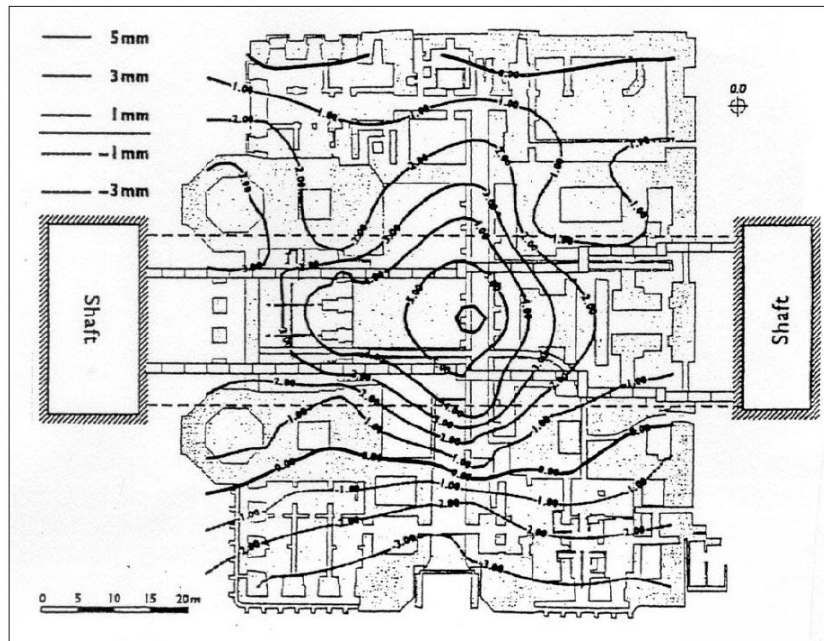
2.4 ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Ο επιτυχής σχεδιασμός της μεθόδου προϋποθέτει τη συλλογή βασικών στοιχείων που αφορούν τόσο τους σχηματισμούς της περιοχής εφαρμογής, όσο και τις επικείμενες κατασκευές στην περιοχή διάνοιξης της σήραγγας.

Η γεωλογική και γεωτεχνική διερεύνηση της περιοχής εκτέλεσης των εργασιών είναι πρωτίστης σημασίας και αποσκοπεί στην αναγνώριση των σχηματισμών της περιοχής καθώς και στον προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών τους χαρακτηριστικών.

Εξίσου σημαντική είναι και η συλλογή πληροφοριών σχετικά με την ύπαρξη, την ακριβή θέση και κατάσταση των υπερκείμενων και υπόγειων κατασκευών, καθώς και των στοιχείων θεμελίωσής τους. Βάσει των στοιχείων που συλλέγονται υπολογίζεται η ευαισθησία των κατασκευών σε ότι αφορά τις καθιζήσεις (συνολικές ή διαφορικές) και τη μέγιστη δυνατότητα ανύψωσής τους ώστε να μην επέλθουν ζημιές στην ανωδομή.

Βάσει των συλλεγόμενων στοιχείων πραγματοποιείται εκτίμηση των καθιζήσεων που αναμένεται να προκληθούν στο έδαφος κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, καθώς και του ρυθμού εξέλιξής τους. Οι εκτιμώμενες καθιζήσεις παρουσιάζονται σε ένα τοπογραφικό διάγραμμα της περιοχής με τη μορφή ισοϋψών καμπύλων (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5 Προβλεπόμενες καμπύλες καθιζήσεων κάτω από τα κτίρια στον κεντρικό σταθμό Antwerpen

Από την αξιολόγηση όλων των πληροφοριών καθορίζονται τα κτίρια που διατρέχουν υψηλό κίνδυνο και γίνεται αποτίμηση των αναμενόμενων ζημιών.

Εν συνεχεία καθορίζονται τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν και ξεκινάει ο σχεδιασμός της μεθόδου και η επιλογή των βασικών παραμέτρων εφαρμογής (πίεση, όγκος, παροχή, επίπεδα εγκατάστασης σωλήνων ενεμάτωσης).

2.5 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΑΔΙΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ

Τα βασικά στάδια εφαρμογής των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων με τη μέθοδο της εδαφικής διάρρηξης είναι τα ακόλουθα:

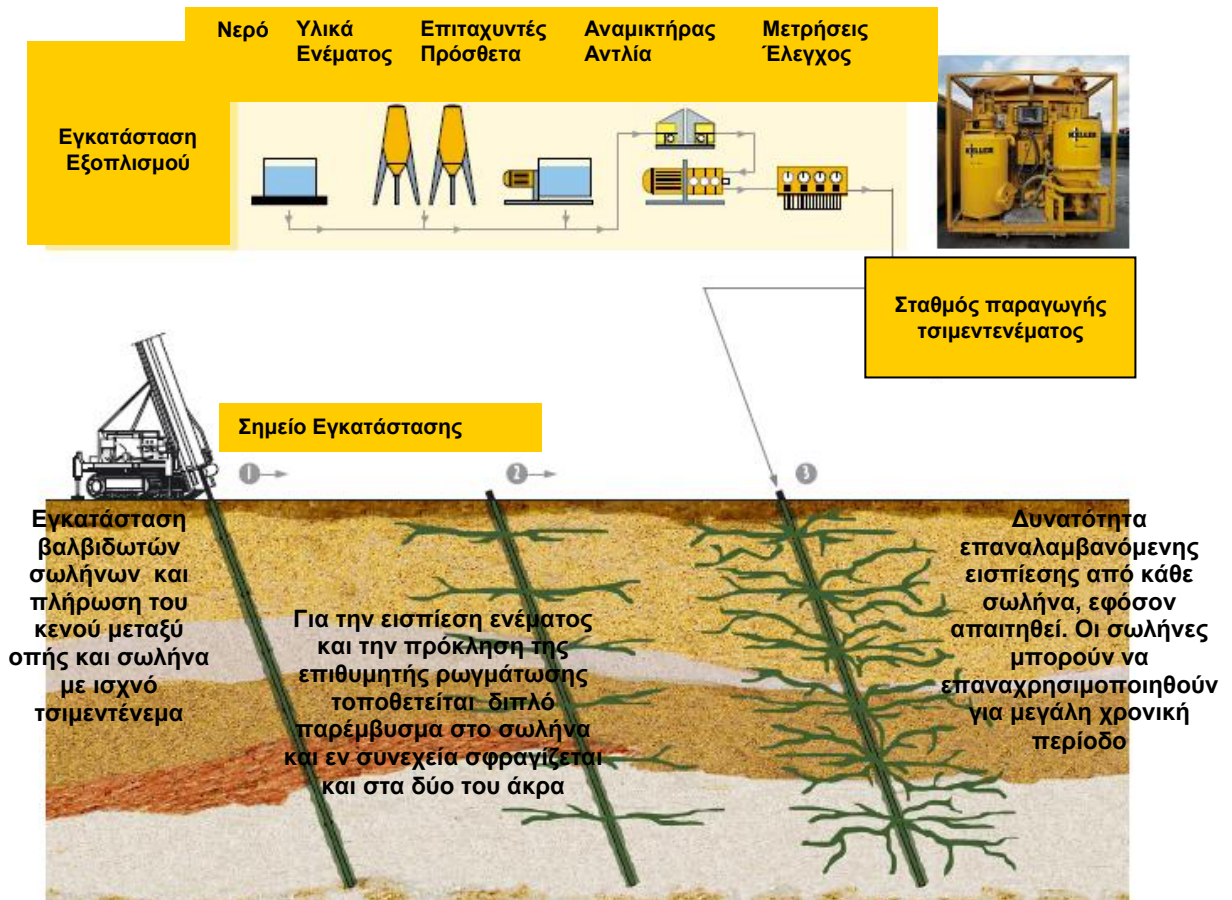
- Εγκατάσταση ειδικού συστήματος καταγραφών συνδεδεμένων με Η/Υ
- Διάνοιξη των οπών ενεμάτωσης με κατάλληλο διατρητικό εξοπλισμό
- Τοποθέτηση των βαλβιδωτών σωλήνων (T.A.M., tube a manchette) για την εισπίεση ενέματος εντός των οπών
- Παρασκευή ενέματος σύμφωνα με τη μελέτη σύνθεσης
- Προ-ενεμάτωση (pre-conditioning):

Εισπίεση ενέματος στο σχηματισμό διαμέσου βαλβιδωτών σωλήνων, με σκοπό την επεξεργασία του σχηματισμού και την προετοιμασία του για ανύψωση

- Ενεμάτωση-Ανύψωση (conditioning)

Εισπίεση ενέματος με σκοπό την πρόκληση ανύψωσης του εδαφικού σχηματισμού (και συνεπώς και της ανωδομής)

- Πρόσθετη ενεμάτωση μετά το πέρας της κατασκευής (σε περίπτωση που κριθεί απαραίτητη από την αξιολόγηση των μετρούμενων στοιχείων)



Σχήμα 2.6 Σχηματική απεικόνιση των βασικών σταδίων εκτέλεσης αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων με τη μέθοδο της εδαφικής διάρρηξης, (Ενημερωτικό φυλλάδιο της Keller)

Σε περιπτώσεις έργων που εκτιμάται ότι τα στοιχεία που συλλέχθηκαν από την εκτελεσθείσα γεωτεχνική έρευνα και η τοπική σχετική εμπειρία (από την κατασκευή έργων στην περιοχή) δεν επαρκούν για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό της μεθόδου, απαιτείται η πραγματοποίηση επί τόπου δοκιμαστικών ενεματώσεων σε φυσική κλίμακα (large scale testing). Από την εκτέλεση δοκιμών σε φυσική κλίμακα συλλέγονται πληροφορίες σχετικά με την εφαρμοζόμενη πίεση ενέματος, το ρυθμό εισπίεσης, τη σύνθεση και την απαιτούμενη ποσότητα ενέματος και ακολούθως επιλέγονται οι παράμετροι σχεδιασμού.

2.6 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΕΣΕΩΝ

2.6.1 Διάνοιξη Οπών-Εγκατάσταση Σωλήνων Ενεμάτωσης

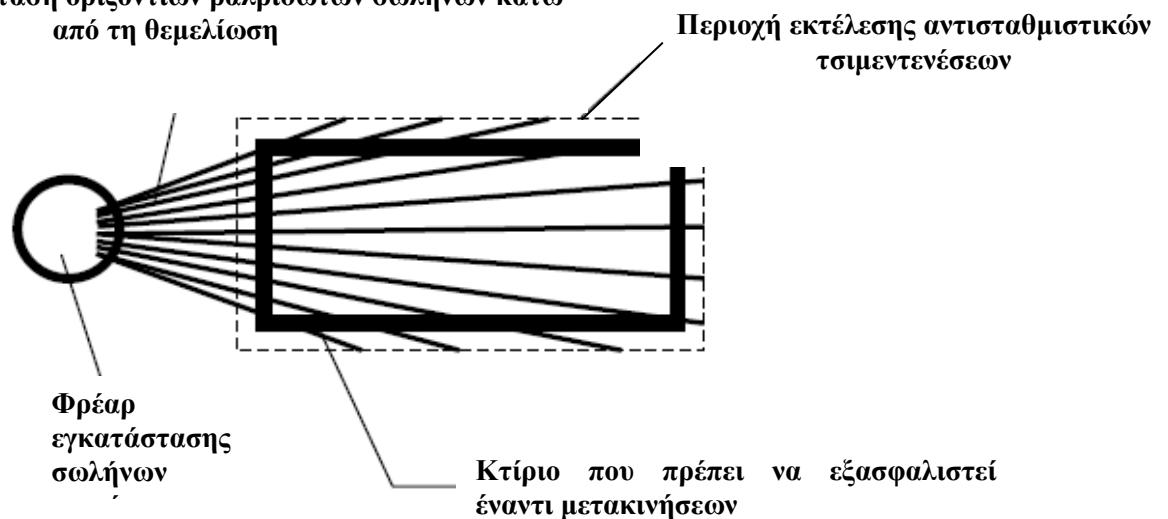
Το ένεμα εισπίζεται μέσω βαλβιδωτών σωλήνων που εγκαθίστανται σε οπές που διανοίγονται στον υπό βελτίωση σχηματισμό.

Η διάνοιξη των οπών γίνεται με συνήθη περιστροφικά (σε μαλακούς σχηματισμούς) ή περιστροφικοκρουστικά γεωτρήματα και η εξασφάλιση της ευστάθειας των τοιχωμάτων της οπής επιτυγχάνεται με χρήση προσωρινής σωλήνωσης ή διατηρητικού υγρού.

Το υλικό της διάτρησης μεταφέρεται στην επιφάνεια με πεπιεσμένο αέρα ή νερό.

Η εισπίεση ενέματος πρέπει να γίνεται από διαφορετικά σημεία κάτω από τη θεμελίωση των κτιρίων που θα εξασφαλιστούν έναντι μετακινήσεων, ούτως ώστε η ανύψωση να σημειωθεί με ελεγχόμενο τρόπο. Για το λόγο αυτό οι σωλήνες ενεμάτωσης εγκαθίστανται στις οπές γεωτρήσεων που διανοίγονται από φρέατα ακτινικά και υπό οριζόντια διεύθυνση.

Ακτινική εγκατάσταση οριζόντιων βαλβιδωτών σωλήνων κάτω από τη θεμελίωση



Σχήμα 2.7 Σχηματική απεικόνιση της εγκατάστασης οριζόντιων αγωγών από φρέαρ για την ενεμάτωση της περιοχής κάτω από τη θεμελίωση κτιρίου

Σε ειδικές περιπτώσεις όπου απαιτείται διάτρηση μεγάλου μήκους ή όταν η πρόσβαση στις απαιτούμενες θέσεις εισπίεσης είναι δύσκολη, οι οπές μπορούν να διανοιχτούν υπό κεκλιμένη διεύθυνση.

Τα φρέατα είναι συνήθως κυκλικής ή ελλειπτικής διατομής. Τα φρέατα ελλειπτικής διατομής πλεονεκτούν καθώς προσφέρουν μεγαλύτερο μέτωπο διάνοιξης των οπών (μεγαλύτερο ποσοστό εκμετάλλευσης της διατομής) και συνεπώς μπορούν να τοποθετηθούν σωλήνες εισπίεσης σε περισσότερες θέσεις κάτω από τη θεμελίωση της κατασκευής.



Σχήμα 2.8 Φρέατα εγκατάστασης σωλήνων ενεμάτωσης στα πλαίσια εκτέλεσης αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων κατά την επέκταση του Μετρό της Ρώμης



Σχήμα 2.9 Γεωτρύπανο εγκατεστημένο στον πυθμένα φρέατος για την τοποθέτηση σωλήνων στα πλαίσια κατασκευής Μετρό στην πολιτεία της Νεβάδα

2.6.2 Παρασκευή και Εισπίεση Ενέματος

Για την πραγματοποίηση της εδαφικής διάρρηξης χρησιμοποιούνται ρευστά ενέματα με κύριο συστατικό το τσιμέντο.

Η σύνθεση του ενέματος είναι διαφορετική σε κάθε στάδιο εκτέλεσης της ενεμάτωσης. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται ενέματα με διαφορετικό λόγο νερού προς τσιμέντο.

Στη φάση προ-ενεμάτωσης το ένεμα που εισπιέζεται δεν είναι πολύ πυκνό και η τάση εισπίεσης αυξάνεται σταδιακά έως ότου εξισωθεί με την απαιτούμενη τάση θραύσης του σχηματισμού (έναρξη ρωγμάτωσης). Στη συνέχεια η τάση μειώνεται απότομα και το ένεμα διαδίδεται στη ρωγμή που διανοίχτηκε.

Η συνέχιση της διαδικασίας ενεμάτωσης οδηγεί σε σταδιακή αύξηση της τάσης εισπίεσης μέχρι την πρόκληση νέας ρωγμάτωσης.

Η εισχώρηση του ενέματος στους πόρους του υπό βελτίωση σχηματισμού, ενισχύει τα χαρακτηριστικά του δημιουργώντας ένα σκελετό αποτελούμενο από έδαφος και ένεμα.

Στη φάση ενεμάτωσης (ανύψωση) χρησιμοποιείται πυκνότερο ένεμα ούτως ώστε κατά την εισπίεση να μην εισχωρεί στους πόρους τους εδάφους, αλλά να υποβάλει τάσεις στον υπό βελτίωση εδαφικό σκελετό με στόχο την πρόκληση της επιθυμητής ανύψωσης.

Ακολούθως παρουσιάζονται ενδεικτικές συνθέσεις ενεμάτων για την εφαρμογή της μεθόδου.

Σύνθεση ενέματος πλήρωσης του κενού μεταξύ του σωλήνα και της οπής

Για την παρασκευή 1m³ ενέματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν 35kg Μπεντονίτη, 250kg Τσιμέντο και 910l νερό.

Σύνθεση ενέματος που θα χρησιμοποιηθεί στη φάση προ-ενεμάτωσης

Βασικά χαρακτηριστικά του ενέματος είναι το ιξώδες, η σταθερότητα και η αντοχή. Για την παρασκευή 1m³ ενέματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν 35kg Μπεντονίτη, 350kg Τσιμέντο και 875l νερό.

Σύνθεση ενέματος που θα χρησιμοποιηθεί στη φάση ανύψωσης

Το ένεμα πρέπει να έχει υψηλότερο ιξώδες και μεγαλύτερη αντοχή από αυτό που χρησιμοποιείται στην προ-ενεμάτωση. Για την παρασκευή 1m³ ενέματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν 35kg Μπεντονίτη, 450kg Τσιμέντο και 840l νερό.

Οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις στην περιοχή του έργου για την εκτέλεση των τσιμεντενέσεων περιλαμβάνουν αποθήκες των συστατικών υλικών των ενεμάτων, συγκροτήματα τροφοδοσίας υλικών, αναμικτήρες, αναδευτήρες, αντλίες εισπίεσης ενέματος και ειδικά αυτόματα καταγραφικά συστήματα συνδεδεμένα με Η/Υ.

Το σύστημα αποθήκευσης των συστατικών σύνθεσης του τσιμεντενέματος αποτελείται από ξεχωριστούς αποθηκευτικούς χώρους για κάθε ένα από τα βασικά συστατικά του, ώστε να προστατεύονται ικανοποιητικά από τις καιρικές συνθήκες και από άλλες πιθανές μολύνσεις.

Συγκεκριμένα η αποθήκευση του νερού γίνεται απαραίτητως σε μεταλλικές ή πλαστικές δεξαμενές, των συνδετικών υλικών (τσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα, ασβέστης) και της παιπάλης (μπεντονίτη, σκωρία, άσβεστο), σε σιλό χωρητικότητας τουλάχιστον είκοσι τόνων. Τα πρόσμικτα υλικά αποθηκεύονται σε μικρά δοχεία.

Η επιλογή των κατάλληλων αναμικτήρων βασίζεται στην απαίτηση παρασκευής ομοιογενούς τσιμεντενέματος. Για το λόγο αυτό η ανάμιξη των συστατικών του πραγματοποιείται είτε σε κολλοειδείς αναμικτήρες είτε σε αναμικτήρες με υψηλές συχνότητες.

Ακόμα και στην περίπτωση ενεμάτων με υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά και μπεντονίτη, η ικανότητα ανάμιξης πρέπει να διασφαλίζει την παραγωγή επαρκούς ποσότητας ενέματος για τον εφοδιασμό των προτεινόμενων σωλήνων με συνεχή και αδιάκοπη ροή.

Για την αδιάκοπη παράδοση των ενεμάτων παρεμβάλλεται μια δεξαμενή συγκράτησης, μεταξύ των δεξαμενών ανάμιξης και του αντλητικού συγκροτήματος, εντός της οποίας πραγματοποιείται ανάδευση του μίγματος για τη διατήρηση των χαρακτηριστικών του ενέματος (αποφυγή διαχωρισμού και πρόωρης πήξης).



Σχήμα 2.10 Μονάδα παραγωγής ενέματος στην πλατεία Bologna της Ρώμης, στα πλαίσια επέκτασης του Μετρό

2.6.3 Αντλίες Εισπίεσης

Για την επιλογή κατάλληλου αντλητικού συγκροτήματος απαιτείται η εξέταση των ακόλουθων στοιχείων:

- Της δυνατότητας μεταβολής του ρυθμού παράδοσης του ενέματος.
- Της ρύθμισης της ταχύτητας εισπίεσης.
- Της ευκολίας καθαρισμού και συντήρησης των αντλιών.

- Της καταλληλότητας των διαμέτρων των βαλβίδων σύμφωνα με τις απαιτήσεις ισχύδους του εισπνεζόμενου ενέματος.

Οι σύγχρονες αντλίες εισπίεσης έχουν τη δυνατότητα αυτόματης τροποποίησης των επιβαλλόμενων πιέσεων (εξομάλυνση πιθανών μεταβολών) εντός ενός εύρους τιμών, μειώνοντας τον κίνδυνο πρόκλησης ανεπιθύμητης θραύσης του υπό βελτίωση σχηματισμού.

Όπως ακριβώς απαιτείται η χρήση ενεμάτων διαφορετικής σύνθεσης για τα διάφορα στάδια εφαρμογής της μεθόδου, έτσι απαιτείται και μεταβολή της πίεσης εισπίεσης. Συγκεκριμένα στη φάση προ-ενεμάτωσης (§2.6.4) η πίεση εισπίεσης είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την προϋπάρχουσα τάση στο σχηματισμό (αρχικό τασικό πεδίο). Εν συνεχεία και για την επίτευξη της ανύψωσης αυξάνεται σταδιακά, συνήθως όχι περισσότερο από 7MPa. Ο ρυθμός άντλησης στη φάση ανύψωσης κυμαίνεται μεταξύ 4 έως 30l/min.

2.6.4 Διαδικασία Εκτέλεσης της Ενεμάτωσης

Η διαδικασία της ενεμάτωσης πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση ενεμάτωσης καλείται προ-ενεμάτωση (pre-conditioning), πραγματοποιείται πριν την έναρξη των εργασιών διάνοιξης της σήραγγας και είναι σημαντική για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Αποσκοπεί στη βελτίωση του σχηματισμού με στόχο τη δημιουργία ενός σκελετού αποτελούμενου από έδαφος και ένεμα με αυξημένη φέρουσα ικανότητα και χαρακτηριστικά παραμορφωσιμότητας. Ενδεικτικά από τη βιβλιογραφία (Chambosee και Otterbein, 2001a) αναφέρεται μείωση των καθιζήσεων της τάξεως του 25 με 50% ανάλογα με τις εδαφικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή ενδιαφέροντος. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιτυγχανόμενη βελτίωση τόσο μειώνεται η εισπνεζόμενη ποσότητα ενέματος στη δεύτερη φάση ενεμάτωσης για την ανύψωση της κατασκευής.

Η ενεμάτωση διακόπτεται όταν οι οριζόντιες τάσεις (σ_h) υπερβούν τις κατακόρυφες (σ_v), δηλαδή όταν αρχίσει να ανυψώνεται ο σχηματισμός (το οποίο σημαίνει ότι δεν μπορεί να βελτιωθεί περισσότερο). Συνήθως ως κριτήριο τερματισμού αυτής της φάσης είναι η εκδήλωση ανύψωσης 5mm.

Η δεύτερη φάση ενεμάτωσης πραγματοποιείται κατά την περίοδο εκτέλεσης των εργασιών διάνοιξης της σήραγγας και αφορά την εισπίεση ενέματος με στόχο την ανύψωση του εδαφικού σχηματισμού που βρίσκεται μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας.

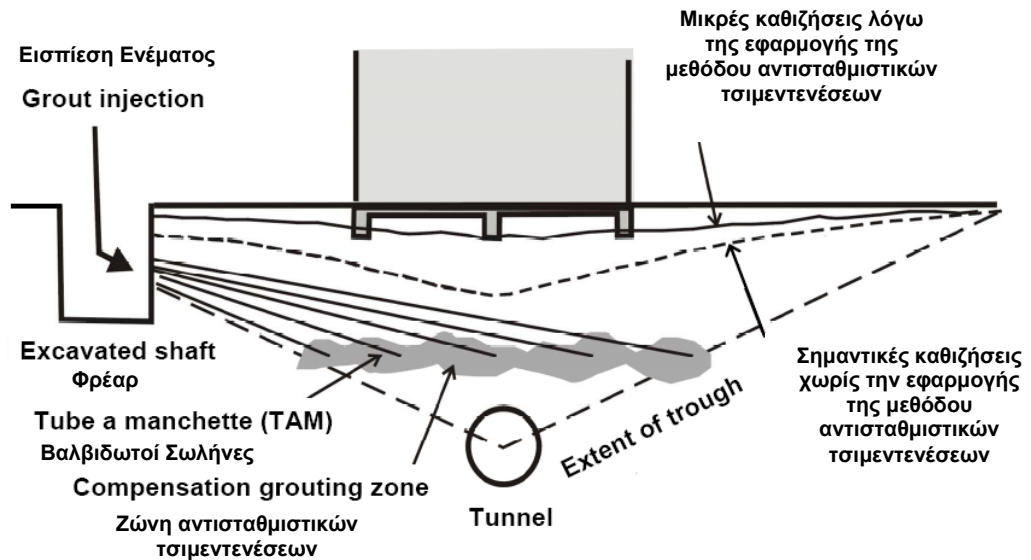
Η εισπίεση ενέματος οδηγεί σε αύξηση των οριζόντιων τάσεων (σ_h) και συνεπώς σε συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων μεγαλύτερο της μονάδας. Η ενεμάτωση έχει ως

αποτέλεσμα την οριζόντια ρωγμάτωση του σχηματισμού και ακολούθως στην ανύψωσή του.

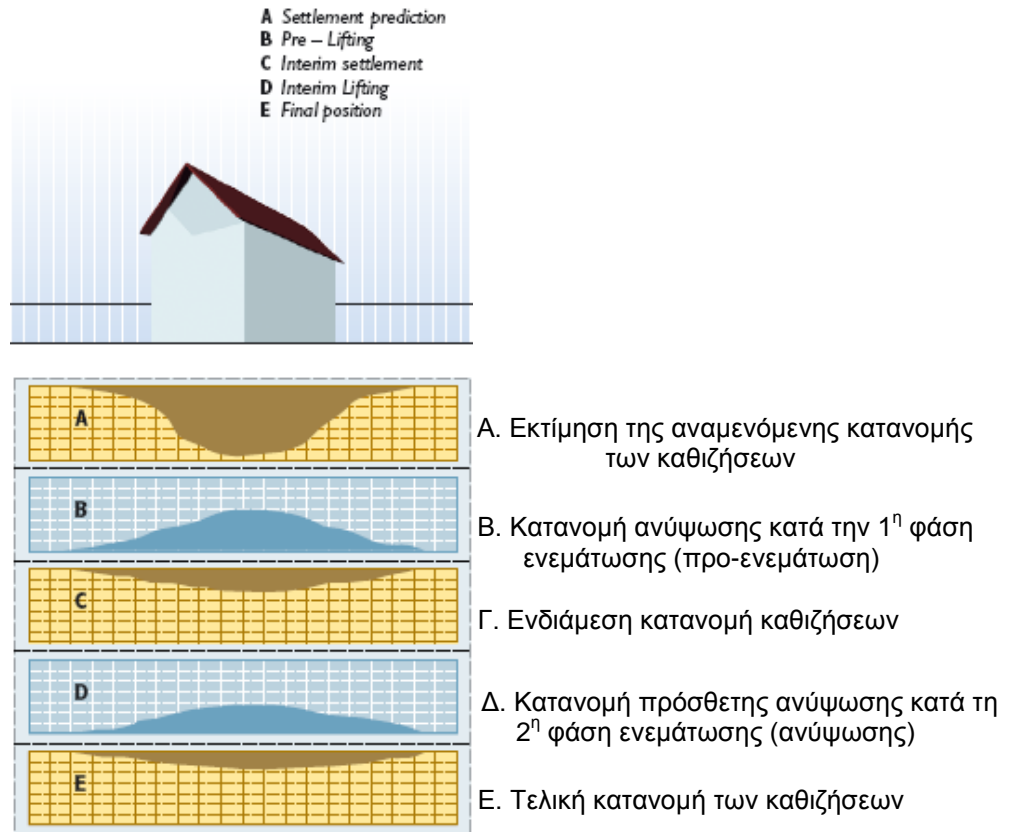
Στο χρονικό διάστημα που παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο σταδίων εκτέλεσης της ενεμάτωσης, παρακολουθείται η μεταβολή των καθιζήσεων.

Μετά το πέρας της κατασκευής της σήραγγας συνεχίζεται η παρακολούθηση και η καταγραφή των καθιζήσεων που λαμβάνουν χώρα, ούτως ώστε σε περίπτωση εκδήλωσης μακροχρόνιων καθιζήσεων, πέραν του επιτρεπτού ορίου της κατασκευής, να πραγματοποιείται πρόσθετη ενεμάτωση για αντιστάθμισή τους.

Η εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να μειώσει δραματικά τις αναμενόμενες καθιζήσεις. Η βελτίωση που επιτυγχάνεται εξαρτάται κυρίως από τον όγκο της εγχυόμενης ποσότητας, τον τύπο του σχηματισμού και το ρυθμό άντλησης (Falk, 1998).



Σχήμα 2.11 Σχηματική απεικόνιση της εφαρμογής της μεθόδου εδαφικής διάρρηξης για τον περιορισμό των αναμενόμενων καθιζήσεων (R. Mair, G. Viggiani, C. Vekiti, 2009)



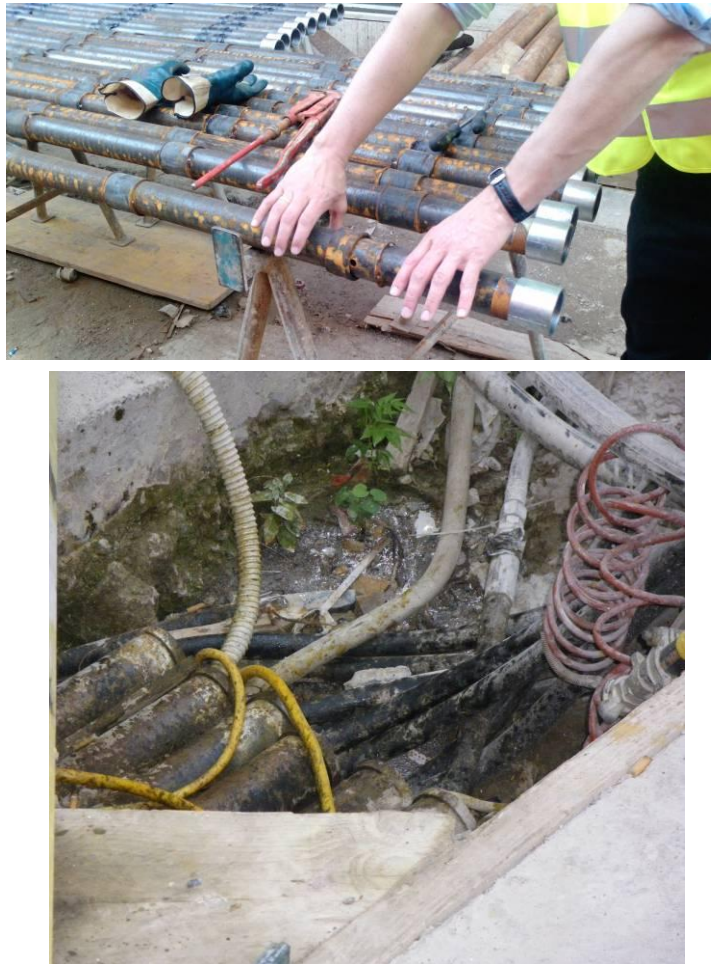
Σχήμα 2.12 Στάδια μεταβολής της κατανομής των καθιζήσεων
 (Ενημερωτικό φυλλάδιο της Keller)

2.7 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΒΑΛΒΙΔΩΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ (Τ.Α.Μ.)

Για την πραγματοποίηση ενέσεων αντιστάθμισης χρησιμοποιούνται βαλβιδωτοί σωλήνες ενεμάτωσης. Οι βαλβιδωτοί σωλήνες, είναι σωλήνες που φέρουν εσωτερικές ή εξωτερικές βαλβίδες (μανσέτες). Οι θέσεις διάταξης των βαλβίδων επιλέγονται ανάλογα με τα σημεία που επιθυμείται εισπίεση ενέματος.

Στην αγορά διατίθενται μεταλλικοί σωλήνες ή σωλήνες από άκαμπτο PVC, διαμέτρου εύρους 1 έως 4 in. Οι αποστάσεις μεταξύ των βαλβίδων μπορεί να κυμαίνονται μεταξύ 250mm και 1000mm.

Συνιστάται το μήκος των σωλήνων να μην υπερβαίνει τα πενήντα (50) μέτρα, αν και δεν αποκλείεται η τοποθέτηση σωλήνων μήκους 70 μέτρων.



