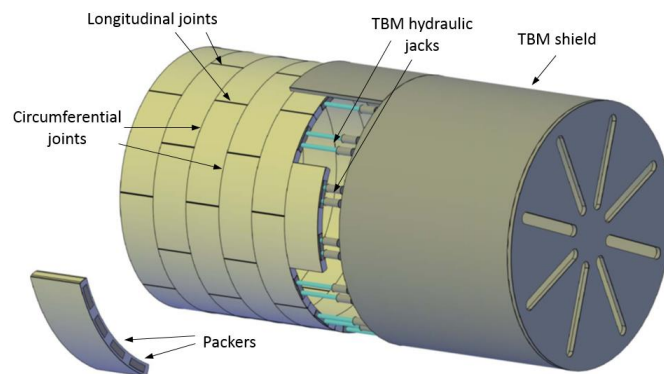
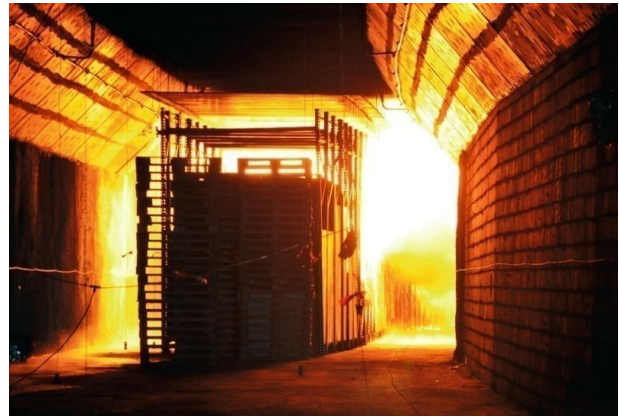


# Μέτρα Στήριξης Σηράγγων

Αλέξανδρος Ι Σοφιανός



ΕΜΠ, Φεβρουάριος 2018

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Ι ΣΟΦΙΑΝΟΣ  
Καθηγητής ΕΜΠ

# *Μέτρα Στήριξης Σηράγγων*

**Ε.Μ.Π**

# Μέτρα Στήριξης Σηράγγων

## Συγγραφή

Αλέξανδρος Ι Σοφιανός

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου

Στα παιδιά μου

Φωτογραφίες εξωφύλλου: Μέτρα στήριξης και ο κίνδυνος από πυρκαγιά

## Περιεχόμενα

Αλέξανδρος Ι Σοφιανός.....	1
ΕΜΠ, Φεβρουάριος 2018 .....	1
Περιεχόμενα.....	v
Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνύμια .....	xii
Πρόλογος.....	xiii
.....	xiii
Εισαγωγή .....	1
Γενικά .....	1
Γνώση της περιβάλλουσας γεωμάζας.....	1
Αποτελέσματα της διάνοιξης .....	2
Κατηγοριοποίηση των μέτρων στήριξης .....	3
Βήματα σχεδιασμού .....	4
Διάταξη του βιβλίου.....	5
Κεφάλαιο 1.....	6
1. Αξιοπιστία των μέτρων στήριξης.....	6
1.1 Συντελεστής ασφαλείας.....	6
1.1.1 Προσδιορισμικός ορισμός του συντελεστή ασφαλείας .....	7
1.1.2 Ευαισθησία του συντελεστή ασφαλείας .....	7
1.1.3 Πιθανοτικός ορισμός του συντελεστή ασφαλείας.....	7
1.1.4 Βασικές έννοιες των πιθανοτήτων .....	9
1.2 Αναλυτικός υπολογισμός της κατανομής του συντελεστή ασφαλείας .....	10
1.2.1 Ανεξάρτητες μεταβλητές .....	10
1.2.2 Ομοιόμορφη συνάρτηση κατανομής .....	11
1.2.3 Τριγωνική κατανομή .....	14
1.3 Αριθμητικός υπολογισμός της κατανομής του συντελεστή ασφαλείας .....	16
1.3.1 Μέθοδος Monte Carlo .....	16
1.3.2 Μέθοδος εκτίμησης σημείων (PEM).....	17
1.4 Ορισμός αστοχίας.....	17
1.5 Παράδειγμα εφαρμογής.....	18
1.5.1 Προσδιορισμικός υπολογισμός των μέτρων υποστήριξης .....	18
1.5.2 Πιθανοτικός προσδιορισμός των μέτρων υποστήριξης .....	19
Παραδείγματα εφαρμογής.....	24

Παράδειγμα 1. Συμβατικός συντελεστής ασφαλείας .....	24
Παράδειγμα 2. Πιθανοτικός συντελεστής ασφαλείας στην ανώτερη εξόρυξη.....	24
Παράδειγμα 3. Παραεκβολή σε ένα βαθύτερο επίπεδο .....	27
<b>Βιβλιογραφία/Αναφορές .....</b>	<b>29</b>
<b>Κριτήριο αξιολόγησης .....</b>	<b>31</b>
Κριτήριο αξιολόγησης 1 .....	31
Κριτήριο αξιολόγησης 2 .....	32
Κριτήριο αξιολόγησης 3 .....	32
Κριτήριο αξιολόγησης 4 .....	32
<b>Κεφάλαιο 2.....</b>	<b>33</b>
<b>2. Ινοπλισμένο εκτοξευμένο σκυρόδεμα .....</b>	<b>33</b>
2.1 Παλαιότερες και σύγχρονες εφαρμογές.....	33
2.2 Τύποι ινών.....	33
2.3 Μίγματα.....	35
2.4 Ιδιότητες .....	38
2.4.1 Χωρικές παράμετροι.....	38
2.4.2 Μηχανισμός αστοχίας.....	41
2.4.3 Ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος .....	44
2.4.4 Ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος.....	44
2.5 Ανάμιξη .....	44
2.5.1 Προσθήκη χαλύβδινων ινών.....	44
2.5.2 Τροφοδότες.....	47
2.6 Διαστασιολόγηση .....	52
2.6.1 Εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού .....	52
2.6.2 Αναλυτικές μέθοδοι σχεδιασμού .....	57
2.6.3 Ημιεμπειρική μέθοδος .....	59
2.7 Στατικός φορέας επένδυσης .....	61
2.7.1 Επένδυση διπλού κελύφους.....	61
2.7.2 Επένδυση μονού κελύφους .....	62
2.8 <i>Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα χρήσης των ινών.....</i>	<i>64</i>
<b>Βιβλιογραφία/Αναφορές .....</b>	<b>66</b>
<b>Εργαστηριακές δοκιμές.....</b>	<b>68</b>
Δοκιμή Α.....	68
Δοκιμή Β.....	69
<b>Κεφάλαιο 3.....</b>	<b>70</b>
<b>3. Δυσθραυστότητα Ινοπλισμένου Σκυροδέματος .....</b>	<b>70</b>
3.1 Δοκιμή πλάκας .....	70

3.1.1	Τετράγωνα πλάκες - EFNARC .....	71
3.1.2	Κυκλικές πλάκες - ASTM C 1550-03a .....	72
3.2	Πρισματικά δοκίμια - Δοκοί .....	73
3.2.1	JSCE SF4 (JSCE 1984).....	74
3.2.2	ASTM C 1609/C 1609M - 05 .....	75
3.2.3	Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 14651:2005 + A1:2007 .....	76
3.2.4	Κυλινδρικά δοκίμια .....	84
	<b>Κριτήρια Αξιολόγησης .....</b>	<b>85</b>
	Κριτήριο αξιολόγησης 1 .....	85
	Κριτήριο αξιολόγησης 2 .....	86
	Απάντηση 86	
	<b>Κεφάλαιο 4.....</b>	<b>87</b>
4.	<b>Μεταλλικά πλαίσια εγκιβωτισμένα στο σκυρόδεμα .....</b>	<b>87</b>
4.1	Δικτυωτά πλαίσια .....	88
4.2	Νευρώσεις RRS.....	92
4.3	Ολόσωμες δοκοί, διατομής H, εγκιβωτισμένες στο σκυρόδεμα.....	95
4.3.1	Σύμβολα .....	95
4.3.2	Ιδιότητες υλικών .....	99
4.3.3	Γεωμετρικοί περιορισμοί .....	101
4.3.4	Παραμορφωσιμότητα .....	102
4.3.5	Αντοχή των διατομών .....	103
4.3.6	Διατμητική αντίσταση.....	105
4.3.7	Διατάξεις λεπτομερειών.....	106
4.3.8	Πλαίσια μη ενσωματωμένα στο σκυρόδεμα. ....	106
	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>108</b>
	<b>Κριτήρια αξιολόγησης.....</b>	<b>109</b>
	Κριτήριο αξιολόγησης 1 .....	109
	Απάντηση/Λύση .....	109
	Κριτήριο αξιολόγησης 2.....	116
	Απάντηση/Λύση .....	116
	Κριτήριο αξιολόγησης 3.....	118
	Απάντηση/Λύση .....	118
	Κριτήριο αξιολόγησης 4.....	118
	Απάντηση/Λύση .....	118
	<b>Κεφάλαιο 5.....</b>	<b>119</b>
5.	<b>Σήραγγες σε σκληρά στρωσιγενή πετρώματα .....</b>	<b>119</b>
5.1	Εντατική κατάσταση στις διεπιφάνειες .....	120

5.1.1	Υδροστατικό εντατικό πεδίο ( $K=1$ ).....	120
5.1.2	Ανισότροπο εντατικό πεδίο, με $K<3$ . Διεπιφάνεια διερχόμενη από το κέντρο ανυποστήρικτου ανοίγματος	124
5.2	Απανταχού διεπιφάνειες .....	127
5.2.1	Ζώνες αστοχίας στην περιφέρεια της εκσκαφής .....	127
5.2.2	Πίεση αντιστήριξης για αποφυγή της ολίσθησης.....	128
<b>Κριτήρια αξιολόγησης.....</b>		<b>133</b>
Κριτήριο αξιολόγησης 1 .....		133
Κριτήριο αξιολόγησης 2 .....		133
Κριτήριο αξιολόγησης 3.....		133
Κριτήριο αξιολόγησης 4.....		133
Κριτήριο αξιολόγησης 5.....		133
<b>Εξάσκηση.....</b>		<b>135</b>
<b>Κεφάλαιο 6.....</b>		<b>136</b>
<b>6.</b>	<b>Επίπεδες υπόγειες οροφές μετά τη ρωγμάτωση .....</b>	<b>136</b>
6.1	Ορθογωνική οροφή .....	136
6.1.1	Αστοχία λόγω καμπτικής θλίψης.....	139
6.1.2	Αστοχία λόγω ελαστικής αστάθειας.....	140
6.1.3	Αστοχία λόγω ολίσθησης σε προϋπάρχουσες ασυνέχειες.....	140
6.1.4	Εφαρμογή .....	141
6.2	Τετραγωνική οροφή.....	142
<b>Βιβλιογραφία/Αναφορές .....</b>		<b>144</b>
<b>Ασκήσεις εξάσκησης.....</b>		<b>145</b>
Άσκηση 1 .....		145
Άσκηση 2 .....		145
<b>Κεφάλαιο 7.....</b>		<b>146</b>
<b>7.</b>	<b>Στήριξη μετώπου σήραγγας.....</b>	<b>146</b>
7.1	Εισαγωγή .....	146
7.2	Μηχανισμός του Horn (1961).....	147
7.2.1	Γεωμετρικά και στατικά στοιχεία .....	147
7.2.2	Δράσες δυνάμεις στο τριγωνικό πρίσμα “P” .....	148
7.2.3	Απαιτούμενη δύναμη στήριξης μετώπου .....	154
7.3	Αναλύσεις συνεχούς μέσου .....	158
7.3.1	Απαιτούμενη στήριξη από αριθμητικές αναλύσεις για στραγγισμένες συνθήκες.....	158
7.3.2	Αναλύσεις για αστράγγιστες συνθήκες.....	160
7.4	<b>Κατασκευαστικά μέτρα .....</b>	<b>161</b>
7.4.1	Στήριξη στην επιφάνεια του μετώπου .....	161



7.4.2	Οπλισμός του πυρήνα με μεγάλου μήκους αγκύρια .....	162
	<b>Βιβλιογραφία/Αναφορές .....</b>	<b>167</b>
	<b>Κριτήριο αξιολόγησης .....</b>	<b>168</b>
	Κριτήριο αξιολόγησης 1. ....	168
	Κριτήριο αξιολόγησης 2. ....	169
	Κριτήριο αξιολόγησης 3. ....	170
	<b>Κεφάλαιο 8.....</b>	<b>171</b>
<b>8.</b>	<b>Μόνιμη επένδυση από έγχυτο σκυρόδεμα .....</b>	<b>171</b>
8.1	Διαστασιολόγηση .....	172
8.1.1	Άοπλη ή οπλισμένη επένδυση.....	173
8.1.2	Εσωτερικές δυνάμεις και διαστασιολόγηση .....	177
8.2	Έγχυση του σκυροδέματος (σύμφωνα με ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-04-01-00:2009) .....	179
8.2.1	Μέθοδος εκτέλεσης της σκυροδέτησης.....	179
8.2.2	Προετοιμασία για τη διάστρωση σκυροδέματος στο δάπεδο σήραγγας .....	179
8.2.3	Τοποθέτηση οπλισμών σκυροδέματος μόνιμης επένδυσης.....	180
8.2.4	Διάστρωση σκυροδέματος σε θεμέλια.....	181
8.2.5	Αρμοί.....	182
8.2.6	Μεταλλότυποι σιηράγγων.....	184
8.2.7	Διάστρωση σκυροδέματος στις παρειές και στους θόλους επενδύσεων σιηράγγων .....	189
8.2.8	Συμπύκνωση σκυροδέματος.....	190
8.3	Μετά την αφαίρεση του μεταλλότυπου .....	190
8.3.1	Επισκευές και συντήρηση .....	190
8.3.2	Ανοχές Μόνιμης επένδυσης.....	191
8.3.3	Επιμέτρηση εργασιών.....	192
	<b>Βιβλιογραφία/Αναφορές/Προδιαγραφές .....</b>	<b>194</b>
	Αναφορές .....	194
	Προδιαγραφές .....	194
	<b>Κεφάλαιο 9.....</b>	<b>195</b>
<b>9.</b>	<b>Στεγάνωση.....</b>	<b>195</b>
9.1	Προστατευτική αποστραγγιστική στρώση από γεωφάσματα .....	195
9.1.1	Μέθοδος εκτέλεσης της εργασίας .....	196
9.1.2	Επιθυμητά χαρακτηριστικά γεωφασμάτων.....	197
9.2	Στεγάνωση με συνθετικές μεμβράνες .....	198
9.2.1	Μέθοδος εκτέλεσης της εργασίας .....	199
9.3	Στεγάνωση σιηράγγων με ψεκασμό.....	203
9.4	Επιμέτρηση της εργασίας.....	203
	<b>Βιβλιογραφία/Αναφορές .....</b>	<b>204</b>

Προδιαγραφές .....	204
<b>Κεφάλαιο 10.....</b>	<b>205</b>
<b>10. Μόνιμη επένδυση από προκατασκευασμένα στοιχεία.....</b>	<b>205</b>
10.1 Γενικά.....	205
10.1.1 Υλικά κατασκευής .....	205
10.1.2 Δομητική μελέτη .....	206
10.2 Από την προκατασκευή στην εγκατάσταση (σύμφωνα με την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-04-03-00:2009) ..	206
10.2.1 Κατασκευή προκατασκευασμένων στοιχείων .....	206
10.2.2 Συντήρηση - Ξεκαλούπωμα - Αποθήκευση Προκατασκευασμένων Στοιχείων.....	211
10.2.3 Συναρμολόγηση προκατασκευασμένων στοιχείων.....	213
10.2.4 Στεγάνωση προκατασκευασμένων στοιχείων .....	222
10.2.5 Κριτήρια παραλαβής περατωμένων εργασιών (σύμφωνα με την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-04-03-00:2009, παρ. 6)	223
• Έλεγχος φακέλου εργαστηριακών δοκιμών. Σχετικά με τις απαιτήσεις.....	223
10.3 Προχώρηση του TBM.....	225
10.3.1 Πίεση επαφής μεταξύ πέδιλου εμβόλου και στοιχείου .....	226
10.3.2 Δυνάμεις διάρρηξης (splitting) μέσα στο τόξο .....	226
10.4 Λειτουργία της σήραγγας .....	228
10.4.1 Αδράνεια του δακτυλίου της επένδυσης .....	228
10.4.2 Φορτία.....	230
10.4.3 Έλεγχοι τυπικών φορτίων .....	230
10.4.4 Έλεγχοι σε σεισμό και τυχηματικά φορτία .....	232
10.4.5 Παράδειγμα όπλισης στοιχείου (Geodata, 2013) .....	233
10.4.6 Παρακολούθηση.....	234
<b>Βιβλιογραφία/Αναφορές/Προδιαγραφές .....</b>	<b>235</b>
Αναφορές .....	235
Προδιαγραφές-Κανονισμοί .....	235
<b>Κεφάλαιο 11.....</b>	<b>237</b>
<b>11. Έλεγχος ποιότητας σκυροδέματος .....</b>	<b>237</b>
11.1 Πρώτες ύλες.....	237
11.1.1 Τσιμέντο (cement) .....	237
11.1.2 Αδρανή υλικά (aggregates).....	237
11.1.3 Πρόσθετα (additives) και Πρόσμικτα (admixtures) .....	238
11.1.4 Νερό (water) .....	238
11.2 Παραγωγή σκυροδέματος.....	238
11.2.1 Σύνθεση σκυροδέματος .....	239
11.2.2 Νοπό και σκληρυμένο σκυρόδεμα.....	239
11.3 Κανονισμοί, Πρότυπα, Προδιαγραφές ελέγχου σκυροδέματος .....	240

11.3.1	Έλεγχοι.....	240
11.3.2	Δειγματοληψίες σκυροδέματος.....	241
11.4	Τεχνολογία Σκυροδέματος .....	241
<b>Κεφάλαιο 12.....</b>		<b>263</b>
<b>12.</b>	<b>Πυροπροστασία μόνιμης επένδυσης .....</b>	<b>263</b>
12.1	Πυρκαγιά και έκρηξη σε σήραγγα.....	263
12.1.1	Πιθανότητα συμβάντος.....	264
12.1.2	Επιπτώσεις πυρκαγιών σε σήραγγες .....	264
12.2	Περιπτώσεις πυρκαγιάς σε σήραγγα .....	265
12.2.1	Οδικές σήραγγες.....	265
12.2.2	Σιδηροδρομικές σήραγγες.....	268
12.2.3	Καταγεγραμμένες πυρκαγιές σε σήραγγες .....	269
12.3	Επιπτώσεις της πυρκαγιάς στην επένδυση της σήραγγας / μηχανισμοί αστοχίας.....	272
12.3.1	Αποφλοιώση σκυροδέματος – είδη.....	274
12.3.2	Ο χάλυβας του οπλισμού.....	279
12.4	Κανονισμοί που ισχύουν για την προστασία από την πυρκαγιά.....	282
12.4.1	Καμπύλες θερμοκρασίας – χρόνου.....	282
12.4.2	Κανονισμοί προστασίας σηράγγων από πυρκαγιά .....	285
12.5	Μέτρα προστασίας από την φωτιά .....	286
12.5.1	Είδη προστασίας .....	286
12.5.2	Ενεργητική προστασία .....	286
12.5.3	Παθητική προστασία .....	287
12.6	Το παρόν και το μέλλον .....	296
12.6.1	Ενεργητική προστασία .....	296
12.6.2	Παθητική πυροπροστασία.....	296
<b>Βιβλιογραφία .....</b>		<b>297</b>
<b>Κεφάλαιο 13.....</b>		<b>299</b>
<b>13.</b>	<b>Παράρτημα.....</b>	<b>299</b>
<b>Ευρετήριο .....</b>		<b>301</b>

## Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνύμια

ACI	American Concrete Institute
AFTES	Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain
AITES	Association International des Tunnels et de l'Espace Souterrain
ASTM	American Society for Testing and Materials
βλ.	βλέπε
BRE	Building Research Establishment
BSI	British Standards Institution
BTS	British Tunnelling Society
CIRIA	Construction Industry Research and Information Association
DBV	Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein
DIN	Deutsches Institut für Normung
ΕΕΕΕΓΜ	Ελληνική Επιστημονική Εταιρεία Εδαφομηχανικής και Γεωτεχνικής Μηχανικής
ΕΕΣΥΕ	Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων και Υπογείων Έργων
EFNARC	European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete
ΕΚΩΣ	Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος
ΕΛΟΤ	Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης
EN	European Norm
ΕΤ Σ	Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος
ΕΤΕΠ	Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές
FIB	Fédération internationale du béton International Federation for Structural Concrete
H-B	Hoek-Brown
ICE	Institution of Civil Engineers
ISO	International Organization for Standardization
ISRM	International Society for Rock Mechanics
ITA	International Tunnelling Association
ΚΕΔΕ	Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Έργων
M-C	Mohr-Coulomb
NATM/NÖT	New Austrian Tunnelling Method /Neue Österreichische Bauweise
πρβ	παράβαλε
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages
ΤΕΕ	Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος

## Πρόλογος

Το παρόν βιβλίο αποτελεί το δεύτερο τόμο του βιβλίου «Υποστήριξη Υπογείων Έργων» του συγγραφέα. Σκοπός του είναι να προσθέσει γνώσεις στα θέματα της υποστήριξης των υπογείων έργων σε μεταπτυχιακούς φοιτητές ή μηχανικούς που έχουν μέτρια εμπειρία στο θέμα. Στα υπόγεια έργα, σε αντίθεση με οποιαδήποτε άλλη μορφή κατασκευής, η γεωμάζα γύρω από τη σήραγγα αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του φορέα τους και έχει κεντρικό ρόλο στην ευστάθειά τους. Η απαιτούμενη στήριξη προστίθεται στο φορέα της ίδιας της γεωμάζας προκειμένου να εξασφαλίσει την ευστάθεια του υπόγειου έργου. Ο τρόπος εκτίμησής της δεν μπορεί να μαθευτεί μόνο από βιβλία και πολλές ουσιαστικές αποφάσεις για την επιλογή της βασίζονται στην κρίση του μηχανικού και την εμπειρία. Συχνά δεν υπάρχει μονοσήμαντη απάντηση σε κάθε σχετική ερώτηση, αλλά αυτή εξαρτάται από τις συνήθειες και εμπειρίες του μηχανικού. Το βιβλίο επομένως παρέχει στον αναγνώστη βασικές γνώσεις, εκτίμησης της απαιτούμενης υποστήριξης και δυνατότητα συμβουλής του, όπου απαιτείται, από ειδικότερες αναφορές σε συγκεκριμένο θέμα, χωρίς να παραγνωρίζεται ότι για να γίνει κάποιος ειδικός, χρειάζονται μεταξύ άλλων και πολλά χρόνια εμπειρίας.

-

## Εισαγωγή

*Η συμπεριφορά των υπογείων ανοιγμάτων και των μέτρων στήριξης τους πρέπει να αντιμετωπίζεται μέσα από τις γενικές βασικές αρχές της επιστήμης της μηχανικής.*

### Γενικά

Η στήριξη των υπογείων έργων διαφέρει από τη στήριξη των κτιριακών ή άλλων δομημάτων ανωδομής. Στα κτιριακά έργα και στη γεφυροποιία ο φέρων οργανισμός έχει καθορισμένες και δοκιμασμένες ιδιότητες, κάτι που δεν ισχύει στα υπόγεια έργα. Ο επόμενος πίνακας απεικονίζει βασικές διαφορές των φορέων στήριξης στα έργα ανωδομής και στα υπόγεια έργα. Μολονότι και στα υπόγεια έργα χρησιμοποιούνται φορείς από σκυρόδεμα και χάλυβα, στα υπόγεια ο κύριος φέρων οργανισμός είναι το ίδιο το πέτρωμα, το οποίο έχει το διττό ρόλο του φέροντος και του φερόμενου. Η στήριξη επομένως έχει το δευτερεύοντα σκοπό της διαφύλαξης της ακεραιότητας του πετρώματος. Οικονομικοί λόγοι επιβάλλουν η τελευταία να είναι όσον το δυνατόν λιγότερη. Κλειδί επομένως, στην επιλογή της, είναι η κατανόηση της δυνατότητας ανάληψης φορτίου από το ίδιο το πέτρωμα, ώστε να συμπληρωθεί η φέρουσα ικανότητά του από την απαραίτητη στήριξη.

#### Σύγκριση των φορέων σήραγγων και κτισμάτων ανωδομής

	Σήραγγες	Δομήματα πάνω από το έδαφος
Υλικά κατασκευής	Ο κύριος φορέας στήριξης είναι το περιβάλλον πέτρωμα, με όλες τις αβεβαιότητές του.	Οι ιδιότητές τους είναι δεδομένες και δύνανται ανά πάσα στιγμή να ελεγχθούν.
Φορτία	Εκτιμώνται είτε εμπειρικά είτε με τη βοήθεια προσομοιωμάτων, και ουσιαστικά είναι άγνωστα.	Είναι γενικά γνωστά
Υπερστατικότητα φορέων	Τα πέτρωμα είναι ένας μαζικός φορέας και ως εκ τούτου έχει μεγάλη υπερστατικότητα, δηλαδή ικανότητα ανακατανομής των εσωτερικών δυνάμεών του.	Οι δομικοί φορείς ακόμη και όταν δεν είναι γραμμικοί, έχουν σχετικά μικρή υπερστατικότητα και πλαστιμότητα, και επομένως περιορισμένη ικανότητα ανακατανομής των εσωτερικών δυνάμεων.
Ασφάλεια	Λόγω των αβεβαιοτήτων που ενυπάρχουν, είναι δύσκολη η εκτίμηση της απόστασης μεταξύ των φορτίων που μπορούν να αναληφθούν από αυτά που αναμένεται να δράσουν	Μπορεί να προσδιοριστεί με επαρκή ακρίβεια ως η απόσταση των φορτίων που μπορούν να αναληφθούν από τα φορτία που εκτιμάται ότι θα δράσουν.

### Γνώση της περιβάλλουσας γεωμάζας

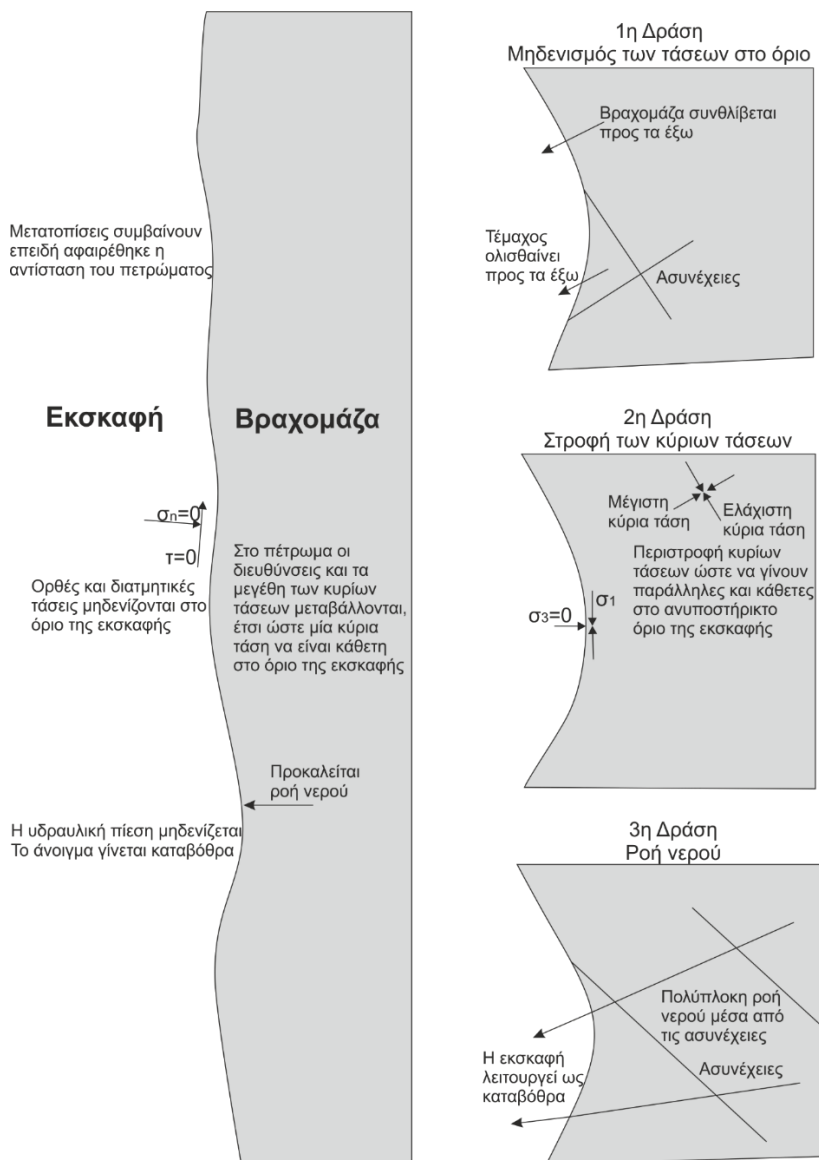
Όσους πυρήνες γεωτρήσεων και αν πάρουμε και δοκιμάσουμε στο εργαστήριο, τα δείγματα θα αφορούν μόνο ένα μικρό κλάσμα από τη συνολική γεωμάζα που θα επηρεαστεί από την κατασκευή της σήραγγας. Περιορισμένες και όχι σαφείς είναι και οι γνώσεις της δομής της γεωμάζας, δηλαδή της διαστρωμάτωσης, των διακλάσεων και των ρηγμάτων. Ως εκ τούτου, έγκειται στην κρίση του μηχανικού να καθορίσει τις συνθήκες του εδάφους και τις μηχανικές του ιδιότητες. Συχνά, θεωρείται ότι η γεωμάζα λειτουργεί ως συνεχές μέσο που επιτρέπει τριδιάστατη ανακατανομή των τάσεων γύρω από το υπόγειο άνοιγμα, αναλαμβάνοντας έτσι μέρος του φορτίου, ώστε το πλήρες υπερκείμενο να μην δρα ως φορτίο στον φορέα της σήραγγας. Αλλά πώς μπορεί να καθοριστεί το ποσοστό αυτό; Και πάλι, αυτό καταλήγει στην κρίση του μηχανικού. Εάν υπάρχει σήραγγα με άμεση επένδυση από εκτοξευμένο σκυρόδεμα, πώς μπορεί να εκτιμηθεί η ένταση της σχετικά την φέρουσα ικανότητά της; Εάν μετρηθεί η σύγκλιση των παρειών της, πώς ξέρουμε ότι τα μέτρα στήριξης της δεν βρίσκονται σε οριακή κατάσταση; Πότε είναι μια ρωγμή στην επένδυση σημαντική και η προειδοποίηση του

τι θα επακολουθήσει; Σε πολλές από αυτές τις ερωτήσεις η απάντηση δεν είναι μονοσήμαντη, αλλά εξαρτάται από την εκάστοτε περίπτωση.

Υπάρχει μια τάση στην σηραγγοποιία η γεωμάζα να ταξινομείται είτε ως μαλακή είτε σκληρή. Τα εδάφη και τα ασθενή πετρώματα εμπίπτουν γενικά στην κατηγορία «μαλακή γεωμάζα» (οι ασθενείς γεωμάζες περιλαμβάνουν την πτωχής ποιότητας κρητίδα, τους ασθενείς ιυόλιθους και τους ασθενείς ή κατακερατισμένους ψαμμίτες. Η «σκληρή γεωμάζα» θα περιλαμβάνει γενικά όλες τις άλλες μορφές βράχου. Ωστόσο, είναι αντιληπτό ότι υπάρχει μετάβαση μεταξύ αυτών των δύο όρων, και η απαίτηση για υποστήριξη συχνά αντιμετωπίζει πιο περίπλοκες συνθήκες γεωμάζας, συχνά με μικτά συστατικά. Ο όρος γεωμάζα αφορά στο γεωυλικό που περιβάλλει μια σήραγγα και περιλαμβάνει το πέτρωμα και, τις τυχόν ενυπάρχουσες ασυνέχειες και ρήγματα. Εναλλακτικά, ο όρος «βραχομάζα» χρησιμοποιείται για τα περιβάλλοντα τη σήραγγα κερματισμένα ή μη πετρώματα.

## Αποτελέσματα της διάνοιξης

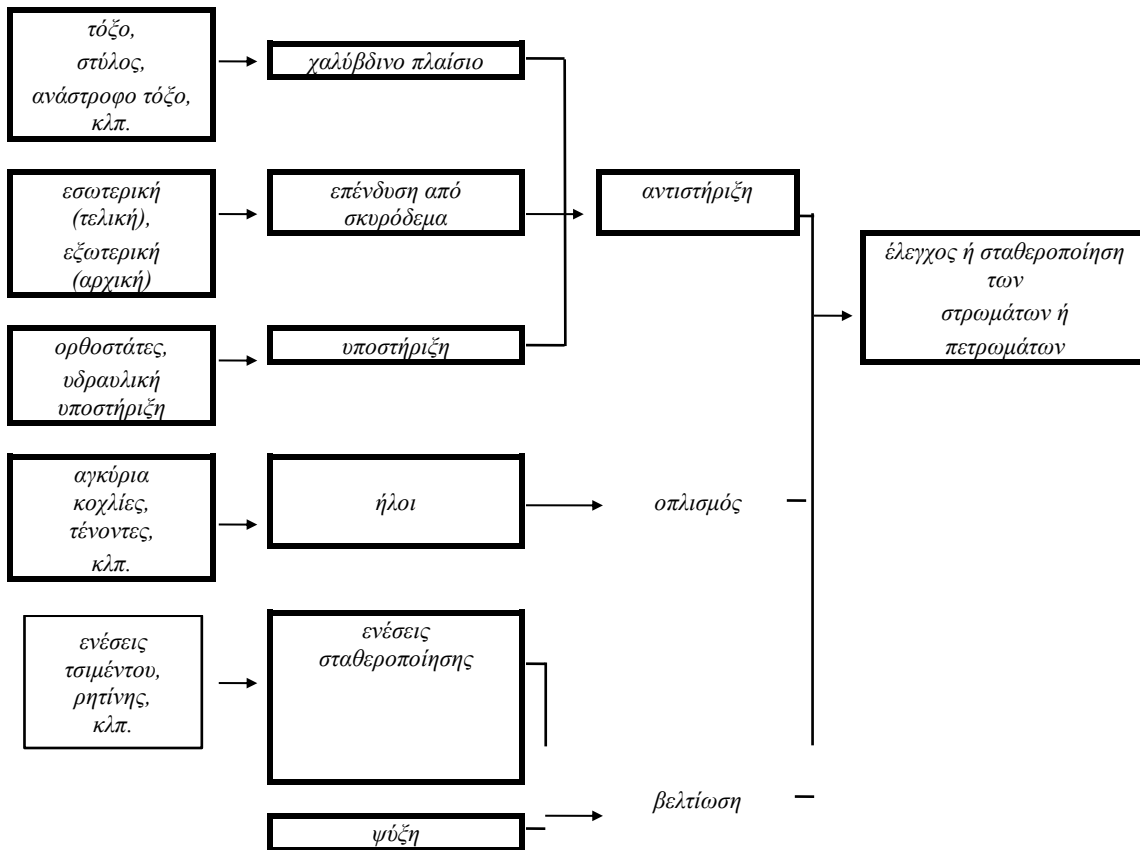
Η εκσκαφή της γεωμάζας για τη δημιουργία του υπογείου ανοίγματος, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα, μηδενίζει τις τάσεις στις παρειές του, αλλάζει τη διεύθυνση του εντατικού πεδίου και το άνοιγμα λειτουργεί για τα υπόγεια νερά ως καταβόθρα. Οι μεταβολές αυτές υποβάλλουν το πέτρωμα σε δυσμενείς εντατικές καταστάσεις, τις οποίες τα μέτρα στήριξης καλούνται να αντιμετωπίσουν, προκειμένου να αποφευχθεί η αστοχία.



Επίδραση της εξόρυξης στο περιβάλλον του υπογείου ανοίγματος

## Κατηγοριοποίηση των μέτρων στήριξης

Μια σειρά από μέτρα σταθεροποίησης της γεωμάζας και η κατηγοριοποίησή τους φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα.



Κατηγοριοποίηση των μέτρων σταθεροποίησης των πετρωμάτων.



## Βήματα σχεδιασμού

Κατά τη μελέτη ακολουθούνται τα βήματα που φαίνονται στον επόμενο Πίνακα. Παρατηρούμε ότι η μελέτη ακολουθεί διακριτή πορεία σύμφωνα με τη δομή της βραχομάζας. Η αριστερή στήλη αφορά συμπεριφορά βραχομάζας η οποία οφείλεται στις μεμονωμένες ασυνέχειες, σε αντίθεση με την δεξιά στήλη, όπου η συμπεριφορά οφείλεται στην αντοχή της βραχομάζας.

### Βήματα σχεδιασμού της υποστήριξης

Συλλογή τεχνικών γεωλογικών στοιχείων από επιφανειακές εμφανίσεις και πυρήνες γεωτρήσεων	
Χαρακτηρισμός της βραχομάζας	
Ταξινόμηση της βραχομάζας και προσδιορισμός τύπων αστοχίας	
Δομικά ελεγχόμενες αστοχίες λόγω βαρύτητας	Αστοχία λόγω υψηλής τάσης υποβοηθούμενης από τη βαρύτητα
Αποτίμηση των κινηματικά δυνατών τύπων αστοχίας	Προσδιορισμός του επιτόπου εντατικού πεδίου στο περιβάλλον πέτρωμα
Καθορισμός της διατμητικής αντοχής στις δυνατών να αστοχήσουν επιφάνειες	Καθορισμός των ιδιοτήτων της βραχομάζας
Υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας ή της επικινδυνότητας των δυνατών αστοχιών	Υπολογισμός του μεγέθους των ζωνών υπερφόρτισης γύρω από την εκσκαφή
Προσδιορισμός των απαιτήσεων υποστήριξης	Μη γραμμική ανάλυση διάδρασης πετρώματος υποστήριξης για τον υπολογισμό της υποστήριξης
Εκτίμηση της επίδρασης των ανατινάξεων και των εκτινάξεων στην υποστήριξη	
Μελέτη της υποστήριξης λαμβάνοντας υπόψη την ακολουθία των εκσκαφών, τη διαθεσιμότητα των υλικών, και την οικονομικότητα της μελέτης.	
Τοποθέτηση της υποστήριξης με πλήρη ποιοτικό έλεγχο ώστε να εξασφαλίζονται το σωστό μήκος των αγκυρίων, η τάνυση και η ενεμάτωσή τους, και η αποτελεσματική εκτόξευση του σκυροδέματος της επένδυσης και η τοποθέτηση των χαλύβδινων πλαισίων όπου απαιτούνται.	
Παρακολούθηση της συμπεριφοράς της εκσκαφής και της υποστήριξης ώστε να επιβεβαιώνεται η μελέτη και να δίνεται η δυνατότητα αλλαγών σε μελλοντικές μελέτες.	

## Διάταξη του βιβλίου

Το βιβλίο συνίσταται από δώδεκα κεφάλαια που περιέχουν τα παρακάτω:

Στο κεφάλαιο 1 αναπτύσσεται το θέμα της αβεβαιότητας στις παραμέτρους ανάλυσης, και της έννοιας του συντελεστή ασφαλείας και της αξιοπιστίας.

Στα κεφάλαια 2 έως 4 δίνονται τεχνολογικά στοιχεία για το εκτοξευμένο σκυρόδεμα οπλισμένο είτε με ίνες είτε με δομικά στοιχεία ενσωματωμένα σε αυτό, καθώς και μέθοδοι υπολογισμού της επέρκειάς του και δοκιμές ελέγχου της ικανότητάς του.

Στα κεφάλαια 5 και 6 αναπτύσσονται οι αναλυτικές μέθοδοι ελέγχου της ευστάθειας των παρειών και της οροφής των σηράγγων ή άλλων υπογείων διανοίξεων μέσα σε στρωσιγενή πετρώματα και υπολογίζονται τα απαιτούμενα άμεσα μέτρα υποστήριξης.

Στο κεφάλαιο 7 εξετάζεται η συμπεριφορά του πετρώματος στον ιδιαίτερα ευαίσθητο χώρο του μετώπου σήραγγας, λόγω υπερφόρτισης. Για την περίπτωση αυτή δίνονται μέθοδοι και διαγράμματα υπολογισμού της απαιτούμενης στήριξης, με ηλώσεις ή άλλα σύγχρονα μέτρα.

Τέλος, τα κεφάλαια 8 έως 12 αναφέρονται στην μόνιμη τελική επένδυση. Στα κεφάλαια 8 και 9 αναπτύσσεται η τεχνολογία κατασκευής της μόνιμης επένδυσης από έγχυτο σκυρόδεμα και ο τρόπος στεγάνωσής της.

Αντίστοιχα στο κεφάλαιο 10 αναπτύσσεται η τεχνολογία κατασκευής επένδυσης από προκατασκευασμένα στοιχεία. Ο έλεγχος της ποιότητάς του σκυροδέματος τη επένδυσης αναπτύσσεται στο κεφάλαιο 11. Τέλος στο κεφάλαιο 12 αναπτύσσεται η τεχνολογία προστασίας της επένδυσης σκυροδέματος από την πυρκαγιά.

Πρόσθετα στοιχεία, όπως πίνακες που αφορούν τις μονάδες μέτρησης και τις σχέσεις μεταξύ τους, θα βρει ο αναγνώστης στο συνοπτικό παράρτημα που παρατίθεται.

Σε κάθε κεφάλαιο του βιβλίου υπάρχουν εκτεταμένες αναφορές στη βιβλιογραφία, και προτάσεις εμβάθυνσης μέσω άλλων συγγραμμάτων.

## Κεφάλαιο 8

### Σύνοψη

*Η μόνιμη επένδυση σήραγγας κατασκευάζεται από άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα. Σκοπός της είναι η διατήρηση της επιτελεστικότητας της σήραγγας κατά τη διάρκεια της προβλεπόμενης ζωής της. Ως εκ τούτου πρέπει να μελετάται ως ένα μόνιμο έργο που θα δύναται να αντιμετωπίσει όλα τα φορτία και τις περιβαλλοντικές δράσεις στα οποία θα υποβληθεί σε αυτό το χρονικό διάστημα και να κατασκευαστεί με συνεχή έλεγχο της ποιότητάς της. Η τοποθέτησή της στο χώρο απαιτεί μεγάλη ακρίβεια, προκειμένου να ανταποκρίνεται η σήραγγα στη λειτουργία της. Η έγχυτη επένδυση των σηράγγων συνήθως δεν έχει επαρκή στεγανότητα προκειμένου να αποτρέπει την εισροή υγρασίας μέσα στη σήραγγα. Τη στεγανότητα αυτή έρχεται να εξασφαλίσει η τοποθέτηση γεωμεμβράνης η οποία σε συνδυασμό με αποστραγγιστικό γεωφύλασμα οδηγεί όποια εισρέοντα νερά σε κατάλληλους αποδέκτες.*

### Προαπαιτούμενη γνώση

*Μάθημα: Οπλισμένο σκυρόδεμα*

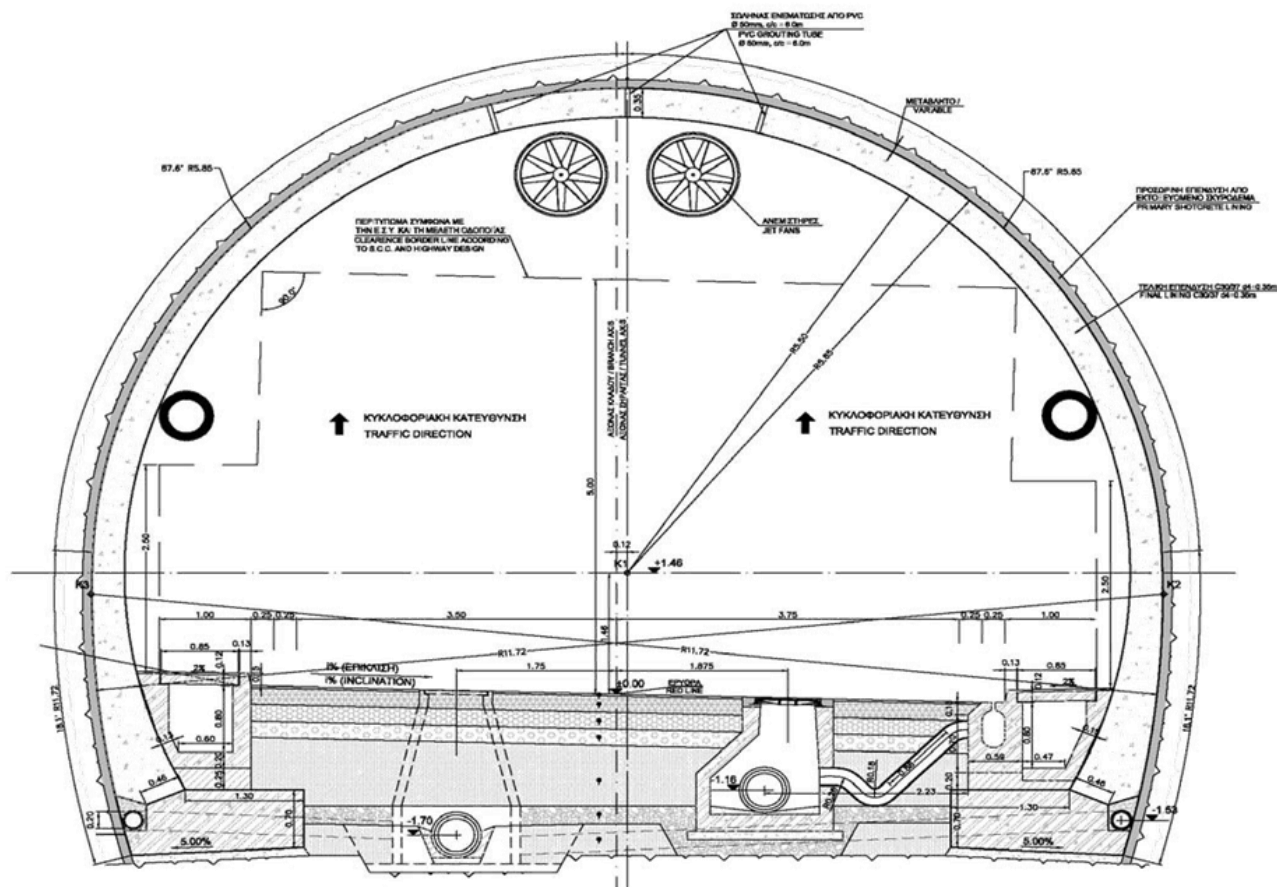
## 8. Μόνιμη επένδυση από έγχυτο σκυρόδεμα

Μόνιμη επένδυση είναι το δομικό στοιχείο της σήραγγας που ικανοποιεί τις απαιτήσεις επιτελεστικότητάς της κατά τη διάρκεια ζωής της. Η διάρκεια αυτή για συγκοινωνιακές σήραγγες είναι 100 έτη. Η εξασφάλιση της ανθεκτικότητάς και της επιτελεστικότητάς της έναντι ποικίλων δράσεων κατά το χρονικό αυτό διάστημα θεωρείται ότι εξασφαλίζεται με χαμηλό κόστος συντήρησης, με την επιτυχή επιλογή υλικών και κατασκευαστικών διαδικασιών, και την εφαρμογή κατάλληλου συστήματος διασφάλισης ποιότητας. Οι συνθήκες περιβάλλοντος που θα επικρατούν κατά τη διάρκεια τεχνικής ζωής του έργου θα πρέπει να εκτιμώνται κατά το σχεδιασμό, ώστε να αξιολογούνται ως προς την επικινδυνότητά τους και να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα.

Η τοποθέτηση της μόνιμης επένδυσης (Σχήμα 8-1) από έγχυτο σκυρόδεμα απαιτεί συνήθως την προσωρινή υποστήριξη του ανοίγματος, και ως εκ τούτου αποτελεί το μόνιμο μέρος δύο κατασκευών. Κατά τη συμβατική διάνοιξη σηράγγων αποτελεί το δεύτερο κέλυφος προστασίας της σήραγγας, που τοποθετείται εσωτερικά μιας επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, η οποία αποτελεί την εξωτερική επένδυση. Σε ορισμένες περιπτώσεις κατασκευής σηράγγων από ασπίδες, η εξωτερική επένδυση δύναται να είναι κατασκευασμένη από προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος. Μεταξύ των δύο επενδύσεων παρεμβάλλεται γενικά σύστημα στεγάνωσης. Η επένδυση από έγχυτο σκυρόδεμα είναι η τελική επένδυση της σήραγγας, η οποία τοποθετείται συνήθως με τη βοήθεια καλουπιού. Κατασκευαστικοί λόγοι επιβάλλουν ως ελάχιστο πάχος τα 20 έως 30cm. Σύμφωνα με τον Ril 853, έγχυτο στεγανό σκυρόδεμα πρέπει να έχει πάχος 0.40m για επενδύσεις μιας στρώσης και 0.30m για την εσωτερική επένδυση αποτελούμενης από δύο στρώσεις. Το σκυρόδεμα της μόνιμης επένδυσης δύναται να οπλίζεται με ράβδους χάλυβα ή/και ίνες.

Το Σκυρόδεμα της τελικής επένδυσης πρέπει να συμμορφώνεται προς τις απαιτήσεις του Προτύπου ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-00. Η Μελέτη Σύνθεσης πρέπει να διασφαλίζει την ικανοποίηση όλων των απαιτήσεων, με την ελάχιστη ποσότητα τσιμέντου, για τη μείωση της εκλυόμενης θερμότητας ενυδάτωσης και την αποφυγή ανάπτυξης ρωγματώσεων. Γενικά, το τσιμέντο του σκυροδέματος είναι υψηλής πρώιμης αντοχής (R), όπως ορίζεται στο πρότυπο (ΕΛΟΤ) EN 197-1. Σε περίπτωση χρήσης ιπτάμενης τέφρας, αυτή συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις του προτύπου (ΕΛΟΤ) EN 450-1. Αντίστοιχα, η πυριτιακή παιπάλη συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις των προτύπων (ΕΛΟΤ) EN 13263-1 και (ΕΛΟΤ) EN 13263-2.

Ο οπλισμός από ράβδους χάλυβα συμμορφώνεται στις απαιτήσεις του Προτύπου ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-02-01-00. Οι ίνες που χρησιμοποιούνται για τη δυσθραυστότητα του σκυροδέματος πληρούν τις απαιτήσεις των προτύπων (ΕΛΟΤ) EN 14889-1 & -2, και (ΕΛΟΤ) EN 14845-1 & -2, και φέρουν σύστημα αγκύρωσης στη μάζα του σκυροδέματος (π.χ. διευρυσμένα άκρα, κυματοειδή μορφή κλπ.) και έχουν την δυνατότητα ομοιόμορφης κατανομής στη μάζα του σκυροδέματος.



Λωρίδες κυκλοφορίας :

Πλάτος αριστερής λωρίδας καθοδήγησης:

Πλάτος δεξιάς λωρίδας καθοδήγησης:

Λ.Ε.Α.:

Πλάτος πεζοδρομίων:

Ελεύθερο ύψος χώρου κυκλοφορίας οχημάτων:

Ελεύθερο ύψος στη ζώνη των πεζοδρομίων έκτακτης ανάγκης:

Καθαρό πλάτος διατομής

Καθαρό ύψος διατομής

Πάχος φορέα μόνιμης επένδυσης

Πάχος θεμελίων

Εξωτερική ακτίνα

Εσωτερική ακτίνα

Σχήμα 8-1. Μόνιμη επένδυση οδικής σήραγγας, του άξονα δυτικής Ελλάδας, τοποθετημένη εσωτερικά της άμεσης.

$3.75+3.50=7.25m$

$0.25+0.25=0.50m$

$0.25+0.25=0.50m$

Άνευ

1.00m

5.00m

2.50m

11.00m

8.12m

0.35m

0.70m

5.85m

5.50m

## 8.1 Διαστασιολόγηση

Η μόνιμη επένδυση κατασκευάζεται συνήθως αφού έχουν μηδενιστεί οι μετακινήσεις των παρειών της σήραγγας από την τοποθετημένη αρχική επένδυση. Λόγοι που επιβάλλουν την κατασκευή της μόνιμης επένδυσης είναι:

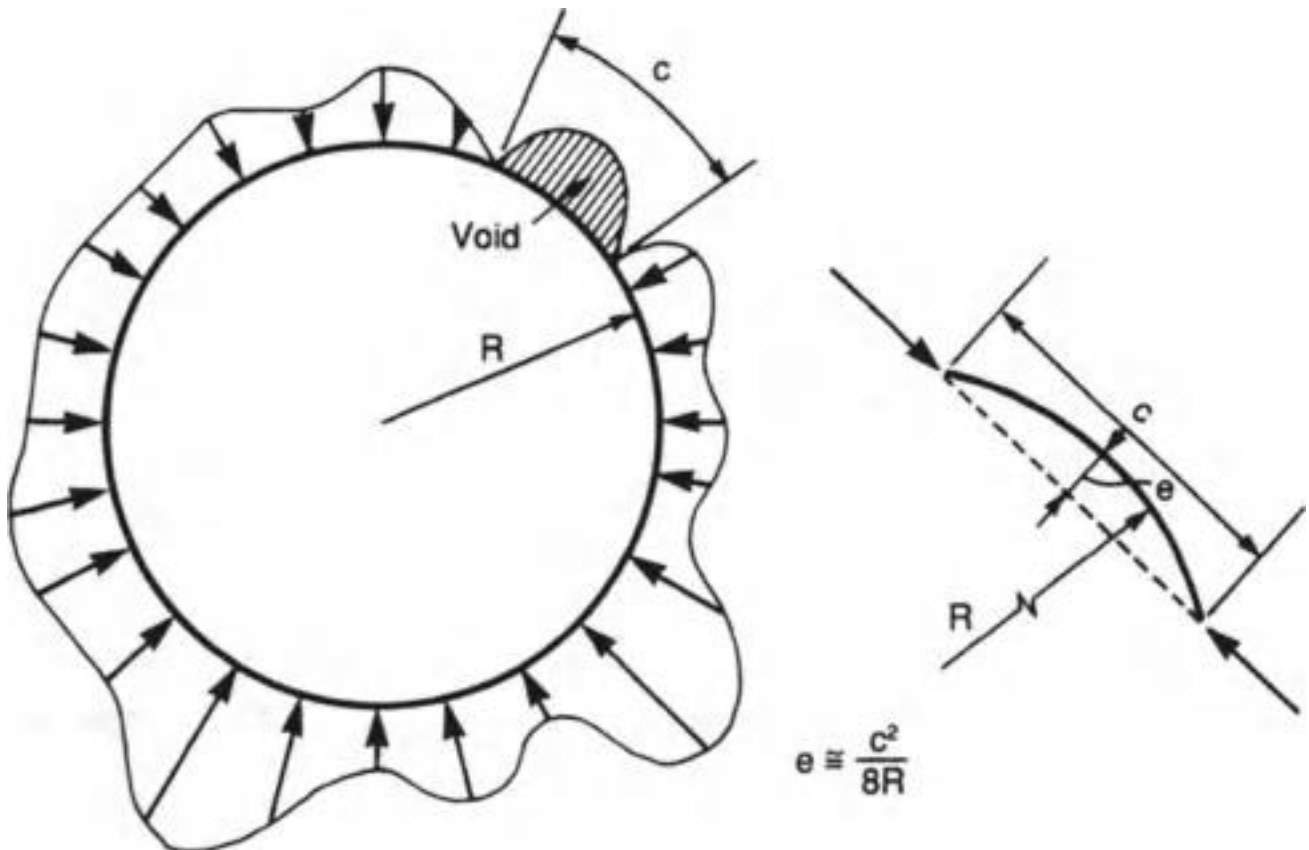
- επίτευξη αποδεκτού επιπέδου ασφαλείας για μόνιμη λειτουργία.
- ανάληψη από τη μόνιμη επένδυση των αναδιανεμημένων φορτίων της γεωμάζας λόγω της υποβάθμισης της υποστηρικτικής δράσης στοιχείων της αρχικής υποστήριξης.
- ανάληψη δράσεων της γεωμάζας, όπως διόγκωσης ή ροής της, που προέρχονται από τη μεταβολή μηχανικών ή φυσικοχημικών ιδιοτήτων κατά την τεχνική διάρκεια ζωής της σήραγγας.
- ικανοποίηση απαιτήσεων τραχύτητας και εμφάνισης της επιφάνειας της μόνιμης επένδυσης.

- ανάληψη δράσεων που δεν υπάρχουν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, αλλά προβλέπονται κατά την τεχνική διάρκεια ζωής του έργου.
- δράσεις από τη λειτουργία της σήραγγας, όπως εκρήξεις, κυκλοφορία, υδραυλική πίεση, κλπ.
- σεισμική δράση
- τυραντίσταση.

Κατά τη διαστασιολόγηση γίνεται συνήθως η θεώρηση ότι τα μέτρα άμεσης υποστήριξης παύουν να αναλαμβάνουν φορτία, οπότε η μόνιμη επένδυση καλείται να τα αναλάβει μαζί με πρόσθετα φορτία που αναμένεται να δράσουν κατά τη λειτουργία της σήραγγας.

### 8.1.1 Άοπλη ή οπλισμένη επένδυση

Η αρχική υποστήριξη είναι εύκαμπτη και γενικά όλκιμη. Είναι επομένως ικανή να παραμορφώνεται εύκολα, και ως εκ τούτου να κινητοποιεί την παθητική αντίσταση και να απομειώνει την ενεργή πίεση. Το σκυρόδεμα της εσωτερικής επένδυσης εγκαθίσταται μόνο μετά από μια τέτοια ανακατανομή και εξομάλυνση των φορτίων της γεωμάζας λόγω της παραμόρφωσης των εύκαμπτων στοιχείων της αρχικής στήριξης. Φορτία που αρχίζουν να δρουν αφού εγκατασταθεί η εσωτερική επένδυση, π.χ. πίεση των υπόγειων υδάτων, προσαρμογές της μακροχρόνιας πίεσης του εδάφους, είναι σχετικά ομοιόμορφα κατανομημένα και παράγουν κυρίως ορθές δυνάμεις στο σκυρόδεμα.



Σχήμα 8-2. Εκκεντρότητα λόγω ύπαρξης κενού πίσω από την επένδυση (Kuesel, 1996)

Ο οπλισμός μπορεί γενικά να παραλειφθεί όταν: δεν απαιτείται στεγανό σκυρόδεμα, η διατομή είναι πλήρως σε θλίψη, η επένδυση είναι εκτός της ζώνης κύκλου παγετού-απόψυξης, η πίεση από τη βραχομάζα είτε απουσιάζει είτε είναι ελαφριά αλλά ομοιόμορφη, οι τάσεις συρρίκνωσης στον δακτύλιο υπερκαλύπτονται από τη συμπίεση, δεν υπάρχουν ζώνες έκπλυσης στη βραχομάζα, δεν αναμένονται σημειακές φορτίσεις στην επένδυση, και δεν αναμένεται μακροπρόθεσμη ασύμμετρη συμπεριφορά της βραχομάζας γύρω από το άνοιγμα.

Κενά που παραμένουν πίσω από την επένδυση από μη πλήρωση με σκυρόδεμα παγιδευμένων θυλάκων αέρα και πιέσεις που προκύπτουν από την ενεμάτωσή τους, βρίσκονται γενικά στη στέψη και εφόσον υπάρχουν

οδηγούν σε εσωτερική κάμψη. Με την (8-1) ο Kuesel (1996) δίνει την εκκεντρότητα  $e$  της ορθής δύναμης στην τελική επένδυση (Σχήμα 8-2) σήραγγας ακτίνας  $R$ , για κενό, λόγω ατελούς ενεμάτωσης, πίσω από την επένδυση μήκους χορδής  $C$ .

$$e = \frac{C^2}{8 \cdot R}$$

(8-1)

### 8.1.1.1 Οπλισμένη

Στις αστικές συγκοινωνιακές σήραγγες, γενικά, καθορίζεται οπλισμός. Για τις σήραγγες στη νέα γραμμή υψηλών ταχυτήτων της DB AG, υπάρχει γενικά υποχρεωτική απαίτηση για ελάχιστο οπλισμό που προκύπτει από τις ειδικές περιπτώσεις φόρτισης: της αναρρόφησης, της πίεσης και του ίδιου βάρους, που ισχύουν για τα τμήματα υψηλών ταχυτήτων ( $v \geq 250$  km/h). Για να εξασφαλιστεί η δυνατότητα συντήρησης της σήραγγας, πρέπει να υπάρχει ελάχιστος εγκατεστημένος οπλισμός, ο οποίος περιγράφεται λεπτομερέστερα στη Ril 853, προκειμένου να αποφεύγεται η πτώση αποκολλημένων τεμαχίων σκυροδέματος. Για σήραγγες υπόγειων σιδηροδρόμων, όλο και περισσότερο χρησιμοποιείται στεγανό σκυρόδεμα που κατασκευάζεται σε τμήματα μέγιστου μήκους 8 m, με τάση αύξησης σε 10 m ή και 12 m, για οικονομικούς λόγους. Προκειμένου να αποφευχθούν ή να διατηρηθούν όσο το δυνατόν μικρότερες οι τάσεις καταναγκασμού στη βραχομάζα ή στην προσωρινή στήριξη από εκτοξευμένο σκυρόδεμα, εφαρμόζεται στρώση ομαλοποίησης από σκυρόδεμα και γεωύφασμα. Ο οπλισμός μελετάται στη βάση είτε δομητικών ελέγχων, είτε ως ελάχιστος ή για συμμόρφωση με τις απαιτήσεις στεγανού σκυροδέματος. Δεδομένου ότι η συμπερίληψη του οπλισμού της προσωρινής επένδυσης στους υπολογισμούς, δεν είναι επαρκώς αποσαφηνισμένη, λόγω αμφιβολιών σχετικά με τη διάβρωση, τη θέση, και τη συνάφεια με το σκυρόδεμα, οι πελάτες και οι μηχανικοί σύμβουλοί τους απαιτούν συνήθως δύο επενδύσεις υποστήριξης, με την εσωτερική επένδυση μόνο να θεωρείται ότι ενεργεί μόνιμα. Οικονομικοί λόγοι απαιτούν είτε τη συμπερίληψη της συμβολής της εξωτερικής επένδυσης στους υπολογισμούς είτε την κατασκευή επένδυσης μονού κελύφους. Συνήθως η έγχυτη εσωτερική επένδυση αποτελεί τη μοναδική μόνιμη ποιοτικά ελεγχόμενη υποστήριξη της σήραγγας, και ως εκ τούτου πρέπει να είναι ικανή να αναλαμβάνει με ασφάλεια τα μακροπρόθεσμα φορτία που θα του ασκηθούν, χωρίς λειτουργικές ή ύστατες (ultimate) αστοχίες. Ο οπλισμός σκοπό έχει την ανάληψη καμπτικών εσωτερικών δυνάμεων, οι οποίες πρέπει να υπολογίζονται σύμφωνα με τις υπάρχουσες συνθήκες, ώστε η επένδυση που θα κατασκευαστεί να είναι ασφαλής και οικονομική. Η όπλιση αυτή βέβαια έρχεται σε αντίθεση με τις παλαιότερες άοπλες τελικές επενδύσεις σιδηράγων που ήταν απλά έντεχνες λιθοδομές.



Σχήμα 8-3. Οπλισμένη διατομή σήραγγας

### 8.1.1.2 Άοπλη

Τίθεται επομένως το ερώτημα αν θα πρέπει πάντα να οπλίζεται το σκυρόδεμα της τελικής επένδυσης σήραγγων ή υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες δύναται να παραμένει άοπλο. Πολλές σήραγγες στην Αυστρία έχουν ήδη κατασκευαστεί άοπλες (ενώ στη Νορβηγία αρκούνται στην αρχική μόνο επένδυση). Η τεχνογνωσία αυτή μεταφέρθηκε στην Ελλάδα, με πρώτη εφαρμογή άοπλης τελικής επένδυσης σε μεγάλης διατομής σήραγγα, το 1985, στον πρώτο κλάδο της σήραγγας του Αρτεμισίου. Ο δεύτερος κλάδος της σήραγγας αυτής κατασκευάστηκε το 2009 με περιορισμένο οπλισμό. Ο Πίνακας 8-1 δίνει κάποιες από τις ευρωπαϊκές σήραγγες που κατασκευάστηκαν άοπλες. Εν τούτοις, όλες οι μεγάλης διατομής σήραγγες που διανοίχθηκαν από το 1985 μέχρι και το 2009 επενδύθηκαν με οπλισμένο σκυρόδεμα, συχνά με ιδιαίτερα βαρύ οπλισμό. Μετά το 2009, εξετάστηκε και πάλι το ενδεχόμενο, σε κάποιες σήραγγες που κατασκευάστηκαν στην Ελλάδα με το σύστημα της παραχώρησης, η τελική επένδυση να είναι από άοπλο σκυρόδεμα.

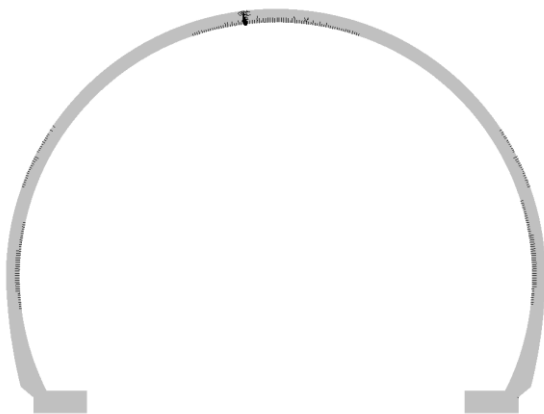
Πίνακας 8-1. Άοπλες σήραγγες

Tunnel	Country	Type of tunnel	Completion time	Length (km)	Tunnel section (m <sup>2</sup> )	Final lining thickness (cm)	Brief geology
Tradenberg	Switzerland	Motorway	2009	2	126	40	Mudstones, Sandstones, Clay marls
Grouff Tunnel	Luxembourg	Motorway	2010	3	96		Marls, Sandstones
Gotthard - Base Tunnel	Switzerland	Railway	On going	25	65	30 - 40	Gneiss
Loetschberg Tunnel	Switzerland	Railway	2008	35			
Schwarzer berg Tunnel	Germany	Motorway	2004	1	102	30 - 40	Gypsum
CTRL 104 North Downs Tunnel	U.K.	Railway	2002	3	103	35 - 40	Chalk

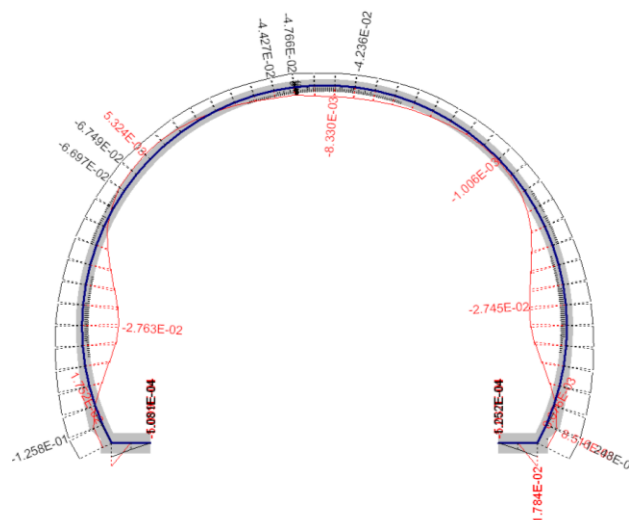
<https://www.db-international.de>

Προκειμένου να ληφθεί απόφαση αν μία σήραγγα θα πρέπει να οπλισθεί ή να παραμείνει άοπλη, βαρύνουσα σημασία έχουν η ποιότητα της γεωμάζας, το εντατικό πεδίο, η σεισμικότητα της περιοχής, οι απαιτήσεις στεγανότητας σε συνδυασμό με τις ρωγματώσεις λόγω ξήρανσης και θερμοκρασιακών μεταβολών, οι απαιτήσεις ασφάλειας, κλπ. Η διαστασιολόγηση των σηράγγων αυτών (Σχήμα 8-4) δύναται να απαιτήσει μη γραμμική ανάλυση (Papanikolaou & Karros, 2014).

Step 26, NS4UZL - nevytuzene osteni 300, MSP, zima, liniove pruzne ulozeni  
Cracks: in elements, opening: <-1.544E-04;1.592E-02>[m], Sigma\_n: <-1.237E+00;9.998E-01>[MPa], Sigma\_TD: <1.017E-16;5.182



(α) Ρωγματώσεις



(β) Εσωτερικές δυνάμεις

Σχήμα 8-4. Άοπλη σήραγγα

### 8.1.1.3 Τοποθέτηση ελάχιστου οπλισμού

Ο Kuesel (1996) θεωρεί ότι δεν υπάρχει λογική αιτιολόγηση για την τοποθέτηση οπλισμού χάλυβα στην εξωτερική ίνα της εσωτερικής επένδυσης. Στην εσωτερική ίνα, ένας διαμήκης οπλισμός προσφέρει αντίσταση στη ρωγμάτωση λόγω συρρίκνωσης, και ένας επαρκής περιφερειακός οπλισμός στηρίζει το διαμήκη στη θέση του έναντι της πίεσης που ασκεί το αντλούμενο σκυρόδεμα γλιστρώντας προς τα κάτω στο μεταλλότυπο. Η τοποθέτηση οπλισμού δεν αναστέλλει βέβαια τη ρωγμάτωση, μειώνει όμως το άνοιγμα κάθε ρωγμής με



σύγχρονη μείωση της απόστασής τους. Ένας ελάχιστος οπλισμός, χωρίς να προσφέρει αντοχή, επιτυγχάνει επομένως αυτήν τη μείωση, (Maidl, 2004). Όμως, από την τοποθέτηση του οπλισμού αυτού προκύπτουν τα παρακάτω σημαντικά μειονεκτήματα (Maidl, 2004):

- Όταν τοποθετείται μεμβράνη στεγανοποίησης μεταξύ των δύο επενδύσεων, ο οπλισμός της εσωτερικής επένδυσης είναι ανεπιθύμητος, δεδομένου ότι είτε θα απαιτηθεί το τρύπημα της μεμβράνης για την τοποθέτηση στηριγμάτων στερέωσης του οπλισμού στη θέση του έναντι της πίεσης του αντλούμενου σκυροδέματος είτε θα είναι δύσκολη η σταθεροποίηση ενός ανεξάρτητου διδιάστατου πλέγματος οπλισμού. Είναι επίσης δύσκολο να αποκλειστεί το κατά λάθος τρύπημα ή ο τραυματισμός της μεμβράνης στεγάνωσης κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης του χάλυβα οπλισμού, χωρίς μάλιστα να μπορεί να ελεγχθεί. Τούτο δύναται να έχει σαν αποτέλεσμα την εισροή νερού στη σήραγγα.
- Σε σήραγγες με στεγάνωση, στη διεπιφάνεια προσωρινής στήριξης εκτοξευόμενου σκυροδέματος και εσωτερικής επένδυσης, πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα για την *εξασφάλιση της θέσης του οπλισμού*. Η στερέωση του οπλισμού στην εσωτερική επένδυση είναι πολύ δύσκολη, και γι' αυτό ο οπλισμός σήμερα κατασκευάζεται συνήθως ως αυτοφερόμενος. Τούτο έχει ως συνέπεια στις μεγαλύτερες διατομές σήραγγας να χρειάζονται σχετικά μεγάλες διατομές οπλισμού.
- Η αντιδιαβρωτική προστασία του οπλισμού απαιτεί πυκνή δομή σκυροδέματος, τη διατήρηση ελάχιστης επικάλυψης σκυροδέματος και τη γόμωση τυχόν ευρέων ρωγμών. Αυτά τα μέτρα αποτελούν επίσης συνήθη πρακτική, αλλά απαιτούν πρόσθετη προσοχή κατά την κατασκευή και την αποκατάσταση των βλαβών.
- Κατά τη διάνοιξη σε σκληρά πετρώματα αναμένεται σημαντική υπερεκσκαφή. Εκτός εάν αυτό αντισταθμίζεται γεωμετρικά με ακριβή μέτρα, ο εξωτερικός οπλισμός δεν θα είναι σε συμφωνία με τις παραδοχές της μελέτης.
- Η ύπαρξη του οπλισμού παρεμποδίζει την αποτελεσματικότητα της δόνησης στη συμπίκνωση του σκυροδέματος, και δύναται να συντελεί στην απόμιξη του σκυροδέματος σε αδρομερή και λεπτομερή.
- Σε περίπτωση πυρκαγιάς, δημιουργούνται αστοχίες λόγω της διαφορετικής συμπεριφοράς του χάλυβα και του σκυροδέματος.

Τα παραπάνω προβλήματα απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή κατά την κατασκευή, και ως εκ τούτου ανέβασμα του κόστους.

### 8.1.2 Εσωτερικές δυνάμεις και διαστασιολόγηση

Η μελέτη της μόνιμης (εσωτερικής) επένδυσης είναι σχετικά απλή (BTS-ICE, 2004), εφόσον θεωρηθεί ότι η αρχική (εξωτερική) υποστήριξη έχει προσωρινό χαρακτήρα. Η εσωτερική επένδυση, τότε, μελετάται ώστε να αναλαμβάνει όλα τα φορτία για την πλήρη διάρκεια ζωής της σήραγγας. Αντίθετα, η μελέτη καθίσταται πιο περίπλοκη, αν θεωρηθεί ότι μέρος του μακροχρόνιου φορτίου εξακολουθεί να αναλαμβάνεται από την αρχική επένδυση, οπότε οι δύο επενδύσεις λειτουργούν ως σύνθετος φορέας.

Αρχικά ο φορέας της μόνιμης επένδυσης αναλαμβάνει μόνο το ίδιο του βάρος, για αντοχή του σκυροδέματος αυτή του χρόνου του ξεκαλουπώματος. Στη συνέχεια, μετά την πλήρη ανάπτυξη της αντοχής του σκυροδέματος, σύμφωνα με τη συνήθη πρακτική, η αρχική στήριξη θεωρείται ως προσωρινή. Προκειμένου επομένως να υπολογιστούν τα τελικά εντατικά μεγέθη της μόνιμης επένδυσης, η ανάλυση συνεχίζεται από το σημείο εκείνο που σταμάτησε όταν υπολογίστηκαν τα εντατικά μεγέθη στην άμεση επένδυση και στην περιβάλλουσα τη σήραγγα βραχομάζα αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης. Ο φορέας καλείται τότε να αναλάβει το φορτίο της αρχικής επένδυσης, όντας σε επαφή μαζί της και μηδενιζόμενης της φέρουσας ικανότητάς της προσωρινής επένδυσης. Ανάλογα με την περίπτωση, η μόνιμη επένδυση θα καλείται να αναλάβει επιπλέον φορτία: υδραυλικά, καταναγκασμού όπως θερμοκρασιακά-ξήρανσης-ερπυσμού του σκυροδέματος, διόγκωσης-σύνθλιψης της γεωμάζας, και τυχηματικά, όπως πρόσκρουσης οχημάτων, έκρηξης, πυρκαγιάς, καθώς και σεισμού. Αναλυτικές οδηγίες για τις φορτίσεις δίνονται από τους Σοφιανός & Καπένης (2003 α & β). Η μελέτη διαστασιολόγησης και ο οπλισμός, εφόσον απαιτείται, πραγματοποιείται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα, και ειδικότερα τους EC 1992 και EC 1997. Ο Πίνακας 8-2 δίνει τους μερικούς συντελεστές ασφαλείας για το σκυρόδεμα και τον χάλυβα.

Πίνακας 8-2. Μερικοί συντελεστές ασφαλείας

Οπλισμένο σκυρόδεμα		Οριακή κατάσταση αστοχίας	Οριακή κατάσταση λειπ/τας
Σκυρόδεμα $\gamma_c$	EC2	1.50	1.00
Χάλυβας $\gamma_s$		1.15	1.00
Άοπλο σκυρόδεμα		Βασικοί συνδυασμοί	Τυχηματικοί συνδυασμοί
Σκυρόδεμα $\gamma_c$	EC2	1.50	1.20
	AFTES	1.50	1.15

Οι συνήθεις φορτίσεις που λαμβάνονται υπόψη περιλαμβάνουν:

- Ίδιο βάρος Φορέα και Βραχομάζας (G)
- Μόνιμο φορτίο επίχωσης-πλήρωσης θεμελίων / ανάστροφου πυθμένα
- Ίδιο βάρος Ανεμιστήρων Αερισμού
- Υδροστατική Πίεση
- Κινητό φορτίο λειτουργίας πεζοδρομίων
- Φόρτιση πεζοδρομίων με μοναδιαίο φορτίο τροχού
- Πρόσκρουση Οχήματος
- Ομοιόμορφη αύξηση και μείωση θερμοκρασίας (+ $\Delta T$ / - $\Delta T$ )
- Θερμοκρασιακή διαφορά μέσα κι έξω ίνας ( $T+in/-out$  -- $T-in/+out$ )
- Συστολή ξήρανσης (Shr)
- Ενυδάτωση (Hyd)
- Φορτίο Έκρηξης (Blast)

Συνδυασμοί φορτίσεων με τους αντίστοιχους συντελεστές φαίνονται στον πίνακα του επόμενου σχήματος.