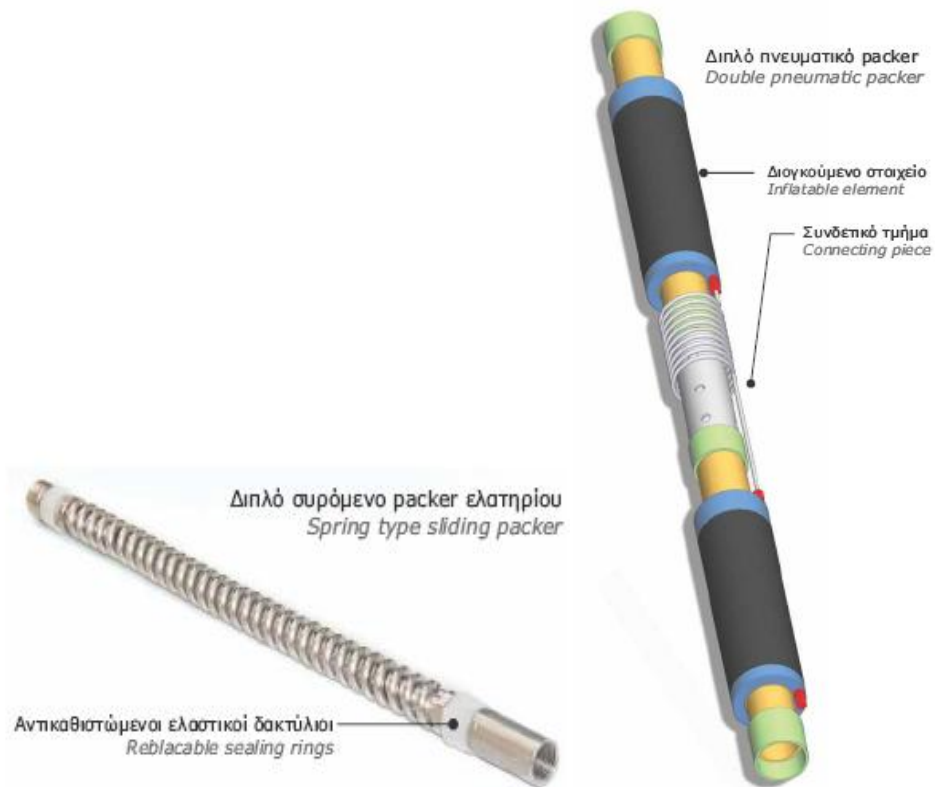
Σχήμα 2.13 Άποψη των βαλβιδωτών σωλήνων που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή της μεθόδου στα πλαίσια της επέκτασης του Μετρό της Ρώμης

Οι σωλήνες εγκαθίστανται κεντρικά στην οπή της γεώτρησης με ιδιαίτερη προσοχή για να μην μετακινηθούν από τη θέση τους οι ελαστικές μανσέτες. Στη συνέχεια, πληρώνεται το δακτυλιοειδές κενό μεταξύ του σωλήνα και της οπής με ισχύο τσιμεντένεμα (τσιμεντένεμα αρχικής πάκτωσης).

Η εισπίεση πραγματοποιείται απομονώνοντας την περιοχή κάθε βαλβίδας με διπλά ειδικά ελαστικά παρεμβύσματα (packer), τα οποία υπό πίεση διαστέλλονται και επιτρέπουν την έξοδο ενέματος αλλά εμποδίζουν, κλείνοντας, την επιστροφή του (Σχήμα 2.14). Η διόγκωση της μεμβράνης του παρεμβύσματος πραγματοποιείται με νερό ή με πεπιεσμένο αέρα.

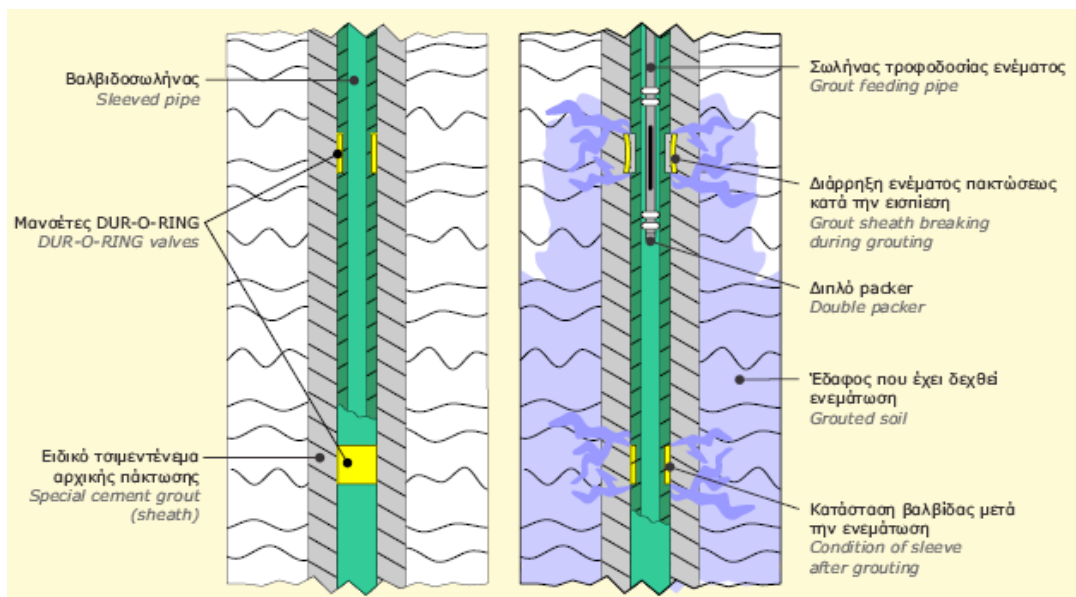
Τα παρεμβύσματα σχεδιάζονται ώστε να αντέχουν χωρίς να σημειωθεί διαρροή, πίεση νερού ίση με τη μέγιστη αναπτυσσόμενη πίεση τσιμεντένεσης.

Στην αγορά διατίθενται δύο τύποι διπλού παρεμβύσματος, τα παρεμβύσματα «συρόμενου» τύπου με άκαμπτο σώμα ή με εύκαμπτο ελατήριο και τα πνευματικά με διογκούμενα στοιχεία.



Σχήμα 2.14 Τύποι διπλών παρεμβυσμάτων (Ενημερωτικό φυλλάδιο της ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε.)

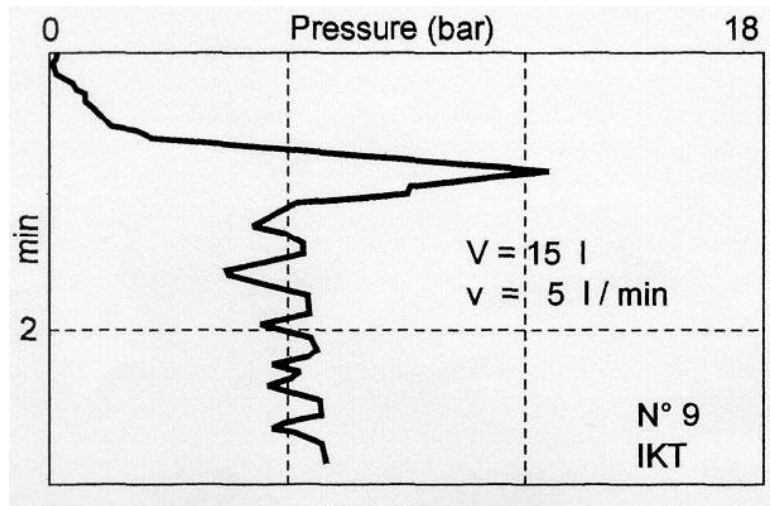
Βασικό πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης βαλβιδοσωλήνων είναι ότι επιτρέπουν την επαναλαμβανόμενη εισπίεση ενέματος σε μεταγενέστερα στάδια, μέσω των ήδη εγκατεστημένων σωλήνων, εξαιτίας της μικρής αντοχής του τσιμεντενέματος στη διεπιφάνεια μεταξύ των σωλήνων και του τοιχώματος της οπής (τσιμεντοειδές ένεμα πάκτωσης των σωλήνων της οπής).



Σχήμα 2.15 Σχηματική απεικόνιση της εισπίεσης ενέματος με χρήση βαλβιδωτών σωλήνων (Ενημερωτικό φυλλάδιο της ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε.)

2.7.1 Διαδικασία Ρωγμάτωσης του Ενέματος μεταξύ των Σωλήνων και των Τοιχωμάτων των Οπών

Στην αρχή της διαδικασίας ενεμάτωσης το μέγεθος της αναπτυσσόμενης πίεσης αυξάνεται σταδιακά έως ότου λάβει μια μέγιστη τιμή P_A (N/mm^2). Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην απαιτούμενη πίεση ρωγμάτωσης του ισχνού σκυροδέματος που παρεμβάλλεται μεταξύ του βαλβιδοσωλήνα και της οπής της γεώτρησης.

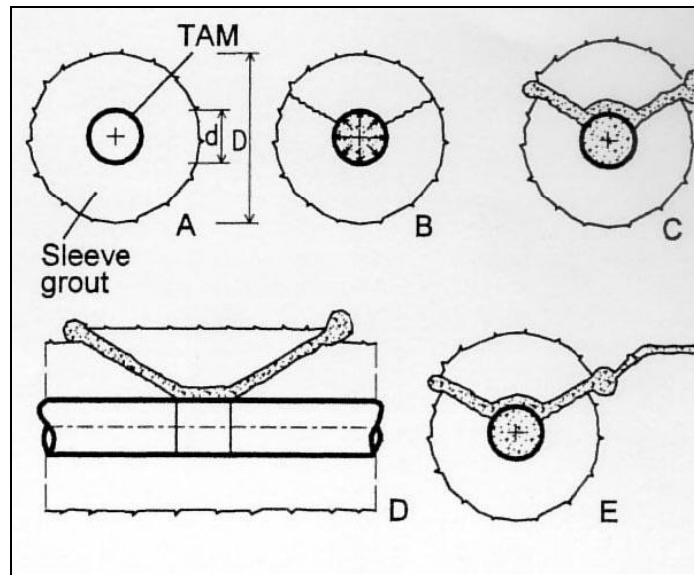


Σχήμα 2.16 Διάγραμμα πίεσης ενεμάτος (G. Chambosse, R. Otterbein, 2002)

Η ρωγμάτωση αναπτύσσεται τόσο ακτινικά όσο και αξονικά υπό γωνίες 120° δημιουργώντας τμήματα ενέματος οστρακοειδούς μορφής (Σχήματα 2.17-2.18). Στην ιδανική περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου σχηματίζονται τμήματα ενέματος διαστάσεων περίπου 20×30 cm. Το άνοιγμα των αναπτυσσόμενων ρωγμών εξαρτάται από την ενδοσιμότητα του εδάφους.



Σχήμα 2.17 Μορφή ρωγμάτωσης ισχνού ενέματος



Σχήμα 2.18 Ρωγμάτωση επιδερμικού σκυροδέματος (G. Chambosse, R. Otterbein, 2002)

Το εισπνεζόμενο ένεμα διαδίδεται διαμέσου των παραπάνω ρωγμών στον εδαφικό σκελετό, σχηματίζοντας αρχικά συσσωματώματα ενέματος. Το στάδιο αυτό σηματοδοτεί την έναρξη της εδαφικής διάρρηξης.

Το μέγεθος της απαιτούμενης πίεσης θραύσης ($P_A, N/mm^2$) του ισχνού σκυροδέματος, εξαρτάται κυρίως από την αντοχή του ισχνού ενέματος (β) και τη διάμετρο της οπής της γεώτρησης.

$$P_A = \partial e \cdot \beta (1)$$

Στην ιδανική περίπτωση που η ρωγμάτωση πηγάζει αποκλειστικά από τη δράση εφελκυστικών δυνάμεων (και όχι διατμητικών) ο συντελεστής ∂e μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (2) και εξαρτάται από τη διάμετρο της οπής της γεώτρησης D (m), τη διάμετρο του σωλήνα d (m), που σχεδόν ταυτίζεται με την απόσταση μεταξύ των παρεμβυσμάτων και το λόγο της εφελκυστικής προς τη θλιπτική αντοχή β_z/β του ισχνού ενέματος.

$$\partial e = 17.8 \cdot \left[\frac{(D^2 - d^2)}{d^2} \right] \cdot \frac{\beta_z}{\beta} (2)$$

Για παράδειγμα για διάνοιξη οπής διαμέτρου $D=0.2m$, τοποθέτηση βαλβιδοσωλήνα διαμέτρου $d=0.06m$, αντοχή ισχνού σκυροδέματος $\beta=3N/mm^2$ και λόγο $\beta_z/\beta=0.075$, υπολογίζεται απαιτούμενη πίεση για την πρόκληση θραύσης του ισχνού σκυροδέματος ίση με 40bar.

2.7.2 Επιβαλλόμενη Πίεση Εισπίεσης

Κατά την εκτέλεση της ενεμάτωσης πραγματοποιείται συνεχής καταγραφή της αναπτυσσόμενης πίεσης (P_p) όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο σημείο έγχυσης, (συνήθως στο στόμιο της αντλίας ή στην αρχή της διάτρησης).

Μετά την ολοκλήρωση των σταδίων ενεμάτωσης η τελική πίεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο ελέγχου της επίτευξης των στόχων των εργασιών ενεμάτωσης.

Η μετρούμενη πίεση (P_p), είναι σαφώς μεγαλύτερη της πίεσης που απαιτείται για τη ρωγμάτωση του σχηματισμού (P_c) καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη οι απώλειες τριβής κατά τη ροή του ενέματος μέσα στη σωλήνωση (P_L), οι απώλειες τριβής κατά τη διάδοση του ενέματος διαμέσου των ρωγμών στο ισχνό σκυρόδεμα που παρεμβάλλεται μεταξύ της σωλήνωσης και του εδάφους (P_R) και η αντίσταση κατά τη ροή του ενέματος στις εδαφικές ρωγμές (P_V), εξαιτίας της διήθησης νερού που οδηγεί σε αύξηση του ιξώδους.

Συνεπώς η πίεση που καταγράφεται και απαιτείται για την επίτευξη της επιθυμητής διάρρηξης και ανύψωσης του σχηματισμού είναι το άθροισμα των παραπάνω παραμέτρων:

$$P_p = P_L + P_c + P_R + P_V \quad (3)$$

Ο υπολογισμός της πίεσης (P_p) είναι αρκετά πολύπλοκος καθώς είναι συνάρτηση ενός πλήθους παραμέτρων που από την αξιολόγηση των καταγραφών κατά την ενεμάτωση δύναται να τροποποιηθούν. Αναλυτικές σχέσεις για τον υπολογισμό της δίδονται στο κεφάλαιο 4.

Ο Kudella (1994) μελέτησε με λεπτομέρεια τις δυνατές μαθηματικές λύσεις και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι τελικές πιέσεις μπορεί να διαφέρουν ουσιαστικά ακόμα και σε περιπτώσεις όμοιων σχηματισμών. Για το λόγο αυτό, προτείνεται ο υπολογισμός των πιέσεων εφαρμόζοντας τις ακόλουθες σχέσεις που βασίζονται σε απλοποιητικές παραδοχές.

Η πίεση (P_c) που απαιτείται για τη ρωγμάτωση του σχηματισμού είναι συνάρτηση της γεωστατικής τάσης. Κατά την ενεμάτωση υπερστερεοποιημένων σχηματισμών ή κανονικά στερεοποιημένων σχηματισμών (κατά τη δεύτερη φάση ενεμάτωσης-ανύψωσης), η πίεση P_c σε κοκκώδη εδάφη μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$P_c(\text{bar}) = \frac{1}{100} \cdot (\gamma \cdot h + p_o) \cdot a(4), \text{ όπου:}$$

γ : το ειδικό βάρος του σχηματισμού

h : το ύψος των υπερκείμενων γαιών

ρ_0 : η αναπτυσσόμενη πρόσθετη τάση στο επίπεδο του σωλήνα από τα φορτία θεμελίωσης

a : από τη βιβλιογραφία κυμαίνεται μεταξύ 1,6 και 2,0.

Η πίεση (P_R) είναι συνάρτηση του όγκου του εισπνεζόμενου ενέματος (V) και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_R (\text{bar}) = 0.08(\text{bar/l}) \cdot V(l) \quad (5)$$

Αντιστοίχως και η πίεση P_V είναι ανάλογη του όγκου (V):

$$P_V (\text{bar}) = 0.12(\text{bar/l}) \cdot V(l) \quad (6)$$

Η πίεση P_L είναι συνάρτηση της διαμέτρου και του μήκους του σωλήνα καθώς και του ρυθμού άντλησης (v). Για συνήθη ενέματα οι απώλειες που αντιστοιχούν σε ρυθμούς άντλησης της τάξεως των 5 έως 25l/min κυμαίνονται από 1bar έως 25.

Για παράδειγμα, στον κεντρικό σταθμό του Antwerp, όπου τοποθετήθηκαν σωλήνες μήκους 4m, απαιτήθηκε όγκος ενέματος $V=60l$, η ασκούμενη πίεση από τη θεμελίωση ήταν $\rho_0=300\text{kN/m}^2$ και οι απώλειες λόγω τριβών στη σωλήνωση (P_L) 6 bar. Γνωρίζοντας ότι το ειδικό βάρος του σχηματισμού ήταν $\gamma=19\text{kN/m}^3$ και εκτιμώντας $a=1.6$, υπολογίζεται μέγιστη απαιτούμενη πίεση εισπίεσης P_P ίση με 24bar.

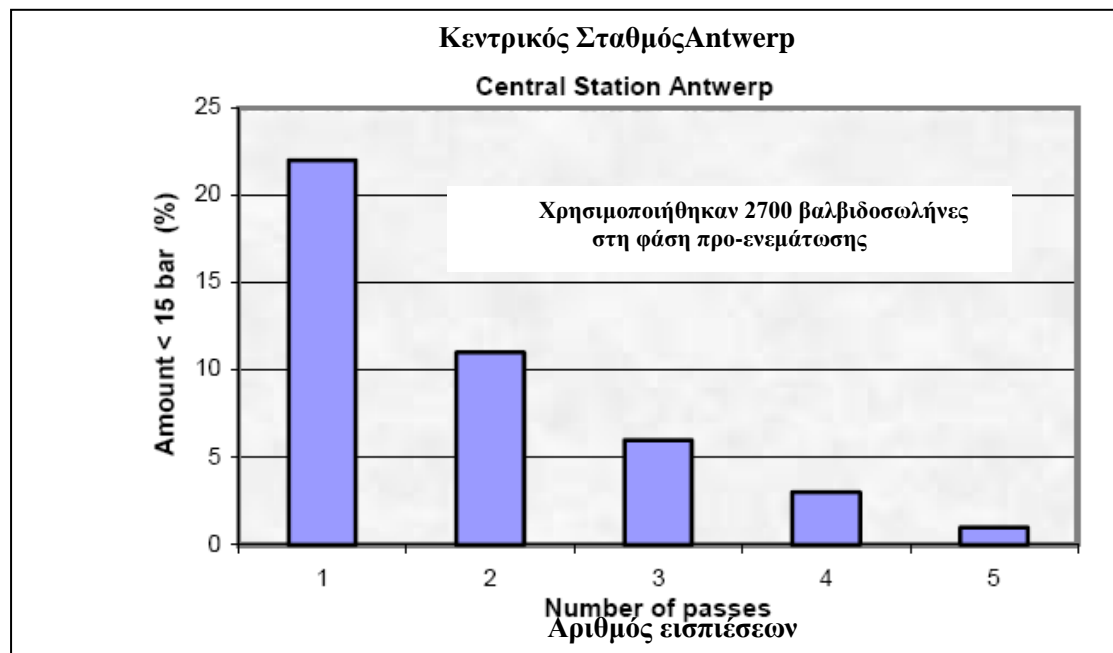
Σε περίπτωση που απαντηθεί κοιλότητα κατά την ενεμάτωση (κυρίως στη φάση προ-ενεμάτωσης), η απαιτούμενη πίεση ρωγμάτωσης μηδενίζεται και η αντίσταση ροής (P_V), μειώνεται αισθητά.

Πιθανή ύπαρξη κοιλότητας στο παραπάνω παράδειγμα και με τη θεώρηση ότι μηδενίζεται τόσο η πίεση ρωγμάτωσης όσο και η αντίσταση ροής του ενέματος κατά την κίνησή του στην κοιλότητα, οδηγεί σε σημαντική μείωση της απαιτούμενης πίεσης εισπίεσης στα 11bar.

Στη φάση προ-ενεμάτωσης η εκτίμηση της πίεσης εισπίεσης είναι δυσκολότερη καθώς πρέπει να εκτιμηθεί εκ των προτέρων η έκταση των χαλαρών ή/και διαταραγμένων ζωνών που θα απαντηθούν. Σε κάθε περίπτωση είναι δύσκολο να αποτιμηθεί εκ των προτέρων ο απαιτούμενος αριθμός εισπίεσεων σε αυτό το στάδιο.

Για παράδειγμα, κατά την κατασκευή του κεντρικού σταθμού στο Antwerp, στη φάση προ-ενεμάτωσης, στόχος ήταν η ανάπτυξη πίεσης $P_P > 20\text{bar}$. Κατά την πρώτη εισπίεση η επιθυμητή πίεση δεν αναπτύχθηκε στο 22% των θέσεων ενεμάτωσης. Συνεπώς, από ένα σημαντικό πλήθος σωλήνων απαιτήθηκε η πραγματοποίηση δύο έως πέντε επαναλήψεων για την ανάπτυξη της επιθυμητής πίεσης.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το ποσοστό των σωλήνων στους οποίους αναπτύχθηκε πίεση χαμηλότερη της απαιτούμενης συναρτήσει του πλήθους των εισπιέσεων που εκτελέστηκαν.



Σχήμα 2.19 Εφαρμογή επαναλαμβανόμενων εισπιέσεων από θέσεις ενεμάτωσης στις οποίες δεν αναπτυσσόταν η επιθυμητή πίεση, στον Κεντρικό Σταθμό Antwerp στο Βέλγιο (G. Chambosse, R. Otterbein, 2002)

Συνεπώς στη φάση προ-ενεμάτωσης είναι δύσκολος ο προκαθορισμός της ποσότητας του ενέματος που πρέπει να εισπιαστεί. Οι G. Chambosse και R. Otterbein, μελετώντας μια σειρά έργων που πραγματοποιήθηκαν στη Γερμανία συμπέραναν ότι κατά την εφαρμογή της μεθόδου σε σχηματισμούς μέσης έως υψηλής πυκνότητας η ποσότητα που απαιτήθηκε στη φάση προ-ενεμάτωσης κυμάνθηκε από 40 έως 115/m².

2.7.3 Αποτελεσματικότητα

Οι Soga και λοιποί (2000), εισήγαγαν το βαθμό αποτελεσματικότητας για τον καθορισμό του βαθμού επιτυχία της εφαρμογής της μεθόδου.

Εξ ορισμού ο βαθμός αποτελεσματικότητας (n), ορίζεται ως το πηλίκο του όγκου ανύψωσης V_h (m³) προς την ποσότητα του ενέματος ΔV_o (m³) που εισπιέστηκε σε συγκεκριμένο όγκο εδάφους V_o .

$$n_{gr} = \frac{V_h}{\Delta V_o} \cdot 100\%$$

Για την εκτίμηση του βαθμού αποτελεσματικότητας χωρίζεται η περιοχή εφαρμογής (υπό βελτίωση σχηματισμός) σε στοιχειώδη κελιά (Viggiani, presented by

Kummerer). Σε κάθε κελί περιλαμβάνεται ένας στοιχειώδης αριθμός θέσεων έγχυσης ενέματος. Το ένεμα που εισπνέζεται από κάθε αγωγό συνεισφέρει στο συνολικό όγκο κάθε στοιχείου. Άρα το V_h και το V_o αναφέρονται σε κάθε στοιχείο.

Εναλλακτικά ο βαθμός αποτελεσματικότητας (n), ορίζεται ως το πηλίκο του γινομένου της επιτευχθείσας ανύψωσης του εδάφους επί της επιφάνειας κάτοψης εφαρμογής των τσιμεντενέσεων (V_h) προς τον όγκο του ενέματος V_{ini} που εισπνέστηκε. Θεωρητικά, σε αστράγγιστες συνθήκες, θα έπρεπε να ισούται με τη μονάδα.

Από πειράματα και από την εφαρμογή της μεθόδου στην πράξη συμπεραίνεται ότι για να επιτευχθεί η επιθυμητή ανύψωση απαιτείται πολύ μεγαλύτερη ποσότητα ενέματος από τη θεωρητική και οι βαθμοί αποτελεσματικότητας που επιτυγχάνονται είναι μικρότεροι της μονάδος και γενικότερα σχετικά χαμηλοί.

Πιο συγκεκριμένα κατά την ενεμάτωση αναπτύσσεται ένας μηχανισμός φαινομένων (απρόβλεπτος προσανατολισμός διάνοιξης των ρωγματώσεων, ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων γύρω από το σημείο έγχυσης λόγω υψηλών πιέσεων εισπνέσης και ανάπτυξης πλαστικών παραμορφώσεων, αύξηση του ιξώδους λόγω εφίδρωσης ενέματος, συμπίεση του εδάφους κατά την εισπνέση ενέματος) που οδηγεί στη μείωση της αποτελεσματικότητας κατά την εφαρμογή.

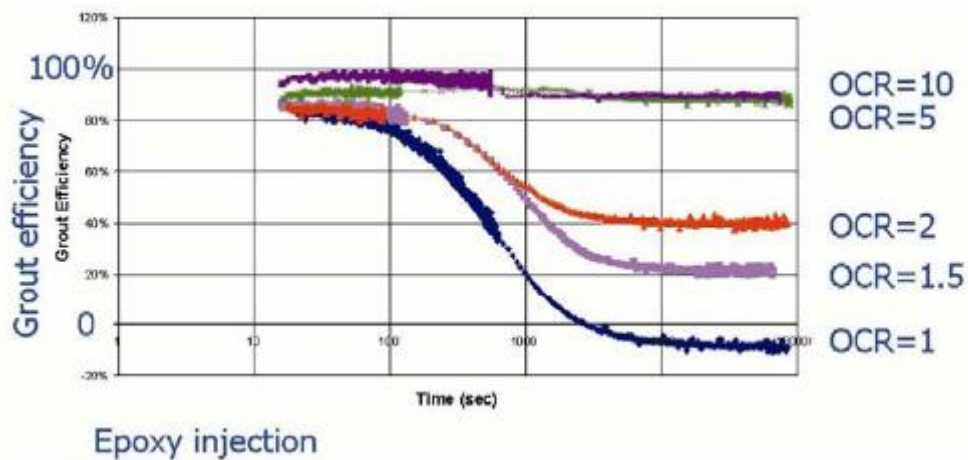
Ο βαθμός αποτελεσματικότητας δεν παραμένει σταθερός κατά τη διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου, συνήθως όσο εξελίσσεται η διαδικασία ενεμάτωσης και αυξάνεται ο όγκος του εισπνέζόμενου ενέματος στον υπό βελτίωση σχηματισμό, αυξάνεται. Στη φάση ενεμάτωσης (ανύψωση) ο βαθμός αποτελεσματικότητας συνήθως κυμαίνεται από 5% έως 20% (G. Chambosse και R. Otterbein, 2001α).

Για παράδειγμα κατά την εφαρμογή της μεθόδου στο Antwerp στη φάση προ-ενεμάτωσης ο βαθμός αποτελεσματικότητας ήταν της τάξεως του 10%, ενώ κατά τη διάνοιξη της σήραγγας της τάξεως του 35%. Ο μέσος βαθμός αποτελεσματικότητας υπολογίστηκε ίσος με 20%.

Στις περιπτώσεις στις οποίες κατά την εισπνέση του ενέματος αναπτύσσεται σημαντική υπερπίεση πόρων, ο βαθμός αποτελεσματικότητας της εφαρμογής θα μειωθεί με την πάροδο του χρόνου λόγω εκδήλωσης σημαντικών μακροχρόνιων καθιζήσεων (Au, 2000 & 2001).

Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως στις κανονικά στερεοποιημένες αργίλους, λόγω της σταδιακής αποτόνωσης της υπερπίεσης πόρων που οδηγεί στην παραμόρφωση του σχηματισμού. Στις υπερστερεοποιημένες αργίλους δεν αναμένεται η εκδήλωση σημαντικών μακροχρόνιων καθιζήσεων καθώς αναπτύσσεται μικρότερη υπερπίεση πόρων κατά την εισπνέση του ενέματος.

Συνεπώς συμπεραίνεται ότι η αποτελεσματικότητα της μεθόδου σε αργιλικούς σχηματισμούς εξαρτάται από το βαθμό υπερστερεοποίησης (OCR), που διαμορφώνεται μετά την ολοκλήρωση της φάσης προ-ενεμάτωσης.



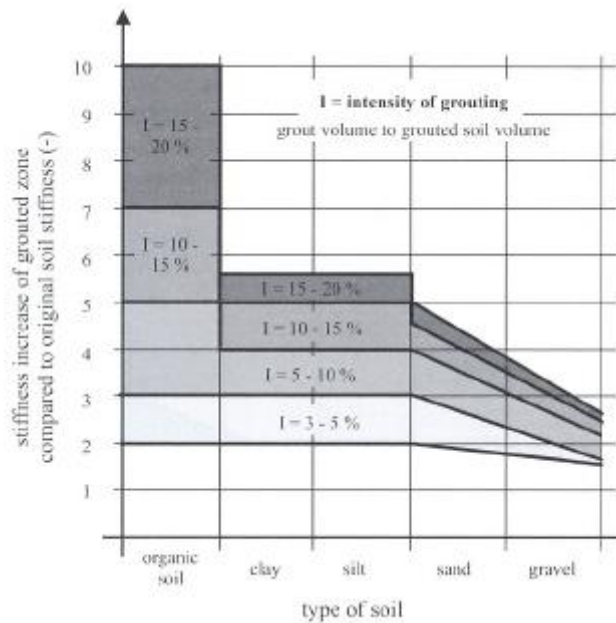
Σχήμα 2.20 Επίδραση του OCR στο βαθμό αποτελεσματικότητας της μεθόδου σε αργιλικούς σχηματισμούς (Soga et al. In Van Vilet)

Συγχρόνως, έχει διαπιστωθεί ότι ο βαθμός αποτελεσματικότητας υποδιπλασιάζεται στις περιπτώσεις που η εισπίεση πραγματοποιείται σε βάθος τετραπλάσιο του πλάτους της θεμελίωσης.

Βελτίωση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου, τόσο σε αργιλικά όσο και σε κοκκώδη εδάφη, είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί, καθώς ο μηχανισμός των φαινομένων που αναπτύσσονται κατά την ενεμάτωση δεν είναι πλήρως κατανοητός.

Παρ' όλα αυτά έχει διαπιστωθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση ακαμψίας του σχηματισμού που επιτυγχάνεται στη φάση προ-ενεμάτωσης τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση των παραμορφώσεων που θα προκληθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Η βελτίωση της ενδοσιμότητας του σχηματισμού εξαρτάται τόσο από τον τύπο του όσο και από την εισπιεζόμενη ποσότητα ενέματος.

Ο Falk, συγκέντρωσε στοιχεία από εφαρμογές της μεθόδου και παρουσίασε σχηματικά ενδεικτικές τιμές βελτίωσης της ακαμψίας ανάλογα με το είδος του εδάφους και το λόγο της ποσότητας του ενέματος και του υπό βελτίωση σχηματισμού.



Σχήμα 2.21 Αύξηση της ακαμψίας του υπό-βελτίωση σχηματισμού στη φάση προ-ενεμάτωσης (Falk)

2.8 ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ-ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

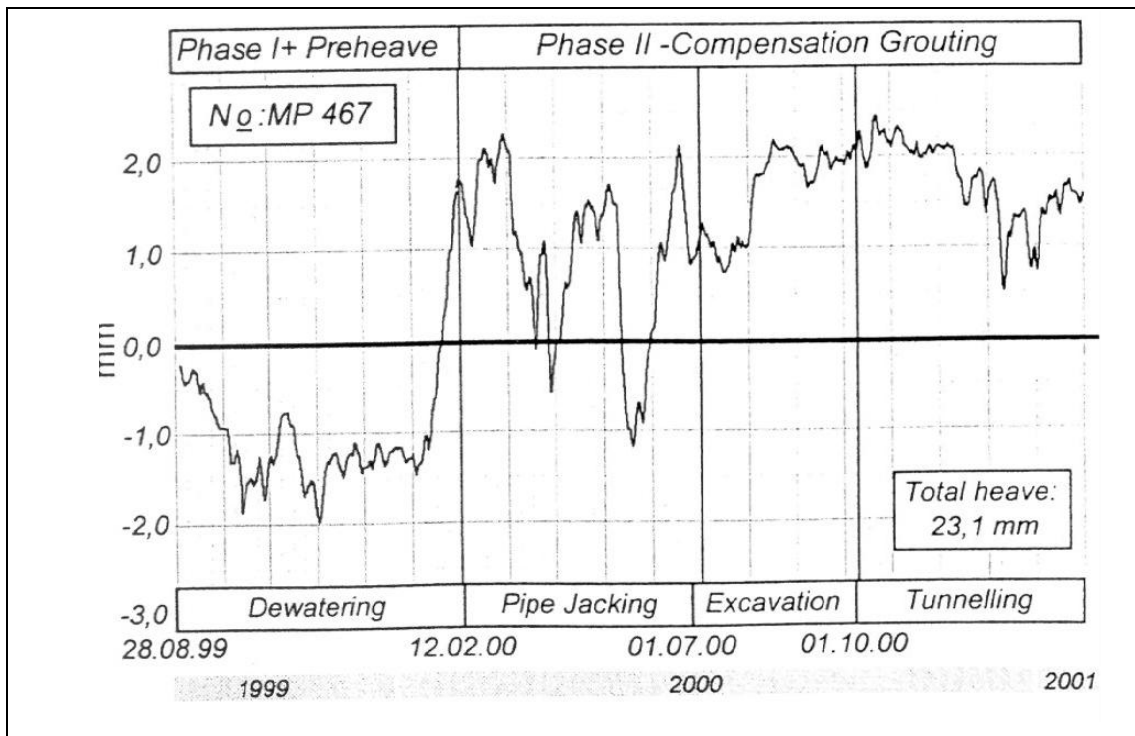
Για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας της μεθόδου είναι απαραίτητη η παρακολούθηση των παραμέτρων ενεμάτωσης (πίεση, παροχή, ποσότητα ενέματος) κατά την εκτέλεση των διαφορετικών φάσεων ενεμάτωσης καθώς και των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων τόσο στην επιφάνεια του εδάφους όσο και στις κατασκευές που επηρεάζονται από τη διάνοιξη της σήραγγας.

Η παρακολούθηση και η αξιολόγηση της μεταβολής των παραπάνω παραμέτρων παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σε σχέση με πιθανές αλλαγές των γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών επί τόπου του έργου.

Οι καταγραφές πρέπει να είναι διαθέσιμες στον υπεύθυνο μηχανικό επί τόπου του έργου σε πραγματικούς χρόνους ώστε να καθίσταται δυνατή η έγκαιρη αξιολόγηση και η πιθανή τροποποίηση των παραμέτρων ενεμάτωσης με στόχο τη βελτιστοποίηση της εφαρμογής.