Πίνακας 8-3. Συνδυασμοί φορτίσεων

LOAD CASE	ΜΟΝΙΜΑ ΦΟΡΤΙΑ + ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ G	ΜΟΝΙΜΟ ΦΟΡΤΙΟ ΕΠΙΧΩΣΗΣ-ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΘΕΜΕΛΙΩΝ GIII,inv (LC50)	ΊΔΙΟ ΒΑΡΟΣ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΩΝ ΑΕΡΙΣΜΟΥ GIV (LC 52)	ΥΑΡ/ΚΑ ΦΟΡΤΙΑ II (LC55)	ΚΙΝΗΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ πεζοδρομίων QIV (LC56)	ΦΟΡΤΙΟ ΤΡΟΧΟΥ (LC57-LC58) QVh	ΟΜ/ΡΦΗ ΘΕΡΜ/ΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ (+ $\Delta T$ ) (LC70)	ΟΜ/ΡΦΗ ΘΕΡΜ/ΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ (- $\Delta T$ ) (LC71)	ΘΕΡΜ/ΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ +ΜΕΣΑ/+ΕΞΩ (T+in/-out) (LC72)	ΘΕΡΜ/ΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ -ΜΕΣΑ/+ΕΞΩ (T-in/+out) (LC73)	ΣΥΣΤΟΛΗ ΞΗΡΑΝΣΗΣ Shr (LC74)	ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ (LC75) Hyd
<b>ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ (ULS)</b>												
Basic												
100	1,35											1,00
101	1,35			1,35								1,00
102	1,35	1,35	1,35									1,00
103	1,35	1,35	1,35	1,35								1,00
104	1,35	1,35	1,35		1,50							1,00
105	1,35	1,35	1,35	1,35	1,50							1,00
106	1,35	1,35	1,35	1,35	1,50			1,00				1,00
107	1,35	1,35	1,35		1,50			1,00				1,00
108	1,35	1,35	1,35	1,35	1,50				1,00			1,00
109	1,35	1,35	1,35	1,35	1,50					1,00		1,00
110	1,35	1,35	1,35	1,35	1,50		1,00		1,00			1,00
111	1,35	1,35	1,35		1,50			1,00	1,00			1,00
112	1,35	1,35	1,35	1,35	1,50		1,00			1,00		1,00
113	1,35	1,35	1,35		1,50			1,00		1,00		1,00
114	1,35											1,00

Τυπικές μηχανικές παράμετροι του οπλισμένου σκυροδέματος, είναι:

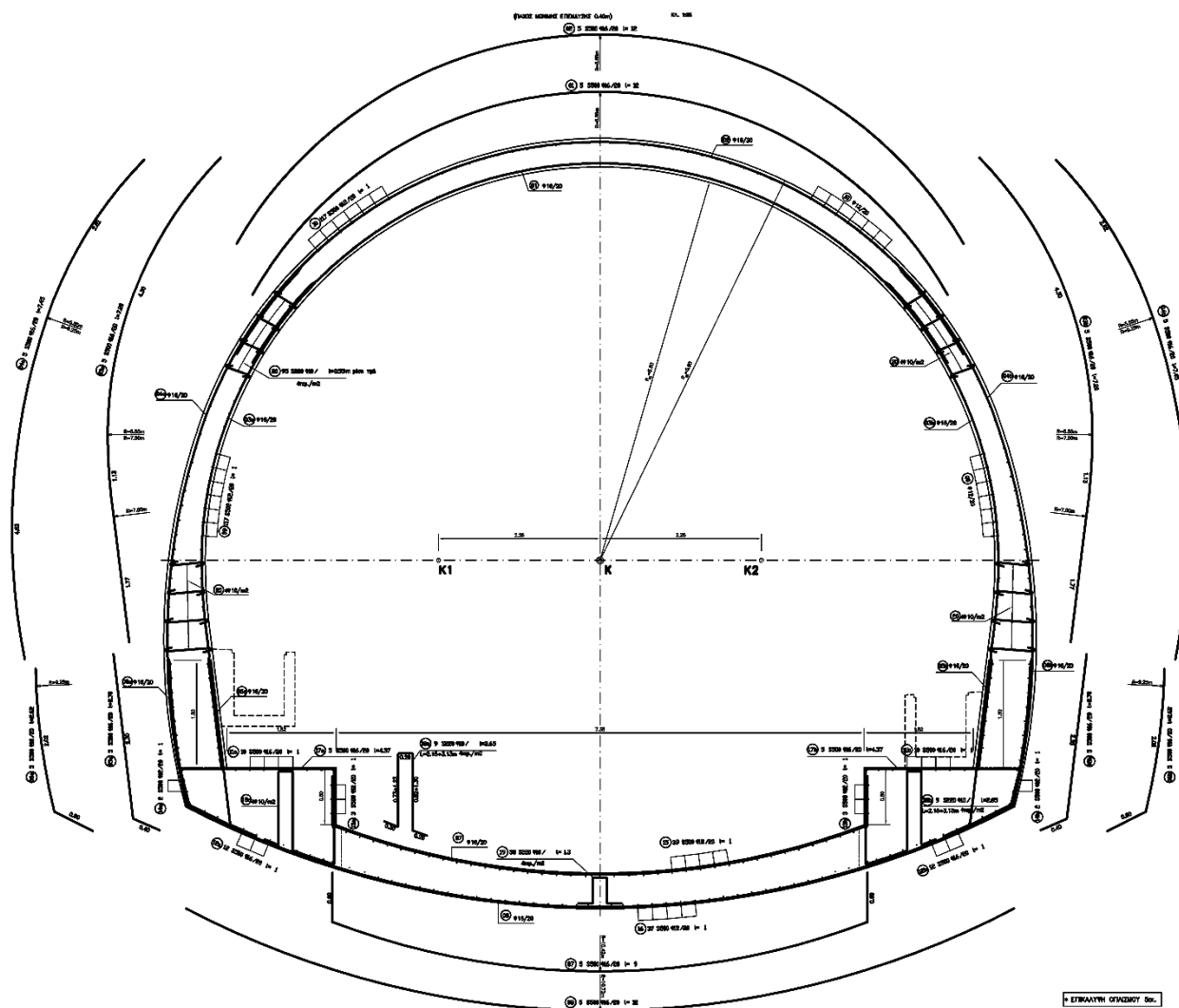
(α) Έγχυτο Σκυρόδεμα, ποιότητας C30/37

- Μέτρο Ελαστικότητας  $E = 31900 \text{ N/mm}^2$
- Χαρακτηριστική αντοχή θλίψης κυλίνδρου  $f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$
- Λόγος Poisson  $\nu=0.2$
- Μοναδιαίο βάρος άοπλου σκυροδέματος  $24 \text{ kN/m}^3$
- Μοναδιαίο βάρος οπλισμένου σκυροδέματος  $25 \text{ kN/m}^3$

(β) Χάλυβας οπλισμού, ποιότητας B500C

- Μέτρο Ελαστικότητας  $E = 205000 \text{ N/mm}^2$
- Όριο διαρροής  $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$

Το Σχήμα 8-5 δίνει ένα τυπικό σχέδιο οπλισμού τελικής επένδυσης σήραγγας.



Σχήμα 8-5. Οπλισμός σήραγγας

## 8.2 Έγχυση του σκυροδέματος (σύμφωνα με ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-04-01-00:2009)

### 8.2.1 Μέθοδος εκτέλεσης της σκυροδέτησης

Στην “Έκθεση Μεθόδου Εκτέλεσης Σκυροδέτησης”, περιγράφεται η μέθοδος εκτέλεσης όλων των εργασιών που σχετίζονται με την σκυροδέτηση της μόνιμης επένδυσης της σήραγγας. Η Έκθεση καλύπτει το σύνολο της κατασκευαστικής αλληλουχίας, δηλαδή: την προετοιμασία των επιφανειών διάστρωσης του σκυροδέματος, την τοποθέτηση των οπλισμών, την κατασκευή και ανέγερση των τύπων, τη διάστρωση του σκυροδέματος, τη διαμόρφωση των αρμών κατασκευής, συστολής ή διαστολής, τη συμπίκνωση του σκυροδέματος, την επεξεργασία και επισκευή της επιφάνειας του σκυροδέματος, τη συντήρησή του και το πρόγραμμα μετρήσεων για την διακρίβωση της γεωμετρικής ακρίβειας της κατασκευής. Στην Έκθεση περιγράφεται η μέθοδος εκτέλεσης της εργασίας, ο προς τούτο απαιτούμενος εξοπλισμός και το απαραίτητο προσωπικό καθώς και τα υλικά που ενσωματώνονται ή χρησιμοποιούνται. Κατά τη σύνταξη της “Έκθεσης Μεθοδολογίας Εκτέλεσης Σκυροδέτησης” λαμβάνονται υπόψη οι χρονικές και λοιπές συμβατικές δεσμεύσεις για την κατασκευή της σήραγγας.

### 8.2.2 Προετοιμασία για τη διάστρωση σκυροδέματος στο δάπεδο σήραγγας

Οι επιφάνειες της γεωμάζας που αποτελούν δάπεδα σήραγγας στις οποίες πρόκειται να διαστρωθεί σκυρόδεμα πρέπει να είναι καθαρές, απαλλαγμένες από λάδια, στάσιμο ή ρέον νερό, λάσπη και χαλαρά, ημι-αποκολλημένα

τεμάχια της. Οι ρωγμές ή σχισμές της βραχομάζας καθαρίζονται από τα πτωχά υλικά πλήρωσης, σε αποδεκτό βάθος, πριν τη διάστρωση σκυροδέματος. Αμέσως πριν τη διάστρωση του σκυροδέματος, όλες οι επιφάνειες καθαρίζονται επιμελώς με εκτόξευση νερού - αέρα υψηλής ταχύτητας, με σάρωμα, με υγρή αμμοβολή ή με άλλα ικανοποιητικά μέσα.

Όλες οι επιφάνειες διαβρέχονται πριν από την διάστρωση του σκυροδέματος. Όλες οι περίπου οριζόντιες επιφάνειες καλύπτονται αμέσως πριν από τη διάστρωση του σκυροδέματος με συνδετικό κονίαμα, πάχους 2 cm, αποτελούμενο από ένα μέρος τσιμέντου και δύο μέρη λεπτόκοκκου αδρανούς κατά βάρος, με λόγο νερού προς τσιμέντο παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα που το περιβάλλει, αλλά που δεν υπερβαίνει το 0.5. Η στρώση αυτή προωθείται με βούρτσες επιμελώς, ώστε να εισχωρεί σε όλες τις ρωγμές της βραχομάζας, για την εξασφάλιση πλήρους επαφής μεταξύ βραχομάζας και σκυροδέματος. Συσσωρεύσεις λεπτόκοκκου σκυροδέματος δεν αφήνονται να κατακαθίσουν σε βαθουλώματα.

Δεν διαστρώνεται συνδετικό κονίαμα περισσότερο από εκείνο που δύναται να καλυφθεί με νωπό σκυρόδεμα από τη βάρδια διάστρωσης σκυροδέματος ή από την αμέσως επόμενη ή από εκείνο το κονίαμα που δύναται να καλυφθεί πριν να αρχίσει η πήξη του. Το συνδετικό κονίαμα, στο οποίο έχει αρχίσει η πήξη πριν από την διάστρωση σκυροδέματος, αφαιρείται. Όπου χρησιμοποιούνται ανοικτά στραγγιστήρια για τη συγκέντρωση και την απομάκρυνση του νερού διήθησης, αυτά γενικά καλύπτονται με σκυρόδεμα χαμηλής κάθισης, το οποίο αφήνεται για τελική πήξη πριν αρχίσει η σκυροδέτηση. Όλες οι εγκαταστάσεις κατακόρυφων σωλήνων, διακλαδώσεων σωλήνων, στραγγιστηρίων και άλλων εγκαταστάσεων αναγκαίων για την επίτευξη θεμελίωσης απαλλαγμένης ρέοντος ή στάσιμου νερού, εγκαθίστανται και στερεώνονται καλά επί τόπου, ώστε να προλαμβάνεται η μετακίνησή τους ή η χαλάρωση τους κατά τη διάστρωση του σκυροδέματος.

Στην περίπτωση διάστρωσης σκυροδέματος πάνω σε γαιώδη εδάφη ή σε προηγηθείσα επίχωση, όλες οι επιφάνειες του εδάφους πάνω στις οποίες θα γίνει διάστρωση πρέπει να είναι καθαρές, υγρές, απαλλαγμένες από στάσιμο ή ρέον νερό, παγετό ή πάγο ή λάσπη και να είναι προετοιμασμένες, ώστε να είναι αποδεκτές. Η επιφάνεια διάστρωσης, εφόσον είναι απορροφητική, πρέπει να υγραίνεται επιμελώς.

### 8.2.3 Τοποθέτηση οπλισμών σκυροδέματος μόνιμης επένδυσης

Η εκτέλεση της εργασίας αυτής πραγματοποιείται σύμφωνα με τις προβλέψεις του Προτύπου ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-02-01-00. Οι ράβδοι οπλισμού δύνανται να κάμπτονται στο εργοστάσιο ή επί τόπου. Η κάμψη του οπλισμού με θέρμανση δεν επιτρέπεται.

Πριν την τοποθέτηση του οπλισμού, οι επιφάνειες των ράβδων, όπως και οι επιφάνειες των οποιωνδήποτε μεταλλικών υποστηριγμάτων καθαρίζονται επιμελώς από την παχιά λεπιοειδή σκουριά, από χαλαρές σκουριές, ακαθαρσίες, λιπαρές ουσίες και άλλες ξένες ουσίες. Μετά την τοποθέτησή τους, οι ράβδοι οπλισμού διατηρούνται καθαρές μέχρι της πλήρους ενσωμάτωσής τους στο σκυρόδεμα. Οι ράβδοι οπλισμού τοποθετούνται σύμφωνα με τα σχέδια, και οι μετρήσεις κατά την τοποθέτηση των ράβδων οπλισμού γενικά γίνονται στον άξονα των ράβδων. Η καθαρή απόσταση μεταξύ των παραλλήλων ράβδων γενικά δεν πρέπει είναι μικρότερη από μιάμιση φορά τη διάμετρο της ράβδου και πάντως όχι μικρότερη των 25 mm.

Η τοποθέτηση του οπλισμού πραγματοποιείται συνήθως από κινούμενο σε ράγες ικρίωμα (Σχήμα 8-6). Οι ράβδοι οπλισμού συγκρατούνται στην θέση τους, ώστε να μην μετατοπίζονται κατά τη διάρκεια της διάστρωσης και της συμπίκνωσης του σκυροδέματος. Ειδική μέριμνα λαμβάνεται για την αποφυγή διατάραξης του ήδη ενσωματωμένου οπλισμού στο σκυρόδεμα. Σύρμα, έδρες, μεταλλικά άγκιστρα, μεταλλικά διαστήματα, ράβδοι οπλισμού αγκυρωμένες ή όχι στο έδαφος ή άλλα αποδεκτά στηρίγματα από μέταλλο ή από σκυρόδεμα, δύνανται γενικά να χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη ράβδων οπλισμού. Τέτοια στηρίγματα πρέπει να έχουν επαρκή αντοχή, ώστε να διατηρούν τον οπλισμό στην θέση του καθ' όλη την διάρκεια των εργασιών σκυροδέτησης.

Τα υποστηρίγματα χρησιμοποιούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να μη συμβάλλουν στον αποχρωματισμό ή στην διάβρωση του σκυροδέματος. Επίσης τοποθετούνται έτσι ώστε να μην εξέχουν της τελικής επιφάνειας του σκυροδέματος. Για να αποφεύγονται λεκέδες πάνω σε εκτεθειμένες επιφάνειες, τα υποστηρίγματα του οπλισμού κατασκευάζονται από σκυρόδεμα ή μέταλλο που δεν λεκιάζει. Για την επικάλυψη του οπλισμού ισχύουν οι σχετικές διατάξεις του Κανονισμού Οπλισμένου Σκυροδέματος.

Σύνδεση ράβδων με επικάλυψη δύναται να εφαρμόζεται, εφ' όσον τα αλληλοεπικαλυπτόμενα τμήματα των ράβδων τοποθετούνται σε επαφή και συνδέονται γερά με σύρμα. Εναλλακτικά, οι ράβδοι δύνανται να ευρίσκονται σε απόσταση, ώστε να είναι δυνατή η ενσωμάτωση ολόκληρης της επιφάνειας κάθε ράβδου μέσα στο σκυρόδεμα.

Γενικά, οι επιμηκύνσεις των ράβδων με επικάλυψη (μάτιση) μπορούν να γίνονται μέχρι το 1/3 των ράβδων και σε διαφορετική κάθε φορά θέση. Η σύνδεση των ράβδων με κοχλίωση επιτρέπεται μετά από ειδική Μελέτη. Η συγκόλληση των ράβδων αντί της σύνδεσης με αλληλοεπικάλυψη, πραγματοποιείται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-02-01-00. Για τη συγκόλληση του οπλισμού χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια τύπου χαμηλής περιεκτικότητας υδρογόνου (ΕΛΟΤ) EN 14295. Όλες οι συγκολλήσεις πρέπει να αξιοποιούν ολόκληρη την αντοχή της μικρότερης ράβδου (θα ενισχύουν την αντοχή της). Στις συγκολλήσεις οι ράβδοι πρέπει να έχουν αρκετή αλληλοεπικάλυψη για να μεταβιβάζουν την ένταση στις ράβδους μέσω της σύνδεσης. Προσκειμένα φύλλα πλέγματος οπλισμού συνδέονται με επικάλυψη όχι μικρότερη των 15 cm, με τα άκρα επικάλυψης στερεά συνδεδεμένα μεταξύ τους με σύρμα ή συγκρατούμενα μαζί με πρότυπους συνδετήρες.



Σχήμα 8-6. Τοποθέτηση οπλισμού με τη βοήθεια ειδικού ικρίωματος.

Εκτεθειμένος οπλισμός, προοριζόμενος για μελλοντική ενσωμάτωση στο σκυρόδεμα, γενικά πρέπει να προστατεύεται έναντι οξείδωσης με παχύ περιτύλιγμα καναβάτσας, διαποτισμένης με ασφαλικό υλικό ή με κατάλληλη αντιδιαβρωτική βαφή. Ο προφυλασσόμενος με τον τρόπο αυτό οπλισμός καθαρίζεται επιμελώς πριν ενσωματωθεί στο σκυρόδεμα.

#### 8.2.4 Διάστρωση σκυροδέματος σε θεμέλια

Ως στρώση στο σκυρόδεμα ορίζεται το πάχος του που διαστρώνεται μεταξύ δύο διαδοχικών και γειτονικών οριζοντίων αρμών κατασκευής. Το μέγιστο επιτρεπόμενο πάχος μίας στρώσης είναι γενικά 2 m για ογκώδη σκυροδέματα. Ο ελάχιστος χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ των σκυροδετήσεων διαδοχικών στρώσεων είναι 24 ώρες για ογκώδη σκυροδέματα. Η διάστρωση του σκυροδέματος μιας στρώσης πραγματοποιείται με τέτοιο ρυθμό, ώστε να μην έχει αρχίσει η πήξη του σκυροδέματος στην προηγούμενη επιφάνεια διάστρωσης προτού διαστρωθεί το επόμενο σκυρόδεμα.

Το πάχος της στρώσης είναι το ελάχιστο απαιτούμενο για τη συμπίκνωση του σκυροδέματος στην τελευταία αυτή στρώση, και ταυτόχρονα η επιφάνεια της στρώσης αυτής παραμένει τραχεία για τη σύνδεσή

της με την επόμενη στρώση. Όλες οι τελικές επιφάνειες που δεν καλουπώνονται και οι οποίες δεν πρόκειται να καλυφθούν με άλλο σκυρόδεμα ή επίχωση, γενικά υπερυψώνονται ελαφρά πάνω από την τελική στάθμη και στη συνέχεια αφαιρείται με πήχη το πλεονάζον σκυρόδεμα.

Ως χρόνος μεταξύ παρακειμένων σε επαφή διαστρώσεων καθορίζεται ο χρόνος που μεσολαβεί από το πέρας μιας διάστρωσης μέχρι την αρχή της επόμενης. Ο Πίνακας 8-4 δίνει τον ελάχιστο χρόνο που πρέπει γενικά να μεσολαβεί μεταξύ παρακειμένων διαστρώσεων για τις κατασκευές.

Πίνακας 8-4. Ελάχιστος χρόνος μεταξύ παρακειμένων διαστρώσεων

Έργο	Ώρες
Επένδυση Σηράγγων (θεμέλια, ανάστροφο τόξο κλπ.)	8
Άλλες θέσεις (τεχνικά στομίων με εκσκαφή και επανεπίχωση, κλπ.)	24

Σε περίπτωση που μετά την σκυροδέτηση προβλέπεται να ασκηθούν φορτία (πχ. επανεπίχωση ή κυκλοφορία επάνω σε ανάστροφο τόξο), τότε συνυπολογίζεται και το κριτήριο της ανάλογα απαιτούμενης αντοχής και οι εργασίες συνεχίζονται αφού παρέλθει ελάχιστο χρονικό διάστημα 24 ωρών.

## 8.2.5 Αρμολί

Ανάλογα με το σκοπό κάθε αρμού, διακρίνονται αυτοί σε κατηγορίες (Πίνακας 8-5). Αρμολί διακοπής εργασιών (κατασκευαστικοί αρμολί) πρέπει κατά κανόνα να αναλαμβάνουν όλες τις εσωτερικές δυνάμεις. Καλόν είναι οι αρμολί αυτοί να τοποθετούνται σε θέσεις μηδενισμού των ροπών. Άλλοι τύποι αρμών έχουν σκοπό τη δυνατότητα μετακίνησης της θέσης λόγω συστολής διαστολής, τον εξαναγκασμό θραύσης σε συγκεκριμένη θέση, κλπ. Οι κατασκευαστικοί αρμολί γενικά είναι περίπου οριζόντιοι. Η διαμόρφωσή τους επιτυγχάνεται με την χρήση τύπων όπου απαιτείται ή με άλλα μέσα, που εξασφαλίζουν κατάλληλη σύνδεση με την αμέσως επόμενη διάστρωση, με την προϋπόθεση ότι δεν απαιτούνται γενικά κλείδες. Όλοι οι αρμολί κατασκευής που καταλήγουν σε ορατές επιφάνειες σκυροδέματος κατασκευάζονται ευθύγραμμοι, οριζόντιοι ή κατακόρυφοι. Όλοι οι προκύπτοντες από την χρησιμοποίηση ή μη τύπων αρμολί στην επιφάνεια της από σκυρόδεμα επένδυσης της σήραγγας υφίστανται διαχείριση κατασκευαστικών αρμών. Οι επιμήκεις αρμολί στο άνω μέρος του δια σκυροδέματος επενδυμένου δαπέδου της σήραγγας υφίστανται επίσης διαχείριση κατασκευαστικών αρμών.

Πίνακας 8-5. Πιθανή κίνηση διαφόρων τύπων αρμού

Σχεδόν μηδενική	Μετακίνηση		Μικρή	Μεγάλη			
	Αρμός						
	Ισχυρός	Ασθενής					
Εργασίας και σκυροδέτησης	Θλίψης	Εγκοπής	Σκληρός & ψαθυρός	Κίνησης			
				1ος τύπος διαστολής	2ος τύπος διαστολής	3ος τύπος κίνησης	4ος τύπος καθίζησης, διαχωρισμού
Αποτέλεσμα της διακοπής σκυροδέτησης. Οι αποστάσεις τους πρέπει να καθορίζονται πριν από τη σκυροδέτηση. Να εξασφαλίζεται η συγκόλληση με το νέο σκυρόδεμα	Όπως ο προηγούμενος, αλλά χωρίς συγκόλληση του νέου σκυροδέματος. Αυτό εξασφαλίζεται από επίχρισμα ασφάλτου, πίσσας ή συνθετικού	Εκ προθέσεως αποδυναμώση της διατομής με εγκοπή, για τον έλεγχο της θέσης της ρωγμής (από πρόθεση σχηματισμός ρωγμής)	Χωρικοί αρμολί με σκληρή πλήρωση (Τσιμέντο ή συνθετικό κονίαμα). Χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρού μεγέθους στοιχεία κατασκευής	Εφάπαξ μεταβολή μήκους εξαιτίας συρρίκνωσης, ερπυσμού	Επαναλαμβανόμενη, εναλλασσόμενη μεταβολή μήκους εξαιτίας θερμοκρασίας	Πρόσθετη πρόβλεψη συνήθως μικρού σπλισμού σε όλες τις κατευθύνσεις (ταλάντωση, περιστροφή ή κλπ.)	Πρόβλεψη κατακόρυφου σπλισμού. Συχνά βαρύς σπλισμός, έπειτα διαχωριστικός αρμός

Κανένα ενσωματωμένο στο σκυρόδεμα μεταλλικό τεμάχιο γενικά δεν πρέπει να συνεχίζεται μέσω αρμού συστολής ή διαστολής. Οι αρμοί συστολής ή διαστολής πρέπει να έχουν ομαλή και επίπεδη ή με εγχοπές επιφάνεια, για να εξασφαλίζουν την επαφή των κατασκευών. Οι απέναντι παρειές που σχηματίζουν τον αρμό πρέπει να είναι τελείως αποχωρισμένες. Η διάστρωση της δεύτερης παρειάς αρχίζει μόνον όταν η πρώτη παρειά έχει σκληρυνθεί πλήρως. Όταν κρίνεται ότι απαιτείται, τοποθετείται σε επαφή με την πρώτη στρώση εγκεκριμένο υλικό πλήρωσης του αρμού, πριν αρχίσει η δεύτερη διάστρωση. Οι προκύπτουσες από την χρησιμοποίηση τύπων επιφάνειες αρμών διαστολής ή συστολής καθαρίζονται επιμελώς από προσφύσεις σκυροδέματος ή από άλλα ξένα υλικά, με απόξεση, λάξευση ή άλλα αποτελεσματικά μέσα. Οι επιφάνειες υποβάλλονται στην επεξεργασία που ορίζεται παρακάτω. Η διατάραξη του επιφανειακού σκυροδέματος στους κατασκευαστικούς αρμούς αλλά και στους αρμούς συστολής – διαστολής, αποφεύγεται κατά τα πρώτα στάδια της σκλήρυνσης. Η ενδεχόμενη απαραίτητη κυκλοφορία πάνω σε νέο σκυρόδεμα διεξάγεται πάνω σε διαβάσεις, κατασκευασμένες με τρόπο τέτοιο ώστε να μην προκαλούνται ζημιές στο σκυρόδεμα.

Οι κατασκευαστικοί αρμοί πριν καλυφθούν με νωπό σκυρόδεμα πρέπει να είναι καθαροί και υγροί, χωρίς όμως παρουσία ελεύθερου νερού. Ο καθαρισμός συνίσταται στην απομάκρυνση εκρεύσαντος σκυροδέματος, χαλαρού ή ελαττωματικού σκυροδέματος, επικαλύψεων, άμμου, σφραγιστικού υλικού στεγάνωσης και άλλων ξένων υλικών. Οι οριζόντιοι κατασκευαστικοί αρμοί στις στρώσεις με ανοικτές και προσπελάσιμες επιφάνειες προετοιμάζονται για να δεχθούν την επόμενη στρώση με υγρή αμμοβολή ή κοπή με εκτόξευση αέρα - νερού, όπως προδιαγράφεται παρακάτω. Αν στην επιφάνεια μιας στρώσης ο σπλισμός είναι πολύ πυκνός και η επιφάνεια δεν είναι προσπελάσιμη, ή αν για οποιαδήποτε άλλη αιτία δεν πρέπει να διαταραχθεί η επιφάνεια μιας στρώσης πριν από την τελική πήξη, τότε δεν επιτρέπεται η κοπή της επιφάνειας με χρήση εκτοξευμένου αέρα - νερού, απαιτείται δε η χρήση υγρής αμμοβολής ή η τύπανση με ελαφρά θυσανωτή σφύρα. Δεν χρησιμοποιούνται υλικά επιβράδυνσης της πήξης επιφανειών.

Η κοπή του κατασκευαστικού αρμού με αέρα - νερό διενεργείται μετά την αρχική πήξη, αλλά πριν από την ολική πήξη του σκυροδέματος. Η επιφάνεια κόπεται με εκτόξευση αέρα - νερού υψηλής πίεσης, μεγαλύτερης από 40 MPa, για την αποκάλυψη καθαρών, υγιών κόκκων των αδρανών. Μετά την κοπή η επιφάνεια πλένεται, μέχρι να εξαλειφθεί οποιοδήποτε ίχνος θολότητας στο νερό της πλύσης. Στην περίπτωση της επεξεργασίας των κατασκευαστικών αρμών με υγρή αμμοβολή, η εργασία διενεργείται αμέσως πριν από την τοποθέτηση της επόμενης στρώσης σκυροδέματος. Ο εξοπλισμός της υγρής αμμοβολής λειτουργεί με πίεση επτακοσίων 700 kPa περίπου. Η άμμος πριν την εισαγωγή στον εξοπλισμό πρέπει να είναι πυκνή, σκληρή, όχι εύθραυστη και αρκετά ξηρή. Η εργασία συνεχίζεται μέχρις ότου απομακρυνθεί όλο το μη ικανοποιητικό και εκρεύσαν σκυρόδεμα, καθώς και επιστρώσεις, κηλίδες, θρύμματα και άλλα ξένα υλικά. Μετά την επεξεργασία, η επιφάνεια του σκυροδέματος πλένεται επιμελώς για την απομάκρυνση κάθε χαλαρού υλικού. Η ίδια επεξεργασία που περιγράφεται παραπάνω, εκτελείται όταν οι κατασκευαστικοί αρμοί έχουν καλυφθεί με στάσιμο νερό για χρονική περίοδο μεγαλύτερη των 10 ημερών ή έχουν καλυφθεί με ξένα υλικά που είναι δύσκολο να απομακρυνθούν με κανονικές εργασίες καθαρισμού. Αν οι κατασκευαστικοί αρμοί δεν καλυφθούν με σκυρόδεμα μέσα σε 20 ημέρες από τον σχηματισμό τους, τα μέτρα τα οποία λαμβάνονται πριν ξεκινήσουν οι εργασίες της επόμενης σκυροδέτησης είναι:

- Απομάκρυνση κάθε τμήματος αποδιοργανωμένου σκυροδέματος.
- Τεχνητό αγρίεμα της επιφάνειας του σκυροδέματος με χρήση μικρών αεροσφυρών ή με άλλα μηχανικά μέσα σε βάθος περίπου 6 mm, έτσι ώστε να αποκαλύπτονται τα αδρανή.
- Καλός καθαρισμός της επιφάνειας του σκυροδέματος και απομάκρυνση κάθε ξένου στοιχείου με πιεσμένο αέρα ή εκτόξευση νερού.
- Διαβροχή του παλαιού σκυροδέματος για αρκετό χρόνο πριν τη σκυροδέτηση του νέου.

Εναλλακτικά συστήνεται η χρήση εποξειδικής κόλλας, η οποία εφαρμόζεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του υλικού στην επιφάνεια του παλαιού σκυροδέματος λίγο πριν τη σκυροδέτηση. Σ' αυτήν την περίπτωση η επιφάνεια του σκυροδέματος πρέπει να είναι απόλυτα στεγνή πριν την εφαρμογή της κόλλας και η σκυροδέτηση στην περιοχή επαφής πρέπει να αποπερατωθεί πριν τη λήξη του χρόνου εργασιμότητας της κόλλας. Γενικά η χρήση τύπων για το σχηματισμό κατασκευαστικών αρμών δεν επιτρέπεται. Όταν είναι απαραίτητο, οι κατασκευαστικοί αρμοί έχουν επιφάνεια με εγχοπές.

## 8.2.6 Μεταλλότυποι σηράγγων

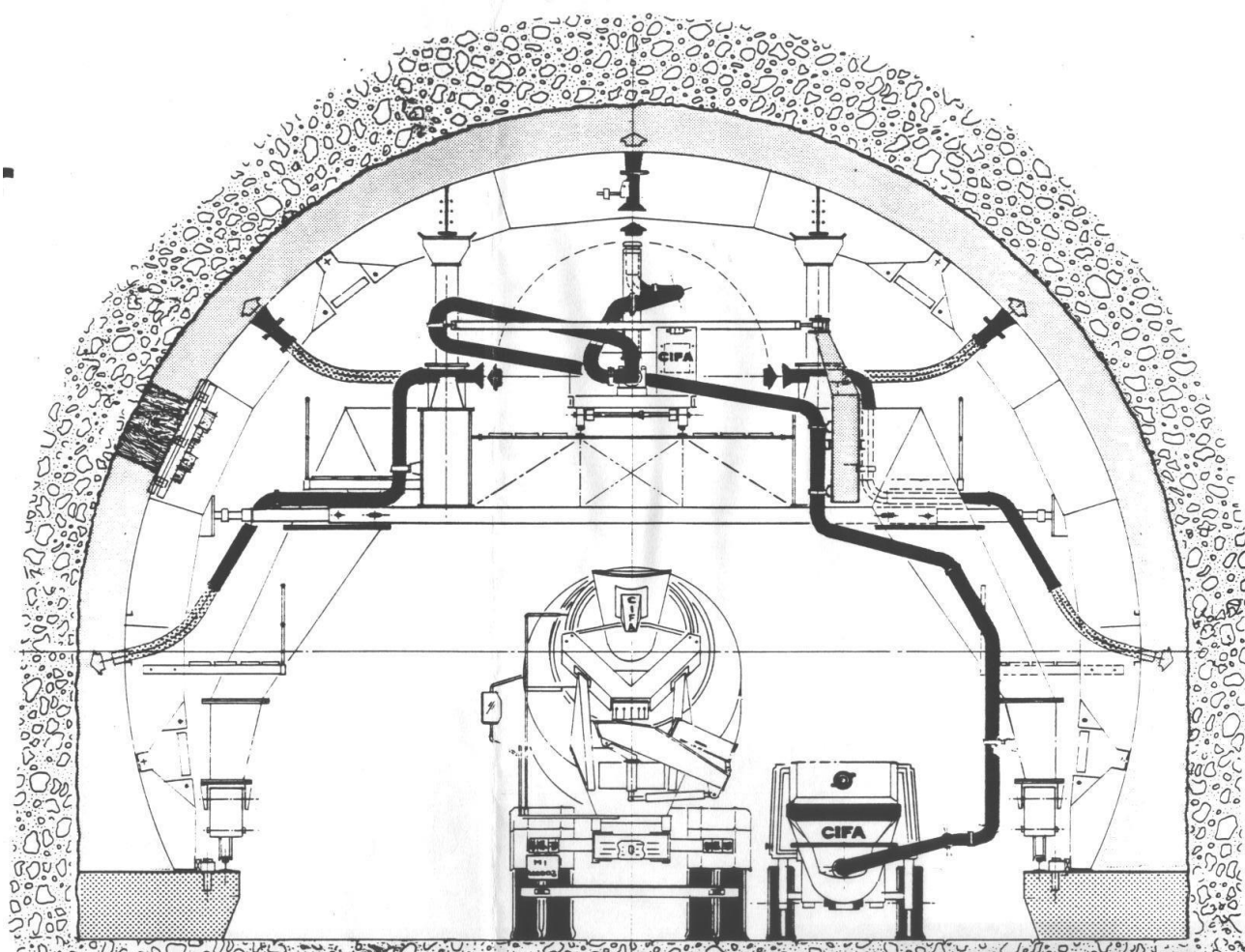
Η κατασκευή της μόνιμης επένδυσης τυποποιείται στο μέγιστο δυνατό βαθμό για λόγους οικονομίας χρόνου, χρήματος και διασφάλισης ποιότητας. Η πλέον επιτυχής μέθοδος για την ικανοποίηση των επιδιώξεων αυτών στις επί τόπου σκυροδετούμενες επενδύσεις είναι η χρήση μηχανικά ή/και υδραυλικά πτυσσόμενου μεταλλότυπου που φέρει χαλύβδινη επένδυση.

### 8.2.6.1 Αυτοκινούμενος μεταλλότυπος

Ο μεταλλότυπος πρέπει να είναι ισχυρός και ανάλογης μορφής και κατασκευής, ώστε να αντέχει στις πιέσεις που ασκούνται κατά την έγχυση και δόνηση του σκυροδέματος, να συγκρατείται χωρίς μετακινήσεις στην σωστή του θέση και να αποδίδει επακριβώς το περιτύπωμα της σήραγγας. Επίσης ο μεταλλότυπος δεν πρέπει να επιτρέπει τη διαρροή κονιάματος. Οι τύποι που χρησιμοποιούνται είναι κατασκευής αναγνωρισμένων εργοστασίων, υδραυλικού ή μη συστήματος, εξασφαλίζουν ταχεία και ευχερή τοποθέτηση στις ακριβείς θέσεις και ευχερή αφαίρεση και μετατόπιση άνευ κρούσεων και καταπονήσεων του σκυροδέματος. Οι τύποι επιτρέπουν την κάτωθεν τούτων δίοδο εργοταξιακών ή άλλων οχημάτων, συρμών, κλπ., όπως επίσης, αν χρειάζεται, και την δίοδο άλλης μεταφερόμενης μονάδας τύπου. Ο μεταλλότυπος διαθέτει ειδικό φορείο μεταφοράς του επί τροχών και κινείται επί σιδηροτροχιών που έχουν τοποθετηθεί κατάλληλα στο δάπεδο ή στα πέδιλα των σηράγγων. Ο μεταλλότυπος δύναται να αποτελείται από τμήματα ή στοιχεία τα οποία θα συνθέτουν τον τύπο αυτό.

Το υγρό σκυρόδεμα παραδίδεται στο εργοτάξιο, τροφοδοτείται στη χοάνη μιας αντλίας σκυροδέματος και αντλείται στη μονάδα του μεταλλότυπου μέσω ενός σωλήνα διανομής σκυροδέματος (Σχήμα 8-7). Ο σωλήνας διανομής σκυροδέματος επιτρέπει την ομοιόμορφη κατανομή του υγρού σκυροδέματος στη μονάδα του μεταλλότυπου. Για μεγαλύτερες διατομές, το σκυρόδεμα αντλείται συχνά πίσω από τον μεταλλότυπο από παράθυρα και συμπυκνώνεται με εσωτερικούς δονητές, αν το πάχος τοίχου είναι επαρκές. Πρέπει να παρέχεται επαρκής αριθμός ανοιγμάτων, ώστε να ελέγχεται η σκυροδέτηση. Τα ανοίγματα αυτά επιτρέπουν τη σκυροδέτηση, την προσπέλαση για τη δόνηση και την επιθεώρηση του διαστρωνόμενου σκυροδέματος πίσω από το μεταλλότυπο. Ο σωλήνας προσκόμισης του σκυροδέματος πρέπει να μπορεί να εισέρχεται στο άνοιγμα χωρίς πρόβλημα, και επίσης να εξασφαλίζεται η επιθεώρηση του διαστρωνόμενου σκυροδέματος από το επόμενο άνοιγμα καθώς και η ελεύθερη πτώση του σκυροδέματος από ύψος που δεν θα υπερβαίνει το 1 m. Τα υπόψη ανοίγματα έχουν κατάλληλες διαστάσεις (π.χ. 0.45 m x 0.90 m με τη μεγάλη διάσταση παράλληλη προς τον άξονα της σήραγγας) και οι θύρες τους ανοίγονται από εξέδρες, για άνετη και ασφαλή προσπέλαση και επιθεώρηση. Ο οριζόντιος άξονας των ανοιγμάτων της κάτω σειράς ευρίσκεται περίπου 1.80m πάνω από το διαμήκη αρμό κατασκευής του πυθμένα της επένδυσης. Τα κέντρα των ανοιγμάτων κάθε επόμενης σειράς απέχουν 1.80 m περίπου από τον οριζόντιο άξονα της αμέσως υποκείμενης σειράς. Τα ανοίγματα διατάσσονται πεσοειδώς, απέχουν μεταξύ τους 2.50 m περίπου, από κατακόρυφο άξονα σε άξονα και προβλέπονται 2 σειρές ανοιγμάτων κοντά στην κορυφή του μεταλλότυπου.





Σχήμα 8-7. Σύστημα διανομής σκυροδέματος

Η θερμοκρασία του σκυροδέματος κατά την έγχυση (BTS-ICE, 2000) πρέπει να είναι μεταξύ 25 και 5°C. Το ναπό σκυρόδεμα έρχεται στη θέση τοποθέτησής του με βαρέλα (Σχήμα 8-7) συνήθως, η οποία τροφοδοτεί αντλία, που στη συνέχεια μέσω δακτυλίου διανομής το αντλεί στο μεταλλότυπο. Ο δακτύλιος διανομής έχει σκοπό την ισόρροπη διανομή του ναπού σκυροδέματος στο μεταλλότυπο. Η συμπίκνωση του σκυροδέματος επιτυγχάνεται με τη χρήση δονητών που είναι εγκατεστημένοι στο μεταλλότυπο.

Στην “Έκθεση Μεθοδολογίας Εκτέλεσης Σκυροδέτησης” περιλαμβάνονται πλήρη τεχνικά στοιχεία (λεπτομερή κατασκευαστικά σχέδια, μελέτη αντοχής του, στήριξής του κλπ.). Η επιλογή της σκυροδέτησης της διατομής σε μία φάση (συνολική διατομή) ή σε δύο (πρώτα σκυροδέτηση πυθμένα και σε επόμενη φάση σκυροδέτηση παρειών και θόλου), καθορίζεται στη μεθοδολογία σκυροδέτησης με βάση τις απαιτήσεις επιτελεσματικότητας και τη στατική μελέτη της μόνιμης επένδυσης. Στη μελέτη και κατασκευή του μεταλλότυπου λαμβάνεται υπόψη ότι ο άξονας της χάραξης στις σήραγγες έχει και καμπύλα τμήματα, ώστε να προβλέπονται οι απαιτούμενες προσθήκες και προσαρμογές (πχ. προσθήκη στο μεταλλότυπο μεταλλικών σφηνών) για την διαμόρφωση των καμπυλών. Επίσης λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη φωλεών Η/Μ εγκαταστάσεων, φρεατίων καθαρισμού, διευρύνσεων (π.χ. σε θέσεις πλατυσμάτων στάθμευσης, φωλεών προσωπικού σε Σιδηροδρομικές Σήραγγες, θέσεων “ωστικών ανεμιστήρων- Jet Fans” και των τμημάτων προσαρμογής αυτών κλπ.) και άλλων, ώστε να προβλέπεται η δυνατότητα ανάλογων προσθηκών και προσαρμογών στο μεταλλότυπο ή συνδυασμός αυτού με άλλους τύπους.

Πριν από την χρησιμοποίηση του μεταλλότυπου για την διάστρωση του σκυροδέματος η επιφάνειά του καθαρίζεται επιμελώς, ώστε να είναι απαλλαγμένη από επιστρώσεις κονιάματος ή άλλα ξένα υλικά. Επίσης πριν από την διάστρωση του σκυροδέματος, η επιφάνεια του μεταλλότυπου επαλείφεται με ειδικό λάδι που συνίσταται από ραφινρισμένο ορυκτέλαιο ειδικής σύνθεσης με ένα ή περισσότερα συστατικά που είναι κατάλληλα για τον επιδιωκόμενο σκοπό. Για την διευκόλυνση επίτευξης ικανοποιητικής προόδου, αλλά και για να καθίσταται δυνατή η ταχεία επισκευή των τυχόν ατελειών της επιφανείας του σκυροδέματος, ο

μεταλλότυπος αφαιρείται αμέσως μόλις το σκυρόδεμα αναπτύξει επαρκή αντοχή, ώστε να αποφεύγονται ραγίσματα, θρυμματισμοί, φουσκώματά του, κλπ.. Η αφαίρεση του μεταλλότυπου συνήθως γίνεται μετά την παρέλευση 10 – 12 ωρών (ανάλογα με την θερμοκρασία περιβάλλοντος) και πάντως σε διάστημα όχι μικρότερο από 8 ώρες, εκτός εάν εφαρμόζονται ειδικές εγκαταστάσεις και τρόποι ωρίμανσης (π.χ. ατμός κ.λπ.). Η ανάπτυξη της ελάχιστης απαιτούμενης αντοχής, προβλέπεται στη Μελέτη, για την αφαίρεση του μεταλλότυπου και ελέγχεται με θραύση τριών (3) τουλάχιστον δοκιμίων για κάθε φάτνωμα. Σε περίπτωση χαμηλών θερμοκρασιών, η αφαίρεση του μεταλλότυπου βραδύνει, προκειμένου να αποκτήσει το σκυρόδεμα την απαιτούμενη αντοχή.

*Πίνακας 8-6. Χρόνοι ξεκαλουπώματος*

Τύπος τσιμέντου	W/C/	Απαιτούμενος χρόνος σκλήρυνσης, σε μέρες, για θερμοκρασία σκυροδέματος:		
		5 °C	12 °C	20 °C
CEM II 32.5 R	0.4	1	¾	½
	0.6	2	1 ½	1
	0.8	4	3	2
CEM I 42.5 R	0.4	½	¼	¼
	0.6	¾	½	½
	0.8	1	¾	¾

### **Παράδειγμα**

**Τι τύπο τσιμέντου και τι λόγο νερού θα χρησιμοποιούσατε για την τελική επένδυση σήραγγας από έγχυτο σκυρόδεμα; Εξηγήστε γιατί.**

### **Απάντηση**

*Τσιμέντο που να αποκτά εντός της ημέρας αντοχή μεγαλύτερη των 5MPa, ώστε να μπορεί να φεύγει ο μεταλλότυπος και την επόμενη μέρα να ξεκινάει νέα σκυροδέτηση τμήματος. Ένα τσιμέντο CEM I 42.5 R και λόγο W/C κάτω του 0.6 σε θερμοκρασία 12° C θα επέτρεπε το ξεκαλούπωμα σε 12 ώρες.*

Ο χρόνος αφαίρεσης του μεταλλότυπου εξαρτάται από τον τύπο του τσιμέντου, τη σύνθεση του σκυροδέματος, τη θερμοκρασία σκυροδέτησης, τις συνθήκες ωρίμανσης, και τη διαδικασία κατασκευής. Το DIN1045 μπορεί μόνον χονδρικά να ληφθεί υπόψη. Ο Πίνακας 8-6 δίνει την επίδραση του τύπου του τσιμέντου, του λόγου N/T, και της θερμοκρασίας σκυροδέτησης, στο χρόνο επίτευξης μιας αντοχής σκυροδέματος 5MPa, που δύναται να θεωρηθεί ως μία ελάχιστη αντοχή ξεκαλουπώματος. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στη συσχέτιση της αντοχής των δοκιμίων με αυτή που πραγματικά έχει αναπτυχθεί στον φορέα, λόγω της μεγάλης διαφοράς στις διαστάσεις μεταξύ των δοκιμίων και του πάχους της διατομής της σήραγγας. Με δεδομένο το μεγάλο πάχος της μόνιμης επένδυσης, αναμένεται, λόγω έκλυσης θερμότητας, να αναπτυχθεί στο σκυρόδεμα πολύ υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με τα δοκίμια τα οποία έχουν ήδη ληφθεί. Αυτή η ανάπτυξη της θερμοκρασίας στο σκυρόδεμα έχει σαν άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της θλιπτικής του αντοχής. Αν υπάρχει λοιπόν ιδιαίτερος λόγος, τοποθετούνται θερμοστοιχεία εντός της διατομής της σήραγγας, έτσι ώστε να γίνεται άμεσος συσχετισμός της αντοχής των δοκιμίων που έχουν ληφθεί με την αντοχή του σκυροδέματος της μόνιμης επένδυσης, σε συνάρτηση με την διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ αυτών. Η αφαίρεση του μεταλλότυπου μπορεί να πραγματοποιείται εφόσον η αντοχή του σκυροδέματος φτάσει την επιτρεπόμενη τιμή της.



Σχήμα 8-8. Σπαστός αυτοκινούμενος μεταλλότυπος

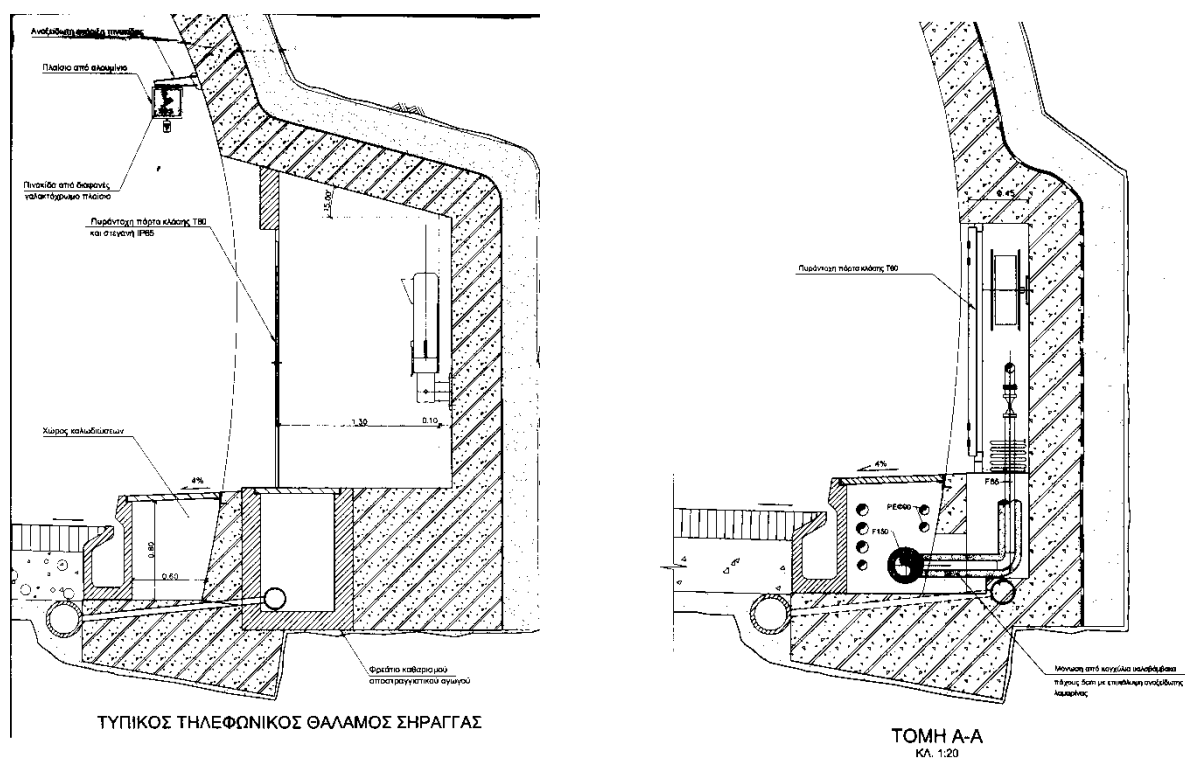
Το σκυρόδεμα εγχέεται σε τμήματα μήκους 8 έως 12.5m, σύμφωνα με το μήκος του μεταλλότυπου (Σχήμα 8-8). Για μικρές διατομές, χρησιμοποιείται μεταλλότυπος πλήρους κυκλικής διατομής (Σχήμα 8-9), δηλαδή ο θόλος και το ανάστροφο κατασκευάζονται ενιαία χωρίς κατασκευαστικό αρμό μεταξύ τους. Για μεγαλύτερες διατομές, εφόσον απαιτείται επένδυση του ανάστρου, αυτή κατασκευάζεται πρώτη, και ακολουθεί η έγχυση σκυροδέματος στο μεταλλότυπο του θόλου.

Το ανοικτό μέτωπο του μεταλλότυπου πρέπει να κλείνει προκειμένου να συγκρατείται το υπό σκυρόδεμα εντός αυτού. Το μέτωπο αυτό δεν έχει σταθερό πάχος, κυμαίνεται δε ανάλογα με το βαθμό υπερή ή υπό-εκσκαφής. Το κλείσιμο επιτυγχάνεται συνήθως με ξυλοδεσιά. Μπορεί να επιτευχθεί επίσης με χρήση ειδικών προκατασκευασμένων στοιχείων κλεισίματος του μετώπου, που προσφέρουν ορισμένοι κατασκευαστές μεταλλοτύπων.



Σχήμα 8-9. Μεταλλότυπο ολόκληρης της διατομής

Η τελική επένδυση διαφοροποιείται από το σχήμα του μεταλλότυπου τόσο σε θέσεις διεύρυνσης και διαφυγής, όσο και σε θέσεις εσοχών (ερμαρίων) που σκοπό έχουν την εξυπηρέτηση της σήραγγας, όπως για την τοποθέτηση τηλεφωνικών θαλάμων, κρουστών πυρόσβεσης, φρεατίων αποχέτευσης, ηλεκτρικών πινάκων, κλπ. (Σχήμα 8-10).

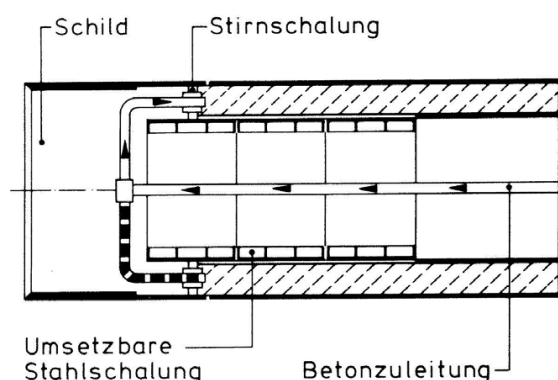


Σχήμα 8-10. Εσοχές σήραγγας. Αριστερά: Τηλεφωνικός θάλαμος. Δεξιά: Ερμάριο πυρόσβεστικών κρουστών και ασθενών ρευμάτων.

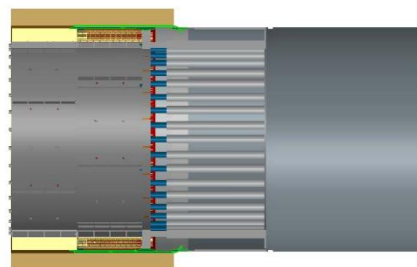
### 8.2.6.2 Μέθοδοι μονού κελύφους (εξωθούμενο σκυρόδεμα)

Η συνεχής κατασκευή επένδυσης από έγχυτο σκυρόδεμα πίσω από το μέτωπο σήραγγας αποτελούσε τα τελευταία χρόνια στόχο της σηραγγοποιίας. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι που βασιζόνταν στην προστασία από ασπίδα και έναν ακολουθούοντα μεταλλότυπο. Το σκυρόδεμα εισπιέζεται στο χώρο μεταξύ μεταλλότυπου και εδάφους, η δε ασπίδα προχωρά με ώθησή της, μέσω δακτυλίου, επάνω στο νωπό σκυρόδεμα. Κάποιες μέθοδοι επιτρέπουν τον οπλισμό του σκυροδέματος με ράβδους. Ίσως η πιο εξελιγμένη από τις μεθόδους είναι η του εξωθούμενου σκυροδέματος, στην οποία το σκυρόδεμα είναι οπλισμένο με χαλύβδινες ίνες. Με τη μέθοδο αυτή, που εφαρμόστηκε για πρώτη φορά (Σχήμα 8-11α) το 1978, και προτείνονται έκτοτε βελτιώσεις της (Σχήμα 8-11β), κατασκευάζονται κυκλικοί δακτύλιοι μήκους 1.20m.

Το μήκος του ακολουθούμενου μεταλλότυπου είναι συνήθως 15m, και εξαρτάται από την ταχύτητα ανάπτυξης της αντοχής του σκυροδέματος και τη μέγιστη ταχύτητα προχώρησης.



(α) Συναρμολογούμενος μεταλλότυπος (Braach, 1992)



(β) Ακολουθών μεταλλότυπος (Lang, 2004)

Σχήμα 8-11. Εξωθούμενο σκυρόδεμα

### 8.2.7 Διάστρωση σκυροδέματος στις παρειές και στους θόλους επενδύσεων σηράγγων

Το σκυρόδεμα των παρειών και των θόλων των επενδύσεων των σηράγγων διαστρώνεται γενικά με σύστημα άντλησης. Ο εξοπλισμός και η μεθοδολογία που χρησιμοποιούνται για τη διάστρωση του σκυροδέματος, είναι τέτοια ώστε να επιτρέπουν τη διάστρωση του σκυροδέματος στην προβλεπόμενη θέση χωρίς διαχωρισμό ή απόμιξη του χονδρόκοκκου αδρανούς. Δεν χρησιμοποιείται εξοπλισμός διάστρωσης που λειτουργεί με πιεσμένο αέρα. Όλοι οι αγωγοί, οι κοχλίες, οι αγκυρώσεις και τα άλλα υλικά τα οποία πρόκειται να ενσωματωθούν στην επένδυση από σκυρόδεμα τοποθετούνται πριν από τη διάστρωση του σκυροδέματος. Η Μελέτη Σύνθεσης και η μεθοδολογία σκυροδέτησης λαμβάνουν υπόψη την ύπαρξη πυκνού οπλισμού και γενικά δυσχερών περιοχών σκυροδέτησης και προβλέπουν σύνθεση σκυροδέματος και μέθοδο σκυροδέτησης συμβατή και ανταποκρινόμενη προς τις συνθήκες αυτές. Δεν ενδείκνυται η χρησιμοποίηση μηχανικών δονητών για τη διάστρωση σκυροδέματος γύρω από ενσωματούμενα τεμάχια. Στην περίπτωση αυτή το σκυρόδεμα συμπυκνώνεται με κοπάνισμα.

Το σκυρόδεμα διαστρώνεται με τρόπο τέτοιο ώστε να εξασφαλίζεται η συμμετρική φόρτιση των υποστηριγμάτων των τύπων. Το εκάστοτε σκυροδετούμενο τμήμα της σήραγγας έχει τέτοιο μήκος, ώστε ο θόλος και οι παρειές της σήραγγας να σκυροδετούνται σε μία συνεχή εργασία. Το άκρο του σωλήνα παροχής “μαρκάρεται” για να φαίνεται το βάθος της βύθισης μέσα στο σκυρόδεμα οποιαδήποτε στιγμή. Λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα για την ώθηση του σκυροδέματος μέσα σε όλες τις ανωμαλίες της επιφάνειας της βραχομάζας και για την τέλεια πλήρωση του θόλου της σήραγγας. Ο χειρισμός του εξοπλισμού διάστρωσης γίνεται από έμπειρο προσωπικό. Αποφεύγονται οι απρόβλεπτοι αρμοί, που για οποιονδήποτε λόγο οφείλονται σε διακοπή πριν την ολοκλήρωση της σκυροδέτησης στις επενδύσεις σηράγγων. Πάντως, σε περίπτωση βλάβης του εξοπλισμού ή αν, για οποιονδήποτε άλλο λόγο, διακοπεί η συνεχής διάστρωση του σκυροδέματος, το σκυρόδεμα στους αρμούς αυτούς θα συμπυκνώνεται με ομοιόμορφη και σταθερή κλίση, για όσο χρόνο αυτό είναι ακόμα εργάσιμο. Το σκυρόδεμα στην επιφάνεια τέτοιων αρμών καθαρίζεται και υγραίνεται, όπως απαιτείται για τους κατασκευαστικούς αρμούς, πριν επαναληφθεί η διάστρωση του σκυροδέματος.

Η εργασία και η αλληλουχία των τμημάτων σκυροδέτησης είναι τέτοια, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία αρχικής έντασης στον οπλισμό. Η “Εκθεση Μεθοδολογίας Εκτέλεσης Σκυροδέτησης” περιλαμβάνει λεπτομερή σχέδια σκυροδέτησης, τα οποία δείχνουν τις διαστάσεις των στρώσεων, την θέση και την διάταξη όλων των ενσωματωμένων τεμαχίων, περιλαμβανομένων και των ράβδων του οπλισμού, τον εξοπλισμό και την αλληλουχία των εργασιών. Το κενό πάνω από την κλείδα πρέπει, μετά την κάθιση του σκυροδέματος, να γεμίσει με τσιμεντοκονίαμα, ώστε να εξασφαλιστεί ότι η έγχυτη επένδυση θα βρίσκεται σε πλήρη επαφή με το περιβάλλον πέτρωμα. Το κονίαμα αυτό είναι αραιής σύστασης και εισπιάζεται διαμέσου οπών που έχουν αφεθεί στην κλείδα σε αποστάσεις 2 έως 5m, μέχρις ότου εξέλθει από την επόμενη οπή. Αυτές οι οπές αργότερα, όταν το κονίαμα θα έχει ήδη σκληρυνθεί, θα τρυπηθούν ξανά για πρόσθετη πλήρωση. Αυτό έχει ως σκοπό να εξασφαλίσει ότι δεν θα παραμείνει εγκλωβισμένος αέρας πίσω από την τελική επένδυση. Η

πίεση του ενέματος θα πρέπει να είναι περιορισμένη (BTS-ICE, 2004), ώστε να μην προκληθεί βλάβη στη νεαρή ακόμη επένδυση, και επίσης η διάταξη ενεμάτωσης θα πρέπει να είναι συμβατή με το σχεδιασμό της υδατοστεγάνωσης.

### 8.2.8 Συμπύκνωση σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα συμπυκνώνεται με εσωτερικούς δονητές, και στη μέγιστη δυνατή πυκνότητα, ώστε να είναι απαλλαγμένο θυλάκων χονδρόκοκκου αδρανούς και αέρα και να είναι σε πλήρη επαφή με το υπόβαθρο και με όλες τις επιφάνειες των τύπων και των ενσωματωμένων τεμαχίων. Οι δονητές πρέπει να είναι ικανοί να μεταδώσουν στο σκυρόδεμα δόνηση με συχνότητα τουλάχιστον 3600 στροφών ανά λεπτό, όταν ευρίσκονται σε φόρτωση. Θα πρέπει να διατίθεται ένας τουλάχιστον εφεδρικός δονητής επί τόπου, σε κατάσταση λειτουργίας. Σε καμία περίπτωση δεν χρησιμοποιούνται οι δονητές για οριζόντια μετατόπιση του σκυροδέματος.

Η συμπύκνωση του σκυροδέματος της επένδυσης σηράγγων γίνεται με δονητές βυθιζόμενου τύπου ή με δονητές που προσαρμολάζονται στους τύπους. Οι δονητές τύπων συνδέονται σταθερά με τους τύπους και λειτουργούν με ταχύτητα τουλάχιστον 8000 στροφών ανά λεπτό κατά την δόνηση του σκυροδέματος. Η ένταση της δόνησης είναι η κατάλληλη για την επίτευξη της απαιτούμενης συμπύκνωσης. Η διάρκεια της δόνησης περιορίζεται σε εκείνη που είναι απαραίτητη, και δεν επιτρέπεται η υπερδόνηση του σκυροδέματος. Οι δονητές τύπων λειτουργούν σε διαδοχικές θέσεις, που απέχουν μεταξύ τους όχι περισσότερο από 120 cm, αμέσως πίσω από την μετακινούμενη κεκλιμένη επιφάνεια του σκυροδέματος στις παρειές και στα κυρτώματα του θόλου. Η θέση των δονητών τύπων στο θόλο, η λειτουργία των δονητών, η παροχή του σκυροδέματος, η θέση του άκρου του σωλήνα παροχής και η μετακίνηση του σωλήνα παροχής συντονίζονται με τρόπο τέτοιο, που να επιτυγχάνεται η μέγιστη πλήρωση του θόλου με σκυρόδεμα και να αποφεύγεται η κάθιση και η ροή σκυροδέματος από τον πληρωθέντα θόλο, λόγω ακατάλληλης θέσης και ρύθμισης της δόνησης.

## 8.3 Μετά την αφαίρεση του μεταλλότυπου

### 8.3.1 Επισκευές και συντήρηση

Αμέσως και κατά το δυνατό μέσα σε εικοσιτέσσερις ώρες μετά την αφαίρεση του μεταλλότυπου, γίνονται οι επισκευές και η επεξεργασία της επιφάνειας του σκυροδέματος που κρίνονται απαραίτητες, ενώ διενεργείται παράλληλα και η συντήρηση του σκυροδέματος. Οι επισκευές εκτελούνται από ειδικευμένους τεχνίτες, με κονίαμα τσιμέντου και άμμου, αναλογίας κατά βάρος 1 προς 2 μέχρι 1 προς 2.5. Όσον αφορά στις επισκευές και στην επεξεργασία των επιφανειών του σκυροδέματος, ισχύουν τα ακόλουθα:

- Γενικά. Μετά την αφαίρεση του μεταλλότυπου, επιδιορθώνεται κάθε εσοχή, ανωμαλία και διόγκωση που εμφανίζεται τοπικά και επιφανειακά, πέρα από την προδιαγραφόμενη ανοχή ή κάθε κενό ή φυσαλίδα ή άλλη ζημιά στο σκυρόδεμα. Σε περιπτώσεις όπου οι παραπάνω ανωμαλίες εμφανίζονται σε σημαντική έκταση και βάθος του σκυροδετημένου σπονδύλου, πριν από την έναρξη των επισκευών, η κατάσταση θα διερευνάται ώστε να αποφασισθεί η επιδιόρθωση ή ενδεχομένως η καθαίρεση και ανακατασκευή του σπονδύλου.
- Επισκευές με νέο σκυρόδεμα ή κονίαμα. Το υπάρχον σκυρόδεμα στην περιοχή που πρόκειται να επισκευασθεί αφαιρείται μέχρι να συναντηθεί το υγιές σκυρόδεμα και τουλάχιστον μέχρι τέτοιο βάθος πίσω από το σιδηρό οπλισμό, ώστε να παρέχει πλήρη συνάφεια του σιδηρού οπλισμού με το νέο σκυρόδεμα. Τα κενά που πρέπει να πληρωθούν, έχουν ακύρια, κλειδιά, δομικό πλέγμα ή υποδοχές για τζινέτια όπως απαιτείται, για να συνδέσουν με ασφάλεια το νέο υλικό στην θέση του. Τα άκρα της τομής μορφώνονται κάθετα προς την επιφάνεια του σκυροδέματος και το νέο σκυρόδεμα πρέπει να είναι επαρκώς συνδεδεμένο με το παλιό σκυρόδεμα. Οι περιοχές που έχουν αποκοπεί, καθαρίζονται τελείως. Οι οπές που έχουν δημιουργηθεί από την απομάκρυνση των ράβδων σύνδεσης, υγραίνονται τελείως και γεμίζουν με ειδικό συνεκτικό κονίαμα που συμπυκνώνεται πλήρως επί τόπου. Το χρώμα του νέου σκυροδέματος και του κονιάματος επισκευής πρέπει να ταιριάζουν με το περιβάλλον σκυρόδεμα. Το σκυρόδεμα και το κονίαμα που χρησιμοποιούνται για γεμίσματα και επισκευές συντηρούνται με τον ίδιο τρόπο που προδιαγράφεται για τις γενικές εργασίες σκυροδέματος. Τα εξογκώματα μπορεί να αφαιρούνται με λείανση. Η επισκευή του σκυροδέματος, κατά το δυνατόν, ολοκληρώνεται μέσα σε 24 ώρες μετά από την αφαίρεση των τύπων.

- Επισκευές με εποξειδική ρητίνη. Όταν το βάθος της βλάβης είναι σημαντικό, η επισκευή πραγματοποιείται με αρχική κοπή με το πριόνι, μίας εγκοπής γύρω από την περίμετρο της ελαττωματικής περιοχής. Στη συνέχεια το ελαττωματικό σκυρόδεμα αφαιρείται με μικρού μεγέθους αερόσφουρα ή κοπίδι και η επιφάνεια που προκύπτει καθαρίζεται με πιεσμένο αέρα για να δεχθεί την εποξειδική στρώση συνάφειας. Υγρές ή βρεγμένες επιφάνειες στεγνώνονται ώστε να δημιουργηθεί επιφάνεια ζεστή στην αφή αμέσως πριν την επάλειψη με το συνδετικό μέσο. Μετά την εφαρμογή σε καθαρή και στεγνή επιφάνεια και ενώ βρίσκεται σε ημίρρευστη κατάσταση, το συνδετικό μέσο θα καλύπτεται με το σκυρόδεμα επισκευής.

Στα πλαίσια της εξασφάλισης της ποιότητας του σκυροδέματος της τελικής επένδυσης είναι αναγκαστική η συντήρηση του έγχυτου σκυροδέματος σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-03-00. Σκοπός της συντήρησης είναι η προστασία του σκυροδέματος από την απώλεια της υγρασίας του και την γρήγορη μείωση της θερμοκρασίας του, και συνεπώς η αποφυγή ανάπτυξης ρωγμάτων. Για το σκοπό αυτό είναι δυνατό να ακολουθεί κέλυφος συντήρησης της επένδυσης επάνω σε αυτοκινούμενο φορείο. Το κενό μεταξύ εξωραχίου κελύφους και επένδυσης πρέπει να είναι σταθερό, περίπου 10-15cm, με σταθερή θερμοκρασία και υγρασία. Η συντήρηση αρχίζει γενικά εντός μίας ώρας μετά την αφαίρεση του μεταλλότυπου, με χρήση του μετακινούμενου φορείου συντήρησης με θερμική μόνωση και απαλό ψεκάσμο της επιφάνειας του σκυροδέματος με νερό κατάλληλης θερμοκρασίας. Το φορείο συντήρησης πρέπει να έχει τη δυνατότητα δημιουργίας ρυθμιζόμενων συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας στην περιοχή της επιφάνειας του σκυροδέματος για τουλάχιστον 48 ώρες μετά την μετακίνηση του μεταλλότυπου. Κατά τη διάρκεια αυτή, στην περιοχή της επιφάνειας του σκυροδέματος η υγρασία του αέρα πρέπει να διατηρείται άνω του 90%, ενώ η πτώση της θερμοκρασίας του σκυροδέματος θα είναι γραμμική και θα προσεγγίζει την θερμοκρασία του περιβάλλοντος της σήραγγας σε διάρκεια 3 έως 4 ημερών. Μετά τις 48 ώρες και τη μετακίνηση του φορείου συντήρησης, η συντήρηση θα συνεχίζεται με διατήρηση της υγρασίας του αέρα της σήραγγας σε επίπεδα όχι κάτω του 80%, με ρύθμιση των συνθηκών αερισμού, με ψεκάσμούς της επιφάνειας του σκυροδέματος ανά διαστήματα, με κατάλληλες μεμβράνες συντήρησης κλπ.

### 8.3.2 Ανοχές Μόνιμης επένδυσης

Ο έλεγχος των ανοχών αφορά την χάραξη, τις εσωτερικές διατάσεις της σήραγγας το πάχος της μόνιμης επένδυσης, και τον οπλισμό και τα ενσωματούμενα στοιχεία. Ο θεωρητικός άξονας της σήραγγας καθορίζεται σαν ο γεωμετρικός τόπος των τομών των εμφανιζόμενων στα σχέδια οριζοντίων και κατακόρυφων αξόνων των διατομών της σήραγγας. Ο Πίνακας 8-7 δίνει τη μέγιστη απόκλιση, σύμφωνα με την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-04-01-00:2009, του πραγματικού άξονα της σήραγγας και της επένδυσής της από την καθορισθείσα οριζοντιογραφική και υψομετρική θέση αυτού που φαίνεται στα σχέδια.

Πίνακας 8-7. Αποκλίσεις χάραξης

Για σήραγγες μήκους L[m]	Απόκλιση από άξονα	Μέγιστη τιμή
L ≤ 500	Οριζοντιογραφική =	± 0.01 m
	Υψομετρική =	± 0.005 m
500 < L < 1000	Οριζοντιογραφική =	Γραμμική παρεμβολή
	Υψομετρική =	
L ≥ 1.000	Οριζοντιογραφική =	± 0.02m
	Υψομετρική =	± 0.01 m

Οι διαστάσεις του εσωραχίου των σηράγγων, που θα προκύψουν μετά την κατασκευή της μόνιμης επένδυσης, δεν πρέπει να διαφέρουν σε κανένα σημείο τους από τις αντίστοιχες διαστάσεις του εσωραχίου, που προβλέπονται στη μελέτη περισσότερο από 2 cm. Το ελάχιστο πάχος της μόνιμης επένδυσης των σηράγγων, μετρούμενο μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας αυτής (περιτυπώματος σήραγγας) και της εξωτερικής επιφάνειας (η επιφάνεια της στεγανωτικής μεμβράνης, ή του εκτοξευομένου σκυροδέματος ή και της γεωμάζας), δεν πρέπει να είναι μικρότερο από το καθοριζόμενο πάχος στη Μελέτη μόνιμης επένδυσης της σήραγγας. Ο Πίνακας 8-8 δίνει τις επιτρεπόμενες ανοχές τοποθέτησης σιδηρού οπλισμού και ενσωματούμενων μεταλλικών τεμαχίων, σύμφωνα με την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-04-01-00:2009.

Πίνακας 8-8. Ανοχές στον οπλισμό

Είδος απόκλισης	Μέγεθος	Απόκλιση mm
Μάτισμα οπλισμού	Το μήκος επικάλυψης (μάτισμα) δεν θα είναι μικρότερο από το προδιαγραφόμενο πέραν των Στην περίπτωση που διαπιστωθεί σε κατασκευασθείσα επένδυση μειωμένο πάχος της ανωτέρω προστατευτικής κάλυψης, θα πρέπει να συνταχθεί ειδική μελέτη, από την οποία θα προκύπτουν τα απαραίτητα μέτρα για την επίτευξη της τεχνικής διάρκειας ζωής του έργου	25
Κάλυψη οπλισμού	Η απόκλιση της προστατευτικής κάλυψης του οπλισμού, όπου το πάχος της είναι 5.0 cm, δεν πρέπει να υπερβαίνει τα: και όπου το πάχος της είναι 7.5 cm ή περισσότερο, δεν πρέπει να υπερβαίνει τα:	6 13
Απόκλιση από την καθορισμένη θέση οπλισμού	Η απόκλιση από την δεικνυόμενη στην Μελέτη θέση δεν πρέπει να υπερβαίνει τα:	25
Ανοχές στην τοποθέτηση ενσωματούμενων μεταλλικών τεμαχίων	Η απόκλιση από την δεικνυόμενη στη Μελέτη απόσταση δεν πρέπει να υπερβαίνει τα	5
Ανοχές στην τοποθέτηση πλακών έδρασης	Η απόκλιση από την οριζόντια στάθμη δεν θα υπερβαίνει τα Η μέγιστη διαφορά στάθμης, κατά μήκος μιας διαγωνίου, δεν θα υπερβαίνει τα	3 3

### 8.3.3 Επιμέτρηση εργασιών

Η επιμέτρηση του έγχυτου σκυροδέματος της πλήρους μόνιμης επένδυσης της σήραγγας (κανονική διατομή, φωλεές, διευρύνσεις, πλαϊνά τοιχώματα, τεχνικά εισόδου στα στόμια της σήραγγας κ.λπ.), όταν απαιτείται, γίνεται σε κυβικά μέτρα σκυροδέματος, ανάλογα με την κατασκευαζόμενη κατηγορία σκυροδέματος, πλήρως κατασκευασμένης μόνιμης επένδυσης σήραγγας. Πέρα από την ποσότητα που προκύπτει από το πάχος της επένδυσης που προβλέπεται επιμετρείται και η ποσότητα, που αντιστοιχεί σε σύγκλιση μικρότερη της προβλεπόμενης.

Ο μεταλλότυπος ή ο ξυλότυπος που χρησιμοποιείται για την μόνιμη επένδυση της διατομής της σήραγγας, όταν απαιτείται, επιμετρείται σε τετραγωνικά μέτρα πραγματικής σκυροδετημένης επιφάνειας. Οι τύποι για την κατασκευή επένδυσης σε φωλεές, για την επένδυση της σήραγγας σε τυχόν διευρυμένη διατομή π.χ. χώροι στάθμευσης, περιοχές τοποθέτησης «ωστικών ανεμιστήρων» (Jet Fans) και των συναρμογών αυτών, για την επένδυση διευρύνσεων, επιμετρώνται σε τετραγωνικά μέτρα πραγματικής σκυροδετημένης επιφάνειας.

Η επιμέτρηση των χαλύβδινων ράβδων οπλισμού ή πλεγμάτων που ενσωματώνονται στη μόνιμη επένδυση, όταν απαιτείται, γίνεται σε χιλιόγραμμα βάρους των χαλύβδινων ράβδων οπλισμού ή πλεγμάτων, που πραγματικά ενσωματώθηκαν στο σκυρόδεμα της μόνιμης επένδυσης. Το βάρος θα υπολογίζεται με βάση το μήκος των ράβδων και το μοναδιαίο βάρος τους ή το μοναδιαίο βάρος των πλεγμάτων, που χρησιμοποιήθηκαν, σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα πρωτόκολλα ζύγισης αυτών. Όπου οι ράβδοι συγκολλούνται, η επιμέτρηση των επικαλύψεων των ράβδων θα γίνεται ως οι ράβδοι να είχαν επικάλυψη. Τα ειδικά στηρίγματα ανάρτησης οπλισμού (Lattice Girders, βλήτρα, επίπεδα δικτυώματα κ.λπ.) επιμετρώνται ιδιαίτερα εφ' όσον προβλέπονται και συμμετέχουν στον οπλισμό.

Η αποδοχή της περαιωμένης εργασίας περιλαμβάνει τους ελέγχους των πρωτοκόλλων παραλαβής ενσωματούμενων υλικών, τους ελέγχους των φακέλων εργαστηριακών δοκιμών σύμφωνα με τα Πρότυπα ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-03-00 και ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-01-00, τον έλεγχο γεωμετρικής ακρίβειας της κατασκευής σύμφωνα με τα σχέδια της εγκεκριμένης Μελέτης, και τον έλεγχο της επιφάνειας μετά το ξεκαλούπωμα (Σχήμα 8-12).





Σχήμα 8-12. Επιφάνεια σκυροδέματος μόνιμης επένδυσης μετά το ξεκαλούπωμα.

## Βιβλιογραφία/Αναφορές/Προδιαγραφές

### Αναφορές

- Kuesel TR (1996). “Tunnel Stabilization and lining”, ch. 5 in “Tunnel Engineering Handbook”, ed. Bickel JO, Kuesel TR, King EH.
- Braach O (1992). “Extrudierbetonbauweise für Tunnelauskleidungen”, Taschenbuch für den Tunnelbau, Essen, Verlag Gluckauf.
- BTS-ICE (2000). “Specification for Tunnelling”, Thomas Telford
- BTS-ICE (2004). “Tunnel Lining Design Guide, ch. 5.6”, Thomas Telford
- Lang G (2004). “Ein Beitrag zur Verfahrenstechnik der Schildvortriebe mit im Schildschwanz hergestellter fugenloser Stahlbetonauskleidung als alleiniger Sicherung”, Technische Universität München.
- Maidl B (2004). “Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus”, Band I, 3 Auflage, Verlag Glückauf.
- Papanikolaou VK, Kappos AJ (2014). “Practical nonlinear analysis of unreinforced concrete tunnel linings”, TUST, 40, 127-140.
- Σοφιανός Α.Ι. και Καπένης Α.Π. (2003α) «Διαστασιολόγηση της τελικής επένδυσης σηράγγων» Δελτίο ΣΠΜΕ, Μέρος Ι.
- Σοφιανός Α.Ι. και Καπένης Α.Π. (2003β) «Διαστασιολόγηση της τελικής επένδυσης σηράγγων» Δελτίο ΣΠΜΕ, Μέρος ΙΙ.