Κατά το σχεδιασμό του συστήματος παρακολούθησης αποφασίζεται το είδος των οργάνων και οι θέσεις που θα εγκατασταθούν, καθώς και η συχνότητα λήψης των μετρήσεων, ούτως ώστε να καθίσταται δυνατή η εκτίμηση του ρυθμού μεταβολής των μετακινήσεων και η έγκαιρη παρατήρηση τυχόν αύξησής του.

Τα λογισμικά καταγραφής που έχουν αναπτυχθεί, παρέχουν τη δυνατότητα απεικόνισης των καθιζήσεων/ανυψώσεων με ισοϋψείς καμπύλες και τη δημιουργία διαγραμμάτων χρόνου-καθιζήσεων για κάθε ξεχωριστό σημείο μέτρησης.



Σχήμα 2.22 Ενδεικτικό Διάγραμμα Μεταβολής Μετατόπισης με το χρόνο σε ένα σημείο παρακολούθησης

Η μέτρηση των παραμέτρων ενεμάτωσης πραγματοποιείται με ειδικά αυτόματα καταγραφικά συστήματα που συνδέονται με Η/Υ, ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση των παραμέτρων σε πραγματικούς χρόνους. Η καταγραφή των απαιτούμενων παραμέτρων πραγματοποιείται στη θέση εξόδου του ενέματος από την αντλία, στο στόμιο της οπής τσιμεντένεσης και σε οποιαδήποτε άλλη θέση κριθεί απαραίτητο.

Η συστηματική παρακολούθηση της εξέλιξης των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων του εδάφους και των κατασκευών κατά την εκτέλεση της μεθόδου των αντισταθμιστικών τσιμεντένεσεων απαιτεί την εγκατάσταση διαφορετικών οργάνων και συστημάτων και πραγματοποιείται με διαφορετικούς τρόπους, όπως είναι:

- Εγκατάσταση κλισιομέτρων (inclinometers) για τη μέτρηση της μετακίνησης του εδάφους.
- Χωροσταθμική υψομετρική αποτύπωση (levelling) με χρήση χωροβάτη.
- Αποκλισιόμετρα (electro-levels) οριζοντίως διατεταγμένα για τη μέτρηση της απόκλισης από την οριζόντια διεύθυνση σε διάφορα σημεία μιας πρακτικά οριζόντιας ευθείας γραμμής (π.χ. κατά μήκος του δαπέδου ενός κτιρίου). Με την ολοκλήρωση των αποκλίσεων, υπολογίζονται οι βυθίσεις των σημείων της αρχικώς οριζόντιας γραμμής.

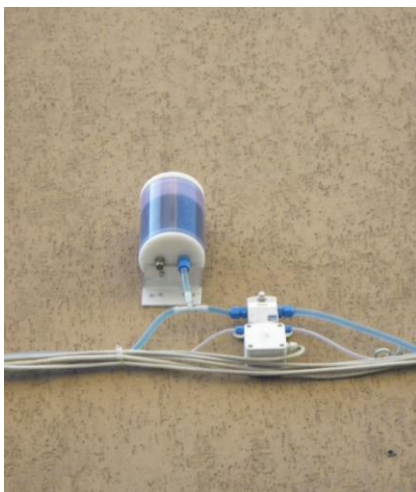
- Όργανα μέτρησης του ανοίγματος των ρωγμών (crack-meter), για την παρακολούθηση των υφιστάμενων ρωγμών, κατάλληλα για τη μέτρηση του ανοίγματός τους σε μια ή δύο διαστάσεις.
- Οπτικοί ανακλαστήρες (optical prisms) τοποθετημένοι στις όψεις των κατασκευών. Οι αναγνώσεις πραγματοποιούνται από αυτόματους θεοδόλιχους.
- Υδραυλικά συστήματα μέτρησης καθιζήσεων-ανυψώσεων (hydrostatic liquid leveling system).
- Ακριβής χωροστάθμηση διατομών για τον μέτρηση της απώλειας εδάφους.

Τα υδραυλικά συστήματα μέτρησης καθιζήσεων-ανυψώσεων, έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια. Αν και ακριβότερα, προτιμάται η εγκατάστασή τους για την παρακολούθηση των μετακινήσεων (ολικών ή διαφορικών) καθώς μπορούν να λαμβάνουν μετρήσεις και από σημεία που δεν είναι προσβάσιμα από άλλα όργανα.

Τα υδραυλικά συστήματα αποτελούνται από κυλινδρικά δοχεία που περιέχουν υγρό (συνήθως νερό), αισθητήρες μέτρησης πίεσης που συνδέονται με τη μονάδα καταγραφής και σωλήνες μικρής διαμέτρου μεταφοράς υγρού και αερίου.

Τα κυλινδρικά δοχεία που περιέχουν το υγρό (Σχήμα 2.23) τοποθετούνται στις θέσεις που επιθυμείται η παρακολούθηση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, και συνδέονται μεταξύ τους και με την κεντρική δεξαμενή του συστήματος (Σχήμα 2.24) διαμέσου γραμμών μεταφοράς του υγρού.

Για τη διασφάλιση ίσης πίεσης στα κυλινδρικά δοχεία, τα δοχεία συνδέονται και με γραμμή παροχής αερίου.

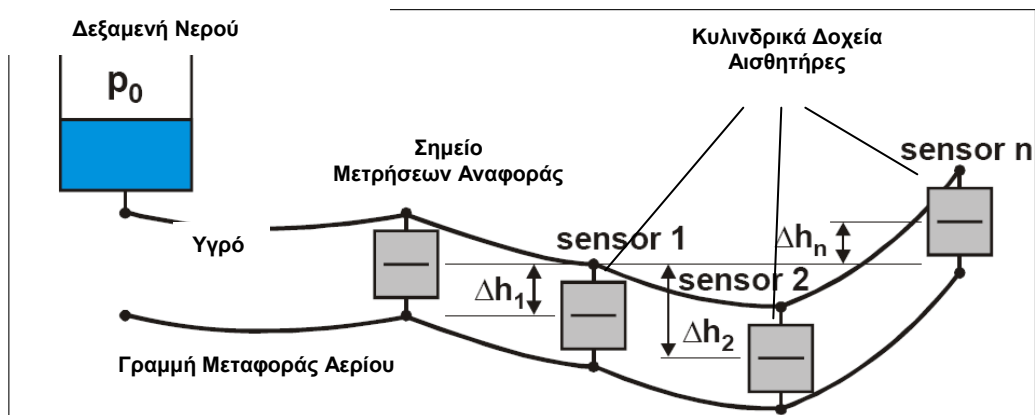


Σχήμα 2.23 Θέσεις τοποθέτησης κυλινδρικών δοχείων με νερό για τη μέτρηση της παραμόρφωσης κτιρίων κατά την εφαρμογή της μεθόδου αντισταθμιστικών τιμεντενέσεων στα πλαίσια κατασκευής νέας γραμμής Μετρό στη Ρώμη

Η λειτουργία των υδραυλικών συστημάτων βασίζεται στην αρχή των συγκοινωνούντων δοχείων.

Το υγρό (νερό) που περιέχουν τα κυλινδρικά δοχεία είναι αρχικά σε ηρεμία. Σε περίπτωση μετακίνησης του εδαφικού σχηματισμού, μεταβάλλεται η στάθμη του και αρχίζει η μεταφορά του υγρού διαμέσου των σωλήνων.

Η μέτρηση των ανυψώσεων/καθιζήσεων βασίζεται στη μέτρηση της διαφοράς της πίεσης μεταξύ της κάθε θέσης παρακολούθησης (κυλινδρικό δοχείο) και της πίεσης στη θέση αναφοράς που έχει οριστεί. Ως πίεση αναφοράς επιλέγεται το ύψος της στάθμης του υγρού της δεξαμενής νερού.



Σχήμα 2.24 Αρχή λειτουργίας Μετρητικού Συστήματος Ανύψωσης Νερού της εταιρείας Ge-Tec

Το σύστημα, όπου απαιτείται, μπορεί να εγκατασταθεί σε διαφορετικές στάθμες (Σχήμα 2.25).



Σχήμα 2.25 Εγκατεστημένο υδραυλικό σύστημα για την παρακολούθηση των μετακινήσεων μιας ιστορικής σιδηροδρομικής γέφυρας κατά την επέκταση της γραμμής Μετρό στη Ρώμη

Οι αισθητήρες πίεσης που χρησιμοποιούνται είναι υψηλής αξιοπιστίας. Ακολούθως δίδεται ένα εύρος τιμών των τεχνικών χαρακτηριστικών τους.

- Εύρος μετρήσεων: 0-200 έως 0-500mm.
- Ακρίβεια περίπου 0.02mm.
- Θερμοκρασία λειτουργίας: -20 έως 80°C.

Βασικό μειονέκτημα του υδραυλικού συστήματος καταγραφής είναι ότι η μεταβολή της στάθμης του υγρού επηρεάζεται τόσο από το ύψος του κυλινδρικού δοχείου όσο και από τις θερμοκρασιακές μεταβολές.

Σύμφωνα με τον Dames (1990) η θερμοκρασία επιδρά στην ακρίβεια του μετρητικού συστήματος κυρίως με τους ακόλουθους τρόπους:

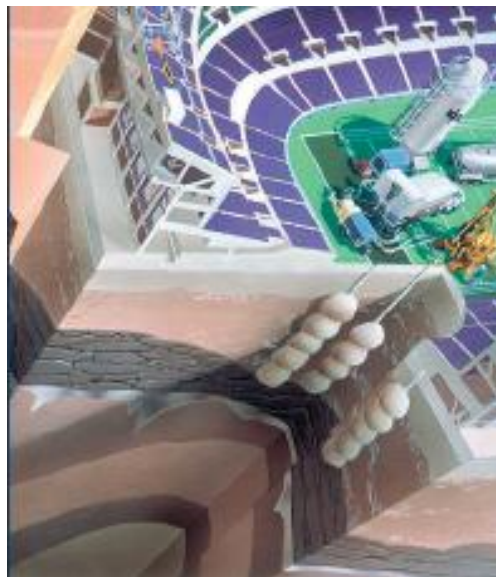
- Μεταβολή της πυκνότητας του νερού.
- Διαστολή των δεξαμενών νερού.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΝΕΜΑΤΩΣΗΣ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ *COMPACTION GROUTING*

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαδικασία ενεμάτωσης υπό πίεση μπορεί να αντικαταστήσει τη μέθοδο της εδαφικής διάρρηξης για την εκτέλεση αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων.

Η μέθοδος βασίζεται στην ώθηση, υπό υψηλή πίεση, ενέματος μεγάλου ιξώδους και μικρής κάθισης, σε χαλαρές εδαφικές στρώσεις (κυρίως σε αμμώδη και ιλυώδη εδάφη) με στόχο τη συμπίκνωσή τους.



Σχήμα 3.1 Σχηματική απεικόνιση της εφαρμογής ενέσεων για την ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας επιφανειακής χαλαρής εδαφικής στρώσης (Ενημερωτικό φυλλάδιο της εταιρείας Keller)

Η μέθοδος εφαρμόστηκε αρχικά για την αποκατάσταση κατασκευών ευαίσθητων στις μετακινήσεις, μέσω της επί τόπου συμπίκνωσης του σχηματισμού θεμελίωσης. Στην πορεία εξελίχτηκε και σήμερα έχει ένα ευρύτερο πεδίο εφαρμογών.

Μια από τις πιο ενδιαφέρουσες εφαρμογές της μεθόδου, αποτελεί η χρήση της κατά τη διάνοιξη σηράγγων. Η ενεμάτωση πραγματοποιείται στην περιοχή μεταξύ της στέψης της σήραγγας και της θεμελίωσης μιας κατασκευής με σκοπό την ελεγχόμενη

ανύψωσή της και την αποφυγή εκδήλωσης καθιζήσεων πέραν των επιτρεπτών ορίων.

Η μέθοδος ενεμάτωσης με πίεση αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ και σταδιακά διαδόθηκε και σε άλλες χώρες του κόσμου.

3.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

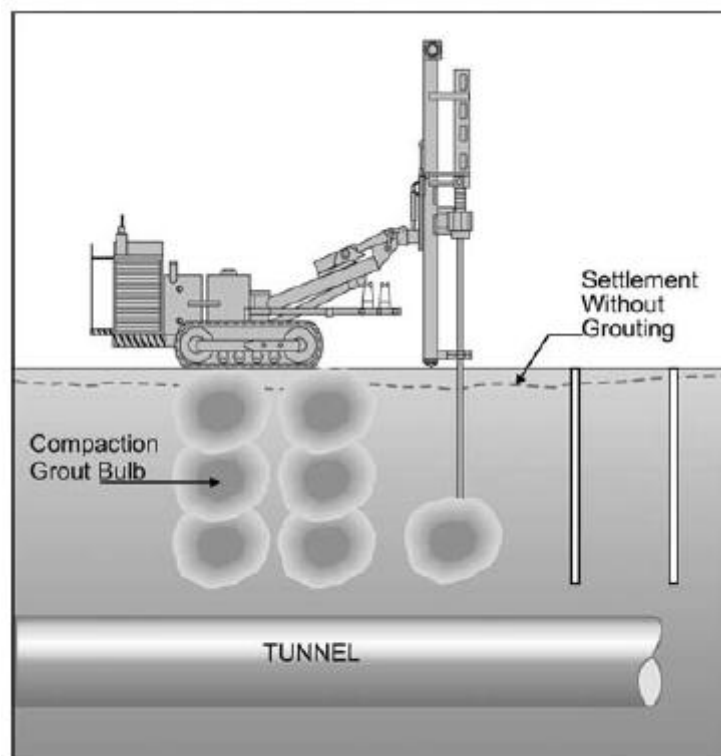
Στις αρχές της δεκαετίας του πενήντα ('50), στην Καλιφόρνια, οι εργολάβοι έργων διερεύνησαν τις δυνατότητες χρήσης κονιαμάτων υψηλού ιξώδους και μικρής κάθισης και συμπέραναν ότι κατά την εισπίεσή τους στο έδαφος, κάτω από το επίπεδο θεμελίωσης, μπορούν να το συμπυκνώσουν και να βελτιώσουν τα μηχανικά του χαρακτηριστικά.

Σύμφωνα με τον James Warner (1982) η πρώτη εφαρμογή της μεθόδου, πραγματοποιήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του πενήντα ('50) στη Δυτική Ακτή της Αμερικής. Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του εβδομήντα ('70) η χρήση της είχε γίνει αποδεκτή και σε άλλα μέρη της Αμερικής.

Τα πρώτα τριάντα χρόνια εφαρμόστηκε αποκλειστικά για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του υπεδάφους. Σύμφωνα με τους Graf (1969), Mitchell (1970) και Brown και Warner (1973), η εξέλιξη της μεθόδου οδήγησε στην αντικατάσταση των μέχρι τότε χρησιμοποιούμενων μεθόδων (πραγματοποίηση τιμμεντέσεων με χρήση υδαρούς ενέματος).

Έκτοτε η μέθοδος εξελίχθηκε και η χρήση της επεκτάθηκε σε ένα ευρύτερο πεδίο εφαρμογών (Rubright & Bandimere, 2004).

Η εφαρμογή της για τον περιορισμό των καθιζήσεων που προκαλούνται κατά τη διάνοιξη αβαθών σηράγγων σε αστικές περιοχές ξεκίνησε το 1977. Έκτοτε βρήκε εφαρμογή σε αντίστοιχες περιπτώσεις και σε άλλες πολιτείες τις Αμερικής (Ουάσιγκτον, Βαλτιμόρη, Βοστόνη, Λος Άντζελες, Σιάτλ).



Σχήμα 3.2 Σχηματική απεικόνιση της εφαρμογής ενέσεων σταθεροποίησης κατά τη διάνοιξη σήραγγας σε αστικό περιβάλλον, πάνω από την περιοχή προχώρησης του μετώπου (R.Rubright & S.Bandimere, 2004)

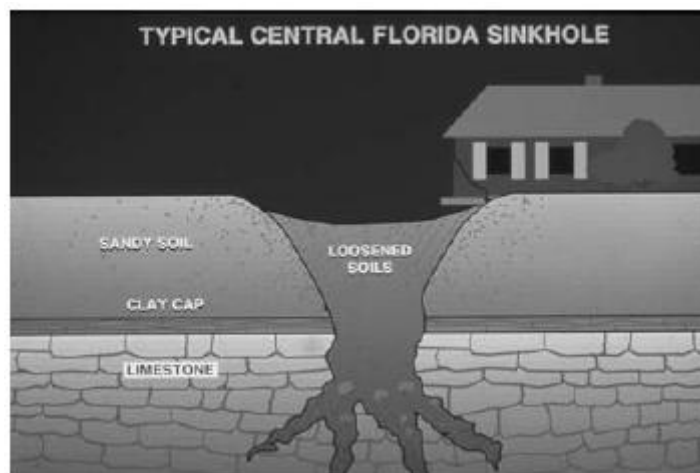
Στις αρχές της δεκαετίας του ογδόντα ('80) εφαρμόστηκε στην κατασκευή έργων για τη βελτίωση του σχηματισμού θεμελίωσής τους. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με τη μέθοδο της βαθιάς δυναμικής συμπύκνωσης (dynamic deep compaction) στη συμπύκνωση του εδάφους θεμελίωσης δύο μονάδων (600MW) παραγωγής ενέργειας (με καύση άνθρακα) στη Φλόριντα.

Πολύ σύντομα, ξαναεφαρμόστηκε για την κατασκευή μιας μεγάλης πυρηνικής υποθαλάσσιας μονάδας στη Georgia της Βόρειας Αμερικής. Σε αυτή την περίπτωση εφαρμόστηκε σε συνδυασμό τόσο με τη μέθοδο της βαθιάς δυναμικής συμπύκνωσης (dynamic deep compaction) όσο και με τη μέθοδο της δονητικής συμπύκνωσης (vibro-compaction).

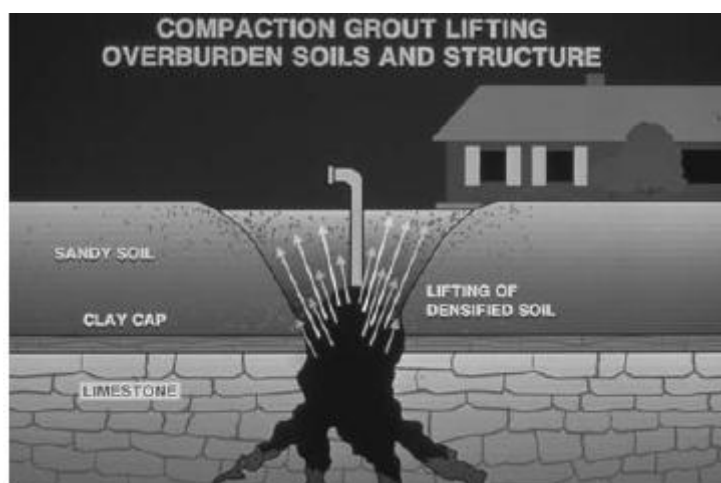
Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για τη συμπύκνωση χαλαρού κοκκώδους σχηματισμού που απαντήθηκε σε μεγάλο βάθος και ήταν δυναμικά ευάλωτο σε ρευστοποίηση. Η πραγματοποίηση των άλλων μεθόδων τσιμεντένεσης, ήταν αντισυμβατική λόγω του μεγάλου βάθους που απαντήθηκαν οι σχηματισμοί.

Στα μέσα της δεκαετίας του ογδόντα ('80) άρχισε η εφαρμογή ενέσεων συμπύκνωσης για την αποκατάσταση δολίνων (χοανοειδής καταβυθίσεις του

φυσικού εδάφους) τόσο στην πολιτεία της Φλόριντα όσο και σε άλλες περιοχές της Βορειοανατολικής Αμερικής.



Σχήμα 3.3 Σχηματική Απεικόνιση δολίνης στην πολιτεία της Φλόριντα (R.Rubright & S.Bandimere, 2004)



Σχήμα 3.4 Εφαρμογή ενεμάτωσης με πίεση για την ανύψωση κατασκευής (R.Rubright & S.Bandimere, 2004)

Τη δεκαετία του ενενήντα ('90) η τεχνολογία εφαρμογής των ενέσεων συμπύκνωσης διαδόθηκε στην Ιαπωνία. Αρχικά αντιμετωπίστηκε με επιφύλαξη. Ο καταστρεπτικός σεισμός που σημειώθηκε στο Κόμπε το 1995, οδήγησε στην υιοθέτησή της για την επιτυχή αντιμετώπιση των καθιζήσεων (ολικών ή διαφορικών) που υπέστησαν πολλές κατασκευές.

Σήμερα η μέθοδος έχει διαδοθεί εκτός των συνόρων της Αμερικής και της Ιαπωνίας και σε διάφορες χώρες της Ευρώπης.

Παρόλα αυτά αξίζει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες εφαρμογές πραγματοποιούνται στην Αμερική καθώς στην Ευρώπη, στις μέχρι τώρα εφαρμογές, προτιμάται η χρήση της μεθόδου της εδαφικής διάρρηξης.

3.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

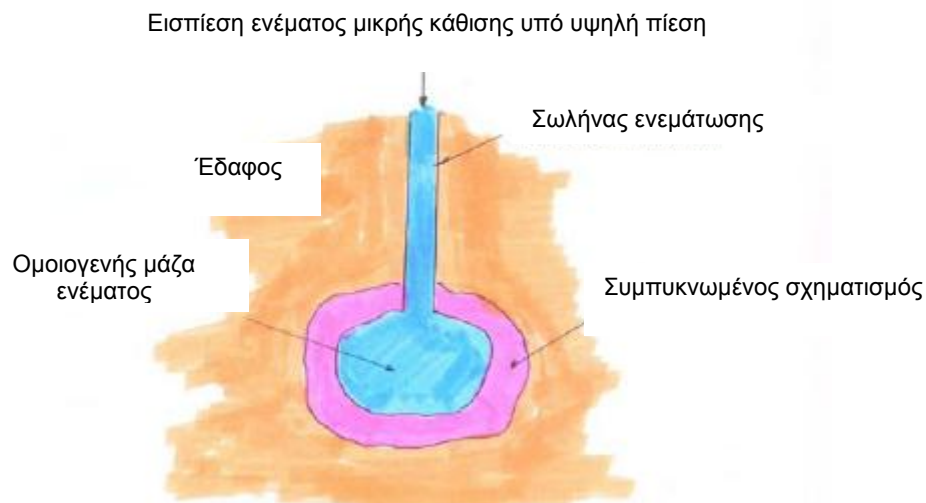
3.3.1 Ορισμός

Το 1980, δημοσιεύτηκε από την επιτροπή της ένωσης Πολιτικών Μηχανικών Αμερικής, στο περιοδικό Journal of the Geotechnical Engineering Division, επίσημος ορισμός της ενεμάτωσης υπό πίεση (compaction grouting).

Βάσει του ορισμού η ενεμάτωση υπό πίεση πραγματοποιείται μέσω της εισπίεσης ενέματος με κάθιση μικρότερη των 25mm. Τα ενέματα είναι συνήθως μίγματα εδάφους-τσιμέντου, με ικανή περιεκτικότητα σε ιλύ που θα προσδίδει στο μίγμα πλαστικότητα και συγχρόνως με επαρκή περιεκτικότητα σε άμμο ώστε να αναπτύσσεται σε αυτά εσωτερική τριβή.

Τα χαρακτηριστικά του ενέματος είναι κατάλληλα ώστε κατά την εισπίεση (συνήθως), να μην εισχωρεί στους πόρους-κενά του εδαφικού σχηματισμού, αλλά να σχηματίζει μια ομοιογενή μάζα, η οποία πιέζοντας τον χαλαρό εδαφικό σχηματισμό που την περιβάλλει θα προκαλέσει ελεγχόμενες μετακινήσεις συμπυκνώνοντας ή/και ανυψώνοντας το σχηματισμό.

Το σχήμα της ενέσιμης μάζας είναι συνήθως σφαιρικό, ελέγχεται όμως από ένα πλήθος παραγόντων όπως είναι η σύνθεση του ενέματος, η παροχευετικότητα, η αντοχή και η υφή (τραχύτητα) του εδαφικού σχηματισμού, το ύψος των υπερκείμενων γαιών και τα φορτία της κατασκευής.



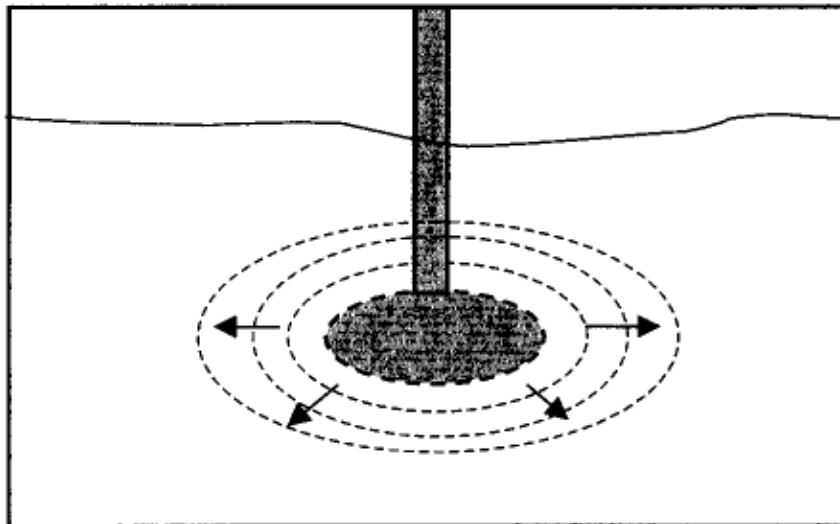
Σχήμα 3.5 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας συμπύκνωσης του εδάφους κατά την εκτέλεση ενέσεων συμπύκνωσης (Chan Man Piu, 2005)

3.3.2 Τρόπος Λειτουργίας

Η μέθοδος βασίζεται στην εισπίεση ενέματος υψηλού ιξώδους και χαμηλής κάθισης εντός του εδαφικού σκελετού. Η επιλογή των χαρακτηριστικών του ενέματος γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε κατά την εισπίεση, να μη διεισδύει στον σχηματισμό αλλά να παραμένει στην περιοχή έγχυσης, σχηματίζοντας μια ομοιογενή μάζα ενέματος, σχεδόν σφαιρικού σχήματος.

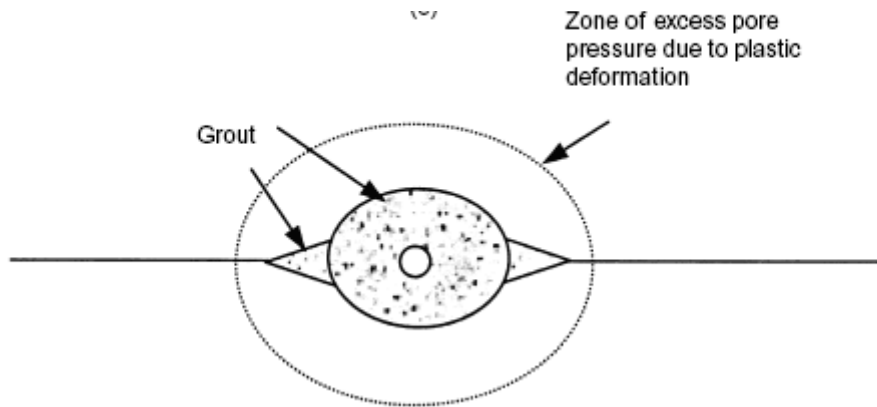
Στην αρχή της διαδικασίας ενεμάτωσης, το ένεμα πιέζει προς τα έξω το περιβάλλον έδαφος, εκτοπίζοντάς το, και σχηματίζει ένα βολβό (Σχήματα 3.4 και 3.5).

Στις περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου σε συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη, κατά τη διαδικασία ενεμάτωσης, ο όγκος του βολβού αυξάνεται λόγω της πλαστικής παραμόρφωσής του. Στις περιπτώσεις εφαρμογής σε κοκκώδη εδάφη, η αύξηση οφείλεται στη συμπίκνωση του σχηματισμού.



Σχήμα 3.6 Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας των ενέσεων συμπίκνωσης

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου είναι δυνατόν να προκληθεί ρωγμάτωση. Λόγω των χαρακτηριστικών του ενέματος, το πιθανότερο είναι το ένεμα να μην εισχωρήσει σε αυτή αλλά να συνεχίσει να διαστέλλεται (αύξηση του όγκου του βολβού).



Σχήμα 3.7 Περιορισμένη διείσδυση του ενέματος στη ρωγμάτωση που προκλήθηκε κατά την ενεμάτωση λόγω του υψηλού ιξώδους (Komiya, Soga, Jafari, Bolton, 2001)

Κατά τη διάνοιξη της ρωγμής η τασική κατάσταση στο έδαφος αλλάζει δραματικά. Συγκεκριμένα αυξάνεται τοπικά η ενδοσιμότητά του και η πίεση εισπίεσης μειώνεται απότομα, μέσω όμως της συνέχιση της διαδικασίας ενεμάτωσης και την εξάπλωση της μάζας ενέματος αυξάνεται και πάλι.

Κατά τη διάρκεια της ενεμάτωσης το περιβάλλον έδαφος υφίσταται σοβαρές παραμορφώσεις και καταπονήσεις που οδηγούν στην τοπική αποτόνωση τμημάτων της διεπιφάνειας ενέματος-εδάφους. Τα τμήματα του εδάφους που είναι εντός της ζώνης επιρροής των τάσεων που επιβάλλονται από την ενεμάτωση, αλλά συγκριτικά πιο απομακρυσμένα από τη διεπιφάνεια εδάφους-ενέματος, υφίστανται σχετικά ομοιόμορφη συμπίκνωση καθώς οι πιέσεις επιβάλλονται πιο ομοιόμορφα και οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις είναι ελαστικές και όχι πλαστικές.

Η δημιουργία ενός καννάβου κατακόρυφων στήλων βολβών ενέματος στον υπό βελτίωση σχηματισμό, προκαλεί βελτίωση της φέρουσας ικανότητάς του και αύξηση της ογκομετρικής παραμόρφωσής του, με αποτέλεσμα την εκδήλωση της επιδιωκόμενης ανύψωσης.

3.3.3 Αποτελεσματικότητα

Ο βαθμός αποτελεσματικότητας (n) της μεθόδου (§2.7.3), ορίζεται ως το πηλίκο του όγκου ανύψωσης $V_h(m^3)$ προς την ποσότητα του ενέματος $\Delta V_o(m^3)$ που εισπιάστηκε σε συγκεκριμένο όγκο εδάφους V_o .

$$n_{gr} = \frac{V_h}{\Delta V_o} \cdot 100\%$$

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στην επίδραση ενός πλήθους παραγόντων στο βαθμό αποτελεσματικότητας της μεθόδου (Graf, 1992b, Warner et al., 1992, Rubright and Welsh, 1993), όπως είναι ο ρυθμός εισπίεσης, τα στάδια

εισπίεσης και ο χρόνος που παρεμβάλλεται μεταξύ των εισπίεσεων, η απώλεια ενέματος λόγω της διείσδυσής του στις ρωγματώσεις (έναντι στην προσθήκη του στο σχηματιζόμενο βολβό ενέματος), απώλεια νερού λόγω εφίδρωσης του ενέματος, αποτόνωση της αναπτυσσόμενης υπερπίεσης πόρων και άλλα.

3.3.4 Ενδεδειγμένες Εδαφικές Συνθήκες Εφαρμογής

Η εφαρμογή της μεθόδου είναι αποτελεσματική κυρίως σε μη συνεκτικούς σχηματισμούς χαμηλής έως μέσης πυκνότητας, χωρίς να αποκλείεται η χρήση της και σε λεπτόκοκκα εδάφη χαμηλής φέρουσας ικανότητας.

Η αποτελεσματικότητά της μειώνεται κατά την εφαρμογή της σε συνεκτικά εδάφη καθώς η συμπύκνωσή τους είναι δύσκολο να επιτευχθεί, ενώ αποφεύγεται η πραγματοποίησή της σε παχίες στρώσεις κορεσμένων αργιλικών εδαφών και αποθέσεων ιλύος.

Η συνηθέστερη εφαρμογή της μεθόδου είναι σε χαλαρούς έως πολύ χαλαρούς κοκκώδεις σχηματισμούς (τυπικές τιμές δοκιμής πρότυπης διείσδυσης SPT, μεταξύ μηδέν και δεκαπέντε κρούσεων), που βρίσκονται πάνω ή κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι συνήθως άμμοι ή/και χαλίκια, συχνά με μικρή περιεκτικότητα αργίλου ή/και ιλύος, με την προϋπόθεση όμως ότι η περιεκτικότητά τους σε λεπτόκοκκα δεν επηρεάζει ουσιαστικά τη διαπερατότητά και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά.

Η χρήση της μεθόδου μπορεί να επιφέρει αύξηση του αριθμού των κρούσεων (N) κατά δέκα ή και παραπάνω, και να οδηγήσει σε σχηματισμούς μέσης πυκνότητας, πυκνούς έως και πολύ πυκνούς.

Η μέθοδος εφαρμόζεται και στην περίπτωση αποθέσεων χαμηλής αντοχής, ακόρεστων συνεκτικών εδαφών, αποτελούμενων κυρίως από άργιλο ή/και ιλύ. Για να είναι δυνατή η εφαρμογή της, ο αριθμός των κρούσεων της δοκιμής πρότυπης διείσδυσης (SPT) πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ μηδέν (0) και δέκα (10).

Η χρήση ενέσεων συμπύκνωσης μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία και σε καταρρέοντα εδάφη, (εδάφη που έχουν δημιουργηθεί από τη μεταφορά υλικών, μέσω του αέρα, και την απόθεσή τους σε ξηρές περιοχές) καθώς η ξαφνική διαβροχή τους μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια της συνοχής τους.