### Προδιαγραφές

- ΕΛΟΤ EN 197-1 Τσιμέντο. Μέρος 1: Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για τα κοινά τσιμέντα.
- ΕΛΟΤ EN 450-1 Ιπτάμενη τέφρα για σκυρόδεμα. Μέρος 1: Ορισμός, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης.
- ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-01-00 Παραγωγή και μεταφορά σκυροδέματος.
- ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-02-01-00 Χαλύβδινοι σπλισμοί σκυροδέματος.
- ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-04-01-00:2009 “Μόνιμη Επένδυση Σηράγγων από Έγχυτο επί τόπου Σκυρόδεμα”
- ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-03-00 Συντήρηση σκυροδέματος.

## Κεφάλαιο 9

### Σύνοψη

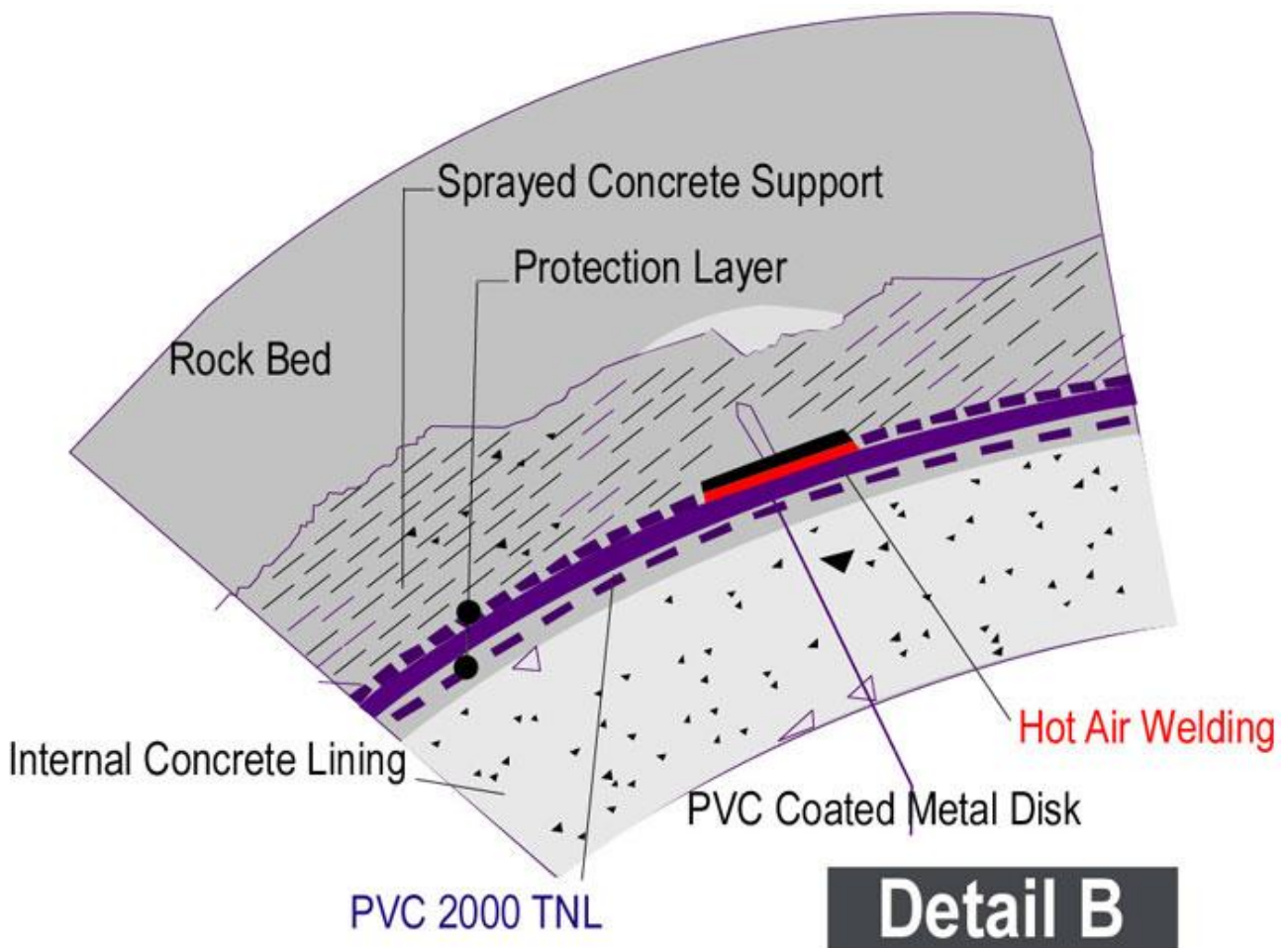
Η στεγάνωση της σήραγγας επιτυγχάνεται με γεωφάσματα και μεμβράνες.

### Προαπαιτούμενη γνώση

Μαθήματα: Υδρογεωλογία. Χρήσιμη βιβλιογραφία: Maidl (2004)

## 9. Στεγάνωση

Η στεγάνωση επιτυγχάνεται συνήθως με την τοποθέτηση γεωμεμβράνης η οποία προστατεύεται από γεωφάσμα που τοποθετείται μεταξύ αυτής και της άμεσης υποστήριξης (Σχήμα 9-1).



Σχήμα 9-1. Γεωφάσμα και στεγανωτική μεμβράνη μεταξύ άμεσης και τελικής επένδυσης

### 9.1 Προστατευτική αποστραγγιστική στρώση από γεωφάσματα

Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται είναι: γεωφάσματα, υλικά στερέωσης, και υλικά διαμόρφωσης των επιφανειών έδρασης της μεμβράνης. Τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του γεωφάσματος πρέπει να

συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις του Προτύπου ΕΛΟΤ EN 13256/A1. Ο προσδιορισμός της μακροχρόνιας αποτελεσματικότητας της προστασίας γεωυφασμάτων που βρίσκονται σε επαφή με γεωσυνθετικά διαφράγματα (μεμβράνες στεγάνωσης) ελέγχεται σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 13719. Βασικά χαρακτηριστικά της στρώσης του είναι η διαπερατότητά της κάτω από συνθήκες συμπίεσης (πίεση σκυροδέματος, νερού μακροχρόνιες δράσεις, κλπ.) και κάτω από συνθήκες θερμοκρασιακών αλλαγών, καθώς και η εφελκυστική αντοχή. Τα γεωυφάσματα πρέπει να ανθίστανται στην καταστροφή από πυρκαγιά και ειδικότερα πρέπει: (1) Να μην είναι εύφλεκτα, (2) Όταν καίγονται να μη δημιουργούν καπνό και οι απελευθερούμενες ουσίες να μην είναι τοξικές, (3) Να μην ρευστοποιούνται στις υψηλές θερμοκρασίες.

### 9.1.1 Μέθοδος εκτέλεσης της εργασίας

Με βάση τις απαιτήσεις επιτελεσματικότητας του συστήματος στεγάνωσης και αποστράγγισης της σήραγγας, καθορίζεται το πεδίο εφαρμογής των μέτρων στεγάνωσης και το αν το γεωύφασμα θα εφαρμόζεται στο σύνολο της περιφέρειας της διατομής της σήραγγας ή μόνο στον θόλο και τις παρειές. Οι εργασίες τοποθέτησης των γεωυφασμάτων ενδείκνυται να αρχίζουν αφού η σήραγγα έχει διανοιχθεί. Στην περίπτωση που τούτο δεν είναι εφικτό, απαιτούνται ενισχυμένα μέτρα ασφάλειας και οι εργασίες να διακόπτονται κατά τις ανατινάξεις. Το μέτωπο της εργασίας θα απέχει ικανή απόσταση από το μέτωπο της σήραγγας ώστε να αποφεύγονται παρενοχλήσεις και να εξασφαλίζεται ομαλή εξέλιξη των εργασιών. Επίσης θα λαμβάνονται υπόψη οι συνθήκες του εργοταξίου (δίκτυα, νερά κ.λπ.), που θα αντιμετωπίζονται κατάλληλα. Η στρώση του γεωυφάσματος τοποθετείται έξω και πριν από την στεγανωτική μεμβράνη προς το γεωυλικό, ώστε:

Να προστατεύσει την στεγανωτική μεμβράνη, που τοποθετείται στην συνέχεια, από βλάβες που δύνανται να προκληθούν από ανωμαλίες του γεωυλικού ή των στοιχείων της άμεσης υποστήριξης. Για τον ίδιο λόγο, η στρώση θα τοποθετηθεί αφού προηγηθεί εξομάλυνση του εσωραχίου της αρχικής υποστήριξης της σήραγγας, με αφαίρεση τεμαχίων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, που προεξέχουν, με άμβλυση αποτόμων ακμών, με κάλυψη ηλώσεων/αγκυρίων με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και με κοπή κάθε μεταλλικού αντικειμένου, που προεξέχει..

Να εξασφαλίσει ταχεία απαγωγή των νερών της βραχομάζας προς τους σωλήνες αποστράγγισης, ώστε να μην υπάρξει κίνδυνος ανάπτυξης υδροστατικών πιέσεων. Ο ρόλος αυτός της υδρομαστευτικής στρώσης είναι ο περισσότερο σοβαρός και γι' αυτό το σύστημα και το είδος των υλικών και των μεθόδων, επιλέγονται ώστε να ανταποκρίνονται, με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, σε μόνιμη στραγγιστική λειτουργία της υδρομαστευτικής στρώσης.

Όταν η αποστράγγιση δεν απαγορεύεται ρητά στις περιοχές μεγάλης σημειακής υδροφορίας, οι οποίες θα επισημαίνονται κατά την διάρκεια των εργασιών διάνοιξης, θα διατάσσεται σύστημα αποστραγγιστικών οπών, σύμφωνα με τις σχετικές προδιαγραφές. Οι ποσότητες των νερών που μαζεύονται από τις αποστραγγιστικές οπές, συγκεντρώνονται σε ειδικό δίκτυο πλαστικών σωλήνων, καταλλήλων διαμέτρων, και οδηγούνται στο διάτρητο αποστραγγιστικό αγωγό ή όπου αλλού προβλέπεται, χωρίς να βλάπτεται η στεγανότητα της διατομής χρήσης της σήραγγας. Η τοποθέτηση των πλαστικών σωλήνων γίνεται ταυτόχρονα με τις εργασίες εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ώστε οι σωλήνες να ενσωματώνονται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Το γεωύφασμα στηρίζεται σταθερά πάνω στα τοιχώματα της σήραγγας. Ο αριθμός των σημείων στήριξης περιορίζεται, όσο είναι δυνατό περισσότερο, ώστε το "σεντόνι" στεγάνωσης να "απλώνεται" πάνω στα τοιχώματα της σήραγγας, ελεύθερο τάσεων, όσο είναι δυνατό, κατά την εφαρμογή της καταπόνησης από την εσωτερική σκυροδέτηση. Οι λωρίδες του γεωυφάσματος επικαλύπτονται κατά 20-30 cm. Εξ άλλου, η κυματοειδής επιφάνεια που προκύπτει από τις ανατινάξεις, συνεπάγεται την ανάγκη στήριξης στα βαθύτερα σημεία, ώστε να εξασφαλίζεται ύπαρξη επαρκούς υλικού και να αποκλείεται η δημιουργία κοιλωμάτων.

Το γεωύφασμα (πλάτους 2 έως 4 m) στερεώνεται πάνω στην επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με την χρήση ταινιών ή ροδελών από συνθετική ύλη, οι οποίες καρφώνονται, πάνω στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, με χαλύβδινο καρφί. Πάνω σ' αυτές τις ροδέλες στερεώνεται, με θερμοκόλληση, η μονωτική μεμβράνη. Οι δίσκοι (ροδέλες) στερέωσης παρουσιάζουν εσοχή τεσσάρων 4 mm βάθους, για την υποδοχή της κεφαλής του καρφιού, και διάμετρο ή εύρος κατ' ελάχιστο ογδόντα 80 mm. Κάτω από τους δίσκους της συνθετικής ύλης και από την κεφαλή του καρφιού, προβλέπεται η τοποθέτηση μεταλλικού δίσκου με ελάχιστη διάμετρο είκοσι 20 mm και ελάχιστο πάχος ένα 1 mm, έτσι ώστε κατά το χτύπημα των καρφιών να μην παρουσιάζεται "σταμπάρισμα". Γενικά, σε περιπτώσεις ομοιόμορφων εκσκαφών βράχου, τρία σημεία

στερέωσης κατά μέσο όρο ανά τετραγωνικό μέτρο επαρκούν. Σε περιπτώσεις πάντως εκτεταμένων ανωμαλιών στις εκσκαφές, ιδίως στην περιοχή της οροφής της σήραγγας, καθίσταται αναγκαία η χρήση μεγαλύτερου αριθμού σημείων στήριξης. Ο αριθμός των σημείων στερέωσης πρέπει να ανέρχεται, κατ' ελάχιστο, σε: α. Ένα τεμάχιο ανά  $m^2$  στην περιοχή του δαπέδου, β. Δύο τεμάχια ανά  $m^2$  στην περιοχή των παρειών, γ. Τρία τεμάχια ανά  $m^2$  στην περιοχή της οροφής.

Η όλη εκτέλεση της τοποθέτησης του γεωφάσματος, όπως περιγράφηκε, πραγματοποιείται με τη βοήθεια κινητού φορείου (σκαλωσιάς). Η διάταξη του φορείου αυτού θα είναι τέτοια, ώστε να μην παρεμποδίζεται η ροή των άλλων εργασιών που γίνονται στην σήραγγα. Ο κατάλληλος σχεδιασμός του φορείου είναι ουσιαστικής σημασίας για την επίτευξη ικανοποιητικού ρυθμού εργασίας. Η ασφάλεια στον χώρο της εργασίας επιβάλλει, εξ άλλου, συνεχή και επαρκή φωτισμό.

### 9.1.2 Επιθυμητά χαρακτηριστικά γεωφασμάτων

Ο Πίνακας 9-1 δίνει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του τύπου του γεωφάσματος (GEOTEXTILE) από αυτούς που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Οι τιμές των χαρακτηριστικών του πίνακα είναι οι ελάχιστες που γίνονται αποδεκτές. Επισημαίνεται ιδιαίτερα, ότι βασικά χαρακτηριστικά της στρώσης του είναι η διαπερατότητά της και μάλιστα κάτω από συνθήκες συμπίεσης (πίεση σκυροδέματος, νερού, μακροχρόνιες δράσεις κ.λπ.) και κάτω από συνθήκες θερμοκρασιακών αλλαγών, καθώς και η εφελκυστική του αντοχή.

Πίνακας 9-1. Χαρακτηριστικά στρώσης γεωφάσματος

Ιδιότητες	Μέθοδος ελέγχου	Μονάδα	Χαρακτηριστικά
Αναλλοίωτο			Απεριόριστα
Μη διαλυτότητα σε οποιοδήποτε είδος υπογείων νερών			Απόλυτα
Μη βλαπτικότητα σε πόσιμο νερό			Ουδέτερο
Ευφλεκτικότητα			Δύσκολη
Διαπερατότητα κάθετα προς την επιφάνεια της στρώσης (ροή υπό πίεση στήλης νερού 10 m)	ASTM D4491-99a (2004) <sup>1</sup>	lt/sec/m <sup>2</sup>	≥ 60
Συντελεστής διαπερατότητας κάθετα και παράλληλα προς την επιφάνεια στρώσης υπό κάθετη πίεση 2 kPa	ASTM D4716-04 <sup>2</sup>	cm/sec	≥ 10 <sup>-1</sup>
Βάρος/μονάδα επιφάνειας	EN 29073-1 <sup>3</sup>	gr/m <sup>2</sup>	≥ 380
Ανεκτή διαφορά από το ονομαστικό βάρος ανά μονάδα επιφάνειας		%	≤ 10
Ελάχιστο πάχος	EN 29073-2 <sup>4</sup>	mm	≥ 3
Ανεκτή διαφορά από το ονομαστικό πάχος		%	≤ 10
Αντοχή σε εφελκυσμό κατά την διαμήκη, εγκάρσια και διαγώνια έννοια (σε λωρίδα πλάτους 50 mm)	EN 29073-3 * <sup>5</sup>	kN/m	≥ 16
Επιμήκυνση ρηγμάτων κατά την διαμήκη, εγκάρσια και διαγώνια έννοια	EN 29073-3 *	%	≥ 60
Αντοχή σε διάτρηση	ASTM D4833-00e1 <sup>6</sup>	N	≥ 550

\* (ή ισοδύναμο ASTM)

<sup>1</sup> ASTM D4491-99a (2004), Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity (Πρότυπη δοκιμή υδροπερατότητας γεωφασμάτων με την μέθοδο της διηλεκτρικής σταθεράς)

<sup>2</sup> ASTM D4716-04, Test Method for Determining the (In-plane) Flow Rate per Unit Width and Hydraulic Transmissivity of a Geosynthetic Using a Constant Head (Μέθοδος προσδιορισμού της διαπερατότητας των γεωφασμάτων κατά μονάδα πλάτους κατά το επίπεδό τους υπό σταθερή υδραυλική πίεση)

<sup>3</sup> EN 29073-1, Textiles - Test Methods for Nonwoven - Part 1: Determination of Mass Per Unit Area (Κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα - Μέθοδοι δοκιμών για μη υφαντά. Μέρος 1: Προσδιορισμός της μάζας ανά μονάδα επιφάνειας)

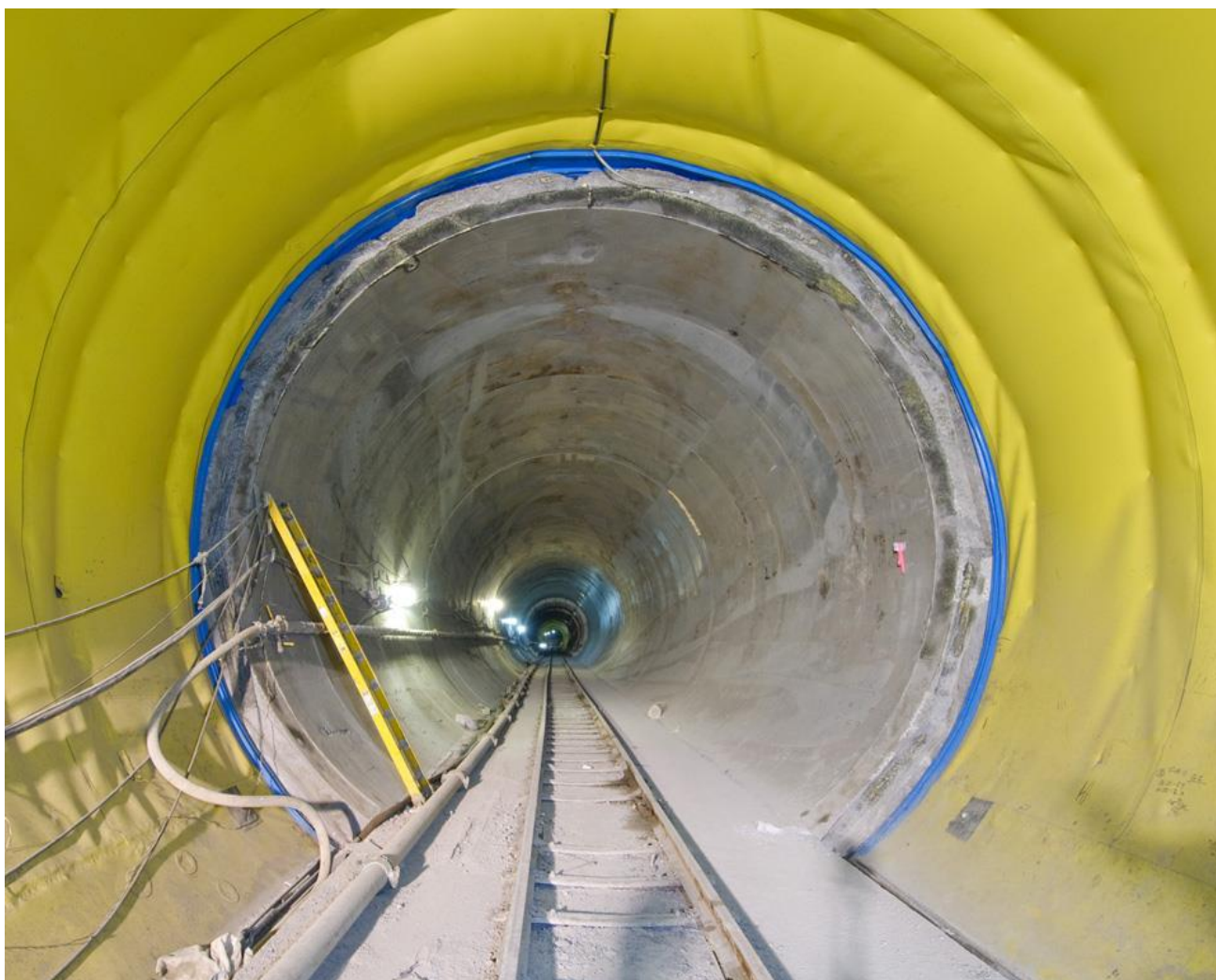
<sup>4</sup> EN 29073-2, Textiles - Test Methods for Nonwovens - Part 2: Determination of Thickness Superseded by EN ISO 9073-2: 1996 (Μέθοδοι δοκιμών μη υφαντών προϊόντων. Μέρος 2: Προσδιορισμός του πάχους -βλ. και νεώτερο EN ISO 9073-2: 1996)

<sup>5</sup> EN 29073-3, Textiles - Test Methods for Nonwovens - Part 3: Determination of Tensile Strength and Elongation (Μέθοδοι δοκιμών μη υφαντών προϊόντων. Μέρος 3: Προσδιορισμός της εφελκυστικής αντοχής και της επιμήκυνσης)

<sup>6</sup> ASTM D4833-00e1, Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geotextiles, Geomembranes, and Related Products (Πρότυπη δοκιμή προσδιορισμού της αντοχής σε διάτρηση των γεωσυνθετικών υλικών)

## 9.2 Στεγάνωση με συνθετικές μεμβράνες

Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται είναι: - Μεμβράνες, Υλικά στερέωσης, Υλικά διαμόρφωσης των επιφανειών έδρασης της μεμβράνης. Οι συνθετικές στεγανωτικές μεμβράνες κατασκευάζονται από υψηλά πολυμερή, συνήθως από χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC και PVC-P), από πολυαιθυλένιο (PE), από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE), από εύκαμπτες πολυολεφίνες (FPO), από πολυπροπυλένιο (PP). Οι μεμβράνες γενικά είναι εύκαμπτες, ανθεκτικές και με καλή εργασιμότητα. Η επιλογή τους, αν δεν προβλέπεται συγκεκριμένος τύπος, γίνεται στην βάση τις απαιτήσης τεχνικής διάρκειας ζωής της μεμβράνης, της χημικής σύστασης του γεωυλικού και του νερού, της υδραυλικής πίεσης που αναμένεται να επενεργεί στην σήραγγα και του εντατικού καθεστώτος που προβλέπεται να βρεθεί η μεμβράνη κατά την τεχνική διάρκεια ζωής της. Η στεγανωτική μεμβράνη πρέπει να συμμορφώνεται στις απαιτήσεις του προτύπου ΕΛΟΤ EN 13491/A1. Σημειώνεται ότι οι μονωτικές μεμβράνες πρέπει να ανθίστανται στην καταστροφή από πυρκαγιά και ειδικότερα πρέπει: 1) Να μην είναι εύφλεκτες, 2) Όταν καίγονται να μην δημιουργούν καπνό και οι απελευθερούμενες ουσίες να μην είναι τοξικές, 3) Να μην ρευστοποιούνται στις υψηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 9-2. Γεωμεμβράνη εξωτερικά της τελικής επένδυσης

### 9.2.1 Μέθοδος εκτέλεσης της εργασίας

Οι γεωμεμβράνες τοποθετούνται στην περιφέρεια της σήραγγας (Σχήμα 9-2) επάνω στο γεωφάσμα. Η τοποθέτησή της πραγματοποιείται από το ειδικό φορείο τοποθέτησης του γεωφάσματος. Με βάση τις απαιτήσεις επιτελεσματικότητας του συστήματος στεγάνωσης και της σήραγγας, καθορίζονται το πεδίο εφαρμογής των μέτρων στεγάνωσης και το αν η μεμβράνη θα εφαρμόζεται στο σύνολο της περιφέρειας της διατομής της σήραγγας ή μόνο στον θόλο και στις παρειές. Επειδή κατά την κατασκευή της σήραγγας επικρατούν δύσκολες συνθήκες, είναι προτιμότερο οι εργασίες στεγάνωσης να αρχίζουν μόνο αφού η σήραγγα έχει πλήρως ανοιχθεί. Στην περίπτωση που τούτο δεν είναι εφικτό, προκύπτουν ουσιαστικές δυσκολίες για την μεταφορά των υλικών, απαιτούνται ενισχυμένα μέτρα ασφάλειας και επίσης πρέπει οι εργασίες να διακόπτονται κατά τις ανατινάξεις. Το μέτωπο της στεγάνωσης πρέπει να απέχει ικανή απόσταση από το μέτωπο της σήραγγας ώστε να αποφεύγονται παρενοχλήσεις και να εξασφαλίζεται ομαλή εξέλιξη των εργασιών. Επίσης είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη οι συνθήκες του εργοταξίου (δίκτυα, νερά κ.λπ.) και να αντιμετωπίζονται κατάλληλα. Πριν την έναρξη της εργασίας για την τοποθέτηση των υλικών υδατοστεγάνωσης, γίνεται, τμηματικά, η παραλαβή της επιφάνειας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, μαζί με τον έλεγχο για τις ελάχιστες διαστάσεις της διατομής.

Η ποιότητα της επιφάνειας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος συμβάλλει σημαντικά στην καλή λειτουργία του όλου συστήματος της στεγάνωσης, γιατί πάνω σ' αυτή γίνεται η στερέωση του συστήματος. Είναι επιβεβλημένο το στρώμα εξομάλυνσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος να καλύπτει όλες τις αιχμές, προεξοχές, κοιλώματα, τις ίνες που πιθανόν εμπεριέχονται, καθώς επίσης και τις στερεώσεις ή τα αγκύρια που χρησιμοποιούνται και μάλιστα με τρόπο τέτοιο που να εξασφαλίζονται οι εξής προϋποθέσεις:

Επαρκής αντοχή και σταθερότητα.

Στρώση εκτοξευομένου σκυροδέματος με λεπτόκοκκα αδρανή μεγίστης διαμέτρου κόκκων 6 mm και ελαχίστου πάχους 30 mm όπου απαιτείται.

Λόγος μήκους προς ύψος στις τοπικές προεξοχές, τουλάχιστον 5:1 στην περίπτωση ελαστικών μεμβρανών πάχους μέχρι 2 mm, ενώ για σκληρότερες ή χονδρότερες μεμβράνες χρειάζεται σχέση 10:1 τουλάχιστον.

Ακτίνα "στρογγυλευμάτων" τουλάχιστον 20 cm.

Να κατασκευάζεται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο πάχος που απαιτείται για τη στατική λειτουργία της αρχικής υποστήριξης έχοντας ενσωματώσει τις κεφαλές των προβλεπόμενων αγκυρίων.

Αφού σταθεροποιηθεί η βραχομάζα και μηδενιστεί ο ρυθμός εξέλιξης των τυχόν παραμορφώσεων μετά την διάνοιξη, να εφαρμόζεται η στρώση του εκτοξευομένου σκυροδέματος (εξομάλυνσης), με διαβάθμιση κόκκων 0 - 6 mm.

Η στεγάνωση του θόλου ακολουθεί την περιφέρεια της σήραγγας και απολήγει στην σύνδεση με τον αποστραγγιστικό σωλήνα στην βάση της διατομής ή με τη μεμβράνη του πυθμένα. Όταν προβλέπεται μεμβράνη και στον πυθμένα (Σχήμα 9-3), μετά την διάστρωση και τοποθέτησή της καλύπτεται με στρώση εκτοξευομένου σκυροδέματος πάχους μέχρι 5 cm ή τσιμεντοκονία για προστασία της από τις εργασίες τοποθέτησης του οπλισμού κ.λπ. Οι λωρίδες της μεμβράνης αλληλεπικαλύπτονται υποχρεωτικά, για την συγκόλληση μεταξύ τους κατά απόλυτα στεγανό τρόπο. Η συγκόλληση γίνεται με την μέθοδο του θερμού πυρήνα (hot air double welding). Η συνήθης επικάλυψη των φύλλων ανέρχεται σε 13-15 cm.



Σχήμα 9-3. Στεγάνωση του δαπέδου της σήραγγας

Η θερμοκόλληση της μεμβράνης γίνεται στην επιφάνεια των δίσκων (ροδελών). Έτσι σε μία αύξηση των φορτίων της βραχομάζας (π.χ. λόγω δυναμικής καταπόνησης) η μεμβράνη απλά θα αποκολληθεί από κάποιους δίσκους, χωρίς να σχισθεί. Η ποιότητα της συγκόλλησης των ραφών προκύπτει σαν συνισταμένη της σωστής θερμοκρασίας συγκόλλησης και της κατάλληλης μηχανικής πίεσης που ασκείται πάνω στην θέση τοπικής τήξης του υλικού των μεμβρανών στο σημείο της συγκόλλησης. Η ραφή θα είναι υποχρεωτικά διπλή, για λόγους ασφαλείας της στεγάνωσης και για να είναι δυνατός ο έλεγχος της στεγανότητάς της.



Χρησιμοποιούνται αυτόματες μηχανές συγκόλλησης δι' επαφής με μεταλλικό θερμαντικό στοιχείο. Οι αυτόματες αυτές μηχανές διαθέτουν ειδικό σύστημα, με μόνιμη διάταξη αντιστήριξης, που κινείται με χωριστό μικρο-κινητήρα. Σαν αποτέλεσμα αυτού, η συγκόλληση είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί ανεξάρτητα από την ύπαρξη ή όχι υπόβαθρου στήριξης των μεμβρανών. Η ταχύτητα της συσκευής ρυθμίζεται σύμφωνα με την απαιτούμενη θερμοκρασία και μάλιστα με δυνατότητα συνεχούς διαβάθμισης (ηλεκτρονική ρύθμιση) και κατά συνέπεια στον χειριστή απομένει απλώς να καθοδηγεί την συσκευή και να επιμελείται για την διατήρηση επαρκούς επικάλυψης και για την ακινητοποίηση του μηχανήματος, σε περίπτωση κάποιας ανωμαλίας. Η συγκολλητική ραφή, με το παραπάνω μηχανήμα, δύναται να αρχίσει είτε από το ένα είτε από το άλλο άκρο της μεμβράνης στο μήκος της και, σε γενική περίπτωση, συνεχίζεται "μια και έξω", δηλαδή σε μια διαρκή φάση, μέχρι το άλλο άκρο.

Το θερμαντικό στοιχείο έχει εσοχή, πλάτους 10 mm περίπου στο κέντρο, ώστε να δημιουργείται μια γεωμετρική, εκ των προτέρων προσδιορισμένη, διακοπή της συνεχούς ραφής στο σημείο αυτό. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται καθ' όλο το μήκος της ραφής ένα "αυλάκι", ενώ η ραφή καθίσταται διπλή. Το ολικό πλάτος της διπλής ραφής πρέπει να είναι 30 mm, εφ' όσον χρησιμοποιείται αυτόματη μηχανή, ή 40 mm, προκειμένου για χρήση μονάδων θερμού αέρα. Το αυλάκι μεταξύ των δυο ραφών χρησιμεύει στην συνέχεια στον έλεγχο της στεγανότητας και της μηχανικής αντοχής της ραφής με τη βοήθεια πιεσμένου αέρα, που εισπίζεται μέσα σ' αυτό υπό πίεση 200 kPa επί 10 λεπτά της ώρας. Πριν από τον έλεγχο πρέπει να επιβεβαιωθεί το ότι οι ραφές έχουν κρυσταλλωθεί επαρκώς. Στην πράξη, οι ραφές ελέγχονται όλες μαζί προς το τέλος κάθε βάρδιας εργασίας.

Η επιφάνεια της μεμβράνης που συγκολλείται στο δίσκο πρέπει να υπερβαίνει το 80% της επιφάνειας του δίσκου. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται κατά την στερέωση της μεμβράνης για την αποφυγή δημιουργίας πτυχών μετά την σκυροδέτηση, οι οποίες έχει αποδειχθεί ότι αντιπροσωπεύουν αδύναμα σημεία στο όλο σύστημα. Οι κυριότερες αιτίες δημιουργίας πτυχώσεων είναι ανώμαλη ή κυματοειδής επιφάνεια έδρασης, ανεπαρκής αριθμός και ακατάλληλη κατανομή των σημείων στερέωσης, τριβή μεταξύ μεμβράνης και προστατευτικής στρώσης, διαδικασία σκυροδέτησης σε συνδυασμό με την εκλυόμενη θερμότητα από την ενυδάτωση του τσιμέντου. Η όλη εκτέλεση της στεγάνωσης, όπως περιγράφηκε ήδη, πραγματοποιείται με την βοήθεια κινητού φορείου (σκαλωσιάς). Η διάταξη του φορείου αυτού είναι τέτοια, ώστε να μην παρεμποδίζεται η ροή των άλλων εργασιών, που γίνονται στην σήραγγα. Ο κατάλληλος σχεδιασμός του φορείου είναι ουσιαστικής σημασίας για την επίτευξη ικανοποιητικού ρυθμού εργασίας. Η ασφάλεια στον χώρο της εργασίας επιβάλλει συνεχή και επαρκή φωτισμό.

Οι κατασκευαστικοί αρμοί στην μόνιμη επένδυση με σκυρόδεμα αντιπροσωπεύουν μια επικίνδυνη περιοχή στην όλη στεγάνωση. Συνήθως στην περιοχή αυτή αναπτύσσονται μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις πάνω στις μεμβράνες. Εξ άλλου δημιουργούνται κίνδυνοι και κατά την φάση της τοποθέτησης και εφαρμογής του μεταλλότυπου της σκυροδέτησης. Γι' αυτόν το λόγο χρειάζεται πρόσθετη εξασφάλιση της στεγανωτικής μεμβράνης στη θέση των κατασκευαστικών αρμών, που επιτυγχάνεται με επικόλληση πρόσθετης προστατευτικής λωρίδας από το ίδιο υλικό πλάτους 50 cm, που τοποθετείται πάνω στην κυρίως ραφή, περιφερειακά και συγκολλάται με χειροκίνητη μηχανή.

Η σύνδεση των στεγανωτικών κατασκευών εντός της σήραγγας με αυτές των εισόδων γίνεται σε περιοχή ευαίσθητη σε καθιζήσεις και γι' αυτό θα πρέπει να διαμορφωθεί ιδιαίτερα. Κατά κανόνα οι κατασκευές εισόδου διαμορφώνονται μετά την ολοκλήρωση της εσωτερικής επένδυσης με σκυρόδεμα και κατά συνέπεια στον χρόνο που μεσολαβεί θα πρέπει να προστατεύεται η στεγάνωση με βοηθητικά μέσα. Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής της εισόδου, απομακρύνεται η βοηθητική στερέωση και σφραγίζεται ο αρμός. Η είσοδος που κατασκευάζεται με ανοικτή μέθοδο στεγανώνεται αφού περιληφθεί η μεμβράνη μεταξύ δύο γεωφασμάτων προστασίας. Εάν αργότερα επικαλυφθεί με κονίαμα, τότε συνιστάται να γίνει προστατευτική επικάλυψη με σκυρόδεμα πάχους τουλάχιστον 5 cm. Η τελική στερέωση της στεγανωτικής μεμβράνης περιμετρικώς της εισόδου πραγματοποιείται μηχανικά με κατάλληλη λάμα ή με συγκόλληση σε ειδικά προφίλ ενσωματούμενα στο σκυρόδεμα κατά την έγχυση.

Διελεύσεις διαφόρων στοιχείων (σωλήνων κ.λπ.) αντιμετωπίζονται κυρίως με κατασκευές φλαντζών. Η στρώση προστασίας (γεωφάσμα) δεν παρεμβάλλεται μεταξύ των φλαντζών. Η μεμβράνη στεγάνωσης συσφίγγεται μεταξύ δύο στρώσεων NEOPREN πάχους 5 mm. Οι διαστάσεις των φλαντζών προδιαγράφονται ανάλογα με την πίεση του νερού.

Ο Πίνακας 9-2 δίνει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του τύπου της μεμβράνης που επιλέγεται από αυτές που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Οι τιμές των χαρακτηριστικών του πίνακα είναι οι ελάχιστες που γίνονται αποδεκτές.

Πίνακας 9-2. Χαρακτηριστικά στεγανωτικής μεμβράνης

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Μέθοδος Ελέγχου	Μονάδα	Χαρακτηριστικά
Πάχος	DIN 53370:1976-02* <sup>1</sup>	mm	≥ 2
Αντοχή σε θραύση (διαμήκης και εγκάρσια)	EN ISO 527-1:1996* <sup>2</sup>	MPa	≥ 15
Επιμήκυνση σε θραύση (διαμήκη και εγκάρσια)	EN ISO 527-1:1996*	%	≥ 300
Απομένουσα αντοχή θραύσης (διαμήκης και εγκάρσια)	EN ISO 527-1:1996*	MPa	≥ 50
Θλιπτική τάση για 20% παραμόρφωση	EN ISO 527-1:1996* <sup>3</sup>	MPa	≥ 20
Πλαστική παραμένουσα παραμόρφωση μετά από 20% θλιπτική παραμόρφωση		%	≤ 5
Αντοχή θλίψης σε χάραξη (σχισμή)	EN ISO 527-1:1996*	MPa	≥ 10
Μεταβολή διαστάσεων (διαμήκων και εγκάρσιων) λόγω γήρανσης	ASTM D1204-02 <sup>4</sup>	%	≤ ±2
Μέτρο ελαστικότητας	ASTM D882-02 <sup>5</sup>	MPa	≥ 120
Αντίσταση σε διάτρηση για ύψος πτώσης 750 mm	BS 6906-2:1989-01-31 <sup>6</sup> ASTM D1922-03α <sup>7</sup>	-	ουδεμία διάτρηση
Υδροαπορροφητικότητα	ISO 8361-1:1991* <sup>8</sup>	%	≤ 2
Αντοχή σε σχίσμο	ASTM D1922-03α	kN/m	≥ 30
Αντοχή σε διάδοση σχισίματος	DIN 53363:2003-10* <sup>9</sup>	N	≥ 250
Αντοχή σε κρούση	ASTM D1709-04 <sup>10</sup>	kN/m	≥ 150
Συρρίκνωση	DIN 16729:1984-09* <sup>11</sup>	%	≤ 2
Αντοχή σε θραύση από υδροστατική πίεση	ASTM D751-00e1 <sup>12</sup>	bar	≥ 10
Ποιότητα κατά την διάρκεια και μετά την φύλαξη σε 80° C [Μη ρηγμάτωση (διαμήκης και εγκάρσια) σε χαμηλές θερμοκρασίες]	DIN 16729:1984-09*	oC	-20
Ανθεκτικότητα σε όξινα και αλκαλικά εδάφη	DIN 16729:1984-09*	%	ανεπηρέαστη
Συμπεριφορά των αρμών συγκόλλησης (πίεση αέρα μέχρι 0,5 bar, εφαρμοζόμενη τουλάχιστον για 10 min)	ASTM D4885-01 <sup>13</sup>	-	ουδεμία διαφυγή
Αποβολή πτητικών	ASTM D4885-01	%	≤ 1
Σκληρότητα		Shore	≥ 75

\* (ή ισοδύναμο ASTM)

<sup>1</sup> DIN 53370:1976-02, Testing of plastic films; determination of the thickness by mechanical feeling

<sup>2</sup> EN ISO 527-1:1996, Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles (ISO 527-1:1993 including Corr 1:1994). -- Πλαστικά. Προσδιορισμός εφελκυστικών ιδιοτήτων. Μέρος 1: Γενικές αρχές

<sup>3</sup> EN ISO 527-1:1996, Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles (ISO 527-1:1993 including Corr 1:1994). -- Πλαστικά. Προσδιορισμός εφελκυστικών ιδιοτήτων. Μέρος 1: Γενικές αρχές

<sup>4</sup> ASTM D1204-02, Standard Test Method for Linear Dimensional Changes of Nonrigid Thermoplastic Sheeting or Film at Elevated Temperature -- Πρότυπη δοκιμή προσδιορισμού γραμμικής διαστολής ευκάμπτων θερμοπλαστικών. Δοκιμές μεμβρανών ή υμένων σε υψηλές θερμοκρασίες

<sup>5</sup> ASTM D882-02, Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting -- Πρότυπη δοκιμή εφελκυστικής αντοχής λεπτών πλαστικών μεμβρανών

<sup>6</sup> BS 6906-2:1989-01-31, Methods of test for geotextiles - Determination of the apparent pore size distribution by dry sieving -- Μέθοδοι δοκιμής γεωφασμάτων. Προσδιορισμός της κατανομής των πόρων κατά μέγεθος με την μέθοδο του κοσκινίσματος σε ξηρή κατάσταση

<sup>7</sup> ASTM D1922-03α, Standard Test Method for Propagation Tear Resistance of Plastic Film and Thin Sheeting by Pendulum Method – Πρότυπη δοκιμή προσδιορισμού της αντίστασης μετάδοσης σχισίματος πλαστικών υμένων και λεπτών φύλλων με την μέθοδο του εκκρεμούς.

<sup>8</sup> ISO 8361-1:1991, Thermoplastics pipes and fittings -- Water absorption -- Part 1: General test method -- Θερμοπλαστικοί σωλήνες και εξαρτήματα. Απορρόφηση νερού. <έρος 1: Γενική δοκιμή

<sup>9</sup> DIN 53363:2003-10, Testing of plastic films - Tear test using trapezoidal test specimen with incision -- Δοκιμές πλαστικών μεμβρανών. Δοκιμή απόσχισης επί τραπεζοειδούς σχήματος δοκιμίου με εγχάραξη

<sup>10</sup> ASTM D1709-04, Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastic Film by the Free-Falling Dart Method -- Πρότυπη δοκιμή προσδιορισμού της αντοχής πλαστικών μεμβρανών σε κρούση με την μέθοδο του πίπτοντος βέλους

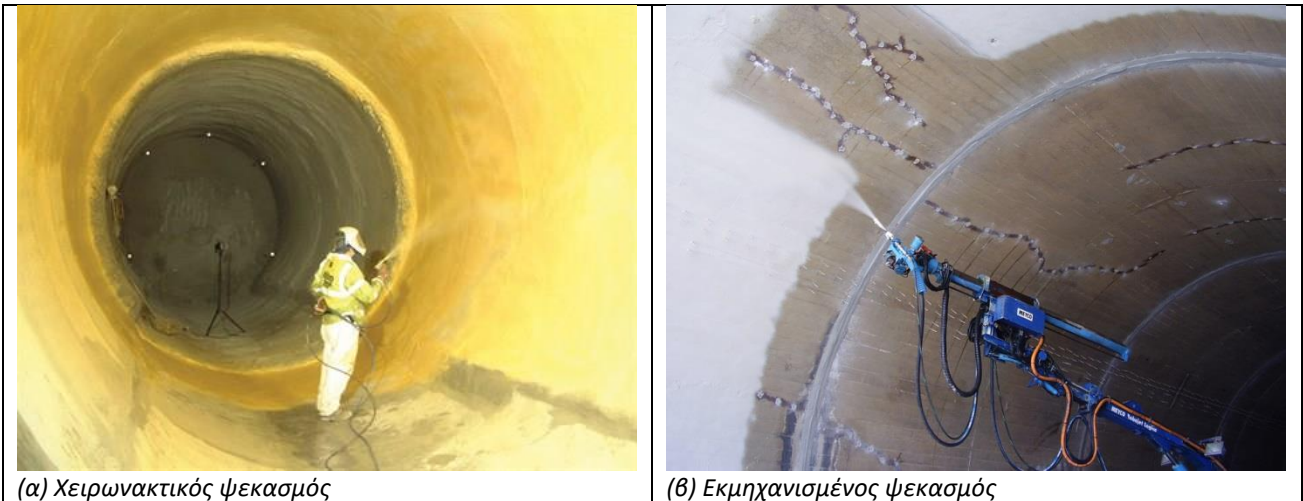
<sup>11</sup> DIN 16729:1984-09, Ethylene copolymer bitumen (ECB) plastic roofing sheeting and plastic sealing sheeting; Requirements -- Φύλλα ασφαλτικού αιθυλενικού συμπολυμερούς επιστέγασης και στεγάνωσης. Απαιτήσεις

<sup>12</sup> ASTM D751-00e1, Standard Test Methods for Coated Fabrics -- Πρότυπη δοκιμή επενδεδυμένων υφασμάτων

<sup>13</sup> ASTM D4885-01, Standard Test Method for Determining Performance Strength of Geomembranes by the Wide Strip Tensile Method -- Πρότυπη δοκιμή προσδιορισμού λειτουργικής αντοχής γεωμεμβρανών με την μέθοδο εφελκυσμού ευρείας λωρίδας.

### 9.3 Στεγάνωση σηράγγων με ψεκασμό

Η στεγάνωση με ψεκασμό (Σχήμα 9-4) εκτελείται απλούστερα και είναι οικονομικότερη. Εν τούτοις δεν εφαρμόζεται συχνά, καθόσον αφενός μεν δεν επιτρέπει την υδρομάστευση, αφετέρου δε δεν εξασφαλίζει σε όλες τις περιπτώσεις την αδιαπερατότητα.



Σχήμα 9-4. Ψεκαζόμενη στεγάνωση

### 9.4 Επιμέτρηση της εργασίας

Η επιμέτρηση της πλήρους κατασκευής προστατευτικής-αποστραγγιστικής στρώσης από γεωφάσμα καθώς και της στεγάνωσης με συνθετικές μεμβράνες, γίνεται σε τετραγωνικά μέτρα τελειωμένης επιφάνειας σήραγγας με στρώση γεωφάσματος και συνθετικής μεμβράνης, αντίστοιχα.

## Βιβλιογραφία/Αναφορές

BTS-ICE (2000). “Specification for Tunnelling”, Thomas Telford

Maidl B (2004). “Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus”, Band I, 3 Auflage, Verlag Glückauf.

### Προδιαγραφές

ΕΛΟΤ EN 13491/A1 Γεωσυνθετικά διαφράγματα – Απαιτούμενα χαρακτηριστικά για χρήση διαφράγματος υγρών στην κατασκευή σηράγγων και υπόγειων έργων - Geosynthetic barriers - Characteristics required for use as a fluid barrier in the construction of tunnels and underground structures.

ΕΛΟΤ EN 13256 A1 Γεωφάσματα και προϊόντα σχετικά με γεωφάσματα – Απαιτούμενα χαρακτηριστικά για χρήση στην κατασκευή σηράγγων και υπόγειων κατασκευών - Geotextiles and geotextile-related products – Required characteristics for use in the construction of tunnels and underground structures.

ΕΛΟΤ EN 13719 Γεωφάσματα και σχετικά προϊόντα – Προσδιορισμός της μακροχρόνιας αποτελεσματικότητας της προστασίας γεωφαιμάτων που βρίσκονται σε επαφή με γεωσυνθετικά διαφράγματα - Geotextiles and geotextile-related products - Determination of the long term protection efficiency of geotextiles in contact with geosynthetic barriers.

CEN/TR 15019 Γεωφάσματα και προϊόντα σχετικά με γεωφάσματα – Έλεγχος ποιότητας στο εργοτάξιο - Geotextiles and geotextile-related products - On-site quality control.

ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-05-01-00. «Στεγάνωση επένδυσης σηράγγων με συνθετικές μεμβράνες - Tunnels lining waterproofing with synthetic membranes», ΦΕΚ Τεύχος Β, 36183-36196

ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-05-02-00. «Γεωφάσματα προστασίας ή αποστράγγισης στεγανοποιητικών μεμβρανών επένδυσης σηράγγων - Geotextiles for the protection or drainage of tunnel lining waterproofing membranes», ΦΕΚ Τεύχος Β, 36197-36208

## Κεφάλαιο 10

### Σύνοψη

Οι σήραγγες που διανοίγονται από ασπίδες επενδύονται συνήθως με προκατασκευασμένα τόξα από σκυρόδεμα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους ώστε να διαμορφώσουν δακτυλίους. Μετά την κατασκευή τους υφίστανται φορτίσεις τόσο κατά την αποθήκευση, μεταφορά και τοποθέτηση, όσον και κατά τη διάνοιξη της σήραγγας και τη λειτουργία της. Η γεωμετρική μορφή των τόξων επιτρέπει την ευθύγραμμη αλλά και την καμπύλη χάραξη της σήραγγας.

### Προαπαιτούμενη γνώση

Μαθήματα: Οπλισμένο σκυρόδεμα. Χρήσιμη βιβλιογραφία: Wittke. (2007),

## 10. Μόνιμη επένδυση από προκατασκευασμένα στοιχεία<sup>2</sup>

### 10.1 Γενικά

Η πρώτη επιτυχής διάνοιξη κάτω από τον Τάμεση με την τοποθέτηση επένδυσης από πλίνθους αμέσως πίσω από την ασπίδα, οδήγησε γρήγορα στην εισαγωγή μεγαλύτερων προκατασκευασμένων στοιχείων που ταίριαζαν με τη νέα μέθοδο (Maidl et al., 1996). Στις σύγχρονες διανοίξεις σηράγγων με ασπίδες ολομέτωπης κοπής, η επένδυση συνήθως ακολουθεί πίσω από την ασπίδα και συνίσταται από προκατασκευασμένα τόξα οπλισμένου σκυροδέματος. Τα συναρμολογημένα τόξα διαμορφώνουν το δακτύλιο της επένδυσης. Η μόνιμη επένδυση από προκατασκευασμένα τόξα, αποτελεί συνήθως εκτός από στατικό στοιχείο, και στοιχείο τελικής επιφάνειας του εσωτερικού της σήραγγας.

#### 10.1.1 Υλικά κατασκευής

Για την κατασκευή των στοιχείων ως υλικά χρησιμοποιούνται: Σκυρόδεμα, Οπλισμοί από χάλυβα, και Ίνες οπλισμού.

Το σκυρόδεμα πρέπει να συμμορφώνεται προς τις απαιτήσεις του Προτύπου ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-01-00. Η κατηγορία του σκυροδέματος είναι υψηλή και ενδεχομένως έχει ειδικές απαιτήσεις. Η σύνθεση πρέπει να διασφαλίζει την ικανοποίηση όλων των απαιτήσεων της επένδυσης, με την ελάχιστη ποσότητα τσιμέντου, για τη μείωση της εκλυόμενης θερμότητας και την αποφυγή ανάπτυξης ρωγματώσεων. Ο χρόνος απομάκρυνσης του στοιχείου από τον τύπο είναι ιδιαίτερα σημαντικός, και η σύνθεση πρέπει να ανταποκρίνεται σε αυτόν. Αν δεν ορίζεται διαφορετικά, το τσιμέντο του σκυροδέματος του θόλου είναι υψηλής πρώιμης αντοχής (R), όπως ορίζεται στην παρ. 7.1.2. του προτύπου (ΕΛΟΤ) EN 197-1. Σε περίπτωση χρήσης ιπτάμενης τέφρας, αυτή συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις του προτύπου (ΕΛΟΤ) EN 450-1. Αντίστοιχα, η πυριτιακή παιπάλη θα συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις των προτύπων (ΕΛΟΤ) EN 13263-1 & -2.

Ο οπλισμός του σκυροδέματος συμμορφώνεται στις απαιτήσεις του Προτύπου (ΕΛΟΤ) ΤΠ 1501-01-02-01-00.

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται για οπλισμό σκυροδέματος πληρούν τις απαιτήσεις των προτύπων (ΕΛΟΤ) EN 14889-1 & -2 για τις χαλύβδινες, και (ΕΛΟΤ) EN 14845-1 & -2 για τις συνθετικές. Οι ίνες φέρουν σύστημα αγκύρωσης στην μάζα του σκυροδέματος (π.χ. διευρυμένα άκρα, κυματοειδή μορφή κ.λπ.) και έχουν τη δυνατότητα ομοιόμορφης κατανομής στη μάζα του σκυροδέματος.

<sup>2</sup> Τα σχήματα του κεφαλαίου ενδέχεται να έχουν copyright, και ως εκ τούτου δύνανται να χρησιμοποιηθούν μόνον στα πλαίσια του μαθήματος.

### 10.1.2 Δομητική μελέτη

Πραγματοποιείται σύμφωνα με τις οδηγίες της ΙΤΑ (2000). Ο Πίνακας 10-1 διακρίνει τον έλεγχο της δομητικής επάρκειας της τοξωτής επένδυσης, σε τρεις φάσεις, ήτοι: από την προκατασκευή μέχρι και την εγκατάσταση, σε ώθηση του TBM, και σε λειτουργία. Αναλυτικότερα οι φάσεις είναι:

(Α) *Διαδικασία προκατασκευής*: Τα φορτία προκύπτουν από την αποθήκευση, τη μεταφορά, την πρόσκρουση, την εγκατάσταση επί τόπου των τόξων και πίεση ενεμάτωσης. Η ελάχιστη αντοχή του προκατασκευασμένου στοιχείου είναι μεγαλύτερη από την προδιαγραφόμενη για την εξαγωγή του από το καλούπι ή μεγαλύτερη από την προδιαγραφόμενη για την αποθήκευση. Σε όλους τους ελέγχους θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αντοχή που έχει αναπτύξει το σκυρόδεμα τη δεδομένη χρονική στιγμή. Φορτία από κρούσεις πρέπει να θεωρούνται επιπρόσθετα.

(Β) *Προχώρηση του TBM*: Περιλαμβάνονται τα φορτία που οφείλονται σε δυνάμεις ώθησης. Στη φάση αυτή υπολογίζεται η μέγιστη δύναμη ώθησης που μεταβιβάζεται στον τελευταίο τοποθετημένο δακτύλιο πίσω από την ουρά της ασπίδας, μέσω των υδραυλικών εμβόλων, η οποία θα πρέπει να μπορεί να παραληφθεί από το δακτύλιο. Πρέπει να διασφαλίζεται η αντοχή των προκατασκευασμένων στοιχείων.

(Γ) *Φάση λειτουργίας*: Τα φορτία οφείλονται στο ίδιο βάρος, τις γεωστατικές πιέσεις, τις υδραυλικές πιέσεις, και τυχηματικά φορτία όπως σεισμός, πυρκαγιά, πρόσκρουση, και όλα τα πιθανά φορτία που θα πρέπει να παραλαμβάνει η επένδυση στη μακρά αυτή περίοδο διάρκειας ζωής του έργου. Οι σεισμικές επιδράσεις λαμβάνονται με βάση τα χαρακτηριστικά της δόνησης στην περιοχή του έργου.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 7 – μέρος 1, στη μελέτη και τη διαστασιολόγηση της τμηματικής επένδυσης απαιτούνται δυο συγκεκριμένοι έλεγχοι της κατασκευής: σε Ύστατη Οριακή Κατάσταση (Αστοχίας) (ULS) και σε Λειτουργικότητας Οριακή Κατάσταση (SLS). Στην κατάσταση ULS, η αντοχή κάποιου τμήματος της όλης κατασκευής έχει ξεπεραστεί, ενώ στην κατάσταση SLS οι λειτουργικές απαιτήσεις έχουν ξεπεραστεί, όπως για παράδειγμα, υπερβολική, πέρα από τα επιτρεπτά όρια, καθίζηση, παράλληλη μετατόπιση, στροφή, παραμόρφωση ή εμφάνιση ρωγματώσεων. Οι έλεγχοι πραγματοποιούνται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα (EN 1992-1-1:2004). Η δομητική ανάλυση πραγματοποιείται με τη βοήθεια αριθμητικών μεθόδων, όπως της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, που δύνανται να λαμβάνουν υπόψη τη φέρουσα συμπεριφορά της γεωμάζας και τα διαφορετικά στάδια φόρτισης, και επιτρέπουν τη λεπτομερή και ρεαλιστική προσομοίωση της γεωμετρίας των τόξων και των αρμών.

## 10.2 Από την προκατασκευή στην εγκατάσταση (σύμφωνα με την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-04-03-00:2009)

Περιλαμβάνει την παραγωγή, αποθήκευση, μεταφορά, τη διαχείριση γενικά των προκατασκευασμένων στοιχείων και την εγκατάστασή τους εντός της σήραγγας.

### 10.2.1 Κατασκευή προκατασκευασμένων στοιχείων

Η κατασκευή των στοιχείων γίνεται είτε σε υφιστάμενη βιομηχανική μονάδα είτε σε ειδική εγκατάσταση παραγωγής σχεδιασμένη για τον σκοπό αυτό. Σε κάθε περίπτωση πάντως οι εγκαταστάσεις και τα συστήματα παραγωγής πρέπει να διαθέτουν Σύστημα Διασφάλισης Ποιότητας και Ποιοτικού Ελέγχου κατά το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 9001 E3, και να συμμορφώνονται με τις προδιαγραφές σχετικά με τα υλικά, τις συνθέσεις, την εφαρμογή, την ωρίμανση και την αποθήκευση των υλικών των σκυροδεμάτων, των προκατασκευασμένων στοιχείων και των στερεωτικών υλικών.

Το εμβαδόν του χώρου εργασίας (Σχήμα 10-1) για τον οπλισμό των στοιχείων είναι τουλάχιστον 3500 m<sup>2</sup>. Πρέπει να υπάρχει αυτοματοποιημένη γραμμή παραγωγής. Κατάλληλος εξοπλισμός μεταφέρει τους κλωβούς προς φύλαξη και όταν απαιτείται, στο χώρο της προκατασκευής. Ο χώρος κατασκευής των προκατασκευασμένων στοιχείων είναι τουλάχιστον 2000 m<sup>2</sup> και είναι εφοδιασμένος με κινούμενο γερανό. Η αλυσίδα παραγωγής αποτελείται από την: α) γραμμή προκατασκευής, β) γραμμή θερμαινόμενης σκλήρυνσης (συντήρησης) και προσωρινής φύλαξης, και γ) γραμμή μεταφοράς.

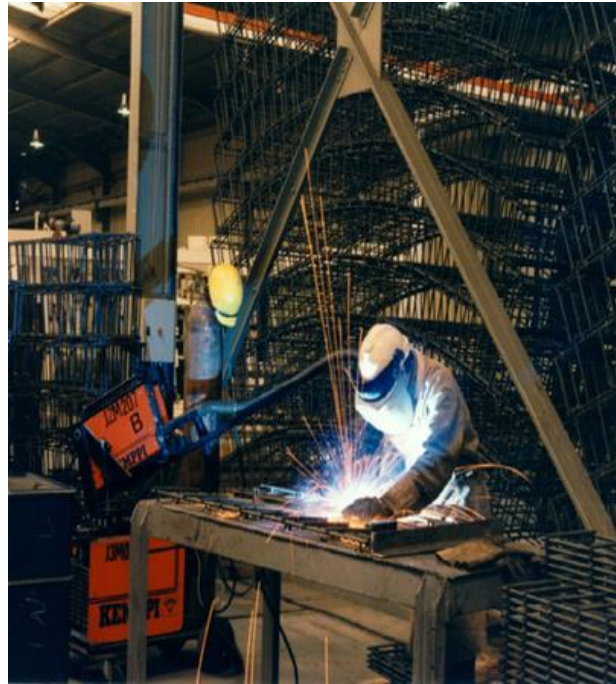
Το παρασκευαστήριο σκυροδέματος πρέπει να είναι αυτόματο, επαρκούς ικανότητας παραγωγής (π.χ. 3 m<sup>3</sup> ανά επτά λεπτά), και να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του Προτύπου ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-04-00 για συγκρότημα παραγωγής σκυροδέματος κατηγορίας Γ.

Η επιφάνεια του καλυμμένου θαλάμου συντήρησης έχει επιφάνεια που καλύπτει το μέγιστο προβλεπόμενο ρυθμό σκυροδέτησης των στοιχείων λαμβάνοντας υπόψη τον απαιτούμενο χρόνο παραμονής

στο θάλαμο και τις απαιτήσεις στοίβασης. Η κίνηση στο θάλαμο συντήρησης ελέγχεται από κεντρικό γραφείο ελέγχου. Ο σχεδιασμός του συστήματος θέρμανσης λαμβάνει υπόψη το ρυθμό παραγωγής σε σχέση με το χρόνο συντήρησης. Ο αέρας στο θάλαμο συντήρησης θερμαίνεται με ηλεκτρικές συσκευές και έχει κατάλληλο ποσοστό υγρασίας.



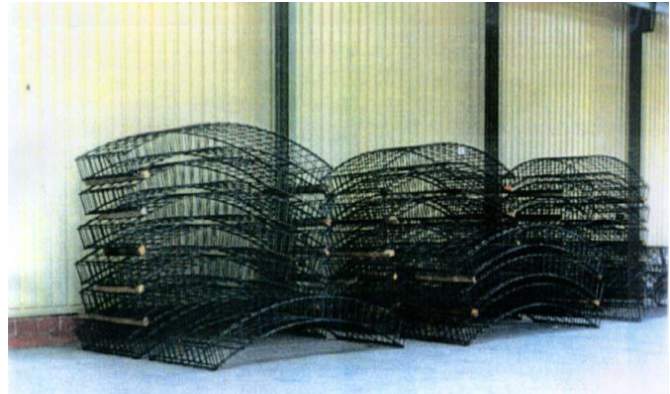
(α) εργαλειομηχανές διαμόρφωσης



(β) συγκόλληση πλαϊνών πλεγμάτων



(γ) βάσεις συναρμολόγησης πλεγμάτων  
Σχήμα 10-1. Συνεργείο σιδηρού οπλισμού



(δ) αποθήκευση κλωβών

Ο χώρος αποθήκευσης έχει επαρκή επιφάνεια ώστε να ικανοποιεί τις αποδόσεις του συγκροτήματος κατασκευής των στοιχείων και τις προβλέψεις του χρονοδιαγράμματος του έργου, και είναι εφοδιασμένος με κατάλληλο ανυψωτικό και μεταφορικό εξοπλισμό. Η μεταφορά γίνεται με φορτηγά ή ρυμουλκούμενα οχήματα ή σιδηροδρομικό συρμό.

Κάθε καλούπι περιλαμβάνει: α) ένα βαγονέτο που θα αποτελείται από στοιχεία υποστήριξης, τροχούς, αποσβεστήρες κίνησης, β) βάση που αποτελείται από χαλύβδινο μέτωπο, διαμήκεις και εγκάρσιες ενισχύσεις, εσοχές αγκυρώσεων, στεγανούς αρμούς, πλευρικούς τύπους στερεωμένους στη βάση (οι τελικές επιφάνειες διαμορφώνονται από μηχανή), δονητές στερεωμένους στην βάση.

Η εργασία του ανθρώπινου δυναμικού περιλαμβάνει κυρίως: καθαρισμό του καλουπιού, λίπανση και σφράγιση, τοποθέτηση του οπλισμού, τοποθέτηση κάθε είδους υποδοχών, τελιώματα, συντήρηση, αφαίρεση στοιχείου, έλεγχο και επισκευή, τοποθέτηση παρεμβυσμάτων και φλαντζών, αποθήκευση.

Πίνακας 10-1. Περίληψη των απαραίτητων ελέγχων της τμηματικής επένδυσης από τη φάση της προκατασκευής μέχρι την φάση της λειτουργίας (Geodata, 2013)

Φάση		Λεπτομέρειες	Έλεγχοι
Α	Προκατασκευή	Εξαγωγή από το καλούπι και πρώτη μετακίνηση	Έλεγχος των προκ. στοιχείων για τα φορτία εξαγωγής και αρχικών μετακινήσεων / χειρισμών
		Αποθήκευση	Έλεγχος των προκ. στοιχείων για το βάρος των υπερκείμενων στοιχείων κατά την αποθήκευση
	Μεταφορά, ανύψωση και τοποθέτηση	Ανύψωση από τον μονταδόρο	Έλεγχος των στοιχείων που θα μετακινηθούν και θα ανυψωθούν από τον μονταδόρο για τα ασκούμενα δυναμικά φορτία.
		Μεταφορά σε φρέατα και σε σήραγγες	Όπως προηγουμένως, έλεγχος των προκατασκευασμένων στοιχείων σε δράσεις ανύψωσης
Β	Προχώρηση TBM	Επαφή με TBM (αλληλεπίδραση μεταξύ πεδίων εμβόλων και δακτυλίου τμηματικής επένδυσης)	Έλεγχος των στοιχείων υπό την επίδραση των τάσεων επαφής από τη δύναμη ώθησης του TBM, λαμβανομένου υπόψη του φαινομένου της εκκεντρότητας του φορτίου
		Επαγόμενος εφελκυσμός από τα πέδιλα των γρύλων (λόγω της επίδρασης της δύναμης ώθησης)	Έλεγχος των στοιχείων σε επαγόμενο εφελκυσμό μεταξύ των πεδίων
		Μοντάρισμα και λανθασμένη ευθυγράμμιση των στοιχείων	Έλεγχος της εισαγωγής του στοιχείου κλειδιού και ανάλυση της λανθασμένης τοποθέτησης του στοιχείου κατά την διάρκεια της τοποθέτησης και της στερέωσης
Γ	Διάρκεια λειτουργίας	Φάση λειτουργίας	Στατικός έλεγχος για τις μακροχρόνιες συνθήκες λαμβανομένων υπόψη των εδαφικών και υδραυλικών φορτίων
		Επαφές μεταξύ των στοιχείων (δράσεις αρμών)	Έλεγχος των προκατασκευασμένων στοιχείων από άποψη τάσεων επαφής στους διαμήκεις αρμούς, αποτελέσματα από φορτία σε μακροχρόνιες συνθήκες, έλεγχος των διαμήκων αρμών λαμβανομένων υπόψη των φορτίων εκκεντρότητας
		Στεγανωτικά παρεμβύσματα	Έλεγχος της επιτελεστικότητας των στεγανωτικών παρεμβυσμάτων και της αλληλεπίδρασης με τους διαμήκεις συνδέσμους
		Πυράντοχη προστασία	Έλεγχος της πυράντοχης κατασκευής
		Σεισμικές συνθήκες	Έλεγχος των απαραίτητων στατικών ελέγχων της τμηματικής επένδυσης λαμβανομένου υπόψη του σεισμικού φορτίου.
		Συμβατότητα	Μελέτη τσιμεντενέσεων

Εκτός αν ορίζεται διαφορετικά, η γραμμή παραγωγής μπορεί να λειτουργεί και χειρωνακτικά. Όπου απαιτείται η γραμμή παραγωγής πρέπει να διασφαλίζει παραγωγή προκατασκευασμένων στοιχείων σε μέχρι τρεις κύκλους εργασίας (βάρδιες) σε καθημερινή βάση.



Τα καλούπια (Σχήμα 10-2, αριστερά) είναι χαλύβδινα και έχουν ισχυρή κατασκευή ώστε να μην παραμορφώνονται, και συντηρούνται τακτικά, έτσι ώστε οι διαστάσεις των παραγομένων τεμαχίων να βρίσκονται μέσα στις προκαθορισμένες ανοχές. Πριν από την έναρξη της παραγωγής μπορούν, αν απαιτείται, να παράγονται δοκιμαστικά στοιχεία για επιθεώρηση και έλεγχο για την αποδοχή τους, καθώς και δείγματα που θα χαρακτηρίζονται ιδιαίτερα και θα φυλάσσονται ως πρότυπα μελλοντικά για αναφορές.



Σχήμα 10-2. Αριστερά: Μεταλλότυπος κενός. Δεξιά: Τοποθετημένος οπλισμός

Όλα τα προκατασκευασμένα στοιχεία φέρουν έναν αξιόπιστο κωδικό αναγνώρισης (Σχήμα 10-3) και έχουν με ανάγλυφα κεφαλαία γράμματα στην εσωτερική επιφάνεια τις ακόλουθες πληροφορίες: (1) Εσωτερική διάμετρος τελικής επιφάνειας, (2) Τύπος στοιχείου – «Τ» Τυπικό - «Κ» Κλείδα - «Ε» Ειδικό, (3) Αποκλειστικός αριθμός αναγνώρισης καλούπιου, (4) Οποιαδήποτε ειδική πληροφορία ενδεικτική της θέσης του στοιχείου στο δακτύλιο, (5) Ημερομηνία σκυροδέτησης στην εσωτερική επιφάνεια του στοιχείου.



(α) Τύπος στοιχείου και μήτρας

(β) Αριθμός παραγωγής

Σχήμα 10-3. Κωδικοί αναγνώρισης

Όταν ενσωματώνονται σιδηροί οπλισμοί (Σχήμα 10-2, δεξιά) στο στοιχείο, διασφαλίζεται σε κάθε περίπτωση η ελάχιστη επικάλυψη των οπλισμών που προβλέπεται από τη μελέτη. Αν δεν προβλέπεται διαφορετικά, πρέπει να συμμορφώνεται με τις προβλέψεις του ΕΚΟΣ και να μην είναι μικρότερη από: 20mm στην εξωτερική πλευρά, 15mm στην εσωτερική πλευρά, και 20mm γύρω από οπές και από εκτεθειμένα σιδηρά στηρίγματα. Σε κάθε στοιχείο υπάρχουν οπές τσιμεντενώσεων, ονομαστικής διαμέτρου 50mm ή μεγαλύτερες, που είναι είτε οπές στο σκυρόδεμα είτε σωληνωμένες.

Η γραμμή παραγωγής (Τύπος carrousel) αποτελείται (Wagner & Schultze, 1996) από: Εξοπλισμό μεταφοράς “carrousel”, καλούπια εξοπλισμένα με δονητή, σύστημα διανομής σκυροδέματος, θάλαμο συντήρησης. Τα καλούπια που τοποθετούνται στη γραμμή παραγωγής (Τύπος Carrousel) τοποθετούνται τμηματικά εμπρός από κάθε θέση εργασίας, πριν μεταφερθούν στο θάλαμο συντήρησης και τέλος, επιστρέψουν στη γραμμή για το νέο κύκλο. Οι θέσεις εργασίας που αποτελούν τη γραμμή παραγωγής γενικά πραγματοποιούν τις ακόλουθες λειτουργίες:

- απομάκρυνση συσκευών τοποθέτησης ενσχυροδετημένων υποδοχέων βλήτρων (inserts), σύμφωνα με τα σχέδια για κάθε τύπο στοιχείου.
- απομάκρυνση στοιχείων, καθαρισμός καλουπιών. Το στοιχείο απομακρύνεται από το καλούπι με αναρρόφηση (με τη βοήθεια συστήματος «κενού αέρος») και ανασηκώνεται ως τη γραμμή μεταφοράς.
- λίπανση καλουπιών, κλείσιμο καλουπιών. Η περίσσεια λιπαντικών απομακρύνεται με καθαρό πανί.
- τοποθέτηση οπλισμού και επαλήθευση της σωστής θέσης στις καβίλιες (spacers).
- τοποθέτηση ενσχυροδετημένων υποδοχέων βλήτρων
- έλεγχο καλουπιών προ σκυροδέτησης.
- σκυροδέτηση πρώτης φάσης και συμπύκνωση. Το καλούπι γεμίζει με σκυρόδεμα και δονείται αλλά η συνολική μετρηθείσα ποσότητα είναι λιγότερη από τη συνολική ποσότητα των τύπων.
- σκυροδέτηση δεύτερης φάσης και συμπύκνωση. Μετά τη σκυροδέτηση της πρώτης φάσης το καλούπι γεμίζεται με το απαραίτητο σκυρόδεμα για την ολοκλήρωση του τμήματος και πραγματοποιείται δόνηση. Στη γραμμή carousel το σύστημα μαγνητικού σήματος αναγνωρίζει το καλούπι και ελέγχει την ποσότητα κάθε φάσης σκυροδέτησης με συσκευή ζυγίσματος σε ηλεκτρονικά καθοδηγούμενο σύστημα.
- καθαρισμός περίσσειας σκυροδέματος των πλαϊνών των καλουπιών, διαμόρφωση επιφανειών με προτιμότερη τη χρήση περιστρεφόμενης σπάτουλας πιεσμένου αέρα
- τελειώματα.

Παρέχεται συσκευή έλξης για την προοδευτική τοποθέτηση των καλουπιών εμπρός από τις προαναφερθείσες θέσεις εργασίας. Μία συρόμενη πλάκα παραλαμβάνει τους τύπους (καλούπια) στο τέλος της γραμμής και τους τοποθετεί (Σχήμα 10-4) στο θάλαμο σκλήρυνσης (συντήρησης), ενώ μία άλλη παραλαμβάνει τους τύπους από το θάλαμο και τους τοποθετεί στην αρχή της γραμμής του νέου κύκλου.



Σχήμα 10-4. Αριστερά: Διάδρομος παραγωγής. Δεξιά: Θάλαμος ωρίμανσης

Μέσα στο θάλαμο σκλήρυνσης (συντήρησης) το στοιχείο σπρώχνεται προοδευτικά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σκλήρυνσης. Αφού βγει από το θάλαμο συντήρησης, το στοιχείο αποχωρίζεται από τον τύπο ο οποίος τοποθετείται στην αρχή της γραμμής του νέου κύκλου.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής, η θερμοκρασία μέσα στο θάλαμο συντήρησης καθορίζεται στη μέγιστη των 55°C. Η θερμοκρασία του θαλάμου συντήρησης προσαρμόζεται κατά τη διάρκεια παραγωγής, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις: α) για τις πρώιμες αντοχές απομάκρυνσης των στοιχείων από τα καλούπια β) αποφυγής ρωγμάτωσης και γ) διάρκειας του κύκλου παραγωγής, η οποία θα ποικίλλει ανάλογα με την απαιτούμενη ικανότητα.

Το στοιχείο που βγαίνει από το θάλαμο συντήρησης ελέγχεται για επιφανειακές ατέλειες και επιδιορθώνεται αν κρίνεται αναγκαίο και έπειτα μεταφέρεται στη στοά στερέωσης του μονωτικού συνδέσμου. Έπειτα από τη στερέωση των μονωτικών συνδέσμων, τα τμήματα αποθηκεύονται μέσα στο ενδιάμεσο κτήριο αποθήκευσης, ή μεταφέρονται στην αίθουσα ελέγχου διαστάσεων. Από την προαναφερθείσα ενδιάμεση περιοχή αποθήκευσης τα τμήματα μεταφέρονται στο χώρο αποθήκευσης. Στην ενδιάμεση περιοχή αποθήκευσης και / ή στο χώρο αποθήκευσης, τα τμήματα σωρεύονται σε στρώματα διαχωριζόμενα από ξύλινες ή άλλες αντίστοιχες πλάκες.

## 10.2.2 Συντήρηση - Ξεκαλούπωμα - Αποθήκευση Προκατασκευασμένων Στοιχείων

### 10.2.2.1 Συντήρηση

Τα στοιχεία δεν απομακρύνονται από τα καλούπια αν το σκυροδέμα δεν έχει αποκτήσει ικανοποιητική αντοχή, έτσι ώστε να προστατεύεται το στοιχείο από οποιαδήποτε ζημιά κατά την μεταφορά του. Η ανάπτυξη της αντοχής του σκυροδέματος κατά την σκλήρυνσή του επηρεάζεται αποφασιστικά από την θερμική επεξεργασία του. Γενικά, αν δεν προβλέπεται διαφορετικά, για το ξεκαλούπωμα και την ασφαλή μεταφορά των στοιχείων απαιτείται αντοχή του σκυροδέματος 12 έως 20 MPa. Αν το ξεκαλούπωμα προβλέπεται το νωρίτερο σε περίπου 20 ώρες, η θερμοκρασία του σκυροδέματος πρέπει να κυμαίνεται στους 20-25°C. Σε περίπτωση που το ξεκαλούπωμα προβλέπεται σε 6-8 ώρες, απαιτείται η λήψη πρόσθετων μέτρων για την εξασφάλιση επαρκούς αντοχής. Για την επιτάχυνση της ανάπτυξης της αντοχής του σκυροδέματος, αυτό τοποθετείται σε θερμοκρασία 40-45°C στο καλούπι και παραμένει σε θερμαινόμενο θάλαμο μέχρι το ξεκαλούπωμα. Μετά το ξεκαλούπωμα τα στοιχεία συντηρούνται προσεκτικά σύμφωνα με τις προβλέψεις του Προτύπου ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-03-00.

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί, έτσι ώστε να μειωθεί η όχληση των Εργατών, οι οποίοι εργάζονται με υψηλά επίπεδα θορύβου, πλησίον των δονούμενων τύπων κατά τη διάρκεια σκυροδέτησης. Ο παράγοντας αποκόλλησης από τους τύπους ενδέχεται να είναι επικίνδυνης σύστασης και θα πρέπει να αποθηκεύεται και να χρησιμοποιείται σύμφωνα με το Σχέδιο Υγιεινής και Ασφάλειας και έπειτα από τις απαραίτητες επαληθεύσεις.

### 10.2.2.2 Ανάρτηση

Η μέθοδος ανάρτησης, φορτοεκφόρτωσης και χειρισμού, ο τύπος του εξοπλισμού και η μέθοδος μεταφοράς (Σχήμα 10-5) δεν πρέπει να προκαλούν ζημιές στα στοιχεία. Αν οι οπές τσιμεντενέσεων χρησιμοποιούνται για την ανάρτηση των στοιχείων, πρέπει να έχει εξασφαλισθεί ότι αυτό έχει ληφθεί υπόψη. Τα στοιχεία δεν μεταφέρονται στο Εργοτάξιο αν δεν έχουν αποκτήσει την χαρακτηριστική αντοχή του κύβου των 28 ημερών. Σημειώνεται επίσης ότι κατά τη διάρκεια ανάρτησης με τη χρήση συστήματος κενού αέρος, απαγορεύεται η κυκλοφορία του προσωπικού κάτω από τα τμήματα.



Σχήμα 10-5. Μεταφορά στοιχείων. Αριστερά: προς το εργοτάξιο. Δεξιά: προς τοποθέτηση

Κάθε είδους στοιχείο περιλαμβάνει θέσεις για κάθε είδους οπή ή άλλες διατάξεις όπως απαιτείται. Τα στοιχεία είναι κατασκευασμένα σύμφωνα προς τις ανοχές που προδιαγράφονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το απαιτούμενο σχήμα για κέλυφος.

Οι οπές ανάρτησης κ.λπ. των εκ σκυροδέματος προκατασκευασμένων τεμαχίων προστατεύονται με ειδικά τεμάχια από γρασαρισμένο καννάβι. Οι οπές των μεταλλικών στοιχείων προστατεύονται με ειδικά τεμάχια από μαλακό PVC. Οι πείροι σύνδεσης είναι από μαύρο σίδηρο, γαλβανισμένοι ή ανοξείδωτοι, αν απαιτείται για ειδικούς λόγους.

### 10.2.2.3 Αποθήκευση

Η αποθήκευση των στοιχείων, γίνεται γενικά σε στοίβες σε στεγασμένη αποθήκη ή υπόστεγο, με προσοχή, χωρίς τραντάγματα, προσκρούσεις, δονήσεις και πάνω σε κατάλληλα ευθυγραμμισμένο ξύλινο υπόστρωμα. Η

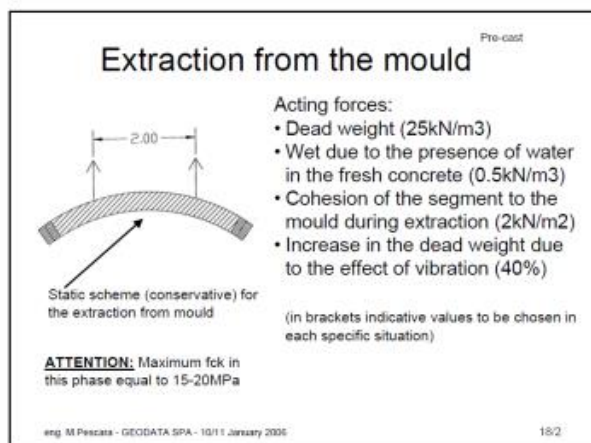
στοίβαση (BTS-ICE, 2004) δύναται να είναι στα πλευρά, στα κοίλα προς τα κάτω ή στα κοίλα προς τα πάνω. Οι στοίβες των στοιχείων καλύπτονται σε όλες τις πλευρές με μεμβράνη μέχρι το δάπεδο για να αποφεύγεται η γρήγορη ξήρανση του σκυροδέματος και να εξασφαλίζεται η ομαλή πτώση της θερμοκρασίας των στοιχείων. Όλοι οι τύποι συσκευασίας έχουν αντίστοιχο σχήμα με την τελική επένδυση, όπου τα στοιχεία να μπορούν να στερεώνονται με πείρους. Επίσης έχουν ανάλογες διαστάσεις και πλάτος ώστε να προστατεύονται, όπου υπάρχουν οι ελαστικοί σύνδεσμοι. Η ξυλεία συσκευασίας, αν χρησιμοποιείται, είναι απαλλαγμένη από ρόζους, ή είναι αντεπικολλητή, έχει το σχήμα του τεμαχίου δημιουργημένο με πριόνι και φέρει οπές για πείρους όπου χρειάζεται. Πρέπει να αντέχει στο σάπισμα, να είναι ανθεκτική στην φωτιά και να διατίθεται σε διάφορα πάχη.

Μεταξύ προκατασκευασμένου στοιχείου από σκυρόδεμα και ξύλου τοποθετείται φύλλο ασφαλτόπανου, πάχους 2 mm για την διανομή των τάσεων κατά μήκος της επαφής. Τα σιδερένια στηρίγματα συσκευασίας, αν χρησιμοποιούνται, είναι κατασκευασμένα από λαμαρίνα πάχους τουλάχιστον 2 mm και φέρουν προστασία έναντι σκουριάς.

#### 10.2.2.4 Παράδειγμα δομητικής μελέτης (Geodata, 2013)

##### 10.2.2.4.1 Εξαγωγή από τους τύπους και πρώτη μεταφορά

Το στατικό προσομοίωμα του προκατασκευασμένου στοιχείου φαίνεται στο Σχήμα 10-6. Οι σημαντικοί παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη είναι, το ίδιο βάρος του στοιχείου, η υγρασία του νεπού σκυροδέματος, η πρόσφυση στο καλούπι και η επίδραση της δόνησης. Η αντοχή του σκυροδέματος θεωρείται ότι είναι τουλάχιστο 15MPa, λόγω περιορισμένου χρόνου πήξης. Οι εσωτερικές δυνάμεις στο στοιχείο φαίνονται στο Σχήμα 10-7.

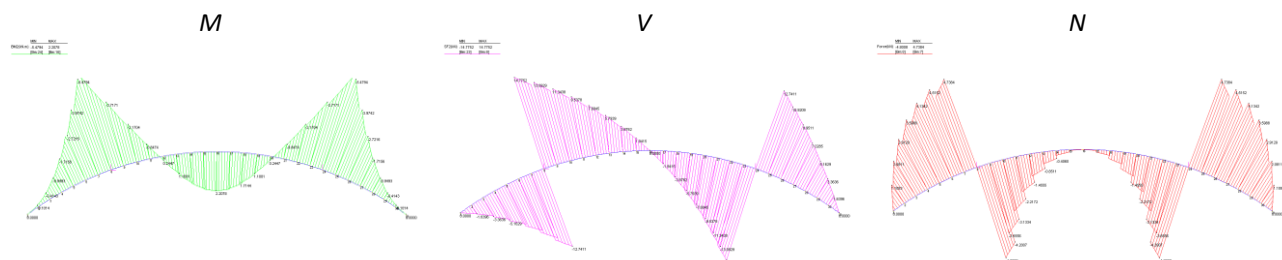


(α) Στατικό προσομοίωμα



(β) Ανάρτηση

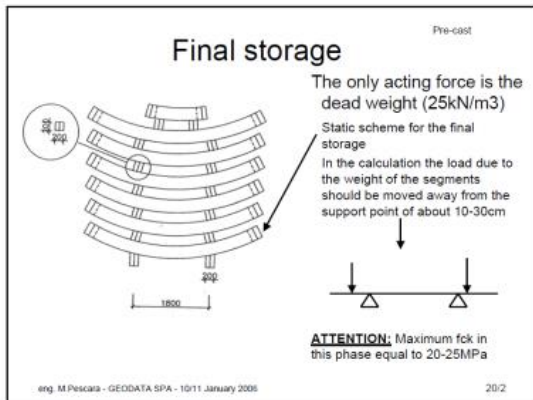
Σχήμα 10-6. Εξαγωγή από τον μεταλλότυπο



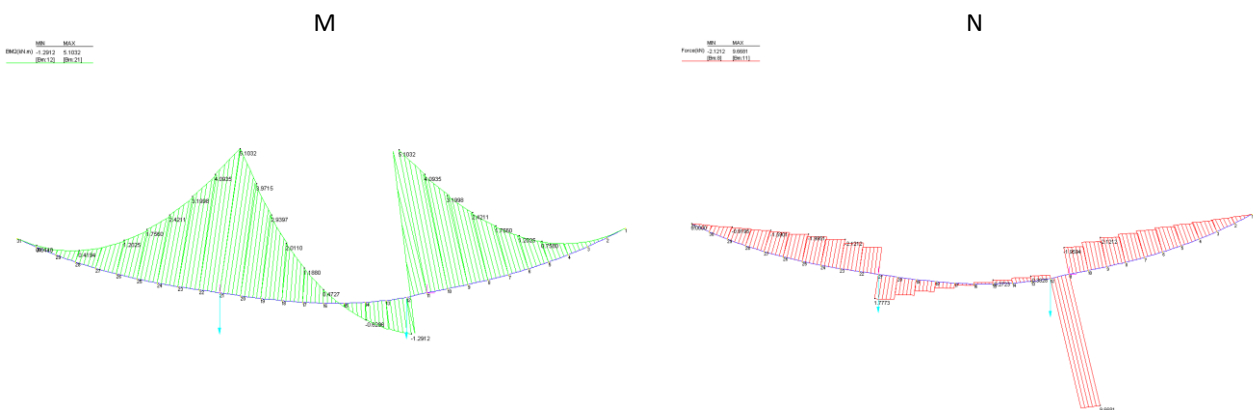
Σχήμα 10-7. Εσωτερικές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την εξαγωγή των στοιχείων

##### 10.2.2.4.2 Αποθήκευση των στοιχείων

Το στατικό προσομοίωμα της αποθήκευσης των προκατασκευασμένων στοιχείων φαίνεται στο Σχήμα 10-8 και δείχνει ότι το βάρος των έξι στοιχείων και του κλειδιού παραλαμβάνεται από το κάτω στοιχείο της στοίβας. Στην φάση αυτή, η αντοχή του σκυροδέματος είναι 20MPa. Οι εσωτερικές δυνάμεις που αναπτύσσονται φαίνονται στο Σχήμα 10-9.



Σχήμα 10-8. Αποθήκευση στοιχείων



Σχήμα 10-9. Εσωτερικές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την αποθήκευση των στοιχείων

### 10.2.3 Συναρμολόγηση προκατασκευασμένων στοιχείων

Τα στοιχεία είναι αποδεκτά προς τοποθέτηση όταν έχουν αποκτήσει την προβλεπόμενη από την Μελέτη αντοχή. Αμέσως πριν την εγκατάσταση επιθεωρούνται για τυχόν ζημιές και για τη σωστή θέση των στεγανωτικών παρεμβυσμάτων. Στοιχεία με ελαττώματα δεν τοποθετούνται.

Όλες οι πλευρές όλων των προκατασκευασμένων στοιχείων καθαρίζονται παντελώς από ξένα υλικά και θραύσματα πριν από την τοποθέτησή τους. Ο δακτύλιος της μόνιμης επένδυσης συναρμολογείται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται οποιαδήποτε ζημιά στα προκατασκευασμένα στοιχεία και να επιτυγχάνεται η προβλεπόμενη από τη Μελέτη γεωμετρία. Τυχόν ζημιές κατά την ανέγερση του δακτυλίου από χτυπήματα ή άλλες δράσεις μπορούν να επιδιορθώνονται επί τόπου. Σε περίπτωση σοβαρών ζημιών, μπορεί να απαιτηθεί η αντικατάσταση των δακτυλίων ή των στοιχείων.

Όπου η μόνιμη επένδυση πρόκειται να ενεματωθεί, το σχήμα των δακτυλίων κρατείται σταθερό κατά την επιβολή της πίεσης ενεμάτωσης και λοιπών κατασκευαστικών φορτίσεων, μέχρι και τη σταθεροποίηση του δακτυλίου.

Η ανέγερση της μόνιμης τοξωτής επένδυσης γίνεται με ειδικής κατασκευής μηχανικό σύστημα ή μπορεί να είναι χειροκίνητο βοηθούμενο από μηχανικά μέσα, με τέτοιο τρόπο που να μην προκαλείται ζημιά στην τελική επένδυση. Επιτρέπεται χειροκίνητη ανέγερση μόνο εφ' όσον αυτό είναι εγκεκριμένο στη μεθοδολογία κατασκευής και μετά από υποβολή της αξιολόγησης ανάλυσης επικινδυνότητας της δραστηριότητας.

Όταν προβλέπεται στη Μελέτη, τοποθετείται ένα παρέμβυσμα (λινάτσα, ελαστικό ή άλλο) πάχους τουλάχιστον 2 mm για τη διανομή των τάσεων σε κάθε κατά μήκος αρμό. Το παρέμβυσμα καλύπτει τουλάχιστον το 80% του μήκους του αρμού. Προβλέπεται αύλακας τοποθέτησης παρεμβύσματος στεγάνωσης σε όλες τις επιφάνειες των αρμών γύρω από το κάθε στοιχείο σε συμφωνία με τις απαιτήσεις του εργοστασίου κατασκευής του παρεμβύσματος.

### 10.2.3.1 Συναρμολόγηση αγκυρωμένης επένδυσης

Η συναρμολόγηση κάθε δακτυλίου αρχίζει κανονικά με τα στοιχεία του ανάστροφου τόξου και προχωρεί με το χτίσιμο και την αγκύρωση διαδοχικών στοιχείων στις πλευρές εναλλάξ, ώστε να γίνει δυνατή η τοποθέτηση του κλειδιού ή του στοιχείου κορυφής στην προκαθορισμένη θέση. Οι θέσεις των στοιχείων, όπως προβλέπονται στην εγκριθείσα μεθοδολογία κατασκευής, διατηρούνται κατά την συναρμολόγηση και μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του δακτυλίου.

Τα ακτινικά συνδετικά αγκύρια σφίγγονται κάθε φορά που το κάθε τεμάχιο μπαίνει στη θέση του, ώστε να διατηρηθεί η επαφή μεταξύ των πλευρών του αρμού και να διατηρηθεί η συμπίεση των φλαντζών, όπου χρησιμοποιούνται.

Εκτός εάν ορίζεται διαφορετικά ο ενσκυροδετημένος υποδοχέας βλήτρου του αγκυρίου είναι κατασκευασμένος από πολυαμίδιο ενισχυμένο με fiber glass. Η φέρουσα ικανότητα της αγκύρωσης είναι μεγαλύτερη ή ίση με 20 τόνους. Ο Πίνακας 10-2 δίνει τα χαρακτηριστικά του υλικού.

Πίνακας 10-2. Χαρακτηριστικά ενσκυροδετημένου υποδοχέα βλήτρου

Ιδιότητες	Μονάδες	Τιμή	Προδιαγραφή
Αντοχή σε εφελκυσμό : 23°C	MPa	40-80	DIN 53455
: 70°C	MPa	18-28	DIN 53455
Τάση εφελκυσμού : 23°C	MPa	35-70	DIN 53455
Επιμήκυνση στους : 23°C	%	150-250	DIN 53455
Μέτρο ελαστικότητας στους 23°C	MPa	1100-1900	DIN 53455
Hardness Rockwell	/	90-100	ASTM D870

Η διάμετρος και το μήκος του ενσκυροδετημένου υποδοχέα βλήτρου καθορίζεται στη μελέτη. Οι ενσκυροδετημένοι υποδοχείς βλήτρων στα στοιχεία του πυθμένα που χρησιμοποιούνται προσωρινά για σύνδεση των προσωρινών σιδηροδρομικών ραγών επί των οποίων κινείται η μηχανή εκσκαφής (TBM) στη διάρκεια κατασκευής του έργου, είναι κατασκευασμένοι από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο. Η φέρουσα ικανότητα της αγκύρωσης ορίζεται στους σχετικούς υπολογισμούς. Η διάμετρος και το μήκος της είναι όπως στα σχετικά σχέδια.

Εκτός εάν ορίζεται διαφορετικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα των αγκυρώσεων και των συμβατών ροδελών είναι: όριο διαρροής μεγαλύτερο ή ίσο των 360 MPa, και όριο θραύσης μεγαλύτερο ή ίσο των 640MPa. Τα αγκύρια είναι γαλβανισμένα ή μη σύμφωνα με τα προβλεπόμενα στη μελέτη. Το πάχος της επικάλυψης στα γαλβανισμένα αγκύρια είναι 70μ το ελάχιστο (5g/dm<sup>2</sup>) με ψευδάργυρο καθαρότητας 95% στην πρώτη τήξη. Η θερμοκρασία εμβαπτισμού είναι μεταξύ 445°C και 465°C. Ισχύει η προδιαγραφή: ΕΛΟΤ EN ISO 1461.

Το πρώτο τοποθετούμενο τεμάχιο διατηρείται στη σωστή του θέση και τα περιφερειακά συνδετικά αγκύρια των υπόλοιπων τεμαχίων τοποθετούνται και ασφαλίζονται χαλαρά για να επιτρέπουν την ορθή μορφή του σχήματος του δακτυλίου. Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής και πριν από την εκσκαφή του επόμενου βήματος, όλα τα περιφερειακά αγκύρια σφίγγονται. Επί πλέον, επανατάνυση των αγκυρίων εκτελείται μετά την ολοκλήρωση του επόμενου βήματος και πριν από την συναρμολόγηση του επόμενου δακτυλίου. Το κυλινδρικό σχήμα της μόνιμης επένδυσης διασφαλίζεται με τα περιθώρια των οπών των αγκυρίων με σκοπό να εξασφαλισθεί η πλήρης περιφερειακή αγκύρωση της επένδυσης, σύμφωνα με τις προβλέψεις της Μελέτης. Όταν χρησιμοποιείται ιδιαίτερος τύπος σύνδεσης και ασφάλισης στοιχείων οι μέθοδοι ανέγερσης ακολουθούν τις οδηγίες του προμηθευτή.

### 10.2.3.2 Κωνική τομεακή επένδυση

Όπου χρησιμοποιούνται κωνικοί δακτύλιοι συναρμολογούνται με τέτοια κατεύθυνση ώστε να είναι δυνατή η υλοποίηση της προκαθορισμένης οριζοντιογραφίας και μηκοτομής της σήραγγας. Ο προσανατολισμός του κώνου αποφασίζεται μετά από κάθε κύκλο εκσκαφής πριν από την ανέγερση του επόμενου δακτυλίου.

### 10.2.3.3 Ενεμάτωση του δακτυλίου

Οι τσιμεντενέσεις πλήρωσης του δακτυλίου σε σήραγγες που διανοίγονται με TBM και έχουν επένδυση από προκατασκευασμένα στοιχεία είναι ένα από τα κυριότερα μέτρα μείωσης των καθιζήσεων στην περιοχή του

ουραίου τμήματος της ασπίδας και των τοποθετημένων στοιχείων της επένδυσης. Οι τσιμεντενέσεις εκτελούνται:

- Μέσα από κανάλια του ουραίου τμήματος της ασπίδας (όταν απαιτείται γρήγορος καθαρισμός του συστήματος προσαγωγής του τσιμεντενέματος στην περίπτωση σταματήματος ή έμφραξης).
- Μέσα από οπές που αφήνονται στα προκατασκευασμένα στοιχεία.

Η ενεμάτωση του κενού γίνεται με συνεχή και άμεσο τρόπο μέσα από το ουραίο τμήμα της ασπίδας ή το συντομότερο δυνατόν, όταν γίνεται εισπίεση μέσω των προκατασκευασμένων στοιχείων.

Σε σήραγγες που διανοίγονται με TBM σε μαλακά εδάφη πραγματοποιούνται ενέσεις επαφής (δευτερογενείς) αμέσως πίσω από την ασπίδα. Οι τσιμεντενέσεις εκτελούνται με πλήρη έλεγχο της πίεσης και του όγκου και εξασφαλίζεται ότι δεν παρατηρούνται απαράδεκτες παραμορφώσεις στον δακτύλιο της μόνιμης επένδυσης και τα στοιχεία του. Η υποδοχή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10-10, χρησιμοποιείται για τη δευτερογενή τσιμεντένεση. Η αντίσταση στην εξόλκευση τέτοιας υποδοχής πρέπει να δύναται να αναλαμβάνει το φορτίο του προκατασκευασμένου στοιχείου με τη θεώρηση ενός επαρκούς συντελεστή ασφάλειας.



Σχήμα 10-10. Τσιμεντένεση επαφής

#### 10.2.3.4 Συναρμολόγηση διαστελλόμενης επένδυσης

Όπου ανεγείρεται μία επένδυση χωρίς αγκύρια χρησιμοποιώντας έναν μηχανισμό διαστολής, ο Ανάδοχος εξασφαλίζει ότι το εξωρράχιο της μόνιμης επένδυσης βρίσκεται στην σωστή επαφή με το περιβάλλον πέτρωμα πριν από την εφαρμογή της δύναμης διαστολής και ότι η διατομή της εκσκαφής επιτρέπει την διαδικασία διαστολής. Διατηρείται μία ποικιλία από κλειδιά διαφορετικού εύρους. Η επιφάνεια της εκσκαπτόμενης διατομής λιπαίνεται για να μειωθούν οι επιφανειακές τριβές κατά την διάρκεια της διαδικασίας διαστολής. Στις σφηνοειδείς επιφάνειες κάθε στοιχείου που πρόκειται να διασταλεί εφαρμόζεται ένα λιπαντικό μίγμα αρμών.

### 10.2.3.5 Αρμολόγημα των προκατασκευασμένων στοιχείων

Οι αρμοί των προκατασκευασμένων στοιχείων ελέγχονται και καθαρίζονται σε βάθος τουλάχιστον 20 mm από τα περισσέυματα τσιμεντοκονιαμάτων, λάσπης και διάφορων βλαβερών στοιχείων που μπορούν να προκαλέσουν ζημιά. Το υλικό αρμολόγησης εισάγεται στο βάθος του αρμού με πίεση με κατάλληλο εργαλείο έτσι ώστε κανένα ορατό σημείο του αρμού να μη μείνει γυμνό. Το υλικό αρμολόγησης είναι κατάλληλο για κάθε είδος προκατασκευασμένου στοιχείου π.χ. τσιμεντοειδή υλικά για τα στοιχεία από σκυρόδεμα.

### 10.2.3.6 Παράδειγμα συναρμολογημένου δακτυλίου

#### 10.2.3.6.1 Τοποθέτηση στο δακτύλιο

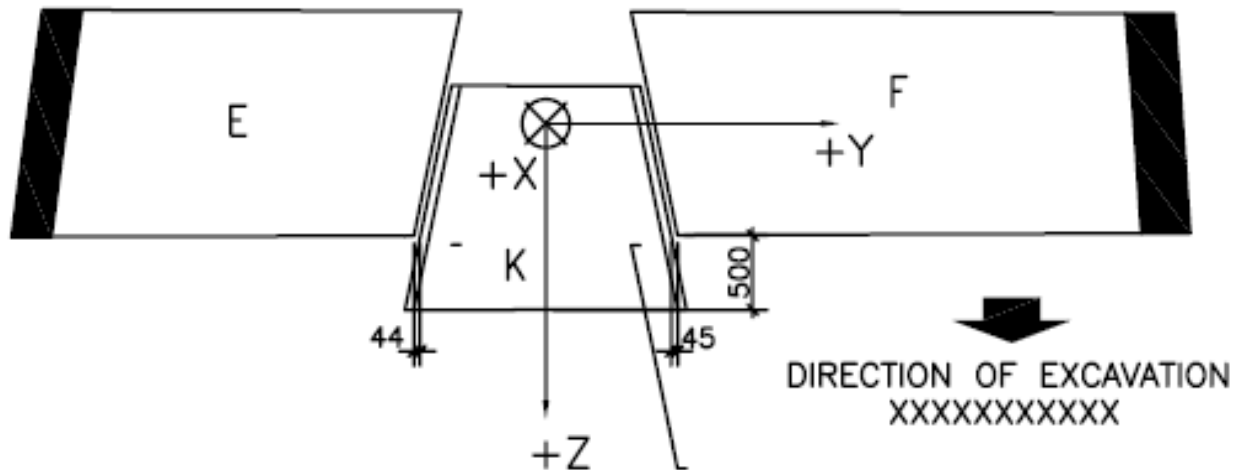
Κάθε φορά που ένα πακέτο έξι προκατασκευασμένων στοιχείων φθάνει στο TBM, τα στοιχεία τοποθετούνται και κοχλιώνονται κάτω από την προστασία της ασπίδας μέσω μονταδόρου (Σχήμα 10-11). Κατά τη διάρκεια της ανύψωσης και μεταφοράς από το μονταδόρο, στα στοιχεία επενεργούν δύο δυνάμεις και ειδικότερα, δύναμη σημειακού φορτίου και δυναμικό φορτίο. Η αντοχή του στοιχείου στη φάση αυτή έχει τη μέγιστη τιμή 50MPa.



Σχήμα 10-11. Τοποθέτηση στοιχείων από τον ανυψωτήρα

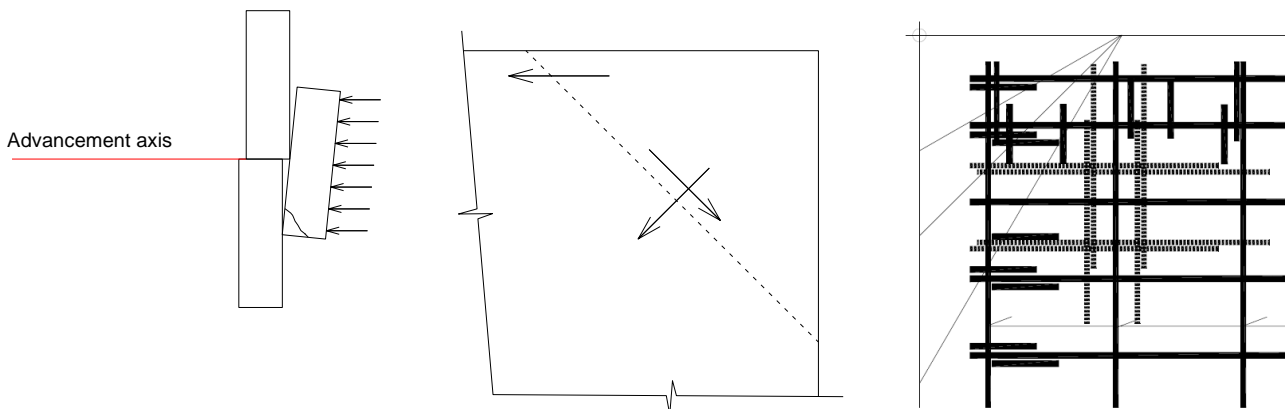
Μετά την άφιξη πίσω από το TBM, το πακέτο των έξι στοιχείων και το κλειδί τοποθετούνται για τη δημιουργία του πλήρους δακτυλίου. Εκπονείται γεωμετρικός έλεγχος που βασίζεται στη διάταξη της γωνίας του ανοίγματος και του ακτινικού αρμού για την αξιολόγηση της σωστής τοποθέτησης του κλειδιού (τοποθέτηση του τελευταίου στοιχείου). Στο Σχήμα 10-12 φαίνεται η τοποθέτηση και η στερέωση των στοιχείων και του κλειδιού.





Σχήμα 10-12. Εισαγωγή στοιχείου κλειδιού (Geodata, 2013)

Με θεώρηση της ώσης του TBM επί του τελευταίου τοποθετηθέντος δακτυλίου, ένα στοιχείο που στηρίζεται επί άλλου ελαφρά μετακινημένου στοιχείου, ελέγχεται ως προς την διάτμηση στη γωνία του. Με τη θεώρηση επιπέδου αστοχίας (Σχήμα 10-13) σε απόσταση από την ακμή του στοιχείου γύρω στα 300mm, ελέγχεται το στοιχείο ως προς επίπεδα αστοχίας σε  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  και  $60^\circ$ . Ο οπλισμός τύπου γάντζου (hoop reinforcement) λειτουργεί σε εφελκυσμό και προσφέρει αντίσταση σε διάτμηση

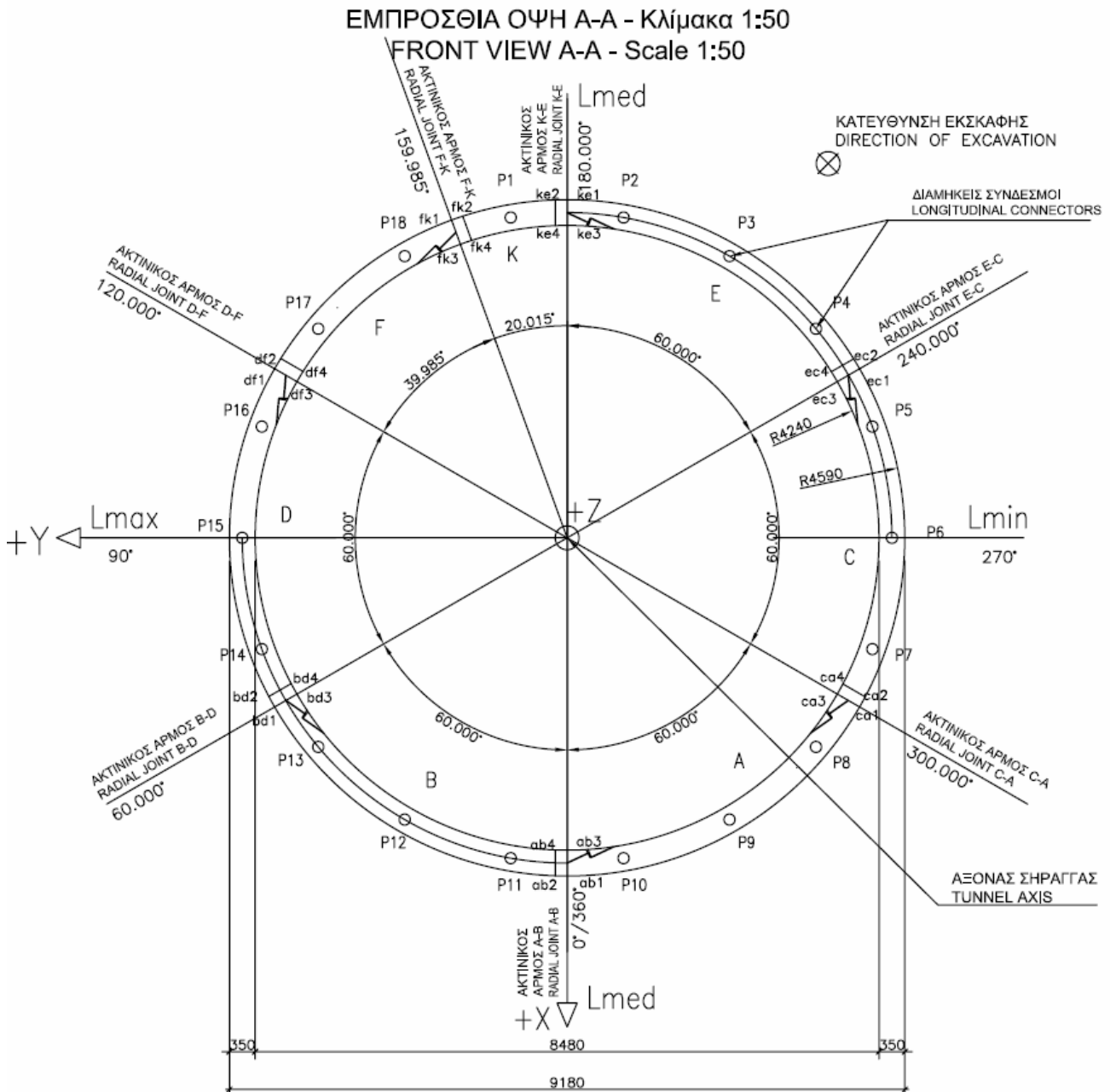


Σχήμα 10-13. Μετάθεση στοιχείου λόγω λανθασμένης τοποθέτησης (Geodata, 2013)

### 10.2.3.6.2 Γεωμετρία

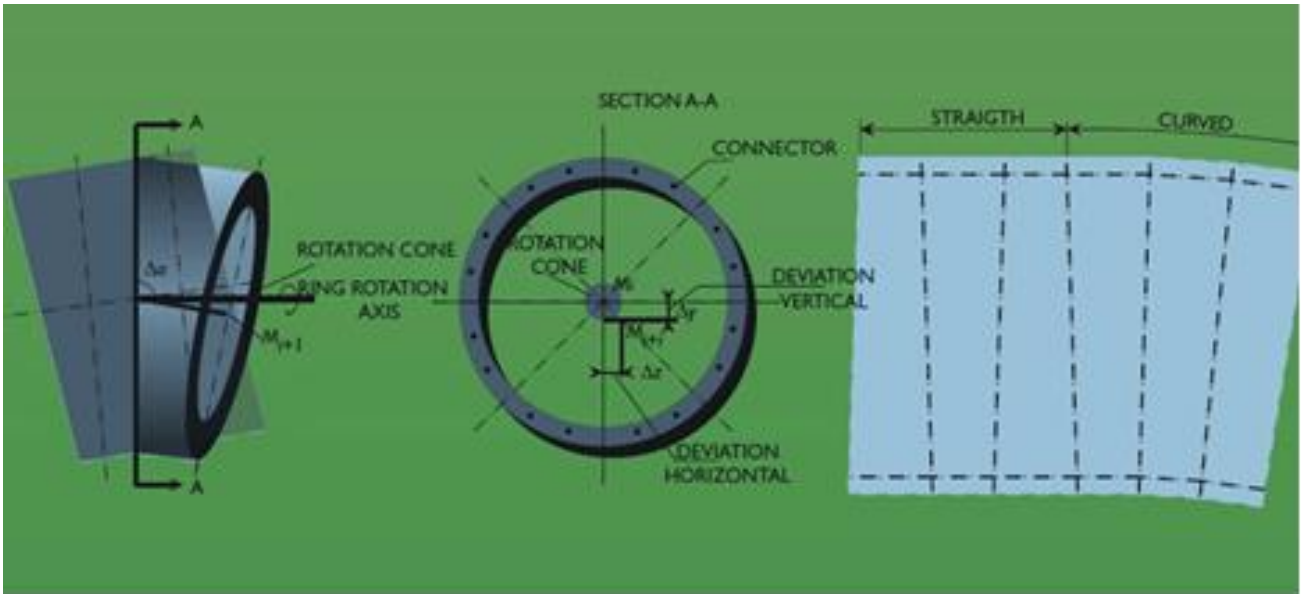
Η τυπική γεωμετρία της διατομής της επένδυσης από προκατασκευασμένα στοιχεία φαίνεται στο Σχήμα 10-14. Ο κάθε δακτύλιος έχει εσωτερική διάμετρο 8.48m και αποτελείται από έξι προκατασκευασμένα στοιχεία (A, B, C, D, E, F), και ένα κλειδί K, πάχους 35cm.

Αποτελείται από στοιχεία τύπου universal, που αποτελεί τη σύγχρονη τάση (Guglielmetti et al. 2007), καθώς ού μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ευθύγραμμα και καμπύλα τμήματα της σήραγγας. Το γεωμετρικό χαρακτηριστικό που εξειδικεύει τον δακτύλιο αυτό είναι η διαφορά μεταξύ του μέγιστου και ελάχιστου μήκους του.



Σχήμα 10-14. Γεωμετρία δακτυλίου προκατασκευασμένων στοιχείων «6+1» (Geodata, 2013).

Ο δακτύλιος Universal επιτρέπει την ακολούθηση της χάραξης (Σχήμα 10-15), χωρίς τη χρήση ειδικών στοιχείων και επίσης τη διόρθωση πιθανών αποκλίσεων του TBM, κατά την διάρκεια της προχώρησης. Για να ακολουθηθούν οι οριζοντιογραφικές και οι μηκοτομικές καμπύλες, οι δακτύλιοι αυτοί συναρμολογούνται με επιμέρους στοιχεία που έχουν διαφορετικές τις δύο απέναντι πλευρές. Οι δακτύλιοι μπορούν να περιστραφούν με γωνία που είναι ίση με το πολλαπλάσιο της γωνιακής απόστασης μεταξύ μιας διαμήκου σύνδεσης και μιας άλλης ( $20^\circ$ ). Για να αποφευχθούν προβλήματα μειωμένης στιβαρότητας της επένδυσης λόγω εμμονής των αρμών, οι διαμήκεις αρμοί διαδοχικών δακτυλίων διατάσσονται πεσοειδώς. Αυτή η διάταξη αυξάνει τη δυσκαμψία του συστήματος της τοξωτής επένδυσης, καθώς οποιοδήποτε άνοιγμα διαμήκου αρμού λόγω στροφής δύο διαδοχικών στοιχείων εμποδίζεται από το επικαλυπτόμενο στοιχείο του γειτονικού δακτυλίου.



Σχήμα 10-15. Δακτύλιος τύπου Universal (Guglielmetti et al., 2007)

Το κάθε στοιχείο του δακτυλίου τοποθετείται πλάι στο άλλο στοιχείο του ίδιου δακτυλίου με μέγιστη διαφορά κατά την έννοια του μήκους τα 10 mm. Οι διαμέτροι που μετρώνται σε διάφορες διευθύνσεις σε ένα τοποθετημένο δακτύλιο δεν μπορεί να είναι μικρότερες ή μεγαλύτερες από την ονομαστική διάμετρο του δακτυλίου περισσότερο από 2%.

#### Παράδειγμα ελάχιστης ακτίνας καμπυλότητας

Σήραγγα διαμέτρου  $D=8m$ , επενδυμένη με προκατασκευασμένα universal τόξα αξονικού μέγιστου μήκους  $a=1525mm$  και ελάχιστου  $b=1475mm$ , τι ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας  $R$  μπορεί να πετύχει;

#### Απάντηση

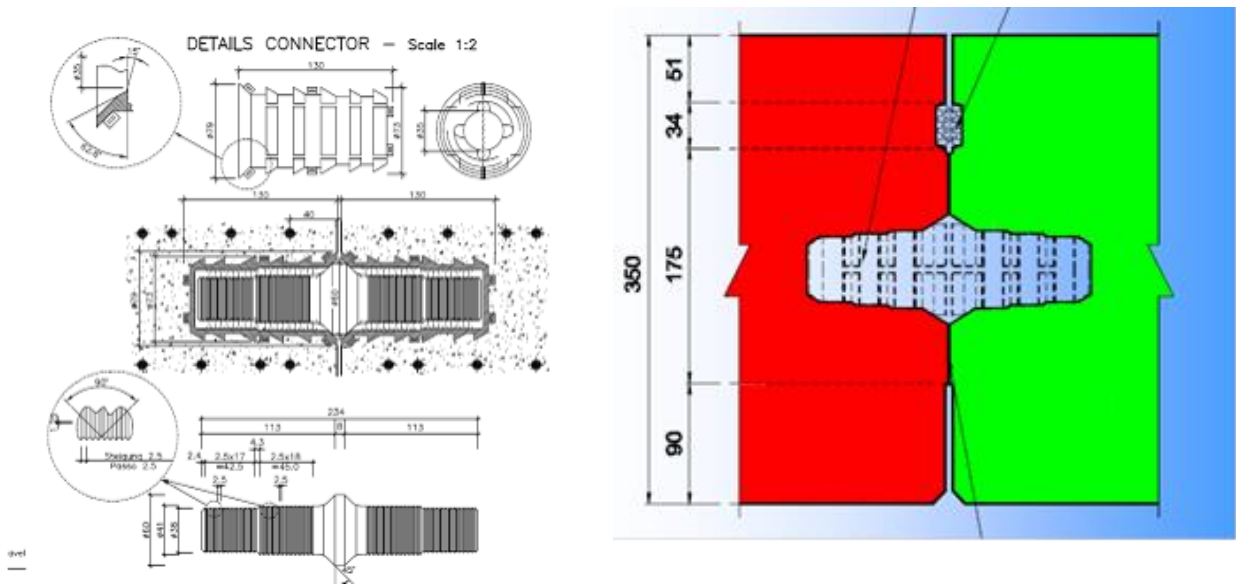
Η ακτίνα καμπυλότητας μετρείται στο μέσον της τροχιάς. Από τα όμοια τρίγωνα έχουμε:

$$\frac{R + \frac{D}{2}}{a} = \frac{R - \frac{D}{2}}{b} \Rightarrow R = \frac{D}{2} \cdot \frac{a + b}{a - b} = \frac{8}{2} \cdot \frac{1525 + 1475}{1525 - 1475} = 240m$$

#### **10.2.3.6.3 Συνδέσεις**

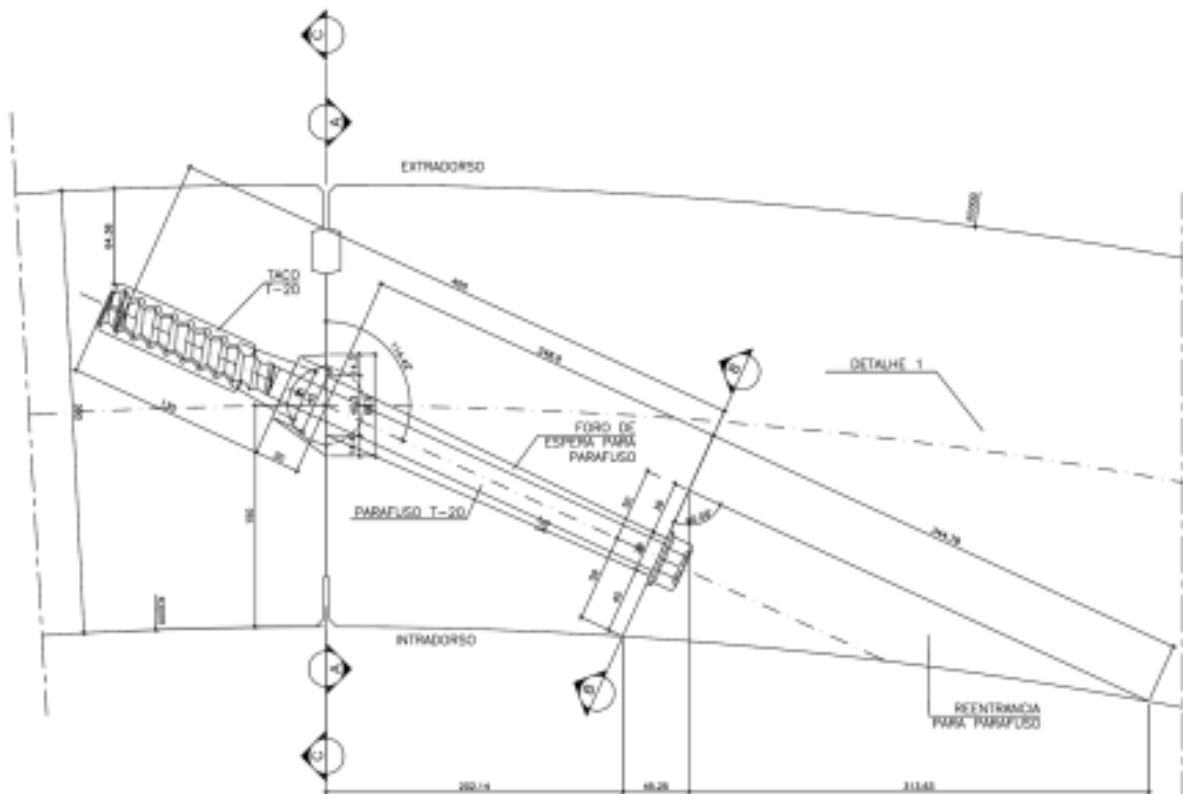
*Διαμήκεις συνδέσεις.* Οι αρμοί του δακτυλίου διασφαλίζονται με τουλάχιστον τρεις πλαστικές ράβδους ή/και μεταλλικούς κοχλίες επαρκούς αντοχής και δύναμης τάνυσης. Εκπονούνται τρεις έλεγχοι για τους διαμήκεις συνδέσμούς:

- Έλεγχος σε δύναμη εξόλκευσης (άμεση εφελκυστική δύναμη από τα παρεμβύσματα), αλληλεπίδραση με το παρέμβυσμα,
- Διατμητική αντίσταση σε στατικές συνθήκες (λόγω του βάρους του προκατασκευασμένου στοιχείου),
- Αντίσταση στην καμπτική ροπή (λόγω του βάρους του τελευταία τοποθετημένου στοιχείου στην οροφή της ουράς της ασπίδας που λειτουργεί σαν πρόβολος).



Σχήμα 10-16. Σύνδεση στους περιφερειακούς αρμούς (μεταξύ δακτύλιων)

Εγκάρσιες συνδέσεις – Κοχλίες. Κάθε διαμήκης αρμός διασφαλίζεται με τουλάχιστον 2 κοχλίες ανά προκατασκευασμένο στοιχείο σε δακτύλιο τύπου universal. Αυτή η απαίτηση μπορεί να ικανοποιείται με τις προβλέψεις που φαίνονται στο Σχήμα 10-17.



Σχήμα 10-17. Κοχλίας σύνδεσης στοιχείων στους διαμήκεις αρμούς (στον ίδιο δακτύλιο)



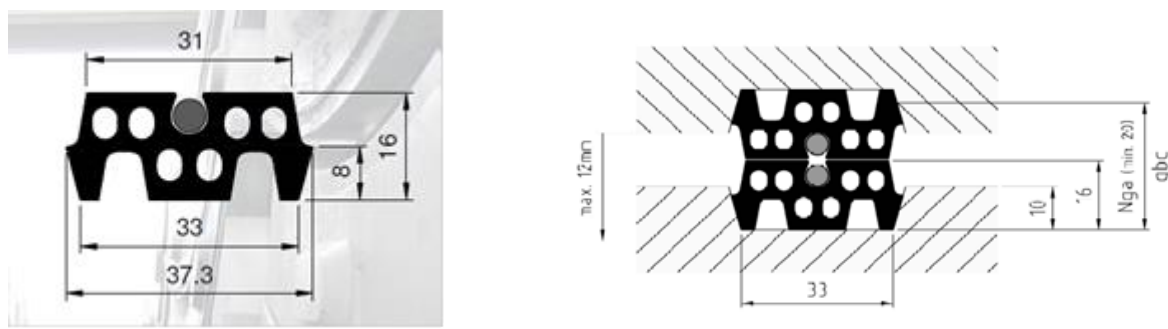
Σχήμα 10-18. Συνεχές παρέμβυσμα περιφερειακά του στοιχείου

## 10.2.4 Στεγάνωση προκατασκευασμένων στοιχείων

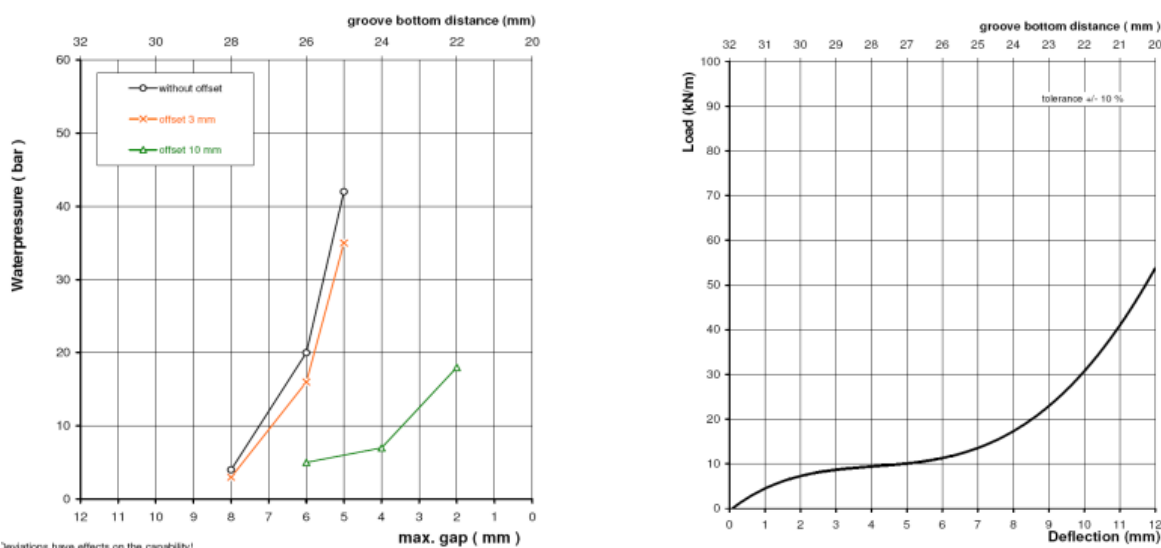
Οι αρμοί της διαμόρφωσης του δακτυλίου και μεταξύ των γειτονικών δακτυλίων, εφ' όσον απαιτείται από τη μελέτη, στεγανώνονται με συνθετικά παρεμβύσματα (Σχήμα 10-18), τα οποία προσαρμόζονται σε συνεχή εγκοπή στην περιοχή του αρμού. Η αποτελεσματικότητα του παρεμβύσματος αποδεικνύεται με ελέγχους καταλληλότητας, οι οποίοι πρέπει να λάβουν υπ' όψη και να θεωρούν πιθανές σχετικές μετατοπίσεις των γειτονικών παρεμβυσμάτων, ανεπαρκή συμπίεσή τους και αντίσταση στην υδροστατική πίεση. Διπλά στεγανωτικά παρεμβύσματα χρησιμοποιούνται μόνο σε προκατασκευασμένα με πάχος >60 cm, αν η Μελέτη δεν προβλέπει διαφορετικά.

Η προμήθεια των υλικών γίνεται από εγκεκριμένους προμηθευτές και υποβάλλονται σε ελέγχους. Τα υδρόφιλα παρεμβύσματα και αυτά που πρέπει, κατά την τοποθέτησή τους, να συμπιεστούν, τοποθετούνται μέσα στον αύλακα που έχει αφαιρεθεί στο χείλος του στοιχείου, σύμφωνα με τις οδηγίες του Κατασκευαστή, ενώ πρέπει να προστατεύονται από τα νερά και να μην τοποθετούνται όταν υπάρχουν νερά στην περιοχή της ανέγερσης των προκατασκευασμένων στοιχείων.

Η διαδικασία επιλογής πραγματοποιείται στη βάση του ότι τα εξεταζόμενα παρεμβύσματα (π.χ. Σχήμα 10-19) πρέπει να διασφαλίζουν τη στεγανωτική πίεση σχεδιασμού, με ταυτόχρονη παρουσία του μεγαλύτερου πιθανού ανοίγματος και της μεγαλύτερης πιθανής εγκάρσιας σχετικής μετακίνησης, λαμβανομένων υπόψη και επαρκών ορίων ασφαλείας. Δυο έλεγχοι (π.χ. Σχήμα 10-20) εκπονούνται για την καταλληλότητα των παρεμβυσμάτων και για τη μηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ παρεμβύσματος και συστήματος σύνδεσης των δακτυλίων.



Σχήμα 10-19. Παρέμβυσμα Datwyler M389 16'' Φ5mm-Black Swell strip με αυλάκωση ανοίγματος 33mm και υλικό τύπου mono EPDM.



Σχήμα 10-20. Χαρακτηριστικά παρεμβυσμάτων (Datwyler M389 16 f 5mm). Αριστερά: Στεγανότητα, Δεξιά: Εκτροπή φορτίου

### 10.2.5 Κριτήρια παραλαβής περατωμένων εργασιών (σύμφωνα με την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-04-03-00:2009, παρ. 6)

- Έλεγχος Πρωτοκόλλων Παραλαβής ενσωματούμενων υλικών.
- Έλεγχος φακέλου εργαστηριακών δοκιμών. Σχετικά με τις απαιτήσεις συμμόρφωσης ισχύουν τα προβλεπόμενα στα Πρότυπα ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-03-00 και ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-01-00.
- Έλεγχος γεωμετρικής ακρίβειας των προκατασκευασμένων στοιχείων, σύμφωνα με την εγκεκριμένη μελέτη.
- Τήρηση ανοχών

#### 10.2.5.1 Ανοχές (πρβ. BTS-ICE, 2000) στο εργοστάσιο

##### 10.2.5.1.1 Ανοχές κατασκευής προκατασκευασμένων στοιχείων

Ο Πίνακας 10-3 δίνει τις ανοχές των διαστάσεων για κάθε ένα τεμάχιο με σχήμα τομέα.

Πίνακας 10-3. Κυκλικά τόξα

α/α	Μέγεθος στοιχείου	mm
1	Μήκος στοιχείου (στην περιφέρεια)	±1
2	Πάχος στοιχείου	±3
3	Πλάτος στοιχείου	±1.5
4	Επιτεδότητα των μετώπων (περιφερειακοί αρμοί). Απόσταση μεταξύ επιφάνειας και ράβδου 1.0 m	< 2
5	Πλάτος αύλακα για τοποθέτηση στεγανωτικού παρεμβύσματος	±1
6	Βάθος αύλακα για τοποθέτηση παρεμβύσματος	1, - 0.5
7	Διαφορά αύλακα, για την τοποθέτηση στεγανωτικού παρεμβύσματος, στις γωνίες	<2

Προκειμένου να ελεγχθούν οι δακτύλιοι, τοποθετούνται δύο, ο ένας πάνω στον άλλο, δοκιμαστικοί δακτύλιοι σε μία οριζόντια και επίπεδη επιφάνεια, έτσι ώστε να συνδέονται μεταξύ τους με ένα τουλάχιστον μπουλόνι, με τοποθετημένα όλα τα προβλεπόμενα κατά μήκος παρεμβύσματα. Ο Πίνακας 10-4 δίνει τις διαστάσεις που πρέπει να ελέγχονται.

Πίνακας 10-4. Δακτύλιοι

α/α	Μέγεθος δακτυλίου	mm
1	Εσωτερική διάμετρος	max(±0.2% διαμέτρου ή 6 mm)
2	Διαφορά εσωτερικής διαμέτρου μεταξύ δύο στοιχείων που ακουμπούν	< 5
3	Άνοιγμα των κατά μήκος αρμών των τομέων (αφού αφαιρεθούν τα παρεμβύσματα και στερεωθούν σφιχτά τα στοιχεία του δακτυλίου μεταξύ τους)	Να μην περνά έλασμα μέτρησης 1mm

##### 10.2.5.1.2 Ανοχές κατασκευής προκατασκευασμένων στοιχείων μεταβλητής διατομής

Ο Πίνακας 10-5 δίνει τις ανοχές των διαστάσεων για κάθε ένα τεμάχιο με σχήμα τομέα.

Πίνακας 10-5. Κυκλικά τόξα

α/α	Μέγεθος στοιχείου	mm
1	Μήκος στοιχείου (στην περιφέρεια)	±1
2	Πάχος στοιχείου	±1.5
3	Πλάτος στοιχείου	±1.5
4	Επιτεδότητα επιφανειών. Ελέγχεται με την τοποθέτηση ευθύγραμμου χάρακα σε κάθε θέση παράλληλη με τους άξονες του εξωραχίου των επιφανειών των εγκάρσιων αρμών και στους κατά μήκος και εγκάρσιους αρμούς.	Να μην περνά έλασμα μέτρησης πάχους: 0.25

Αρμοί Εξωράχιο, εσωράχιο	1.25
-----------------------------	------

Τοποθετείται ένα δοκιμαστικός δακτύλιος σε μία οριζόντια και επίπεδη επιφάνεια, με τοποθετημένα όλα τα προβλεπόμενα κατά μήκος παρεμβύσματα. Ο Πίνακας 10-6 δίνει τις διαστάσεις που πρέπει να ελέγχονται.

Πίνακας 10-6. Δακτύλιοι

α/α	Μέγεθος δακτυλίου	mm
1	Εσωτερική διάμετρος	max(±0.2% διαμέτρου ή 6 mm)
2	Διαφορά εσωτερικής διαμέτρου μεταξύ δύο στοιχείων που ακουμπούν	< 1.5
3	Άνοιγμα των κατά μήκος αρμών των τομέων (αφού αφαιρεθούν τα παρεμβύσματα και στερεωθούν σφιχτά τα στοιχεία του δακτυλίου μεταξύ τους)	Να μην περνά έλασμα μέτρησης πάχους 0.5

### 10.2.5.1.3 Ανοχές κατασκευής προκατασκευασμένων στοιχείων τραπεζοειδούς διατομής

Ο Πίνακας 10-7 δίνει τις ανοχές των διαστάσεων για κάθε ένα τεμάχιο με σχήμα τομέα.

Πίνακας 10-7. Κυκλικά τόξα

α/α	Μέγεθος στοιχείου	mm
1	Μήκος στοιχείου (στην περιφέρεια)	±1
2	Πάχος στοιχείου	-1 έως +3
3	Πλάτος στοιχείου	±1
4	Επιπεδότητα των μετώπων (περιφερειακοί αρμοί). Απόσταση μεταξύ επιφάνειας και ράβδου 1.0 m	< 1
5	Πλάτος αύλακα για τοποθέτηση στεγανωτικού παρεμβύσματος	±1
6	Βάθος αύλακα για τοποθέτηση παρεμβύσματος	+1 έως -0.5
7	Διαφορά αύλακα, για την τοποθέτηση στεγανωτικού παρεμβύσματος, στις γωνίες	<1

Προκειμένου να ελεγχθούν οι δακτύλιοι, τοποθετούνται δύο, ο ένας πάνω στον άλλο, δοκιμαστικοί δακτύλιοι σε μία οριζόντια και επίπεδη επιφάνεια, έτσι ώστε να συνδέονται μεταξύ τους με ένα τουλάχιστον μπουλόνι, με τοποθετημένα όλα τα προβλεπόμενα κατά μήκος παρεμβύσματα. Ο Πίνακας 10-8 δίνει τις διαστάσεις που πρέπει να ελέγχονται.

Πίνακας 10-8. Δακτύλιοι

α/α	Μέγεθος δακτυλίου	mm
1	Εσωτερική διάμετρος	max(±0.2% διαμέτρου ή 6 mm)
2	Διαφορά εσωτερικής διαμέτρου μεταξύ δύο στοιχείων που ακουμπούν	< 3
3	Άνοιγμα των κατά μήκος αρμών των τομέων (αφού αφαιρεθούν τα παρεμβύσματα και στερεωθούν σφιχτά τα στοιχεία του δακτυλίου μεταξύ τους)	Να μην περνά έλασμα μέτρησης 1mm

### 10.2.5.2 Έλεγχος γεωμετρικής ακρίβειας της μόνιμης επένδυσης

Οι Ανοχές Μόνιμης Επένδυσης Σήραγγας, αν δεν καθορίζεται διαφορετικά στην Μελέτη, είναι:

#### 10.2.5.2.1 Γραμμή και Κλίση

Ο θεωρητικός άξονας της σήραγγας καθορίζεται σαν ο γεωμετρικός τόπος των τομών των εμφανιζόμενων στα σχέδια οριζοντίων και κατακόρυφων αξόνων των διατομών της σήραγγας. Ο Πίνακας 10-9 δίνει τη μέγιστη



απόκλιση του πραγματικού άξονα της σήραγγας και της επένδυσής της από την καθορισθείσα οριζοντιογραφική και υψομετρική θέση αυτού που φαίνεται στα σχέδια.

Πίνακας 10-9. Γραμμή και κλίση

L (m)	Μέγιστη οριζοντιογραφική απόκλιση άξονα (m)	Μέγιστη υψομετρική απόκλιση άξονα (m)
≤500	± 0.05	± 0.03
500÷1000	± [0.05+(L-500)·10 <sup>-4</sup> ]	± [0.03+(L-500)·4·10 <sup>-5</sup> ]
≥1000	± 0.10	± 0.05

### 10.2.5.2 Απόκλιση από τις Εσωτερικές Διαστάσεις της Σήραγγας

Οι διαστάσεις του εσωραχίου των σηράγγων, που προκύπτουν μετά την κατασκευή της μόνιμης επένδυσης, δεν πρέπει να διαφέρουν σε κανένα σημείο τους από τις αντίστοιχες διαστάσεις του εσωραχίου, που προβλέπονται στα εγκεκριμένα κατασκευαστικά σχέδια, περισσότερο από 2 cm.

### 10.2.5.3 Έλεγχος της τελειωμένης επιφάνειας.

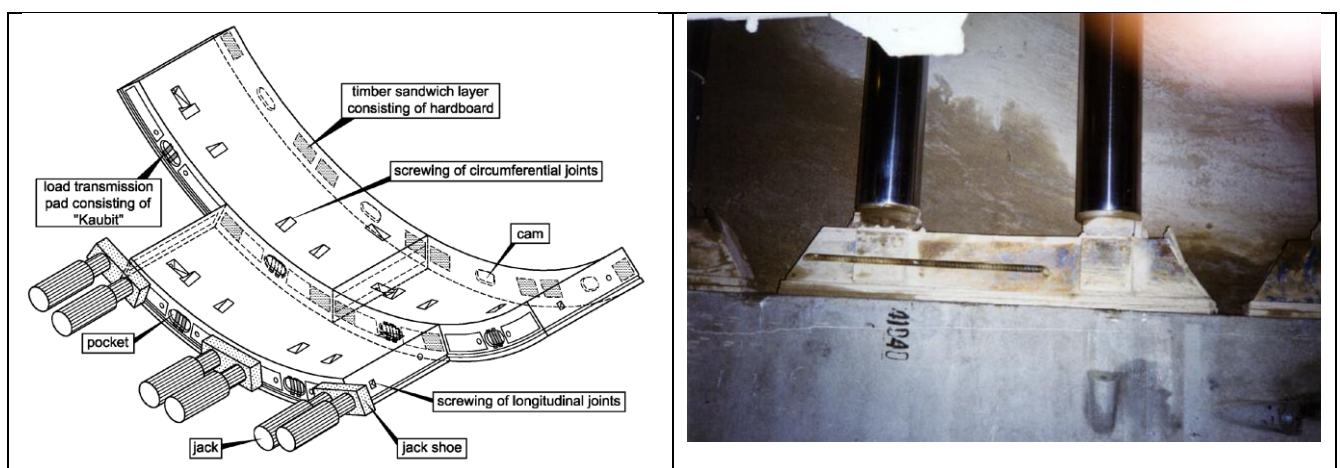
Η μέγιστη απόσταση μεταξύ χειλέων τοποθετημένων τεμαχίων είναι 10mm

## 10.3 Προχώρηση του TBM

Η προχώρηση του TBM με ασπίδα, όπως είναι το μηχάνημα διάνοιξης σηράγγων τύπου EPBM, βασίζεται στην ώση εμβόλου, στον τελευταίο τοποθετηθέντα δακτύλιο μέσω κυλίνδρων. Συνεπώς, η καταλληλότητα της τμηματικής επένδυσης να παραλαμβάνει τέτοια φορτία εμβόλων πρέπει να ελέγχεται στατικά σε:

- Πίεση επαφής μεταξύ των πέλδων των κυλινδρικών γρύλων και του προκατασκευασμένου στοιχείου
- Δύναμη διάρρηξης (τάσεις εφελκυστικού αποχωρισμού), που αναπτύσσεται μέσα στα προκατασκευασμένα στοιχεία.

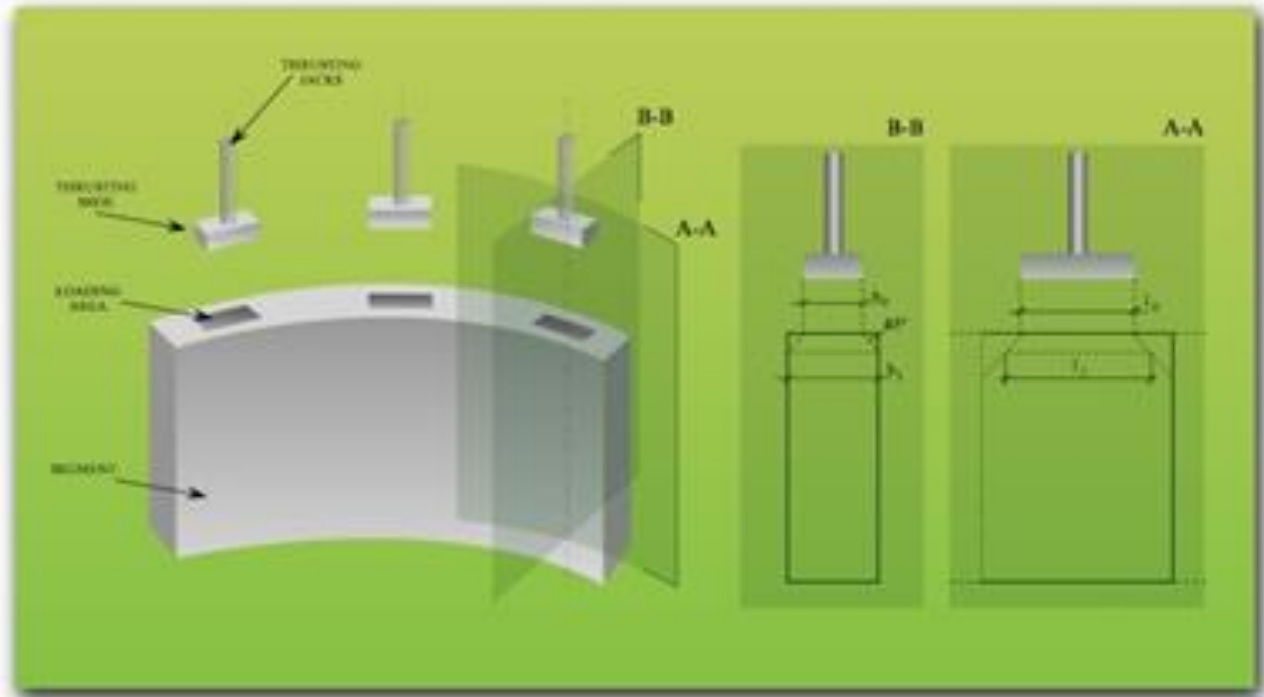
Στη διάρκεια της προχώρησης του TBM, τα προκατασκευασμένα στοιχεία φορτίζονται στις πρόσθιες περιφερειακές πλευρές από τις δυνάμεις των εμβόλων όπως φαίνεται στο Σχήμα 10-21. Στις πίσω πλευρές των στοιχείων, οι δυνάμεις αυτές μεταφέρονται στους δακτυλίους της τμηματικής επένδυσης, που έχουν ήδη τοποθετηθεί, μέσω πέλδων μεταφοράς φορτίων, που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι φτιαγμένα από χαρτόνι. Λόγω της πλευρικής επέκτασης των εφαρμοζόμενων φορτίων από τα έμβολα, λειτουργούν στο στοιχείο επαγόμενες εγκάρσιες εφελκυστικές δυνάμεις που παραλαμβάνονται από τον οπλισμό, τόσο περιφερειακά όσο και στις εγκάρσιες διευθύνσεις.



Σχήμα 10-21. Μεταφορά της ώθησης στον δακτύλιο της τοξωτής επένδυσης μέσω των εμβόλων

Ο έλεγχος αυτός είναι συχνά κρίσιμος για τη στατική διαστασιολόγηση και για την εμφάνιση των ζημιών στα προκατασκευασμένα στοιχεία και για αυτό πραγματοποιείται με τη μεγαλύτερη δυνατή λεπτομέρεια και

ακρίβεια. Η γεωμετρία της πίεσης επαφής του πέδιλου του εμβόλου και η περιοχή επιρροής του στοιχείου φαίνονται στο Σχήμα 10-22.



Σχήμα 10-22. Ώση εμβόλων στον περιφερειακό αρμό

Οι δομητικοί έλεγχοι εκπονούνται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 (EN 1992-1-1:2004), παράγ. 6.7, αναφορικά με τα σημειακά φορτία, και η αντοχή του σκυροδέματος έχει ήδη αναπτυχθεί πλήρως.

### 10.3.1 Πίεση επαφής μεταξύ πέδιλου εμβόλου και στοιχείου

Ο έλεγχος δύναται να πραγματοποιείται με τριδιάστατη ανάλυση (Wittke, 2007) πεπερασμένων στοιχείων. Συχνά θεωρείται ικανοποιητικός όταν επαληθεύεται η ανισότητα :

$$F_{sd} \leq F_{rd} \leq F_{max}; F_{sd} = 1.1 \times \frac{F_{TBM}}{N_c}; F_{rd} = A_{c0} \times f_{cd} \times \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}}; F_{max} = 3.0 \times f_{cd} \times A_{c0}$$

$$A_{c0} = b_0 \times l_0, A_{c1} = b_1 \times l_1$$

(10-1)

Όπου,

$F_{TBM}$  : μέγιστη δύναμη ώθησης του TBM,

$N_c$  : αριθμός των πέδινων που μεταφέρουν φορτία στον δακτύλιο της τμηματικής επένδυσης,

$F_{rd}$  μέγιστο φορτίο στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας της δύναμης ώθησης των ωστήρων,

$F_{sd}$  είναι το μέγιστο φορτίο ULS της δύναμης που εφαρμόζεται από τα έμβολα

$F_{max}$  : μέγιστο επιτρεπτό φορτίο που σχετίζεται άμεσα με την ποιότητα του σκυροδέματος,

$b_0$  και  $l_0$ : διαστάσεις της φορτιζόμενης περιοχής

$b_1$  και  $l_1$ : διαστάσεις της περιοχής κατανομής.

### 10.3.2 Δυνάμεις διάρρηξης (splitting) μέσα στο τόξο

Σαν αποτέλεσμα της δύναμης ώθησης του TBM που λειτουργεί στα προκατασκευασμένα στοιχεία μέσω των εμβόλων, αναπτύσσονται ζώνες θλίψης και εφελκυσμού μέσα στα στοιχεία. Η τάση εφελκυσμού μέσα στο στοιχείο, προκαλεί διάρρηξη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10-23. Η θεωρία του φορτίου διάρρηξης σε ελαστικό

μέσο, που έχει αναπτυχθεί από τον Leonhardt (1971), δύναται να υιοθετηθεί για την ανάλυση της κατανομής της τάσης εφελκυσμού, τόσο στη διαμήκη όσο και στην περιφερειακή διεύθυνση.



Σχήμα 10-23. Κατανομή της δύναμης εφελκυστικής διάρρηξης μέσα στο τόξο

### 10.3.2.1 Περιφερειακή διατομή

Η περιφερειακή διατομή περιγράφεται ικανοποιητικά στην τομή Α-Α στο Σχήμα 10-22. Για να βρεθεί η περιοχή κατανομής της εφελκυστικής αντοχής, γίνεται χρήση νομογράμματος, που φαίνεται στο Σχήμα 10-24. Με αναφορά στο σχήμα, λαμβάνεται ο τύπος που χρησιμοποιείται στο νομόγραμμα:

$$Z = 0.25 \times F_{sd} \times \left(1 - \frac{l_1}{l_2}\right); A_s = \frac{Z}{f_{yd}} \quad (10-2)$$

όπου,

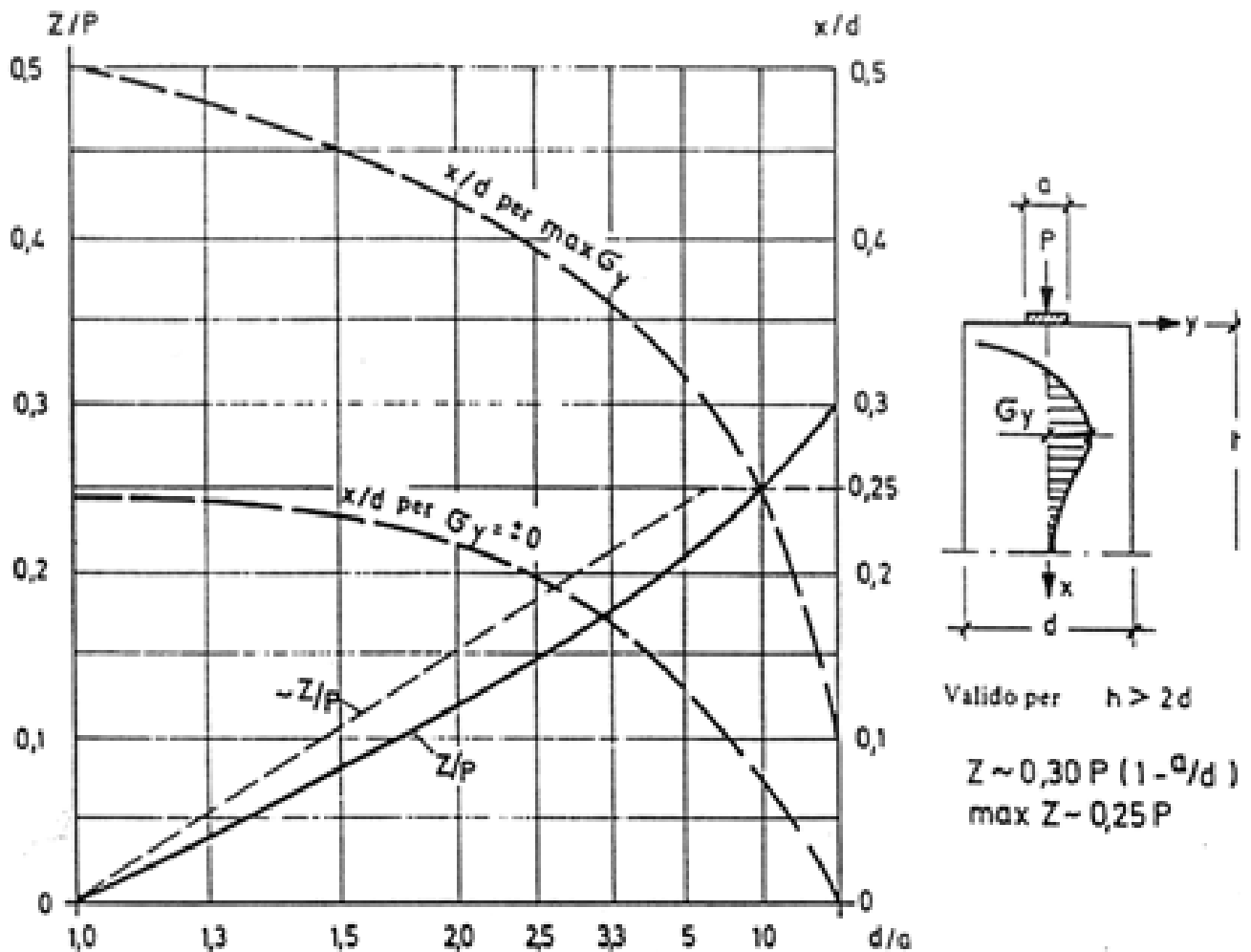
$l_1$  = μήκος της άνω περιφέρειας του πέλδλου

$l_2$  = μήκος του στερεού που υπόκειται σε αυτό το φορτίο

$A_s$  = απαιτούμενη διατομή χάλυβα για την αποφυγή εφελκυστικής θραύσης

$f_{yd}$  = αντοχή διαρροής του χαλύβδινου οπλισμού

$Z$  = δύναμη διάρρηξης



Σχήμα 10-24. Αριστερά: Νομόγραμμα προσδιορισμού περιοχών μέγιστης και ελάχιστης τάσης εφελκυστικής διάρρηξης (splitting) λόγω αξονικής δύναμης ώθησης (Leonhardt 1971)

### 10.3.2.2 Εγκάρσια διατομή

Παρομοίως, στην εγκάρσια τομή, η κατανομή της τάσης εφελκυσμού δίνεται από το νομόγραμμα στο Σχήμα 10-24. Είναι επίσης απαραίτητο να γνωρίζουμε τους ελάχιστους οπλισμούς που θα καλύψουν τη ζώνη εφελκυσμού.

## 10.4 Λειτουργία της σήραγγας

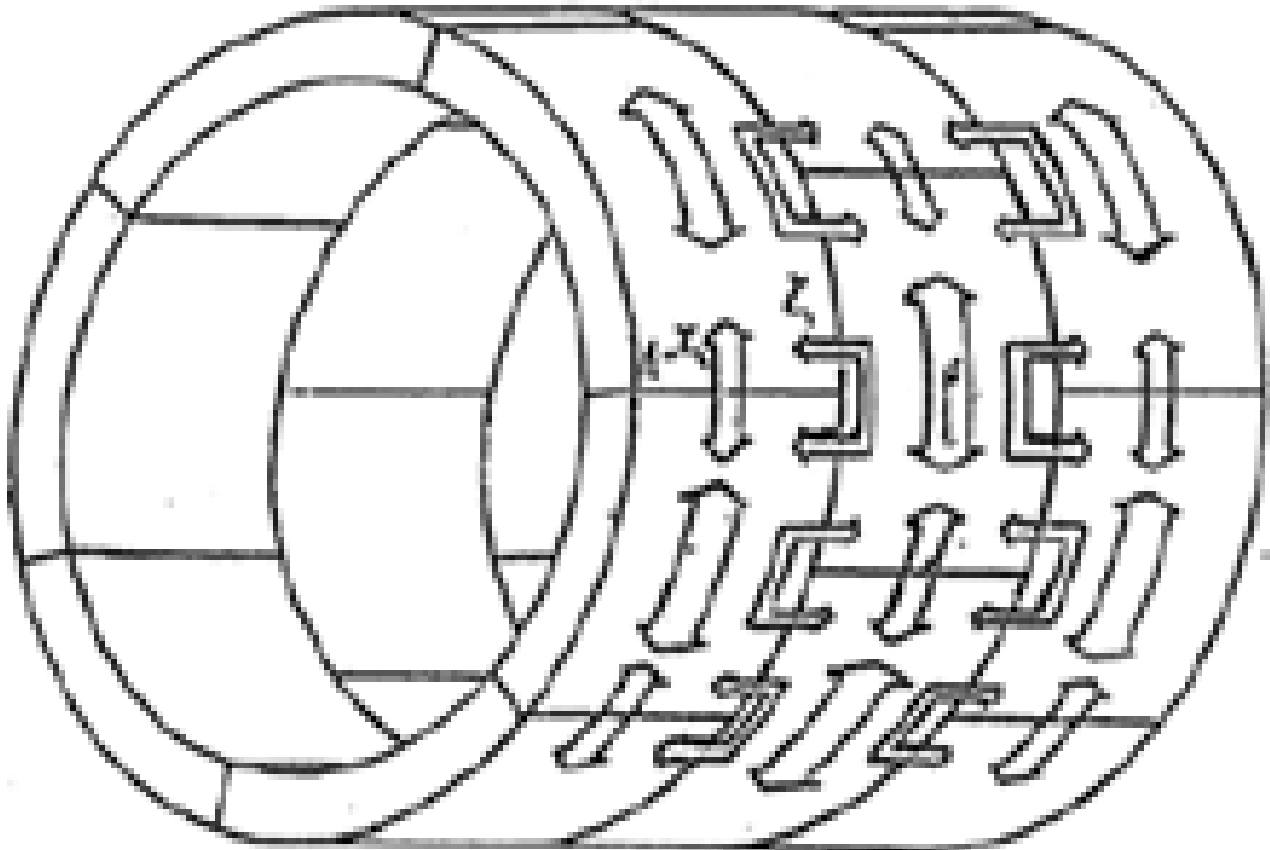
Στη μακρά περίοδο λειτουργίας της σήραγγας, η τμηματική επένδυση πρέπει να παραλαμβάνει όλα τα πιθανά φορτία που θα εφαρμοσθούν στη διάρκεια της ζωής του έργου.