Η συμπύκνωση και συνεπώς η βελτίωση των εν λόγω σχηματισμών απαιτείται όταν επέλθει ο κορεσμός τους. Ο κορεσμός μπορεί να οφείλεται είτε σε τυχαίο γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε συγκέντρωση υδάτων, όπως είναι η περίπτωση αστοχίας σωλήνα μεταφοράς υδάτων, είτε στη χαμηλή δυνατότητα στράγγισης του σχηματισμού.

Από την εφαρμογή της μεθόδου σε αυτές τις περιπτώσεις, έχει διαπιστωθεί ότι δεν οδηγεί πάντα στην επιθυμητή συμπίκνωση. Υπάρχουν περιπτώσεις που ο σχηματισμός κατέρρευσε.

Κατά την ενεμάτωση σε σχηματισμούς στους οποίους η περιεχόμενη υγρασία παρουσιάζει διακυμάνσεις, συχνά απαιτείται χρήση διαφορετικής τεχνολογίας για τη διάνοιξη των οπών, ούτως ώστε να μετριαστεί η πιθανότητα κατέρρευσης του σχηματισμού κατά την εφαρμογή των εργασιών ενεμάτωσης.

Η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή επιπρόσθετα και στην πλήρωση των εδαφικών κενών ή των ρωγμών ενός βραχώδους σχηματισμού, όταν απαντώνται σε μεγάλο βάθος. Η χρήση της, σε αυτές τις περιπτώσεις, συνίσταται έναντι της έγχυσης ρευστού ενέματος (με χαμηλό ιξώδες).

Η σταθερότητα και η συνεκτικότητα που παρουσιάζει το εισπνεζόμενο ένεμα οδηγούν σε μείωση της ικανότητας διάδοσής του σε μεγάλες αποστάσεις. Παράλληλα τα υψηλά θιξοτροπικά χαρακτηριστικά του επηρεάζουν το μέγεθος των αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων κατά τη διεύθυνσή του στο σκελετό του σχηματισμού. Συγκεκριμένα όσο υψηλότερο είναι το ιξώδες τόσο μεγαλύτερες είναι οι διατμητικές τάσεις που απαιτούνται για να επιτευχθεί ροή του ενέματος.

Συνεπώς η διάδοση του ενέματος γίνεται με ελεγχόμενο τρόπο (συγκριτικά με τη χρήση ρευστών ενεμάτων) και για αυτό προτιμάται σε περιπτώσεις στις οποίες το μέγεθος και η κατεύθυνση των κενών είναι άγνωστα.

Τέλος, έχει παρατηρηθεί η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου σε λεπτές μη βελτιώσιμες στρώσεις με σημαντικά υπερκείμενα. Οι στρώσεις αυτές πρέπει να έχουν πάχος μικρότερο από 1,8m και μπορεί να συνίστανται από ξηρές ή κορεσμένες αργίλους, ιλύες ή/και οργανικά εδάφη (τύρφη, υπολείμματα ξύλου).

Η εφαρμογή της μεθόδου στους εν λόγω σχηματισμούς αποσκοπεί στη δημιουργία μιας βάσης υποστήριξης των υπερκείμενων φορτίων.

Βασική προϋπόθεση είναι η υπερκείμενη στρώση να έχει πάχος μεγαλύτερο από 1,8m ή ισοδύναμο ασκούμενο φορτίο και να έχει υψηλή φέρουσα ικανότητα ή να μπορούν να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά της.

Η πραγματοποίηση ενεμάτωσης υπό πίεση σε στρώσεις μεγάλου πάχους κορεσμένων συνεκτικών αργίλων ή/και ιλύων δεν ενδείκνυται καθώς έχει παρατηρηθεί ότι η ενεμάτωση μπορεί να οδηγήσει στο αντίθετο από το επιθυμητό αποτέλεσμα, δηλαδή στην επιτάχυνση της εκδήλωσης των προκαλούμενων καθιζήσεων.

Η επιτάχυνση της ανάπτυξης των καθιζήσεων, το πιθανότερο είναι να πηγάζει από την προσωρινή και συγχρόνως απότομη αύξηση της πίεσης των πόρων, που

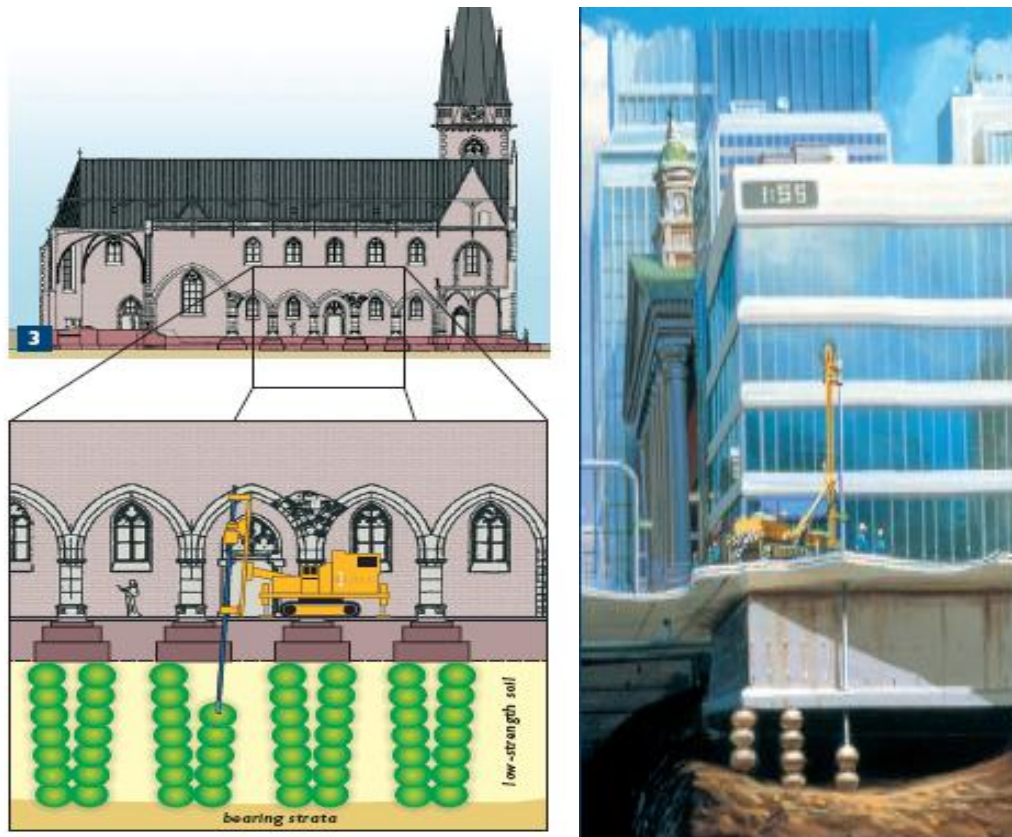
οφείλεται στη μετατόπιση που επιβάλλεται στο σχηματισμό κατά την εισπίεση ενέματος, η οποία δεν μπορεί να αποτονωθεί.

Η αύξηση της πίεσης των πόρων στο σχηματισμό μπορεί να οδηγήσει σε ξαφνική μείωση τόσο της διατμητικής αντοχής όσο και της ενδοσιμότητας και συνεπώς σε εκδήλωση καθιζήσεων έναντι της επιθυμητής ανύψωσης.

3.3.5 Περιπτώσεις Εφαρμογής

Η συνηθέστερη εφαρμογή της μεθόδου είναι η χρήση της για τη σταθεροποίηση και αποκατάσταση της θεμελίωσης κτιρίων, μέσω της ενίσχυσης του εδάφους κάτω από τα θεμέλια. Σε αυτή την περίπτωση η ενεμάτωση λαμβάνει χώρα είτε στο σχηματισμό που υπόκειται της θεμελίωσης της κατασκευής, είτε εφαπτομενικά στη θεμελίωση, δηλαδή στη διεπιφάνεια εδάφους –υποστήριξης.

Η χρήση της αποσκοπεί στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας και στην ανάκτηση της απαιτούμενης αντοχής του εδάφους θεμελίωσης, μέσω της προσθήκης στοιχείων μεγαλύτερης φέρουσας ικανότητας (βολβών ενέματος) στο χαλαρό σχηματισμό. Η εφαρμογή της μπορεί ουσιαστικά να παραλληλιστεί με την κατασκευή πασσάλων για την υποστήριξη της ανωδομής.



Σχήμα 3.8 α & β Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής ενεμάτωσης υπό πίεση για την ενίσχυση της θεμελίωσης κτιρίων (Ενημερωτικό φυλλάδιο της εταιρείας Keller)

Σε πολλές περιπτώσεις η αποκατάσταση της θεμελίωσης απαιτεί και την ανύψωση της κατασκευής λόγω της εκδήλωσης ανεπιθύμητων καθιζήσεων (ολικών ή διαφορικών). Η ανύψωση συνήθως πραγματοποιείται μέσω της εφαρμογής ενός προγράμματος συμπύκνωσης του σχηματισμού.

Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και για την ανύψωση κατασκευών (αντισταθμιστικές τσιμεντένες) με σκοπό την προστασία κατασκευών από αναμενόμενες καθιζήσεις (ολικές ή διαφορικές) λόγω της μελλοντικής πραγματοποίησης υπόγειων διανοίξεων στην περιοχή.

Η μέθοδος ενεμάτωσης υπό πίεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μέτρο βελτίωσης εδάφους σε περιοχές που πρόκειται να κατασκευαστούν έργα. Αποτελεί εναλλακτική ή πρόσθετη λύση στις μεθόδους πασσαλοθεμελίωσης και στις κλασσικές μεθόδους ενίσχυσης και βελτίωσης των εδαφικών παραμέτρων (π.χ. χαλικοπάσσαλοι, δονητική αντικατάσταση).

Μέσω της εφαρμογής της μεθόδου επιτυγχάνεται συμπύκνωση του εδάφους και συνεπώς αύξηση της αντοχής, της φέρουσας ικανότητάς, της δυσκαμψίας του και γενικότερα βελτίωση των τιμών των μηχανικών παραμέτρων. Ωστόσο η εφαρμογή των κλασσικών μεθόδων τσιμεντένεσης είναι συνήθως πιο οικονομική.

Συνήθως επιλέγεται η χρησιμοποίησή της όταν στην περιοχή ενδιαφέροντος απαντάται χαλαρή εδαφική ζώνη μικρού πάχους σε σημαντικό βάθος, η οποία αναμένεται να προκαλέσει μη αποδεκτές καθιζήσεις κατά την επιβολή πρόσθετων φορτίων είτε από την ανωδομή είτε από πιθανή μελλοντική σεισμική φόρτιση.

Άλλη μια οικονομικά συμφέρουσα περίπτωση επιλογής χρησιμοποίησης της μεθόδου είναι η περίπτωση στην οποία ο υγιής σχηματισμός απαντάται σε μεγάλο βάθος και συνεπώς συμφέρει η βελτίωση των χαρακτηριστικών του χαλαρού επιφανειακού σχηματισμού, έναντι της βαθιάς υποστήριξης.

Συνοψίζοντας, η μέθοδος δύναται να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική ή συμπληρωματική της δονητικής συμπύκνωσης όταν υπάρχει περιορισμένο ύψος εργασίας, απαίτηση εργασιών χωρίς δόνηση (π.χ. κοντά σε κατασκευές πολύ υψηλής ευαισθησίας), όταν απαιτείται συμπύκνωση σε πολύ μεγάλα βάθη ή όταν παρεμβάλλονται σκληρές εδαφικές στρώσεις στις οποίες η δονητική μέθοδος δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί.



Σχήμα 3.9 α. Εφαρμογή της μεθόδου σε υπόγειο κτιρίου (περιορισμένο ύψος εργασίας) β. εφαρμογή της μεθόδου για την ενίσχυση της θεμελίωσης κατασκευής)
(Ενημερωτικό φυλλάδιο της εταιρείας Keller)

3.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΤΙΚΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΕΣΕΩΝ

Το παρόν κεφαλαίο επικεντρώνεται στο σχεδιασμό της μεθόδου αντισταθμιστικών τσιμεντένεσεων με τη μέθοδο ενεμάτωσης υπό πίεση, κατά την εφαρμογή της για τον περιορισμό εκδήλωσης ανεπιθύμητων καθιζήσεων που αναμένεται να προκληθούν σε κατασκευή που βρίσκεται στην περιοχή διάνοιξης σήραγγας.

3.4.1 Απαιτούμενα Στοιχεία για το Σχεδιασμό της Μεθόδου

Τα απαιτούμενα στοιχεία για το σχεδιασμό της μεθόδου δεν διαφοροποιούνται από εκείνα που αφορούν το σχεδιασμό της μεθόδου εδαφικής διάρρηξης (§2.4).

Οι πληροφορίες που συλλέγονται από την πραγματοποίηση της γεωτεχνικής και γεωφυσικής (όπου πραγματοποιείται) έρευνας στην περιοχή διάνοιξης της σήραγγας, σε συνδυασμό με την εκτίμηση των καθιζήσεων και του ρυθμού εξέλιξής τους που αναμένεται να προκληθούν κατά τη διάνοιξη, είναι απαραίτητα στοιχεία για τον καθορισμό των κτιρίων που πρέπει να προστατευτούν έναντι καθιζήσεων.

Φυσικά εξίσου σημαντική για τον καθορισμό «του βαθμού επικινδυνότητας» των κτιρίων είναι και η συλλογή πληροφοριών σχετικά με την κατάστασή τους και την ύπαρξη υπόγειων κατασκευών, στην περιοχή ενδιαφέροντος, ούτως ώστε να είναι δυνατός ο προσδιορισμός τόσο του μεγέθους των επιτρεπόμενων καθιζήσεων (ολικών ή διαφορικών) που μπορούν να εκδηλωθούν χωρίς να επηρεαστεί η λειτουργικότητα της κατασκευής, όσο και της μέγιστης ανύψωσης που μπορεί να προκληθεί χωρίς να υπάρχουν επιπτώσεις στο σκελετό της ανωδομής.

3.4.2 Σχεδιασμός της Μεθόδου Ενεμάτωσης

Ο σχεδιασμός της διαδικασίας εκτέλεσης των ενέσεων συμπύκνωσης και η επιλογή των παραμέτρων ενεμάτωσης είναι καθοριστικά για την αποτελεσματική εφαρμογή της.

Ο σχεδιασμός της διαδικασίας ενεμάτωσης περιλαμβάνει τον καθορισμό:

- Του απαιτούμενου γεωτρητικού εξοπλισμού.
- Του απαιτούμενου εξοπλισμού αποθήκευσης, τροφοδοσίας και παρασκευής (ανάδευσης και ανάμιξης) ενέματος.
- Του απαιτούμενου εξοπλισμού εκτέλεσης της ενεμάτωσης.
- Του τύπου ενέματος (μελέτη σύνθεσης).
- Των θέσεων εκτέλεσης των εργασιών ενεμάτωσης (απόσταση των γεωτρήσεων, αναγκαίος αριθμός και βάθος οπών).

Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την εξέλιξη των εργασιών ενεμάτωσης, το πρόγραμμα εκτέλεσης των τιμωμένων ενέσεων μπορεί να τροποποιηθεί από τον υπεύθυνο μηχανικό επί τόπου του έργου, βάσει της αξιολόγησης των καταγραφών και της προόδου των εργασιών, με στόχο την τεχνικοοικονομική επιτυχία της εφαρμογής

- Των κύριων χαρακτηριστικών της ενεμάτωσης (απαιτούμενες πιέσεις και παροχές).

Για την επιβεβαίωση των παραμέτρων ενεμάτωσης, στις περισσότερες των περιπτώσεων εκτελούνται δοκιμαστικές ενεματώσεις.

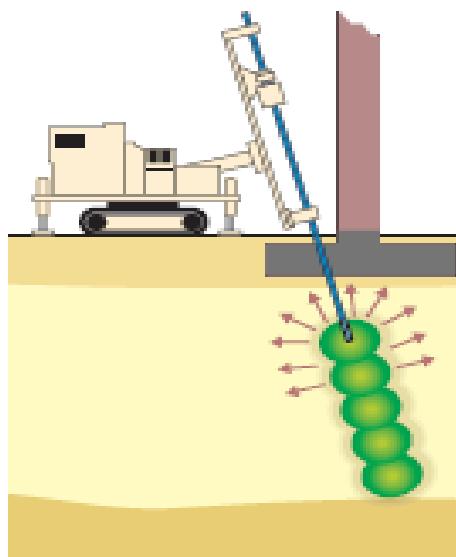
- Των κριτηρίων που πρέπει να επιτευχθούν για τον τερματισμό του κάθε σταδίου ενεμάτωσης.

3.4.3 Παράμετροι Σχεδιασμού της Ενεμάτωσης

Η επιτυχής και τεχνικοοικονομικά συμφέρουσα εκτέλεση της μεθόδου απαιτεί το λεπτομερή σχεδιασμό του καννάβου ενεμάτωσης. Συγκεκριμένα πρέπει να ορίζονται με ακρίβεια οι θέσεις, το βάθος και η διεύθυνση εγκατάστασης των σωλήνων εισπίεσης ενέματος, η μεταξύ τους απόσταση, το μήκος και η διάμετρος τους.

Συχνά και κυρίως λόγω των αγωγών κοινής ωφέλειας που υπάρχουν στην περιοχή ενεμάτωσης, είναι υποχρεωτική η πραγματοποίηση τιμωμένων ενέσεων σε μεγαλύτερα βάθη. Συγκεκριμένα συνίσταται ο σχεδιασμός της ζώνης ενεμάτωσης σε βάθος, τουλάχιστον τρία μέτρα κάτω από τους αγωγούς.

Εξίσου σημαντικός είναι και ο καθορισμός των ζωνών ενεμάτωσης (υποδιαίρεση της επιφάνειας του υπό βελτίωση σχηματισμού κατά βάθος) καθώς και των πρωτογενών και δευτερογενών οπών ενεμάτωσης (§3.4.4).



Σχήμα 3.10 Τοποθέτηση αγωγού ενεμάτωσης υπό κεκλιμένη διεύθυνση (Ενημερωτικό Φυλλάδιο της Εταιρείας Keller)

Η αξονική απόσταση μεταξύ των οπών εισπίεσης του ενέματος κυμαίνεται από 0,9 έως 4,6m, με συνηθέστερες τιμές μεταξύ 1,5m και 2,1m.

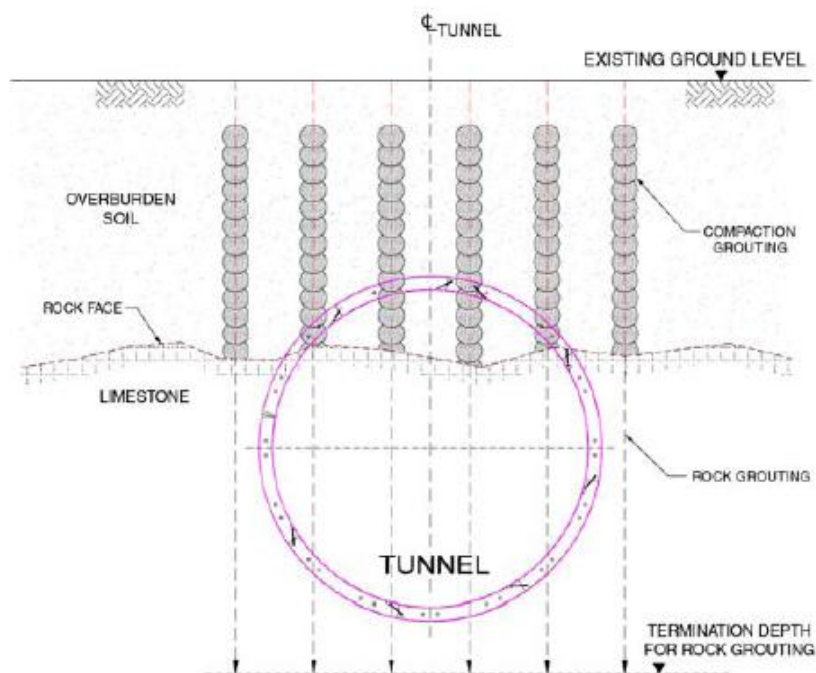
Πυκνότεροι κάνναβοι διάνοιξης οπών εφαρμόζονται στις περιπτώσεις πραγματοποίησης της μεθόδου σε επιφανειακούς χαλαρούς σχηματισμού μικρού πάχους (μέχρι πάχους 6m), ή σε περιπτώσεις που τα φορτία που μεταφέρονται στο σχηματισμό από την ανωδομή είναι περιορισμένα.

Όσο αυξάνεται το βάθος στο οποίο απαντάται ο υπό βελτίωση σχηματισμός (και συνήθως όταν το πάχος της υπερκείμενης στρώσης είναι μεγαλύτερο από 9.0m), η απόσταση μεταξύ των οπών ενεμάτωσης αυξάνεται και μπορεί να φτάσει και τα 4.5m, με συνηθέστερες τιμές μεταξύ 2,4 και 3m. Αυτό συμβαίνει λόγω του υψηλού γεωστατικού πεδίου. Σε αυτή την περίπτωση ανήκει συνήθως και η περίπτωση βελτίωσης σχηματισμού κατά τη διάνοιξη αβαθούς σήραγγας.

Αραιός κάνναβος διάνοιξης των οπών ενεμάτωσης χρησιμοποιείται και στις περιπτώσεις στις οποίες δεν απαιτείται σημαντική βελτίωση των παραμέτρων του σχηματισμού.

Για το βέλτιστο σχεδιασμό της μεθόδου η διάτρηση και τσιμεντένεση των οπών πραγματοποιείται σε δύο τουλάχιστον στάδια. Οι πρώτες σειρές οπών διανοίγονται σε αραιές μεταξύ τους αποστάσεις και ενεματώνονται πριν από τη διάτρηση των ενδιάμεσων οπών. Κατ' αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να βελτιστοποιηθεί ο απαιτούμενος αριθμός οπών ενεμάτωσης και η τελική απόστασή τους να είναι αυτή που κρίνεται απαραίτητη από τα αποτελέσματα των τσιμεντενέσεων κατά την πορεία της εργασίας.

Καθ' όλη τη διάρκεια της κατασκευής απαιτείται έλεγχος και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ενεμάτωσης επί τόπου και σε συνεχή βάση από τον υπεύθυνο μηχανικό, ούτως ώστε να είναι δυνατή η προσαρμογή του προγράμματος στις αποκαλυπτόμενες πραγματικές επί τόπου συνθήκες. Δηλαδή να είναι δυνατή η τροποποίηση των παραμέτρων σχεδιασμού (μέθοδος διάτρησης, ο αριθμός των σταδίων εφαρμογής, τα βάθη και η αποστάσεις των οπών).



Σχήμα 3.11 Διάταξη εφαρμογής της μεθόδου κατά τη διάνοιξη της σήραγγας Smart Tunnel στην Kuala Lumpur

Η τάση εισπίεσης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να συμπυκνώσει το σχηματισμό. Συνήθεις τιμές (μετρούμενες στη θέση εισπίεσης) είναι μεταξύ 6,9 και 28bar.

Ο καθορισμός του μεγέθους της πίεσης εισπίεσης πραγματοποιείται με τη βοήθεια προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων και την πραγματοποίηση δοκιμαστικών τσιμεντενέσεων στην περιοχή εφαρμογής.

Το μέγεθος του ρυθμού εισπίεσης είναι ίσως πιο κρίσιμο από την ίδια την πίεση εισπίεσης.

Στην περίπτωση επιφανειακών σχηματισμών που βρίσκονται υπό αστράγγιστες συνθήκες ο ρυθμός εισπίεσης πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0,01 έως 0,02m³/min. Σε ξηρούς σχηματισμούς ή σε σχηματισμούς υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης, ο ρυθμός άντλησης είναι μέσος και κυμαίνεται μεταξύ 0,02 και 0,11m³/min. Υψηλοί ρυθμοί άντλησης, της τάξεως των 0,11 έως 0,34m³/min εφαρμόζονται για την εισπίεση ενέματος σε χαλαρούς σχηματισμούς με σημαντικά υπερκείμενα.

Μια ακόμα παράμετρος που πρέπει να αποφασιστεί κατά το σχεδιασμό είναι ο όγκος του ενέματος που εισπνέζεται σε κάθε στάδιο εφαρμογής. Στόχος κατά την εφαρμογή της μεθόδου είναι η ομαλή διάδοση του ενέματος στην υπό βελτίωση στρώση, ώστε να μην παρατηρηθεί ανύψωση σε πρώιμο στάδιο.

Συγχρόνως σε περίπτωση εισπνέσης υπερβολικού όγκου ενέματος, υπάρχει κίνδυνος εκδήλωσης ανεπιθύμητης ρωγμάτωσης του σχηματισμού, που θα οδηγήσει στην εκδήλωση μη επιθυμητών αποτελεσμάτων.

Και αυτή η παράμετρος πρέπει να παρακολουθείται σε συνεχή βάση κατά τη διάρκεια των εργασιών ενεμάτωσης ούτως ώστε μέσω της αξιολόγησης των καταγραφών να πραγματοποιείται τροποποίηση της εισπνέζομενης ποσότητας, όπου απαιτείται.

Για παράδειγμα αν κατά την εφαρμογή των τελευταίων σταδίων ενεμάτωσης, δεν έχει σημειωθεί ανύψωση του σχηματισμού, απαιτείται αύξηση της εισπνέζομενης ποσότητας. Αντιστοίχως απαιτείται μείωση αν παρατηρηθεί ανύψωση από τα αρχικά στάδια εισπνέσης κατά την εφαρμογή της μεθόδου σε σχηματισμούς που απαντώνται σε μεγάλα βάθη.

Η εισπνέζομενη ποσότητα ενέματος συνήθως καθορίζεται κατά την εκτέλεση της μεθόδου σε κάθε στάδιο εφαρμογής.

Για παράδειγμα ο απαιτούμενος όγκος ενέματος σε μια περιοχή που οι σωλήνες ενεμάτωσης είναι διατεταγμένοι σε κάρναβο διαστάσεων 2.1x2.1(mxm) και τα στάδια ενεμάτωσης πραγματοποιούνται ανά 0,8m θα μπορούσε να υπολογιστεί ως:

$$2.1 \times 2.1 \times 0.8 \times 10\% = 0.35 \text{m}^3/\text{linear m}$$

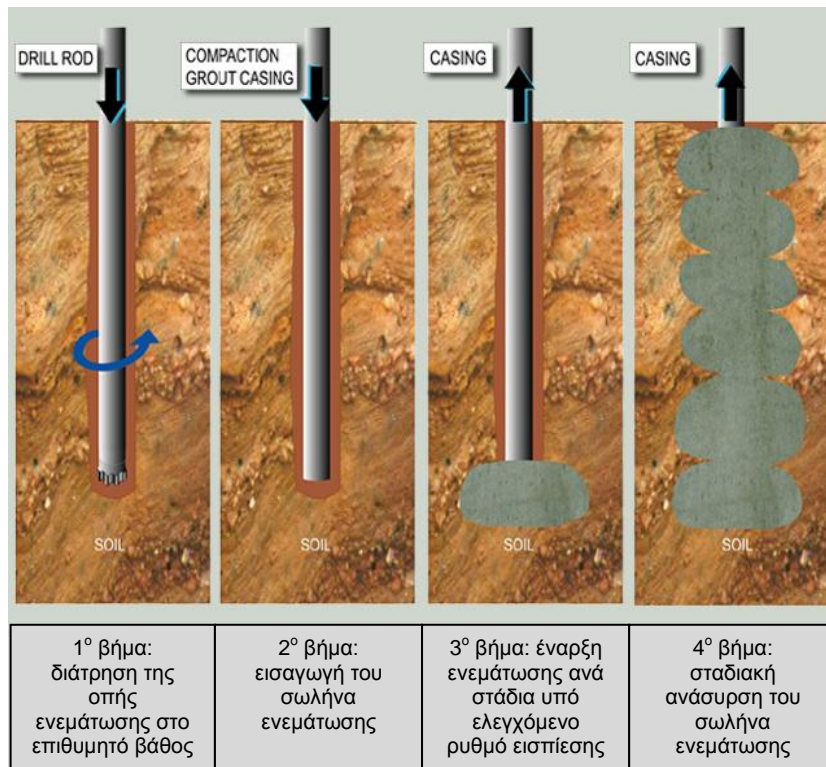
Το ποσοστό 10% αντιστοιχεί στο συντελεστή συμπίκνωσης (compaction ή replacement factor) και εξαρτάται από το είδος του προς βελτίωση σχηματισμού. Για κανονικές εδαφικές αποθέσεις, χωρίς κενά, συνήθως κυμαίνεται από 3 έως 12%. Έχουν καταγραφεί περιπτώσεις στις οποίες ο συντελεστής αυτός έχει λάβει τιμές της τάξεως του 20% σε χαλαρές αποθέσεις με εξαιρετικά χαμηλά χαρακτηριστικά αποτελούμενα από λατύπες και κροκάλες.

Η επιθυμητή ανύψωση πραγματοποιείται σταδιακά μέσω της εισπνέσης ενέματος σε διαφορετικά βάθη (στάδια). Σε κάθε στάδιο τίθενται όρια ως προς την ανύψωση που δύναται να επιτευχθεί. Το ιδανικό είναι να πραγματοποιείται μικρή ανύψωση ανά στάδιο και να εφαρμόζονται πολλά στάδια για την επίτευξη της επιθυμητής συνολικής ανύψωσης.

3.4.4 Στάδια Εκτέλεσης Ενεμάτωσης

Οι ενέσεις συμπύκνωσης πραγματοποιούνται σε τουλάχιστον δύο φάσεις. Αρχικά διανοίγεται μια πρώτη ομάδα οπών, σε σχετικά αραιό κάρναβο και πραγματοποιείται η τσιμεντένεσή τους μέσω της εγκατάστασης των ειδικών σωλήνων ενεμάτωσης.

Η τσιμεντένεση κάθε οπής πραγματοποιείται συνήθως κατά ανιόντα στάδια. Αρχικά γίνεται η διάτρηση της οπής σε όλο της το βάθος και κατόπιν εκτελείται τσιμεντένεσή της σε διαδοχικά τμήματα καθ' ύψος προχωρώντας από τον πυθμένα προς το στόμιο, δημιουργώντας έτσι σε κάθε στήλη ομοιογενείς σφαίρες κονιάματος που συμπιέζουν και συμπυκνώνουν το χαλαρό σχηματισμό. Για την τσιμεντένεση σε κάθε τμήμα τοποθετείται στεγανωτικό παρέμβυσμα στο πάνω μέρος του. Η ενεμάτωση σε κάθε στάδιο θεωρείται επιτυχής και διακόπτεται όταν πληρείται το κριτήριο καταλληλότητας που έχει τεθεί από το μελετητή. Η πίεση εισπίεσης σε κάθε τμήμα είναι διαφορετική και συνήθως ίση με το βάρος των υπερκείμενων γαιών.



Σχήμα 3.12 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας ενεμάτωσης κατά ανιόντα στάδια

Σε περιπτώσεις που ο σχηματισμός είναι πολύ κερματισμένος και παρουσιάζονται καταπτώσεις των τοιχωμάτων καθώς και σε περιπτώσεις μη επαρκούς πλευρικής στήριξης, η τσιμεντένεση πραγματοποιείται σε κατιόντα στάδια. Στην τσιμεντένεση κατά κατιόντα στάδια πραγματοποιείται διάτρηση της οπής μέχρι το κάτω όριο του σταδίου και για την εκτέλεση της τσιμεντένεσης τοποθετείται στεγανωτικό παρέμβυσμα στο πάνω όριο του σταδίου. Η διαδικασία ενεμάτωσης

κατά κατιόντα στάδια συνεπάγεται την δημιουργία βολβού αρχικά στο ρηχότερο επίπεδο και εν συνεχεία την προώθηση του αγωγού ενεμάτωσης σε βαθύτερο επίπεδο και την επανάληψη της διαδικασίας.

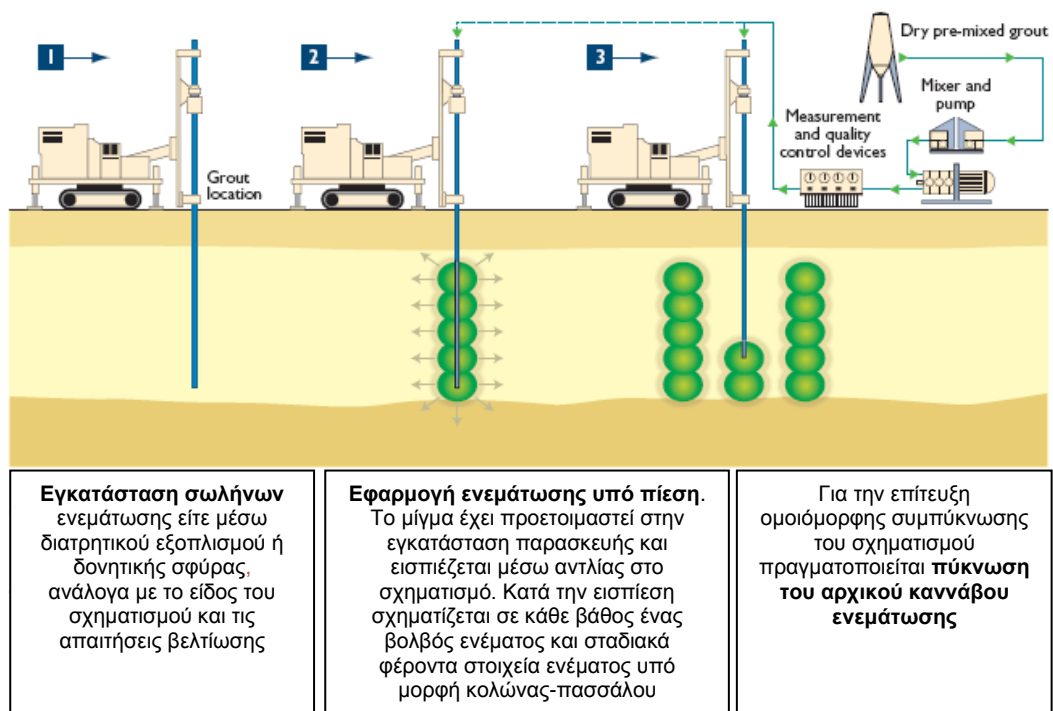
Η τσιμεντένεση κατά κατιόντα στάδια είναι πιο χρονοβόρα. Από τους ρυθμούς άντλησης που εφαρμόζονται συνήθως συμπεραίνεται ότι πριν την επαναδιάτρηση πρέπει να μεσολαβήσει ένα χρονικό διάστημα γύρω στις οκτώ με δέκα ώρες για να πήξει το ένεμα και να μην επηρεαστεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

Τα πραγματικά βάθη των τμημάτων ενεμάτωσης εξαρτώνται από τις συνθήκες του σχηματισμού που θα απαντηθούν κατά τη διάτρηση της οπής. Η εισπίεση ενέματος πραγματοποιείται μέχρι την επίτευξη των κριτηρίων τερματισμού που έχουν τεθεί.