### 10.4.1 Αδράνεια του δακτυλίου της επένδυσης

Ο δακτύλιος της επένδυσης δεν έχει δυσκαμψία, ούτε ίση με αυτήν ενός συμπαγούς κυλίνδρου σταθερού πάχους, αλλά ούτε και ίση με αυτήν δακτυλίου με εμμένοντες διαμήκεις αρμούς. Η δυσκαμψία είναι θεμελιώδους σημασίας για τον προσδιορισμό των δρωσών τάσεων και των μετακινήσεων, ειδικά αυτών που αφορούν τους αρμούς. Η τιμή της εξαρτάται από τον αριθμό των προκατασκευασμένων στοιχείων του δακτυλίου, καθώς και από τον τύπο του υπεδάφους που διαδρά με τον δακτύλιο. Λόγω του ότι η διάταξη των δακτυλίων περιστρέφεται συνεχώς, δεν είναι πρακτικό να προσομοιωθεί η παρουσία των αρμών σε συγκεκριμένες θέσεις, για παράδειγμα με μειωμένα πάχη ή ειδικές διεπιφάνειες.

Η προσομοίωση αυτής της ειδικής κατασκευής μπορεί να γίνει αποτελεσματικά με τη χρήση της διαδικασίας που συστήνεται από την Ιαπωνική Επιτροπή Σηράγγων. Με αυτήν προσδιορίζεται η μειωμένη δυσκαμψία και η τιμή των καμπτικών ροπών που λειτουργούν στο δακτύλιο και τους αρμούς. Στο Σχήμα 10-25 φαίνεται η

γενική αρχή της προσομοίωσης. Ο δακτύλιος θεωρείται αποτελούμενος από ζώνες, τόσο υψηλής, όσο και χαμηλής δυσκαμψίας, δηλαδή από τα στοιχεία και τους αρμούς αντιστοίχως. Μια ακολουθία δακτυλίων είναι αυτή όπου ένας αρμός σε ένα δακτύλιο καταλήγει σε προκατασκευασμένο στοιχείο του προηγούμενου και του επόμενου δακτυλίου. Αυτή η διάταξη επιτρέπει τις ροπές που δεν μπορούν να αναληφθούν από τους αρμούς, να μεταφέρονται στον προηγούμενο και τον επόμενο δακτύλιο.



Σχήμα 10-25. Δυσκαμψία της τοξωτής επένδυσης

Πίνακας 10-10. Μειωμένα χαρακτηριστικά του δακτυλίου

	Μέγεθος	Μείωση	Επεξήγηση
1	$E_a =$	$(1 - \zeta) \cdot E_c$	το διορθωμένο μέτρο ελαστικότητας του δακτυλίου
2	$M_j =$	$(1 - \zeta) \cdot M_c$	η καμπτική ροπή του αρμού
3	$M_s =$	$(1 + \zeta) \cdot M_c$	η καμπτική ροπή του προκατασκευασμένου στοιχείου
4	$M_c =$		η καμπτική ροπή που υπολογίστηκε από την ανάλυση
5	$E_c =$		το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος
6	$\zeta =$		συντελεστής που λαμβάνει τιμές 0.3÷0.5

Αυτή η θεώρηση μεταφέρεται στην αριθμητική ανάλυση με τα βήματα: (α) Διόρθωση σε  $E_a$  του μέτρου ελαστικότητας (γραμμή 1, Πίνακας 10-10)  $E_c$  του σκυροδέματος του δακτυλίου σύμφωνα με τον παράγοντα  $\zeta$  (γραμμή 6, Πίνακας 10-10), (β) Υπολογισμός των φορτίων διατομής, (γ) Τροποποίηση της τιμής της καμπτικής ροπής  $M_c$ , με την αυξομείωση της τιμής αντίστοιχα σε  $M_s$  για το δακτύλιο (γραμμή 3, Πίνακας 10-10) και σε  $M_j$  για τους αρμούς (γραμμή 2, Πίνακας 10-10) με τον ίδιο παράγοντα  $\zeta$  (η αξονική δύναμη παραμένει η ίδια).

Η τιμή της παραμέτρου  $\zeta$  κυμαίνεται μεταξύ 0.3 και 0.5 σα συνάρτηση του αριθμού των στοιχείων και της ακαμψίας του περιβάλλοντος εδάφους. Η τιμή 0.3 έχει εκτιμηθεί από ανάστροφες αναλύσεις που επιβεβαιώθηκαν από πολλούς μελετητές.

Οι κρίσιμες διατομές σχεδιασμού των σηράγγων πρέπει να περιλαμβάνουν χαρακτηριστικές διατομές, όπως με: (α) το μεγαλύτερο υπερκείμενο, (β) το ελάχιστο υπερκείμενο, (γ) την υψηλότερη στάθμη υδροφόρου ορίζοντα, (δ) την χαμηλότερη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (ε) τη μέγιστη επιφόρτιση, (ς) έκκεντρα φορτία,

(ζ) ανισοσταθμία στην επιφάνεια, (η) διπλανή σήραγγα σε σημερινή ή μελλοντική περίπτωση, (θ) μελλοντικές αναπτύξεις (έργα τρίτων), (ι) μαλακό έδαφος, (ια) μικτό ή βραχώδες έδαφος.

## 10.4.2 Φορτία

### 10.4.2.1 Ίδιον βάρος κατασκευής

Για τον υπολογισμό του ιδίου βάρους της τμηματικής επένδυσης ο Πίνακας 10-11 δίνει μοναδιαία βάρη που δύνανται να λαμβάνονται.

Πίνακας 10-11. Μοναδιαία βάρη

Υλικό	Μοναδιαίο βάρος
Οπλισμένο ή προεντεταμένο σκυρόδεμα	25 kN/m <sup>3</sup>
Άοπλο σκυρόδεμα	23 kN/m <sup>3</sup>
Χάλυβας	78 kN/m <sup>3</sup>
Άλλα Υλικά	Από εγκεκριμένους κανονισμούς ή άλλες έγκυρες πηγές

### 10.4.2.2 Φορτία εδάφους και υπόγειου νερού

Σαν εδαφικό φορτίο θεωρείται το βαρυντικό φορτίο που προκύπτει από το γινόμενο του μοναδιαίου βάρους της εδαφικής στρώσης επί το ύψος του υπερκειμένου ( $\gamma \times H$ ). Επιπρόσθετα του εδαφικού φορτίου, θεωρείται και η υδραυλική στατική πίεση λόγω της ύπαρξης του υδροφόρου ορίζοντα και των μεταβολών του, τόσο στους βραχυπρόθεσμους, όσο και τους μακροπρόθεσμους στατικούς ελέγχους της κατασκευής.

### 10.4.2.3 Επιφανειακά φορτία κτιρίων και κατασκευών τρίτων μερών

Είναι τα φορτία των κτιρίων ή άλλων υφισταμένων κατασκευών (γέφυρες, μνημεία, κλπ.) στη γειτονία του έργου για τη διάρκεια της κατασκευής, τα οποία αξιολογούνται ξεχωριστά για κάθε κτίριο με τρόπο κατάλληλο για τον τύπο και τη διάταξη της θεμελίωσης κάθε κατασκευής/κτιρίου. Για κοινές κατασκευές κτιρίων και για κάθε όροφο, δύναται να εφαρμόζεται ομοιόμορφο φορτίο 10 kN/m<sup>2</sup> σαν μια καλή εκτίμηση μόνιμων και κινητών φορτίων του κτιρίου. Για μελλοντικά κτίρια, στη θέση του υφισταμένου κτιρίου ή του οικοπέδου, το φορτίο (>50kN/m<sup>2</sup>) δύναται γενικά να προκύπτει από το μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό ορόφων σύμφωνα με τους προβλεπόμενους όρους δόμησης της εκάστοτε περιοχής, προσαυξημένο (~3.0m) και λαμβανομένου υπόψη του προαναφερθέντος φορτίου ανά όροφο των 10 kN/m<sup>2</sup>. Ασύμμετρες κατασκευές και δυσμενείς εκσκαφές, εφόσον είναι πιθανές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

### 10.4.2.4 Φορτία κυκλοφορίας

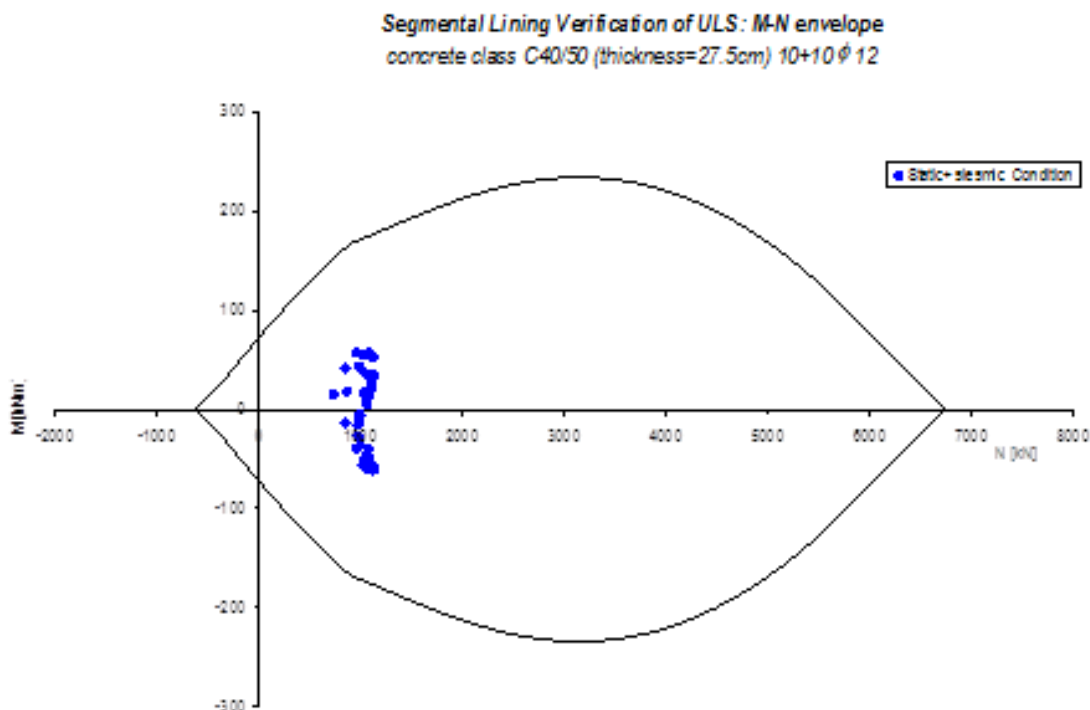
Τα φορτία οδικής κυκλοφορίας στην επιφάνεια του εδάφους, που λαμβάνονται υπόψη στη μελέτη είναι συνήθως της τάξης των 15 kN/m<sup>2</sup>.

## 10.4.3 Έλεγχοι τυπικών φορτίων

### 10.4.3.1 Στατικός έλεγχος των τόξων του δακτυλίου

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 7 – μέρος 1, απαιτούνται έλεγχοι της κατασκευής σε Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ULS) και σε οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (SLS), όπως προβλέπεται από τον εθνικό ελληνικό κανονισμό και τον Ευρωκώδικα (EN 1992-1-1:2004). Στην κατάσταση ULS, η αντοχή κάποιου τμήματος της όλης κατασκευής έχει ξεπεραστεί, ενώ στην κατάσταση SLS οι λειτουργικές απαιτήσεις έχουν ξεπεραστεί, όπως για παράδειγμα, υπερβολική, πέρα από τα επιτρεπτά όρια, καθίζηση, παράλληλη μετατόπιση, στροφή, παραμόρφωση ή εμφάνιση ρωγματώσεων.

Ο κύριος χαλύβδινος οπλισμός του προκατασκευασμένου στοιχείου θα διαταχθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των στατικών ελέγχων. Ο έλεγχος για καμπτικές ροπές-αξονικές δυνάμεις (π.χ. Σχήμα 10-26), και για τέμνουσες δυνάμεις, πραγματοποιείται με βάση την ULS. Η ανάλυση οριακής κατάστασης αστοχίας εκπονείται με τη χρήση ειδικών συντελεστών ασφαλείας για τα φορτία και την αντοχή. Οι τιμές των επί μέρους συντελεστών ασφαλείας λαμβάνονται από τον Ευρωκώδικα 7 και το Εθνικό Παράρτημα EN 1997-1: 2004, ανάλογα με τον τύπο του έργου (προσωρινό ή μόνιμο), την περίπτωση της φόρτισης (κανονική ή τυχηματική) και τον τύπο του εδάφους.



Σχήμα 10-26. Περιβάλλουσα αντοχής M-N σε έλεγχο οριακής κατάστασης αστοχίας

Οι αναλύσεις εκπονούνται για αντιπροσωπευτικές γεωτεχνικές τομές εδάφους, στις οποίες βασίζονται οι έλεγχοι. Εφαρμόζονται εμπειρικές, αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι. Οι Εμπειρικές μέθοδοι βασίζονται σε εμπειρικούς τύπους και άλλες μεθόδους βάσει εμπειρίας από εφαρμογές σε παρόμοια έργα. Οι Αναλυτικές μέθοδοι εφαρμόζονται χρησιμοποιώντας μαθηματικές λύσεις για τις τάσεις και παραμορφώσεις γύρω από τη σήραγγα, που βρίσκονται στη βιβλιογραφία ή για ρηχές σήραγγες ολόκληρο το γεωστατικό πεδίο φορτίζει την κατασκευή. Οι Αριθμητικές μέθοδοι αξιολογούν την επάρκεια της τοξωτής επένδυσης με υπολογιστικές τεχνικές, που ακολουθούν σε βήματα τις φάσεις εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας.

#### 10.4.3.2 Δράση ακτινικού (διαμήκους) αρμού και σχετικοί έλεγχοι

Οι ορθές τάσεις που λειτουργούν σε περιμετρική διεύθυνση μεταφέρονται από τους διαμήκεις αρμούς του δακτυλίου. Πιθανή εκκεντρότητα της ορθής τάσης οδηγεί σε ανάπτυξη καμπτικής ροπής στον αρμό. Ανάλογα με το κριτήριο σχεδιασμού, η πίεση επαφής στην επιφάνεια του αρμού και η δύναμη εκτίναξης πρέπει να διερευνηθούν. Η μέγιστη εκκεντρότητα προσδιορίζεται από την καμπτική ροπή που αναπτύσσεται στους αρμούς και από την ελάχιστη συνεμφανιζόμενη ορθή δύναμη. Η ανάλυση ακολουθεί τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην ενότητα 10.3.2.

#### 10.4.3.3 Έλεγχος άνωσης

Η δομή της σήραγγας πρέπει να ελεγχθεί έναντι της άνωσης, λαμβάνοντας υπόψη, (α) τα νεκρά φορτία, (β) Χαρακτηριστικά φορτία με διεύθυνση προς τα κάτω (βάρος επανεπίχωσης), (γ) Χαρακτηριστικές υδροστατικές πιέσεις άνωσης. Κινητά και νεκρά φορτία που μπορεί να μην είναι παρόντα σε ολόκληρη την διάρκεια λειτουργίας του έργου δεν λαμβάνονται υπόψη. Οι υπολογισμοί βασίζονται στη δυσμενέστερη περίπτωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στη διάρκεια λειτουργίας του έργου (οριακή κατάσταση αστοχίας), ο οποίος θα εκτιμηθεί από τις πραγματικές επί τόπου συνθήκες αναφορικά με τα υδρογεωλογικά στοιχεία, συμπεριλαμβανομένων πιθανών επιπτώσεων από την παρουσία της κατασκευής στη ροή του υπογείου νερού. Η ασφάλεια της κατασκευής έναντι επίπλευσης προσδιορίζεται σύμφωνα με την αναφορά των παραγράφων 2.4.7.4 και 10.2 του EN1997-1.

## 10.4.4 Έλεγχοι σε σεισμό και τυχηματικά φορτία

### 10.4.4.1 Σεισμός

Γενικά, η περίπτωση της σεισμικής φόρτισης υπολογίζεται σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ-2000 και όπως έχει τροποποιηθεί από τότε) λαμβανομένων υπόψη των προδιαγραφών και της σοβαρότητας των κατασκευών. Η σεισμική εδαφική επιτάχυνση λαμβάνεται σύμφωνα με τις ζώνες εφαρμογής. Ο σεισμικός έλεγχος της τελική επένδυσης, δύναται να εκπονεείται σύμφωνα με τη μέθοδο Kuesel, για θεώρηση περιορισμένου υπερκειμένου. Η σχετική με την περιοχή μέγιστη επιτάχυνση εδάφους δίνεται από την εξίσωση:

$$a_{max,s} = S \cdot a_{gR} \quad (10-3)$$

όπου  $S$  είναι ο παράγων του εδάφους που εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους. Στον Ευρωκώδικα 8 συστήνεται τιμή του  $S$  με βάση τον τύπο του φάσματος ελαστικής απόκρισης. Ο Πίνακας 10-12 αφορά στις συνθήκες που χαρακτηρίζονται από  $M_w < 5.5$ , ενώ ο Πίνακας 10-13 σε συνθήκες που χαρακτηρίζονται από  $M_w > 5.5$ .

Πίνακας 10-12. Τιμές παραμέτρων για το Τύπου 1 φάσμα ελαστικής απόκρισης

Τύπος εδάφους	S	$T_B$ (s)	$T_\psi$ (s)	$T_D$ (s)
A	1	0.05	0.25	1.2
B	1.35	0.05	0.25	1.2
C	1.5	0.10	0.25	1.2
D	1.8	0.10	0.30	1.2
E	1.6	0.05	0.25	1.2

Πίνακας 10-13. Τιμές παραμέτρων για το Τύπου 2 φάσμα ελαστικής απόκρισης

Τύπος εδάφους	S	$T_B$ (s)	$T_\psi$ (s)	$T_D$ (s)
A	1	0.15	0.4	2
B	1.2	0.15	0.5	2
C	1.15	0.20	0.6	2
D	1.35	0.20	0.8	2
E	1.4	0.15	0.5	2

Η ειδική τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης της περιοχής του έργου, πρέπει να διορθωθεί λαμβάνοντας υπόψη το βάθος της σήραγγας. Η διόρθωση αυτή λαμβάνεται από οδηγία που δίνεται από τους Hashash et al. (2001) και αφορά στον προσδιορισμό του μειωτικού συντελεστή  $C$  για τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση στην επιφάνεια, ανάλογα με το βάθος της σήραγγας.

$$a_{z,max} = C \cdot a_{max,s} \quad (10-4)$$

Ο Πίνακας 10-14 δίνει την τιμή του συντελεστή  $C$ , όπου  $a_{z,max}$  είναι η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση στο βάθος της σήραγγας.

Πίνακας 10-14. Λόγοι εδαφικής κίνησης ( $C$ ) σε βάθος, σε σχέση με την κίνηση στην επιφάνεια

Βάθος Σήραγγας (m)	Λόγος εδαφικής κίνησης στο βάθος της σήραγγας προς την κίνηση στην επιφάνεια
$\leq 6$	1.0
6÷15	0.9
15÷30	0.8
>30	0.7

Η τιμή  $a_{z,max}$  χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της  $\gamma_{max}$  (μέγιστη διατμητική παραμόρφωση σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου), μέσω της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας  $V_s$  (Πίνακας 10-15). Η  $V_s$  είναι συνάρτηση του μεγέθους του σεισμού και της απόστασης από τη σεισμική πηγή.



$$\gamma_{max} = \frac{V_S}{C_S}; C_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu) \frac{\gamma}{g}}}; \Delta x_{max} = \gamma_{max} \times \left(\frac{h_{mod}}{2}\right) \quad (10-5)$$

όπου:  $C_s$  είναι η φαινόμενη ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων. Η  $\gamma_{max}$  που σχετίζεται με τη μέγιστη οριζόντια μετακίνηση  $\Delta x_{max}$ , δίνεται από την (10-5)

Πίνακας 10-15. Λόγοι μέγιστης ταχύτητας προς μέγιστη επιτάχυνση εδάφους (PGA), στην επιφάνεια

Μέγεθος ροπής ( $M_s$ )	Μέγιστη ταχύτητα (cm/s) προς μέγιστη επιτάχυνση (g) εδάφους Απόσταση πηγής από σήραγγα (km)		
	0÷20	20÷50	50÷100
Βράχος 6.5	66	76	86
	97	109	97
	127	140	152
Στυφό έδαφος	94	102	109
	140	127	155
	180	188	193
Μαλακό έδαφος	140	132	142
	208	165	201
	269	244	251

#### 10.4.4.2 Πρόσκρουση οχημάτων

Σύμφωνα με τον τύπο της σήραγγας, και τον σχετικό ΚΜΕ.

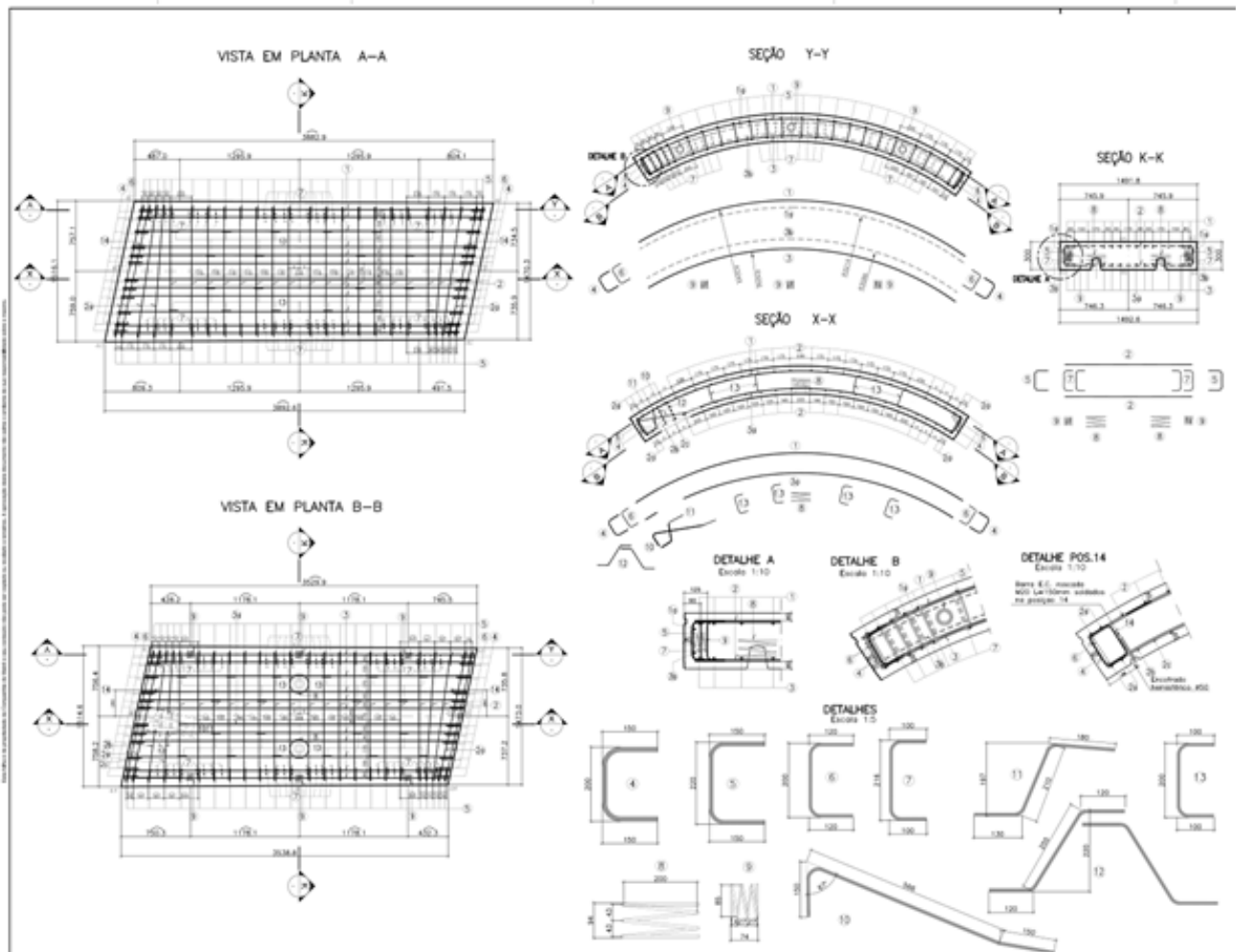
#### 10.4.4.3 Πυρκαγιά

Τα πυράντοχα δομικά στοιχεία πρέπει να θεωρηθούν και υπολογιστούν σύμφωνα με τις μεθόδους που περιγράφονται στον ελληνικό κανονισμό για προστασία έναντι φωτιάς (ΦΕΚ 360/Β/28.05.1991), και το Π.Δ. 71/88. Το πυράντοχον της κατασκευής, εκφραζόμενο σε διάρκεια φωτιάς που το στοιχείο μπορεί να αντέξει, υπολογίζεται σύμφωνα με τον βαθμό της θερμικής επίθεσης (fire attack grade). Ο βαθμός της θερμικής επίθεσης είναι συνάρτηση του απαιτούμενου χρόνου αντίστασης στην φωτιά και της θερμοκρασίας που θα αναπτυχθεί σε κάθε ειδική κατασκευή.

Όταν η επικάλυψη ξεπερνά προδιαγραφόμενα όρια «Εγκεκριμένων Κανονισμών», προβλέπεται δευτερογενής οπλισμός στη μελέτη για την αποφυγή της αποφλοίωσης της επικάλυψης του σκυροδέματος. Η τοξωτή επένδυση μελετάται, ώστε να διατηρεί την ικανότητα ανάληψης των φορτίων στη διάρκεια που είναι εκτεθειμένη στην φωτιά. Σύμφωνα με τον «Ευρωκώδικα 2, Μελέτη κατασκευών από σκυρόδεμα - Μέρος 1-2: Γενικοί Κανόνες – Στατική μελέτη έναντι φωτιάς, Κεφάλαιο 4». Επιτρέπονται (α) Απλοποιημένες μέθοδοι υπολογισμού για ειδικού τύπου δομικά στοιχεία, και (β) Προχωρημένες μέθοδοι υπολογισμού για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων τμημάτων της κατασκευής ή και ολόκληρης της κατασκευής.

#### 10.4.5 Παράδειγμα όπλισης στοιχείου (Geodata, 2013)

Η διάταξη απαιτούμενων οπλισμών για ένα προκατασκευασμένου στοιχείο, μαζί με ποσότητες και κατασκευαστικές λεπτομέρειες, φαίνεται στο Σχήμα 10-27.



Σχήμα 10-27. Διάταξη οπλισμού σε στοιχείο

### 10.4.6 Παρακολούθηση

Η γεωμηχανική και δομητική παρακολούθηση έχει ως σκοπό τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας της επένδυσης, ως προς τις παραδοχές, τις εδαφικές συνθήκες, έκτακτες καταστάσεις κατά την κατασκευή, και τη διαχρονική παρακολούθηση της επάρκειας του έργου. Για το σκοπό αυτό, εντός και επί των προκατασκευασμένων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα προβλέπεται συνήθως η τοποθέτηση οργάνων, όπως:

- Ανακλαστήρες 3D (στόχοι διπλής όψης ή πρίσματα), για τη μέτρηση των ολικών μετακινήσεων της τμηματικής επένδυσης, με χρήση ηλεκτρονικών γεωδαιτικών σταθμών υψηλής ακρίβειας.
- Κυψέλες πίεσης, για τη μέτρηση της πίεσης στο σκυρόδεμα εντός των προκατασκευασμένων στοιχείων της τμηματικής επένδυσης.
- Παραμορφωσίμετρα τύπου δονούμενης χορδής, για τη μέτρηση των παραμορφώσεων των προκατασκευασμένων στοιχείων της τμηματικής επένδυσης.

Οι τιμές των συγκλίσεων, των τάσεων και των παραμορφώσεων της τμηματικής επένδυσης εκτιμώνται με βάση αριθμητικές αναλύσεις της μελέτης και προσδιορίζονται οι τιμές των ορίων επιφυλακής και συναγερμού.

## Βιβλιογραφία/Αναφορές/Προδιαγραφές

### Αναφορές

- BTS & ICE (2000). “Specification for Tunnelling”, section 203, Thomas Telford.
- BTS & ICE (2004). “Tunnel Lining Design Guide”, section 5.4, Thomas Telford
- Geodata (2013). “Μεθοδολογία επένδυσης σήραγγας TBM διατομής διπλής γραμμής με προκατασκευασμένα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα, Τμήμα: Χαϊδάρι – Πειραιάς”, Αττικό Μετρό
- Guglielmetti V, Grasso P, Mahtab A and Xu S. (2007). “Mechanized Tunnelling in Urban Areas - design methodology and construction control”, Taylor & Francis Group
- Hashash et al. (2001) “Αντισεισμική μελέτη και ανάλυση υπογείων κατασκευών”
- ITA (2000). “Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining”, TUST, 15, 3, pp. 303-331
- Leonhardt. F (1971). «Προεντεταμένον Σκυρόδεμα», Α Τόμος, §9.21.
- Maidl B, Herrenknecht M, Anheuser L (1996). “Mechanised Shield Tunnelling, section 6.1.3, Ernst & Sohn,
- Wagner H and Schultze A ed. (1996). “Tunnel Boring Machines”, Block D, Balkema.
- Wittke W ed. (2007). “Stability analysis and design for mechanized tunnelling, ch. 6”, WBI Print 6, Aachen. Germany.581p.

### Προδιαγραφές-Κανονισμοί

- ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-04-00 Εργοταξιακό σκυρόδεμα παραγωγής σκυροδέματος.
- ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-01-00 Παραγωγή και μεταφορά σκυροδέματος.
- ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-03-00 Συντήρηση σκυροδέματος.
- ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-02-01-00 Χαλύβδινοι οπλισμοί σκυροδέματος.
- ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-04-03-00:2009 Μόνιμη Επένδυση με προκατασκευασμένα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα
- ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-07-02-00 Τσιμεντενέσεις σηράγγων
- ΕΛΟΤ EN 197-1 Τσιμέντο. Μέρος 1: Σύθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για τα κοινά τσιμέντα.
- ΕΛΟΤ EN 450-1 Ιπτάμενη τέφρα για σκυρόδεμα. Μέρος 1: Ορισμός, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης.
- ΕΛΟΤ EN 13263-1 Πυριτική παιπάλη για σκυρόδεμα. Μέρος 1: Ορισμοί απαιτήσεις και κριτήρια συμμόρφωσης.
- ΕΛΟΤ EN 13263-2 Πυριτική παιπάλη κατάλληλη για το σκυρόδεμα. Μέρος 2: Αξιολόγηση συμμόρφωσης.
- ΕΛΟΤ EN 14889-1 Ίνες σκυροδεμάτων. Μέρος 1: Χαλύβδινες ίνες. Ορισμός, προδιαγραφές και συμμόρφωση.
- ΕΛΟΤ EN 14889-2 Ίνες οπλισμού σκυροδέματος. Μέρος 2: Ίνες από πολυμερή. Ορισμός, προδιαγραφή και συμμόρφωση.
- ΕΛΟΤ EN 14845-2 Μέθοδοι δοκιμών ινών οπλισμού σκυροδέματος. Μέρος 2: Επιπτώσεις επί της αντοχής.
- ΕΛΟΤ EN 13369. Κοινοί κανόνες για προκατασκευασμένα προϊόντα από σκυρόδεμα
- ΕΛΟΤ EN ISO 1461 Θερμό γαλβάνισμα δι’ εμβαπτίσεως διαμορφωμένων σιδηρών και χαλύβδινων στοιχείων. Προδιαγραφές και μέθοδοι δοκιμών
- ΕΛΟΤ EN ISO 527.01 Πλαστικά – Προσδιορισμός ιδιοτήτων εφελκυσμού

- EN 1992-1-1 (2004). “Ευρωκώδικας 2”, Μελέτη κατασκευών από σκυρόδεμα, Μέρος 1-1, Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια
- EN 1992-1-2 (2004). “Ευρωκώδικας 2”, Μελέτη κατασκευών από σκυρόδεμα - Μέρος 1-2, Γενικοί Κανόνες – Στατική μελέτη για κατάσταση πυρκαγιάς
- EN 1990 (2005). “Ευρωκώδικας 0”, Βάση για την στατική μελέτη
- EN 1991-1 (2002). “Ευρωκώδικας 1”, Δράσεις στις κατασκευές, Μέρος 1-2, Γενικές Δράσεις – Δράσεις σε κατασκευές εκτεθειμένες σε φωτιά.
- AFTES (1998). “Recommandations relatives à la conception, le dimensionnement et l’exécution des revêtements en voussoirs préfabriqués en béton armé installés à l’arrière d’un tunnelier”, Working Group n°18
- AFTES (1988) “Temporary Supports and Permanent Lining. Considerations on the usual methods of tunnel lining design”, Tunnel et Ouvrages Souterrains, n°90, p.337-357, Working Group n°7
- AFTES, 1993. “Les Joints d’étanchéité entre voussoirs”, Tunnels et Ouvrages Souterrains, Suppl. N°.155 pp 164-166
- AFTES (1993). «Θεωρήσεις σε σχέση με τις συνήθεις μεθόδους μελετών σηράγγων» – Ομάδα Εργασίας n.7
- ITA WG (2000). “Οδηγίες για τη μελέτη των επενδύσεων σε σήραγγες που διανοίγονται με ασπίδες”, Περιοδικό Tunnelling and Underground Space Technology, Τομ. 15, Αριθ. 3, σελίδες, 303 – 331

# Κεφάλαιο 11

## Σύνοψη

*Ο έλεγχος της ποιότητας του σκυροδέματος της μόνιμης επένδυσης των σιηράγγων, εξασφαλίζει ότι αυτή είναι αυτή που προδιαγράφεται από τη μελέτη, και με βάση την οποία έχει διαστασιολογηθεί.*

## Προαπαιτούμενη γνώση

*Μαθήματα: Τεχνικά υλικά*

## 11. Έλεγχος ποιότητας σκυροδέματος<sup>3</sup>

### 11.1 Πρώτες ύλες

Το σκυρόδεμα αποτελείται από πρώτες ύλες, τσιμέντο, αδρανή υλικά, πρόσθετα, πρόσμικτα και νερό.

#### 11.1.1 Τσιμέντο (cement)

Το τσιμέντο είναι πέντε διαφορετικών τύπων (I, II, III, IV, V) και τριών κατηγοριών αντοχής (32.5, 42.5, 52.5 MPa).

#### 11.1.2 Αδρανή υλικά (aggregates)

Τα αδρανή των επενδύσεων είναι διαβαθμισμένα ανενεργά υλικά ορυκτής προέλευσης τα οποία με συγκολλητικό υλικό το τσιμέντο χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους. Η ονομασία αδρανή δόθηκε στα υλικά αυτά με την έννοια ότι κατά την ανάμιξη των υλικών αυτών με συγκολλητικά υλικά (κονίες), όπως τσιμέντο, ασβέστης, άσφαλτος κλπ. ή το νερό, δεν συμμετέχουν ενεργά στις διαδικασίες πήξης και σκλήρυνσης. Βέβαια αυτό δεν ανταποκρίνεται εντελώς στην πραγματικότητα διότι η χημική αδράνεια των υλικών αυτών εξαρτάται από την ορυκτολογική τους σύσταση και τα υλικά με τα οποία έρχονται σε επαφή. Διακρίνονται σε φυσικά, τεχνητά και ανακυκλωμένα. Τα φυσικής προέλευσης είναι θραυστά πετρώματα, ποταμίσιες, λιμναίες ή θαλάσσιες αποθέσεις, λατομικά προϊόντα, κλπ. Για την κατασκευή των επενδύσεων χρησιμοποιούνται τα φυσικά αδρανή, δηλαδή αυτά που προέρχονται από πετρώματα τα οποία έχουν υποστεί μόνο μηχανική επεξεργασία-θραύση, πλύσιμο, διαλογή. Τα φυσικά αδρανή διακρίνονται σε συλλεκτά από χαλαρές αμμοχαλικώδεις αποθέσεις και σε θραυστά αδρανή λατομείων. Τα συλλεκτά μπορούν να αξιοποιηθούν ως έχουν ή μετά από επεξεργασία και είναι χαμηλής ποιότητας. Τα θραυστά αδρανή είναι υψηλής ποιότητας: μετά την εξόρυξή τους υπόκεινται σε περαιτέρω μηχανική κατεργασία και θραύση λίθου στο λατομείο και στη συνέχεια διαχωρίζονται με κόσκινα. Στο σκυρόδεμα τα αδρανή αποτελούν το 60-75% κατ' όγκο και 70-85% κατὰ βάρος. Η διεθνής εμπειρία λέει ότι για κάθε m<sup>3</sup> σκυροδέματος που παράγεται, απαιτούνται περίπου 2 τόνοι αδρανών υλικών.

Τα αδρανή σύμφωνα με την κοκκομετρική τους διαβάθμιση διακρίνονται σε: χονδρόκοκκα, λεπτόκοκκα, και παιπάλη. Τα χονδρόκοκκα (Σχήμα 11-1) είναι μεγαλύτερα από 4mm, τα λεπτόκοκκα χαρακτηρίζονται ως άμμος και είναι από 4 έως 0.063mm και η παιπάλη μικρότερη από 0.063mm, δηλ. διέρχεται από το κόσκινο Νο 200. Αδρανή, των οποίων πάνω από το 70% είναι μεγέθους παιπάλης και η μέγιστη διάμετρος των κόκκων είναι 2mm, χαρακτηρίζονται ως filler. Τα χονδρόκοκκα αδρανή έχουν διάφορα μεγέθη και ακανόνιστο σχήμα. Κατατάσσονται σύμφωνα με τον ΕΛΟΤ EN 12620 σε: ρυζάκι 4-8mm, γαρμπίλι 8-16mm, χαλίκι 16-31.5mm. Παράγονται με πρωτογενή, δευτερογενή, τριτογενή θραύση και ταξινόμηση των προϊόντων κάθε φάσης θραύσης σε δονούμενα κόσκινα (πολλαπλών καταστρωμάτων) για την παραγωγή των διαφόρων κοκκομετρικών κλασμάτων («διαβαθμίσεων»). Τα συγκροτήματα παραγωγής αδρανών υλικών είναι εγκατεστημένα μέσα ή πολύ κοντά στο λατομείο και είναι σταθερά ή μετακινούμενα. Πολλές φορές, όταν οι απαιτήσεις του έργου είναι αυστηρές, επιβάλλεται και η διενέργεια έκπλυσης των αδρανών για την

<sup>3</sup> Επιμέλεια: Νίκος Μαρσέλλος

απομάκρυνση της επιφανειακής σκόνης, οπότε είναι αναγκαία η εξασφάλιση τροφοδοσίας νερού στο λατομείο αδρανών. Στην παρασκευή του σκυροδέματος, τα φυσικά ή τεχνητά αδρανή υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν πρέπει να έχουν επαρκή αντοχή και πρόσφυση και χημική ανεκτικότητα ως προς το τσιμέντο. Τέτοια υλικά μπορεί να είναι προϊόντα θραύσης κυρίως ασβεστολιθικών πετρωμάτων και γρανίτη.



Ρυζάκι



Γαρμπίλι



Χαλίκι/Σκύρα

Σχήμα 11-1. Χονδρόκοκκα αδρανή

Για το χαρακτηρισμό της μορφής των αδρανών χρησιμοποιούνται οι δείκτες του ποσοστού πλακοειδών κόκκων  $I_F$  [%], και του ποσοστού επιμηκών κόκκων  $I_E$  [%]. Αναφέρονται για τον ασβεστόλιθος  $I_F$  18-26% και  $I_E$  19-30%. Η παιπάλη, στο μείγμα των αδρανών, επικάθεται στους μεγαλύτερους κόκκους, και διαμορφώνει μία κρούστα μειωμένης διατμητικής αντοχής. Για τον προσδιορισμό των ποσοστών της παιπάλης πραγματοποιείται η δοκιμή ισοδύναμου άμμου. Για τον προσδιορισμό του τύπου και του ποσοστού των περιεχομένων αργιλικών ορυκτών στην παιπάλη πραγματοποιείται η δοκιμή μπλε του μεθυλενίου, και εξάγεται ο αντίστοιχος δείκτης. Οι φυσικές ιδιότητες των αδρανών είναι: το ειδικό βάρος  $G_s$  και η υγρασία απορρόφησης  $W_a$ . Τα συνήθη αδρανή είναι κανονικού βάρους, με ειδικό βάρος ~2.6.

Τα αδρανή αντιστέκονται στη διάδοση των μικρορωγαματώσεων που προκαλούνται από τη συστολή ξήρανσης. Η φύση των δεσμών που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια των αδρανών και τσιμεντόπαστας οδηγεί στις μηχανικές αντοχές του σκυροδέματος. Οι μηχανικές ιδιότητες των αδρανών αποτιμώνται ως δείκτες και είναι: η αντοχή σε σύνθλιψη ACV, η αντοχή σε κρούση AIV, η αντοχή σε αποτριβή και κρούση LAAV και MDAV, ο δείκτης αντίστασης σε στίλβωση PSV, ο δείκτης απότριψης AAV, και η ανθεκτικότητα σε αποσάθρωση με τη δοκιμή ψύξης-απόψυξης και τη δοκιμή υγείας με τη χρήση θεικών αλάτων. Η αντοχή των αδρανών ξεπερνά τα 80MPa, σαφώς ανώτερη από τα 40 έως 50MPa που είναι η αντοχή του τσιμεντοκονιάματος. Από τις τρεις κατηγορίες πετρωμάτων, τα πυριγενή και οι λεπτοκρυσταλλικοί γρανίτες πλεονεκτούν έναντι των πετρωμάτων από τις άλλες κατηγορίες. Τα περισσότερα ιζηματογενή πετρώματα είναι γενικά ακατάλληλα ή χαμηλής ποιότητας αδρανή. Αντίθετα, οι σκληροί με χαμηλό πορώδες ασβεστόλιθοι είναι τα συνηθέστερα πετρώματα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αδρανών υλικών σκυροδέματος στη χώρα μας, γιατί έχουν πολύ καλούς δείκτες, ικανοποιούν τις μηχανικές αντοχές των συνήθων κατασκευών, έχουν μικρό κόστος θραύσης, και απαντώνται στα περισσότερα μέρη του Ελλαδικού χώρου.

### 11.1.3 Πρόσθετα (additives) και Πρόσμικτα (admixtures)

Π.χ. Πυριτιακή παιπάλη, επιβραδυντικά, υπερευστοποιητικά, αερακτικά.

### 11.1.4 Νερό (water)

Ο έλεγχος της ποιότητας κάθε υλικού βασίζεται στην διερεύνηση της συμμόρφωσής του, με τις απαιτήσεις, Κανονισμών (Regulations), Προτύπων (Standards), Προδιαγραφών (Specifications) και «συνιστομένων πρακτικών» (Recommended practices). Επίσης έχουν εκδοθεί συνολικά 440 ΕΤΕΠ από τον ΕΛΟΤ, που από 30.7.2012 είναι υποχρεωτικές (ΦΕΚ/2221/Β/30-7-2012).

Όλα αυτά είναι γραμμένα στην Τεχνική Συγγραφή Υποχρεώσεων (ΤΣΥ), που μεταξύ άλλων πρέπει να τηρήσει ο Ανάδοχος - Εργολήπτης του Έργου, από τον Κύριο του Έργου (ΚτΕ).

## 11.2 Παραγωγή σκυροδέματος

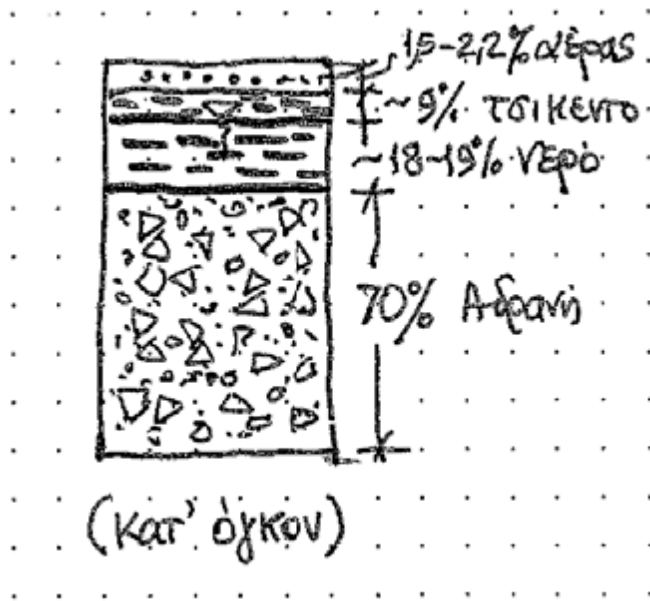
Η παραγωγή σκυροδέματος γίνεται σε αναμκτήρες είτε μικρές μπετονιέρες π.χ. 0.25m<sup>3</sup>, είτε σε συγκροτήματα παραγωγής Έτοιμου/Εργοστασιακού σκυροδέματος, π.χ. 80-120m<sup>3</sup>/h.)

### 11.2.1 Σύνθεση σκυροδέματος

Με την ανάμιξη των πρώτων υλών σε ορισμένες αναλογίες, παράγεται το νωπό σκυρόδεμα, το οποίο στη συνέχεια αρχίζει να πήζει και τελικά παράγει το σκληρυμένο σκυρόδεμα. Ο Πίνακας 11-1 δίνει τις συνήθεις αναλογίες κατά βάρος και το Σχήμα 11-2 τις αναλογίες κατ' όγκον των συστατικών του σκυροδέματος, για ένα τυπικό σκυρόδεμα κατηγορίας αντοχής C20/25. Με βάση τον πίνακα, ένα κυβικό μέτρο σκυροδέματος ζυγίζει ~2.4 t.

Πίνακας 11-1. Συνήθεις αναλογίες κατά βάρος σκυροδέματος C20/25

Τσιμέντο	Νερό	Άμμος	Γαρμπίλι	Χαλίκι	Επιβραδυντής	Υπερ-Κ	Σύνολο
300kg/m <sup>3</sup>	180kg/m <sup>3</sup>	1000kg/m <sup>3</sup>	200 kg/m <sup>3</sup>	700 kg/m <sup>3</sup>	~0.3% κ.β. του τσιμέντου	~0.5% κ.β. του τσιμέντου	2380 kg/m <sup>3</sup>



Σχήμα 11-2. Συνήθεις αναλογίες κατ' όγκον σκυροδέματος C20/25

### 11.2.2 Νωπό και σκληρυμένο σκυρόδεμα

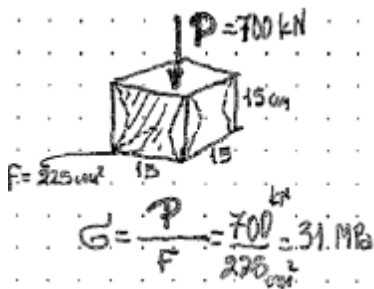
Με την ανάμιξη των πρώτων υλών παράγεται το νωπό σκυρόδεμα (fresh concrete) το οποίο έχει τις εξής ιδιότητες:

- Εργασιμότητα (workability) που μετρείται με τη δοκιμή κάθισης (slump) ή εξάπλωσης
- Θερμοκρασία (temperature)  $t_c$  που μετρείται με το θερμομέτρο σκυροδέματος
- Πυκνότητα ή μοναδιαίο βάρος (density-unit weight) που μετρείται με ζυγούς σε kg/m<sup>3</sup>
- Αεροπεριεκτικότητα (air content) που μετρείται με τη συσκευή αεροπεριεκτικότητας (%)

Από το νωπό σκυρόδεμα παρασκευάζονται συνήθως 6-12 δοκίμια σκυροδέματος τα οποία μετά από 20-32 ώρες μεταφέρονται σε αναγνωρισμένο/εποπτευόμενο από το ΚΕΔΕ/ΥΠΟΜΕΔΙ εργαστήριο ή σε διαπιστευμένο από το ΕΣΥΔ/ΕΣΥΠ Εργαστήριο για θραύση τους στις 7 ημέρες και στις 28 ημέρες, για τον προσδιορισμό της συμβατικής αντοχής σε θλίψη του σκυροδέματος.

Το σκληρυμένο σκυρόδεμα (hardened concrete) έχει τις εξής ιδιότητες

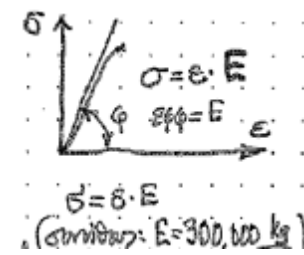
Αντοχή σε θλίψη  
(compressive strength)



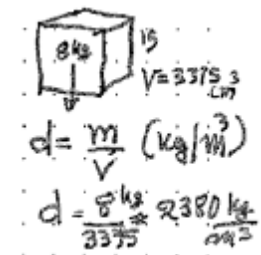
Αντοχή σε κάμψη  
(flexural strength)



Μέτρο ελαστικότητας  
(modulus of elasticity)



Πυκνότητα  
(density)



### 11.3 Κανονισμοί, Πρότυπα, Προδιαγραφές ελέγχου σκυροδέματος

Ο έλεγχος της ποιότητας κάθε υλικού βασίζεται στην διερεύνηση της συμμόρφωσής του με τις απαιτήσεις, Κανονισμών (Regulations), Προτύπων (Standards), Προδιαγραφών (Specifications) και «συνιστώμενων πρακτικών» (Recommended practices). Επίσης έχουν εκδοθεί συνολικά 440 ΕΤΕΠ από τον ΕΛΟΤ, που από 30.7.2012 είναι υποχρεωτικές (ΦΕΚ/2221/Β/30-7-2012). Όλα αυτά είναι γραμμένα στην Τεχνική Συγγραφή Υποχρεώσεων (ΤΣΥ), που μεταξύ άλλων πρέπει να τηρήσει ο Ανάδοχος - Εργολήπτης του Έργου, από τον Κύριο του Έργου (ΚΤΕ).

Για το σκυρόδεμα ειδικά, ισχύουν τα εξής:

- Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-2016) που δημοσιεύτηκε στο ΦΕΚ/1561/Β/2-6-2016<sup>4</sup>.
- Το νέο Ευρωπαϊκό Πρότυπο για σκυρόδεμα: ΕΛΟΤ EN 206-1, (European Specification for concrete, CEN/TC/104). Έχει συνταχθεί και εγκριθεί επίσης από τον ΕΛΟΤ το Εθνικό Προσάρτημα (National Annex), στις 24.2.2011.
- Οι ΕΤΕΠ, που δημοσιεύθηκαν στο ΦΕΚ/2221/Β/30.7.2012. Ειδικά για το σκυρόδεμα, υπάρχουν (7) ΕΤΕΠ, για την: Παραγωγή-μεταφορά-διάστρωση-συμπύκνωση-συντήρηση σκυροδέματος, αφαίρεση ξυλοτύπων, κλπ.
- Οι Μέθοδοι ελέγχου (Test methods), για δειγματοληψία σκυροδέματος, παρασκευή και συντήρηση δοκιμίων, θράυση στις 28 ημέρες, μέτρηση της εργασιμότητας (κάθιση-slump), θερμοκρασίας σκυροδέματος, με τις EN 12350, EN 12390, και τις ΣΚ-303, ΣΚ-304, ΣΚ-309, κλπ, έκδοσης ΚΕΔΕ/ΥΠΟΜΕΔΙ.
- Διάφορες Διεθνείς προδιαγραφές, όπως των: ACI ( American Concrete Institute), BS, AFNOR, DIN, κλπ.
- Υπάρχουν επίσης 6 Τεχνικές Οδηγίες του ΣΠΜΕ για σκυρόδεμα, στο: [www.spme.gr](http://www.spme.gr).

#### 11.3.1 Έλεγχοι

Ο έλεγχος της ποιότητας του σκυροδέματος διακρίνεται σε 3 φάσεις:

(α) Έλεγχοι πριν την σκυροδέτηση, δειγματοληψίες πρώτων υλών, κοκκομετρήσεις αδρανών, ειδικά/φαινόμενα βάρη, Ισοδύναμο άμμου, Μπλε του Μεθυλενίου, Los Angeles, Υγεία, κλπ.

Όλα αυτά οδηγούν στη: Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος (Concrete Mix Design) και στα δοκιμαστικά αναμίγματα (Trial Mixes) για τον έλεγχο της αντοχής σε θλίψη, κάθισης, πυκνότητας, κλπ.

(β) Έλεγχοι κατά την παραγωγή και σκυροδέτηση, όπως δειγματοληψίες σκυροδέματος, πχ, 6 δοκίμια ανά 150 m<sup>3</sup>/ανά ημέρα, μέτρηση της κάθισης, της θερμοκρασίας σκυροδέματος: 10°C < t < 32°C και έλεγχος των Δελτίων Αποστολής, αν τηρήθηκε ο χρόνος μεταφοράς του σκυροδέματος < 2 ώρες, κλπ.

Επίσης εάν έγινε η διάστρωση του σκυροδέματος σωστά, σε στρώσεις πάχους < 0.60 m, από σωστό ύψος πτώσης < 2.5 m, κλπ, εάν έγινε η δόνηση με δονητές, στο σωστό χρόνο και απόσταση δόνησης και τέλος εάν έγινε η σωστή συντήρηση του σκυροδέματος (Curing).

(γ) Έλεγχοι μετά τη σκυροδέτηση, χρόνος αφαίρεσης των ξυλοτύπων, πχ, Πίνακας: 11.6, μέτρα προστασίας του σκυροδέματος κατά τη σκυροδέτηση σε Υψηλές/Χαμηλές θερμοκρασίες, αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αντοχών των «συμβατικών δοκιμίων», και την αποδοχή ή αμφισβήτηση μιας παρτίδας, βάσει των Κριτηρίων Συμμόρφωσης του ΚΤΣ.

<sup>4</sup> Ισχύς από 2-4-2017 (ΦΕΚ/4007/Β/14-12-2016)



Αναμένεται η έκδοση Υπουργικής Απόφασης με το παράρτημα ΠΒ5-1, που αναφέρεται στην «Πιστοποίηση ελέγχου παραγωγής Εργοστασιακού Σκυροδέματος» (certified concrete), μέχρι τέλους 2017. Γίνεται η σύνταξη Τεχνικής Έκθεσης ( Technical Report) ,και η υποβολή της στην Επίβλεψη του τεχνικού έργου, για να συνοδεύει τα πιστοποιητικά για την πληρωμή («πιστοποίηση») του Έργου.

### 11.3.2 Δειγματοληψίες σκυροδέματος

Τόσο στον ΚΤΣ, όσον και στον ΕΛΟΤ EN 206-1, κλπ, αναφέρονται, η συχνότητα δειγματοληψιών, η παρασκευή των δοκιμίων, πχ κυβικά δοκίμια, 15×15×15 cm, σε 2 στρώσεις με 25 χτυπήματα, με πρότυπη ράβδο, Φ16 mm, η προφύλαξη τους τις πρώτες 24 ώρες από τον ήλιο, κρύο, δονήσεις και η μεταφορά τους σε Αναγνωρισμένο ή Διαπιστευμένο κατά ISO 17025 από το ΕΔΥΔ Εργαστήριο, και η θραύση τους από βαθμονομημένη πρέσα θραύσης και η αξιολόγηση με τα Κριτήρια Συμμόρφωσης, κλπ.

- 6 δοκίμια έως 150 m<sup>3</sup> /ανά ημέρα.
- για άνω των 150m<sup>3</sup>, 6 δοκίμια ανά 150m<sup>3</sup> σκυροδέματος.

Ο έλεγχος της κάθισης, θερμοκρασίας, κλπ επίσης περιλαμβάνονται στις υποχρεώσεις του Αναδόχου.

Εάν τα δοκίμια δεν ικανοποιούν τα Κριτήρια Συμμόρφωσης επακολουθούν οι "Επανέλεγχοι" του ΚΤΣ, με "εντατική συντήρηση" του Έργου για 14÷28 ημέρες, η αποκοπή πυρήνων(καρότα), και οι διάφορες διαδικασίες.

## 11.4 Τεχνολογία Σκυροδέματος

-1-

27.8.2015

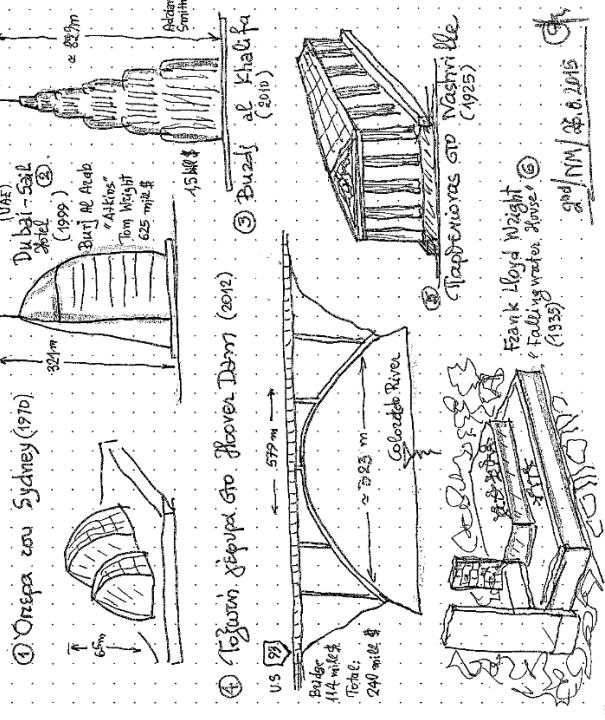
**Σημειώσεις Τεχνολογίας σκυροδέματος - Βιβλίο: I**

Νίκ. Μαρσέλλος, Τζο. Μιμίλιν, ΕΜΠ

1. Εισαγωγή

Το σκυρόδεμα αποτελεί το κίβριο κατασκευαστικό υλικό των Τεχνικών Έργων, με την μέγιστη δυνατότητα για στήριξη των Αρχιτεκτονικών Έργων της Έργων.

Εκπαινε πολλούς διαφορετικές χρήσεις του σε έργα στην Ελλάδα και το εξωτερικό σε αεροναυπηγικές εγκαταστάσεις:



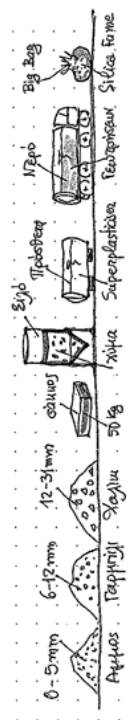
2nd / NM / 27.8.15

-2-

2. Γαυμια με το "ξηρό - σκυρόδεμα"

Το σκυρόδεμα (concrete) αποτελείται από τις εξής α-γίες:

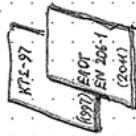
- Τσιμέντο, (5) διαφορετικών τύπων, και (3) υαλοφibrών αυτών:
- Τύποι: I, II, III, IV, V
- Κατηγορίες αυτών: 32, 5 MPa - 42, 5 MPa - 52, 5 MPa
- Αδρανή γηλιά (aggregates), φυσικά ή θραυστά
- Αφίμα (0-5mm), Γαβιλή (6-12mm), Χάλυβι/αύρα (12-31mm)
- Πρόσθετα σκυροδέματος (Additions):
- Επι-δραστήρια, υπέρ-ρευστοποιητικά, αεραμια
- Νερό (Διυτιν ή Γεωτρήσεων)
- Πρόσκρια (Additions), όπως: πυριτινή παυήλα (σίβια, fume) υγρ.



Η διατάξη του σκυροδέματος γίνεται σε Ακτινωτές είτε κυβέλες (πυκνότητες 1.2-1.25m<sup>3</sup>), είτε σε Σχισμοειδή Περιβλήεις Είκοτα/Εξοστρασιών σκυροδέματος (20-120 m<sup>3</sup>/h)

Οι Κατομήτοι και τα Πρόβια των διέθων των σιδερωτων και των διαρρηχτων σκυροδέματος είναι:

- 0. Κατομήτοι Τεχνολογίας Σκυροδέματος: ΚΤΣ-97
- 1. ΕΚΕΠ (ΔΕΚ 522/19/30.7.2012)
- 2. ΣΧΕΔΙΟ Απαιτήσεων των ΚΤΣ-2015 (88 de/δημοσια Διοδισια) 4-4 \*
- Το Ευρωπαϊκό Πρόβιο για το σκυρόδεμα:
- 0. ΕΚΕΠ (ΔΕΚ 522/19/30.7.2012)
- (Εφαρμογές Ρεταίνες, Προδιαγραφές).

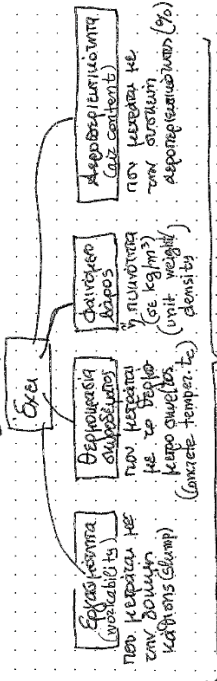


2nd / NM / 27.8.15

-3-

3. Νωπό - συμπεριμένο σκυρόδεμα

Με την ανέλιξη των α-γών των σκυροδεμάτων, παραχένται το: "Νωπό σκυρόδεμα" (fresh concrete) το οποίο έχει τις εξής κώριες ιδιότητες:

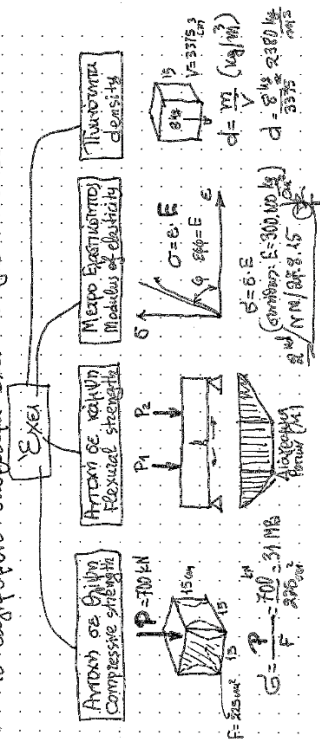


Ελαστικότητα, ανήλθους: 6-12, δύναμη σκυροδέματος και στα σόδια μετά 30-52 αρα κερδίζονται σε Α-αυτοκρήνη/ερωδωμένο στο το ΚΕΔΕ/ΥΠΟΜΕΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ή σε Διαπιστευμένο στο το ΕΣΥΔ/ΕΣΥΠ Εργαστήριο, για θέωση τους, στις 7-ημέρες και στις 28 ημέρες, να προσδώσει τους:

Συμβατικής αντοχής σε θύση του σκυρτος

Αυτά είναι ιδιότης των: "Συμπεριμένου σκυρτος (hardened concrete)"

Το συμπεριμένο σκυρόδεμα έχει τις εξής ιδιότητες:

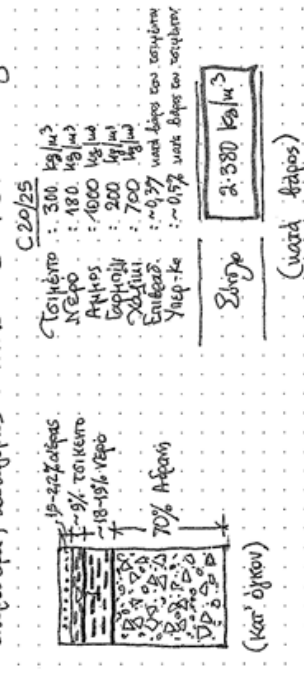


-4-

4. Σύθεση των σκυροδέματος

Με την ανέλιξη των α-γών σε σφαιρικές ανακρήσεις, διαρρέεται το "νωπό σκυρόδεμα", για το οποίο μετά κέρδους υγρός, μετά την πήξη του, παράγει το "σκληρωμένο σκυρόδεμα".

Οι συνθέσεις ανακρήτες "κατά όγκο" των συστατικών των σκυροδέματος αρα για "κατά βάρος", για ένα τυπικό σκυρόδεμα, καθυφίσεις αντοχής: C20/25, είναι οι εξής:



Αυτό σημαίνει ότι εάν υποθετικώς ένα κύβος στο σκυρόδεμα C20/25, διαστάσεων: 1m x 1m x 1m, αυτός θα ζύγίζει 2.380 kg/m³ ή κατά προσέγγιση: 2,4 t/m³

$d = \frac{m}{V} = \frac{2380}{0.15 \cdot 0.15 \cdot 0.15}$

- 5 -

5. Οι υαλινοί αντοχής των σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα αποτελείται από τσιμέντο, άμμο, γκρι άμμο και τσιμεντοκίον. Κάθε ένα από αυτά έχει διαφορετική αντοχή σε θλίψη, η οποία ονομάζεται:

**Κατηγορία αντοχής (concrete class)**

Οι υαλινοί αντοχής χαρακτηρίζονται από την

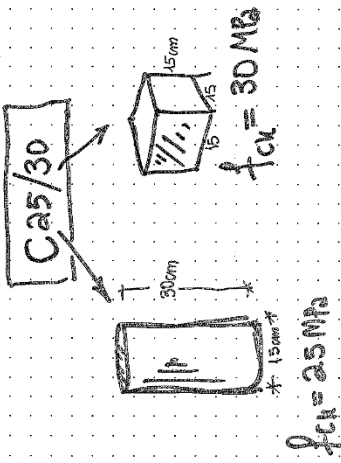
**Χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος:  $f_{ck}$**

(concrete characteristic strength:  $f_{ck}$ )

η οποία σφραγίζεται με δύο αριθμούς, π.χ. **C25/30**

όπου ο πρώτος αριθμός αντιπροσωπεί την χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος, ενώ ο δεύτερος αριθμός με **χρηματικά** είναι ο δεύτερος αριθμός, εάν αυτή καθορίζεται με **κυβικά δοκίμια (15x15x15 cm)**

Σημειώνεται αυτό λόγω τα διαφορετικά us. εζης:



Συνήθεις κατηγορίες αντοχής: C20/25 - C25/30 - C30/37 - C35/45.

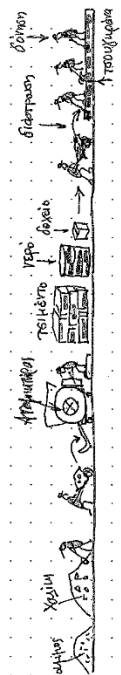
2<sup>η</sup> / ΝΜ / ΔΕ. 8. 15

- 6 -

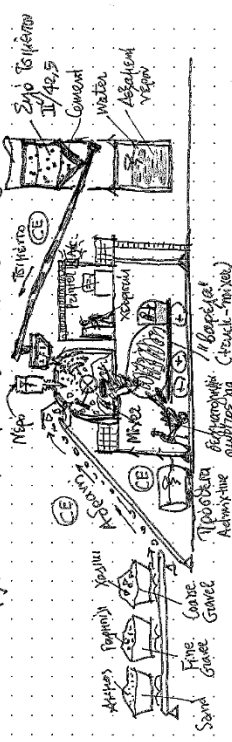
6. Η "επιτομή" του σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα διαφέρει σε φαινομενικές (μικρές), είτε σε μικρές (μεσοτηγές), είτε σε μεγάλες σταθερές. Σχηματίζονται παραμετρικά. Εφαρμογή/επιτομή/επιτομή/επιτομή (Concrete Batching Plant) - Ready Mixed Concrete - Factory produced concrete

Στις μικρές μεσοτηγές γίνεται η εισαγωγή των θύλων στο κρηπίδα, ενώ στα μεγάλα με το κρηπίδα με 2-3 θύλων, και προστίθεται με κάποιο δόχη (π.χ. πένελο 16-17 λίτρων) τα νερά, είτε κάποια δόχη (π.χ. 20 λίτρα), είτε σε αέρα με 20-30 λίτρα. Σε μεγάλα θύλων (20 λίτρα), είτε σε αέρα με 20-30 λίτρα. Η ανεμίζηση των θύλων γίνεται να διαλύσει το τσιμέντο, ή το νερό, η ελαστικότητα και μεταφορά στο σημείο διακίνησης των σκυροδέματος, γίνεται με τον ίδιο τρόπο, με έμφυση το κρηπίδα & ποσότητα και με το Α-τάβλαρο στον υψηλότερο όροφο. Η παραγωγή αυτή των σκυροδέτων γίνεται συνήθως τα 5-10 m³/ώρα.



Στο Σχημάτιο παρατηρείται ο αέρας, τα θύλα διαλύονται με αερίους ± 2% σε 2-3 λεπτά (π.χ. 20-30 sec) και προστίθεται στον κρηπίδα, και μετά ελαστικότητα 20-30 sec - 1 λεπτό, ελαστικότητα στην κρηπίδα για ελαστικότητα (pumping) στο έργο.



**Concrete Batching Plant**

2<sup>η</sup> / ΝΜ / ΔΕ. 8. 15

-8-

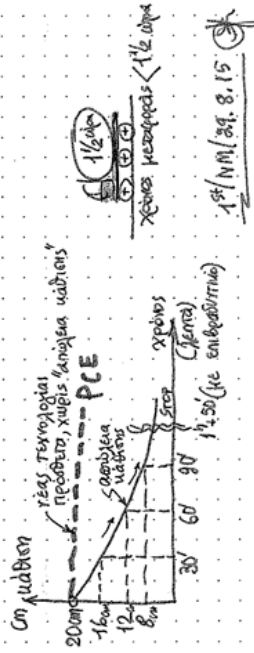
(β) Στόχοι της μέγιστης αντέσεως είναι η υφαντοποίηση των αραιωτήσεων των τεχνικών προδιαγραφών ή των αναγκών του έργου. Για τον σκοπό αυτό, αναφέρεται ως Οργανωτής του έργου, λαμβάνονται κάποια κριτήρια ασφαλείας για ανώτατο, την εφαρμοστέα, κτλ.

(γ) Έτσι για την αντοχή σε ρήξη, ο ΚΤΣ-97, υποθέτει ότι οι αραιώτες στη μέγιστη αντέσεως πρέπει να είναι περίπου 4-6 ΜΡα μεγαλύτερη από την  $f_{ck}$ , εξαρτώμενες από τον διαπορώση των αραιωτών, που μετριέται με ανώτατη αντοχή:  $k \cdot s$ , όπου:  $k=1,64$  έως  $2,14$ , εγγράφη, η κλίση (συντελεστή) αντοχής:  $f_a$  είναι:

$$f_a = f_{ck} + 1,64 \cdot s$$

Παραδείγματα:  
 Έαν για:  $C25/30$ , η τυπική απόκλιση των αραιωτών του Σχολιαστικού παραρτήριου συμφορέματος, στο το "ΑΡΧΕΙΟ" αραιωτών, με τα ίδια γήινά είναι:  $s=2,0$  ΜΡα τότε η απαιτούμενη αντοχή στο μέγιστο αντέσεως:  $f_a$  είναι:  
 $f_a = f_{ck} + 1,64 \cdot s = 30 + 2,0 \times 1,64 = 33,3$  ΜΡα

(δ) Για την εφαρμοστέα, και π.χ. δύσκολη κατάσταση: 16 cm στο έργο, τότε η μέγιστη αντέσεως θα πρέπει να έχει να είναι μεγαλύτερη, π.χ. 20 cm, αναγκάσει πάλι είναι η ανώτατη από το παρεμβατικό ύψους μέχρι να είναι έργο, αναγκάσει πάλι είναι - το υφαντοί - η διαρροή στα του περιβάλλοντος και του συμφορέματος, για το φαινόμενο αυτό της κλίσεως των υαρίων με τον χρόνο, λέγεται σπινδύλια υαρίων (loss of slump)



-7-

7. Μέγιστη αντέσεως του συμφορέματος (Concrete Mix Design)

(α) Στόχος της μέγιστης αντέσεως του συμφορέματος είναι να βρεθούν εύλετες οι αναφορές των υαρίων, οι όποιες θα υφαντοποιήσουν τις απαιτήσεις για το σφινδύλια να είναι:

- Η αντοχή του συμφορέματος π.χ.  $C25/30$
- Η εφαρμοστέα του σφινδύλιου π.χ. υαρίων: 16-18 cm (υφαντοί:  $s$ )
- Η απαιτητικότητα (Durability) του συμφορέματος στο χρόνο (ηλικία ή διαμεταξύ τους του υαί ή η ερροσισια των χαρμύων του σφινδύλιου από τον διαβρωση)
- Η ενυφαντοποίηση (Workability) του συμφορέματος
- Η κλίση & εδαμίες ιδιοτητές, όπως κλίση "δραμίδες", κλίση υαρίων π.χ. κριτικότητα και εδαμίες κλίση για τα αδρανή, κτλ
- Η αντοχή στην διάχυση, η αντοχή στην σφινδύλιου, όπως σφινδύλιου αεροσφινδύλιου, ή αεροσφινδύλιου:  $4,5\%$  &  $1,5\%$  για βέβαια (σφινδύλιου resistence), με χρήση εδαμίων, ταίφταν, κτλ

Για να επιτευχθεί ο σκοπός της μέγιστης αντέσεως "b" ο "Σχεδιαστικός" όπως συνήθως να λέγεται, πρέπει να είναι τα εξής (4) βήματα:

- Απαρασυναρπαστική διαγνωστική των υαρίων, των εδαμίων στο το λάτοκείο (Quartz), τον τεφίλετον, και περιδείων, κτλ
- Εργαστηριακά δομικά για την μέτρηση των ιδιοτήτων των υαρίων π.χ. κριτικότητα και εδαμίες κλίση για τα αδρανή, κτλ
- Στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός των απαιτήσεων, όπως ώστε το σφινδύλιου των υαρίων να είναι έργο:  $f_a = 1000 \text{ Et}$

$$T + N + A + \text{σπινδύλιου} = 1 \text{ m}^3$$

- Με τις αναφορές αυτές πραγματοποιείται δομικό σφινδύλιου αναμίγματα (trial mixes) στο εργαστήριο, για να μετρηθούν:

Mix Design  
 Η υαρίων Η αντοχή Η ημικλίση Η Βερμίσματα Η του σφινδύλιου του σφινδύλιου φων. έργο του σφινδύλιου σφινδύλιου π.χ. Slump: 16 cm Αντοχή: 37 ΜΡα  $2.380 \text{ kg/m}^3$   $t_c = 28 \text{ C}$  κλίση: 2,2%

Έαν αυτά είναι υφαντοποίηση, σταματάει οι δομικές σφινδύλιου, σφινδύλιου οι αναφορές ή τα γήινά. Μέχρι να βρεθεί το σωστό μίγμα

1st / NM / 29. 8. 15

-10-

(δ) Τελική σύνθεση μελέτης σύνθεσης συμπυκνώματος

Από: Έκον γίνει τα δομησιακά αναμειγνύματα, με τις "κατ' αρχήν", αναμειγνύματα μελέτης σύνθεσης, εάν οι αναμειγνύματα ή εφαρμοσμένα επιβλεπόμενα, προσεγγιστικά από των εφαρμοσμένων με νόμοιο: υπερ-ευστοχιστική σε δομησιακά από: 0,57% - 1%, και προσεγγιστικά και ένα επιβλεπόμενα ή να τα δομησιακά ή χρόνος μεταφοράς του συμπύκνωμα, μετά: 20', εφό 1/2 ώρα, σε 1+50, και η Τελική σύνθεση είναι:

**C25/30**

- Τσιμέντο (II/42,5) = 320 kg/m<sup>3</sup>
  - Νερό = 175 kg/m<sup>3</sup>
  - Άμμος = 1000 kg/m<sup>3</sup>
  - Χαλίκι = 200 kg/m<sup>3</sup>
  - Επιβλεπόμενα = 700 kg/m<sup>3</sup>
  - Υπερ-ρευστοποιητικό = 0,57% μετά λάτος του τσιμέντου = 1 kg/m<sup>3</sup>
- Σημειώσεις: 1) οι επιβλεπόμενα, πρέπει να δομησιακά, η ποσότητα από τα νόμοιο εφαρμοσμένα είναι: 1 kg/m<sup>3</sup> λάτος του τσιμέντου = 1 kg/m<sup>3</sup> λάτος του τσιμέντου = 1 kg/m<sup>3</sup>

Σύνολο = 2400 kg/m<sup>3</sup>

Θα πρέπει στα δομησιακά αναμειγνύματα στο Σχηματισμό παραγωγής συμπυκνώματος (σχηματισμό: 4-5), να γίνεται αυτό να είναι:

(β) Άνταξες 28 ημερών > 30 + 1,64 x 2 = 33,4 MB, S = 2,0 MB

ii) Εργασιομέτρηση, στα: 0 + 30' > 16 cm

Εάν αυτά δεν επιβεβαιωθούν, είτε η κυρία ανάλυση είναι: π.χ. β = 3,0 m/s, η β μάλλον = 12 cm. η.η. θα πρέπει να γίνει αλλαγές στους σπασμούς,

π.χ. β' αυτοκίνη: β = β<sub>α</sub> + 1,64 x β = 30 + 1,64 x 3 = 35 MB

ii) εφαρμοσμένα: Να αυξηθεί η δομησιακά υπέρβαση π.χ. 5,2% και να γίνει (4) νέα δομησιακά αναμειγνύματα.