Υπάρχει δυνατότητα εφαρμογής συνδυασμού των δύο περιπτώσεων πραγματοποιώντας στην κορυφή της υποβελτίωσης ζώνης ενέσεις κατά κατιόντα στάδια και εν συνεχεία εφαρμόζοντας τη διαδικασία ενεμάτωσης κατά ανιόντα στάδια.

Μετά την ολοκλήρωση της τσιμεντένεσης της πρώτης ομάδας οπών που είχαν διανοιχτεί, αξιολογούνται και ελέγχονται τα αποτελέσματα της ενεμάτωσης και λαμβάνεται απόφαση για τις θέσεις διάνοιξης και τον αριθμό των δεύτερων σειρών οπών, ενδιάμεσα των πρώτων. Κατ' αυτό τον τρόπο η εφαρμογή της μεθόδου θα εκτελείται στις θέσεις που κρίνεται απαραίτητο από τα αποτελέσματα των τσιμεντενέσεων στην πορεία της εργασίας.

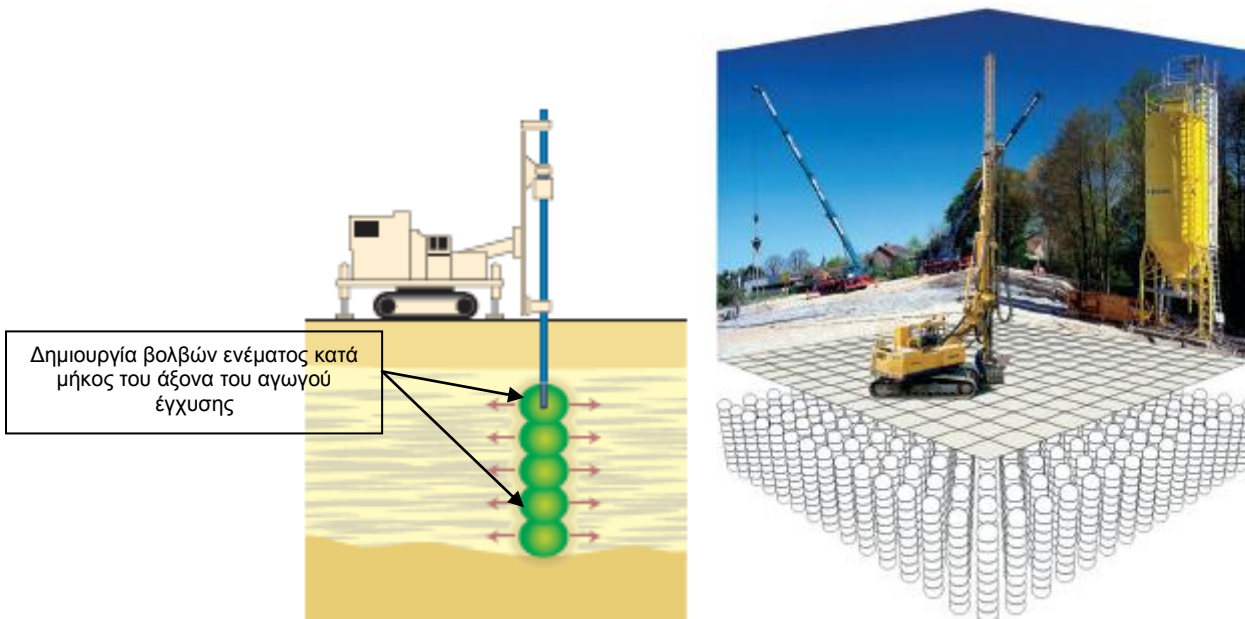
Η εισπίεση σε δυο διαφορετικά στάδια είναι πολύ σημαντική καθώς η δευτερεύουσα ενεμάτωση εκτελείται σε πιο δύσκαμπτο σχηματισμό, λόγω της ενεμάτωσης των πρώτων οπών.



Σχήμα 3.13 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας ενεμάτωσης με πίεση κατά ανιόντα στάδια(ενημερωτικό φυλλάδιο Keller)

Η πραγματοποίηση συμπληρωματικών τσιμεντενέσεων (διάνοιξη τρίτης σειράς οπών) συνήθως δεν είναι αναγκαία καθώς στο δεύτερο στάδιο ενεμάτωσης δημιουργείται αρκετά πυκνός κανάβος εισπνέσης ενέματος.

Μετά την ολοκλήρωση της εκτέλεσης των ενέσεων συμπύκνωσης οι βολβοί ενέματος σχηματίζουν σειρές (σχεδόν) συνεχών κυλίνδρων ενέματος (Σχήμα 3.14) εντός του εδαφικού σχηματισμού.

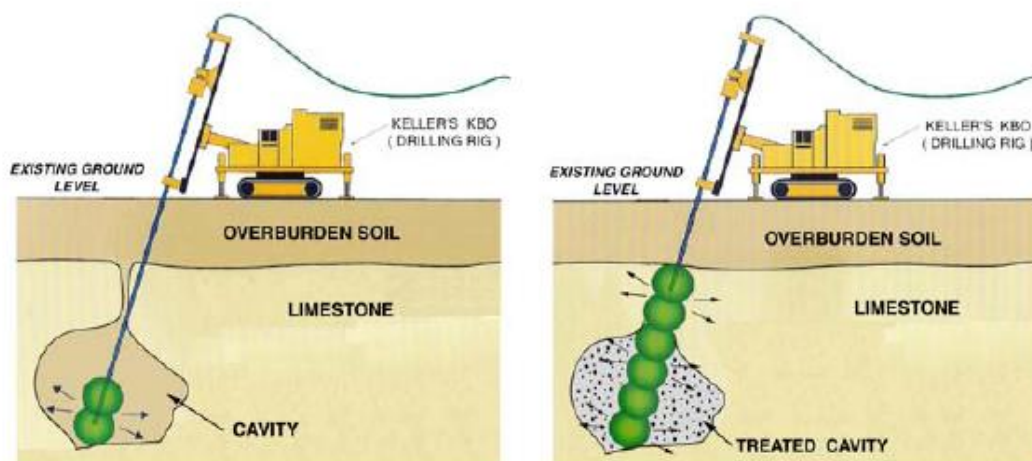


Σχήμα 3.14 α. Δημιουργία κυλίνδρου ενέματος στο χαλαρό εδαφικό σχηματισμό β. Σειρές κυλίνδρων ενέματος (Ενημερωτικό φυλλάδιο της εταιρείας Keller)

Η διεύθυνση των οπών ενεμάτωσης δεν παίζει ουσιαστικό ρόλο για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου αν και υπάρχουν ενδείξεις ότι στις περιπτώσεις που ο αγωγός αποκλίνει από την κατακόρυφο μπορεί να παρατηρηθεί πρόωρη ανύψωση του σχηματισμού.



Σχήμα 3.15 Πραγματοποίηση τσιμεντενέσεων υπό κλίση 27° σε έργο του Μετρό στην Kuala Lumpur



Σχήμα 3.16 Σχηματική απεικόνιση πραγματοποίησης ενέσεων συμπίκνωσης υπό κλίση (Ενημερωτικό φυλλάδιο της εταιρείας Keller)

3.5 ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ- ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου ενεμάτωσης με πίεση, όπως και κατά την εφαρμογή της μεθόδου εδαφικής διάρρηξης, πραγματοποιείται αυτόματη καταγραφή των παραμέτρων ενεμάτωσης (πίεση, παροχή, ποσότητα ενέματος), με τη βοήθεια ειδικών συστημάτων καταγραφής που συνδέονται με Η/Υ.

Συγχρόνως, απαραίτητη είναι η εγκατάσταση κατάλληλων οργάνων μέτρησης (§2.8), για να καταγράφονται με ακρίβεια οι μετακινήσεις που εκδηλώνονται στο σχηματισμό και στις παρακείμενες κατασκευές ώστε να εξασφαλίζεται ότι παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων.

Ανεξαρτήτου του πόσο πλήρες είναι το πρόγραμμα των ενεματώσεων κατά τη φάση σχεδιασμού, πάντα θα χρειάζεται προσαρμογή και προσθήκη ανάλογα με τις επί τόπου συνθήκες. Ο υπεύθυνος μηχανικός επί τόπου του έργου, ελέγχει και αξιολογεί τις καταγραφές των παραμέτρων ενεμάτωσης και των μετακινήσεων (μέγεθος, ρυθμός εξέλιξης). Η αξιολόγηση των καταγραφών παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σε σχέση με πιθανές αλλαγές των γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών και λαμβάνονται αποφάσεις για τροποποίηση των παραμέτρων με στόχο τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού.

3.6 ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Για τον καθορισμό του βαθμού επιτυχίας της μεθόδου ενεμάτωσης υπό πίεση, εκτελούνται κατάλληλες δοκιμές ελέγχου τόσο επί τόπου του έργου, όσο και σε ειδικά εργαστήρια.

Η εκτέλεση επί τόπου δοκιμών ελέγχου είναι η συνηθέστερη. Οι δοκιμές που πραγματοποιούνται συνήθως είναι η δοκιμή πρότυπης δεισδυσσης (SPT) και η δοκιμή πενετρομέτρου (CPT).

Συγχρόνως, στις περιπτώσεις που είναι δυνατή η πρόσβαση στον υπό βελτίωση σχηματισμό, μπορούν να πραγματοποιηθούν και επί τόπου δοκιμές συμπύκνωσης (δοκιμές φόρτισης πλάκας).

Κατά την εξέλιξη των εργασιών πραγματοποιούνται και δοκιμές ελέγχου των ενεματώσεων, οι οποίες αφορούν επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές καθορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών τους.

Η πραγματοποίηση δοκιμής κάθισης είναι πολύ σημαντική, για αυτό και εκτελείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, τόσο στη θέση της αντλίας ενεμάτωσης όσο και στο τέλος της γραμμής παροχής του ενέματος.



Σχήμα 3.17 Δοκιμή κάθισης για τον έλεγχο της καταλληλότητας του εισπιεζόμενου ενέματος (Ενημερωτικό φυλλάδιο της εταιρείας Keller)

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η μετρούμενη κάθιση μπορεί να διαφοροποιείται από 51 έως 71mm από την αντλία μέχρι την άκρη του αγωγού ενεμάτωσης.

Εάν η αντοχή του ενέματος είναι ιδιαίτερης σημασίας λαμβάνονται πυρήνες από την περιοχή του έργου για την πραγματοποίηση δοκιμών εκτίμησής της.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΝΕΜΑΤΩΣΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σχεδιασμός και η εφαρμογή της μεθόδου των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων βασίζεται κυρίως σε εμπειρικές σχέσεις και μεθόδους, καθώς και στην εμπειρία από προηγούμενα έργα. Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία για τη μέθοδο εκτίμησης της πίεσης ενεμάτωσης και διεξάγονται σχετικές έρευνες από πολλούς ερευνητές.

Οι μεταβολές στις επιβαλλόμενες τάσεις και παραμορφώσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία ενεμάτωσης δεν μπορούν να εκτιμηθούν μόνο με αυτές τις εμπειρικές μεθόδους. Στην πράξη είναι απαραίτητη η πλήρης προσομοίωση του προβλήματος και η ανάλυσή του με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (Krajewski, Wawrzyniak, 2004).

Η προσομοίωση με αριθμητικά μοντέλα αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης σε πολλά πανεπιστήμια. Τα περισσότερα αριθμητικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί είναι διδιάστατα και πρόσφατα αναπτύχθηκαν και τριδιάστατα, τα οποία προσομοιώνουν ακριβέστερα το πρόβλημα.

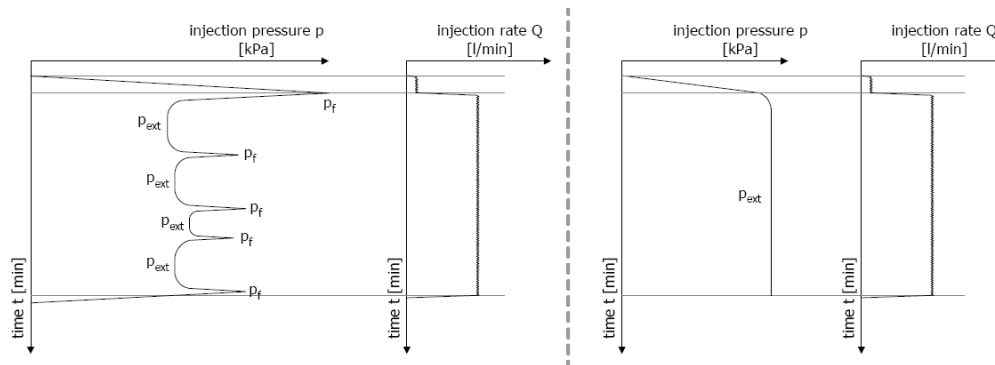
Η μέθοδος των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τη μέθοδο της εδαφικής διάρρηξης (§2), είτε με τη μέθοδο της ενεμάτωσης υπό πίεση (§3). Και στις δύο περιπτώσεις βασίζεται στην εισπίεση ενέματος στον υπό βελτίωση σχηματισμό.

Λόγω της εισπίεσης δημιουργείται μια μάζα ενέματος, σφαιρικού ή κυλινδρικού σχήματος εντός του σκελετού του σχηματισμού. Κατά την εξέλιξη της διαδικασίας ενεμάτωσης η τάση εισπίεσης αυξάνεται σταδιακά και οδηγεί σε διαστολή της μάζας του ενέματος και στην ανάπτυξη αρχικά ελαστικών και εν συνεχεία πλαστικών παραμορφώσεων στον υπό βελτίωση σχηματισμό.

Η σταδιακή αύξηση της τάσης ενεμάτωσης συνεχίζεται μέχρι να λάβει μια μέγιστη τιμή. Στην περίπτωση της εδαφικής διάρρηξης αντιστοιχεί στην πίεση (p_i) που θα προκαλέσει τη ρωγμάτωση του σχηματισμού, ενώ στην περίπτωση εφαρμογής της

μεθόδου ενεμάτωσης υπό πίεση αντιστοιχεί στην πίεση (p_u) που απαιτείται για τη δημιουργία ικανού βολβού ενέματος για τη δημιουργία της απαραίτητης συμπύκνωσης που θα οδηγήσει στην επιθυμητή ανύψωση του σχηματισμού. Στις περισσότερες των περιπτώσεων εφαρμογής της μεθόδου αυτής η ενεμάτωση δε συνοδεύεται από ρωγμάτωση του σχηματισμού ($p_u < p_f$).

Στην περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου της εδαφικής διάρρηξης, όταν η τάση ξεπεράσει την οριακή τάση αστοχίας του σχηματισμού (p_f) και προκαλέσει την επιθυμητή ρωγμάτωση, παρατηρείται απότομη πτώση της σε μια τιμή (p_{ext}), που αντιστοιχεί στην πίεση ροής του ενέματος για τη διάδοση της ρωγμάτωσης που δημιουργήθηκε.



Σχήμα 4.1 Σταδιακή αύξηση της πίεσης ενεμάτωσης, υπό σταθερό ρυθμό εισπίεσης, μέχρι τη ρωγμάτωση του σχηματισμού και διατήρηση μιας σταθερής τιμής της πίεσης κατά τη διάδοση του ενέματος στη ρωγμάτωση (R. Grotenhuis, 2004)

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο μηχανισμός ροής του ενέματος στον εδαφικό σκελετό, αναλυτικές και εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης της απαιτούμενης μέγιστης πίεσης ενεμάτωσης (για κάθε μέθοδο χωριστά), καθώς και ένας ενδεικτικός τρόπος υπολογισμού των διαστάσεων της ρωγμάτωσης που δημιουργείται κατά την εισπίεση.

Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται συνοπτικά οι δύο μεθοδολογίες προσομοίωσης της εισπίεσης ενέματος στο σχηματισμό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

4.2 ΠΙΕΣΗ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΕΝΕΜΑΤΟΣ

Η δημιουργία της ρωγμάτωσης συνοδεύεται από πτώση της επιβαλλόμενης τάσης σε μια ελάχιστη τιμή p_{ext} (Σχήμα 4.1), που αντιστοιχεί στο άθροισμα της απαιτούμενης πίεσης διατήρησης του ανοίγματος της ρωγμής και της πίεσης που απαιτείται για να ξεπεραστεί η διατμητική αντοχή του σχηματισμού ώστε να προκληθεί διάδοση της ρωγμάτωσης μέσω της κίνησης του ενέματος στο εσωτερικό της.

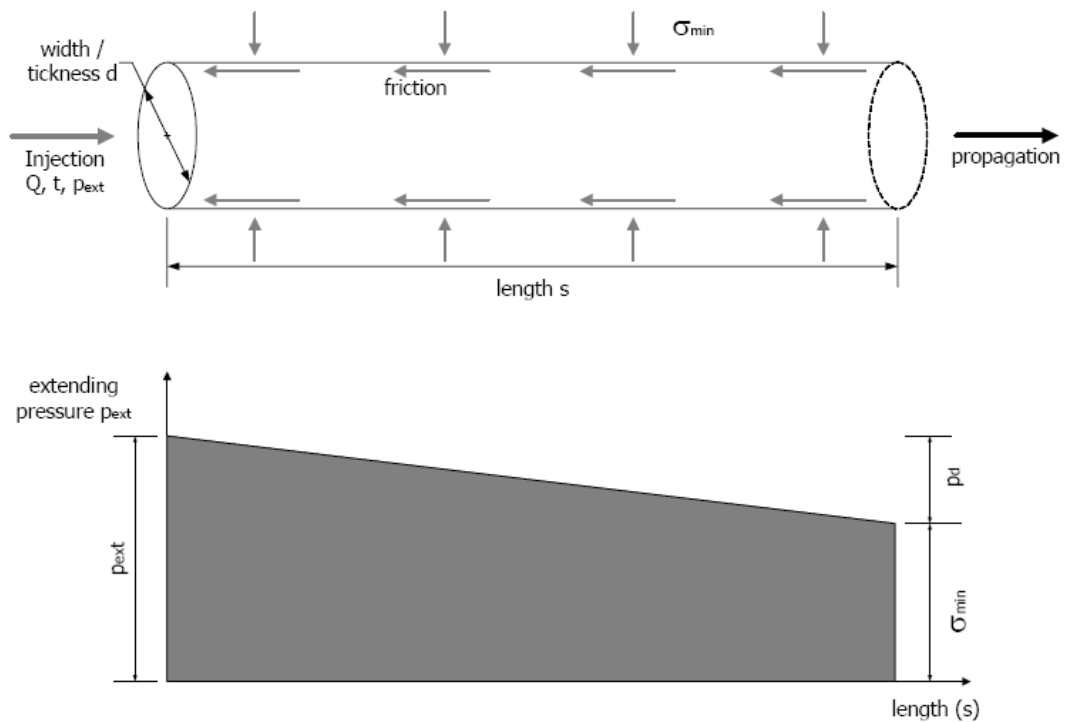
Η ρωγμή μπορεί να προσομοιωθεί σαν μια οπή ανοίγματος d και μήκους s . Το μήκος της ρωγμής εξαρτάται από το μέγεθος της πίεσης p_{ext} , τη διάμετρο της οπής και την αναπτυσσόμενη τριβή λόγω διατμητικών δυνάμεων.

$$p_{ext} = \sigma_{min} + p_d \quad (1), \text{ όπου:}$$

σ_{min} : η ελάχιστη κύρια τάση, που αντιστοιχεί στην απαιτούμενη πίεση για να προκληθεί θραύση του σχηματισμού (kN/m^2)

p_d : η απαιτούμενη πίεση ροής ενέματος (ώστε να ξεπεραστεί η διατμητική αντίσταση του σχηματισμού) (kN/m^2)

Η επέκταση της ρωγμής συνεχίζεται έως ότου η επιβαλλόμενη πίεση, που μειώνεται σταδιακά, εξισωθεί με τη διατμητική αντίσταση του εδαφικού σχηματισμού (σ_{min}).



Σχήμα 4.2 Καθορισμός της απαιτούμενης πίεσης ροής ενέματος εντός της ρωγμής (R. Grotenhuis, 2004)

Η απαιτούμενη πίεση ροής του ενέματος (p_d) είναι συνάρτηση δύο παραμέτρων, του ορίου διαρροής του ενέματος, που αντιστοιχεί στην απαιτούμενη ενέργεια για να προκληθεί η κίνησή του και του ιξώδους του, που αντιστοιχεί στην πρόσθετη ενέργεια για την αύξηση του ρυθμού ροής.

Ο μηχανισμός κίνησης του ενέματος προσομοιώνεται ιδεατά από το πλαστικό μοντέλο Bingham, βάσει του οποίου:

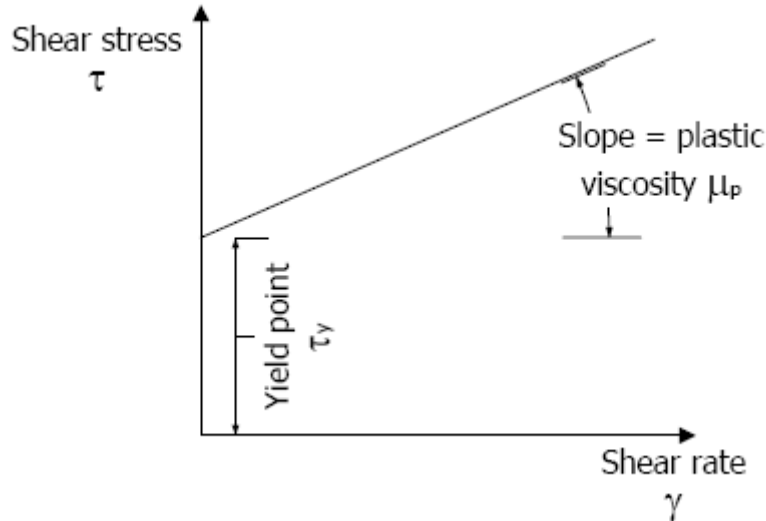
$$p_d = \tau = \tau_\gamma + \mu_p \cdot \gamma \quad (2), \text{ όπου:}$$

τ : διατμητική τάση στο ένεμα (kN/m^2)

τ_y : όριο διαρροής ενέματος (kN/m^2)

μ_p : ιξώδες= $\tau/\dot{\gamma}$ (kNs/m^2)

$\dot{\gamma}$: ρυθμός διάτμησης ($1/\text{s}$)



Σχήμα 4.3 Γραφική απεικόνιση του πλαστικού μοντέλου Bingham
(R. Grotenhuis, 2004)

Στην περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου εδαφικής ρωγμάτωσης, το ένεμα εισέρχεται στη ρωγμή και επεκτείνει το μήκος της ζώνης ρωγμάτωσης.

Αντιθέτως, στην περίπτωση ενεμάτωσης υπό πίεση, λόγω της χρήσης ενέματος με υψηλό ιξώδες, το ένεμα δεν είναι δυνατό να εισέλθει και να διαδοθεί στο επίπεδο αδυναμίας (κατά μήκος της ρωγμής). Υπάρχει πιθανότητα ο βολβός να συνεχίσει να διαστέλλεται και να αυξηθεί εκ νέου η πίεση εισπίεσης.

4.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

Σε αυτή την παράγραφο, παρουσιάζονται αναλυτικές σχέσεις και καταστατικά μοντέλα υπολογισμού των απαιτούμενων πιέσεων κατά τη διαδικασία ενεμάτωσης για την εκτέλεση αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων.

Οι παρακάτω αναφερόμενες μέθοδοι βασίζονται κυρίως σε εμπειρικά στοιχεία και πειραματικά αποτελέσματα, για κάθε μέθοδο χωριστά.

Αξίζει να αναφερθεί ότι στη βιβλιογραφία υπάρχουν περιορισμένα στοιχεία για την εκτίμησή τους και συνεχίζουν να διεξάγονται σχετικές έρευνες από αρκετούς ερευνητές.

4.3.1 Εκτίμηση Τάσης Εισπίεσης κατά την Εφαρμογή της Μεθόδου Εδαφικής Διάρρηξης

Το μοντέλο εκτίμησης της απαιτούμενης πίεσης ρωγμάτωσης, διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος του σχηματισμού, συνεκτικού (αργιλικού) ή μη συνεκτικού (αμμώδους), στον οποίο εφαρμόζεται.

Αυτό οφείλεται κυρίως λόγω της αυξημένης διαπερατότητας που χαρακτηρίζει τα αμμώδη εδάφη, καθώς υπάρχει δυνατότητα «διαφυγής» του νερού του ενέματος, φαινόμενο που είναι πρακτικά απίθανο να εκδηλωθεί σε αδιαπέρατους σχηματισμούς.

Συγχρόνως η διαδικασία ρωγμάτωσης στα αμμώδη εδάφη λαμβάνει χώρα υπό στραγγιζόμενες συνθήκες ενώ στα αργιλώδη υπό αστράγγιστες.

Ακολούθως παρουσιάζεται μια γενική μεθοδολογία υπολογισμού της απαιτούμενης πίεσης θραύσης για την εφαρμογή της μεθόδου σε συνεκτικούς σχηματισμούς και ποιοτικά αποτελέσματα για την εφαρμογή της σε μη συνεκτικά εδάφη.

▪ Μηχανισμός Ρωγμάτωσης Συνεκτικών (Αργιλικών) Σχηματισμών

Θεωρώντας τον υπό βελτίωση σχηματισμό ως ομογενές ισότροπο μέσο, πολλοί ερευνητές πραγματοποίησαν μια σειρά αναλύσεων για τη διερεύνηση του μηχανισμού ρωγμάτωσης του εδάφους.

Ανεξαρτήτως της θεώρησης του μηχανισμού αστοχίας του σχηματισμού (υπέρβαση εφελκυστικής ή διατμητικής αντοχής), τα περισσότερα μοντέλα που προτείνονται στη βιβλιογραφία, έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$p_f = A \cdot \sigma_{\min} + B \cdot C_u \quad (3),$$

στην οποία:

p_f : πίεση θραύσης (kPa)

σ_{\min} : ελάχιστη κύρια τάση (kN/m²)

C_u : αστράγγιστη διατμητική αντοχή (kN/m²)

A και B: συντελεστές

Η παραπάνω σχέση είναι αρκετά απλή στην εφαρμογή της καθώς δεν απαιτεί τον προσδιορισμό πολύπλοκων εδαφικών παραμέτρων.

Οι συντελεστές A και B, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα, λαμβάνουν διαφορετικές τιμές ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο μοντέλο ρωγμάτωσης (κυρίως λόγω των αλλαγών στην πίεση εισπίεσης και στο βαθμό στερεοποίησης).

Η παράμετρος B, αυξάνεται όσο αυξάνεται ο ρυθμός εισπίεσης και κυμαίνεται μεταξύ 1 και 2.

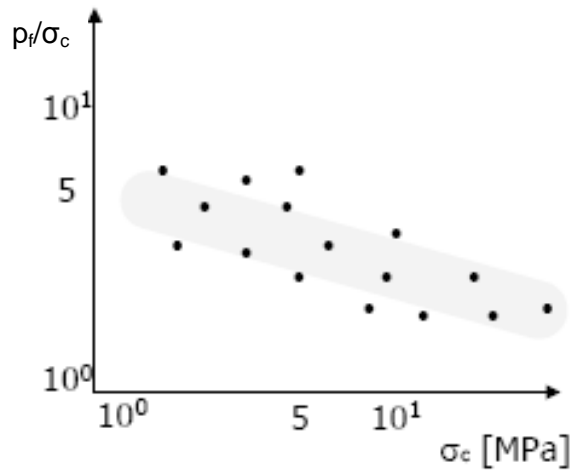
Σε ορισμένα μοντέλα υπογραμμίζεται η επίδραση του βαθμού στερεοποίησης του σχηματισμού στην απαιτούμενη τάση εισπίεσης, για αυτό και στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται και το εύρος της τιμής του δείκτη υπερστερεοποίησης (OCR) για το οποίο βρίσκει εφαρμογή το κάθε μοντέλο.

Μοντέλο Ρωγμάτωσης των	Παράμετρος	Παράμετρος	OCR
	A	B	
Bjerrum και λοιποί (απευθείας ρωγμάτωση)	≈1	?	-
Bjerrum και λοιποί (ρωγμάτωση μετά τη διαστολή)	≈1.4	?	-
Andersen και λοιποί	1	≈1.2-1.6	1-3.5
Panah & Yanagisawa	1	1	0.2-1.0
Mori & Tamura	1	1-2	0.5-1.5
Overy & Dean	1	1-2	≈1
Yuan & Koizumi	1	1-2	-
Decker & Clemence Εργαστηριακές δοκιμές σε αργιλώδεις ιλύες	2	1	-
Hassani και λοιποί Εργαστηριακές δοκιμές σε κορεσμένα και ακόρεστα εδάφη (στα ακόρεστα το B λαμβάνει τις μεγαλύτερες τιμές)	1	1-2	-

▪ **Μηχανισμός Ρωγμάτωσης μη Συνεκτικών (Αμμώδη) Σχηματισμών**

Η έρευνα σε ότι αφορά το μηχανισμό έναρξης της ρωγμάτωσης στις άμμους είναι σχετικά νέα, για αυτό και βρέθηκαν περιορισμένα στοιχεία στη βιβλιογραφία.

Ο De Pater και λοιποί διερεύνησαν τη διαδικασία ρωγμάτωσης σε αμμώδεις σχηματισμούς με βάση το λόγο της μέγιστης πίεσης εισπίεσης του ενέματος (πίεση θραύσης) προς το ισχύον τασικό πεδίο, p_f/σ_c , συναρτήσει της μέσης γεωστατικής τάσης και κατέληξαν στο ακόλουθο διάγραμμα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις στις οποίες ισχύει $\sigma_c > 0.7\text{MPa}$.



Σχήμα 4.4 Πειραματική Σχέση Υπολογισμού της απαιτούμενης πίεσης ρωγμάτωσης μη συνεκτικών σχηματισμών (De Pater et al.)

Και ο Bezuijzen και λοιποί διερεύνησαν το μηχανισμό έναρξης της ρωγμάτωσης σε άμμους και κατέληξαν στην ακόλουθη εξίσωση για τον υπολογισμό της ελάχιστης απαιτούμενης πίεσης θραύσης.

$$p_f = p_{\text{blow-out}} = u + 2 \cdot \sigma'_v \quad (4), \text{ όπου:}$$

$p_{\text{blow-out}}$: πίεση θραύσης (kPa)

u : πίεση πόρων (kN/m^2)

σ'_v : κατακόρυφη ενεργός τάση (kN/m^2)

Η απαιτούμενη πίεση ρωγμάτωσης μπορεί να υπολογιστεί και με τη χρήση ενός από τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για το μηχανισμό προσομοίωσης διαστολής σφαιρικού βολβού ενέματος κατά τη διαδικασία ενεμάτωσης.

Τα περισσότερα μοντέλα βασίζονται στην απλοποιητική παραδοχή γραμμικής ελαστικής-ιδεατά πλαστικής συμπεριφοράς του υπό βελτίωση σχηματισμού και στηρίζονται στο γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Vesic (1972), Luger & Hergarden (1998), Yu (2000) και Salgado & Randolph (2001)) ή στο καταστατικό μοντέλο Cam-Clay.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ενδεικτικά το μοντέλο των Luger & Hergarden, (της εταιρείας GeoDelft), το οποίο προτιμάται για την εκτίμηση της απαιτούμενης πίεσης πρόκλησης ρωγμάτωσης σε ανομοιογενείς σχηματισμούς.

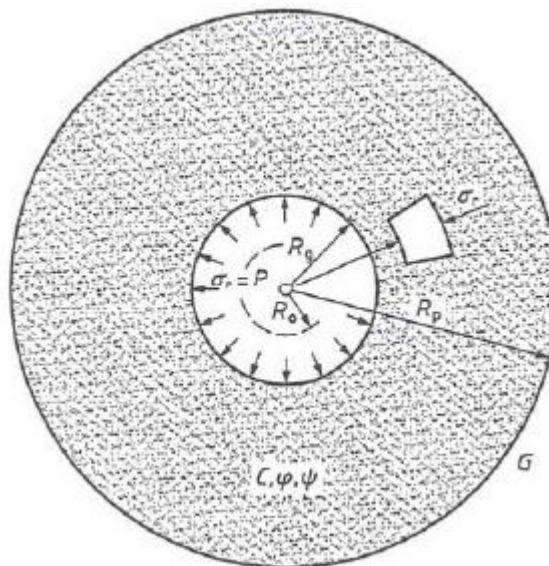
Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη θεωρία που αναπτύχθηκε από τον Vesic το 1972 για τη διαστολή κοιλότητας, είναι όμως πιο συντηρητική στις παραδοχές της.

Βασική παραδοχή της μεθόδου είναι η θεώρηση αξονοσυμμετρικής επίπεδης παραμόρφωσης γύρω από την περιοχή της οπής. Συγχρόνως θεωρεί ότι η διαστολικότητα στην πλαστική ζώνη είναι μηδενική ($\psi=0^\circ$).

Κατά την ενεμάτωση οι τάσεις που επιβάλλονται από το ένεμα στο σχηματισμό αυξάνονται σταδιακά. Όταν ξεπεράσουν τις γεωστατικές, το έδαφος αρχίζει να παραμορφώνεται ελαστικά.