19/11/2018 8.15

-9-

(δ) Διαδικασία προσδιορισμού μελέτης σύνθεσης συμπύκνωμα

Επί, ότι για τα γινά έχουν ερμηνευθεί τα επιβλεπόμενα τους, οι υπομειγνύματα, αναμειγνύματα και ένας δόξα είναι αναμειγνύματα των γίνων: Νερό ή τσιμέντο (N/T), με των αναμειγνύματα αναμειγνύματα: β, και έχουν δόξα τσιμέντο για των ποσότητας: Νερό(N), σε σχέση με των κέλυφος κόμμο των αναμειγνύματα π.χ. σύμφωνα με των Αμερικανικών μεθόδων για τσιμέντο Mix Design: ACI-211.4

Εάν γινών, για: C25/30 είναι:

- (β) επιβλεπόμενα: Τσιμέντον (II/42,5) = 320
- Άμμος = 2,65
- Χαλίκι/Χαλίκι = 2,72
- Νερό = 1,0

και μετ' επιτήρηση, η περιεκτικότητα σε αέρα είναι: 1,5% = 15 λίτρα

(ii) Ο λάτος:  $\frac{N}{T} = 0,55$ , και η ποσότητα νερού:  $N = 175 \text{ kg/m}^3$

τότε  $T = \frac{N}{0,55} = \frac{175}{0,55} \approx 320 \text{ kg/m}^3$

Ετσι έχουμο:

T + N + Άμμος + Χαλίκια + αέρα = 1 m<sup>3</sup>

$\frac{320}{3} + \frac{175}{1} + 1000 + 200 + 15 = 1000 \text{ λίτ}$

$\frac{106 \text{ λίτ} + 175 \text{ λίτ} + 331 \text{ λίτ} + 15 = 1004 \text{ λίτ} \text{ από: } 1000 = 4 \text{ λίτ, } 0,4\%$

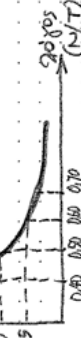
$\approx 10\% = 10\% \text{ (σε άερα)} = 70\%$

Διαγράμμα γίνων (N/T) και απτήν, (από Α.Μ. Νεσίλλε, από ACI-211.4)

Από: (N/T) ή ευδεικνύει

C25/30 (N/T) για τσιμέντο: II/42,5

C24/25 (N/T) για τσιμέντο: II/42,5



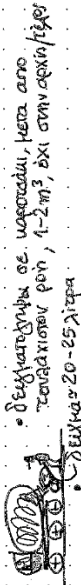
19/11/2018 8.15

8. Σχετικοι και δοκιμες στο συμπόδεμα

Μετα την παραγωγή των νεοτων συμπόδεματων, οι κωνιστικοι απαιτούν την επίτευξη ογκομετρικών δοκιμών και ελέγχων στο συμπόδεμα.

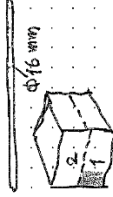
Οι κυριότεροι έλεγχοι είναι:

(α) Πνευματικότητα των νεοτων συμπόδεματων



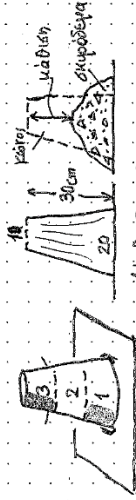
(β) Παρασκευή και συντήρηση των δοκιμιαν στο εργο.

Επίσης 15' απο την δοκιμαστική πρέπει να έχει εγγραμμενώνη η λήψη + συντηρηση των δοκιμιαν συμπόδεματων, σε ηρωτάις μήτρος: 15 x 15 x 15 cm, που συνιστάται να είναι χυτοσιδηρές/κοιτηθείς σε συντηρησιμη χίτευη, σε (2) στρώσεις x (25) κωνηκώστα με αυη ραβδο συντηρησιμη: φ=16 mm, μήκος: L=60 cm



(γ) Προβλεπόμενες εργασιμότητες (μάθους) των συμπόδετων

Αν εργασιμότητα προβλεπεται με την δοκιμη μάθους (Σκμmp) με τον κώδο μάθους, οπότε το συμπόδεμα συντηρησιμη σε (3) στρώσεις x (25) κωνηκώστα, με την ραβδο συντηρησιμη.



Υπαρχουν (5) κατηγορίες μάθους: 51-52-53-54-55

150 N/mm<sup>2</sup> / 1.915 MPa

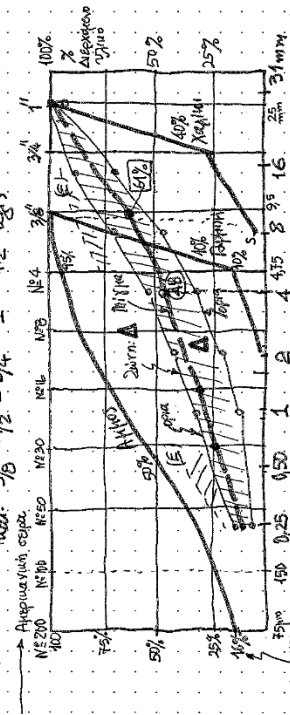
Προκατ. οριζοτ. ηρωκώ ραβδο συντηρησιμη

(ε) Σύνοψη (3) αδρανών για το Μίγμα (Job mix)

Για να βρω τις αναλογίες των (3) υμεσμάτων αδρανών: άμμου, χαμηλίου και χαλμού, που θα αποτελέσουν το μίγμα των αδρανών (Job mix) στο συμπόδεμα, πραγματοποιώ τις (3) κοινωμετρικές των αδρανών και φέρωσα σε ποτες αναλογίες, το μίγμα τους, έτσι κοινωμετρικη διαβάση μεσα στο φάσ της Κανονισμιας, όπως π.χ. στο διάγραμμα Ι, Ζώνη: Δ του ΚΤΣ-97

Αν δεικά υλοποιών που πραγματοποιώ τις κοινωμετρικές μπορεί να είναι είτε:

- Τετραγωνική σειρά: (63mm) - 0,25 - 0,50 - 1 - 2 - 4 - 8 - 16 - 31,5 mm, είτε
- Αμφοτερογωνική σειρά: Ν<sup>ο</sup> 200 (φ=1mm) - Ν<sup>ο</sup> 400 - Ν<sup>ο</sup> 50 - Ν<sup>ο</sup> 16 - Ν<sup>ο</sup> 8 - Ν<sup>ο</sup> 4 (φ=15mm) και: 3/8 - 1/2 - 3/4 - 1 - 1 1/2 - 2

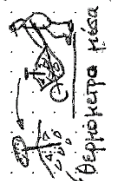


Εάν έχω όλες αναλογίες π.χ. Αμμο/Χαλμώ/Άμμο, ήρωκώ κωνηκώ κωνηκώ και την Ζώνη: Ε, ή να αναλογισθώ τις αναλογίες των υμεσμάτων αδρανών (π.χ. άμμος, χαλμώ, χαμηλίο), και η εδωδα συμπόδεμα, είναι/Αποικειτοεινά, Απο-αμφοτερογωνικη μισοα να πραγματοποιώ (2) Άμμο, Ογκώδο κωνηκώ: Άμμο + χαλμώ π.χ. 60% - 40%, και ποτε να έχω των ομοιοτητα και των εδωδα κωνηκώ των βέλων (ήρωκώ: Fair-Face Concrete/FCC, Self-compacting concrete (SCC) είτε υδροκωνηκώ και εδωδα Test: Εξαγωγή (Flow) 65-80 cm, V-Funnel, L-Box, κτλ.

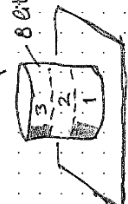
150 N/mm<sup>2</sup> / 1.915 MPa

-13-

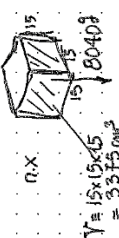
(δ) Μέτρηση θερμοφασίας σκυροδέματος:  $t_c$   
 $10-13^\circ C \leq t_c \leq 32^\circ C$   
 το θερμοκείμε μέσα στη μάζα του σκυρτός > 3 μέτρα



(ε) Φαινόμενο βάρος (πυκνότητα) του σκυρτός (unit weight/density)  
 Συμπυκνώνεται σε ένα δοχείο, κατά προσέγγιση όγκου 8 λίτρ σε 3 στρώσεις x (25) κομμάτια το σκυροδέμα, και μετράμε το βάρος του σκυρτός.  
 Διαφοράς το βάρος/όγκου του σκυρτός = πυκνότητα σκυρτός

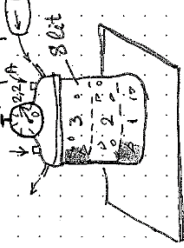


Πυκνότητα =  $\frac{\text{Βάρος}}{\text{Όγκος}}$  (συνήθως)  
 Μια κατά προσέγγιση τιμή, παίρνουμε 8040 kg/m<sup>3</sup> φέρνοντας το δοκίμιο του σκυροδέματος φέρνοντας πριν την βελτίωση τους 8040 kg



Πυκνότητα =  $\frac{8040}{3375} = 2382 \text{ kg/m}^3 = 2,38 \text{ t/m}^3$   
 $= 2,38 \text{ g/cm}^3$

(στ) Αεροπεριεμεινότητα του σκυρτός (air-content)  
 Για να μετρήσουμε την αεροπεριεμεινότητα του σκυρτός που δοκίμους είναι:  $\pm 1,5\% - 2,2\%$  αρμοιοποιούμε την συνιστώσα αεροπεριεμεινότητας



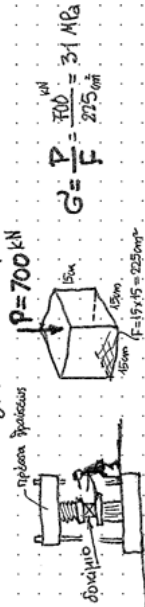
- Μεθόδους δοκιμής: ΕΑΟΤ EN 12350-7 (ASTM C231)
- Συμπύκνωση σε 3 στρώσεις x (25) κομμάτια
- Προσθήκη νερού μέσα από τα σχήματα για να ευδιάλυθεί ο αέρας
- Διακωνισμός πίεση, ώστε να συμπιεστεί ο αέρας στο εσωτερικό του δοκιμίου
- Πίεση το νεύρωσι Α, και η βελόνα δείχνει στο κενό/αέρα/την αεροπεμεινότητα

130 / (mm) 1.9.15

-14-

(ζ) Προσδιορισμός αντοχής σε θλίψη (compressive strength)

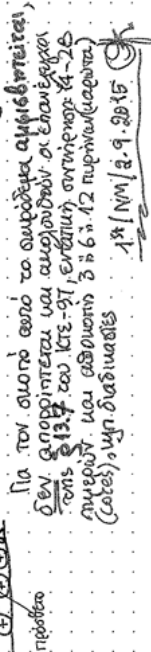
Μετα την αντήρηση (curing) του δοκιμίου σκυροδέματος σε βέλτιστο υγρασίας (curing top), για 3 ή 7 ή 28 ημέρες, σε σχετική υγρασία: RH > 90-95% και θερμοκρασία:  $20 \pm 2^\circ C$ , τα δοκίμια εδραζούνται στο πρόσωπο εργασίας δοκιμίου (Compression testing machine) για τον προσδιορισμό της αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων



Ο εθισμός των αδειοδοτημάτων των δοκιμίων γίνεται σε κατάσταση με τα δεδομένα της μελέτης. Ανδρείος, αλλά και με τις ανήλικες διαμορφώσεις, τις υφιστάμενες, οι οποίες στο Εργαστήριο, τον εθισμό που χρησιμοποιείται για τις δοκίμους (π.χ. ανακατασκευές, βεβαιωτικές, κλπ) τις συνθέτουμε για τον χρόνο κλεισίματος των δοκιμίων στο Εργαστήριο, εντός 20-32 ημερών, την αμφίβια της κλεισίματος (π.χ. η πρόοδος πρέπει να έχει διαμορφωθεί, από το κλειδί ή από Εργαστήριο Μετρολογίας διαπιστωμένο από το ΕΣΥΑ).

Για τους αυτούς τους λόγους, εάν ένας κολλητής αντοχής στα δοκίμια, δεν σφαιραίνει:  
 • ούτε σε το ετοιμο σκυροδέμα ή με ζεμάς αντοχές  
 • ούτε σε το έργο εκειχομένης αντοχής

Μπορεί το ετοιμο σκυροδέμα να ήθε να μείνει στο έργο είτε να προσέθετε νερό στη λεπία, με εντολή στον Οδηγό, ή να προσέθετε αμύδα ή άλλο είδος ανάμειξη: 3-5, κλπ



Για τον αιώρο αέρα το σκυροδέμα αμυδαίνεται, δεν απορροπείται και απορροπών οι ελαστικές τους 13.7 του κτε-97, εντάτη συνθήκη 4-28 ημερών και αδειωσής 3 ή 6 ή 12 ημερών (Cotes) για διαμορφώσεις 130 / (mm) 1.9.15



5. Επιλογή κατηγορίας αυτοκινήτων, επιλεγεί κατηγορίας κλάσιων.

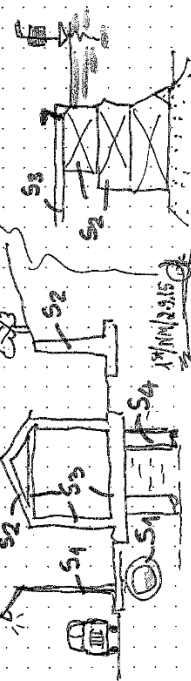
- (α) Συμμόρφως οι μέγιστες επιμέτρηση το: C29/65, ως κατηγορία αυτοκινήτων συμμορφώματος, για την μέγιστη τους, για τους εφές εφές:
  - να μη είναι οι μέγιστες "μονομετρία"
  - "φρέβουνται" οι το "εξοπλισμό" του C25/30
  - Δεν γινώσκουν τα θέματα "Αντιεπιπτώσεις" (Duzabólly) του συμφορ, ούτε ζέρουν οι το ΕΠΟΤ ΕΝ 206-1, υποδυναμ ως εξακιστη κατηγορία συμφορ το: C25/30, να για παράταλασσιο συμφορ (1 km στο. παράτα) το: C30/37

Ανι μετρώμε οι η Ερσάδα έχει 15.000 km μήκους, ναί πάνω από 250 Νύκτα, το: C30/37, για εφρέθε να, είναι το 50% τον συμμορφώματος, τον ζύμω: 10-15 km από τον Παράτα, όπως προβέρται το Σχέδιο: ΚΤΕ-2015. 330 kg/m<sup>3</sup> Επίσης στο παράταλασσιο συμφορμα αεραταται: 330 kg/m<sup>3</sup> ταιγέτο, ως εφάκισση, περιμετωπύτα. Για εφής προσατάται ναί παρύνθων, από τον διαφωτισμό, από τα συμφορτα (C2) από με αυτή την περιμετωπύτα ταιγέτο, το: C37/30, "δραται" αυτατα.

Αρα θεωρείται οι το: C25/30 να εφρέθε σε όση την ναί να είναι η εφάκισση κατηγορία συμφορ τον μέγιστες, γέτωμα, ναί στο παράταλασσιο το: C30/37

(β) Ως πός τον εφάκιστο τον κατηγορία κλάσιων, γέτωμα πέρνει το προσηταί η κατηγορία: 54 περίπου: 16-18cm κλάσιση, ναί για φρέατοιδωσσίου > 20,0cm, ήα γέτωμα, διαταχέ με πύκνο οργαγο μεπαεί α αεραταται: 55, με αυθίση > 22cm, η/ναί η Απο-συμμετωπύτα συμφορμαί.

Αντιδρα σε σέτες, γέτωμα σε εφίμνη επίπεδα, ήταπει να χρετωποηταί το: 52, με 8-10cm αυθίση, ναί σε Διέκη, στοίβα, ταιγέτος Οκτωβίου: λιμενικών Εργων, ταιγέτος Απριλλίου, ναί, η.π. Σε υναί πλάτα, ζήκητα, Εργων, Δωαφρα, το: 53, με: 14-15cm είναι αριετα



10. Χρόν τον διασάρητα τον συμμορφώματος, στην αυθίση του στο Ερσ, τον χρονη τον, στην Ερσ, τον ποίσημα εφς.

Το Διόραγμα Ροής των ενεργειών ενός Μηχανισμού που έχει εφίσημαί είτε στην Εφάκισση είτε στην κατασκευά ενός Ερσ, από συμμορφμα παράταλασσιο.

- 1<sup>η</sup> Φάση: Σχεδιασμοδ - Μέγιστες τον κατασκευά
- Επιλογή κατηγορίας αυτοκινήτων, ηκ: C25/30
  - Επιλογή κατηγορίας υαδίων ηκ: 54
  - Επιλογή κατηγορία αυθίσης στο περιεφάρων: ΧC3
  - Επιλογή επιμετωπύτα συμφορ: 35 mm
  - Εφίση θέματα, όπως:
    - \* Επιμετωπύ ταιγέτο με αυθίση στα δεινά (ε.ε)
    - \* Επιμετωπύ εφρέατοιδωσσίου: 4,5% ± 1,5% εφ περίοδη τα, ήκαη με παρτα (βήκητα, Νεφωμίν)

2<sup>η</sup> Φάση: Εφίση Εταρεία, Εφίση συμμορφώματος

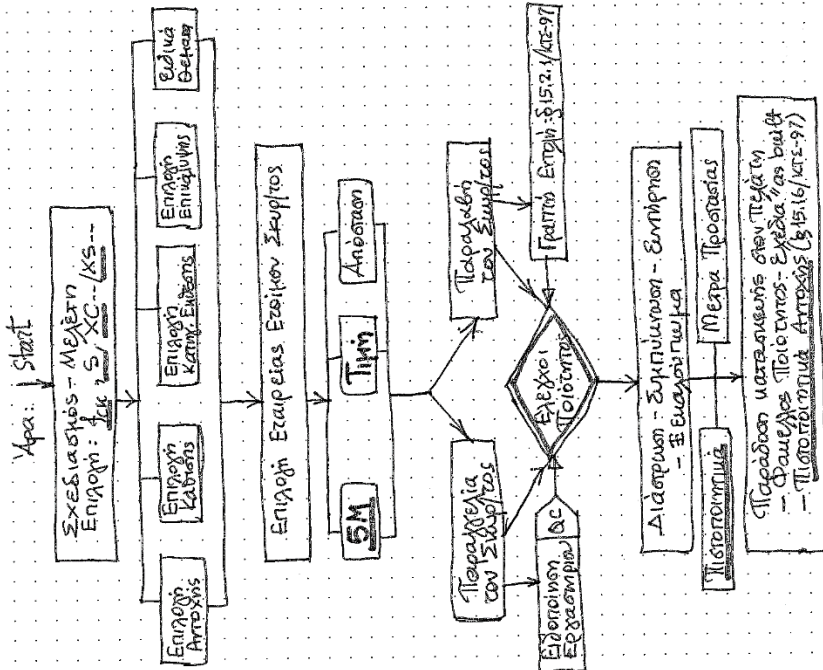
- Εφάκισση αριεταί από το Ερσ, ηκ: 1/2-1/3εα
- Εφάκισση αριεταί, βεταταί, ποταταί, ηκ: 50"
- Εφάκισση, ηκ: 50", οημεία: Μ3ε, Μηχανικό, Μ3ε, οημεία αριεταί συμμορφώματος - Εφάκισση ηκ: 100"
- Εφάκισση αριεταί, ηκ: Minimum ταιγέτο: ηκ: 100"
- Εφάκισση, ηκ: Maximum, ηκ: Νεφωμίν, ηκ: 100"
- Εφάκισση, ηκ: 60 (ηκ/η)

3<sup>η</sup> Φάση: Παράταλασσιο τον συμμορφώματος

- Κατηγορία αυτοκινήτων, ηκ: C25/30 η C30/37
- Κατηγορία υαδίων, ηκ: 54, με: 16-18cm
- Εφάκισση περιμετωπύτα ταιγέτο ηκ: > 300 kg/m<sup>3</sup>
- Πύκνο οργαγο: 10 ηκ/η, σε κοπύση: 60 ηκ/η
- Πύκνο οργαγο: 10 ηκ/η, σε κοπύση: 60 ηκ/η
- Πύκνο οργαγο: 10 ηκ/η, σε κοπύση: 60 ηκ/η
- Πύκνο οργαγο: 10 ηκ/η, σε κοπύση: 60 ηκ/η
- Πύκνο οργαγο: 10 ηκ/η, σε κοπύση: 60 ηκ/η
- Πύκνο οργαγο: 10 ηκ/η, σε κοπύση: 60 ηκ/η
- Πύκνο οργαγο: 10 ηκ/η, σε κοπύση: 60 ηκ/η

1/2 (ηκ/η) / 2.9. 15

-18-



Διαγράμμα Ροής Επιλέξιμης Εργον αερο σκυρίτωνα

15/ΝΜ/2.9.15

-17-

4<sup>η</sup> φάση: Παραγωγή σκυρίτων στο Εργο

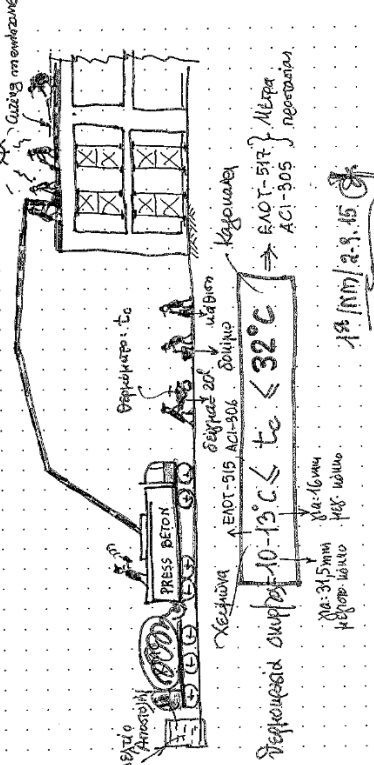
- Εξέταση των Δεσμών Αποδοχής
- Χρόνος φέρουσας/Αφίσης/Επιφόρτισης < 1 ώρα + 30'
- Δείγματα παραμπίλα/μετρήσιμη υαλοπίνακας
- Μετρήσιμη υπερφόρτιση των σκυρίτων
- Δείγματα στο ψήφια, 12 ώρες δομικών σκυρίτων (6 δομικά/ώρα, 150mm/μήκος, 12 δομικά > 150mm)

Προσοχή: Από κάθε βάρη, μόνο 1 δομικό.

- Προσδοκώμενη υπερφόρτιση, εάν απαιτείται 2 δείγματα της ερρασιμότητας, **και νεφών** (6.9/ΚΤΕ-97)

5<sup>η</sup> φάση: Διάσπαση - Σχημάτισση - Εντήρηση

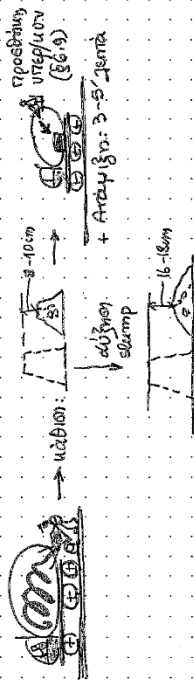
- Διάσπαση σε στρώσεις έως < 0.60m
- Οχι υψος πλάτους > 2.5m, πλάτος (σημείο) 0.50m
- Σχημάτισση: τυφλωμένοι (2) δονητές
- Δοσολογία: 30-40cm, τυφλωμένοι: 5'/από δόση
- Εντήρηση, αμέσως, με Causing μετωπιαία
- Το εντός 2 ωρών με βρέξιμα 2 τσιμέντα, και για τυφλωμένους: 7 ημέρες, (3) βρέξιμα/ήφα
- Μετά η προετοιμία, σε υαλοπίνακας, υαλοπίνακας
- Αποφόρτιση: Εμπροσθίων > 2-3 ημέρες, από ψήφια
- Διακοπή της επόχθης τυφλωμένων (Τιτάνιος § 11.6)
- Αποσπαστή ερπον: 20-32 ώρες δομικών στο Εργοταξίο



-19-

11. Συχνές ερωτήσεις (FAQ)

(α) Τι είναι αν το μιστόν έρδει "σφιχτό"?



Εάν το ανώροδο έρδει με χαμηλή κλίση - "σφιχτό" - π.χ. 3-10cm, γίνεται επι-τόπου προσθήκη από ένα συρματόσχοινι από τον δάκτυλο υπερ-ρευστοποιητών π.χ. 1-2 kg/m<sup>3</sup>, σε ανενόητος με την Ελλάδα, στη βεράντα, και αμορύνει αμορύνει του σωλήτες, στα χρώματα σφράγιση (3-12 cm) επί: 3-5 cm. Εάν η κλίση γίνει η επιθυμητή π.χ. 16-18 cm, ταφίρια δομικού μετά την προσθήκη του σφραγιστή. Η απεξο παραμένει ελάνθη τον εφορτιστή αν έχει προστεθεί πρόσθετο με ελάνθη του εφορτιστή. Εάν έλκονται, σφραγιστές ΔΕΝ έχει ελάνθη για την σφραγιστική απεξο.

(β) Τι είναι αν έρδει "μαλακό" μιστόν?

Εάν το ανώροδο έχει παραχρηθεί π.χ. 5cm, με μια κλίση: 14-15cm, και έρδει με κλίση: 20-22cm, οδεύει: 55, ερώτως αν αυξη η κλίση σφραγιστή σε υπερ-δοσολογία. Εάν είναι αυξη η κλίση και μιστόν να περιμένει 20 λεπτά η κλίση θα γίνει, ενώ μπορεί να το χρησιμοποιήσει, αν τα υφιστάμενα κων/άνετρα π.χ. κλειστο-βραχίονι κων/άνετρα που είναι τα αρακά και η αυχός. Εάν κλειστο-βραχίονι κων/άνετρα από τον δάκτυλο, για να το "καταβεί" για να την/τορπίσει η κλίση, τότε το ανώροδο επι-τόπου κλίση, και σφραγιστή σε ΔΕΝ των Αρσενίων 5 Οκτώβριος, κων/άνετρα ... το σφραγιστή!! Εάν δεν έχουμε εμπειρία στη Μορτάδα, το επιστρέψουμε πίσω.

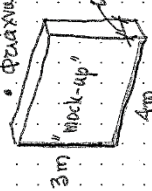
19/11/2015

-20-

(γ) Τι είναι αν έρδει "μαξές επιφάνειες" μιστόν

Και αρχίζω σιδηράται το συμπίεσμα, ώστε το "μαξάρι" να έχει αυτές τις ιδιότητες, π.χ.

- Προσθήκη: C 25/30, με τσιμέντο ≥ 320 kg/m<sup>3</sup> ✓
- Προσθήκη: γλυ: κλίση: 54, συνολικός: 16-18 cm ✓
- Τι είναι: Απαιτώ: διατηρησιμότητα, C 25/30 ✓
- Τι είναι: Απαιτώ: συνολικός: 1000 kg/m<sup>3</sup> αμμο, τσιμέντο 15% - Φροντιστή για ένα μάχι: **δέντρο** του σφραγιστή.
- Προσθήκη: (2) δέντρος, π. 50-470mm, δέντρο από: 30-40cm συνολικός: (2) δέντρο/άνετρα φέση, να μην αμμομιάει.
- Να έχει υπερβολή η **επικάλυψη** του σφραγιστή, μήν ο δέντρος το μαζώνει (> 1-2 διαμετρήσεις του δέντρο), μήν των εφιστάσεων (flexion agent), ΔΕΝ έχει περί σφραγιστή, αλλά εφιστάσεις, πιθανώς να φέση να αμμομιάει με την το υφιστάμενα, π.χ. υφιστάμενα, κων/άνετρα, τα έχουν γίνει ~ 3-4 χρώματα. ΔΕΝ καταβεί, οπότε με πάνω από 15 χρώματα, αναμειγνύει με δέντρος κατασκευαστών.
- Προσθήκη: π.χ. 15-20, αναμειγνύει τον δέντρο + υφιστάμενα οποιους τσιμέντων, και υφιστάμενα/δέντρο.
- Απαιτώ: επι-τόπου "δομικών έργων", σε εσωτερικό μόνον σε το "δομικό-έρδει", που έχει οριζόντια στα έρδει (σε ύψος ή στην θέση) πλάσε, ελάνθη σε ελάνθη, αναμειγνύει σφραγιστή. στο κων/άνετρα εφορτιστή ≥ 8 ΜPa (επί το ΑΑ).



- Φρέζα κων/άνετρα "Meck-up", σε περίπτωση Fair-Face (κων/άνετρα που το έρδει η επιπέδη, και θα παραμείνει ως δέντρο σε ελάνθη. την διαμέτρη των έργων.
- Οι σφραγιστές κων/άνετρα, στο χέρο κων/άνετρα, στο έρδει, υφιστάμενα, αναμειγνύει στο έρδει (σε ύψος) στο έρδει (5m-56cm) δέντρο, από **κων/άνετρα**, από **δέντρο**, από κων/άνετρα + εφορτιστή. Σφραγιστή, πιθανώς από **Cover** π.χ. 50 mm.

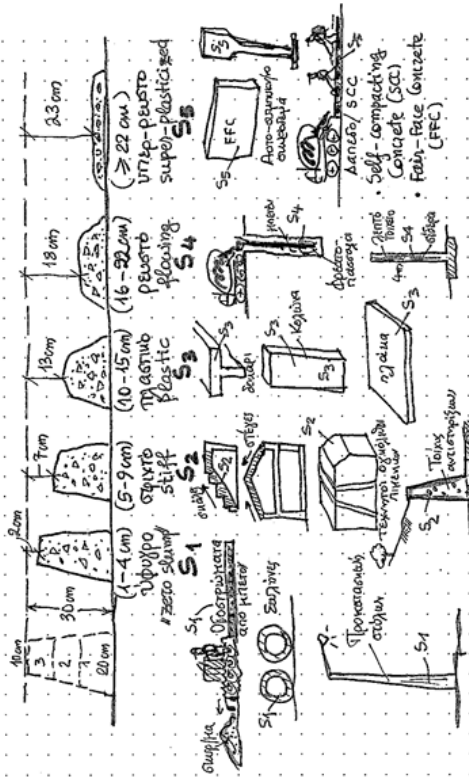
19/11/2015



15. Κατηγορίες υδάτινων - 2L εργασιμότητα του σκυφάλου

Υπάρχουν πολλοί τρόποι να μετρήσεις την "εργασιμότητα" (workability). Ο πιο συνδυασμένος είναι με την δομική ιατρική (slump test) με τον κύριο παράγοντα. Απλό κέβρα είναι η δομική εργασιμότητα (flow test), η δομική βεβα για το "slump" συμπεριφορά, η βεβα και άλλα, που μετρούν την δυναμικότητα (consistency), ή άλλες ιδιότητες

Υπάρχουν (5) κατηγορίες υδάτινων: S<sub>1</sub> - S<sub>2</sub> - S<sub>3</sub> - S<sub>4</sub> - S<sub>5</sub>



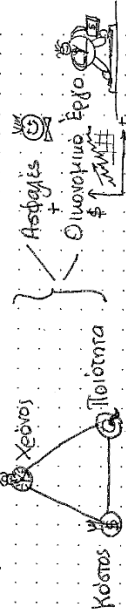
- Για ναύα από 215cm υδάτινη χρησιμοποιείτε τον δομική βεβα
- Για ναύα από 175cm υδάτινη χρησιμοποιείτε τον δομική βεβα

Δομική εργασιμότητα (flow):  $g = \frac{215}{Z}$ ,  $h \times 65 - 80$  cm  
 Για ναύα από: 65cm - 80cm εργασιμότητα και με V-Finite = 6-10' sec, το συμπεριφορά έχει χαρακτηριστικά "αυτο-σφαιρικού"

$1^{\text{st}} \text{ NM} / 4.9.15$

14. Ποιά είναι η "δομική", ένας "Μηχανικός έλεγχου ποιότητας" (Materials Engineer)

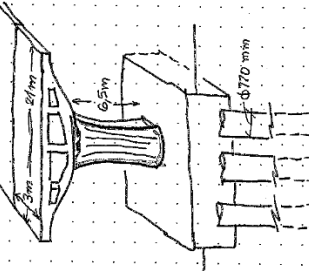
Όταν μια εταιρεία αναλαμβάνει την επίβλεψη ενός έργου και υπογράφει την "Συμβάση" του έργου, πρέπει να διασφαλίσει το έργο στο σωστό χρόνο - Ποιότητα - και κόστος



Ένα από τα στελέχη του έργου, ειδικά στο αρχικό στάδιο, είναι ο Project Manager, που διασφαλίζει τη διαχείριση του έργου, να είναι η καλύτερη δυνατή και τον καλύτερο χρόνο. Εξαρτάται από την εμπειρία του.

(F) Μηχανικός Έλεγχου Ποιότητας του έργου (Materials Engineer)

Είναι αυτός που διασφαλίζει να σχεδιάσει τις καλύτερες συνθήκες για να διασφαλίσει τον έλεγχο της ποιότητας του έργου, όχι θεωρητικά, αλλά με:



1. Τα δεδομένα υλικών της περιοχής
2. Τον δεσφαιρωμένο χρόνο του έργου
3. Τα δεδομένα συνεργεία κατασκευής
4. Την δομική επιβάρυνση του έργου
5. Το συγκεκριμένο χρόνο προεξέλιξης
6. Τη ποιότητα, προεξέλιξης της δομικής
7. Το δεδομένο παρατηρητικό σημείο
8. Το δεδομένο παρατηρητικό σημείο
9. Τα δεδομένα, υψόμετρο, μέγεθος, 8-4 μέρη/μέτρο
10. Τα δεδομένα, υψόμετρο, μέγεθος, 8-4 μέρη/μέτρο
11. Τα δεδομένα, υψόμετρο, μέγεθος, 8-4 μέρη/μέτρο

Αν δεν διασφαλίσει, τότε ο Μηχανικός του QC του έργου (12) για τους καλύτερους και τον QA. Με τα οποία Method Statements (13) για 150 300, και τους υπαλλήλους, για να διασφαλίσει here is the Challenge!

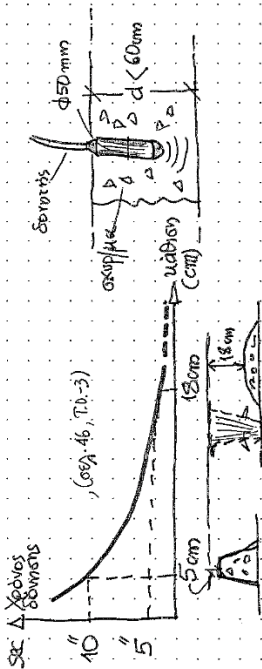
$1^{\text{st}} \text{ NM} / 3.9.15$

- 25 -

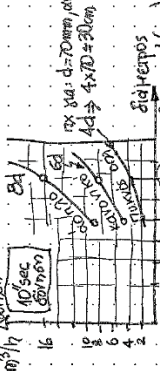
16. Έκθεση μεταξύ εργασιμότητας = πρώτου δόνησης - ελάχιστης διαμέτρου δόνηση και απόδοσης δόνησης.

Η δόνηση των σκυροδέματος γίνεται είτε με εσωτερικούς δονητές "μήπες" (internal vibrator) είτε με δονητές εξωτερικών ή με δονητικές μηχανές επιφανείας (vibrating beam, plate etc.) (επιφάνεια νιζαριών).  
 Σημειώνεται να υπάρχουν **τουλάχιστον 2 δονητές** στη φέρουσα στήλη ή πλάκα:  $\phi 50\text{mm} - \phi 70\text{mm}$ , που δίνουν περίπου  $\pm 3\text{ m/s}^2$ .

Η εργασιμότητα των σκυρδών παύει σημαντικά γρήγορα στο χρόνο δόνησης, ένα λεπτό σκυρόδεμα με υαλόν: 5-8 cm για χρεώσεται, για 10' sec δόνηση, ενώ ένα βρεστό σκυρόδεμα με υαλόν: 15-18 cm, κομμά να χρεώσεται για 5' sec, γρήγορα παραμένει ελαφρύ, γίνεται αυτή την ουσία:



Στη δόνηση των πλάκων: HETEK (Kerolit/MSB) 97 και στην Τεχνική Οδηγία: ΕΟ-3, του ΣΤΜΕ (www.spime.gr) φαίνεται το παρακάτω χαρακτηριστικό πην ασφαλείας:  
 Διακεκοπεί δόνηση • Πυκνωτικά οβελία • ανόδοση δόνησης: 4d, 8d, 11d  
 16 10' sec 10' sec 10' sec  
 18 10' sec 10' sec 10' sec  
 4 4 4  
 2 2 2



Στο ACI-305, και την ΠΕΤΕΠ: 01-04-02 του ΙΟΚ, αλλά και στην Εγκύκλιό του Τ.Ο.-3, φαίνεται οι αποστάσεις δόνησης: 14' / 10' / 9.15

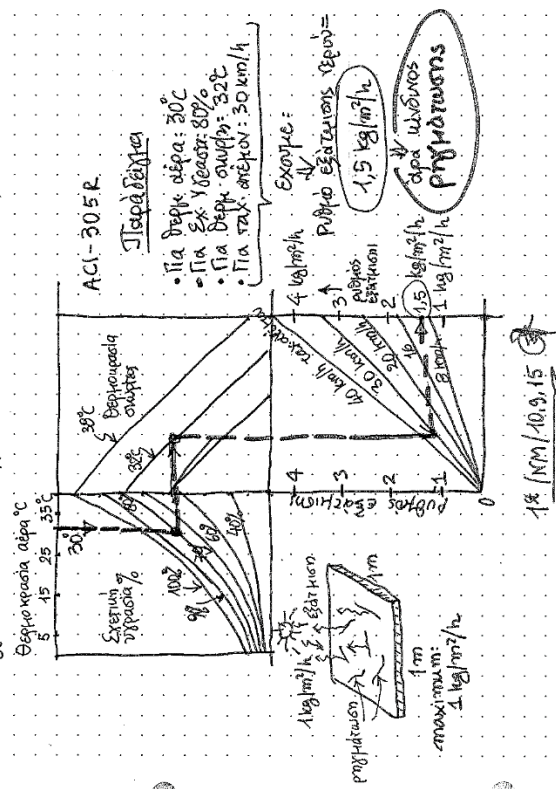
- 26 -

17. Συμπεριέκτηση με υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος

Όταν έχουμε θερμοκρασίες περιβάλλοντος  $> 35^\circ\text{C}$ , υπάρχει κίνδυνος πιθανόν να έχουμε και θερμοκρασία σκυροδέματος:  $T_c$  μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία σκυροδέματος  $< 32^\circ\text{C}$

Εάν σιμύει να έχουμε και μικρή σχετική υγρασία: πχ 30% και μεγάλες ταχύτητες ανέμων πχ 40 km/h, τότε υπάρχει πιθανόν να έχουμε κεραιβ ριζική **εξοχέλιση νερού** από το σκυρόδεμα και έτσι η σχετική υγρασία να είναι  $< 1\text{ kg/m}^3/\text{h}$  → τότε υπάρχει **κίνδυνος ρηγάτων** (plastic shrinkage cracking)

Στο Σχήμα 4 στα 31, της Τεχνικής Οδηγίας Τ.Ο.-2 του ΣΤΜΕ, που έχει θεσπίσει από το **ACI-305 R. 10** φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας: το depth-αέρας, σχετ. υγρασίας και ταχ. ανέμων στο ρυθμό εξοχέλισης της υγρασίας των σκυρδών (και στο ΕΛΟΤ-515, και ΚΤΣ-97)



14' / 10' / 9.15



- 30 -

Η ποιότητα γράφει, δεν είναι ζωή τον φίλε. "ταλαιά".

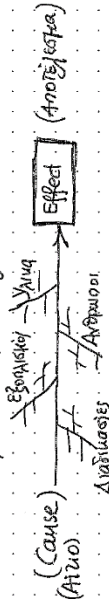
Υπάρχουν: Προσυνδέσεις, π.χ. Κάρτα πλυσίματος (Mik Deshm)  
 Σχεδιασμός (Mik Deshm)  
 Εξοπλισμός, μηχανήματα  
 Εργαστηριακό προσωπικό  
 Διαδικασίες, κανονισμοί.  
 π.χ. στο Σκυρόδεμα →

Επί αυτού να ενοηθεί: Αποτέλεσμα (Αποτέλεσμα)  
 Προδιαγραφές (Απόδοσις, Εργασιακότητα, Κερδοφορία, Ανθεκτικότητα, Αποδοτικότητα στην κατασκευή, Ευελιξία στην αλλαγή, 5 εργαζόμενοι)

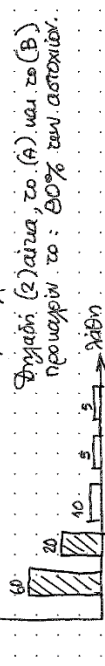
Στα "εργαλεία" της ποιότητας, οι "μυνητοί" της ποιότητας έχουν αρσενική διάφορα, εδάφους.

π.χ. Ο Edward Deming τους: "μυνητοί ποιότητας"

Ο Ishikawa, το "ψοποιώμαχο" (Fishbone)



Ο Pareto, τον κανόνα: 80/20, εδάφους το 80% των γαδών οφείλονται σε (3) μωρια αία. στο 20% οφείλονται των αζών.

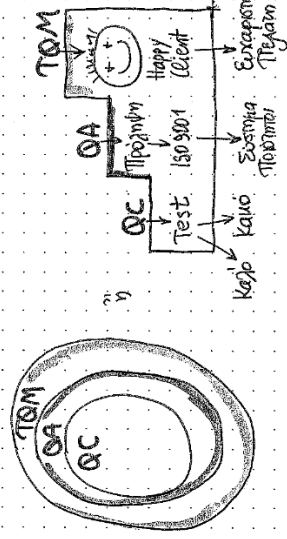


Ο Juran, που τον κανόνα να βρεθεί στην Βιβλιοθήκη (Απόδοσις Στάθους, Ολική Ποιότητα, Ευάδους Τεχνολογίας), στην ΕΒΕΕ. Σημειώνονται τα "στοιχεία" για την ένοια της Ποιότητας!! (Προσυνδέσεις στην ΕΒΕΕ (www.ebe.gr, EFQM, EOQ)

15/11/10, 9.15

- 29 -

Χωρίς τα (3) εδάφους είναι το ένα "υπόσύνδρομο" τον άθρο, (3) βόματα, (3) ούμας.



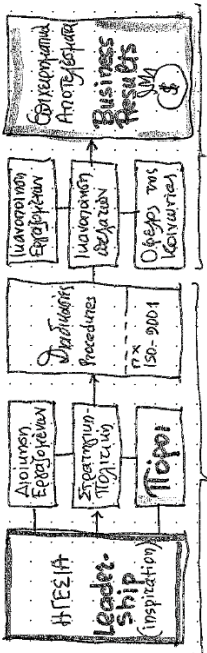
Υπάρχουν και δύο εξειδικευμένα "εργαλεία" για την ποιότητα οφείλονται το:

**"European Model for Quality Excellence"**

στο το EFQM (European Foundation for Quality Management) είναι Οργανισμό που συσταθεί τον π.χ. 250 μέλη της Ευρωπαϊκής και έχουν θέσει "κρίτηρια" για την απονομή των βραβείων.

**Business Excellence Awards**

(Βραβεία Επιχειρηματικής Αριότητας) Στη χώρα μας το EFQM εισάγουσεται από την ΕΒΕΕ (εδαφους) το μοντέλο είναι:



**Προσυνδέσεις**

15/11/10, 9.15



-32-

20. Ο δειγματολόγος των Σιωποδέματων

- 1. Σωστή Διασύνταξη, Κατηγορία Αποκός > C25/30, Κατηγορία Κάδιους > 54
- 2. Σωστή Παραγραφή, Έλεγχος Λεξιων Αποστήλη, Χρόνος φέρων/επιφώνησης < 1 1/2 ώρα, Έλεγχος περιεχ. τσιγκέτου > 300gr
- 3. Σωστό, σωστά, Εταιρείας, Εξοπλισμ Σιωποδέματος, Σωστό είναι δυνατόν, Εξοπλισμ της Μοράδος, Γνωριμία με τον Διημ μηχανικό, υδρόδυνα, διαφύγη & Τσίσις
- 4. Φεικλατομήτρες και έλεγχος ποιότητας στο έργο σου, λήψη Απαιτησιών, Εργαστηριον, Επιστημολογικό, από το ΚΕΔΕ ή Διαπιστευμένο από το ΕΣΥΔ/ΕΣΠΗ για πραγματοποίηση ελέγχων. Πιστοποίηση αυτών.
- 5. Γραφείο έπληρ στον Καταναλωτή (§ 15.2.1/ΕΤΕ-97) για πραγματοποίηση ελέγχων ποιότητας.
- 6. Σωστή Διασύνταξη-Συνοπτική-Συμπέραση
- 7. Τήρηση των χρόνων Αφαίρεσης Συμπόρων (Πληρωμα: 446)
- 8. Μέτρα προστασίας σε συνροδένση σε υψηλές β. ταχύτητες. Βερμουςαίτες
- 9. Σωστή συμπεριφορά, Marketing, όρος ημερησίως στην δουλειά σου, Μέτρα Ασφαλείας, Υγιεινής
- 10. Να θυμάσαι πάντα: Happy Client!

Να έρπεις και να ικανοποιείς, όχι μόνο τα ανάγκες σου και τις προσδοκίες του θελάτη σου. Ο "επιδοδότης" θελάτης, θα γίνει ο καλύτερος θελάτης σου!

και τέλος να μεταβιβάεις με προσοχή τα μυστικά σου σε Νέους Μηχανικούς. Οπως "κόπες" πρώτος, εσύ, έτσι και να τις μεταβιβάσεις και να κόψεις τους τελευταίους Μηχανικούς.

10/9/2015 / Επιδοδότης  
 Νηλ Μαρσέλλος, ΠΜ/ΕΜΠ (3)

-31-

19. Το Marketing στο Εργαστήριο των Μηχανικών

Όπως αυτές τις γνώσεις για το σιωποδέμα, όπως θα τις "σπρώξεις" στον θελάτη?

Εδώ έρχονται οι σχέσεις του Marketing και συμπληρώνουν κάθε "πακέτο" Marketing εκεί: "4P"

- (Α) Product = ποιο προϊόν "πουλάς"? Τι είναι το προϊόν σου?
- (β) Price = σε ποιά τιμή πουλάς το προϊόν?
- (γ) Promotion = πώς έχεις κάνει την "προβολή" σου? Την προβολή της δουλειάς σου μέσω τιμολόγων? Σε δημόσιες, ήδη σε περιοδικές σε εκθέσεις? Την προβολή του φαφίλου σου? Έκτες Site?
- (δ) Place = ποιο είναι το "δίκτυο διανομής" σου? Ποιοι και πόσοι κυλάνε για εμένα σε εγγύς, σε θελάτες, στην αγορά?

Εάν έχεις Προσέχει/Επαγγελματική κάρτα/Βιογραφικό με Portfolio, με φωτογραφίες από την δουλειά σου, και σχέδια θεμάτων σου για την δουλειά σου, τότε (3) ώραφατα αμέσως αποκείνται:

- 1<sup>ο</sup> "Επιδοδότη του θελάτη" να τον ενημερώσεις από εκεί που έχει. Τσο κανόνιστοι, Ευρωπαϊκές, Αμερ-αμερικάνοι και έχουν νέες απαιτήσεις σε Δεικλατομήτρες, Διαμει, σε Εγκλισμ κατηγορία αποκός C25/30 ή C30/37 για το παρατάλαστο σιωποδέμα, για προστασία από τα χτυπήματα και την διάφωση των σχεδίων εγκλισμ, ψη
- 2<sup>ο</sup> Γεχνικές Διαπραγματεύσεις, Επικοινωνίας, Αξέτας, τα γεγονότα: Soft Skills (Διαπροσωπικές δεξιότητες) με τις οποίες θα πετύχεις καλύτερη συμπεριφορά
- 3<sup>ο</sup> Να εφαρμόσεις τις (8) διαστάσεις της Ποιότητας και πρώτος το: Customer satisfaction, την ικανοποίηση των αναγκών + προσδοκίων του θελάτη και το: Happy Client!

Αα! Πάρε και θρωατα βάρη!  
 15/11/10.9.15

Νικ. Μαρσέλλος Τεχν. Πληξ. Ε.Μ.Π. nikos.marsellos@gmail.com	Σκυρόδεμα (συνέχεια)	-2/3- 1
6	<p>Τυπική σύνθεση σκυροδέματος:</p> <p><b>C 25/30</b></p> <p>Τσιμέντο (Π/42,5): 300 kg/m<sup>3</sup> → 320 kg/m<sup>3</sup> (Π/33,5)                  Νερό: 170 kg/m<sup>3</sup> → 180 kg/m<sup>3</sup> (εξαρτάται)                  Άμμος (0-5mm), GF: 950-1000 kg/m<sup>3</sup> ανεξάρτητος κομμιτρεσέρων                  Χαλίκι (0-3/5mm), GC: 700-720 kg/m<sup>3</sup>                  Γραφίτη (6-12mm): 200 kg/m<sup>3</sup></p> <p>Εξοδωμένη (Rebar): 0,2-0,4% ως τομή (X44 → X40)                  υπερ-ελαστικό (Superplast): 0,5% - 1,2% ως τομή (π.χ. Σύνορο: 2370 - 2385 kg/m<sup>3</sup>)</p>	<p>α) Αύξηση αντοχής με τον χρόνο</p> <p>β) Μείωση αντοχής με την αύξηση ροής: N/T</p>
7	<p>Κύριες ιδιότητες σκυρτος</p> <p><b>5C</b></p> <p><b>5M</b></p> <p>A-A-A Απόκλιση Ανέκδοτη</p> <p>Χρόνος Φόρτωσης &lt;math&gt;t_c&lt;/math&gt;</p>	<p>α) Χωρίς πιστοποίηση ελέγχου ποιότητας: Κριτήριο Σκληρότητας (π. 11-3) 55-18111</p> <p>β) 6 δομικά, από 6 βαρέες / ανή: 150 m<sup>3</sup>/μάρκα</p> <p><math display="block">\left\{ \begin{array}{l} f_c \geq f_{ck} + 1,60 \cdot 5,6 \text{ και } f_t \geq f_{tk} - 2,0 \text{ MPa} \\ \text{min } S \geq 15 \text{ MPa} \end{array} \right.</math></p> <p>• ΚΕΔΒ, Τετρακύβ, 166, 11854-16mm: 210-21455904/924                  • ΕΛΟΤ, Κύριος, 50, Πλεσιτέρι, : 210 - 2120-100</p>
8	<p>Ελέγχος ποιότητας</p> <p>α) Χωρίς πιστοποίηση ελέγχου ποιότητας (ΠΒ5-1)</p>	<p>α) ΚΤΣ-2016, ΦΕΚ/1561/Β/2.6.2016                  β) Α.1: "Manual of Concrete Practice", www.concrete.org                  γ) www.e-archimedes.gr δ) www.spruce.gr</p>
9	Προβλεπόμενες	
10	Βιβλιογραφία	

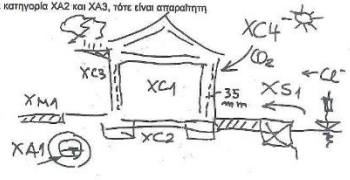
Νικ. Μαρσέλλος Τεχν. Πληξ. Ε.Μ.Π. nikos.marsellos@gmail.com	Σκυρόδεμα Concrete	Τεχν. Φύλλο: 1 -1/3-
1	Κανονισμοί (Regulations)	<p>Απαραίτητα: 8.4.2017</p> <p><b>ΚΤΣ-2016</b> (ΦΕΚ/1561/Β/2.6.2016), 5 ΚΤΣ-97 (για τα παλαιά τεύχη)                  β' (ΦΕΚ/4007/Β/14.12.2016)</p>
2	Πρότυπα (Standards, Norms)	<p>ΕΛΟΤ EN 206-1 + Εθνικό Πρόσθημα (έκδοση: 2011)                  ΕΛΟΤ EN 12620 (Άδρανή), ΕΛΟΤ EN 934-2 (Πρόσθημα)                  (Υπάρχει και τα παλαιά σχέδια Πρόσθημα τον ΕΛΟΤ, στα οποία παρέχεται ο ΚΤΣ-97: ΕΛΟΤ 346, ΕΛΟΤ 515, ΕΛΟΤ 519, 519)</p>
3	Τεχνικές Προδιαγραφές (Specifications)	<p>ΕΤΕΠ, από: ΕΛΟΤ (ΦΕΚ/3221/Β/30.7.2012), 440 αμ.                  έχει αναπαράγει η υποχρεωτική ισχύς από: 59 ΕΤΕΠ.                  Κατάλογος ΕΤΕΠ: <a href="http://www.sate.gr">www.sate.gr</a> (ΥποΑρθρώσιμα)</p>
4	Μεθόδαι Ελέγχου (Test methods)	<p>ΕΛΟΤ EN 12350: Δοκιμές νωπού σκυρτος (δέγμα, slump)                  ΕΛΟΤ EN 12390: Δοκιμές συμπιεσμένου σκυρτος (δομικά)                  ΕΛΟΤ EN 13791: Εκτίμηση επι-τόπου θραύσιμης αντοχής, ύψη (Πάρκισον και τα παλαιά: ΣΚ-303, ΣΚ-304, ύψη, τον ΚΕΔΕ/ΠΡΟΣΒΕ) (στα οποία βασίζονται ο ΚΤΣ-97.)</p>
5	Τεχνικά χαρακτηριστικά σκυροδέματος	<p>α) Κατηγορίες ενδεδειγμένες στο περιβάλλον + Αρτηρώσεις (exposure classes)</p> <p><b>Πίνακας: B2-7</b>, σύμφωνα: 18.091</p> <p>... XC3, XC4, ..., XS1</p> <p>• Μέγιστος ρότος: N/T &lt;math&gt;\leq 0,150 - 0,155&lt;/math&gt; (ενεργός)                  • Min κατάρτησις: C25/30 → C30/37                  • Min περ. Τσιμέντου: <math>T &gt; 310 - 320 \text{ kg/m}^3</math>                  • Min επιμάζωμα <math>\geq 35 - 45 \text{ mm}</math> (για διαβιβάση)</p> <p>β) Ιδιότητες:</p> <p>• <math>P = 850 \text{ kN}</math> C25/30                  • Θυμνική αντοχή (Compressive strength) <math>d = \frac{P}{F} = \frac{850}{300} = 283 \text{ MPa}</math>                  • Εφάρσις (slump) <math>T &gt; 310 - 320 \text{ kg/m}^3</math>                  • Τυμνότητα (unit weight, density) <math>d = \frac{M_{\text{ολοκλήρου}}}{V_{\text{ολοκλήρου}}} = \frac{6040}{3375} = 1790 \text{ kg/m}^3</math>                  • Θερμ. σκυρτος: <math>t_c</math> (από βιβλιογραφία ελέγχου) <math>d = 2350 &lt; d &lt; 2400 \text{ kg/m}^3</math></p>

ΚΤΣ - 2016 (ΦΕΚ/1561/Β/2.6.2016)

Πίνακας Β2-7 - Απαιτήσεις για το σκυρόδεμα ανάλογα με την κατηγορία έκθεσης

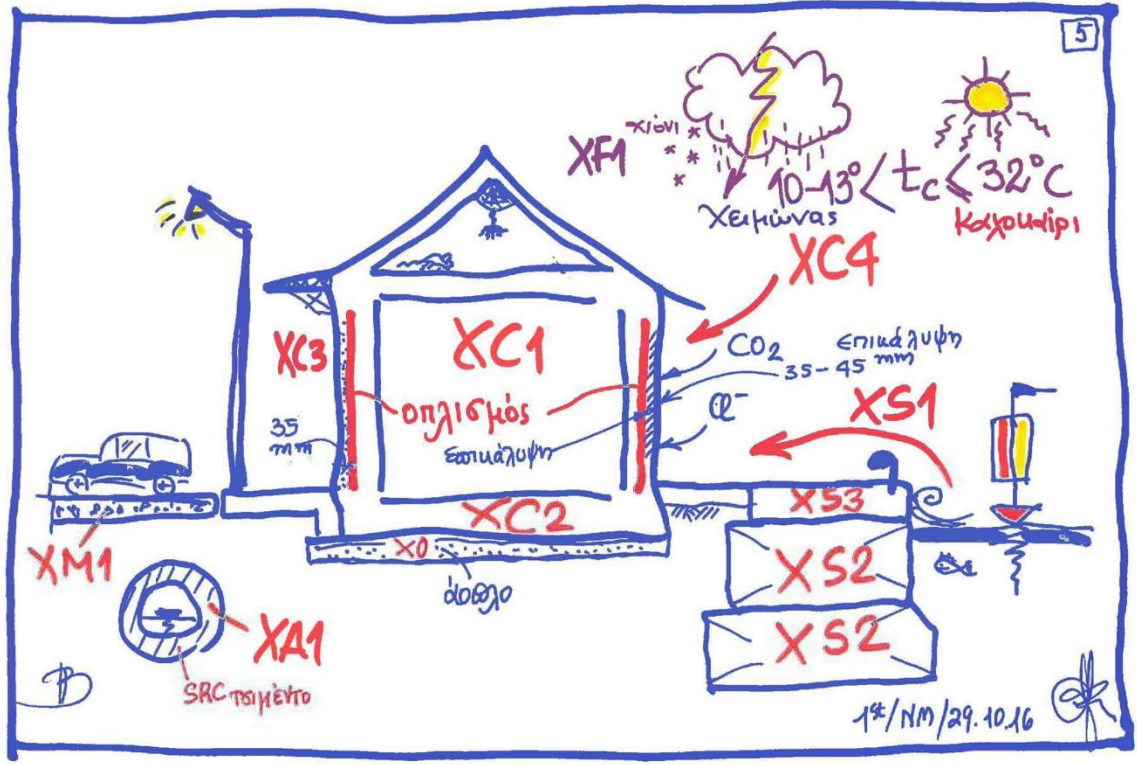
Κατηγορία έκθεσης	Χωρίς κίνδυνο διάβρωσης ή προσβολής	Διάβρωση λόγω χλωριδίων												Προσβολή από ψύξη/σύμψη	Χημική προσβολή <sup>1</sup>	Τριβή / Ατάκτση												
		Θαλασσινό νερό																										
		Ταμμένα II, III, IV (Επίσης CEM IWB-LL + CEM IWB-L)						Ταμμένα I (+ CEM IWB-LL + CEM IWB-L)																				
1	max NT	0,08	0,07	0,58	0,50	0,50	0,50	0,46	0,50	0,50	0,46	0,51	0,50	0,45	0,68	0,65	0,55	0,50	0,55	0,50	0,45	0,40	0,40					
2	ηδη κατηγορία αντοχής	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60	C 55/65	C 60/70	C 65/75	C 70/80	C 75/85	C 80/90	C 85/95	C 90/100	C 95/105	C 100/110	C 105/115	C 110/120	C 115/125	C 120/130	C 125/135	C 130/140	C 135/145			
3	ηδη περιεκτικότητα σε ταμμένο kg/m <sup>3</sup>	280	303	300	320	330	330	350	330	330	330	330	330	330	320	300	300	320	320	320	340	380	380	380	360			
4	ηδη επιθετικότητα για ανθεκτικότητα <sup>2</sup> mm	25	25	35	35	45	46	50	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40			
5	ηδη περιεκτικότητα σε αέρα (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,0 <sup>3</sup>	4,0 <sup>3</sup>	4,0 <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	-	-			
6	Άλλες απαιτήσεις	Σημ.: Απορία σκυροδέμα						Σημ.: Μόνο με μέσο στη διάσταση 1,6 km						Σημ.: Διαβρωτικές ύλες						Αδρανή σύμφωνα με ΕΛΟΤ EN12620 με ισοσταθμιστική αντοχή σε παγώσει <sup>4</sup>			Τομήνο ανθεκτικό σε βλάβη			LA ≤ 27	LA ≤ 28	LA ≤ 22

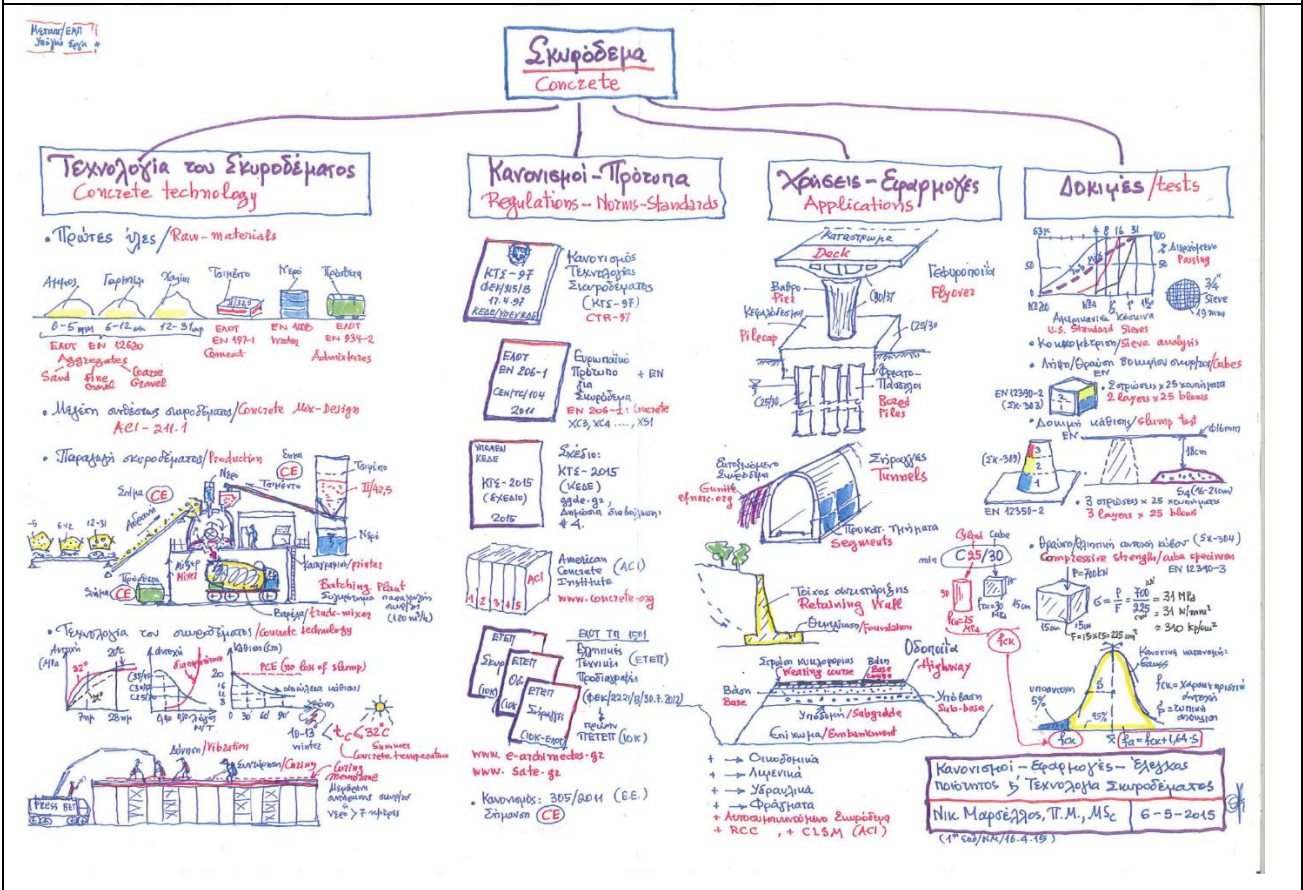
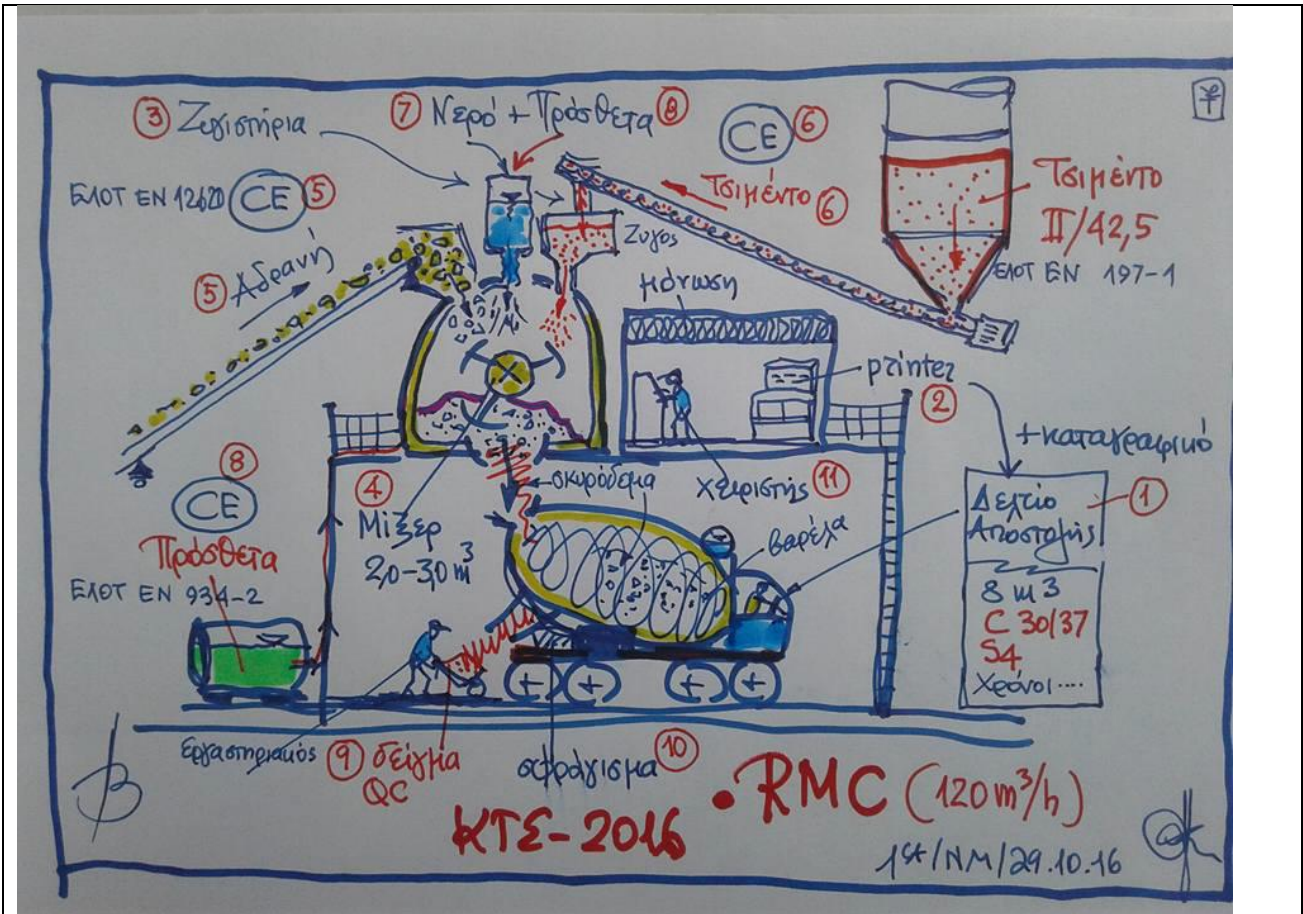
<sup>1</sup> Όταν δεν προστίθεται αερακτικό πρόσθετο, η επιθετικότητα του σκυροδέματος ελέγχεται με κατάλληλη μέθοδο, σε σύγκριση με σκυρόδεμα του οποίου η αντοχή σε ψύξη/σύμψη για την αντίστοιχη κατηγορία έκθεσης είναι αποδεκτή.  
<sup>2</sup> Για αυτή την κατηγορία έκθεσης (X4) ισχύουν και οι παράφοροι B7.7.5 και B7.7.6 του παρόντος ΚΤΣ. Όταν η ύπαρξη SO<sub>2</sub> οδηγεί σε κατηγορία XA2 και XA3, τότε είναι απαραίτητη η χρήση τσιμεντού ανθεκτικού σε θειικά σύμψημα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1.  
<sup>3</sup> Οι τιμές της επικάλυψης αφορούν οπλισμένο σκυρόδεμα.  
<sup>4</sup> Για τα αδρανή υλικά ισχύει και η παράφορος Β1.3.3.3 του παρόντος ΚΤΣ.

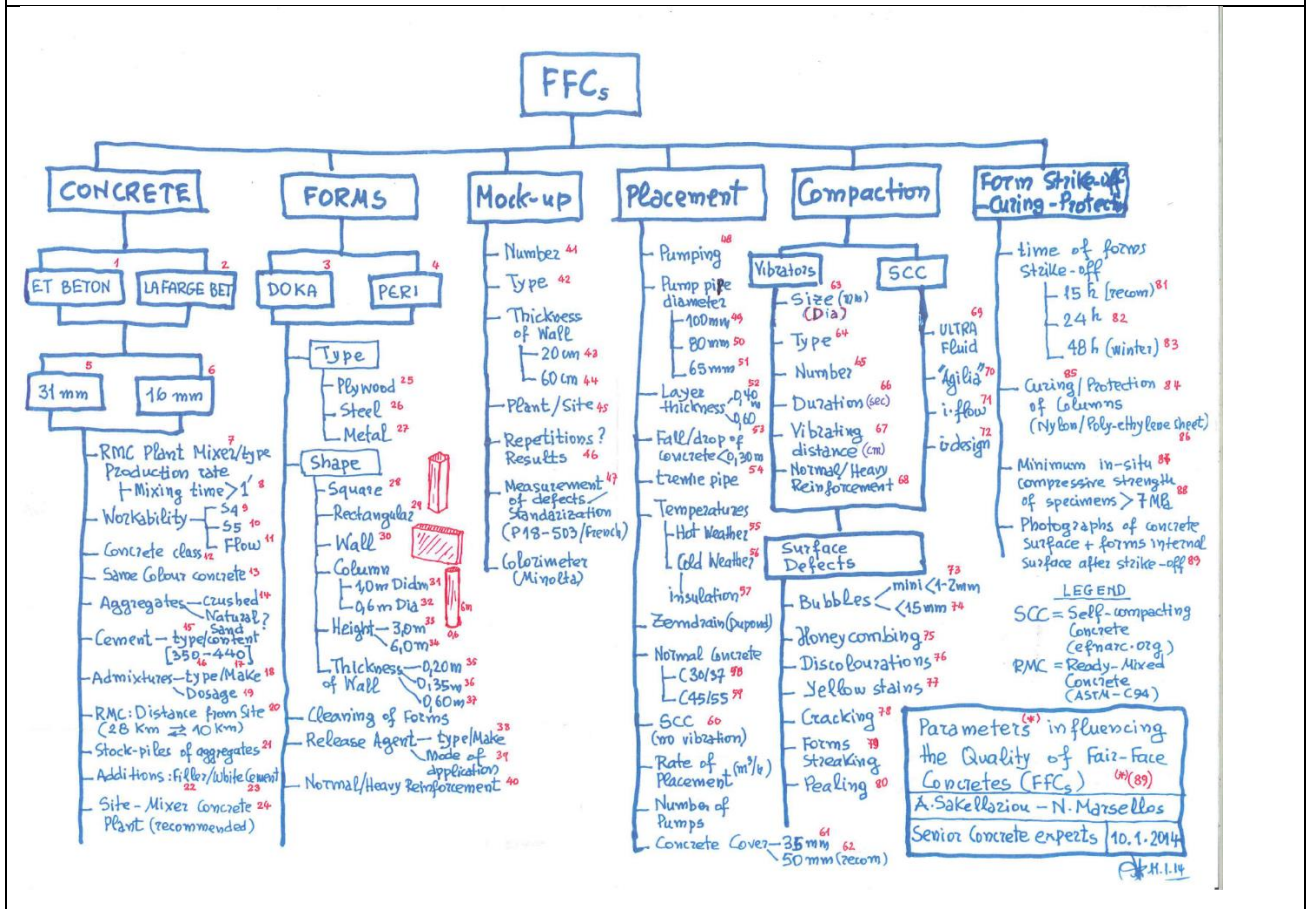
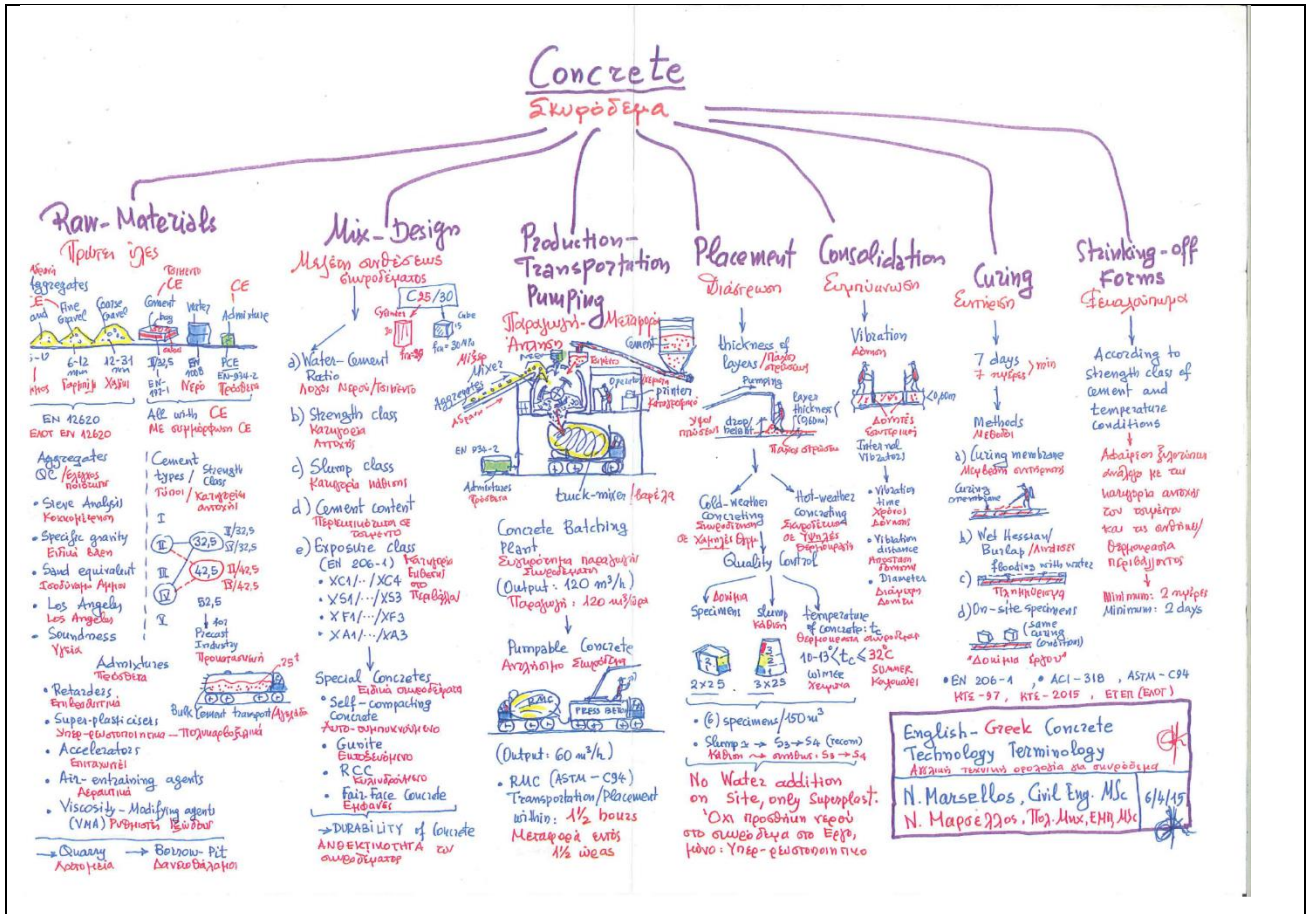


Τεύχος Β' 1561/02.06.2016  
ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ  
18091

-3/3-  
I



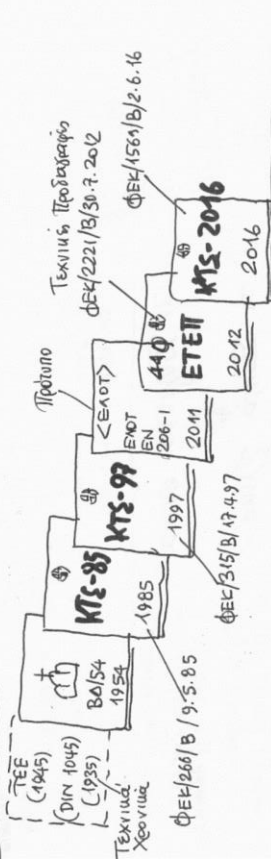




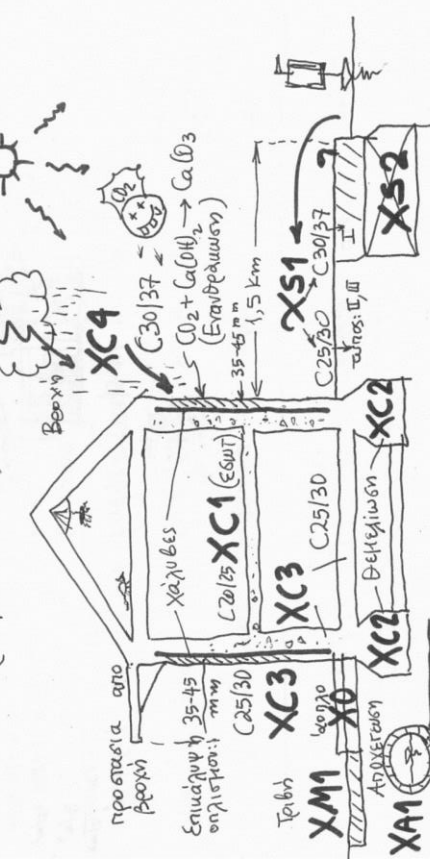
15/6-16/6/2016

CTE/Θεσσαλίας  
Σεμινάριο Τεχνολογίας Συνοδόμετου

Κανονισμοί: Κύρια Σημεία

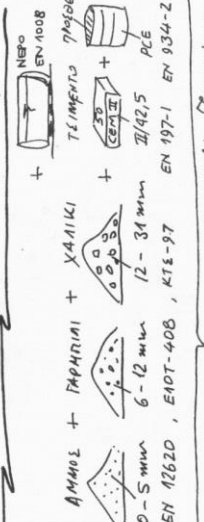


Β Κατηγορίες ευθέως στο Περιβάλλον - Αναρτήσεις (Exposure class)



Κατηγορίες Ευθέως	XC3	XC4	XS1	XF1	XA1	XM1
Απαιτήσεις	N/T	0,50	0,50	0,55	0,50	0,50
Μέγιστος Τύχη	300	320	330	320	320	320
Ματ. Αποχρώς	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Επιμαχ. Οχλήτου	35 mm	35	45	-	35	-
					Φ/NM/16.6.16	

18/12/2011  
"Ο όμοιος Κανονισμός Τεχνολογία Συνοδόμετου"



Εάν ζυγίσεις σωστά με ακριβή ζυγαριά και ακριβή ζύγιους (+2% N+T, ±3% Αφαιρεί)

τα σωστά για εως προδιαγραφών και ως σωστός μεταβίβων αναρτήσεις

$T = 270 \text{ kg/m}^3$  |  $T = 300 \text{ kg/m}^3$   
 $N = 185 \text{ kg/m}^3$  |  $N = 170 \text{ kg/m}^3$   
 $A = 1920 \text{ kg/m}^3$  |  $A = 1890 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_p = 1,5 \text{ kg/m}^3$  |  $\rho_p = 2,5 \text{ kg/m}^3$   
 $\Sigma = 2375 \text{ kg/m}^3$  |  $\Sigma = 2360 \text{ kg/m}^3$



και τα φρακταίρες σωστά για 1/2 ώρα  
και τα μεταφέρεις εως 1/2 ώρα  
χαλπίς να αρσθόσους εσωτήτορ Νερό

Τότε έχει πάντα ποιότητα!!