Συνέχιση της διαδικασίας ενεμάτωσης οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση της πίεσης εισπίεσης. Όταν υπερβεί μια συγκεκριμένη τιμή $p > p_f$, ο σχηματισμός αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά, αρχικά στην εδαφική ζώνη που περιβάλλει την οπή ενεμάτωσης. Περαιτέρω αύξηση των επιβαλλόμενων τάσεων θα οδηγήσει σε επέκταση της πλαστικής ζώνης, μέχρι μια μέγιστη ακτίνα πέραν της οποίας οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις είναι ελαστικές.

Υπάρχει ένα όριο των επιβαλλόμενων πιέσεων ενεμάτωσης (p_{lim}) το οποίο αν ξεπεραστεί, σύμφωνα με τη θεωρία GeoDelft υπάρχει κίνδυνος εκδήλωσης αστοχίας είτε λόγω μη ελεγχόμενης διαστολής της μάζας ενέματος είτε λόγω υδραυλικής διάρρηξης. Η οριακή πίεση p_{lim} εκτιμάται ότι αντιστοιχεί στην πίεση p_f για την πρόκληση ρωγμάτωσης στο σχηματισμό.



Σχήμα 4.5 Σχηματική απεικόνιση της διαστολής κοιλότητας

Σύμφωνα με το μοντέλο GeoDelft η μέγιστη πίεση που μπορεί να αναπτυχθεί κατά την ενεμάτωση για να μην επέλθει αστοχία του σχηματισμού είναι:

$$p_{lim} = p'_{lim} + u \quad (5), \text{ όπου:}$$

$$p'_{lim} = (p'_f + c \cdot \cot \phi) \cdot Q^{\frac{-\sin \phi}{1+\sin \phi}} - c \cdot \cot \phi \quad (6), \text{ για κυλινδρική διαστολή}$$

$$p'_{lim} = (p'_f + c \cdot \cot \phi) \cdot Q^{\frac{-\frac{4}{3} \cdot \sin \phi}{1+\sin \phi}} - c \cdot \cot \phi \quad (7), \text{ για σφαιρική διαστολή}$$

$$p'_f = \sigma'_o \cdot (1 + \sin \phi) + c \cdot \cos \phi \quad (8)$$

$$Q = \frac{\sigma'_o \cdot \sin \phi + c \cdot \cos \phi}{G} \quad (9)$$

u: η αρχική πίεση πόρων στον υπό βελτίωση σχηματισμό (kN/m²)

σ'_o : η αρχική ενεργός τάση (kN/m²)

ϕ : η γωνία εσωτερικής τριβής (°)

G: μέτρο διάτμησης = E/(2(1+v)) (kN/m²)

4.3.2 Εκτίμηση της Τάσης Εισπίεσης κατά την Εφαρμογή της Μεθόδου Ενεμάτωσης υπό Πίεση

Η εφαρμογή της μεθόδου ενεμάτωσης υπό πίεση αποσκοπεί στη συμπίκνωση του σχηματισμού μέσω της δημιουργίας καθ' ύψους στηλών βολβών ενέματος.

Η απαιτούμενη τάση ενεμάτωσης για την επίτευξη της επιθυμητής συμπίκνωσης σε περίπτωση εφαρμογής σε μη συνεκτικούς σχηματισμούς ή της επιθυμητής πλαστικής παραμόρφωσης, σε περίπτωση εφαρμογής σε συνεκτικά εδάφη, είναι υψηλή και μπορεί να προσομοιωθεί με την αντίστοιχη τάση διατμητικής αστοχίας πασσάλου.

Για παράδειγμα στους συνεκτικούς σχηματισμούς μπορεί να εκτιμηθεί από την ακόλουθη σχέση (Essler και λοιποί, 2000):

$$p_u = 6 \cdot C_u + \sigma'_h \quad (10), \text{ όπου:}$$

σ'_h : η οριζόντια ενεργός γεωστατική τάση (kN/m²)

4.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΡΩΓΜΩΝ

Για τις ανάγκες υπολογισμού της έκτασης της ρωγμάτωσης θεωρούνται ελαστικές συνθήκες παραμόρφωσης.

Το πλάτος της ρωγμάτωσης που προκαλείται από την επιβολή πίεσης ίσης με (p_i) μπορεί να υπολογιστεί από την εφαρμογή της σχέσης του Griffith (11).

$$w(r) = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2)}{E} \cdot p_i \cdot \sqrt{a^2 - r^2} \quad (11), \text{ όπου:}$$

p_i : επιβαλλόμενη πίεση (kPa)

$w(r)$: πλάτος ρωγμής

E: μέτρο Ελαστικότητας (kN/m²)

ν : λόγος poisson

a : μήκος ρωγμής

Ο όγκος του εισπνεζόμενου ενέματος προκύπτει από το την ολοκλήρωση του πλάτους ως προς το μήκος της ρωγμής.

$$V_E = 2 \cdot \int_0^a \left[\frac{2(1-\nu^2)}{E} \cdot p_i \cdot \sqrt{a^2 - r^2} \right] dr = \frac{\pi \cdot (1-\nu^2)}{E} p_i \cdot a^2 \quad (12)$$

Από την επίλυση της σχέσης (12), μπορεί να υπολογιστεί το ζητούμενο μήκος της ρωγμάτωσης:

$$a = \sqrt{\frac{V_E \cdot E}{\pi(1-\nu^2) \cdot p_i}} \quad (13) \text{ (C. Wawrzyniak, W. Krajewski)}$$

Ως όγκος (V_E) ενεμάτωσης τίθεται αυτός που επιλέγεται κατά το σχεδιασμό και εξαρτάται από τη μέγιστη πίεση και το ρυθμό ενεμάτωσης.

Υπολογίζοντας το μήκος της ρωγμάτωσης βάσει της εξίσωσης (13) για πίεση θραύσης ίση με αυτή που υπολογίζεται από τις εξισώσεις της παραγράφου 4.3, μπορεί να παραχθεί το αναλυτικό μοντέλο προσομοίωσης του προβλήματος με οριζόντιες και κατακόρυφες ρωγμές (C. Wawrzyniak, 2002).

4.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η μέθοδος των αντισταθμιστικών τιμεντενέσεων βασίζεται κυρίως στην εφαρμογή εμπειρικών σχέσεων και μεθόδων, καθώς και στην εμπειρία από προηγούμενα έργα. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια διερευνάται και επεκτείνεται η χρήση αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

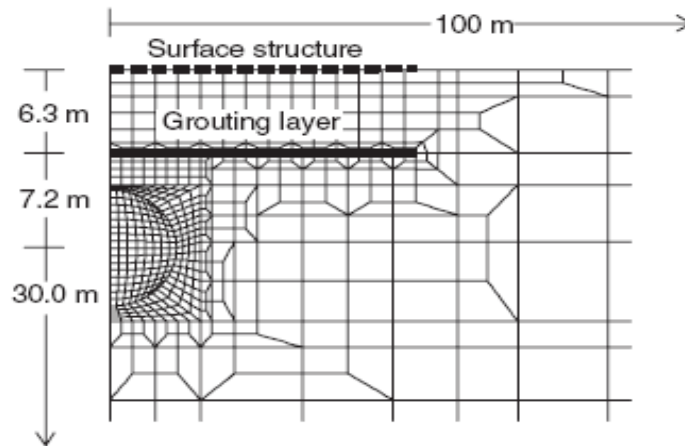
Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι στη φάση σχεδιασμού παρέχει τη δυνατότητα γενικότερης εποπτείας του προβλήματος και συγκεκριμένα την εκτίμηση του τασικού πεδίου, των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στο πεδίο εφαρμογής και στην επιφάνεια του εδάφους καθώς και των παραμέτρων ενεμάτωσης.

Επιπροσθέτως, κατά τη φάση κατασκευής, είναι δυνατή η πραγματοποίηση ανάστροφων αναλύσεων βάσει των επιτόπου καταγραφών για την αναπροσαρμογή και βελτιστοποίηση του σχεδιασμού.

Τα περισσότερα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης είναι διδιάστατα και πρόσφατα αναπτύχθηκαν και τριδιάστατα, τα οποία προσομοιώνουν ακριβέστερα το πρόβλημα.

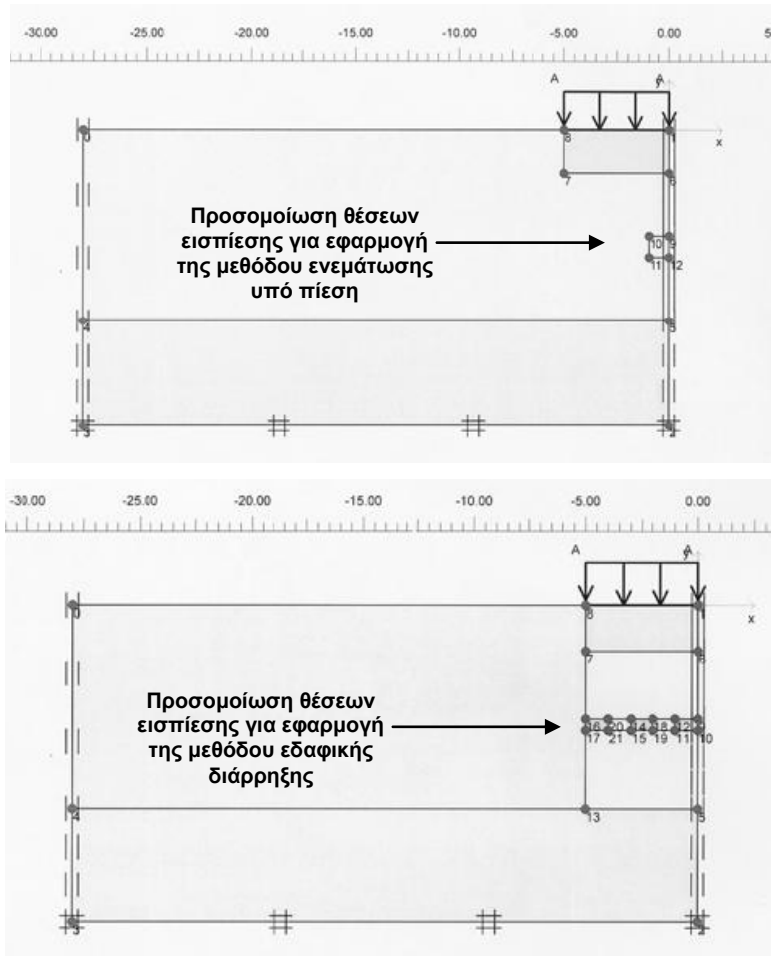
4.5.1 Σχεδίαση του Προβλήματος

Αρχικά σχεδιάζεται ο κάρναβος του προβλήματος και εν συνεχεία προσομοιώνεται η σήραγγα, η κατασκευή που επιθυμείται να προστατευθεί έναντι μετακινήσεων και ορίζεται η περιοχή της ζώνης ενεμάτωσης. Ένα τυπικό πλάτος της περιοχής που μπορεί να ορισθεί είναι τα 3m.



Σχήμα 4.6 Παράδειγμα Διδιάστατου Μοντέλου Προσομοίωσης της Μεθόδου Εδαφικής διάρρηξης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Η έκταση της ζώνης ενεμάτωσης επιλέγεται ανάλογα με τις συνθήκες και τις απαιτήσεις του εκάστοτε έργου. Οι θέσεις εισπιέσεις προσομοιώνονται ως στοιχεία εντός της ζώνης ενεμάτωσης.



Σχήμα 4.7 Προσομοίωση των θέσεων εισπίεσης α. με τη μέθοδο ενεμάτωσης υπό πίεση, β. με τη μέθοδο εδαφικής διάρρηξης

4.5.2 Μεθοδολογία Προσομοίωσης της Ενεμάτωσης

Η προσομοίωση της εισπίεσης ενέματος στον υπό βελτίωση εδαφικό σχηματισμό για την πραγματοποίηση αριθμητικών αναλύσεων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο βασικές μεθοδολογίες, τη μεθοδολογία των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων και τη μεθοδολογία των επιβαλλόμενων τάσεων.

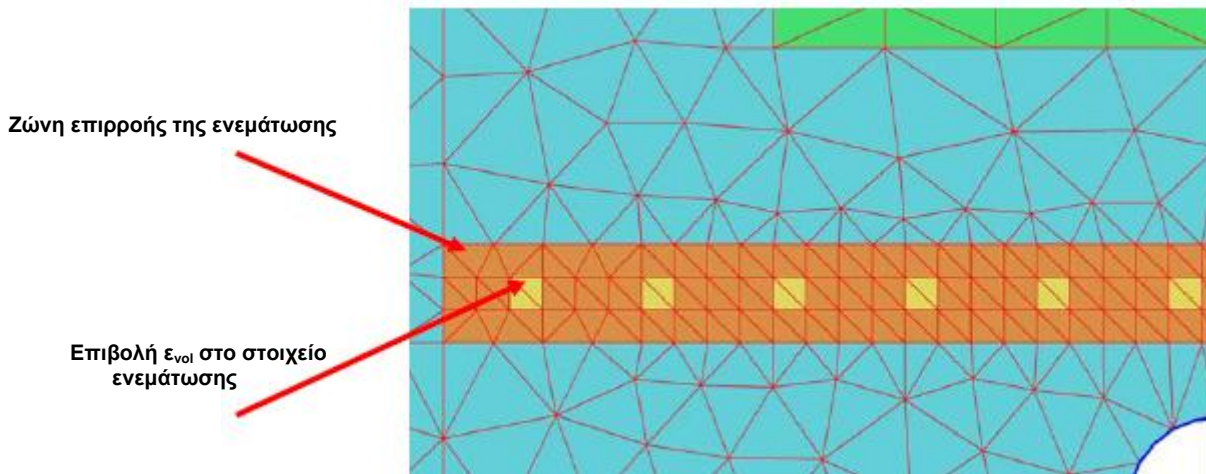
- Μεθοδολογία επιβαλλόμενων παραμορφώσεων

Η προσομοίωση της παραμόρφωσης του εδαφικού σχηματισμού λόγω της εισπίεσης ενέματος, πραγματοποιείται μέσω της αύξησης του όγκου των στοιχείων που αντιστοιχούν στη θέση εισπίεσης του ενέματος (ενδεικτικά αναφέρεται το μοντέλο των Kummerer, Schweiger, Otterbein).

Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στη χρήση μοντέλων διαστολής του βολβού του ενέματος (Nicholson και λοιποί (1994), Schweiger & Falk (1998)).

Η έκταση και ο βαθμός των αντισταθμιστικών τιμεντενέσεων προκαθορίζεται στο μοντέλο.

Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να προσομοιωθεί επιπλέον βελτίωση των χαρακτηριστικών του εδάφους και κατά την τελική φάση ενεμάτωσης (ανύψωση), (Kummerer et al, 2003).



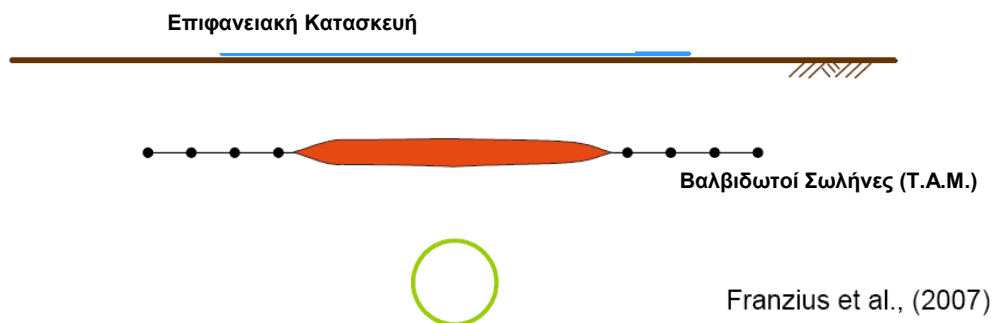
Σχήμα 4.8 Διδιάστατο Μοντέλο Προσομοίωσης της μεθόδου Εδαφικής Διάρρηξης με χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων, με τη μεθοδολογία επιβαλλόμενων παραμορφώσεων

- Μεθοδολογία επιβαλλόμενων τάσεων

Η προσομοίωση με τη μεθοδολογία των επιβαλλόμενων τάσεων, θεωρείται πιο πολύπλοκη και βασίζεται στην εφαρμογή τάσεων στο εσωτερικό των στοιχείων της ζώνης ενεμάτωσης, (Konacenic και λοιποί (1996), Lee και λοιποί (2000), Wisser και λοιποί (2005)). Με τη μέθοδο προσομοιώνεται τόσο η ροή του ενέματος όσο και η ανάπτυξη της ρωγμάτωσης.

Η τάση εφαρμόζεται είτε απευθείας σε όλο το μήκος της περιοχής ενεμάτωσης (ανάλυση «single step»), είτε ανά βήματα («incremental» ανάλυση), όπου σε κάθε βήμα εφαρμόζεται η πίεση σε ένα μεμονωμένο στοιχείο της ζώνης ενεμάτωσης που αντιστοιχεί σε θέση εισπίεσης ενέματος.

Η προσομοίωση της διαδικασίας ενεμάτωσης μέσω της σταδιακής εφαρμογής τάσεων, προσομοιώνει καλύτερη τη μέθοδο της ενεμάτωσης υπό πίεση στην οποία το ένεμα δεν εισέρχεται και δε διαδίδεται στη ρωγμάτωση. Αντιστοίχως, η επιβολή της τάσης απευθείας σε όλη τη ζώνη ενεμάτωσης προτιμάται για την προσομοίωση της μεθόδου της εδαφικής διάρρηξης.



Σχήμα 4.9 Διδιάστατο Μοντέλο Προσομοίωσης της μεθόδου Εδαφικής Διάρρηξης με χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων με τη μεθοδολογία επιβαλλόμενων τάσεων

Τόσο με τη μεθοδολογία των επιβαλλόμενων τάσεων όσο και με τη μεθοδολογία των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων, προσομοιώνεται η βελτίωση του εδάφους λόγω της επιδιωκόμενης συμπύκνωσης, επιπλέον πρέπει να προσομοιωθεί και η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σχηματισμού λόγω της διάχυσης του ενέματος, στη ζώνη επιρροής της ενεμάτωσης.

Η βελτίωση πραγματοποιείται με την ποσοστιαία αύξηση των αρχικών χαρακτηριστικών του σχηματισμού, που εκτιμάται εμπειρικά, στα στοιχεία που αντιστοιχούν στην έκταση της ζώνης επιρροής της ενεμάτωσης που έχει οριστεί. Για την προσομοίωση της μεθόδου εδαφικής διάρρηξης η μεταβολή των χαρακτηριστικών του σχηματισμού πραγματοποιείται στη φάση προ-ενεμάτωσης, ενώ δεν αποκλείεται να απαιτηθεί μεταβολή τους και κατά την τελική φάση ενεμάτωσης. Αντιθέτως στη μέθοδο ενεμάτωσης υπό πίεση, η μεταβολή των χαρακτηριστικών της ζώνης ενεμάτωσης πραγματοποιείται σε ένα στάδιο.

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΡΓΩΝ ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΣΤΗΚΕ Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΤΙΚΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΕΣΩΝ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων για την προστασία κατασκευών έναντι εκδήλωσης ανεπιθύμητων καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη σηράγγων σε αστικό περιβάλλον, πραγματοποιείται είτε με τη μέθοδο της εδαφικής διάρρηξης, είτε με τη μέθοδο ενεμάτωσης υπό πίεση.

Στις χώρες της Ευρώπης, για την πραγματοποίηση αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων προτιμάται η εφαρμογή της μεθόδου της εδαφικής διάρρηξης. Η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί σε πολύ σημαντικά έργα, όπως είναι η προστασία του πύργου του Big Ben κατά την κατασκευή της επέκτασης της γραμμή Μετρό Jubilee line στο Λονδίνο (§5.2), η προστασία πολλών κατασκευών κατά τη διάνοιξη του μετρό της Λισαβόνας (E.Falk, 1997), κατά την κατασκευή της επέκτασης των νέων γραμμών Μετρό B1 και C στην Ρώμη (§5.3) καθώς και κατά την επέκταση της σιδηροδρομικής γραμμής Docklands Light στο Λονδίνο. Κατά τη διάνοιξη σήραγγας κάτω από τον κεντρικό σταθμό της Antwerp χρησιμοποιήθηκε για τη σταθεροποίηση ενός ιστορικού κτιρίου (R. Otterbein, 2000).

Η μέθοδος της ενεμάτωσης υπό πίεση χρησιμοποιείται κυρίως στην Αμερική και σε χώρες εκτός της Ευρώπης. Ορισμένες σημαντικές περιπτώσεις εφαρμογής της είναι κατά τη διάνοιξη της σήραγγας Smart Tunnel στην Kula Lumbur (§5.4), κατά τη διάνοιξη σηράγγων στη Βαλτιμόρη για την προστασία 40 κατασκευών από οπποπλινθοδομή (Baker και λοιποί, 1989), καθώς και κατά τη διάνοιξη σήραγγας στη Μινεάπολη (Cording και λοιποί, 1989).

Οι βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδους των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων είναι περιορισμένες, ενώ στις διαθέσιμες δεν παρουσιάζονται εκτενώς λεπτομέρειες σχετικά με τις παραμέτρους ενεμάτωσης που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τα αποτελέσματα που επετεύχθησαν.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου της εδαφικής διάρρηξης κατά τη διάνοιξη αβαθούς

σήραγγας, η οποία πραγματοποιείται κυρίως στην Ευρώπη, και γίνεται αναφορά σε μια περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου ενεμάτωσης υπό πίεση.

5.2 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ BIG BEN ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΤΡΟ JUBILEE ΣΤΟ ΛΟΝΔΙΝΟ

5.2.1 Παρουσίαση Έργου

Η επέκταση της γραμμής Μετρό Jubilee line στο Λονδίνο, περιελάμβανε την κατασκευή 16km δίδυμων σηράγγων, έντεκα σταθμών καθώς και την προστασία κτιρίων και κατασκευών από πιθανές βλάβες λόγω εκδήλωσης ανεπιθύμητων καθιζήσεων κατά την εκσκαφή των σηράγγων και των σταθμών.

Η διάνοιξη της δίδυμης σήραγγας καθώς και η κατασκευή του σταθμού Westminster εκτιμήθηκε ότι θα προκαλούσε σημαντικές μετακινήσεις και στροφή στον πύργο του Big Ben και στο παλάτι του Westminster και κρίθηκε απαραίτητη η λήψη μέτρων περιορισμού τους.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την προστασία τους ήταν η μέθοδος των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων και συγκεκριμένα της εδαφικής διάρρηξης (Κεφάλαιο 2).

5.2.2 Ο πύργος του Big Ben

Η κατασκευή του Big Ben ολοκληρώθηκε το 1858, λίγο μετά τη φωτιά του 1834 όπου είχε καεί το παλάτι του Westminster.

Ο πύργος αποτελείται από φέρουσα οπτοπλινθοδομή ύψους 61m, με εξωτερική πέτρινη επένδυση, στην οποία στηρίζεται το μεταλλικό πλαίσιο της οροφής μήκους 31m.

Είναι θεμελιωμένος σε τετραγωνική πλάκα σκυροδέματος πλευράς 15m και πάχους 3m, η οποία εδράζεται σε χερσοποτάμιες αποθέσεις χαλίκων υπό μορφή αναβαθμών (Terrace gravel), σε βάθος επτά μέτρων (7m) κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Το βάρος του εκτιμάται στα 85MN και η μέση επιβαλλόμενη πίεση στη βάση της θεμελίωσης περί τα 400kPa.



Σχήμα 5.1 Άποψη του Big Ben και του παλατιού του Westminster (J. Burland, 2002)

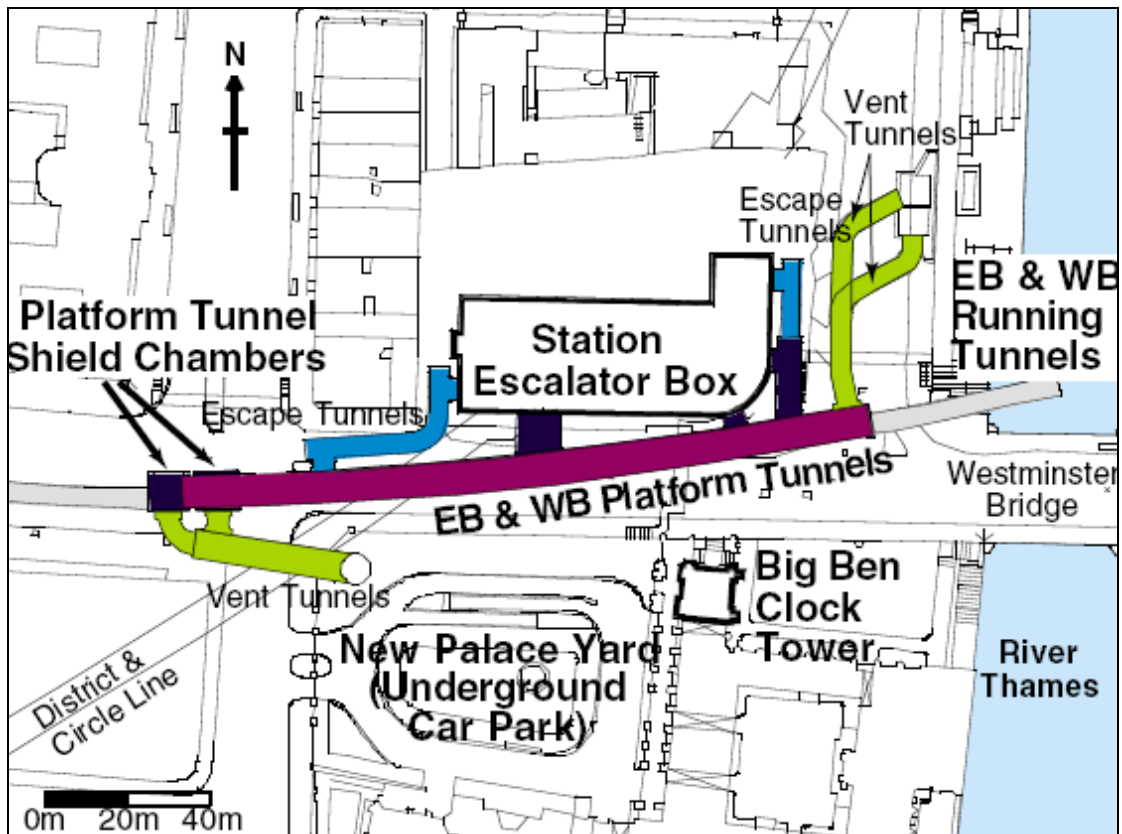
5.2.3 Στοιχεία Κατασκευής του Σταθμού Westminster

Η επέκταση της γραμμής Jubilee line και η κατασκευή του σταθμού Westminster, αποτελούν τη βαθύτερη εκσκαφή που έχει πραγματοποιηθεί στο Λονδίνο. Συγκεκριμένα το βάθος της ανήλθε στα 39m.

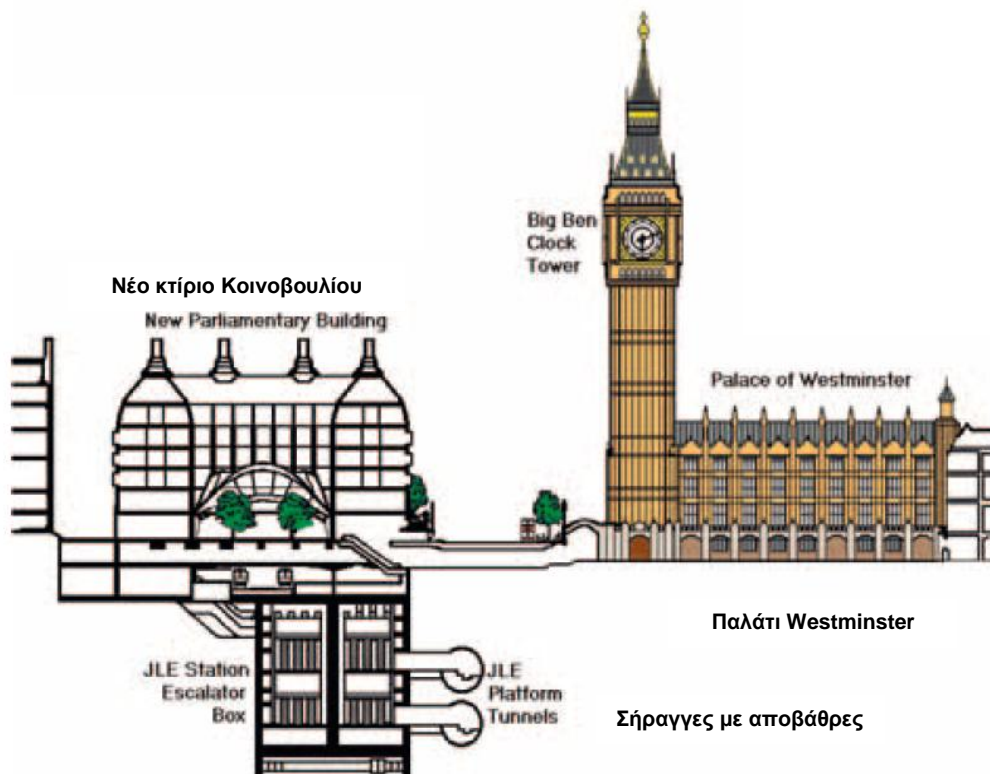
Για την πραγματοποίηση της βασικής εκσκαφής απαιτήθηκε η κατασκευή διαφραγματικού τοίχου περιμετρικά της.

Μεταξύ του σταθμού και του Big Ben και σε βάθη 21m και 30m από την επιφάνεια του εδάφους, κατασκευάστηκαν σε κατακόρυφη διάταξη δύο σήραγγες με αποβάθρες, εξωτερικής διαμέτρου 7.4m,.

Το βόρειο τμήμα του πύργου απέχει μόλις 28m από τον άξονα της σήραγγας και 34m από τους διαφραγματικούς τοίχους περιμετρικά του σταθμού (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2 Σχέδιο του σταθμού Westminster και της επέκτασης της γραμμής Μετρό Jubilee line (R. Mair, D.Harris)



Σχήμα 5.3 Κατά μήκος τομή στην περιοχή κατασκευής του σταθμού Westminster, που δείχνει τη γειτνίαση του Big Ben με τις νέες σήραγγες (R. Mair, D.Harris)

5.2.4 Εδαφικές Συνθήκες

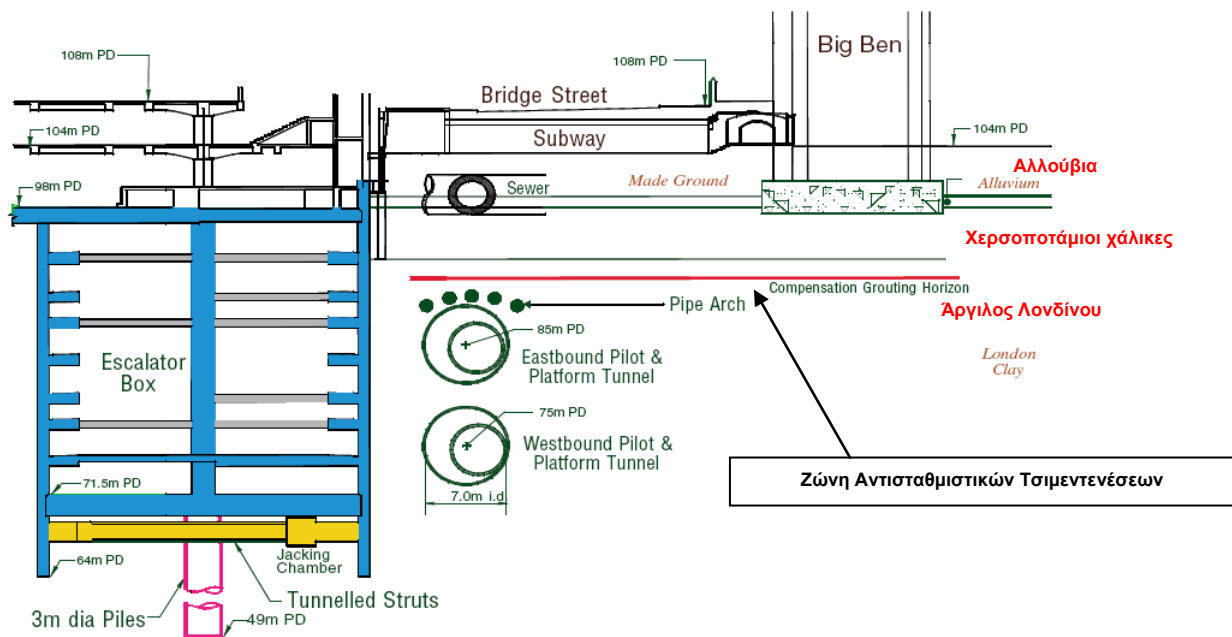
Συναντήθηκαν επιφανειακά και μέχρι βάθους 5.0m και κατά θέσεις λιγότερο, τεχνητές επιχώσεις. Σε μεγαλύτερο βάθος και μέχρι τα 8.0m εντοπίζονται αλλουβιακές αποθέσεις.

Από τα 8m και μέχρι περίπου τα 13m συναντήθηκαν χερσοποτάμιες αποθέσεις χαλίκων υπό μορφή αναβαθμών (Terrace Gravel). Μετά τις χερσοποτάμιες αποθέσεις απαντήθηκε η άργιλος του Λονδίνου (London Clay), η οποία εκτείνεται κάτω από το σταθμό. Το πάχος της στρώσης εκτιμάται στα 35m.

Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται ενδεικτική κατά μήκος τομή της περιοχής.

5.2.5 Κίνδυνος Στροφής

Στις αρχές του 1970, κατασκευάστηκε υπόγειος χώρος στάθμευσης βάθους 18.5m (New Palace Yard, Σχήμα 5.2), κάτω από το νέο παλάτι. Κατά το σχεδιασμό είχε εκτιμηθεί ότι θα προκληθεί στροφή του πύργου κατά 1/6000 προς την αντίθετη πλευρά από τον υπόγειο χώρο στάθμευσης. Εντέλει προκλήθηκε στροφή ίση με 1/7000 προς την πλευρά του υπόγειου χώρου στάθμευσης (Burland and Hancock, 1977).



Σχήμα 5.4 Τομή στην περιοχή του σταθμού Westminster, στην οποία φαίνεται το εδαφικό προφίλ (R. Mair, D.Harris)

5.2.6 Εφαρμογή Αντισταθμιστικών Τσιμεντένεσων για τον περιορισμό της Στροφής του Big Ben

Ένα από τα μέτρα που χρησιμοποιήθηκαν για τον περιορισμό των καθιζήσεων και της στροφής (προς το σταθμό Westminster) του πύργου του Big Ben ήταν η μέθοδος των αντισταθμιστικών τσιμεντένεσων.

Η εγκατάσταση των βαλβιδωτών σωλήνων πραγματοποιήθηκε ακτινικά και υπό οριζόντια διεύθυνση από φρέαρ που διανοίχτηκε στην περιοχή. Η διάταξη των σωλήνων σχεδιάστηκε κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να υπάρχει δυνατότητα εισπίεσης ενέματος από ένα πλήθος διαφορετικών θέσεων. Συγκεκριμένα, κάτω από τη θεμελίωση του Big Ben τοποθετήθηκαν 16 βαλβιδωτοί σωλήνες με μέγιστη αξονική απόσταση μεταξύ τους στα 2.5m.

Χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικοί σωλήνες διαμέτρου 70mm και μήκους περίπου 50m, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις έφτασαν και τα 65m. Η απόσταση μεταξύ των θέσεων εισπίεσης (περιοχές βαλβίδας) ήταν 0.3m.

Η διαδικασία ενεμάτωσης διήρκησε πάνω από 21 μήνες, από τον Ιανουάριο του 1996, έως το Σεπτέμβριο του 1997. Σε αυτό το χρονικό διάστημα εκτελέστηκαν τέσσερις διαφορετικές φάσεις ενεμάτωσης και εισπιάστηκαν συνολικά 122m³.

Κατά την εκτέλεση των εργασιών ενεμάτωσης αποφασιζόταν, βάσει των καταγραφών των μετακινήσεων, η θέση ενεμάτωσης καθώς και η εισπιεζόμενη ποσότητα ενέματος.

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η διάταξη των βαλβιδωτών σωλήνων που εγκαταστάθηκαν από φρέαρ που διανοίχτηκε στη μέση της Bridge Street καθώς και οι συνηθέστερες θέσεις εισπίεσης ενέματος. Στους κύκλους αναγράφεται η ποσότητα ενέματος (σε λίτρα) που εισπιάστηκε συνολικά κατά την εκτέλεση των σταδίων ενεμάτωσης.

του πύργου εκτιμήθηκε 1 έως 2mm και η στροφή αναμενόταν στα 4 με 8mm, μετρούμενη σε ύψος 55m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.

Εξαιτίας της υψηλής ταχύτητας διάνοιξης (31m/12h) κατέστη δύσκολος ο προγραμματισμός των εργασιών ενεμάτωσης, η αξιολόγηση των μετρούμενων παραμέτρων και η τροποποίησή τους, με αποτέλεσμα να καταγραφούν καθιζήσεις της τάξεως των 10mm στην περιοχή που πραγματοποιήθηκαν αντισταθμιστικές τσιμεντενέσεις και 20mm στις άλλες περιοχές, στις οποίες η απώλεια όγκου ανήλθε σε 3.5%, έναντι 1.4% που είχε εκτιμηθεί κατά το σχεδιασμό.

Από τα όργανα που είχαν τοποθετηθεί στον πύργο για την καταγραφή των μετακινήσεων κατά τη διέλευση του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής καταγράφηκε στροφή της τάξεως των 6mm, η οποία εντός 10 ημερών είχε φτάσει τα 8mm και ο ρυθμός εξέλιξής της ήταν 1.4mm/μήνα. Τον Αύγουστο του 1995 είχε προκληθεί στροφή 12mm.

Συνεπώς διαπιστώθηκε ότι η εισπιεζόμενη ποσότητα ενέματος δεν επαρκούσε για τον περιορισμό των καθιζήσεων και της στροφής του πύργου σε ασφαλή όρια και απαιτήθηκε η πραγματοποίηση πρόσθετων εισπιέσεων ενέματος.

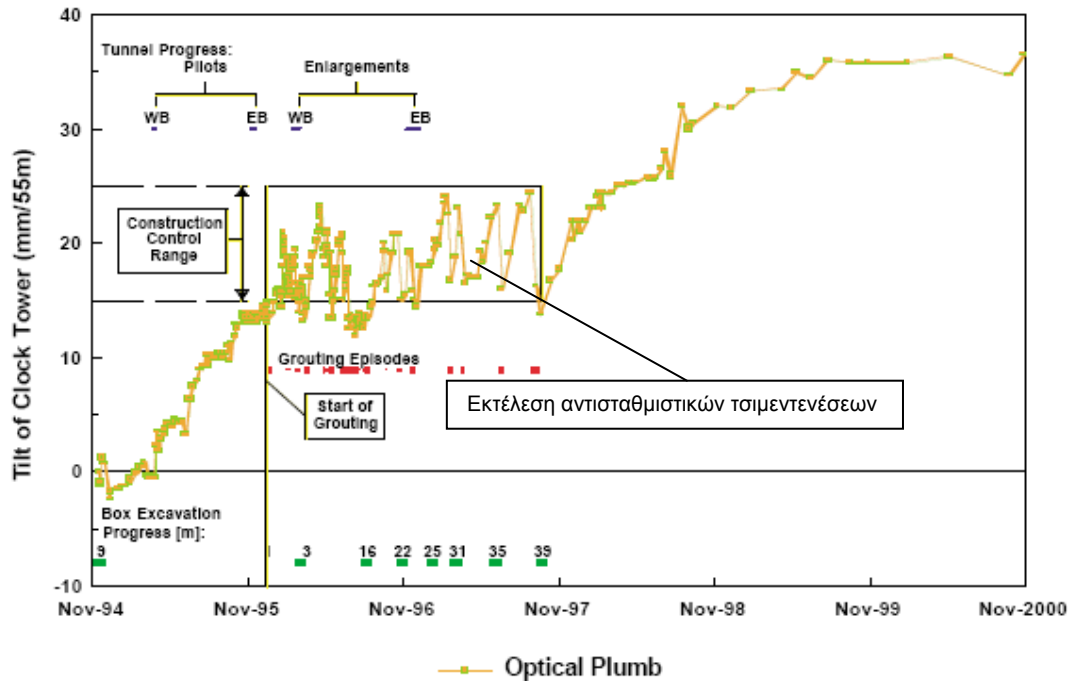
Ο σχεδιασμός και η εκτέλεση των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων κατά την κατασκευή της σήραγγας ανατολικής κατεύθυνσης ήταν πιο συστηματικοποιημένος, λόγω της εμπειρίας από την κατασκευή της σήραγγας δυτικής κατεύθυνσης.

Η ταχύτητα διάνοιξης μειώθηκε ούτως ώστε να υπάρχει επαρκής χρόνος για την πραγματοποίηση της ενεμάτωσης, ενώ ο εισπιεζόμενος όγκος αυξήθηκε, καθώς οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για απώλειες της τάξεως του 3.5%.

Οι καθιζήσεις που προκλήθηκαν δεν ξεπέρασαν τα 2mm.

Στο σχήμα 5.6 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της μεταβολής της στροφής του Big Ben στο επίπεδο μέτρησης (55m από την επιφάνεια του εδάφους) κατά το χρονικό διάστημα 1994 έως 2000.

Το μέγιστο αποδεκτό όριο στροφής του πύργου ήταν 1/2000, το οποίο αντιστοιχεί σε καταγραφή 27.5mm στο ύψος των 55mm. Ως όριο έναρξης της εκτέλεσης των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων τέθηκε η καταγραφή στροφής ίση με 1/2500, που αντιστοιχεί σε 22mm. Η στροφή έπρεπε να κρατηθεί σε ένα επίπεδο διακύμανσης μεταξύ των 15 και 25mm.



Σχήμα 5.6 Χρονική εξέλιξη της μεταβολής της στροφής του πύργου Big Ben, κατά τη χρονική περίοδο 1994-2000. (Burland et al, 2001)

Η ευστάθεια του πύργου προστατεύθηκε από τις ανεπιθύμητες επιπτώσεις από την κατασκευή του σταθμού, τη διάνοιξη βοηθητικών σηράγγων καθώς και από την από την εκδήλωση ερπυστικών παραμορφώσεων.

Συνολικά εκτελέστηκαν 29 στάδια ενεμάτωσης και εισπίαστηκαν 122m³ ενέματος.

Χωρίς την εκτέλεση αντισταθμιστικών τσιμεντένεσων η κλίση του πύργου εκτιμάται ότι θα ήταν περίπου 120mm και θα είχαν εκδηλωθεί σημαντικές ρωγμές στο παλάτι.

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής (Σχήμα 5.6), διαπιστώθηκε ότι ο ρυθμός αύξησης της εκδηλωμένης στροφής (κυρίως λόγω της ανάπτυξης ερπυστικών παραμορφώσεων) μειωνόταν μέχρι της σταθεροποίησή της στα 35mm.

Έκτοτε δεν έχει απαιτηθεί η εκτέλεση πρόσθετης εισπίασης ενέματος.

Οι βλάβες στον πύργο λόγω της επέκτασης της γραμμής του Μετρό είναι ουσιαστικά ασήμαντες (κατηγορία 0 έως 2 της κατάταξης των Mair, Taylor και Burlan (§1.3) και περιορίστηκαν τοπικά.

5.3 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΤΡΟ Β1 ΣΤΗ ΡΩΜΗ

5.3.1 Παρουσίαση Έργου

Η κατασκευή της νέας γραμμής Μετρό Β1 στη Ρώμη περιλαμβάνει την διάνοιξη δίδυμων αβαθών σηράγγων διαμέτρου 6.7m και μήκους μεγαλύτερου από 8km, με χρήση μηχανήματος ολομέτωπης κοπής τύπου EPB, και την κατασκευή τεσσάρων σταθμών.

Σε πολλές θέσεις κατά μήκος της χάραξης η απόσταση μεταξύ της σήραγγας και της θεμελίωσης των υπερκείμενων κατασκευών ήταν μικρή και κυμαινόταν μεταξύ 3 και 7m.

Αρκετά κτίρια έπρεπε να προστατευθούν έναντι μετακινήσεων λόγω της διάνοιξης. Η προστασία τους πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων και συγκεκριμένα με χρήση της μεθόδου εδαφικής διάρρηξης (Κεφάλαιο 2).

5.3.2 Εδαφικές Συνθήκες

Το επιφανειακό στρώμα που συναντάται στην περιοχή αποτελείται από τεχνητές επιχώσεις (μεταβλητού πάχους), στις οποίες κατά θέσεις εντοπίζονται αρχαιολογικά ευρήματα. Η βασική στρώση αποτελείται από αργιλοίλυες και αμμώδεις ιλύες που απαντώνται κάτω από στρώση χερσοποτάμιων χαλίκων. Και οι δύο αυτοί σχηματισμοί ανήκουν στην Πλειοστόκενη περίοδο.

Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή των κυρίων εργασιών απαντάται σε βάθος 7 έως 9 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Κατά θέσεις απαντήθηκαν παλιές βαθιές τάφροι πληρωμένες με αλλουβιακές αποθέσεις ιλυο-αργιλώδους έως αμμώδους υλικού.

Ακολούθως παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των σχηματισμών που απαντήθηκαν.

Σχηματισμός	c (kPa)	φ (°)	E (MPa)
Τεχνητές Επιχώσεις	0	30	20-70
Πυροκλαστικά	0-20	28-38	90-400
Πρόσφατες Αλλουβιακές Αποθέσεις (OC)	15-45	19-27	60-160
Πρόσφατες Αλλουβιακές Αποθέσεις (NC)	0-5	28-30	60-160
Άμμος (Paleotevere)	0-30	26-37	80-200
Ιλυώδης-Άργιλος (Paleotevere)	5-30	20-34	80-200
Χάλικες (Paleotevere)	0-10	32-41	100-300

5.3.3 Σχεδιασμός Αντισταθμιστικών Τσιμεντένεσων

Κατά το σχεδιασμό της νέας γραμμής Μετρό εκτιμήθηκε απώλεια όγκου λόγω της διάνοιξης με το μηχάνημα ολομέτωπης κοπής της τάξεως του 0.6% έως 2% (για τις δυσμενέστερες περιοχές διάνοιξης).

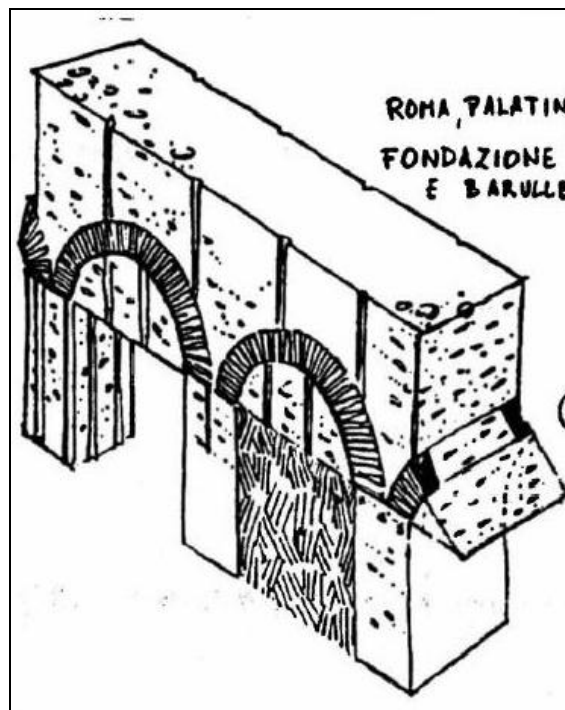
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της κατάστασης των κατασκευών στην περιοχή διάνοιξης.

Για την προστασία των κατασκευών και τον περιορισμό της εκδήλωσης των βλαβών, αποφασίστηκε ο περιορισμός των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, μεταξύ των κατηγοριών 0 και 2, σύμφωνα με την κατάταξη των Mair, Taylor και Burland.

Από την παραπάνω διερεύνηση διαπιστώθηκε η αναγκαιότητα λήψης μέτρων περιορισμού των αναμενόμενων παραμορφώσεων για την προστασία κατασκευών στην περιοχή του σταθμού της Piazza Bologna.

Οι κατασκευές στις οποίες κρίθηκε απαραίτητη η προστασία έναντι μετακινήσεων, ήταν κτίρια κυρίως από σπτοπλινθοδομή, αποτελούμενα το πολύ από δέκα ορόφους, που κατασκευάστηκαν μεταξύ του 1930 και 1946.

Ο τύπος θεμελίωσης των κτιρίων ποικίλει από ρηχές θεμελιώσεις έως βαθιές (μέχρι 15m), με το χαρακτηριστικό τύπο θεμελίωσης που χρησιμοποιείτο στη Ρώμη «rozzi e barulle» (Σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.7 Σχηματική απεικόνιση του τύπου θεμελίωσης «rozzi e barulle»

Ελέγχθηκαν όλα τα πιθανά μέτρα περιορισμού των αναμενόμενων παραμορφώσεων και αποφασίστηκε η εκτέλεση αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων με τη μέθοδο της εδαφικής διάρρηξης.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, για την προσομοίωση της ανταπόκρισης της κατασκευής κατά τις εργασίες διάνοιξης και τη θέσπιση επιτρεπτών ορίων παραμόρφωσης και στροφής.

Τα κτίρια στα οποία αποφασίστηκε να εκτελεστούν αντισταθμιστικές τσιμεντενέσεις ταξινομήθηκαν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τα επιτρεπτά όρια παραμόρφωσης που ορίστηκαν. Στην πρώτη κατηγορία ορίστηκε επιτρεπόμενη καθίζηση 15mm και στροφή 1/500, ενώ στην άλλη επιτρεπόμενη καθίζηση ήταν 10mm και στροφή 1/1000.

5.3.4 Δοκιμαστικές Ενεματώσεις σε Φυσική Κλίμακα

Για την επιτυχή εκτέλεση των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων πραγματοποιήθηκαν επί τόπου δοκιμαστικές δοκιμές ενεμάτωσης σε φυσική κλίμακα. Στόχος της εκτέλεσης των δοκιμαστικών τσιμεντενέσεων ήταν ο σχεδιασμός του τρόπου εγκατάστασης των βαλβιδωτών σωλήνων, ώστε να μην προκληθούν μετακινήσεις κατά την τοποθέτησή τους καθώς και ο καθορισμός των κατάλληλων παραμέτρων ενεμάτωσης.

Για τις ανάγκες της πραγματοποίησης της δοκιμής σε φυσική κλίμακα, κατασκευάστηκε στην περιοχή του έργου ένα πέδιλο διαστάσεων 2.2x2.2m², το οποίο θεμελιώθηκε σε εννέα πασσάλους διαμέτρου 600mm και μήκους 7.5m.

Από ένα φρέαρ διαμέτρου 3.5m, που διανοίχτηκε σε απόσταση 10m εγκαταστάθηκαν δύο σειρές βαλβιδωτών σωλήνων μήκους 28m.



Σχήμα 5.8 Άποψη του φρέατος για την εγκατάσταση σωλήνων για τη δοκιμαστική ενεμάτωση σε φυσική κλίμακα (C. Kummerer et al, 2011)

Μετά την ολοκλήρωση των φάσεων ενεμάτωσης, επετεύχθη συνολική ανύψωση 40mm. Από τις καταγραφές διαπιστώθηκε η σταθερότητα της ανύψωσης με το χρόνο και η μηδαμινή επίδραση της ενεμάτωσης στο ελεύθερο πεδίο (green field).

Τα αποτελέσματα της δοκιμαστικής ενεμάτωσης σε φυσική κλίμακα ήταν ικανοποιητικά και εκτιμήθηκε ότι θα έπρεπε να αντισταθμιστεί απώλεια όγκου ίση με 2% κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με ταχύτητα 14m/ημέρα.

5.3.5 Εκτέλεση Αντισταθμιστικών Τσιμεντενέσεων

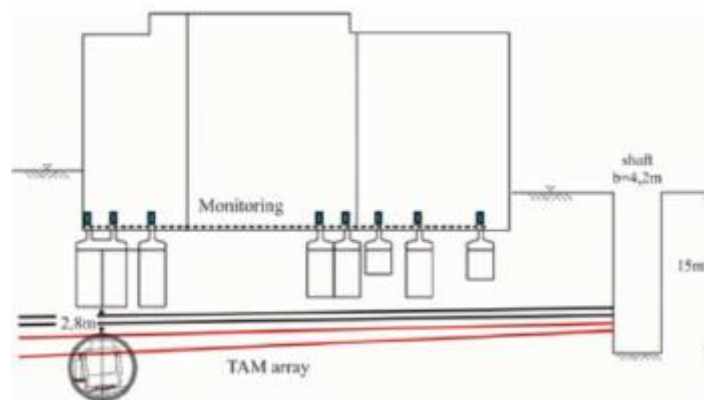
Για την εκτέλεση των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων εγκαταστάθηκαν δώδεκα μονάδες άντλησης ενέματος ικανές να εισπνέζουν ταυτοχρόνως 150l/min και διανοίχτηκαν οπές συνολικού μήκους 6700m. Η εγκατάσταση των σωλήνων ενεμάτωσης πραγματοποιήθηκε από τέσσερα φρέατα (Σχήμα 5.9).



Σχήμα 5.9 Κάτοψη του σχεδίου ενεμάτωσης για την προστασία των κτιρίων στο πλαίσιο κατασκευής της νέας γραμμής μετρό B1 (Καταγραφή εταιρείας Keller κατά την εκτέλεση των εργασιών ενεμάτωσης)

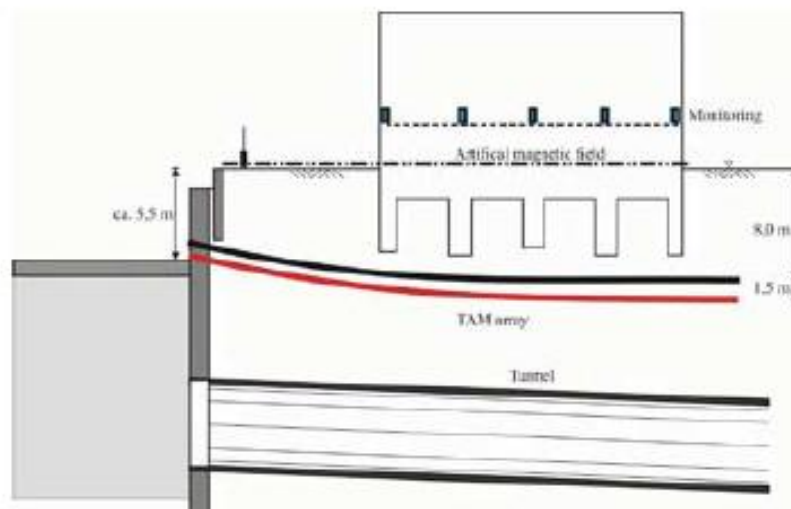
Στην πρώτη κατηγορία κτιρίων, οι μεταλλικοί βαλβιδωτοί σωλήνες εγκαταστάθηκαν υπό οριζόντια διεύθυνση σε δύο διαφορετικά επίπεδα.

Σε μια περιοχή, λόγω της διέλευσης του TBM σε απόσταση μικρότερη από 3.0m από τη θεμελίωση ενός κτιρίου, αποφασίστηκε η βελτίωση του σχηματισμού και στο πάνω τμήμα της σήραγγας. Για το λόγο αυτό προστέθηκαν δύο ακόμα επίπεδα ενεμάτωσης. Σε αυτό το ύψος, για την ενεμάτωση χρησιμοποιήθηκαν σωλήνες από fiber glass, για να είναι δυνατή η εκσκαφή του σχηματισμού κατά τη διέλευση του TBM. Σε ένα συγκεκριμένο κτίριο της περιοχής κρίθηκε αναγκαία η προσθήκη δύο ακόμα επιπέδων ενεμάτωσης (Σχήμα 5.10).



Σχήμα 5.10 Τυπική κατά μήκος τομή με μεταλλικούς σωλήνες ενεμάτωσης και σωλήνες από fiber glass (C. Kummerer et al, 2011)

Στην περιοχή του φρέατος εξόδου του TBM οι βαλβιδωτοί σωλήνες εγκαταστάθηκαν υπό κεκλιμένη διεύθυνση λόγω της γεωμετρίας του κτιρίου του σταθμού. Σε αυτή τη θέση εγκαταστάθηκαν 25 σωλήνες μέγιστου μήκους 40m (Σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.11 Εγκατάσταση σωλήνων ενεμάτωσης υπό κεκλιμένη διεύθυνση, στην περιοχή του φρέατος εξόδου του TBM (C. Kummerer et al, 2011)

Η παρακολούθηση των μετακινήσεων πραγματοποιήθηκε μέσω της εγκατάστασης υδραυλικού συστήματος μέτρησης καθιζήσεων-ανυψώσεων που περιελάμβανε 140 θέσεις μέτρησης. Επιπροσθέτως εγκαταστάθηκαν 9 κλισίμετρα. Όλα τα συστήματα καταγραφών συνδέθηκαν με Η/Υ για να είναι δυνατή η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο.

Η αξιολόγηση των καταγραφών κατά την εκτέλεση της ενεμάτωσης σε συνδυασμό με την παρακολούθηση των καταγραφών που πραγματοποιούνται στο TBM, κατέστησαν δυνατή την τροποποίηση του σχεδιασμού και των παραμέτρων ενεμάτωσης και όπου κρίθηκε απαραίτητο και των παραμέτρων λειτουργίας στο TBM.

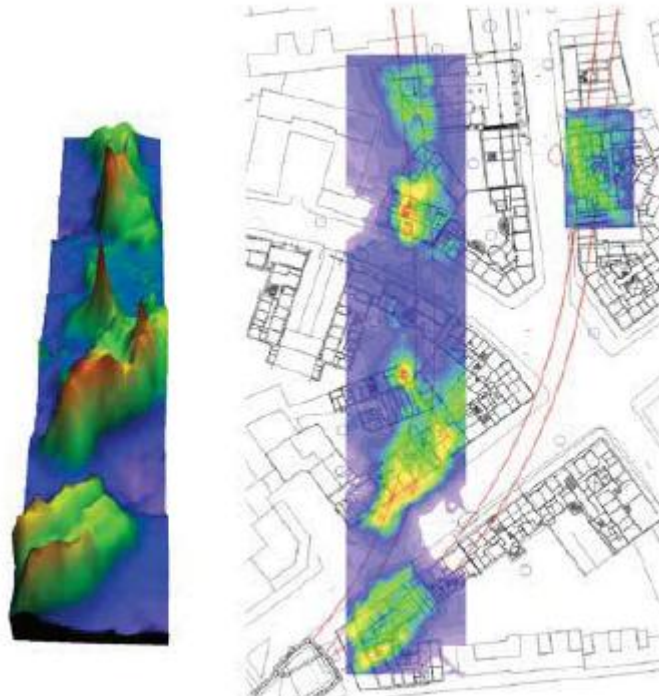
Στη φάση προ-ενεμάτωσης πραγματοποιήθηκε ανύψωση της τάξεως των 5mm και επετεύχθη αντιστάθμιση του 50% των αναμενόμενων καθιζήσεων. Η επιτυχής εφαρμογή της προ-ενεμάτωσης και η ελεγχόμενη προχώρηση της διάνοιξης με το TBM, οδήγησε σε περιορισμό των καθιζήσεων σε μεγέθη μικρότερα των 5mm.

Στο σύνολο των εργασιών, δεν σημειώθηκε καμιά καταγραφή καθιζήσεων πέραν των επιτρεπτών τιμών. Συνολικά εισπνέστηκαν περίπου 500m³ ενέματος.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται ενδεικτικά η ποσότητα ενέματος που εισπνέζονταν στα διαφορετικά στάδια ενεμάτωσης (ανά ημέρα), από τους βαλβιδωτούς σωλήνες που εγκαταστάθηκαν από το φρέαρ που διανοίχτηκε στην piazza Bologna. Ο συνολικός εισπνέζόμενος όγκος ενέματος σε εκείνη τη θέση ήταν 97.44m³.

Ημερήσια Καταγραφή	Όγκος ενέματος (l)
13/4/2010	2699
14/4/2010	10000
15/4/2010	8318
16/4/2010	5497
20/4/2010	3824
21/4/2010	8976
22/4/2010	8838
23/4/2010	9239
24/4/2010	8927
26/4/2010	7721
27/4/2010	9381
28/4/2010	5244
11/5/2010	3434
12/5/2010	5342

Σχήμα 5.12 Ημερήσιες καταγραφές του εισπνέζόμενου όγκου ενέματος από τους σωλήνες που εγκαταστάθηκαν από το φρέαρ στη θέση της piazza Bologna (Καταγραφή εταιρείας Keller κατά την εκτέλεση των εργασιών ενεμάτωσης)



Σχήμα 5.13 Συνολικά εισπνεζόμενος όγκος ενέματος(C. Kummerer et al, 2011)

5.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ SMART TUNNEL ΣΤΗΝ ΚΥΑΛΑ LUMBUR ΤΗΣ ΜΑΛΑΙΣΙΑΣ

5.4.1 Παρουσίαση Έργου

Η διάνοιξη της σήραγγας Smart Tunnel, εσωτερικής διαμέτρου 11.8m και μήκους 9.7km, στην Kuala Lumpur πραγματοποιήθηκε εξολοκλήρου σε ασβεστολιθικό σχηματισμό, ο οποίος κατά θέσεις εμφανιζόταν σπηλαιώδης και καρστικοποιημένος.

Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των εργασιών διάνοιξης του φρέατος εκκίνησης του TBM, σημειώθηκε εισροή υπόγειου νερού στην εκσκαφή, μεγαλύτερη της εκτιμώμενης.

Για τον περιορισμό της ποσότητας του νερού που εισρέει στις ανοιχτές εκσκαφές και τη βελτίωση του σχηματισμού υπεδάφους στις θέσεις κατά μήκος της χάραξης που αναμενόταν να διατηρηθεί σχηματισμός επιρρεπής στην εκδήλωση καθιζήσεων, σχεδιάστηκε ένα λεπτομερές πρόγραμμα ενεμάτωσης.

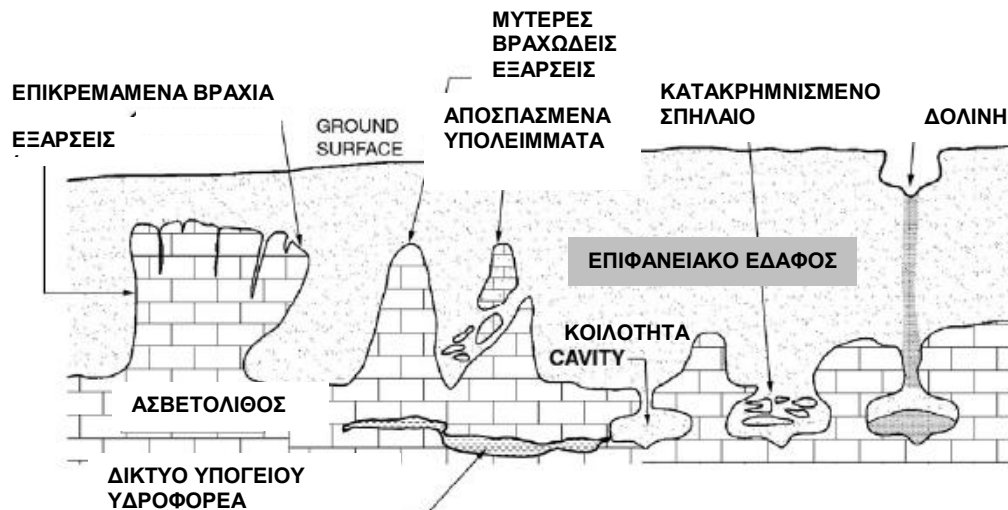
Το πρόγραμμα ενεμάτωσης περιελάμβανε την εφαρμογή ενός συνδυασμού διαφορετικών ειδικών τεχνικών ενεμάτωσης όπως είναι το jet grouting και η μέθοδος ενεμάτωσης υπό πίεση (compaction grouting).

5.4.2 Εδαφικές Συνθήκες

Σύμφωνα με τους Gobbert και Hutchinson (1973), η ενότητα των ασβεστολίθων της Kuala Lumpur αποτελείται από τεφρά έως λευκά λεπτοκρυσταλλικά

παχυστρωματώδη μάρμαρα της περιόδου του άνω Σιλούριου, και κατά θέσεις από δολομίτες.

Η καρστικοποίηση του σχηματισμού είναι έντονη από νερό που μεταφέρει ανθρακικά οξέα. Λόγω της προς τα κατόντη κίνησης του νερού ο ασβεστολιθικός σχηματισμός έχει διαβρωθεί επιφανειακά σχηματίζοντας βραχώδεις εξάρσεις διαφόρων σχημάτων και κοιλοτήτες.



Σχήμα 5.14 Εδαφικό Προφίλ της περιοχής διάνοιξης (V. Raju, I. Yee, 2006)

Η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιήθηκε σε βάθος 10 έως 16m από την επιφάνεια του σχηματισμού, σχεδόν εξολοκλήρου σε βραχώδη σχηματισμό. Στις θέσεις που συναντήθηκαν κοιλοτήτες ή ο σχηματισμός εμφανιζόταν κερματισμένος υπήρχε κίνδυνος εκδήλωσης σημαντικών παραμορφώσεων και αστοχιών τύπου καμινάδας.

5.4.3 Εφαρμογή Ενεμάτωσης υπό Πίεση

Η μέθοδος ενεμάτωσης υπό πίεση (Κεφάλαιο 3) εφαρμόστηκε για την πλήρωση κενών του σχηματισμού καθώς και για τη συμπύκνωση χαλαρών σχηματισμών πάνω από τη στέψη της σήραγγας, με απώτερο στόχο τον περιορισμό των αναμενόμενων καθιζήσεων στο σχηματισμό (στην επιφάνεια του εδάφους) και στις γειτονικές κατασκευές, λόγω της διάνοιξης της σήραγγας.



Σχήμα 5.15 Εφαρμογή ενεμάτωσης υπό πίεση κάτω από το σιδηρόδρομο για περιορισμό των καθιζήσεων (V. Raju, I. Yee, 2006)

Ανάλογα με τις συνθήκες του σχηματισμού στην περιοχή εφαρμογής, τον απαιτούμενο ρυθμό μετατόπισης και την επιδιωκόμενη συμπύκνωση, η απόσταση μεταξύ των οπών ενεμάτωσης κυμάνθηκε από 2 έως 3m.

Η ενεμάτωση πραγματοποιήθηκε σε ανιόντα στάδια των 0.5m. Εξαίρεση αποτέλεσαν οι περιοχές που απαιτήθηκε η βελτίωση επιφανειακών σχηματισμών καθώς και οι περιοχές στις οποίες εκτιμήθηκε ότι οι υπερκείμενες κατασκευές ήταν πολύ ευαίσθητες στις μετακινήσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις η ενεμάτωση πραγματοποιήθηκε σε κατιόντα στάδια.

Η τάση εισπίεσης του ενέματος κυμάνθηκε μεταξύ 10 και 20bar και ο ρυθμός εισπίεσης από 50 έως 100l/min. Χαμηλοί ρυθμοί εισπίεσης επιλέχθηκαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου σε σχηματισμούς με σχετικά χαμηλή διαπερατότητα. Οι υψηλότεροι ρυθμοί εφαρμόστηκαν για την πλήρωση των κενών του σχηματισμού (σπηλαίων) καθώς και για τη βελτίωση επικίνδυνων σε αστοχία εδαφών.