Νίκος Μαρσέλλος  
Μέγιστο Επιπέδους ΚΤΕ-97  
Προχτύπος Μπακινιός Σ.Μ.Π. (1973)

$G = 750 \text{ kN}$   
 $\frac{750 \text{ kN}}{22.500 \text{ mm}^2} = 33 \text{ N/mm}^2 = 33 \text{ MPa}$   
 $\approx 340 \text{ kg/cm}^2$   
 $d = \frac{8040^3}{3375 \text{ cm}^3} = 2.382 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

1<sup>η</sup> Ερωτημα/ΝΑ/18-12-2011

## Κεφάλαιο 12

### Σύνοψη

*Η προστασία της μόνιμης επένδυσης εκ σκυροδέματος των σήραγγων, από την πυρκαγιά, επιτυγχάνεται είτε με μεθόδους παθητικής προστασίας είτε με ενσωμάτωση στην επένδυση κατάλληλων ινών ανακούφισης.*

### Προαπαιτούμενη γνώση

*Μαθήματα: Οπλισμένο Σκυρόδεμα*

## 12. Πυροπροστασία μόνιμης επένδυσης

### 12.1 Πυρκαγιά και έκρηξη σε σήραγγα

Είναι γεγονός ότι οι πυρκαγιές σε σήραγγες συμβαίνουν πολύ σπανιότερα σε σχέση με τις πυρκαγιές σε ανοιχτό δρόμο. Όπως αναφέρουν οι Beard & Carvel (2005), σύμφωνα με γαλλικές, γερμανικές, ελβετικές και ιταλικές στατιστικές, τα ατυχήματα σε σήραγγες είναι λιγότερα σε σχέση με τα ατυχήματα σε ανοιχτό δρόμο αφού δεν υπόκεινται σε καιρικές επιδράσεις, οι διασταυρώσεις είναι λιγότερες και επίσης οι οδηγοί τείνουν να είναι πιο προσεκτικοί κατά την οδήγηση μέσα σε αυτές. Οι επιπτώσεις όμως από μία πυρκαγιά σε σήραγγα μπορεί να είναι πολύ πιο σοβαρές σε σχέση με μία πυρκαγιά σε έναν ανοιχτό δρόμο καθώς υπάρχει μεγάλη δυσκολία στην κατάσβεση της. Ο βασικότερος λόγος, εκτός της διαφοράς καύσης που υπάρχει μεταξύ κλειστού και ανοιχτού χώρου, είναι οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς σε σήραγγα λόγω της στενότητας του χώρου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο καπνός από την πυρκαγιά να μην μπορεί να παρασυρθεί από τον κρύο αέρα που υπάρχει μέσα στη σήραγγα και να εγκλωβίζεται μέσα σε αυτή δημιουργώντας αποπνικτική ατμόσφαιρα.

Η συχνότητα των πυρκαγιών σε σήραγγα είναι συνάρτηση αρκετών παραγόντων όπως το μήκος της σήραγγας, η πυκνότητα της κίνησης μέσα στη σήραγγα, η ταχύτητα με την οποία κινούνται τα οχήματα σε αυτή και η ολισθηρότητα του οδοστρώματος. Η πιθανότητα πρόκλησης σοβαρών και επικίνδυνων πυρκαγιών σε σήραγγες από οχήματα βαρέως τύπου είναι μεγαλύτερη αυτής που προκαλείται από οχήματα ιδιωτικής χρήσης. Ο Πίνακας 12-1 δίνει την κατηγοριοποίηση των πυρκαγιών, σύμφωνα με μία γαλλική μελέτη, ανάλογα με την κρισιμότητα τους και τη συχνότητα τους, χρησιμοποιώντας δείγμα 26 πυρκαγιών σε οδικές σήραγγες που προκλήθηκαν από οχήματα. Επίσης ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (Πίνακας 12-2) στις περιπτώσεις πυρκαγιών που προκαλούν μικρή καταστροφή στη σήραγγα εκτιμάται να είναι μικρότερος από 20 MW, ενώ στις περιπτώσεις μεγαλύτερης καταστροφής εκτιμάται ότι είναι μεγαλύτερος από 20 MW.

Πίνακας 12-1: Κατηγοριοποίηση κρισιμότητας και συχνότητας πυρκαγιάς

Είδος οχήματος	Κατάταξη πυρκαγιάς	Περιπτώσεις πυρκαγιάς ανά 10 <sup>8</sup> οχηματοχιλιόμετρα*
Επιβατικά αυτοκίνητα	-Πυρκαγιά χωρίς καμία καταστροφή	1-2
Φορτηγά χωρίς επικίνδυνο φορτίο	- Πυρκαγιά χωρίς καμία καταστροφή	8
	- Πυρκαγιά με μικρή καταστροφή στη σήραγγα	1
	-Πολύ σοβαρή πυρκαγιά	0.1-0.3
Φορτηγά που μεταφέρουν επικίνδυνο φορτίο	- Πυρκαγιά χωρίς καμία καταστροφή	2
	-Πυρκαγιά με τη συμμετοχή και του επικίνδυνου φορτίου και μεγάλη καταστροφή	0.3

\*: διερχόμενα οχήματα ανά χιλιόμετρο μήκους οδού

### 12.1.1 Πιθανότητα συμβάντος

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, οι πυρκαγιές που μπορούν να προκαλέσουν μεγάλη καταστροφή είναι πολύ σπάνια γεγονότα. Σύμφωνα με γαλλικές στατιστικές θα συμβούν 1-2 πυρκαγιές σε οχήματα για κάθε 100.000.000 οχηματοχιλιόμετρα σήραγγας. Ομοίως στην περίπτωση οχημάτων βαρέως τύπου, για κάθε 100.000.000 οχηματοχιλιόμετρα σήραγγας θα συμβούν 8 πυρκαγιές μία εκ των οποίων θα είναι σοβαρή και θα προκαλέσει καταστροφή στη σήραγγα. Από την ίδια στατιστική εκτιμήθηκε ότι θα υπάρξουν από 1 έως 3 πολύ σοβαρές πυρκαγιές σε σήραγγα (με ανάμιξη πολλών οχημάτων αλλά και την ύπαρξη θυμάτων) για κάθε 1.000.000.000 οχηματοχιλιόμετρα (Beard & Carvel, 2005). Επίσης σύμφωνα με μελέτη η οποία πραγματοποιήθηκε στο διάστημα 2006-2009 ο ρυθμός πραγματοποίησης σοβαρής σύγκρουσης στη σήραγγα είναι μεταξύ 9.13-20.45 συγκρούσεις/ 10<sup>8</sup> οχηματοχιλιόμετρα όταν το ίδιο εύρος σε ανοιχτούς δρόμους είναι μεταξύ 8.62-10.14. Οι αιτίες εκτός από τη συμπεριφορά των οδηγών έγκεινται και στην κακή ορατότητα μέσα στις σήραγγες (Caliendo & De Guglielmo, 2012). Όπως φάνηκε από τα παραπάνω στατιστικά στοιχεία η πιθανότητα για να συμβεί μία πυρκαγιά σε σήραγγα με σοβαρές επιπτώσεις είναι μικρή, όμως η καταστροφή που μπορεί να συμβεί, είναι μεγάλη και συνεπώς αυξάνεται η διακινδύνευση (NCHRP, 2011), που ορίζεται από την:

Διακινδύνευση = Πιθανότητα x Καταστροφή

(12-1)

Επειδή μάλιστα: α) πολλές οδικές σήραγγες έχουν πολύ υψηλή κυκλοφορία (π.χ περίπου 37.000.000 οχήματα πέρασαν από τη σήραγγα του Elbe στη Γερμανία το 1995, β) υπάρχουν 15000 οδικές, σιδηροδρομικές και σήραγγες μετρό μόνο στην Ευρώπη και γ) οι περισσότερες από αυτές έχουν μήκος πολλών χιλιομέτρων, αυξάνεται η πιθανότητα να συμβεί ένα σοβαρό ατύχημα. Ο Πίνακας 12-3 αποδεικνύει ότι θανατηφόρες πυρκαγιές σε σήραγγες συμβαίνουν κάθε χρόνο την τελευταία δεκαετία. Αυτό είναι ένα σημαντικό πρόβλημα το οποίο έχει την πιθανότητα να γίνει σοβαρότερο στο μέλλον με την αύξηση του πλήθους, του μήκους και της κυκλοφορίας των σιδηράγγων. Η τάση αυτή αποτυπώνεται τις τελευταίες δύο δεκαετίες στον αριθμό των οδικών σιδηράγγων παγκοσμίως που αυξάνεται με υψηλούς ρυθμούς σε σχέση με το συνολικό οδικό δίκτυο (CEMBUREAU/BIBM/ERMCO, 2004).

### 12.1.2 Επιπτώσεις πυρκαγιών σε σήραγγες

Οι πυρκαγιές παράγουν θερμότητα, καπνό και τοξικά αέρια τα οποία προκαλούν καταστροφή της σήραγγας και απώλειες ανθρώπινων ζωών. Η θερμότητα είναι η βασική αιτία της καταστροφής του δομήματος της σήραγγας, ενώ είναι σπάνια η αιτία της απώλειας των ανθρώπινων ζωών. Ο πρώτος φόβος του ανθρώπου σε περίπτωση πυρκαγιάς είναι η έλλειψη ορατότητας που οφείλεται στον καπνό που προέρχεται από τη φλόγα. Οι βασικές επιπτώσεις από τις πυρκαγιές σε σήραγγες είναι:

- Οι θάνατοι και τραυματισμοί είτε των χρηστών της σήραγγας είτε του προσωπικού λειτουργίας της σήραγγας είτε των πυροσβεστών και γενικότερα των δυνάμεων διάσωσης. Η θερμότητα, ο καπνός, τα



αέρια, η έλλειψη οξυγόνου και η απώλεια ορατότητας οδηγεί σε ζάλη, ασφυξία, εγκαύματα, και ακόμα και στο θάνατο.

- Οικονομικές απώλειες που σχετίζονται με την καταστροφή της σήραγγας περιλαμβάνοντας το κόστος για α) την αντικατάσταση του εξοπλισμού της σήραγγας (φώτα, ανεμιστήρες, τηλεπικοινωνία) β) την αντικατάσταση της επένδυσης της σήραγγας που έχει καταστραφεί και την) απώλεια εσόδων από τη διακοπή της κυκλοφορίας (Frank, -). Επίσης στις οικονομικές απώλειες περιλαμβάνεται και η καταστροφή των οχημάτων και των φορτίων που φέρουν αυτά. Για παράδειγμα η συνολική οικονομική απώλεια από τις πυρκαγιές στη σήραγγες Channel, Mont-Blanc και Tauern ήταν αντίστοιχα 252 Μ€, 392 Μ€ και 28.5 Μ€.
- Κυκλοφοριακή συμφόρηση από τη διακοπή κυκλοφορίας της σήραγγας για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα που κυμαίνεται από μερικές εβδομάδες μέχρι και χρόνια, ανάλογα με την καταστροφή που έχει υποστεί η σήραγγα.
- Περιβαλλοντική καταστροφή λόγω της τοξικότητας του καπνού.

Η πιο σημαντική μεταβλητή που χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς είναι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (HRR)  $q_c$ , κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς, (Carvel, 2004; Barbauskas & Peacock, 1992), που ορίζεται από τη σχέση:

$$q_c = \chi \cdot m^n \cdot A_f \cdot \Delta H_c \quad (12-2)$$

όπου  $\chi$  ένας συντελεστής (μεταξύ 0 και 1) που περιλαμβάνεται στη σχέση για να προσδιορίζει το ποσοστό της ατελούς καύσης,  $m^n$  είναι η ταχύτητα καύσης του καυσίμου (ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου),  $A_f$  η επιφάνεια του καυσίμου, και  $\Delta H_c$  η θερμότητα της καύσης του καυσίμου (Carvel, 2004). Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας για κάθε κατηγορία οχήματος δίνεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 12-2: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας για όλες τις κατηγορίες οχημάτων (NFPA, 2011)

Όχημα	Μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας (MW)	Χρόνος μέχρι το μέγιστο ρυθμό έκλυσης θερμότητας (min)
Επιβατικό αυτοκίνητο	5-10	0-30
Πολλαπλά επιβατικά αυτοκίνητα (2-4 οχήματα)	10-20	13-55
Λεωφορείο	20-30	7-10
Φορητό βαρέως τύπου	70-200	10-18
Βυτιοφόρο	200-300	-

## 12.2 Περιπτώσεις πυρκαγιάς σε σήραγγα

### 12.2.1 Οδικές σήραγγες

Παρακάτω περιγράφονται οι πιο σημαντικές πυρκαγιές σε σήραγγες που εκδηλώθηκαν τα τελευταία χρόνια (Beard & Carvel 2005; Carvel, 2004).

#### 12.2.1.1 Σήραγγα του Mont – Blanc

Στις 24 Μαρτίου του 1999 ένα όχημα βαρέως τύπου περνώντας μέσα από τη σήραγγα του Mont-Blanc με κατεύθυνση από τη Γαλλία προς την Ιταλία άρχισε να αναφλέγεται λόγω της υπερθέρμανσης του κινητήρα του. Μόλις ο οδηγός συνειδητοποίησε την πυρκαγιά στο όχημα (περίπου 6 km από την είσοδο) το ακινητοποίησε και έφυγε, πεζός πλέον, τρέχοντας προς την έξοδο της Ιταλίας. Μέσα σε λίγα λεπτά οι υπεύθυνοι λειτουργίας και κυκλοφορίας της σήραγγας αντιλήφθηκαν την πυρκαγιά και απέτρεψαν άλλα οχήματα να εισέλθουν. Όμως, 18 οχήματα βαρέως τύπου, 9 αυτοκίνητα ΙΧ (ιδιωτικής χρήσης), ένα βαν, και μία μοτοσυκλέτα είχαν ήδη εισέλθει στη σήραγγα από την είσοδο της Γαλλίας πριν κλείσει η κυκλοφορία. Από τα 29 οχήματα που αναφέρθηκαν, τα 4 οχήματα βαρέως τύπου πέρασαν από το φλεγόμενο όχημα βαρέως τύπου και κατάφεραν να ταξιδέψουν με ασφάλεια μέχρι την έξοδο της σήραγγας προς Ιταλία. Τα υπόλοιπα 25 έμειναν παγιδευμένα μέσα στον καπνό και τη φωτιά με αποτέλεσμα όσοι βρίσκονταν μέσα σε αυτά να πεθάνουν. Η φορά του ανέμου που

επικρατούσε εκείνη την ώρα (βόρειος) αλλά και το διαφορετικό σύστημα αερισμού στα δύο άκρα της σήραγγας (όλοι οι ανεμιστήρες από την Ιταλική άκρη είχαν ρυθμιστεί να τροφοδοτούν με φρέσκο αέρα, ενώ στη Γαλλική άκρη οι ανεμιστήρες είχαν ρυθμιστεί άλλοι να τροφοδοτούν και άλλοι να απαγούν) οδηγούσε όλο τον καπνό της φωτιάς προς την έξοδο της Γαλλίας. Παράλληλα όσο η ταχύτητα του αέρα παρέμενε μεγαλύτερη από 1 m/s τόσο ο καπνός δεν ήταν στατικός, με αποτέλεσμα μέσα σε λίγα λεπτά να μην υπάρχει καθόλου φρέσκος αέρας μέσα στη σήραγγα. Η πυρκαγιά εξαπλώθηκε γρήγορα με αποτέλεσμα να κάψει και τα 25 οχήματα τα οποία βρίσκονταν πίσω από το φλεγόμενο όχημα βαρέως τύπου. Ακόμα και μετά από την παρέλευση τώσων ετών δεν είναι ξεκάθαρο πως η πυρκαγιά κατάφερε και εξαπλώθηκε σε τέτοια απόσταση και σε τόσο σύντομο χρονικό διάστημα. Οι εξηγήσεις που έχουν δοθεί αναφέρουν ως βασικό αίτιο την καύση των καυσίμων των οχημάτων. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ξεπέρασε τα 190 MW και οι θερμοκρασίες στη σήραγγα ξεπερνούσαν τους 1000°C. Η φωτιά χρειάστηκε 53 h για να κατασβεστεί, ενώ μικρές εστίες φωτιάς έκαιγαν για τις επόμενες πέντε ημέρες. Συνολικά 39 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους εκ των οποίων 38 ήταν χρήστες της σήραγγας ενώ ένας ήταν πυροσβέστης. Από τα 38 θύματα τα 27 πέθαναν μέσα στα οχήματα τους, δύο στην έξοδο διαφυγής όπου είχαν πάει με σκοπό να σωθούν, και οι υπόλοιποι οδηγώντας προς την έξοδο της Γαλλίας. Η πυρκαγιά αυτή είναι η σοβαρότερη που έχει συμβεί σε σήραγγα μέχρι και σήμερα, αφού υπήρχαν 39 νεκροί αλλά και 34 τραυματίες. Το συμβάν στη σήραγγα του Mont – Blanc ήταν το 18ο που έχει συμβεί στη συγκεκριμένη σήραγγα από την μέρα που δόθηκε στην κυκλοφορία τα τέλη του 1965. Από τα υπόλοιπα 17 τα περισσότερα ήταν ελάσσονος σημασίας, χωρίς να υπάρχει θύμα, και μόνο σε πέντε από αυτά χρειάστηκε η επέμβαση της πυροσβεστικής.

Όπως φάνηκε από την παραπάνω περιγραφή του συμβάντος δεν ήταν ένας παράγοντας που προκάλεσε την καταστροφή αλλά συνδυασμός παραγόντων όπως τα διαφορετικά συστήματα αερισμού στο κάθε άκρο της σήραγγας, η εύφλεκτη φύση του πρώτου οχήματος λόγω της κατασκευής και του εύφλεκτου φορτίου του (μαργαρίνη και αλεύρι). Η οικονομική απώλεια από τη συγκεκριμένη πυρκαγιά ήταν της τάξης των 392.000.000€ συμπεριλαμβανομένου του κόστους επισκευής αλλά και της απώλειας του εσόδων λόγω της διακοπής της κυκλοφορίας μέσα στη σήραγγα για 3 έτη. Η καταστροφή του σκυροδέματος ήταν ολοσχερής για περίπου 3 km της σήραγγας όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.1.



Εικόνα 12.1: Εικόνες καταστροφής της σήραγγας του Mont Blanc (<http://www.tunneltalk.com>)

### 12.2.1.2 Σήραγγα του Caldecott, Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής

Στις 7 Απριλίου του 1982 στη σήραγγα του Caldecott, στο Oakland των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής συνέβη κατάρρευση της σήραγγας όταν ένα όχημα, με μεθυσμένο οδηγό, προσέκρουσε στα τοιχώματα της και δημιούργησε απότομη διακοπή κυκλοφορίας. Στη συνέχεια ένα βυτιοφόρο το οποίο μετέφερε πετρέλαιο προσέκρουσε πάνω στο ακινητοποιημένο όχημα με αποτέλεσμα να αναποδογυρίσει και να προκληθεί διαρροή του πετρελαίου. Υπάρχει και μία δεύτερη άποψη η οποία υποστηρίζει ότι η διαρροή προκλήθηκε από το λιώσιμο του μετάλλου του βυτιοφόρου. Μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα το πετρέλαιο αναφλέχθηκε και η φλόγα επεκτάθηκε τόσο πολύ που άρχισε να καίγεται το βυτιοφόρο, το αυτοκίνητο και 4 άλλα οχήματα που ακολουθούσαν. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία στην επένδυση της σήραγγας να αυξηθεί πολύ ώστε να καταρρεύσει μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα. Επτά άτομα έχασαν τη ζωή τους και αρκετά τραυματίστηκαν. Στην προκειμένη περίπτωση ο βασικός παράγοντας της εξάπλωσης της πυρκαγιάς ήταν η διαρροή του πετρελαίου που έφερε το βυτιοφόρο, με αποτέλεσμα να δυσχεράνει το έργο των πυροσβεστών οι οποίοι κατάφεραν να σβήσουν τη φωτιά μετά από δύο ώρες. Η μέγιστη θερμοκρασία εκτιμήθηκε περί τους 1050 °C.

### 12.2.1.3 Σήραγγα του Nihonzaka

Στις 11 Ιουλίου του 1979 ξέσπασε πυρκαγιά στη σήραγγα Nihonzaka της Ιαπωνίας σε απόσταση 400 m από την έξοδο από σύγκρουση φορτηγών και αυτοκινήτων, η οποία είχε ως αποτέλεσμα την καταστροφή 173 οχημάτων και φορτηγών, το θάνατο επτά ατόμων και το σοβαρό τραυματισμό άλλων δύο λόγω της σύγκρουσης των οχημάτων. Η συγκεκριμένη σήραγγα είναι η μοναδική, ανάμεσα σε αυτές που περιγράφηκαν παραπάνω, που είχε εξοπλιστεί με συστήματα καταιονισμού νερού. Το συγκεκριμένο σύστημα ξεκίνησε να καταβρέχει σχεδόν άμεσα με την έναρξη της πυρκαγιάς και κατέστειλε επιτυχημένα την εξάπλωση για περίπου 25 λεπτά, ικανό χρονικό διάστημα για να μπορέσουν οι οδηγοί να ξεφύγουν από τα οχήματά τους. Στη συνέχεια, όμως, τα καύσιμα αναφλέχθηκαν ξανά και η φωτιά αναζωπυρώθηκε ενώ τα καλώδια και οι σωλήνες των συστημάτων ενεργητικής πυροπροστασίας είχαν διαλυθεί λόγω της φλόγας και της θερμοκρασίας. Έτσι η πυρκαγιά εξαπλώθηκε δραματικά και χρειάστηκαν δύο μέρες για να τεθεί υπό έλεγχο και άλλες πέντε ημέρες για να σβήσει ολοσχερώς.

### 12.2.1.4 Σήραγγα του Tauern (Αυστρία)

Στις 29 Μαΐου του 1999, τα ξημερώματα, πραγματοποιούντο έργα κατασκευής στη σήραγγα του Tauern στην Αυστρία, με αποτέλεσμα η μία λωρίδα να είναι κλειστή και στην άλλη να πραγματοποιείται η κίνηση και για τις δύο κατευθύνσεις. Σε απόσταση 600 m από τη βόρεια είσοδο της σήραγγας υπήρχαν φανάρια στα οποία είχε σχηματισθεί μία σειρά αυτοκινήτων περιμένοντας να ξεκινήσουν. Σε εκείνο το χρονικό σημείο ένα φορτηγό έπεσε με μεγάλη ταχύτητα πάνω στο τελευταίο αυτοκίνητο της σειράς διακόπτοντας την κυκλοφορία και στις δύο διευθύνσεις της σήραγγας. Αμέσως μετά το ατύχημα ξέσπασε μία μικρή πυρκαγιά η οποία έγινε αντιληπτή από το κέντρο ελέγχου το οποίο κάλεσε την πυροσβεστική και την αστυνομία οι οποίοι ξεκίνησαν να κατασβένουν την πυρκαγιά και να προτρέπουν τους επιβάτες να εκκενώσουν τα οχήματα (Leitner, 2001). Οι περισσότεροι οδηγοί έκαναν αναστροφή για να ξεφύγουν από την πυρκαγιά ενώ περίπου 30 min μετά από το ατύχημα πραγματοποιήθηκε περαιτέρω ανάφλεξη και η σήραγγα έπρεπε να εγκαταλειφθεί. Κάποιοι οδηγοί είτε δεν πρόλαβαν να ξεφύγουν και κήκαν στα αυτοκίνητα τους είτε πέθαναν από το ατύχημα είτε πέθαναν από τις αναθυμιάσεις του καπνού με αποτέλεσμα 12 άτομα συνολικά να χάσουν τη ζωή τους ενώ 24 αυτοκίνητα και 16 φορτηγά να καταστραφούν ολοσχερώς.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η ανθρώπινη συμπεριφορά (συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπινου λάθους) αποτελεί βασική αιτία των πυρκαγιών στις σήραγγες. Η πυρκαγιά στις σήραγγες του Nihonzaka και του Caldecott ξεκίνησαν ως αποτέλεσμα σύγκρουσης οχημάτων, ενώ οι συνθήκες στη σήραγγα του Mont –Blanc θα μπορούσαν να ήταν πιο φυσιολογικές αν οι υπεύθυνοι λειτουργίας της σήραγγας είχαν ακολουθήσει μία διαφορετική στρατηγική αερισμού. Όπως έχει φανεί, το 1/3 όλων των πυρκαγιών σε οδικές σήραγγες ξεκίνησαν ως αποτέλεσμα ενός ανθρώπινου λάθους, ενώ αρκετά περιστατικά ξεκίνησαν λόγω μηχανικής ή ηλεκτρικής βλάβης των οχημάτων. Επίσης έχει αποδειχθεί ότι στις πυρκαγιές εμπλέκονται όλων των ειδών τα οχήματα, όπως επιβατικά, βαρέως τύπου, μοτοσυκλέτες, βαν, φορτηγά, τουριστικά λεωφορεία. Όμως στα περισσότερα από τα γεγονότα που υπήρχαν θύματα, ενεπλάκησαν οχήματα βαρέως τύπου τα οποία χωρίς απαραίτητα να φέρουν «επικίνδυνο φορτίο» έκαναν τη δουλειά των πυροσβεστών πολύ δυσκολότερη, λόγω του μεγάλου όγκου τους. Είναι σημαντικό στις μέρες μας οι οδηγοί να ενημερώνονται μέσω σεμιναρίων κατά τη διάρκεια της οδικής εκπαίδευσής τους, για τη συμπεριφορά τους σε περίπτωση κινδύνου μέσα σε σήραγγα.

## 12.2.2 Σιδηροδρομικές σήραγγες

Στην Ευρώπη η χρήση του τρένου και του μετρό είναι πολύ διαδεδομένη εξυπηρετώντας εκατομμύρια επιβάτες καθημερινώς. Την τελευταία δεκαετία δύο σοβαρές πυρκαγιές συνέβησαν σε σιδηροδρομικές σήραγγες που είχαν αρκετά θύματα, στη σήραγγα του Καπρούν και στη σήραγγα της Μάγχης. Το 2003 στην Κορέα 198 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους όταν ξέσπασε πυρκαγιά σε βαγόνι του μετρό ενώ το 2005 στο μετρό του Αζερμπαϊτζάν 200 άτομα πέθαναν όταν ξέσπασε πυρκαγιά λόγω ηλεκτρικού βραχυκυκλώματος.

### 12.2.2.1 Σήραγγα του Καπρούν

Πέρα από τις πυρκαγιές σε σιδηροδρομικές σήραγγες, πυρκαγιές έχουν συμβεί ακόμα και σε σήραγγες του οδοντωτού (Εικόνα 1.2) (<http://www.theguardian.com/world/2004/feb/19/austria>). Στις 11 Νοεμβρίου του 2000 η Αυστρία έζησε τη χειρότερη τραγωδία στη μεταπολεμική της ιστορία. Το πρωί του Σαββάτου της 11<sup>ης</sup> Νοεμβρίου, περίπου 170 άνθρωποι επιβιβάστηκαν σε αμαξοστοιχία του οδοντωτού σιδηρόδρομου που από το 1974 συνδέει το χιονοδρομικό κέντρο του Καπρούν με την κορυφή του όρους Κίτσαϊνχορν. Λίγα λεπτά μετά την αναχώρηση, το τρένο εισήλθε σε σήραγγα μήκους τριών χιλιομέτρων. Έχοντας διανύσει περίπου 600 μέτρα μέσα στη σήραγγα, η αμαξοστοιχία τυλίχτηκε στις φλόγες μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αμέσως μετέβησαν στον τόπο του δυστυχήματος σωστικά συνεργεία, τα οποία όμως δυσκολεύτηκαν να διασώσουν τους ανθρώπους, εξαιτίας των δυσμενών συνθηκών που επικρατούσαν και του κινδύνου να αποκολληθεί το τρένο από τη σήραγγα και να παρασύρει και τους ίδιους στην αλπική άβυσσο.

Η επιχείρηση ολοκληρώθηκε σε πέντε ημέρες, κατά τη διάρκεια των οποίων κανείς δεν ήταν σε θέση να αναφέρει τα αίτια της τραγωδίας. Ο τελικός απολογισμός ήταν 155 νεκροί η ταυτότητα των οποίων εξακριβώθηκε με τη μέθοδο του DNA, αφού τα περισσότερα θύματα ήταν πλήρως απανθρακωμένα. Κατά τη διάρκεια των ερευνών σε ολόκληρο το σιδηροδρομικό δίκτυο, οι εμπειρογνώμονες ανακάλυψαν στις ράγες του οδοντωτού, λιπαντικό που κατά πάσα πιθανότητα διέρρευσε από μία κατεστραμμένη ανάρτηση του συρμού και αναφλέχθηκε εξαιτίας της μεγάλης τριβής.



Εικόνα 12.2: Εικόνα καταστροφής της σήραγγας Καπρούν

### 12.2.2.2 Σήραγγα της Μάγχης

Στις 18 Νοεμβρίου του 1996 ξέσπασε πυρκαγιά σε τρένο που μετέφερε βαρέα φορτηγά οχήματα καθώς κινείτο μέσα από τη σήραγγα της Μάγχης με κατεύθυνση από τη Γαλλία προς τη Μεγάλη Βρετανία. Το μέγεθος του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας της πυρκαγιάς έφτασε μέχρι και τα 350 MW και το σκυρόδεμα της επένδυσης καταστράφηκε ολοσχερώς (αντοχή 28 ημερών > 80 MPa). Η πυρκαγιά ξεκίνησε καθώς η αμαξοστοιχία διερχόταν από την είσοδο της σήραγγας με αποτέλεσμα οι φλόγες να γίνουν αντιληπτές άμεσα από τους φρουρούς ασφαλείας. Παρά το γεγονός όμως ότι τέθηκε σε λειτουργία ο κώδωνας του κινδύνου, το τρένο πρόλαβε να εισέλθει αρκετά μέσα στη σήραγγα όταν πλέον ο οδηγός ενημερώθηκε ότι το τρένο του είχε

πιάσει φωτιά. Στη συνέχεια προσπάθησε να οδηγήσει το τρένο μέχρι την έξοδο της σήραγγας, αλλά η βλάβη που είχε προκαλέσει η πυρκαγιά ανάγκασε το τρένο να ακινητοποιηθεί εντός της σήραγγας. Μετά από περίπου είκοσι λεπτά έκθεσης στον καπνό, οι επιβάτες και το πλήρωμα διέφυγαν από την έξοδο διαφυγής. Από το ατύχημα κανείς δεν σκοτώθηκε, αν και επτά άτομα μεταφέρθηκαν στο νοσοκομείο λόγω της παρατεταμένης εισπνοής καπνού. Η πυρκαγιά διήρκεσε 9 ώρες και κατέστρεψε τη μηχανή του τρένου, δέκα φορτηγά και προκλήθηκαν ζημιές για περίπου ένα χιλιόμετρο στην επένδυση της σήραγγας ενώ έθεσε σε σοβαρό κίνδυνο τη σωματική ακεραιότητα των πυροσβεστών. Στο σημείο όπου ξέσπασε η πυρκαγιά (περιοχή 50 μέτρων περίπου) συνέβη πλήρης καταστροφή του σκυροδέματος (Εικόνα 1.3) αφού εκτιμήθηκε ότι η μέγιστη θερμοκρασία άγγιξε τους 1100°C. Ο οπλισμός της σήραγγας αποκαλύφθηκε πλήρως, ενώ σε πολλά σημεία φάνηκε ξεκάθαρα το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προσωρινής επένδυσης. Στο σημείο του ατυχήματος η σήραγγα διερχόταν μέσα από υγρή βράχο ενώ 300 m πιο μπροστά η σήραγγα διερχόταν από άμμο. Εάν η φωτιά είχε εκδηλωθεί μόλις 300 μέτρα μετά το σημείο του ατυχήματος η άμμος θα είχε εισχωρήσει στο εσωτερικό της σήραγγας και θα είχε προκληθεί μεγαλύτερη αστοχία στη σήραγγα. Μετά το παραπάνω συμβάν η «Eurotunnel» έκανε σημαντικές αλλαγές στη διαδικασία ασφαλείας.



Εικόνα 12.3: Εικόνες από την καταστροφή της σήραγγας της Μάγχης (1996)

### 12.2.3 Καταγεγραμμένες πυρκαγιές σε σήραγγες

Μέχρι το 1989 είχαν καταγραφεί περίπου 100 περιπτώσεις πυρκαγιών σε σήραγγες εκ των οποίων οι 25 είχαν θύματα. Στον πίνακα 1.3 που ακολουθεί δίνονται οι πυρκαγιές σε σήραγγες είτε οδικές είτε σιδηροδρομικές από το 1990 έως το 2013, με χρονολογική σειρά από τις νεότερες προς τις παλαιότερες. Όπως φαίνεται από τα ατυχήματα που καταγράφονται σε 26 χώρες, το φαινόμενο της πυρκαγιάς σε σήραγγα αποτελεί παγκόσμιο πρόβλημα. Παρατηρήθηκε επίσης ότι πυρκαγιές έχουν συμβεί σε σήραγγες ακόμα και κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

Πίνακας 12-3: Πυρκαγιές σε σήραγγα κατά το χρονικό διάστημα 1990-2013

ΤΥΠΟΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ	ΟΝΟΜΑ	ΜΗΚΟΣ (km)	ΕΤΟΣ	ΧΩΡΑ	ΘΥΜΑΤΑ
Οδική	Madelena do Mar	1.5	2013	Πορτογαλία	-
Σιδηροδρομική	-	-	2013	Ρωσσία	-
Οδική	Huai Khwang	-	2013	Ταϊλάνδη	-
Σιδηροδρομική	-	-	2013	Καναδάς	-
Οδική	Brattli	3.6	2013	Νορβηγία	-
Σιδηροδρομική	Oslo	-	2012	Νορβηγία	-
Οδική	Wallasey	2.4	2012	Αγγλία	-
Οδική	Channel	51	2012	Γαλλία/Αγγλία	-
Οδική	Fjord	7.2	2011	Νορβηγία	-
<b>Οδική</b>	<b>WuxiLihu</b>	<b>10.95</b>	<b>2010</b>	<b>Κίνα</b>	<b>24</b>
Οδική	Trojane	2.9	2010	Σλοβενία	-
Οδική	Gubrist	3.2	2009	Ελβετία	-
<b>Οδική</b>	<b>Eiksund</b>	<b>7.7</b>	<b>2009</b>	<b>Νορβηγία</b>	<b>5</b>
Οδική	Channel	51	2008	Γαλλία/Αγγλία	-
<b>Οδική</b>	<b>San Martino</b>	<b>0.4</b>	<b>2007</b>	<b>Ιταλία</b>	<b>2</b>
<b>Οδική</b>	<b>Santa Clarita</b>	<b>0.165</b>	<b>2007</b>	<b>Καναδάς</b>	<b>3</b>
Οδική	Caldecott	1.028	2007	Καναδάς	-
<b>Οδική</b>	<b>Burnley</b>	<b>2.9</b>	<b>2007</b>	<b>Αυστραλία</b>	<b>3</b>
<b>Οδική</b>	<b>Viamala</b>	<b>0.7</b>	<b>2006</b>	<b>Ελβετία</b>	<b>9</b>
<b>Οδική</b>	<b>Frejus</b>	<b>12.9</b>	<b>2005</b>	<b>Γαλλία</b>	<b>2</b>
Οδική	Frejus	12.9	2004	Γαλλία	-
Οδική (υπό κατασκευή)	Trojane	2.9	2004	Σλοβενία	-
Οδική	Kinkempois	0.6	2004	Βέλγιο	-
Οδική	Dullin	1.5	2004	Γαλλία	-
Οδική	Golovec	0.7	2003	Σλοβενία	-
<b>Οδική</b>	<b>Floyfjell</b>	<b>3.1</b>	<b>2003</b>	<b>Νορβηγία</b>	<b>1</b>
Οδική (υπό κατασκευή)	Guadarrama	30	2003	Ισπανία	-
Οδική	Locica	0.8	2003	Σλοβενία	-
Οδική	Mornay	2.6	2003	Γαλλία	-
Οδική	Cret d'eau	4	2003	Γαλλία	-
<b>Σιδηροδρομική</b>	<b>Jungango</b>	-	<b>2003</b>	<b>Κορέα</b>	<b>189</b>
Οδική	Horner	-	2002	Νέα Ζηλανδία	-
Οδική	Ted Williams	2.6	2002	Η.Π.Α	-
Οδική	A 86	-	2002	Γαλλία	-
Οδική	Tauern	6.4	2002	Αυστρία	-
<b>Οδική</b>	<b>St Gotthard</b>	<b>16.9</b>	<b>2001</b>	<b>Ελβετία</b>	<b>11</b>
Οδική	Gleinalm	8	2001	Αυστρία	-
Οδική	Howard Street	-	2001	Η.Π.Α	-
Οδική	Tauern	6.4	2001	Αυστρία	-
Σιδηροδρομική	-	-	-	Γερμανία	-
Οδική	Prapontin	-	2001	Ιταλία	-
Σιδηροδρομική	Dusseldorf	-	2001	Γερμανία	-
Σιδηροδρομική	Toronto	-	2000	Καναδάς	-
Οδική	Laerdal	24.5	2000	Νορβηγία	-
<b>Οδοντωτός</b>	<b>Kitzsteinhorn</b>	<b>3.3</b>	<b>2000</b>	<b>Αυστρία</b>	<b>155</b>

Οδική	Oslofjord	-	2000	Νορβηγία	-
Οδική	Saukopftunnel	-	2000	Γερμανία	-
Σιδηροδρομική	-	-	2000	Η.Π.Α	-
<b>Οδική</b>	<b>Rotsethorn</b>	<b>1.2</b>	<b>2000</b>	<b>Νορβηγία</b>	<b>2</b>
Οδική	Seljestad	1.3	2000	Νορβηγία	-
Σιδηροδρομική	Berlin	-	2000	Γερμανία	-
Οδική	Cross –harbour	-	2000	Κίνα	-
Σιδηροδρομική	Montreal	-	2000	Καναδάς	-
Οδική	Tauern	6.4	2000	Αυστρία	-
Οδική	Candid	0.252	1999	Γερμανία	-
Σιδηροδρομική	Amsterdam	-	1999	Ολλανδία	-
Σιδηροδρομική	-	-	1999	Η.Π.Α	-
<b>Οδική</b>	<b>Tauern</b>	<b>6.4</b>	<b>1999</b>	<b>Αυστρία</b>	<b>4</b>
<b>Σιδηροδρομική</b>	<b>Salerno</b>	<b>9</b>	<b>1999</b>	<b>Ιταλία</b>	<b>4</b>
<b>Οδική</b>	<b>Mont- Blanc</b>	<b>11.6</b>	<b>1999</b>	<b>Ιταλία</b>	<b>39</b>
Οδική	Leinebusch	-	1999	Γερμανία	-
<b>Οδική</b>	<b>Oslofjord</b>	-	<b>1999</b>	<b>Νορβηγία</b>	<b>2</b>
<b>Οδική</b>	<b>Gueizhou</b>	<b>0.8</b>	<b>1998</b>	<b>Κίνα</b>	<b>80</b>
Οδική	Gleinalm	8	1998	Αυστρία	-
Οδική	St.Gotthard	16.9	1997	Ελβετία	-
Σιδηροδρομική	Toronto	-	1997	Καναδάς	-
Σιδηροδρομική	Exilles	2.1	1997	Ιταλία	-
Οδική	Propontin	4.9	1997	Ιταλία	-
Οδική	Channel	51	1996	Γαλλία/Αγγλία	-
Οδική	Ekeberg	1.5	1996	Νορβηγία	-
Σιδηροδρομική	Washington	-	1996	Η.Π.Α	-
<b>Οδική</b>	<b>Isola delle Femmine</b>	<b>0.148</b>	<b>1996</b>	<b>Ιταλία</b>	<b>5</b>
<b>Σιδηροδρομική</b>	<b>Baku</b>	-	<b>1996</b>	<b>Αζερμπαϊτζάν</b>	<b>220</b>
<b>Οδική</b>	<b>Pfander</b>	<b>6.7</b>	<b>1995</b>	<b>Αυστρία</b>	<b>3</b>
Οδική	Hitra	5.6	1995	Νορβηγία	-
Οδική	Kingsway	2	1994	Αγγλία	-
Οδική	Great Belt	-	1994	Δανία	-
Οδική	St.Gotthard	16.9	1994	Ελβετία	-
Οδική	Castellar	0.57	1994	Γαλλία	-
<b>Οδική</b>	<b>Huguenot</b>	<b>4</b>	<b>1994</b>	<b>Ν.Αφρική</b>	<b>1</b>
Οδική	Hovden	1.3	1993	Νορβηγία	-
Οδική	Vardo	-	1993	Νορβηγία	-
Οδική	Serra a Ripoli	0.442	1993	Ιταλία	-
Σιδηροδρομική	New York	-	1992	Η.Π.Α	-
Οδική	Bonn	-	1991	Γερμανία	-
<b>Σιδηροδρομική</b>	-	-	<b>1991</b>	<b>Κίνα</b>	<b>15</b>
<b>Σιδηροδρομική</b>	<b>Moscow</b>	-	<b>1991</b>	<b>Ρωσία</b>	<b>7</b>
Σιδηροδρομική	Hirshengraben	1.3	1991	Ελβετία	-
<b>Σιδηροδρομική</b>	<b>New York</b>	-	<b>1990</b>	<b>Η.Π.Α</b>	<b>2</b>
Οδική	Roldal	4.7	1990	Νορβηγία	-
Οδική	Mont- Blanc	11.6	1990	Ιταλία	-

Αξιοσημείωτη είναι η περίπτωση πυρκαγιάς στη σήραγγα του Brattli της Νορβηγίας το 2013, από πυρκαγιά που ξέσπασε σε φορτηγό το οποίο μετέφερε καραμελωμένο κατσικίσιο τυρί, το οποίο λόγω του λίπους και της υψηλής θερμοκρασίας που επικρατούσε αναφλέχθηκε και προκάλεσε πυρκαγιά .

### 12.3 Επιπτώσεις της πυρκαγιάς στην επένδυση της σήραγγας / μηχανισμοί αστοχίας

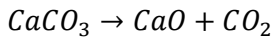
Η επένδυση της σήραγγας αποτελείται από το σκυρόδεμα και το χαλύβδινο οπλισμό. Το σκυρόδεμα θεωρείται το πιο διαδεδομένο, οικονομικότερο και ασφαλέστερο δομικό υλικό και για το λόγο αυτό ο 20<sup>ος</sup> αιώνας έχει χαρακτηριστεί ως ο αιώνας του σκυροδέματος. Η χρήση του σκυροδέματος συναντάται στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα με εντελώς διαφορετικές ιδιότητες σε σχέση με σήμερα. Η εξέλιξη που υπήρχε στην ανάπτυξη υπερρευστοποιητών έφερε γρήγορα τη δημιουργία σκυροδέματος με αυξημένη θλιπτική αντοχή. Στη δεκαετία του 1970 θεωρείτο υψηλή μια θλιπτική αντοχή της τάξης των 25-30 MPa ενώ σήμερα αναφέρονται αντοχές μέχρι 120 MPa.

Παράλληλα οι απαιτήσεις για αυξημένη διάρκεια ζωής των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα οδήγησε στο σχεδιασμό σκυροδεμάτων υψηλής επιτελεστικότητας (High Performance Concrete - HPC). Αυτό είναι σύνηθες σκυρόδεμα παρασκευασμένο με ποζολανικά πρόσθετα όπως πυριτική παιπάλη και χαμηλό λόγο νερού προς υδραυλικά υλικά το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως διότι παρέχει υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα συγκριτικά με τα συνήθη σκυροδέματα . Όμως, παρά την υψηλή αντοχή, ανθεκτικότητα και ακαυστότητά του, το σκυρόδεμα δεν είναι και δεν πρέπει να εκλαμβάνεται ως πυράντοχο υλικό αφού, α) οι μηχανικές ιδιότητες του υποβαθμίζονται με την αύξηση της θερμοκρασίας , β) δημιουργείται εκρηκτική αποφλοίωση που έχει αποτέλεσμα την απώλεια κομματιών σκυροδέματος και την απόλυτη έκθεση του οπλισμού στην πυρκαγιά(Εικόνα2.2). Από την άλλη πλευρά το σκυρόδεμα από άποψη συμπεριφοράς σε πυρκαγιά είναι το καλύτερο από τα συνήθη δομικά υλικά για τους παρακάτω λόγους: α) Τα δομικά στοιχεία τα οποία κατασκευάζονται από σκυρόδεμα είναι γενικά πολύ μεγαλύτερης μάζας από τα αντίστοιχα χαλύβδινα, και έτσι καθυστερεί η αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του στοιχείου, β) Το σκυρόδεμα ακόμα και σε ξηρό περιβάλλον περιέχει νερό και λόγω αυτού ανθίσταται σε σχετικά υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα άλλα δομικά υλικά, γ) Είναι άκαυστο συγκρινόμενο με το δομικό ξύλο.

Το σκυρόδεμα είναι ένα δομικό υλικό το οποίο παράγεται με την ανάμιξη τσιμέντου, άμμου, νερού και αδρανών υλικών. Τα προϊόντα της ενυδάτωσης του τσιμέντου θεωρούνται γενικώς χημικά σταθερά σε θερμοκρασίες μεταξύ 20°C και 80 °C. Το τσιμέντο χάνει το προσροφημένο νερό μεταξύ 60°C και 85°C και το ελεύθερο νερό του μεσοστρώματος των υδροξυλίων μεταξύ 80°C και 100°C. Στην περιοχή μεταξύ 100°C και 200°C το τσιμέντο αρχίζει να χάνει τη σταθερότητά του, αφού η εξαμιζόμενη υγρασία αρχίζει να συμβάλλει πλέον στη μείωση των δυνάμεων συνοχής μεταξύ των υδροξυλίων (OH<sup>-</sup>) που δημιουργούν τη μηχανική αντοχή του υλικού και τελικά την μείωση της αντοχής του. Παράλληλα επηρεάζονται οι χημικοί δεσμοί μεταξύ των υδροξυλίων, το μέγεθος και η κατανομή των πόρων. Σε θερμοκρασίες άνω των 300°C ξεκινά η διάσπαση του Ca(OH)<sub>2</sub> σε CaO και H<sub>2</sub>O. Η διάσπαση αυτή δεν είναι κρίσιμη με την έννοια της απώλειας αντοχής, μπορεί όμως να οδηγήσει σε σοβαρές ζημιές και αποφλοίωση του σκυροδέματος. Στη θερμοκρασιακή περιοχή των 500 °C αρχίζει σταδιακά η αποσύνθεση των ενώσεων ένυδρου πυριτικού ασβεστίου (CSH) και η καταστροφή της γέλης του τσιμεντολιθώματος. Η αποσύνθεση των υδροξυλίων συνεχίζεται με εντονότερους ρυθμούς στο θερμοκρασιακό εύρος 600 – 700°C και ολοκληρώνεται στους 800°C. Η τήξη του τσιμέντου επέρχεται σε θερμοκρασίες άνω των 900°C. Στον Πίνακα 2.4 συνοψίζεται η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες.

Εκτός από το τσιμέντο, στο σκυρόδεμα συναντώνται και τα αδρανή τα οποία καταλαμβάνουν συνήθως από 65 έως 75% του όγκου του σκυροδέματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συμπεριφορά του σκυροδέματος στις υψηλές θερμοκρασίες να επηρεάζεται από τον τύπο των αδρανών. Τα συνήθη χρησιμοποιούμενα αδρανή υλικά εμφανίζουν σταθερότητα σε θερμοκρασίες μέχρι τους 300-350°C. Τα αδρανή μπορούν να υποστούν κρυσταλλικούς μετασχηματισμούς που οδηγούν σε σημαντική αύξηση του όγκου τους, όπως η περίπτωση των πυριτικών αδρανών στα οποία πραγματοποιείται η μετατροπή του α-χαλαζία (τριγωνικό) σε β-χαλαζία (εξαγωνικό) μεταξύ των 500 και 650°C και συνοδεύεται με αύξηση του όγκου περίπου 5.7%. Από την άλλη πλευρά τα ασβεστολιθικά αδρανή διασπώνται σε θερμοκρασίες άνω των 800°C σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση (5):





(12-3)

Το φαινόμενο είναι γνωστό και ως ασβεστοποίηση των αδρανών. Αυτή προκαλεί με τη σειρά της διαστολή, ρωγμές και θραύση των ασβεστολιθικών αδρανών, ενώ το αέριο CO<sub>2</sub> διαφεύγει στο περιβάλλον.

Οι πρώτες έρευνες σχετικά με τη συμπεριφορά του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες χρονολογούνται από τη δεκαετία του 1970. Στις μελέτες αυτές φαίνεται ότι το σκυρόδεμα χάνει το μεγαλύτερο μέρος της αντοχής του στις υψηλές θερμοκρασίες άνω των 600° C ενώ παραμένει ασφαλές σε θερμοκρασίες μέχρι 250 - 300°C. Οι λόγοι που οδηγούν στην απώλεια της αντοχής του σκυροδέματος είναι οι φυσικοχημικές αλλαγές που λαμβάνουν χώρα στο τσιμέντο και στα αδρανή με την άνοδο της θερμοκρασίας. Επίσης παρατηρήθηκε ότι το σκυρόδεμα δεν μπορεί να παραλάβει φορτίο όταν θερμανθεί πάνω από τους 600°C, ενώ παράλληλα λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του, η θερμότητα δεν μεταφέρεται εύκολα στο εσωτερικό του. Επομένως αν το σκυρόδεμα δεν αποφλοιωθεί, θα συνεχίσει να παρέχει καλή θερμομόνωση. Επίσης η έκλυση υψηλών ποσοτήτων θερμότητας από μια πυρκαγιά επηρεάζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, όπως επίσης και τη συνάφεια σκυροδέματος οπλισμού. Οι παράμετροι που έχουν γενικότερα αναλυθεί για το σκυρόδεμα και το χάλυβα είναι αποτελέσματα πειραματικών διεργασιών οι οποίες διεξήχθησαν είτε κατά τη διάρκεια της έκθεσης των δοκιμίων σε υψηλές θερμοκρασίες είτε μετά την απόσβεση. Η διαφοροποίηση αυτή συμβαίνει γιατί παρατηρείται μερική ανάκτηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, οι οποίες είχαν μειωθεί κατά τη διάρκεια της φωτιάς. Το σκυρόδεμα δεν ανακτά όμως σημαντικό βαθμό των μηχανικών ιδιοτήτων σε αντίθεση με το χάλυβα.



Εικόνα 12.4: Εικόνες καταστροφής της επένδυσης της σήραγγας

### 12.3.1 Αποφλοίωση σκυροδέματος – είδη

Το βασικό πρόβλημα του σκυροδέματος σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας είναι η εκρηκτική αποφλοίωση του. Η εκρηκτική αποφλοίωση συμβαίνει όταν το σκυρόδεμα εκτίθεται σε υψηλές και απότομα αυξανόμενες θερμοκρασίες προκαλώντας τη βίαιη ή μη αποκοπή στρώματος ή κομματιών σκυροδέματος από την επιφάνεια μιας κατασκευής, μείωση της θλιπτικής αντοχής με αποτέλεσμα τη μείωση της φέρουσας ικανότητας του (Khoury, 2003; UPTUN, 2008; Khoury, 2000; Phan, 2008). Παρά το γεγονός ότι έχει παρατηρηθεί αποφλοίωση και σε κτιριακές κατασκευές, τα παραδείγματα από πυρκαγιές σε σήραγγες ανέδειξαν πιο έντονα το πρόβλημα της εκρηκτικής αποφλοίωσης. Η επίλυση της εκρηκτικής αποφλοίωσης του σκυροδέματος αποτελεί πλέον πρωταρχική απαίτηση για κάθε σχεδιασμό νέας σήραγγας. Η αποφλοίωση μπορεί να συμβεί στο σκυρόδεμα είτε εκτεθεί σε φλόγα είτε θερμανθεί σε υψηλή θερμοκρασία χωρίς την παρουσία της φλόγας. Ιστορικά η πρώτη παρατήρηση της αποφλοίωσης εμφανίζεται στο 1916 από τον Gary μελετώντας την επίδραση της φωτιάς σε σπία (Gary, 1916). Όταν γίνεται αναφορά στο όρο αποφλοίωση εννοείται η εκρηκτική αποφλοίωση καθώς η εκρηκτική αλλά και η πολλαπλή φύση της την καθιστά υψηλού κινδύνου. Επίσης η εκρηκτική αποφλοίωση έχει μελετηθεί περισσότερο τις τελευταίες δεκαετίες καθώς υπάρχουν δεδομένα από δύο πραγματικά γεγονότα πυρκαγιάς σε σήραγγα καθώς και από εργαστηριακά πειράματα προσομοίωσης πυρκαγιάς. Βέβαια υπάρχουν και άλλες μορφές αποφλοίωσης οι οποίες δεν έχουν διερευνηθεί στην ίδια έκταση καθώς δεν έχουν τόσο σοβαρές συνέπειες οι οποίες είναι:

- α. Αποφλοίωση αδρανών
- β. Γωνιακή αποφλοίωση
- γ. Επιφανειακή αποφλοίωση
- δ. Αποφλοίωση μετά την ψύξη του δοκιμίου

Πίνακας 12-4: Θερμοκρασιακές μεταβολές του σκυροδέματος

Θερμοκρασία	Φυσικές διεργασίες	Επίδραση στις ιδιότητες
°C	-Εξάτμιση του φυσικά προσροφημένου νερού και του νερού του μεσοστρώματος των υδροξυλίων	Μικρή αύξηση της θλιπτικής αντοχής και μείωση του μέτρου ελαστικότητας
100-400 °C	-Εξάτμιση του μηχανικά συνδεδεμένου νερού, - Διάσπαση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ σε $\text{CaO}$ και $\text{H}_2\text{O}$ η οποία όχι μόνο επιταχύνει την αποφλοίωση αλλά και μειώνει την αντοχή του σκυροδέματος	-Μείωση της θλιπτικής αντοχής και περαιτέρω μείωση του μέτρου ελαστικότητας , -Το τσιμέντο χάνει τη σταθερότητα του αφού μειώνονται οι δυνάμεις συνοχής μεταξύ των υδροξυλίων -Εκρηκτική αποφλοίωση (150°C -300°C)
400-500 °C	-Το συνδεδεμένο με τα υδροξείδια του ασβεστίου νερό ελευθερώνεται μέσω της πίεσης των υδρατμών και λειτουργεί διαρρηκτικά προκαλώντας αποφλοίωση του σκυροδέματος, -Τα χαλαζιακά συστατικά του σκυροδέματος (άμμος , αδρανή) μεταβάλλουν τον όγκο τους λόγω του μετασχηματισμού του χαλαζία από α σε β. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σκυρόδεμα να υπόκειται σε φαινόμενα ερπησμού	Ισχυρή μείωση της θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας, έντονη εκρηκτική αποφλοίωση του,
500-900 °C	-Διάσπαση ανθρακικού ασβεστίου	-Ελάχιστη παραμένουσα αντοχή, -Το σκυρόδεμα χάνει την φέρουσα ικανότητα του -Αποσύνθεση τσιμεντοπολυτού
>900 °C		Τήξη σκυροδέματος

Πίνακας 12-5: Χαρακτηριστικά διαφορετικών τύπων αποφλοιώσης

Αποφλοιώση	Πιθανός χρόνος πραγματοποίησης(min)	Φύση	Ήχος	Συνέπεια	Βασικοί παράγοντες
Αδρανών	7-30	Μη-βίαη	Σκάσιμο	Επιφανειακή	H,A,S,D,W
Γωνιακή	30-90	Μη-βίαη	Κανένας	Ίσως σοβαρή	T,A,F <sub>t</sub> , R
Επιφανειακή	7-30	Βίαη	Σκάσιμο	Ίσως σοβαρή	H,W,P, F <sub>t</sub>
Εκρηκτική	7-30	Βίαη	Δυνατός κρότος	Σοβαρή	H,A,S, F <sub>x</sub> , G,O,P,Q,R,S,W, Z
Μετά την ψύξη	Κατά τη διάρκεια και μετά την ψύξη ανάλογα με την απορρόφηση υγρασίας	Μη-βίαη	Κανένας	Ίσως σοβαρή	T,A,F <sub>t</sub> ,L,Q, R,W1,AT

A = Θερμική διαστολή αδρανών

B = Θερμική διάχυση αδρανών

P = Διαπερατότητα

F<sub>x</sub> = Διατμητική αντοχή σκυροδέματος

O = Προφίλ θέρμανσης

Z = Μέγεθος διατομής

Q = Σχήμα διατομής

F<sub>t</sub> = Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος

R = Οπλισμός

G = Ηλικία σκυροδέματος

S = Μέγεθος αδρανών

AT = τύπος αδρανών

H = Ρυθμός θερμότητας

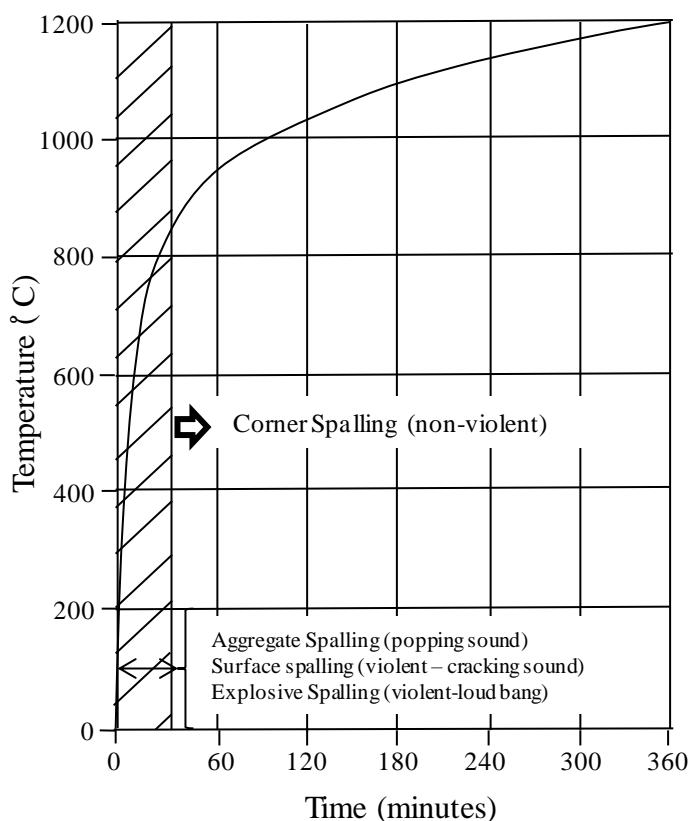
T = Μέγιστη θερμοκρασία

L = Φόρτιση

W = Παρουσία υγρασίας

W1 = Απορρόφηση υγρασίας

Τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών τύπων αποφλοιώσης φαίνονται στον πίνακα 2.5. Οι περισσότερες δοκιμές αποφλοιώσης εκτελούνται σε εργαστήρια προσομοίωσης πυρκαγιάς ακολουθώντας ένα ρυθμό θέρμανσης σύμφωνα με το πρότυπο ISO 834:1987. Στο διάγραμμα της παρακάτω εικόνας φαίνεται ο χρόνος εμφάνισης κάποιων μορφών αποφλοιώσης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία κατά την προσομοίωση της καμπύλης ISO 834 (UPTUN, 2008; Khoury, 2000; Phan, 2008).



Εικόνα 12.5: Διάγραμμα εμφάνισης μορφών αποφλοιώσης

### 12.3.1.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την αποφλοιώση

Η εκρηκτική αποφλοιώση συμβαίνει κατά τα πρώτα 7-20 λεπτά της πυρκαγιάς σε θερμοκρασία περίπου από 150-300°C προκαλώντας την απομάκρυνση στρώματος σκυροδέματος πάχους 25-100 mm (Εικόνα 2.6). Γενικά υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που επηρεάζουν την εκρηκτική αποφλοιώση. Αυτοί είναι :

- Η αντοχή του σκυροδέματος. Γενικά η υψηλή αντοχή του σκυροδέματος ευνοεί την πραγματοποίηση εκρηκτικής αποφλοιώσης ακόμα και σε χαμηλούς ρυθμούς ροής θερμότητας. Η πρόσφατη εμπειρία στην Ευρώπη έχει δείξει ότι η καταστροφή του σκυροδέματος λόγω εκρηκτικής αποφλοιώσης μπορεί να είναι αρκετά σοβαρή καθώς έχει αρχίσει και χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο το σκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας (HPC) για την κατασκευή των σιηράγγων. Το σκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας (HPC) είναι πυκνότερο και ισχυρότερο σε σχέση με το κανονικό σκυρόδεμα (NSC) και γι' αυτό έχει περισσότερες πιθανότητες να αποφλοιωθεί μέσα στα πρώτα 20 λεπτά της πυρκαγιάς.
- Ο ρυθμός ροής της θερμότητας. Η πιθανότητα και η σοβαρότητα της εκρηκτικής αποφλοιώσης αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού ροής θερμότητας.
- Το μέγεθος του εκτεθειμένου τμήματος. Η εκρηκτική αποφλοιώση είναι δύσκολο να συμβεί σε λεπτά κομμάτια λόγω της περιεχόμενης υγρασίας η οποία απελευθερώνεται πιο εύκολα αποτρέποντας με αυτό τον τρόπο τη δημιουργία πιέσεων στους πόρους. Επίσης πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι η εκρηκτική αποφλοιώση είναι λιγότερο πιθανή σε κομμάτια μεγάλου πάχους, μεγαλύτερου από περίπου 200-300 mm. Ως εκ τούτου η εκρηκτική αποφλοιώση είναι πιο πιθανή σε μεσαίου μεγέθους τμήματα .
- Το σχήμα του εκτεθειμένου τμήματος. Η εκρηκτική αποφλοιώση συμβαίνει ευκολότερα σε τμήματα με «γρήγορη» εναλλαγή της διατομής όπως για παράδειγμα σε γωνίες και πιο συχνά σε οξείες γωνίες. Τα ιδανικά σχήματα για να μη συμβεί εκρηκτική αποφλοιώση είναι οι επίπεδες επιφάνειες και οι στρογγυλεμένες γωνίες. Σύμφωνα με τον Khoury η μορφή της σήραγγας μπορεί να επηρεάσει την ικανότητα της να ανθίσταται στην πυρκαγιά. Πιο συγκεκριμένα ορθογώνιας διατομής σήραγγες και σήραγγες cut and cover είναι κατασκευές που καταπονούνται από καμπτικές τάσεις. Σε περίπτωση πυρκαγιάς σε τέτοιας μορφής σήραγγες θα δημιουργηθεί αποφλοιώση του σκυροδέματος στην εσωτερική επιφάνεια αλλά και μείωση της καμπτικής αντοχής επηρεάζοντας τη σταθερότητα του δομήματος. Από την άλλη, οι κυκλικής διατομής σήραγγες συμπεριφέρονται διαφορετικά αφού καταπονούνται από θλιπτικές τάσεις στο θόλο της σήραγγας οι οποίες αυξάνονται κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς εξαιτίας της εμποδιζόμενης διαστολής που αναπτύσσεται κοντά στη θερμαινόμενη επιφάνεια.
- Το ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας. Η αποφλοιώση είναι πιθανό να συμβεί σε σκυρόδεμα με υγρασία μεγαλύτερη από 2%-3% κατά βάρος (5% κατ'όγκο). Ωστόσο, σε πολύ πυκνό σκυρόδεμα υψηλής αντοχής μπορεί να συμβεί εκρηκτική αποφλοιώση ακόμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία 2.3-3.0% κατά βάρος. Αυτό οφείλεται στο χαμηλό πορώδες και τη χαμηλή διαπερατότητα του εν λόγω σκυροδέματος.
- Οι πιέσεις των πόρων. Διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην εκρηκτική αποφλοιώση. Σε σκυρόδεμα με χαμηλή διαπερατότητα και υψηλό ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας μπορούν να δημιουργηθούν σημαντικές πιέσεις πόρων. Το μέγεθος της πίεσης εξαρτάται από το επίπεδο κορεσμού των πόρων. Οι πιέσεις των πόρων που έχουν μετρηθεί σε συνθήκες όμοιες με έκθεση σε φωτιά είναι της τάξης του 1.4-2.1 N/mm<sup>2</sup>. Τέτοιες πιέσεις, οι οποίες είναι μικρότερες από την εφελκυστική αντοχή του κανονικού σκυροδέματος, δεν προκαλούν αστοχία από μόνες τους, αλλά συνεισφέρουν στην εκρηκτική αποφλοιώση σε συνδυασμό με άλλου είδους πιέσεις (UPTUN, 2008; Khoury, 2000).
- Η διαπερατότητα. Είναι ένας σημαντικός παράγοντας στη δημιουργία εκρηκτικής αποφλοιώσης αφού επηρεάζει το ρυθμό της απελευθέρωσης των ατμών (UPTUN, 2008; Khoury, 2000).
- Η ηλικία σκυροδέματος. Σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει πρόσφατα έχει παρατηρηθεί ότι η πιθανότητα εκδήλωσης εκρηκτικής αποφλοιώσης μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Αυτό οφείλεται στο μικρότερο ποσοστό υγρασίας που έχει το μεγαλύτερης ηλικίας σκυρόδεμα (UPTUN, 2008; Khoury, 2000).
- Η θλιπτική τάση. Μία αύξηση στη θλιπτική τάση είτε από μείωση του μεγέθους του τμήματος του σκυροδέματος είτε από αύξηση της φόρτισης «ενθαρρύνει» τη δημιουργία εκρηκτικής αποφλοιώσης. Συνδυασμός της θλιπτικής τάσης (άνω των 2 N/mm<sup>2</sup>) και υγρασίας (άνω του 3.3% κατά βάρος) αυξάνουν την πιθανότητα εμφάνισης εκρηκτικής αποφλοιώσης (UPTUN, 2008; Khoury, 2000).
- Ο τύπος αδρανών. Είναι προφανές ότι η πιθανότητα εκδήλωσης εκρηκτικής αποφλοιώσης μειώνεται όταν χρησιμοποιούνται αδρανή χαμηλής θερμικής διαστολής. Η πιθανότητα για να συμβεί εκρηκτική αποφλοιώση αυξάνεται με το είδος του αδρανούς, με τη σειρά: ελαφροβαρές, βασάλτης, ασβεστόλιθος, πυριτικά αδρανή (UPTUN, 2008; Khoury, 2000).

- Το μέγεθος αδρανών. Η πιθανότητα εκδήλωσης εκρηκτικής αποφλοίωσης αυξάνεται όσο μεγαλύτερα σε μέγεθος αδρανή χρησιμοποιούνται (UPTUN, 2008; Houry, 2000).
- Η ρωγμάτωση. Έχει θετική αλλά και αρνητική επίδραση στην εκρηκτική αποφλοίωση. Ενώ οι μικρορωγματώσεις διευκολύνουν την απελευθέρωση της υγρασίας κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και ως αποτέλεσμα ανακουφίζουν τις πιέσεις των πόρων παράλληλα διευκολύνουν τη διαδικασία της αποφλοίωσης δημιουργώντας πηγή διάδοσης ρωγμών (UPTUN, 2008; Houry, 2000).
- Ο σπλισμός του σκυροδέματος. Η παρουσία του σπλισμού στο σκυρόδεμα μειώνει την πιθανότητα εκδήλωσης εκρηκτικής αποφλοίωσης, ενώ παράλληλα αποτρέπει την αποφλοίωση σε χαμηλά θερμοκρασιακά εύρη. Η παρουσία ή μη του σπλισμού και όχι η ποσότητα του αποτελεί βασικό παράγοντα για την πραγματοποίηση ή μη της εκρηκτικής αποφλοίωσης.

### 12.3.1.2 Περιγραφή του μηχανισμού αστοχίας

Οι μηχανισμοί που προτείνονται για την εξήγηση της εκρηκτικής αποφλοίωσης του σκυροδέματος εμπίπτουν σε τρεις κατηγορίες:

(α) **Αποφλοίωση λόγω των πιέσεων των πόρων.** Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εμφάνιση της παραπάνω αποφλοίωσης είναι η διαπερατότητα του σκυροδέματος, και ο ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας. Η τιμή της πίεσης των πόρων στο υπό θέρμανση σκυρόδεμα είναι δύσκολο να υπολογισθεί. Η πλειοψηφία των μοντέλων που υπάρχουν για τον υπολογισμό της πίεσης των πόρων δίνουν τιμές μικρότερες για την πίεση των πόρων σε σχέση με την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Συνεπώς ο μηχανισμός αυτός δεν θα πρέπει να οδηγεί από μόνος του σε αποφλοίωση. Η αποφλοίωση λόγω των πιέσεων των πόρων μπορεί να συμβεί μόνο σε μικρά μη φορτισμένα δοκίμια.

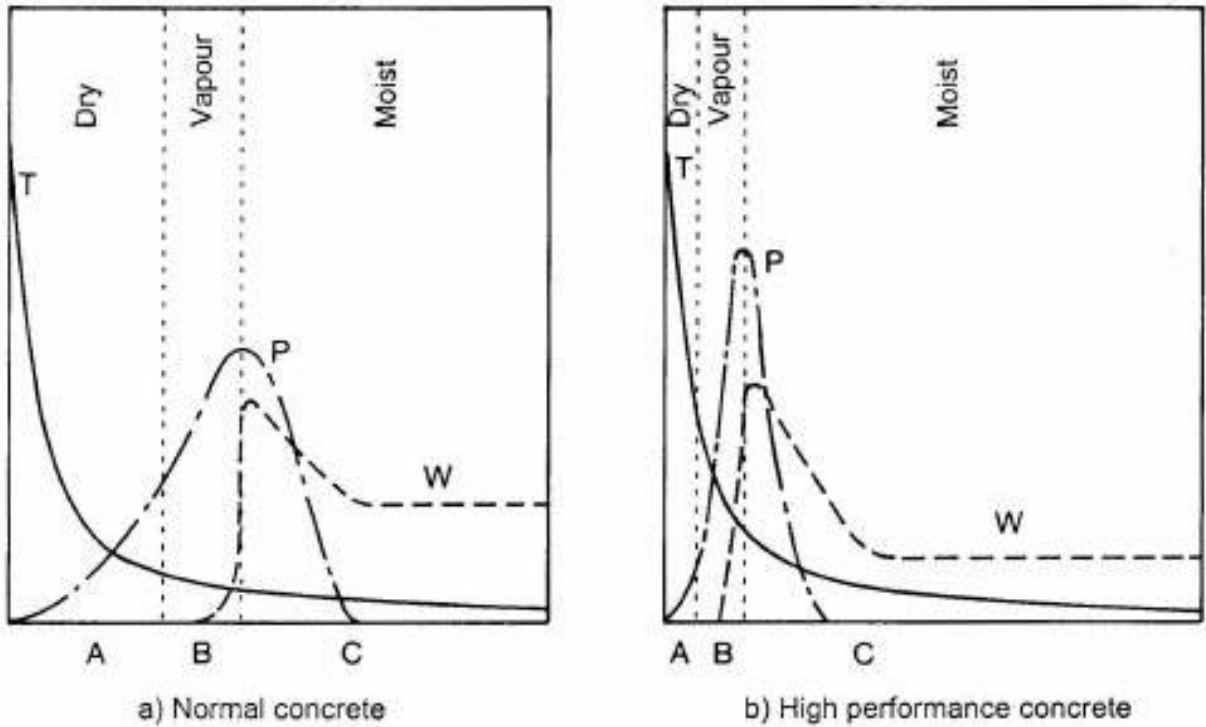
(β) **Αποφλοίωση λόγω θερμικής καταπόνησης.** Η αποφλοίωση λόγω θερμικής καταπόνησης εξηγείται από το γεγονός ότι η θέρμανση ενός υλικού με χαμηλή αγωγιμότητα (όπως το σκυρόδεμα ή ορισμένα κεραμικά) δημιουργεί θερμοκρασιακές βαθμώσεις που ωθούν τις θλιπτικές τάσεις κοντά στην θερμαινόμενη επιφάνεια και τις εφελκυστικές τάσεις στις ψυχρότερες περιοχές. Οι θλιπτικές τάσεις στην επιφάνεια μπορεί να ενισχυθούν λόγω πιθανής εξωτερικής φόρτισης. Όμως ελάχιστες κατασκευές σκυροδέματος φορτίζονται σε τέτοιο επίπεδο που να πλησιάζει το όριο αντοχής τους κάνοντας το φαινόμενο της αποφλοίωσης λόγω θερμικής καταπόνησης αρκετά σπάνιο. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την αποφλοίωση λόγω θερμικής καταπόνησης είναι το εφαρμοζόμενο φορτίο, ο ρυθμός ροής θερμότητας, η αντοχή του σκυροδέματος και η διαστολή των αδρανών.

(γ) **Αποφλοίωση λόγω συνδυασμού πιέσεων πόρων και θερμικής καταπόνησης.** Η περίπτωση αυτή είναι η συνηθέστερη για την εξήγηση της εκρηκτικής αποφλοίωσης. Η αποφλοίωση αυτή συμβαίνει υπό τη συνδυασμένη δράση της πίεσης των πόρων, των θλιπτικών τάσεων (λόγω θερμικής καταπόνησης) που δρουν στην επιφάνεια του σκυροδέματος που εκτίθεται στη φωτιά και της ύπαρξης εσωτερικών ρωγμών. Κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς οι ρωγμές αναπτύσσονται παράλληλα στη θερμαινόμενη επιφάνεια και αυτό συνοδεύεται από απότομη απελευθέρωση ενέργειας και βίαιη αστοχία της περιοχής που εκτίθεται στη θερμοκρασία.

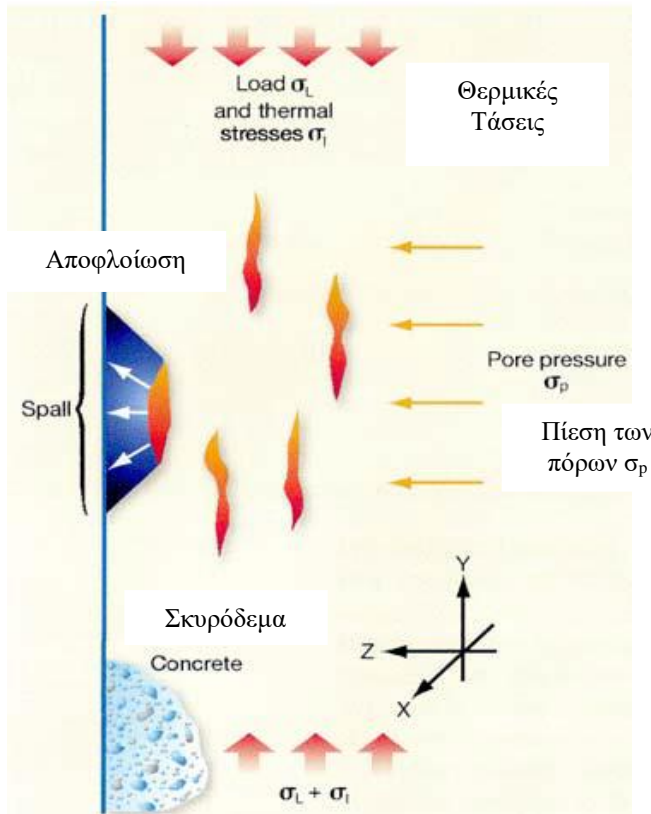
Η επιβολή της θερμότητας στην επιφάνεια του σκυροδέματος έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας θερμοκρασιακής βαθμωσης που ωθεί την υγρασία στο εσωτερικό του σκυροδέματος, και έτσι αναπτύσσονται τρεις διαφορετικές ζώνες υγρασίας (Εικόνα 2.4): (α) μία ξηρή ζώνη κοντά στην θερμαινόμενη επιφάνεια, (β) μία ενδιάμεση ζώνη εξάτμισης (γ) μία κορεσμένη ζώνη η οποία μπορεί να περιέχει περισσότερη υγρασία από την αρχική του σκυροδέματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη της μέγιστης πίεσης πόρων σε κάποια απόσταση από την επιφάνεια ανάλογα με την διαπερατότητα και την αντοχή του σκυροδέματος συμβάλλοντας έτσι στην εκρηκτική αποφλοίωση του. Η μέγιστη πίεση των πόρων είναι μεγαλύτερη σε υψηλότερης αντοχής σκυρόδεμα και αναπτύσσεται πιο κοντά στην επιφάνεια. Το σκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας τείνει να υφίστανται πολλαπλή αποφλοίωση σε λεπτότερα τμήματα όπως συνέβη π.χ στη σήραγγα του «Great Belt» κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς του 1994. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς αναπτύσσονται μεγαλύτερες πιέσεις μέσα στους πόρους εξαιτίας της χαμηλότερης διαπερατότητας ενώ και η μέγιστη τιμή της πίεσης των πόρων εμφανίζεται πλησιέστερα στην επιφάνεια με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται επαναλαμβανόμενη αποκόλληση λεπτομερών τμημάτων σκυροδέματος.