Ο όγκος του εισπνεζόμενου ενέματος ήταν διαφορετικός σε κάθε περίπτωση εφαρμογής και ανάλογος με τις συνθήκες του σχηματισμού στην περιοχή εφαρμογής, τον απαιτούμενο ρυθμό μετατόπισης και την επιδιωκόμενη συμπύκνωση.

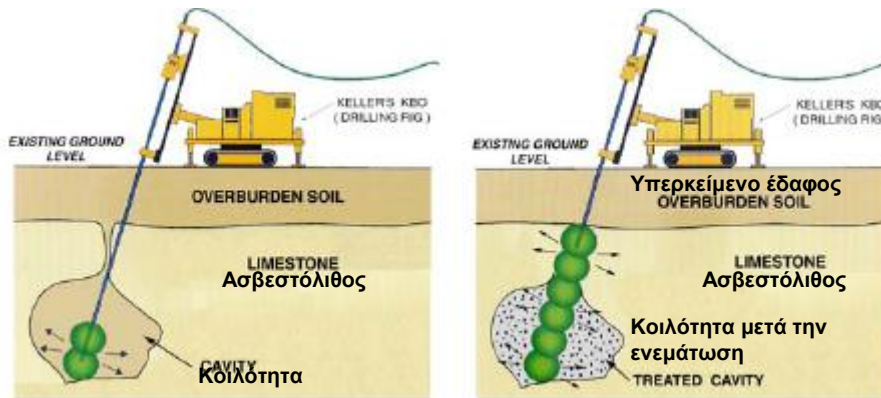
Ως κριτήρια τερματισμού του κάθε σταδίου ενεμάτωσης τέθηκαν τα ακόλουθα τρία:

- Ανύψωση της επιφάνειας του σχηματισμού πάνω από ένα όριο.
- Διακοπή της ροής του ενέματος υπό προκαθορισμένη τάση εισπίεσης (π.χ. ίση με το άθροισμα της γεωστατικής τάσης και των απωλειών κατά τη ροή του ενέματος συν 5 έως 10bar).
- Εισπίεση όγκου ενέματος μεγαλύτερη από την προκαθορισμένη ποσότητα.

▪ Πλήρωση Κενών

Τα περισσότερα κενά (κοιλότητες, σπήλαια, δολίνες, έγκοιλα) που απαντήθηκαν στο σχηματισμό ήταν πληρωμένα με πολύ χαλαρό εδαφικό υλικό.

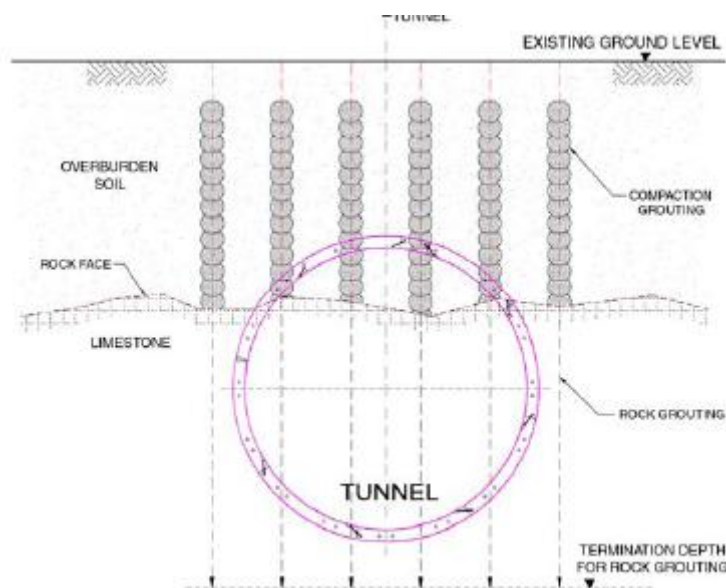
Στη θέση εισπίεσης λόγω της χρήσης πολύ πυκνού ενέματος με υψηλό ιξώδες σχηματιζόταν ένας βολβός ενέματος που οδηγούσε στη συμπύκνωση του χαλαρού εδάφους πλήρωσης και στη σταθεροποίηση της κοιλότητας.



Σχήμα 5.16 Σχηματική απεικόνιση της πλήρωσης κοιλότητας (V. Raju, I. Yee, 2006)

▪ Συμπύκνωση υπερκείμενου εδάφους

Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε ευρέως για τον περιορισμό εμφάνισης δολίνων, συμπυκνώνοντας το χαλαρό εδαφικό σχηματισμό μέσω της εισπίεσης ενέματος σε διαφορετικά στάδια και θέσεις, σχηματίζοντας καθ' ύψος στήλες ενέματος στοιχείων με μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα.



Σχήμα 5.17 Εφαρμογή αντισταθμιστικών τσιμεντένεσων με τη μέθοδο ενεμάτωσης υπό πίεση κατά την κατασκευή του Smart Tunnel (V. Raju, I. Yee, 2006)

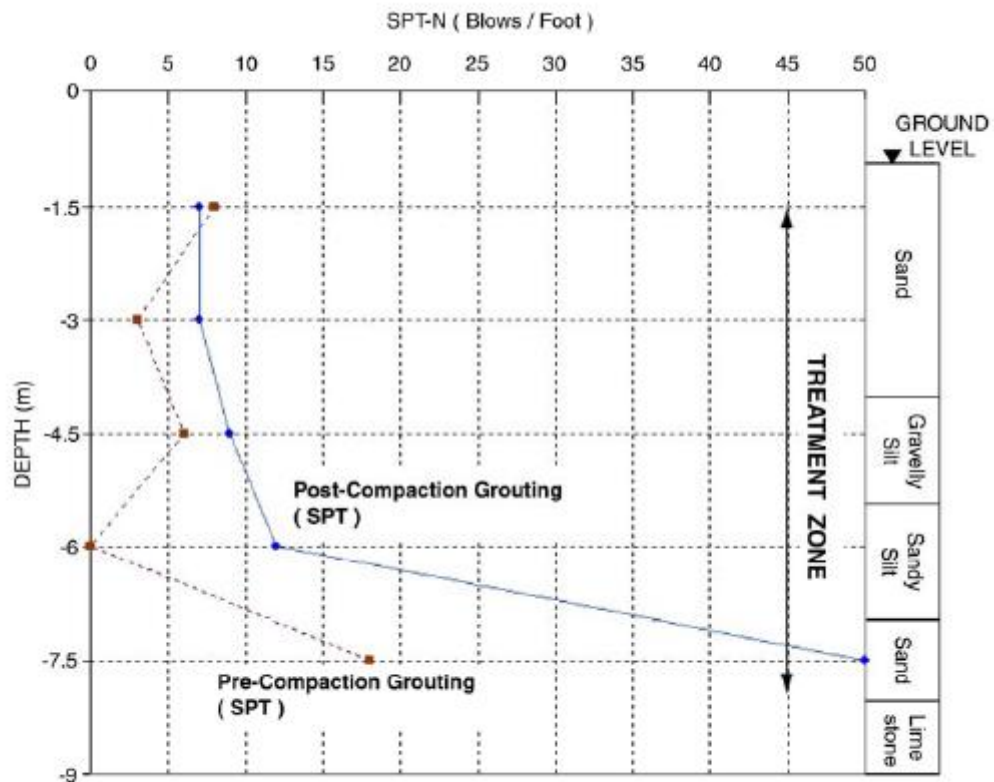
5.4.4 Ποιοτικός Έλεγχος

Κατά τη διάνοιξη των οπών εγκατάστασης των σωλήνων ενεμάτωσης και κατά την εκτέλεση του προγράμματος ενεμάτωσης καταγράφονταν οι παράμετροι διάνοιξης και ενεμάτωσης αντίστοιχα.

Συγχρόνως καταγράφονταν οι μετακινήσεις της επιφάνειας του σχηματισμού (ανύψωση) για αποφυγή εκδήλωσης ανύψωσης πέραν της επιθυμητής, καθώς θα οδηγούσε σε σημαντικές βλάβες στις υπερκείμενες κατασκευές.

Για τον έλεγχο της επίτευξης της επιθυμητής συμπύκνωσης πραγματοποιήθηκαν δοκιμές πρότυπης διείδυσης SPT, στον αρχικό σχηματισμό και στο σχηματισμό μετά την ολοκλήρωση της ενεμάτωσης.

Στους ιλυώδεις και στους αμώδεις σχηματισμούς η εφαρμογή της ενεμάτωσης επέφερε αύξηση 5 έως 10 κρούσεων/ft (N) και οδήγησε σε μέσης πυκνότητας σχηματισμούς (έναντι της αρχικής χαλαρής τους κατάστασης).



Σχήμα 5.18 Τυπικά αποτελέσματα δοκιμής πρότυπης διείδυσης πριν και μετά την εκτέλεση ενεμάτωσης υπό πίεση στην Kuala Lumpur κατά τη διάνοιξη της σήραγγας Smart Tunnel (V. Raju, I. Yee, 2006)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια λόγω της ανάπτυξης των αστικών κέντρων έχει κριθεί αναγκαία η επέκταση των υφιστάμενων και η κατασκευή νέων υπόγειων δικτύων συγκοινωνίας σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους.

Κατά την πραγματοποίηση των εκσκαφών διάνοιξης των σηράγγων και των υπόγειων σταθμών προκαλούνται παραμορφώσεις στο περιβάλλον έδαφος και κατά συνέπεια και στις κατασκευές που βρίσκονται στη ζώνη επιρροής τους. Σε ορισμένες περιπτώσεις διανοίγονται σήραγγες κάτω από παλαιά κτίρια των ιστορικών κέντρων των πόλεων ή σε κτίρια με σημαντική δημόσια λειτουργία. Συνεπώς οι ανοχές στις προκαλούμενες παραμορφώσεις είναι συχνά πολύ μικρές. Φυσικά ανάγκη προστασίας έναντι εκδήλωσης ανεπιθύμητων παραμορφώσεων υπάρχει συχνά και σε συνήθη κτίρια (κατοικίες, εργασιακοί χώροι κ.α.).

Προκειμένου να μειωθούν οι συνέπειες της διάνοιξης της σήραγγας σε κατασκευές που κρίνονται ευαίσθητες στις αναπτυσσόμενες μετακινήσεις, λαμβάνονται ειδικά μέτρα περιορισμού των αναμενόμενων καθιζήσεων (ολικών ή διαφορικών).

Η εφαρμογή των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων σε συνδυασμό με τα προηγμένα συστήματα καταγραφών που έχουν αναπτυχθεί, αποτελεί ένα σύγχρονο μέτρο προστασίας των κατασκευών έναντι ανάπτυξης ανεπιθύμητων καθιζήσεων.

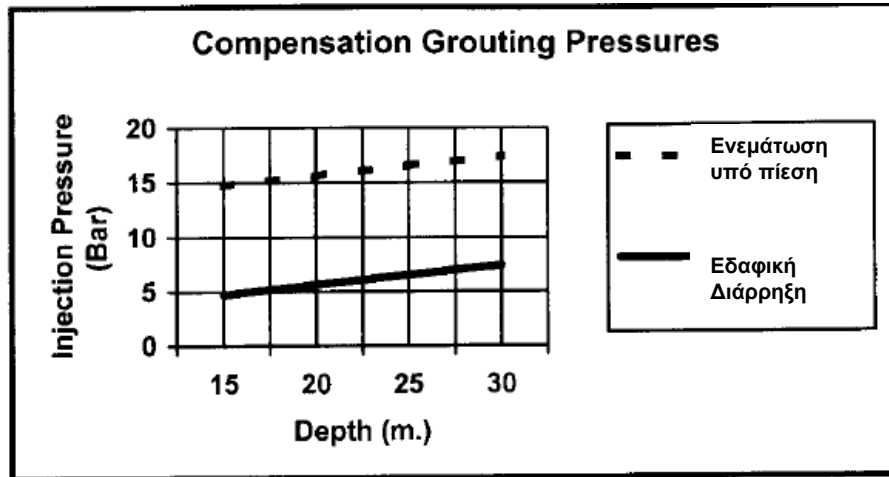
Τα τελευταία χρόνια έχει εφαρμοστεί σε πολύ σημαντικά έργα, όπως είναι η προστασία του πύργου του Big Ben κατά την κατασκευή της επέκτασης της γραμμής Μετρό Jubilee line στο Λονδίνο, η προστασία πολλών κατασκευών κατά τη διάνοιξη του μετρό της Λισαβόνας, η προστασία πολλών κατασκευών καθώς και μιας ιστορικής γέφυρας κατά την κατασκευή των νέων γραμμών Μετρό Β1 και C στη Ρώμη.

6.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΤΙΚΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΕΣΕΩΝ

Διακρίνονται δύο μέθοδοι εκτέλεσης αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων, η μέθοδος της εδαφικής διάρρηξης και η μέθοδος ενεμάτωσης υπό πίεση.

Οι μέθοδοι περιγράφονται αναλυτικά στα κεφάλαια 2 και 3, ενώ ακολούθως παρουσιάζονται οι βασικές αρχές και οι διαφορές τους.

- Η μέθοδος της εδαφικής διάρρηξης βασίζεται στη δημιουργία και διάδοση ρωγμών εντός του εδαφικού σχηματισμού μέσω της εισπίεσης ενέματος, με στόχο τη δημιουργία ενός σκελετού αποτελούμενου από φλέβες ενέματος και έδαφος. Καθώς συνεχίζεται η διαδικασία ενεμάτωσης, ο σκελετός συμπιέζει το περιβάλλον έδαφος και προκαλεί ανύψωση του υπερκείμενου εδάφους και της κατασκευής.
- Η μέθοδος της ενεμάτωσης υπό πίεση βασίζεται στην εισπίεση ενέματος υψηλού ιξώδους εντός του εδαφικού σκελετού. Τα χαρακτηριστικά του ενέματος επιλέγονται κατάλληλα, ούτως ώστε κατά την εισπίεση το ένεμα να μη διεισδύει στο σχηματισμό, αλλά να σχηματίζει μια ομοιογενή μάζα. Κατά την τυπική εφαρμογή της μεθόδου εισπιέζεται ένεμα σε διαδοχικές θέσεις κατά ανιόντα στάδια, σχηματίζοντας στήλες αποτελούμενες από βολβούς ενέματος. Λόγω της διαστολής της μάζας του ενέματος επιβάλλονται τάσεις στον υπό βελτίωση σχηματισμό, με αποτέλεσμα να τον συμπυκνώνουν και να προκαλούν ανύψωση.
- Στην πράξη προτιμάται η εφαρμογή της μεθόδου της εδαφικής διάρρηξης σε συνεκτικούς σχηματισμούς, ενώ η μέθοδος της ενεμάτωσης υπό πίεση βρίσκει συχνότερα εφαρμογή σε κοκκώδη εδάφη.
- Η απαιτούμενη τάση εισπίεσης είναι σημαντικά μικρότερη στη μέθοδο της εδαφικής διάρρηξης συγκριτικά με τη μέθοδο ενεμάτωσης υπό πίεση. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ενδεικτικά η απαιτούμενη τάση εισπίεσης για τις δύο μεθόδους σε σχέση με το βάθος που απαντάται ο υπό βελτίωση σχηματισμός.



Σχήμα 6.1 Σύγκριση της απαιτούμενης τάσης εισπίεσης των δύο μεθόδων εκτέλεσης αντισταθμιστικώντσιμεντενέσεων (R. Essler, E. Droof, E. Falk, (2000))

- Ο βαθμός αποτελεσματικότητας της μεθόδου (n), που ορίζεται ως το πηλίκο του όγκου ανύψωσης $V_h(m^3)$ προς την ποσότητα του ενέματος $\Delta V_o(m^3)$ που εισπίεστηκε σε συγκεκριμένο όγκο εδάφους V_o , είναι μικρότερος της μονάδας και γενικά είναι σχετικά χαμηλός.

Ο βαθμός αποτελεσματικότητας δεν παραμένει σταθερός κατά τη διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου. Συνήθως όσο εξελίσσεται η διαδικασία ενεμάτωσης και αυξάνεται ο όγκος του εισπιεζόμενου ενέματος παρουσιάζει αύξηση.

Στις περιπτώσεις στις οποίες κατά την εισπίεση του ενέματος αναπτύσσεται σημαντική υπερπίεση πόρων, ο βαθμός αποτελεσματικότητας της εφαρμογής μειώνεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου λόγω ανάπτυξης μακροχρόνιων καθιζήσεων
- Ο μηχανισμός διάνοιξης των ρωγματώσεων στη μέθοδο της εδαφικής διάρρηξης είναι πολύπλοκος και αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης πολλών ερευνητών. Για τη διάδοση της ρωγμάτωσης με κατά το δυνατόν ελεγχόμενο τρόπο, περιορίζονται οι εισπιεζόμενες ποσότητες ενέματος.

Αντίθετα κατά την εκτέλεση της μεθόδου ενεμάτωσης υπό πίεση υπάρχει δυνατότητα καλύτερου ελέγχου της διαδικασίας ενεμάτωσης.
- Η τεχνολογία των βαλβιδωτών σωλήνων που χρησιμοποιείται στη μέθοδο της εδαφικής διάρρηξης επιτρέπει την επαναλαμβανόμενη εισπίεση ενέματος από την ίδια θέση εισπίεσης, εφόσον απαιτείται.

Στη μέθοδο ενεμάτωσης υπό πίεση δεν συνιστάτε η επαναλαμβανομένη εισπίεση καθώς οι σωλήνες ενεμάτωσης δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκ νέου και απαιτείται επαναδιάτρηση.

- Στις χώρες της Ευρώπης προτιμάται η εφαρμογή της μεθόδου της εδαφικής διάρρηξης, ενώ η μέθοδος της ενεμάτωσης υπό πίεση είναι πιο διαδεδομένη στην Αμερική.

6.3 ΣΥΝΕΧΙΣΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ-ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Ο ακριβής μηχανισμός που λαμβάνει χώρα κατά την ενεμάτωση (διαστολή του βολβού ενέματος, δημιουργία και διάδοση της ρωγμάτωσης) δεν είναι απολύτως κατανοητός καθώς υπεισέρχονται πάρα πολλοί παράγοντες κατά την εφαρμογή. Συνεπώς τα διαθέσιμα στοιχεία στη βιβλιογραφία αναφορικά με τις μεθόδους εκτίμησης των παραμέτρων σχεδιασμού είναι περιορισμένα.

Ο σχεδιασμός και η εφαρμογή της μεθόδου βασίζεται κυρίως σε εμπειρικές σχέσεις και μεθόδους, καθώς και στην εμπειρία από προηγούμενα έργα, ενώ τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Κεφ. 4).

Καθώς η μέθοδος των αντισταθμιστικών τσιμεντενέσεων εφαρμόζεται με επιτυχία για τον περιορισμό των αναπτυσσόμενων καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη σηράγγων, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την προστασία του πύργου του Big Ben κατά τη διάνοιξη της γραμμής Μετρό Jubilee line στο Λονδίνο, κρίνεται απαραίτητη η συνέχιση της έρευνας σε ότι αφορά το μηχανισμό λειτουργίας τους και τον καθορισμό κατάλληλων αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης.

Η ανάπτυξη πληρέστερων μεθόδων προσδιορισμού των παραμέτρων ενεμάτωσης και η πληρέστερη προσομοίωση του προβλήματος θα οδηγήσει σε αύξηση του βαθμού αποτελεσματικότητας της μεθόδου και στην τεχνικοοικονομική βελτίωση της εφαρμογής.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- (1) Aoyagi T. (1995), Representing Settlement for Soft Ground Tunneling, Thesis (M.Sc.), Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Civil and Environmental Engineering
- (2) Arslan U., Krajeewski W., Ripper P. (2005), Advanced grouting techniques for tunnel constructions under sensitive buildings, *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future*-Erdem & Solak (eds), 2005 Taylor & Francis Group, London
- (3) Au S. K., Jafari M.R, Soga K., Bolton M.D, Karim .F, Komiya K. (2000), Experimental and Numerical Investigation of Compensation Grouting In Clay. *Proc. of GeoEng 2000*, Melbourne
- (4) Ameratunga J., Nadarajah P., Effects of Tunneling in Soft Ground and Assessment of building damage, *Coffey Geotechnics* (presentation)
- (5) Au S.K.A., Soga K., Jafari M. R., Bolton M. D., Komiya K., (2003), Factors Affecting Long-Term Efficiency of Compensation, Grouting in clays, *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 129/254 (2003)
- (6) Augarde C.E., Burd H.J., Housby G.T (1995), A three-dimensional finite element model of tunnelling, *Numerical Models in Geomechanics*, Proc. NUMOG V, pp. 457-462
- (7) Augarde C.E., Burd H.J., Housby G.T (1998), Some Experiences of modeling tunneling in soft ground using three-dimensional finite elements, *Proceedings on the 4th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, pp. 603-612
- (8) Aye Z., Karki D.& Schulz C. (2006), Ground Movement Prediction and Building Damage Risk-Assessment for the Deep Excavations and Tunneling Works in Bangkok Subsoil, *International Symposium on Underground Excavation and Tunneling Bangkok, Thailand*, pp. 281-297
- (9) Baker A., Broadrick R. (1997), Compaction Grouting: "A Twenty Year Update and a Vision for the 21st Century", 1997 ASCE Florida Annual Meeting
- (10) Bezuijen A. (2010), Compensation Grouting in Sand: Experiments, Field Experiences and Mechanisms, PhD Thesis, Delft University
- (11) Bezuijen A., Wilson A., Masini L., Sanders M. (2008), Laboratory Tests On Compensation Grouting - The Influence of the Installation, in *ITA* (2008)
- (12) Bloodworth A.G., Housby G.T (2000), Three Dimensional Analysis of Building Settlement Caused by Shaft Construction, *Proceedings of the International Symposium. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground* Rotterdam, NL, Taylor & Francis, pp. 607-612
- (13) Bolton M.D., Chin C.Y., Lu Y.C (1994), Compensation Grouting, Centrifuge, 94, Leung, Lee & Tan(eds),

- (14) Bolton M.D., Lu Y.C & Sharma J.S (1996), Centrifuge Models of Tunnel Construction and Compensation Grouting, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Mair & Taylor(eds)
- (15) Burland J. (2002), A tale of two towers: Big Ben and Pisa, The Royal Academy of Engineering and The Royal Society of Edinburgh, February 2002 Joint Lecture
- (16) Chambosse G. & Otterbein R. (2002), State of the Art of Compensation Grouting in Germany, XVth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul, Technical paper 61-61E
- (17) Chambosse G. & Otterbein R. (2001), Central Station Antwerp, Compensation Grouting Under High Loaded Foundations, Response of Building to Excavation-Induced Ground Movements, Imperial College, London 17th-18th July 2001, Technical Paper 61-56E
- (18) Chan M. P. (2005), Analysis and Modeling of Grouting and its Application In Civil Engineering, Bachelor Thesis, University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying
- (19) Cheong M.T., Au S.K.A, Soga K., Mair R.J., I Bolton M.D., Fundamental Study of Compensation Grouting in Clay, University of Cambridge, Department of Engineering, http://www-civ.eng.cam.ac.uk/geotech_new/posters/meicheong.gr
- (20) Dazhi W., Building Damage Assessment
http://www.geoss.sg/documents/seminar/GeoSSEventSeminar10Nov2009_slides.pdf
- (21) Darby A., Wilson R. (2006), Design Of The Smart Project, Kuala Lumpur, Malaysia, International Conference and Exhibition on Tunneling Trenchless Technology, 7-9 March 2006, Selangor, Malaysia
- (22) Dekker H., Otterbein R. (2000), First Results after Injection and Pipe Driving Works at the Central Station of Antwerp, Studienammiddag, 23-11-2000, Antwerpen, Technical Paper 61-59E
- (23) Essler R. D., Drooff E. R., Falk E. (2000), Compensation Grouting, concept, theory and practice, ASCE Geotechnical Special Publication No 104, pp. 1-15, Reston VA: American Society of Civil Engineers
- (24) Falk E., (1997), Underground works in Urban Environment, XIVth International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering, Technical paper 61-54E.
- (25) Franzius J.N., Schroeder F.C, Grammatikopoulou A., Cabarkapa Z., Higgins K.G., Potts D.M. (2007), Comparison Of Different Approaches To Model Compensation Grouting, Proc. 10th Int. Conf on Numerical Modeling in Geomechanics-NUMOG X, Rhodes (eds G. N. Pande & S. Pietruszczak), Taylor and Francis Group, pp. 359-364
- (26) Gens A. (2007), Settlement compensation by grouting in urban areas, (Discussion Leader), XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
- (27) Giardina G, Max A.N. Hendriks, Rots Jan G. (2008), Numerical Analyses of tunnel-induced settlement damage to a Masonry Wall, 7th fib PhD Symposium in Stuttgart, Germany, 11-13 September 2008
- (28) Haimoni A M, Wright R.H (1999) , Protection of Big Ben Using Compensation Grouting, Ground Engineering Vol.32, No.8, August, pp. 33-37

- (29) Harris D. (2001), Protective Measures, Chapter 11 in Building Response to Tunnelling, Volume 1 Projects and Methods (Eds Burland et al) Thomas Telford
- (30) Houlsby G.T., Burd H.J., Augarde C.E. (1999), Analysis of tunnel-induced settlement damage to surface structures, XII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam, 7-10 June, Vol. 1, pp. 147-152
- (31) Jakobs M., Kummerer C, The Application of a Hydrostatic Leveling System under Extreme Temperature Conditions for the Control of a Protective Measure for the Tunneling under a Railway Bridge in Italy, Ge Tec, Brochure GT 06-12 E.
- (32) Keller Company, Settlement Compensation for the Central Station Antwerp, Stabilisation of an Historical Building (2000), Site Report 61-29E
- (33) Keller Company, Compaction Grouting, Brochure 66-01E
- (34) Keller Company, The Soilfrac Process, Brochure 61- 02 E.
- (35) Klados G., Kok Y.H (2004), Selection and Performance of TBM In Karstic Limestone SMART case, Internation Congress on Mechanized Tunnelling "Challenging Case Histories", Torino, No.67
- (36) Kleinlugtenbelt R. (2005), Compensation Grouting Experiments in Sand, M. Sc. Thesis, Delft University of Technology, Faculty Civil Engineering and Geosciences
- (37) Knitsch H. (2008), Visualization of Relevant Data for Compensation Grouting, Artikel aus der Zeitschrift: Tunnel 3/2008, Technical Paper GT 08-20D/E
- (38) Komiya K., Soga K., Akagi H., Jafari M.R., Bolton M.D., (2001), Soil consolidation associated with grouting during shield tunneling in soft clayey ground, Geotechnique 51, No 10, pp. 835-846
- (39) Konstantakos D. ,Whittle J.A. , Regalado C, Bernhard (2004), Control of Ground Movements for a Multi-level-anchored Diaphragm Wall During Excavation, Proc. Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, New York, April 13-17 2004, Paper No. 5.68
- (40) Kummerer C., Thurner R., Rigazio A., Zamagni A. (2007), Compensation grouting for limiting settlements of two railway bridges induced by a twin-tunnel excavation, Proc. 14th Eur. Conf. Soil Mech. Geotech. Engng, Madrid
- (41) Kummerer C., Helmut F. Schweiger , Otterbein R., Watt A. (2001), Numerical Modelling of the Effects of Compensation Grouting Fundamental Investigations And Case Study, Institute for Soil Mechanics And Foundation Engineering Graz university of Technology
- (42) Kummerer C., Schweiger H., Otterbein R., (2003), Active Settlement Control with Compensation Grouting - Results From A Case Study, Proc. of 3rd International Specialty Conference on Grouting and Ground Treatment pp. 813-823
- (43) Kummerer C., Falk E., Sciotti A., Saggio G., Compensation Grouting and Deep Sealing Slabs for the Construction of the New Metro Line B1 in Rome, Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 1497-1502
- (44) Lee S.W, Bolton M.D., Mair R.J., Soga K., Dasari G.R., Hagiwara T.(2001), Centrifuge and numerical modeling of compensation grouting near tunnel linings, International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul

- (45) Lee S.W., Dasari G.R., Mair R.J., Bolton M.D., Soga K., Sugiyama T., Ano Y., Hagiwara T., Nomoto M. (1999), The effects of compensation grouting on segmented tunnel linings, Proceedings of International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Tokyo, 217-222, Japanese Geotechnical Society
- (46) Mair R. J., Harris D.(2001), Innovating Engineering To Control Big Ben's Tilt, *Ingenia* 9, August 23-27
- (47) Mair R.J., Viggiani G., Menkiti C.O. (2009), Reduction and Control of Surface Settlement Induced by Shallow and Deep Excavations, Conference on Risk Mitigation by Soil Improvement and Reinforcement XXII, Conferenze di Geotecnica di Torino, November 2009
- (48) Mair W. (2011), Tunneling In Urban Areas And Effects On Infrastructure – Advances in research and practice, Muir Wood Lecture 2011
- (49) Moseley M.P.& Kirsch K., Ground Improvement, 2nd edition, Taylor & Francis Harris D. I. (2001), Protective measure, Chapter 11 in Building Response to Tunneling. Volume 1 Projects and Methods. (Eds Burland et al) Thomas Telford
- (50) Ni J., Cheng W.C. (2009), Grout Efficiency of Lifting Structure in Soft Clay, Proc. of the 2009 GeoHunan International Conference on Challenges and Recent Advance in Pavement Technologies and Transportation Geotechnics, pp. 1-8
- (51) Pedro S., Kummerer C., Bezuijen A. (2007), Settlement compensation by grouting, XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid 2007
- (52) Raju V.R., Yee I. (2006), Grouting in Limestone for Smart Tunnel Project in Kuala Lumpur, Malaysia, Internation Conference and Exhibition on Tunneling and Trenchless Technology, Kuala Lumpur, Malaysia, Technical Paper 60-53E
- (53) Schweiger H.F., Soft Clay Modelling for Engineering Practice SCMEP, Presentation of the Research Training Network, <http://scmep.civil.gla.ac.uk/>
- (54) Soga K., Bolton M.D., Au S.W.K.A., Komiya K., Hamelin A., Van Cotthem A., Buchet G., Michel J.P. (1999), Development of compensation grouting modelling and control system, Proceedings of International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Tokyo, pp. 405-410, Japanese Geotechnical Society
- (55) Sola P., Ground and Structure Movements during the pre-treatment phase in Compensation Grouting
- (56) Sugiyama T, Nomoto M., Ano Y., Nomoto T., Hagiwara T., Mair R. J., Bolton M.D. Soga K. (2000), Compensation grouting at the Docklands Light Railway Lewisham Extension Project, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Kusakabe
- (57) Suthersan S. (1999), Hydraulic And Pneumatic Fracturing, Remediation engineering : design concepts Ed. Suthan S. Suthersan Boca Raton: CRC Press LLC
- (58) Vahdatirad M. J., Ghodrati H., Firouzian S., Barari A. (2010), Analysis of an underground structure settlement risk due to tunneling- A case study from Tabriz, Iran, Journal: Songklanakarin Journal of Science and Technology, Volume: 32, Issue: 2; Start page: 145

- (59) Vesic, A.S., (1972), Expansion Of Cavities In Infinite Soil Mass, Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, vol.98, No SM3, pp.265-290.
- (60) Wang S., Luna R. & Yang J., The Influence of Tunnel Construction on the Performance of Shallow Foundation Bridge,
http://utc.mst.edu/documents/ShuyingWang_TunnelConference.pdf
- (61) Wang S.Y., Chan D.H, Lam K.C., AU S.K.A. (2010), Numerical and Experimental Studies of Pressure-Controlled Cavity Expansion in Completely Decomposed Granite Soils of Hong Kong, Computers and Geotechnics, 37:977-990
- (62) Wang S.Y., Sun L., Au A.S.K., Yang T.H., Tang C.A. (2009), 2D-numerical analysis of hydraulic fracturing in heterogenous geo-materials, Journal: Construction and Building Materials 23 (2009) 2196-2206
- (63) Williams M., Nobes C. (2007), Soilfrac Compensation Grouting for Building Protection on the New MetroRail City Project
- (64) Wong L.W., Chen H.T. (1997), Fracture Grouting for Correcting Building Settlement, Proc. of 2nd second international symposium on structures and foundations in Civil Engineering, Hong Kong, China, 7-10 January, pp. 275-280
- (65) Wong L.W., Shau M.C., Chen H.T. (1996), Compaction Grouting for Correcting Building Settlement, Proc. of IS-Tokyo '96 , The 2nd Int. Conf. on Grouting and Deep Mixing 1996, Balkema, Rotterdam, pp.231-236
- (66) Wu J., Numerical Modeling the Behavior of Ground Improvement in Soft Clay, Department of Civil Engineering Informatics Chung Hua University, No 707, Sec. 2
- (67) Ενημερωτικό Υλικό της Εταιρείας Keller, <http://www.kellergrundbau.com/>
- (68) Ενημερωτικό Υλικό της Εταιρείας Hayward Baker, <http://www.haywardbaker.com/>
- (69) Ενημερωτικό Υλικό της Εταιρείας ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε., <http://www.elebor.gr>
- (70) Καββαδάς Μ., Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων (Κεφ.5), Έκδοση Ε.Μ.Πολυτεχνείου, 2005
- (71) Καψαμπέλη Α. Σ., Σακελλαρίου Μ. Γ. (2005), Αλληλεπίδραση μεταξύ Αβαθών Σηράγγων και Κτηρίων. Παραμετρική Διερεύνηση, 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας
- (72) Παναγιωτίδης Θ. (2009), Νέες Τεχνικές Ενεμάτων σε Υπόγειες Κατασκευές – Οικονομία Κόστους και Χρόνου σε Δύσκολες Συνθήκες, 16^ο Συνέδριο Σκυροδέματος
- (73) Προσωρινές Εθνικές Προδιαγραφές, ΠΕΤΕΠ 11-03-05-00, Έκδοση 1.0-Μάιος 2006
- (74) Ρόζος Δ., Εγχειρίδιο Τεχνικής Γεωλογίας, Διάλεξη 7
- (75) Σαββίδης Σ.Α., Kirsch F., Παπαδάκος Γ.Σ., Ειδικά Γεωτεχνικά Προβλήματα κατά την Κατασκευή Σηράγγων εντός Αστικών Περιοχών, 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, pp. 489-496