Επίσης οι θερμικές καταπονήσεις αναπτύσσονται ως αποτέλεσμα της θερμοκρασιακής βαθμωσης και της μεγαλύτερης διαστολής του σκυροδέματος κοντά στην θερμαινόμενη επιφάνεια. Μολονότι ο παροδικός ερπυσμός ανακουφίζει τις τάσεις σε κάποιο βαθμό κατά τη διάρκεια της πρώτης θέρμανσης, παρόλα αυτά οι

τάσεις αυτές εξακολουθούν να αναπτύσσονται και συμβάλλουν στην εκρηκτική αποφλοίωση, σε συνδυασμό με την πίεση των πόρων (Εικόνα 2.5).



Εικόνα 12.6: Μονοδιάστατη ποιοτική κατανομή της θερμοκρασίας ( $T$ ), της υγρασίας ( $W$ ), και της πίεσης των ατμών ( $P$ ) στο σκυρόδεμα όταν θερμαίνεται από μία πλευρά



Εικόνα 12.7: Ενεργές τάσεις σε θερμαινόμενο σκυρόδεμα

Δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν από τον Jansson (2006) έδειξαν ότι οι πιέσεις των πόρων δεν έλαβαν υψηλές τιμές κατά την έναρξη της αποφλοΐωσης. Η ομάδα του Jansson πραγματοποίησε μία θερμική δοκιμή σε σκυρόδεμα και έδειξε ότι η αποφλοΐωση ξεκίνησε 15 λεπτά μετά το ξεκίνημα της δοκιμής όταν η θερμοκρασία σε ένα βάθος δοκιμίου 10 mm ήταν περί τους 200°C και η πίεση στο σκυρόδεμα περίπου 0.7 MPa. Αυτή η πίεση είναι χαμηλότερη από την αντοχή εφελκυσμού του σκυροδέματος στη μετρούμενη θερμοκρασία, και υποδεικνύει ότι οι πιέσεις των πόρων είναι λιγότερο σημαντικές σε σχέση με τις θερμικές καταπονήσεις σχετικά με την αιτία πραγματοποίησης εκρηκτικής αποφλοΐωσης.



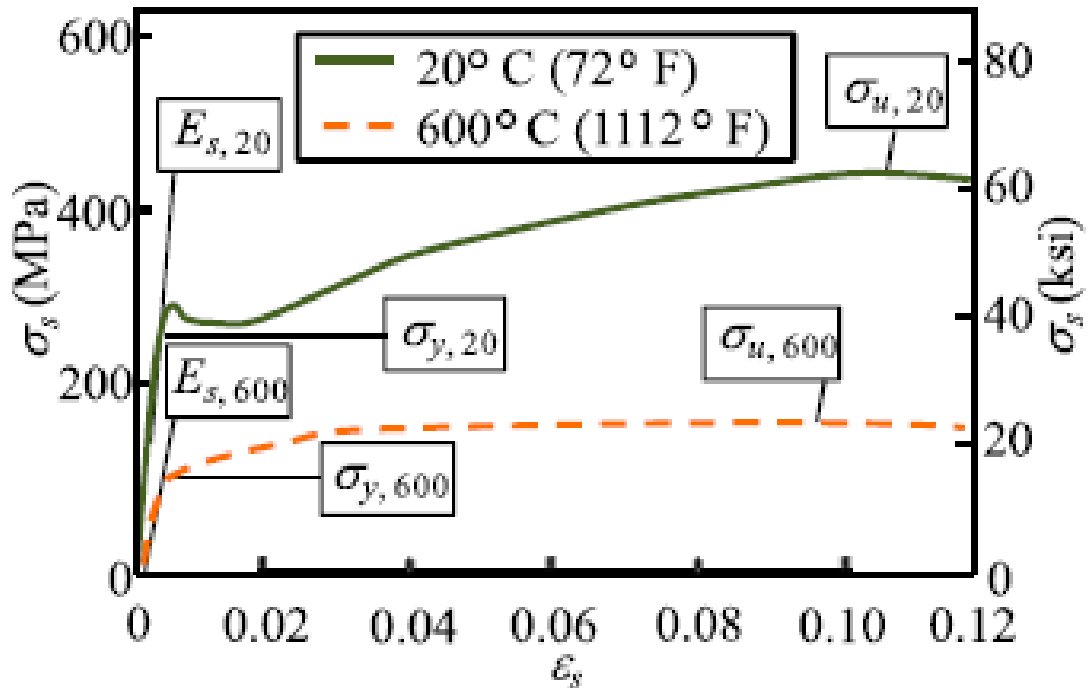
Εικόνα 12.8: Εικόνα αποφλοΐωσης σκυροδέματος μετά από πυρκαγιά

### 12.3.2 Ο χάλυβας του οπλισμού

Ένα ακόμα κρίσιμο στοιχείο κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς είναι η θερμότητα που μεταφέρεται από το σκυρόδεμα στο χάλυβα του οπλισμού και για αυτό το λόγο αποτελεί σημαντικό παράγοντα το πάχος της επικάλυψης που έχει εφαρμοσθεί (Khoury, 2000; Αγγελόπουλος & Γιόκαρης, 2005). Ο χάλυβας είναι ένα άκαυστο υλικό το οποίο όμως δεν αντέχει για μεγάλη χρονική διάρκεια σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε κάποιες περιπτώσεις ενδέχεται να εμφανισθούν φαινόμενα όπως ερπυσμός, χαλάρωση και μεταβολή της μικροδομής του χάλυβα. Οι μεταβολές στο χάλυβα μετά την επάνοδο σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος είτε παραμένουν είτε αίρονται ανάλογα με την μέθοδο παραγωγής και την θερμοκρασία στην οποία εκτέθηκε. Με την έκθεση

των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζονται κυρίως, το όριο διαρροής, η εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας, η τάση αστοχίας και η δυσκαμψία του.

Οι παραπάνω αλλαγές γίνονται πιο σαφείς με το παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 2.7) τάσεων-παραμορφώσεων το οποίο είναι χαρακτηριστικό του δομικού χάλυβα ASTM A36 υπό συνθήκες περιβάλλοντος (20°C) και υπό συνθήκες αυξημένης θερμοκρασίας (600°C).

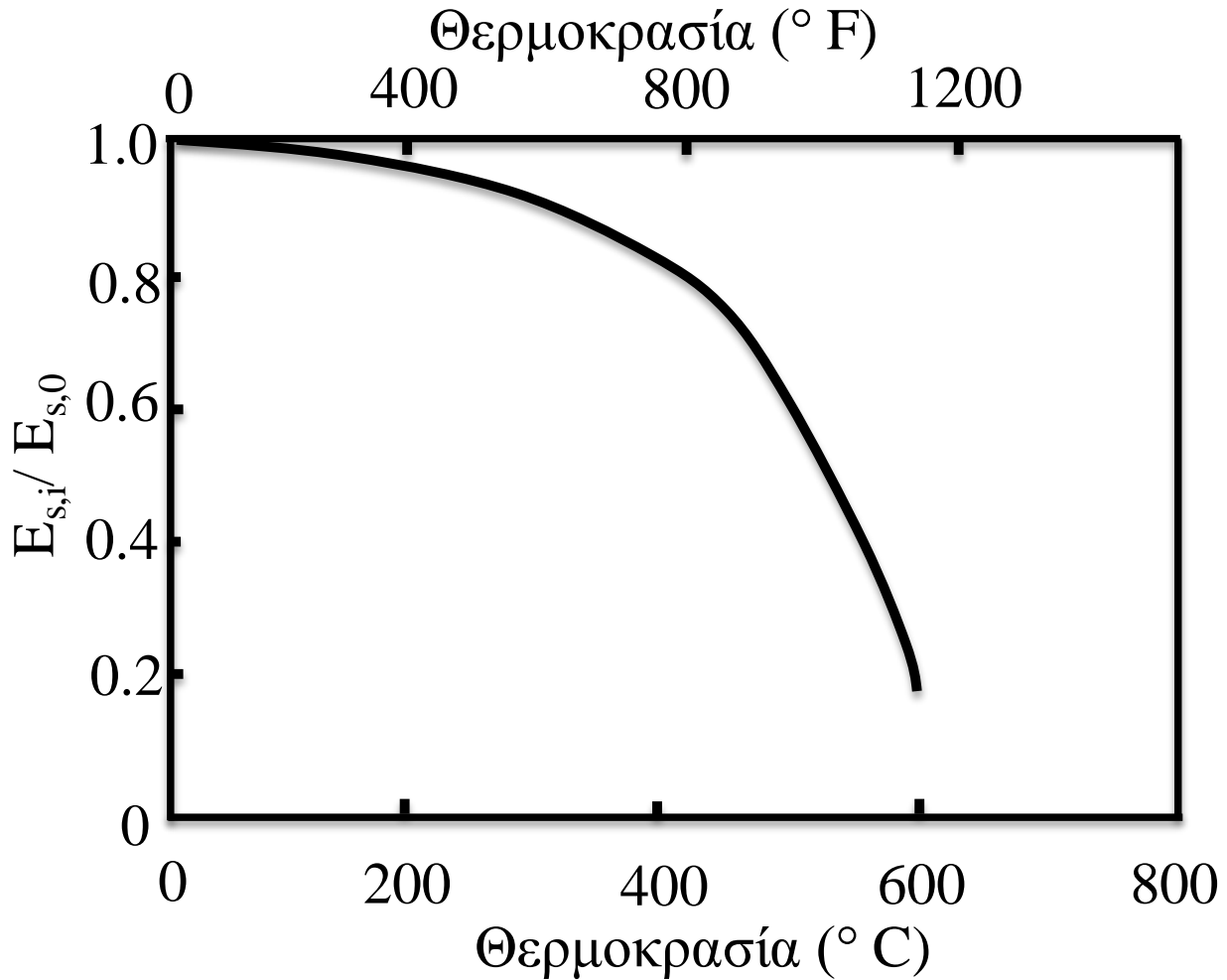


Εικόνα 12.9: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων για χάλυβα ASTM A36 υπό υψηλές θερμοκρασίες

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα της εικόνας 2.7 η τάση διαρροής ( $\sigma_{y, 20}$ ) του χάλυβα σε συνθήκες περιβάλλοντος είναι 248 MPa, ενώ η τάση διαρροής ( $\sigma_{y, 600}$ ) στους 600°C για το ίδιο υλικό μειώνεται περισσότερο από το ήμισυ και φτάνει στην τιμή των 103 MPa. Ακόμη πιο έντονη είναι η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας  $E_s$  το οποίο είναι ίσο με 200 GPa υπό συνθήκες περιβάλλοντος, και μειώνεται σε 36 GPa στους 600°C (Davidson et al., 2013; Felicetti et al., 2006). Τέλος, η τάση αστοχίας ( $\sigma_{u, 20}$ ) υπό συνθήκες περιβάλλοντος είναι περίπου 440 MPa, ενώ η αντίστοιχη τιμή μετά από έκθεση στους 600°C φτάνει στα 152 MPa.

Η υποβάθμιση των δομικών ιδιοτήτων του χάλυβα με την αύξηση της θερμοκρασίας, διευκρινίζεται περαιτέρω, λαμβάνοντας υπόψη τα σχετικά μεγέθη των δομικών ιδιοτήτων μετρούμενων σε ένα εύρος θερμοκρασιών. Στο διάγραμμα της εικόνας 2.8 φαίνεται το σχετικό μέτρο ελαστικότητας σε θερμοκρασίες μεταξύ 0°C και 600°C. Όπως φαίνεται ο δομικός χάλυβας διατηρεί ένα ουσιαστικό μέρος της δυσκαμψίας (περίπου 90%) για θερμοκρασίες μέχρι περίπου 300°C. Ωστόσο, για υψηλότερες θερμοκρασίες, η μείωση της δυσκαμψίας αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό.





Εικόνα 12.10: Σχετικά μεγέθη μέτρου ελαστικότητας για θερμοκρασίες 0°C και 600°C

Οι χάλυβες των κατασκευών π.χ. χάλυβας που χρησιμοποιείται ως οπλισμός σκυροδέματος ή ως αγκύριο (οπλισμού), έχουν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Σε κάποιες περιπτώσεις ο χάλυβας που χρησιμοποιείται για τον οπλισμό σκυροδέματος μπορεί να προεντεταθεί, προκειμένου να προσφέρει μια θλιπτική δύναμη στη δοκό του σκυροδέματος. Σε μία τέτοια περίπτωση αν ο χάλυβας θερμανθεί σε μία θερμοκρασία περίπου 300°C, χάνει την τάνυση και σχεδόν όλη την αντοχή κάτι το οποίο αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα στον κατασκευαστικό τομέα. Όταν ο χάλυβας χρησιμοποιείται ως αγκύριο για να ενισχύσει τη βραχομάζα, δεν μπορεί να εξασφαλισθεί κανενός είδους προστασία δεδομένου ότι τα αγκύρια έχουν εγκατασταθεί κάθετα προς την επιφάνεια του βράχου, με τα άκρα των αγκυρίων απροστάτευτα από τη θερμότητα. Η συμπεριφορά των χαλύβων κατά την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες εξαρτάται από:

- Τη θερμοκρασία έκθεσης
- Το χρόνο έκθεσης
- Τη σύσταση και τη μέθοδο παραγωγής των χαλύβων

Από τα παραπάνω και σύμφωνα με τα πρότυπα πυροπροστασίας, NFPA 502, έχει υιοθετηθεί η θερμοκρασία των 250°C ως θερμοκρασιακό όριο για τους δομικούς χάλυβες, πέραν του οποίου θεωρείται ότι χάνουν την δομική τους ακεραιότητα.

Επίσης η συνάφεια μεταξύ του σκυροδέματος και του οπλισμού αποτελεί πρωταρχικό χαρακτηριστικό του οπλισμένου σκυροδέματος και εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του μήκους αγκυρώσεως και είναι οι ακόλουθοι: α) ποιότητα σκυροδέματος (θλιπτική-εφελκυστική αντοχή), β) είδος και μέγεθος αδρανών μέσα στο σκυροδέμα, γ) είδος καταπόνησης που ασκείται

στο σκυρόδεμα, δ) επιφάνεια ράβδου οπλισμού, ε) επικάλυψη οπλισμού, στ) παρουσία εγκάρσιου οπλισμού, ζ) θερμοκρασία. Σχετικά με την επιρροή της θερμοκρασίας στη συνάφεια σκυροδέματος και χάλυβα, έχει παρατηρηθεί ότι προκαλείται μείωση των τάσεων συνάφειας με την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην περιοχή της συνάφειας.

## 12.4 Κανονισμοί που ισχύουν για την προστασία από την πυρκαγιά

### 12.4.1 Καμπύλες θερμοκρασίας – χρόνου

Η πυρκαγιά είναι αντίδραση καύσης με ταυτόχρονη έκλυση φωτός και θερμότητας. Μια τυπική πυρκαγιά αποτελείται από τρεις φάσεις: τη φάση της επώασης, τη φάση της πλήρους ανάπτυξης και τη φάση της απόσβεσης. Η απόκριση του δομήματος της σήραγγας σε μια πυρκαγιά εξαρτάται από το είδος της πυρκαγιάς. Τα βασικά χαρακτηριστικά μιας πυρκαγιάς σε σήραγγα είναι :

- - Ο ρυθμός ροής θερμότητας, ο οποίος επηρεάζει την ανάπτυξη της θερμοκρασίας, και της πίεσης των πόρων μέσα στο σκυρόδεμα
- - Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (HRR)
- - Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας
- - Η διάρκεια της πυρκαγιάς
- - Ο τρόπος απόσβεσης

Τα τελευταία χρόνια μια μεγάλη έρευνα έχει λάβει χώρα σε διεθνές επίπεδο για να διαπιστωθεί το είδος της πυρκαγιάς που θα μπορούσε να συμβεί σε μια σήραγγα και γενικότερα σε υπόγειους χώρους. Η έρευνα έλαβε χώρα σε πραγματικές συνθήκες πυρκαγιάς σε εγκαταλελειμμένες σήραγγες αλλά και σε εργαστηριακή κλίμακα. Βάση των δεδομένων που ελήφθησαν από τα πειράματα αναπτύχθηκε μια σειρά από καμπύλες χρόνου / θερμοκρασίας οι οποίες προστέθηκαν στις ήδη υπάρχουσες και χρησιμοποιούνται πλέον για την εκτίμηση και αξιολόγηση διαφόρων υλικών παθητικής πυροπροστασίας. Στο διάγραμμα της εικόνας 2.1 δίνονται οι πρότυπες θερμοκρασιακές καμπύλες πυρκαγιάς.

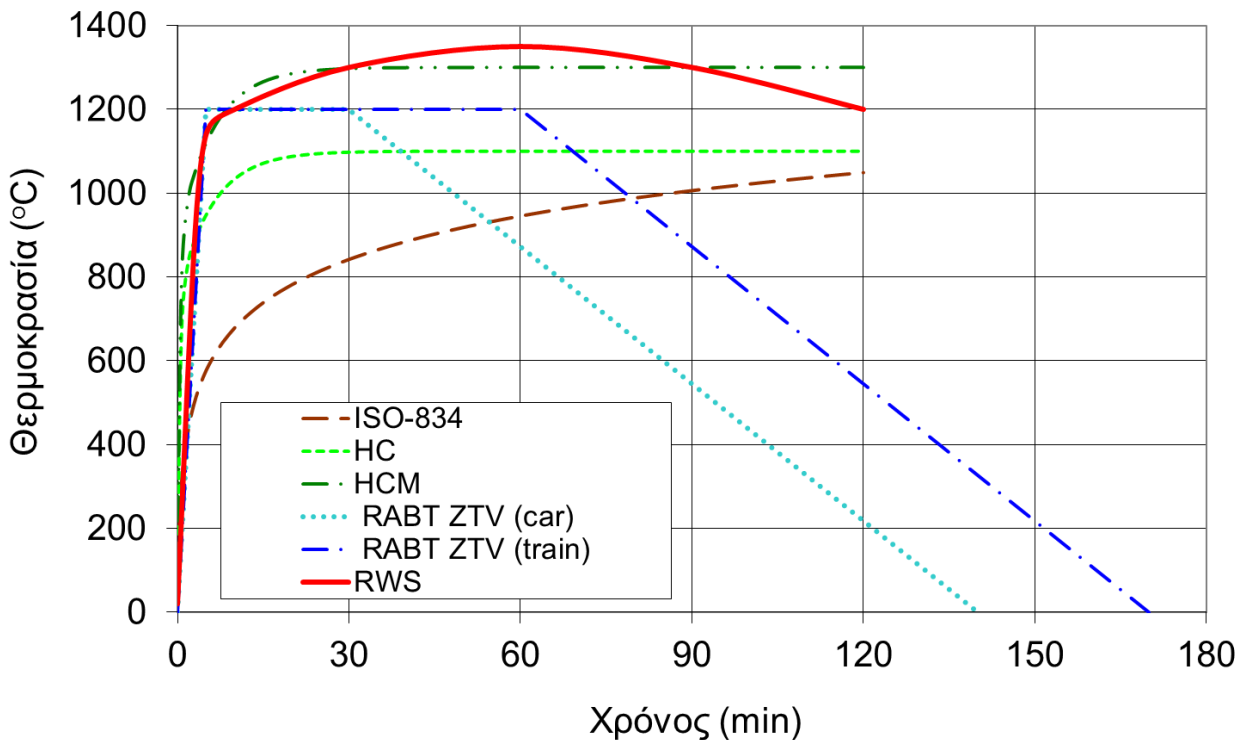
Διακρίνονται οι εξής έξι πρότυπες καμπύλες (Promat, -; Khoury, 2000; EFNARC, 2009; Both et al., 1999) ανάπτυξης της θερμοκρασίας  $T$  σε  $^{\circ}\text{C}$ , με το χρόνο  $t$  σε min:

1) καμπύλη ISO (ISO-834) Η καμπύλη αυτή βασίζεται στην ταχύτητα καύσης των υλικών που συναντώνται σε κατοικίες και εμπορικά κτίρια (πυρκαγιά κυτταρινικής φύσης) και καθορίζει μια μέθοδο δοκιμής για τον προσδιορισμό της αντοχής στη φωτιά των διαφόρων στοιχείων της κατασκευής. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας της καμπύλης περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$T = 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) + 20$$

(12-4)

++



Εικόνα 12.11: Πρότυπες θερμοκρασιακές καμπύλες πυρκαγιάς

Η θερμοκρασία μετά από 30min φτάνει τους 842°C. Η πυρκαγιά διαρκεί δύο ώρες και η θερμοκρασία φτάνει στους 1049°C.

2) Καμπύλη υδρογονανθράκων (HC). Παρά το γεγονός ότι η προηγούμενη καμπύλη ISO-834 χρησιμοποιήθηκε για πολλά χρόνια, έγινε σύντομα σαφές ότι ο ρυθμός της καύσης για ορισμένα υλικά όπως βενζίνη, χημικά κλπ., ήταν πολύ μεγαλύτερος από το ρυθμό με τον οποίο, για παράδειγμα, καίγεται ο ξυλότυπος μιας οικοδομής. Ως εκ τούτου, προέκυψε η ανάγκη για μία εναλλακτική καμπύλη με σκοπό τη διεξαγωγή δοκιμών σε κατασκευές και υλικά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία πετροχημικών. Έτσι η καμπύλη υδρογονανθράκων αναπτύχθηκε για να λαμβάνει υπόψη την καύση και άλλων υλικών (πετρέλαιο, άλλα χημικά υλικά) που χρησιμοποιούνται στην πετρελαιοκή βιομηχανία και δεν συναντώνται σε συνήθη οικοδομικά έργα. Η καμπύλη υδρογονανθράκων έχει εφαρμογή σε μικρές πυρκαγιές πετρελαίου όπως για παράδειγμα, σε δεξαμενές καυσίμων αυτοκινήτων. Η θερμοκρασία στην καμπύλη αυτή φτάνει στους 1100°C από τα πρώτα 15min και διατηρείται στην συγκεκριμένη θερμοκρασία για τρεις ώρες.

Η εξέλιξη της θερμοκρασίας (σε °C) της καμπύλης υδρογονανθράκων (HC) περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$T = 20 + 1080 \cdot (1 - 0.325 \cdot e^{-0.167 \cdot t} - 0.675 \cdot e^{-2,5 \cdot t}) \quad (12-5)$$

3) Τροποποιημένη καμπύλη υδρογονανθράκων (HCM). Η συγκεκριμένη καμπύλη διαμορφώθηκε κατόπιν αιτήσεως του γαλλικού υπουργείου συγκοινωνιών και ονομάζεται «Τροποποιημένη καμπύλη υδρογονανθράκων» (HCM). Προέρχεται από την προηγούμενη καμπύλη υδρογονανθράκων με μία διαφοροποίηση στη μέγιστη θερμοκρασία. Η μέγιστη θερμοκρασία της καμπύλης HCM είναι 1300°C αντί των 1100°C, της τυπικής καμπύλης HC.

Ωστόσο, η αύξηση της θερμοκρασίας κατά τα πρώτα λεπτά της καμπύλης HCM είναι τόσο απότομη όσο σε όλες τις καμπύλες υδρογονανθράκων (RWS, HCM, HC), πιθανώς προκαλώντας ένα θερμοκρασιακό σοκ στο σκυρόδεμα με αποτέλεσμα την αποφλοιώση του.

Η εξέλιξη της θερμοκρασίας στην τροποποιημένη καμπύλη υδρογονανθράκων (HCM) περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$T = 20 + 1280 \cdot (1 - 0.325 \cdot e^{-0.167 \cdot t} - 0.675 \cdot e^{-2,5 \cdot t}) \quad (12-6)$$

4) Καμπύλες RABT (Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln) ZTV: Οι συγκεκριμένες καμπύλες αναπτύχθηκαν στη Γερμανία ως αποτέλεσμα μιας σειράς πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο των ευρωπαϊκών προγραμμάτων “EUREKA”, “SOLIT” και “UPTUN”. Στις καμπύλες αυτές η αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι τους 1200°C πραγματοποιείται μέσα σε πέντε λεπτά. Η θερμοκρασία παραμένει σταθερή για 30 min στην περίπτωση πυρκαγιάς σε αυτοκίνητο (RABT ZTV car) και για 60min για την περίπτωση πυρκαγιάς σε τρένο (RABT ZTV train) και στη συνέχεια αποσβένεται. Η φάση της απόσβεσης και για τις δύο περιπτώσεις διαρκεί 110 min. Η ανάπτυξη της θερμοκρασίας στις καμπύλες RABT ακολουθεί τις συντεταγμένες του πίνακα 2.1.

5) Καμπύλη RWS (Πίνακας 2.2): Η καμπύλη αυτή αναπτύχθηκε από το υπουργείο συγκοινωνιών της Ολλανδίας και πρόκειται για τη δυσμενέστερη περίπτωση από όλες τις καμπύλες. Βασίζεται στο σενάριο ότι πραγματοποιείται πυρκαγιά σε ένα φορτηγό με 50 m<sup>3</sup> πετρέλαιο, ή οποιοδήποτε άλλο καύσιμο, και η ισχύς είναι της τάξης των 300MW ενώ η διάρκεια της είναι 120min. Η μέγιστη θερμοκρασία στην καμπύλη αυτή είναι 1350°C.

Πίνακας 12-6: Συντεταγμένες καμπύλης RABT

RABT – ZTV (τρένο)	
Χρόνος (minutes)	Θερμοκρασία (°C)
0	15
5	1200
60	1200
170	15
RABT – ZTV (αυτοκίνητο)	
Χρόνος (minutes)	Θερμοκρασία (°C)
0	15
5	1200
30	1200
140	15

Η διαφορά της καμπύλης αυτής από εκείνη των υδρογοναναθράκων είναι ότι πρόκειται για πυρκαγιά σε κλειστό χώρο όπως σε σήραγγες κάτι το οποίο δεν ισχύει για τις άλλες καμπύλες (UPTUN, 2008). Όμως οι θερμοκρασίες που εκτιμήθηκαν από πραγματικά γεγονότα πυρκαγιάς σε σήραγγα ήταν σαφώς μικρότερες από τις τιμές της καμπύλης RWS, για παράδειγμα στη σήραγγα της Μάγχης η μέγιστη θερμοκρασία που μετρήθηκε ήταν 1100°C, στη σήραγγα του Great Belt η μέγιστη θερμοκρασία ήταν 800°C, στη σήραγγα του Mont-Blanc και Tauern η μέγιστη θερμοκρασία μετρήθηκε ίση με 1000°C.

Πίνακας 12-7: Συντεταγμένες καμπύλης RWS

RWS, RijksWaterStaat	
Χρόνος (minutes)	Θερμοκρασία (°C)
0	20
3	890
5	1140
10	1200
30	1300
60	1350
90	1300
120	1200

Αποτελεί την πιο απαιτητική καμπύλη θερμικών φορτίων σχεδιασμού, που όμως προσομοιώνει καλύτερα την περίπτωση πυρκαγιάς σε σήραγγα. Η απότομη αύξηση της θερμοκρασίας στα πρώτα λεπτά της πυρκαγιάς, που προβλέπεται από την καμπύλη οδηγεί σε καταστροφή της επένδυσης της σήραγγας αν δεν ληφθούν συγκεκριμένα μέτρα προστασίας (Σακκάς et al., 2010).

#### 12.4.2 Κανονισμοί προστασίας σηράγγων από πυρκαγιά

Η Ε.Ε αναγνωρίζοντας τις τραγικές συνέπειες από τις πυρκαγιές στις σήραγγες εξέδωσε το 2004 την οδηγία 2004/54/EK σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις ασφαλείας στις ευρωπαϊκές οδικές σήραγγες. Για την προστασία των ανθρώπων και της σήραγγας από πυρκαγιά προβλέπονται, μεταξύ άλλων, υποχρεωτικές έξοδοι κινδύνου, σχεδιασμός του συστήματος αερισμού για τον έλεγχο της θερμοκρασίας και του καπνού, και επαρκής αντοχή των κατασκευών της σήραγγας στη φωτιά (Οδηγία, 2004). Η Ελλάδα ανταποκρίθηκε στην ανωτέρω οδηγία με το Π.Δ 230/2007, που δημοσιεύθηκε στο ΦΕΚ 264Α/2007 (ΠΔ, 2007). Η συγκεκριμένη οδηγία δεν αναφέρεται καθόλου σε θερμοκρασιακές απαιτήσεις σχετικά με τη δομοστατική επάρκεια της μόνιμης επένδυσης. Αναφέρεται κατά κύριο λόγο στην ύπαρξη κατάλληλου αερισμού, συστημάτων ανίχνευσης καπνού και πυρκαγιάς, στην ύπαρξη πυροσβεστήρων αλλά και στην αντοχή των ηλεκτρονικών και μηχανολογικών εξοπλισμών έναντι της πυρκαγιάς (Σακκάς, et al., 2010).

Παράλληλα ο εθνικός οργανισμός προστασίας από την πυρκαγιά των Η.Π.Α- NFPA (National Fire Protection Association) βασιζόμενος στα θερμικά φορτία έχει δημοσιεύσει από το 2011 πρότυπα σχετικά με τις απαιτήσεις για την προστασία των δομικών στοιχείων των οδικών σηράγγων (NFPA, 2011). Πιο αναλυτικά το συγκεκριμένο πρότυπο αναφέρει στην παράγραφο 7.3 ότι ανεξάρτητα από το μήκος της σήραγγας, τα μέτρα παθητικής πυροπροστασίας πρέπει να περιλαμβάνονται στο σχεδιασμό της για την προστασία των δομικών στοιχείων αυτής, προκειμένου να:

- (1) Ελαχιστοποιηθούν οι καταστροφές του δομήματος και η κατάρρευση της σήραγγας
- (2) Ελαχιστοποιηθούν οι οικονομικές απώλειες λόγω του κλεισίματος της σήραγγας.

Επίσης σύμφωνα με τον N.F.P.A το δόμημα πρέπει να είναι ικανό να αντέξει στην Rijkswaterstaat (RWS) καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου ή οποια άλλη αναγνωρισμένη πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου. Κατά τη διάρκεια των 120 λεπτών έκθεσης στην πυρκαγιά, πρέπει να πληρούνται τα ακόλουθα κριτήρια αστοχίας (NFPA, 2011):

(1) Σε σήραγγες από προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος θα πρέπει να αποφευχθεί η εκρηκτική αποφλοίωση (explosive spalling).

(2) Σε σήραγγες με χαλύβδινο οπλισμό η θερμοκρασία στην επένδυση δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 300°C (572°F).

Για τα υλικά πυροπροστασίας το πρότυπο προβλέπει :

(1) Σε σήραγγες με επένδυση από έγχυτο σκυρόδεμα πρέπει:

(α) Η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια των υλικών να μην υπερβαίνει τους 380°C (716°F).

(β) Η θερμοκρασία του χάλυβα οπλισμού εντός του σκυροδέματος, υποθέτοντας μια ελάχιστη κάλυψη 25 mm (1 in), να μην υπερβαίνει τους 250°C (482°F).

(2) Το υλικό να είναι άκαυστο σύμφωνα με το πρότυπο ASTM (2011) E136.

(3) Το υλικό να έχει ελάχιστη θερμοκρασία τήξης τους 1350°C (2462°F).

Στο πλαίσιο αυτό η Διοικητική Αρχή Σηράγγων (Δ.Α.Σ) πραγματοποίησε μία ανάλυση επικινδυνότητας οδικών σηράγγων χωρίς την εμπλοκή οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα (ΥΥΜΔ, -). Η ανάλυση αυτή αναφέρεται και στις απαιτήσεις για την δομοστατική επάρκεια της μόνιμης επένδυσης σε περίπτωση πυρκαγιάς διάρκειας δύο ωρών. Σύμφωνα με την παραπάνω μελέτη για την εξασφάλιση της δομοστατικής επάρκειας ισχύουν τα εξής:

A) Σε περιπτώσεις σηράγγων με επί τόπου έγχυτη από σκυρόδεμα επένδυση η θερμοκρασία στην επιφάνεια του σκυροδέματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 380°C ενώ η θερμοκρασία στον οπλισμό δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 250°C (με επικάλυψη 25 mm).

B) Σε σήραγγες με επένδυση από προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος θα πρέπει να αποκλείεται η αποφλοίωση (spalling).

Σύμφωνα, εξάλλου, με την ΙΤΑ (2004) ο δομικός σχεδιασμός σηράγγων ανθεκτικών σε φωτιά κρίνεται απαραίτητος. Στόχοι της πυρανθεκτικότητας των σηράγγων είναι να επιτραπεί η δυνατότητα εκκένωσης της

σήραγγας από τους χρήστες και η εξασφάλιση ασφαλών συνθηκών για τις ενέργειες διάσωσης. Παράλληλα η ΙΤΑ έχει προτείνει οδηγίες για τα κριτήρια σχεδιασμού των σηράγγων ανάλογα με το είδος των οχημάτων που κινούνται εντός αυτής αλλά και το είδος της σήραγγας, όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.3 (ΙΤΑ, 2004).

Πίνακας 12-8: Απαιτήσεις σύμφωνα με την ΙΤΑ (2004)

Τύπος Οχήματος	Σήραγγα κάτω από μεγάλη κατασκευή	Σήραγγα σε ασταθές έδαφος	Σήραγγα σε σταθερό έδαφος	Σήραγγα Cut & Cover
Αυτοκίνητα/Βαν	ISO-834 60 min	ISO-834 60 min	1	1
Φορτηγά/Βυτιοφόρα	RWS/HC 120 min	RWS/HC 120min	2	2

1 Η ασφάλεια δεν αποτελεί κριτήριο και συνεπώς δεν απαιτείται ανθεκτικότητα στην πυρκαγιά. Παρόλα αυτά υπάρχουν οι παρακάτω απαιτήσεις :

- ISO-834 για 60 min στις περισσότερες περιπτώσεις
- Καμία προστασία αν το σύστημα πυροπροστασίας είναι τόσο ακριβό σχετικά και με το κόστος αλλά και την ενόχληση από τις εργασίες αποκατάστασης μετά από μία πυρκαγιά.

2 Η ασφάλεια δεν αποτελεί κριτήριο και συνεπώς δεν απαιτείται ανθεκτικότητα στην πυρκαγιά. Παρόλα αυτά υπάρχουν οι παρακάτω απαιτήσεις :

- RWS/HC για 120 min αν απαιτείται πυροπροστασία λόγω κάποιας ιδιότητας (π.χ σήραγγα κάτω από κτίριο).
- ISO για 120 min στις περισσότερες περιπτώσεις
- Καμία προστασία αν το σύστημα πυροπροστασίας είναι τόσο ακριβό σε σχέση με το κόστος κατασκευής

## 12.5 Μέτρα προστασίας από την φωτιά

### 12.5.1 Είδη προστασίας

Η προστασία των σηράγγων από πυρκαγιές απαιτεί μια προσέγγιση που συνδυάζει την εφαρμογή μεθόδων πυροπροστασίας καθώς και των συστημάτων διαχείρισης κινδύνου (όπως οι διαδικασίες εκκένωσης, διαδικασίες επικοινωνίας, απαγωγή καπνού, κλπ.) (Sakkas, et al., 2013). Στην φάση του σχεδιασμού ο μηχανικός καλείται να προσδώσει στην κατασκευή τον απαιτούμενο βαθμό πυρασφάλειας συνδυάζοντας μεθόδους ενεργητικής και παθητικής πυροπροστασίας.

### 12.5.2 Ενεργητική προστασία

Με τον όρο ενεργητική πυροπροστασία εννοούμε όλα τα μέτρα που απαιτούνται για την καταστολή της πυρκαγιάς αλλά και τη διαχείριση του κινδύνου. Η ενεργητική πυροπροστασία περιλαμβάνει το σύνολο του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που εγκαθίσταται σε μία κατασκευή και είναι απαραίτητος για την έγκαιρη ανίχνευση μιας πυρκαγιάς ή την άμεση αντιμετώπισή της πριν αυτή καταστεί ανεξέλεγκτη. Η ενεργοποίηση των μέσων κατάσβεσης μπορεί να πραγματοποιείται είτε με χειροκίνητη επέμβαση είτε αυτόματα, δηλαδή να ενεργοποιούνται από κάποιο αισθητήριο όπως για παράδειγμα με αισθητήρες για την αύξηση της θερμοκρασίας, τον καπνό κ.α (TEE, -). Ο ρόλος της ενεργητικής πυροπροστασίας είναι να αποτρέπει την εξάπλωση της πυρκαγιάς από το ένα όχημα στο άλλο, κάνοντας και το έργο των σωστικών συνεργείων ευκολότερο (Brinson, 2010).



Εικόνα 12.12: Συστήματα ψεκασμού νερού

Οι δύο πιο κοινές μορφές των ενεργητικών μέτρων προστασίας που χρησιμοποιούνται στις σήραγγες είναι τα συστήματα εξαερισμού και τα συστήματα καταιονισμού (Εικόνα 2.9). Τα συστήματα αερισμού δεν μπορούν να καταστείλουν μία πυρκαγιά από μόνα τους αλλά μόνο σε συνδυασμό με τα συστήματα καταιονισμού. Στόχος των συστημάτων αερισμού είναι η απομάκρυνση του καπνού και των τοξικών αερίων από τη σήραγγα με τέτοιο τρόπο που να επιτυγχάνεται η ασφαλής απομάκρυνση των χρηστών της σήραγγας από την πυρκαγιά. Η προσφορά των συστημάτων αερισμού είναι αρκετά σημαντική, όπως φάνηκε και στην περίπτωση της πυρκαγιάς στη σήραγγα του Mont – Blanc, όπου θα μπορούσε η καταστροφή να ήταν σαφώς μικρότερη αν τα συστήματα αερισμού είχαν λειτουργήσει σωστά.

Τα συστήματα καταιονισμού περιλαμβάνουν τους ψεκαστήρες, τα συστήματα κατακλυσμού και το σύστημα ομίχλης νερού. Σχετικά με την αποτελεσματικότητα των συστημάτων καταιονισμού υπάρχει μία έντονη διαφοροποίηση στις απόψεις καθώς άλλοι εκτιμούν ότι είναι αποδοτικά ενώ αντίθετα άλλοι εκτιμούν ότι όχι μόνο δεν αποδίδουν αλλά μπορεί να δυσχεραίνουν και την κατάσταση (Beard & Carvel, 2005). Τα προβλήματα που μπορούν να προκύψουν από τη χρήση των ψεκαστήρων νερού είναι:

- Το νερό μπορεί να προκαλέσει έκρηξη στο καύσιμο ή οποιαδήποτε άλλη χημική διεργασία
- Το νερό που εξατμίζεται μπορεί να προκαλέσει προβλήματα υγείας και ορατότητας στους χρήστες
- Η αποδοτικότητα τους είναι μικρή για πυρκαγιές μέσα σε οχήματα
- Η συντήρησή τους είναι αρκετά ακριβή

### 12.5.3 Παθητική προστασία

Τα μέτρα παθητικής πυροπροστασίας είναι εκείνα που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του δομήματος της σήραγγας. Αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της κατασκευής της σήραγγας και παραμένουν εκεί για όλη τη διάρκεια της ζωής της δημιουργώντας ένα εμπόδιο στην εξάπλωση της πυρκαγιάς με στόχο τη διατήρηση της ακεραιότητας των δομικών στοιχείων της (σκυροδέμα και χάλυβα οπλισμού), ενώ παράλληλα δεν απαιτούν συντήρηση σε αντίθεση με ενεργητικά μέτρα προστασίας. Γενικότερα ο ρόλος της παθητικής πυροπροστασίας είναι:

- Η ελαχιστοποίηση του ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας εντός του σκυροδέματος και του οπλισμού (εφόσον υπάρχει), έτσι ώστε η δομική ακεραιότητα να διατηρείται κατά τη διάρκεια και μετά την πυρκαγιά.
- Να μειωθεί ή να εξαλειφθεί ο κίνδυνος εκρηκτικής αποφλοώσης και απώλειας της επιφάνειας του σκυροδέματος

Οι μέθοδοι παθητικής πυροπροστασίας διακρίνονται σε εξωτερικές (μόνωση) και εσωτερικές (σχεδιασμός σκυροδέματος). Τα εξωτερικά συστήματα πυροπροστασίας περιλαμβάνουν την εφαρμογή ειδικών κονιαμάτων στην επένδυση ή στον οπλισμό της σήραγγας και την εφαρμογή πλακών πυροπροστασίας σε όλη την περίμετρο της σήραγγας (Both et al., 1999). Τα εσωτερικά συστήματα περιλαμβάνουν εφαρμογή ειδικών συνθέσεων σκυροδέματος, προσθήκη πρόσθετων σκυροδέματος, διαφοροποίηση στον τύπο των αδρανών καθώς και εφαρμογή ινών πολυπροπυλενίου ή χαλύβδινων ινών.

Φαινομενικά, μία μέθοδος παθητικής πυροπροστασίας θα ήταν η χρήση στρωμάτων σκυροδέματος μεγάλου πάχους τα οποία θα θυσιάστούν σε περίπτωση πυρκαγιάς χωρίς να προκληθεί ωστόσο κατάρρευση της σήραγγας. Ωστόσο, η τοποθέτηση υπερογκών ποσοτήτων σκυροδέματος είναι εξαιρετικά αναποτελεσματική, αντιοικονομική, ενώ παράλληλα προκαλεί διαφοροποίηση στο σχεδιασμό της σήραγγας. Ως εκ τούτου, αποτελεσματικές μέθοδοι παθητικής πυροπροστασίας είναι εκείνες που περιλαμβάνουν τη χρήση μη παραδοσιακών υλικών που έχουν εξαιρετικά υψηλή αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες και ισχυρές μονωτικές ιδιότητες (Davidson et al., 2013).

### 12.5.3.1 Εκτόξευση τσιμεντοειδών κονιαμάτων στην επένδυση της σήραγγας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ευάλωτο στην εκρηκτική αποφλοίωση όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Από την άλλη πλευρά τα κονιάματα τσιμεντοειδούς βάσης τα οποία περιέχουν αδρανή υλικά όπως βερμικουλίτη, μπορούν να παραμείνουν αναλλοίωτα ακόμα και μετά από την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες. Μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε υφιστάμενες σήραγγες όσο και σε νέες, υπό κατασκευή, σήραγγες. Όμως η κατασκευή της σήραγγας με τη χρήση αυτών των κονιαμάτων αντί του σκυροδέματος είναι απαγορευτική λόγω του υψηλού κόστους τους και για αυτό το λόγο εφαρμόζονται ως επικάλυψη της επένδυσης με ένα λεπτό στρώμα κονιάματος πάχους 50 mm ή λιγότερο ανάλογα με τις απαιτήσεις. Η εγκατάσταση των πυρίμαχων κονιαμάτων (π.χ. MeycoFireshield 1350) απεικονίζεται στην εικόνα 2.10.



Εικόνα 12.13: Εφαρμογή κονιάματος πυροπροστασίας (Δηλαβέρης, 2004)



Για την εγκατάσταση ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Αρχικά εφαρμόζεται ένα χαλύβδινο πλέγμα στην επένδυση της σήραγγας. Στη συνέχεια εκτοξεύεται το πυρίμαχο κονίαμα πάνω στο πλέγμα ανάλογα με το προβλεπόμενο πάχος (το πάχος εξαρτάται από το επιθυμητό επίπεδο πυροπροστασίας). Όμως έχουν αναφερθεί έντονα προβλήματα σχετικά με τη συνάφεια των υλικών στην επένδυση της σήραγγας. Επίσης τα πυρίμαχα κονιάματα πυροπροστασίας μπορούν να εφαρμοσθούν και σε άλλες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα όπως π.χ σε γέφυρες (Davidson et al., 2013).

Αυτή τη στιγμή στην αγορά υπάρχουν πέντε τύποι κονιαμάτων που χρησιμοποιούνται για την παθητική πυροπροστασία. Το πιο γνωστό, λόγω της εκτεταμένης χρήσης του, είναι το MEYCO Fireshield 1350 της εταιρείας BASF το οποίο αποτελείται από τσιμέντο Portland, ανόργανα αδρανή, νερό, ειδικά πρόσθετα και επιταχυντή. Το συγκεκριμένο κονίαμα μπορεί να εφαρμοσθεί είτε με εκτόξευση είτε με τη μορφή πυράντοχων πλακών. Εμποδίζει τόσο την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος που εκτίθεται σε θερμοκρασίες >300°C, αλλά και την εκρηκτική αποφλοιώση του. Σε δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Ολλανδικό κέντρο Έρευνας πυράντοχων υλικών (TNO), το υλικό ανταποκρίθηκε με επιτυχία στις απαιτήσεις της πυρκαγιάς RWS. Έχει εφαρμοσθεί σε διάφορες σήραγγες στο εξωτερικό (Σήραγγα Mitholz Ελβετία, Σήραγγα Soderled Σουηδία) αλλά και στην Ελλάδα, σε μία συνδετήρια σήραγγα του οδικού δικτύου της Κακιάς Σκάλας. Ο λόγος που εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη σήραγγα είναι ότι στο εσωτερικό της υπάρχουν καλώδια υψηλής τάσης τα οποία δεν πρέπει να εκτεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι βασικές ιδιότητες του υλικού αυτού σύμφωνα με τις δοκιμές της ΙΤΑ δίνονται στον πίνακα 2.9.

Πίνακας 12-9: Ιδιότητες υλικού πυροπροστασίας Meyco 1350

Φυσικές και Θερμικές Ιδιότητες (Meyco fireshiled 1350)	
Αντίδραση στη φωτιά	Κατηγορία A1
Θερμική αγωγιμότητα	0.41 W/m·K
Ειδική θερμότητα	830 J/kg·K
Πυκνότητα	1200 - 1800 kg/m <sup>3</sup>
Συντελεστής απορρόφησης	0.91
Υδαταπορροφητικότητα	18 %
Μηχανικές Ιδιότητες	
Μέτρο ελαστικότητας – E	7900 MPa
Αντοχή σε θλίψη	15-18 MPa
Αντοχή σε εφελκυσμό	1.5 MPa
Συμπληρωματικά στοιχεία	
Πορώδες	52%
pH (αλκαλικότητα)	< 12

Στο συγκεκριμένο κονίαμα λόγω της ευρείας χρήσης του, είναι διαθέσιμα και τα στοιχεία από τη θερμική δοκιμή που πραγματοποιήθηκε προσομοιώνοντας την καμπύλη RWS. Στον πίνακα 2.10 δίνονται οι θερμοκρασίες στη διεπιφάνεια του σκυροδέματος με το κονίαμα, για διάφορα πάχη του κονιάματος. Η δοκιμή θεωρείται επιτυχημένη για πάχος μεγαλύτερο ή ίσο με 50 mm, όπου η θερμοκρασία έχει τιμές χαμηλότερες από τις απαιτούμενες. Για μεγαλύτερο πάχος κονιάματος η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια είναι σαφώς χαμηλότερη ενώ αντίθετα για πάχη κονιάματος μικρότερα των 50 mm η θερμοκρασία είναι υψηλή και δεν προσδίδει ασφάλεια στην κατασκευή. Μετά τη δοκιμή το πάχος του κονιάματος το οποίο έχει εκτεθεί σε θερμοκρασία πάνω από τους 600°C έχει αποσυντεθεί και θα πρέπει να γίνει αποκατάσταση του αρχικού πάχους (Δηλαβέρης, 2004).

Πίνακας 12-10: Αποτελέσματα δοκιμών για το υλικό *Meyco Fireshield 1350* υπό την καμπύλη *RWS*

Πάχος κονιάματος (mm)	30 min (oC)	60 min (oC)	90 min (oC)	120 min (oC)
25	234	383	474	521
30	182	316	401	511
35	148	261	343	393
40	126	217	295	345
45	108	182	254	304
50	94	157	219	267
55	84	139	190	236
60	75	124	167	208
65	67	112	149	185
70	61	100	136	167
75	55	92	124	151

### 12.5.3.2 Δημιουργία πυράντοχης ασπίδας με τη χρήση πυράντοχων πλακών

Πέραν από την εφαρμογή των υλικών με τη διαδικασία της εκτόξευσης όπως αναφέρθηκε και παραπάνω υπάρχει η δυνατότητα επένδυσης της σήραγγας με πλάκες πυροπροστασίας. Ιστορικά, η επένδυση με πλάκες έχει χρησιμοποιηθεί για αισθητικούς λόγους (Beard & Carvel, 2005). Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, αρκετοί κατασκευαστές έχουν αναπτύξει συστήματα επένδυσης σηράγγων με πλάκες πυροπροστασίας που είναι ικανά να παρέχουν προστασία στη σήραγγα έναντι υψηλών θερμοκρασιών. Τα σύγχρονα συστήματα επένδυσης σήραγγας συνήθως αποτελούνται από προ-κατασκευασμένες άκαμπτες πλάκες, οι οποίες είναι άκαυστες και περιέχουν πυρίμαχα συστατικά (Davidson et al. 2013) (π.χ. πυριτικά άλατα ασβεστίου, γύψο και ενισχύονται από ίνες για την αποφυγή της αποσύνθεσής τους). Οι πλάκες τοποθετούνται απευθείας ή μία δίπλα στην άλλη και εφαρμόζονται με τρεις διαφορετικούς τρόπους (<http://www.fire-protection.gr/>):

- Εφαρμογή ως παραμένον ξυλότυπος. Οι πλάκες τοποθετούνται πριν από την σκυροδέτηση και ανά τακτά διαστήματα τοποθετούνται μεταλλικά αγκύρια (καρφιά) στις πλάκες για την πλήρη σύνδεση με το σκυρόδεμα.
- Με μηχανική στερέωση επί του σκυροδέματος. Οι πυράντοχες πλάκες σταθεροποιούνται πάνω στο σκυρόδεμα με τη χρήση μεταλλικών, άκαυστων αγκυριών. Η εργασία αυτή γίνεται μετά την απομάκρυνση του ξυλότυπου.
- Με μηχανική στερέωση σε απόσταση από το σκυρόδεμα, με τη χρήση κατάλληλων μεταλλικών προφίλ



Εικόνα 12.14: Εφαρμογή πλακών πυροπροστασίας (<http://www.promat-tunnel.com>)

Τα συστήματα επένδυσης με πλάκες πυροπροστασίας χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στις ευρωπαϊκές οδικές σήραγγες, όπου έχουν πραγματοποιηθεί περισσότερες από 100 εγκαταστάσεις. Αυτή η ανταπόκριση

οφείλεται στην ικανότητα των πλακών πυροπροστασίας να διατηρούν σε χαμηλά επίπεδα τη θερμοκρασία στην επένδυση σε περίπτωση πυρκαγιάς. Στην αγορά αυτή τη στιγμή υπάρχουν οι πλάκες από την εταιρεία PROMAT οι οποίες είναι κατασκευασμένες από πυριτικό ασβέστιο, είναι άφλεκτες και διατίθενται στο εμπόριο με την ονομασία PROMATECT – T (Davidson et al., 2013; <http://www.promat-tunnel.com>). Οι συγκεκριμένες πλάκες εξετάστηκαν και σε πλήρους κλίμακας δοκιμές για να αξιολογηθεί το επίπεδο πυροπροστασίας που προσφέρεται. Πιο συγκεκριμένα σε ένα τμήμα της σήραγγας Runehamar μήκους 75 m, που ήταν επενδεδυμένο με πλάκες προστασίας Promatect-T υπεβλήθη σε πυρκαγιά χρησιμοποιώντας ως πηγή ένα όχημα βαρέως τύπου. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, η θερμοκρασία κυμαινόταν σε τιμές άνω των 1300°C στην περιοχή της φωτιάς (Beard & Carvel, 2005). Μετά τη δοκιμή οι πλάκες πυροπροστασίας παρέμειναν άθικτες και η θερμοκρασία στην επένδυση της σήραγγας περιορίστηκε στους 200°C (Davidson et al., 2013).

### 12.5.3.3 Εφαρμογή διογκωμένων επιστρωμάτων στον οπλισμό της επένδυσης

Τα διογκωμένα επιστρώματα είναι εκτοξευόμενα συνήθως και εφαρμόζονται στον οπλισμό της κατασκευής (Εικόνα 2.12) που βρίσκεται σε κίνδυνο όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 12.15: Εφαρμογή διογκωμένων επιστρωμάτων στον οπλισμό (Davidson et al., 2013).

Τα διογκωμένα επιστρώματα όταν εκτεθούν σε θερμοκρασίες περίπου 300°C ή μεγαλύτερες, υφίστανται σημαντικούς μετασχηματισμούς, σχηματίζοντας στρώματα καμμένου άνθρακα. Το ανθρακώδες υλικό διαστέλλεται με την έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία ογκομετρικά 25-50 φορές. Το διογκωμένο πλέον υλικό έχει ισχυρές μονωτικές ιδιότητες και ιδιότητες πυραντίστασης, με την εφαρμογή ενός λεπτού στρώματος υλικού πάχους μόλις 2 mm. Τα διογκούμενα επιστρώματα δεν έχουν εφαρμοστεί ως υλικά πυροπροστασίας αν και δείχνουν ότι μπορούν να ανταποκριθούν σε θερμοκρασίες μέχρι και 1093°C. Για παράδειγμα, το Burn Barrier 46801 είναι μία διογκούμενη εποξική βαφή η οποία μπορεί να ανταποκριθεί σε άμεση έκθεση στη φλόγα και σε θερμοκρασίες άνω των 1093°C (Davidson et al., 2013). Οι ιδιότητες των υλικών πυροπροστασίας του εμπορίου δίνονται στον πίνακα 2.11.

### 12.5.3.4 Εσωτερική παθητική πυροπροστασία με τη χρήση ινών πολυπροπυλενίου

Η εσωτερική παθητική πυροπροστασία δύναται να πραγματοποιηθεί είτε με την εφαρμογή ινών πολυπροπυλενίου είτε με κατάλληλο σχεδιασμό του μίγματος του σκυροδέματος με παράλληλη χρήση ειδικών πρόσθετων.

Οι ίνες πολυπροπυλενίου (Εικόνα 2.13) εφαρμόζονται στο σκυροδέμα κατά τη διάρκεια της παρασκευής του και έχει αποδειχθεί ότι μετριαζουν την τάση του σκυροδέματος προς αποφλοίωση και σε κάποιες περιπτώσεις την αποτρέπουν. Πιο συγκεκριμένα σε μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τον Haack διαπιστώθηκε ότι σε βελτιστοποιημένα μίγματα σκυροδέματος με την προσθήκη ινών πολυπροπυλενίου δεν

παρατηρήθηκε αποφλοίωση ακόμα και κατά την έκθεση της επιφάνειας του σκυροδέματος σε θερμοκρασίες μέχρι και 1200°C (Davidson et al., 2013; Haack, 2004).

Γενικότερα έχουν αναπτυχθεί δύο θεωρίες σχετικά με τη λειτουργία των ιών πολυπροπυλενίου. Σύμφωνα με τη πρώτη οι ίνες τήκονται σε θερμοκρασία των 160°C σχηματίζοντας δίοδους μέσα στη μάζα του σκυροδέματος, επιτρέποντας έτσι στη περιεχόμενη υγρασία να διαφύγει σε μορφή υδρατμών. Αυτό πραγματοποιείται χωρίς να δημιουργείται εσωτερική πίεση αλλά προκαλώντας υψηλή διαπερατότητα και αποτρέποντας την εκρηκτική αποφλοίωση. Μία άλλη θεωρία υποστηρίζει ότι οι μικρο-ρωγμές που δημιουργούνται γύρω από τις ίνες συμβάλλουν στη μείωση της πίεσης του ατμού (Clement & Focaracci, 2011).

Η ποσότητα των ιών που εφαρμόζεται στο σκυρόδεμα διαφέρει ανάλογα με το επιθυμητό επίπεδο πυροπροστασίας, δηλαδή όσο μεγαλύτερη θερμική αντίσταση πρέπει να επιτευχθεί τόσο μεγαλύτερη ποσότητα εφαρμόζεται. Για παράδειγμα για την αντίσταση σε μία πυρκαγιά τύπου ISO-834 απαιτούνται περίπου 1kg/m<sup>3</sup> ιών, ενώ για αντίσταση σε πυρκαγιά τύπου RWS η ποσότητα μπορεί να αυξηθεί μέχρι περίπου 3kg/m<sup>3</sup>. Όμως δεν μπορούν να εφαρμόζονται μεγάλες ποσότητες ιών καθώς γίνεται πιο δύσκολη η άντληση και η εφαρμογή του σκυροδέματος.

Πίνακας 12-11: Ιδιότητες εμπορικών υλικών παθητικής πυροπροστασίας (CET, -; [www.sika.com](http://www.sika.com))

Κονίαμα / Πλάκα	Θερμοκρασιακές καμπύλες που μπορεί να ανταποκριθεί	Θερμική αγωγιμότητα ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) στους 300 K	Ειδική Θερμότητα ( $J/kg \cdot K$ ) στους 300 K	Πυκνότητα ( $kg/m^3$ )	Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)	Αντοχή σε θλίψη / /εφελευσμό (MPa)	Πορώδες %	Σκληρότητα	PH (αλκαλικότητα)	Συνάφεια με το σκυρόδεμα (MPa)	Υδαταπορροφητικότητα %
Cyc Feu 6	ISO 834	0.26	880	850							
Fendolite MII	ISO 834, HC, HCM	0.19		775					12-12.5		
Pyrocrete 241	ISO 834, HC	0.12	1500	881		6 /					
IR 4020	ISO 834, HC, HCM	0.26	880	850						4.17	
Sikacrete 213	ISO 834, HC, HCM,	0.23				2 /			12-12.5		
FireBarrier 135	ISO 834, HC, HCM,RABT, RWS	0.185	765	1150	4050	9 / 0.8	66%	90 Shore A	8	1.1	49 %
Meyco fireshield 1350	ISO 834, HC, HCM,RABT, RWS	0.41	830	1200-1800	7900	15-18/1.5	52%		<12	2	18%
Promatec-πλάκα	ISO 834, HC, HCM,RABT, RWS	0.175		940		9.3			12		
PST-system	ISO 834, HC, HCM,RABT, RWS	0.13	1050	800	1840	0.5/0.5	2%	90 Shore A	13	>0.5	

Η αποτελεσματικότητα της πυροπροστασίας με τη χρήση ινών πολυπροπυλενίου κρίνεται από τους παρακάτω παράγοντες : τον τύπο, τη διάμετρο και το μήκος των ινών, την ποσότητα των ινών ανά κυβικό μέτρο, τον τύπο των αδρανών, το σχεδιασμό του σκυροδέματος, τη διαπερατότητα του σκυροδέματος, την περιεκτικότητα σε υγρασία του σκυροδέματος, το ρυθμό ροής της θερμότητας και τη μέγιστη θερμοκρασία.

Παρά το γεγονός ότι οι ίνες πολυπροπυλενίου προσφέρουν ένα σύστημα για την αποφυγή της αποφλοίωσης δεν προστατεύουν το σκυρόδεμα και τον οπλισμό του από τις αρνητικές επιπτώσεις της υψηλής θερμοκρασίας. Επίσης, η αποτελεσματικότητα των ινών πολυπροπυλενίου, χρήζει βελτιστοποίησης αναφορικά με τη χρήση τους σε σκυροδέματα υψηλής επιτελεστικότητας και αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα. Ακόμα, η αντοχή του σκυροδέματος μειώνεται απότομα λόγω της τήξης των ινών, ενώ η εναπομείνουσα θλιπτική αντοχή μετά τη φωτιά είναι ιδιαίτερα χαμηλή, καθιστώντας αναγκαία την εκτεταμένη επισκευή της κατασκευής.



Εικόνα 12.16: Ίνες πολυπροπυλενίου

Πέρα από την εφαρμογή των ινών πολυπροπυλενίου όπως αναφέρθηκε και παραπάνω μπορεί να σχεδιασθεί κατάλληλα το μίγμα του σκυροδέματος με σκοπό να γίνει πυράντοχο. Κάτι τέτοιο πραγματοποιήθηκε, χρησιμοποιώντας σε κατάλληλες αναλογίες τσιμέντο Portland τύπου Ι, πορσελάνη, σκωρία υψικαμίνων και ίνες πολυπροπυλενίου σε αναλογία 0.1% κ.ο.

Γενικά στην εσωτερική παθητική πυροπροστασία ανήκουν και οι μέθοδοι που αναφέρονται στον πίνακα 2.12.

Τέλος τα τελευταία χρόνια πληθαίνουν οι προσπάθειες για την προστασία του σκυροδέματος έναντι της πυρκαγιάς με τη χρήση νέων τεχνικών και υλικών. Οι διεθνείς οργανισμοί έχουν συστήσει ομάδες εργασίας με σκοπό τη συγγραφή προδιαγραφών για τον έλεγχο των μεθόδων παθητικής πυροπροστασίας των ευαίσθητων κατασκευών από σκυρόδεμα. Ενδεικτικά αναφέρεται η σύσταση της επιτροπής πυροπροστασίας οδικών σιράγγων (Fire Protection in Tunnels) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Σκυροδέματος E.F.N.A.R.C, η διεθνής επιτροπή της FIB (Fire Design of Concrete Structures) και το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα «Upgrading Tunnels» (UPTUN, 2008). Σύμφωνα με τις παραπάνω επιτροπές οι συνθήκες που πρέπει να εξασφαλίζει η κατασκευή σε περίπτωση πυρκαγιάς είναι με σειρά προτεραιότητας οι κάτωθι : α) αποφυγή της άμεσης κατάρρευσης της κατασκευής και της εκρηκτικής αποφλοίωσης του σκυροδέματος προκειμένου να δοθεί ο απαραίτητος χρόνος στους χρήστες για να την εγκαταλείψουν, και ως εκ τούτου η διατήρηση της θερμοκρασίας του σκυροδέματος σε θερμοκρασίες κάτω από τους 350°C β) η αποφυγή της κατάρρευσης προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα των σωστικών συνεργειών και των συνεργειών πυρόσβεσης που εισέρχονται σε αυτήν, μετά την εκκένωση της από τους χρήστες και γ) δυνατότητα εκ των υστέρων επισκευής της με το μικρότερο δυνατό κόστος προκειμένου αυτή να επανέλθει στην κατάσταση που βρισκόταν πριν την πυρκαγιά διατηρώντας τη στατική και αντισεισμική λειτουργία της στο ακέραιο (UPTUN, 2008).

Όμως, παρά την προσπάθεια που γίνεται από διάφορους οργανισμούς και επιτροπές τόσο σε εθνικό επίπεδο όσο και σε παγκόσμιο, η συντριπτική πλειοψηφία των σιράγγων παγκοσμίως δεν περιέχουν παθητική πυροπροστασία που να μπορεί να ανθίσταται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Παράλληλα η συντριπτική πλειοψηφία των σιράγγων δεν περιέχει ούτε συστήματα ενεργητικής πυροπροστασίας (Beard & Carvel, 2005). Εντούτοις, όπως αναλύθηκε εκτενώς παραπάνω, το πρόβλημα είναι υψίστης σημασίας καθώς από το 2000 μέχρι το 2005 συνέβησαν 37 πυρκαγιές σε σιράγγες που είχαν ως αποτέλεσμα την απώλεια 350 ανθρώπινων ζωών.

Πίνακας 12-12: Μέθοδοι εσωτερικής παθητικής πυροπροστασίας (UPTUN, 2008)

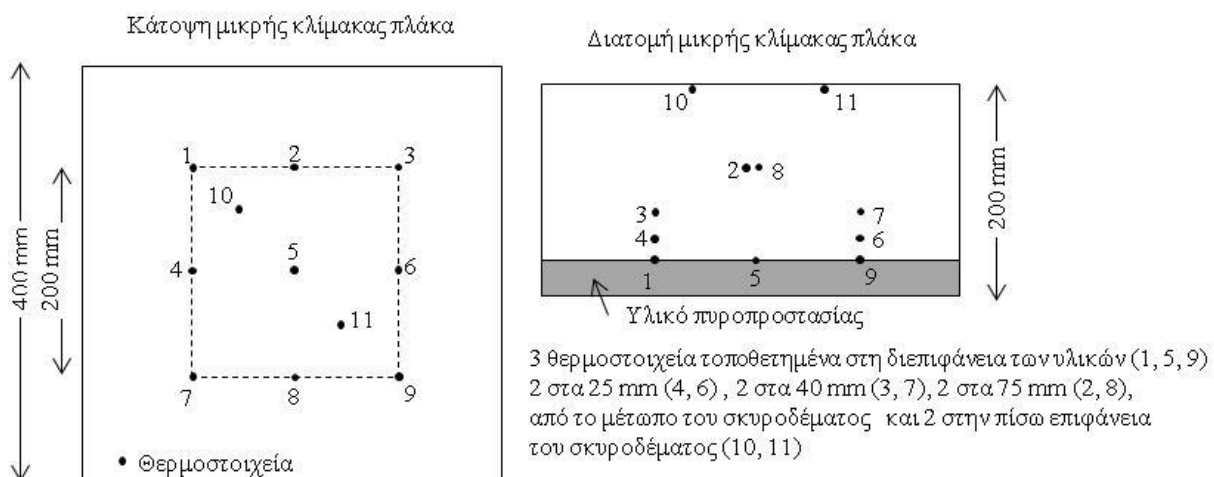
Μέθοδος	Αποτελεσματικότητα	Σχόλια
Αερακτικά πρόσθετα στο σκυρόδεμα	Αποτελεσματικά όταν υπάρχει χαμηλό ποσοστό υγρασίας	Μειώνουν τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος
Περιορισμός υγρασίας στο σκυρόδεμα	Μειώνει την πίεση στο εσωτερικό των πόρων του σκυροδέματος	Στις σήραγγες η υγρασία είναι υψηλή και δύσκολο να ελεγχθεί
Περιορισμός θλιπτικής αντοχής	Μειώνει την πίεση της εκρηκτικής αποφλοΐωσης	Αντιοικονομική λύση που οδηγεί σε επιλογή μεγαλύτερων διατομών
Επιλογή αδρανών	Η χρήση αδρανών χαμηλής διαστολής με μικρό μέγιστο κόκκο είναι αποτελεσματική	Σε σκυροδέματα με υψηλή υγρασία δεν αποφεύγεται η εκρηκτική αποφλοΐωση
Χρήση οπλισμού	Μειώνει την καταστροφή λόγω εκρηκτικής αποφλοΐωσης	Δεν είναι πάντα αποτελεσματική μέθοδος όπως για παράδειγμα στη σήραγγα της Μάγχης
Χρήση βοηθητικού οπλισμού	Μειώνει την καταστροφή λόγω εκρηκτικής αποφλοΐωσης	Η χρήση τους είναι δύσκολη σε λεπτές διατομές
Μεταλλικές ίνες	Μειώνει την καταστροφή λόγω εκρηκτικής αποφλοΐωσης	Αποτελεσματική λύση σε χαμηλές θερμοκρασίες
Επιλογή διατομής	Λεπτότερες διατομές μειώνουν την καταστροφή λόγω εκρηκτικής αποφλοΐωσης	Λύση όχι πάντα εφικτή

### 12.5.3.5 Δοκιμές για την απόδοση της προστασίας

Η πρότυπη δοκιμή ελέγχου παθητικής πυροπροστασίας βασίστηκε στις οδηγίες της E.F.N.A.R.C (European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete) που καλύπτουν την αξιολόγηση των συστημάτων παθητικής πυροπροστασίας της εκ σκυροδέματος μόνιμης επένδυσης των σηράγγων. Η δοκιμή περιλαμβάνει την έκθεση της επιφάνειας ενός δοκιμίου, που αποτελείται από σκυρόδεμα και το επιλεγμένο υλικό πυροπροστασίας, σε θερμοκρασιακές μεταβολές ανάλογα με την καμπύλη που έχει επιλεγεί να προσομοιωθεί. Παράλληλα μετρείται η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια των υλικών αλλά και σε διάφορες θέσεις εντός του δοκιμίου (Εικόνα 13.17). Όπως αναφέρεται και στις οδηγίες, υπάρχουν δύο δοκιμές ελέγχου παθητικής πυροπροστασίας:

- Μικρής κλίμακας δοκιμή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή ενδεικτικών δεδομένων απόδοσης του υλικού
- Μεγάλης κλίμακας δοκιμή που χρησιμοποιείται για να αποδειχθεί ότι ένα σύστημα προστασίας πληροί όλες τις απαιτήσεις των υλικών παθητικής πυροπροστασίας.

Από τον Σακκάς (2014) πραγματοποιήσε μικρής κλίμακας δοκιμή. Στη δοκιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε δοκίμιο διατομής 400 x 400 mm<sup>2</sup> και πάχους 200 mm. Το δοκίμιο του σκυροδέματος κατασκευάστηκε σύμφωνα με τις οδηγίες της EFNARC.



Εικόνα 12.17: Διάταξη θερμοστοιχείων στη μικρής κλίμακας δοκιμή

Όπως φαίνεται και στο σχήμα της εικόνας 13.17 για τη μέτρηση της θερμοκρασίας τοποθετούνται τρία θερμοστοιχεία στη διεπιφάνεια των υλικών (1, 5, 9), δύο στα 25 mm (4,6), δύο στα 40 mm (3,7), 2 στα 75 mm (2,8) από το μέτωπο του σκυροδέματος και 2 στην πίσω επιφάνεια του σκυροδέματος (10,11). Στις θέσεις 2,3,4,6,7,8,10,11 τοποθετούνται θερμοστοιχεία τύπου “K” τα οποία έχουν τη δυνατότητα μέτρησης μέχρι 1100°C, ενώ στις θέσεις 1,5,9 τοποθετούνται θερμοστοιχεία τύπου “S” τα οποία έχουν τη δυνατότητα μέτρησης σε θερμοκρασίες άνω των 1100°C. Για την τοποθέτηση των θερμοστοιχείων δημιουργούνται κατάλληλες οπές από την πίσω επιφάνεια του δοκιμίου του σκυροδέματος στη διάμετρο του θερμοστοιχείου μέχρι το επιθυμητό βάθος ανάλογα με την θέση τοποθέτησης. Τα θερμοστοιχεία στη συνέχεια συνδέονται με καταγραφέα δεδομένων ο οποίος μεταφέρει τα αποτελέσματα σε υπολογιστή με σκοπό να παρατηρείται η θερμοκρασία στο δοκίμιο κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

## 12.6 Το παρόν και το μέλλον

### 12.6.1 Ενεργητική προστασία

Σχετικά με την αποτελεσματικότητα των συστημάτων καταιονισμού υπάρχει μία έντονη διαφοροποίηση στις απόψεις καθώς άλλοι εκτιμούν ότι είναι αποδοτικά ενώ αντίθετα άλλοι εκτιμούν ότι όχι μόνο δεν αποδίδουν αλλά μπορεί να δυσχεραίνουν και την κατάσταση. Τα προβλήματα που μπορούν να προκύψουν από τη χρήση των ψεκαστών νερού είναι:

- Το νερό μπορεί να προκαλέσει έκρηξη στο καύσιμο ή οποιαδήποτε άλλη χημική διεργασία
- Το νερό που εξατμίζεται μπορεί να προκαλέσει προβλήματα υγείας και ορατότητας στους χρήστες της σήραγγας
- Η αποδοτικότητα τους είναι μικρή για πυρκαγιές μέσα σε οχήματα
- Η συντήρησή τους είναι αρκετά ακριβή

### 12.6.2 Παθητική πυροπροστασία

Δύο βασικά προβλήματα υπάρχουν στην περίπτωση της παθητικής πυροπροστασίας

- Ο χρόνος που απαιτείται για την εγκατάσταση των υλικών πυροπροστασίας
- Το κόστος των υλικών που χρησιμοποιούνται

Πάνω σε αυτήν την κατεύθυνση υπάρχει έντονη ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα της ανάπτυξης υλικών πυροπροστασίας χαμηλού κόστους.



## Βιβλιογραφία

- Αγγελόπουλος Γ, Γιώκαρης Σ, (2005). «Επίδραση πυκαγιάς σε σήραγγα- Μέθοδοι επισκευής και ενίσχυσης», 11<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο «Ενισχύσεις – επισκευές κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και ανασχεδιασμός υφιστάμενων κατασκευών».
- ASTM (2011). E136 – 12 Standard Test Method for Behavior of Materials in a Vertical Tube Furnace at 750°C.
- Barbauskas V, Peacock R (1992). “Heat release rate: The single most important variable in Fire hazard” Fire Safety Journal:18:255-272.
- Beard A, Carvel R (2005). “The Handbook of Tunnel Fire Safety” Thomas Telford Publishing: London.
- Both C, van de Haar PW, Tan GL, Wolsink GM (1999). “Evaluation of passive fire protection measures for concrete tunnel linings”, Proc. International Conference on tunnel fires and escape from tunnels, Lyon, France, 5-7 May, pp. 95-104.
- Brinson Alan (2010). “Active Fire Protection in Tunnels”, Proceedings Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt am Main, Germany.
- Caliendo C, De Guglielmo M (2012). “Accident Rates in Road Tunnels and Social Cost Evaluation”, Procedia - Social and Behavioral Sciences 53: 166 – 177.
- Carvel R (2004). “Fire size in tunnels” Phd Thesis. Heriot-Watt University, School of the Built Environment, Division of Civil Engineering Riccarton, Edinburgh.
- CEMBUREAU/BIBM/ERMCO (2004). “Improving fire safety in tunnels”, <http://www.bibm.eu/Content/www.bibm.eu/Documenten/improving%20fire%20safety%20in%20tunnels%20document.pdf>, 2004.
- CET (Cente d’etudes des tunnels). Data sheets on sprayable mortars for fire protection - <http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/>
- Clement F, Focaracci A (2011). “Fire Protection in Tunnels: Requirements, Solutions and Case histories”, Proceedings of World Tunnel Congress.
- Davidson MT, Harik IE, Davis DB (2013). “Fire impact and passive fire protection of infrastructure: State of the Art”, Journal of Performance of Constructed Facilities 27 (2):135-143.
- Δηλαβέρης Κ (2004). «**Σύστημα Παθητικής Πυροπροστασίας MEYCO Fix Fireshield 1350**», Ημερίδα Νέες Τεχνολογίες στα Υπόγεια Έργα, Αθήνα.
- EFNARC (2009) {European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete}, “Specification and guidelines for testing of passive fire protection for concrete Tunnel linings”.
- Felicetti R, Gambarova PG, Meda A (2006). “Residual behaviour of steel rebars and R/C sections after a fire”, Construction and Building Materials; 23:3546–3555.
- Frank P (-) “The Causes, Effects & Control of Real Tunnel Fires. An examination of what actually happened in recent incidents and the reaction of fire and rescue teams to these incidents”.
- Gary M (1916). “Fire tests on reinforced concrete buildings” (στα Γερμανικά), Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, Heft 11, Germany.
- Haack A (2004). “Technical options for fireproof tunnel linings—Limits, advantages and disadvantages of the various solutions”, Proceedings of the 1<sup>st</sup> Brazilian Congress on Tunnels and Underground Structures—International Seminar on South American Tunneling, São Paulo, Brazil:1–6.
- ITA (2004) {International Tunneling Association}. “Guidelines for structural fire resistance for road tunnels”, Working Group No.6 Maintenance and Repair.

- Jansson R (2006). “Liquid/steam pressure measurement inside concrete exposed to fire”, in Structures in fire, Proceedings of Fourth International Workshop, Aveiro, Portugal:745-776.
- Khoury GA (2000). “Effect of fire on concrete and concrete structures”, Progress in Structural Engineering and Materials:2;49–447.
- Khoury GA (2003). “Passive fire protection in tunnels”, Concrete, 37(2):31–36.
- Leitner A (2001). “The fire catastrophe in the Tauern Tunnel: experience and conclusions for the Austrian guidelines”, Tunnelling and Underground Space Technology 16:217-223.
- NCHRP (2011) {National Cooperative Highway Research Program}. “Design Fires in Road Tunnels, A synthesis of Highway practice” Transportation Research Board.
- NFPA (2011). “502 - Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways”, National Fire Protection Association.
- Οδηγία (2004)/54/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 29ης Απριλίου 2004 σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις ασφαλείας για τις σήραγγες του διευρωπαϊκού οδικού δικτύου.
- Phan LT (2008). “Pore pressure and explosive spalling in concrete”, Materials and Structures; 41:1623–1632.
- Promat (-). “Tunnel Fire Protection, For Tunnels Structures and Services”.
- ΠΔ (2007). Προεδρικό Διάταγμα 264, Τεύχος Πρώτο.
- Σακκάς Κ, Νομικός Π, Πάνιας Δ, Σοφιανός Α (2010). “Προστασία Σηράγγων από πυρκαγιά”. Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ: 383-389.
- Sakkas K, Nomikos P, Sofianos A, Panias D (2013). “Inorganic polymeric materials for passive fire protection of underground constructions”, Journal of Fire and Materials, 37:140-150.
- Σακκάς Κ (2014). “Προστασία των μέτρων στήριξης σηράγγων από πυρκαγιά”, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ.
- ΤΕΕ (-). «Πυροπροστασία», Σεμινάρια Νέων Μηχανικών.
- UPTUN (2008). Workpackage 2, “Fire development and mitigation measures, Runehamar Tunnel Fire Tests”, and Workpackage 4, Fire effects and tunnel performance: system structural response, Spalling review: types, assessment and prevention, Evaluation of present technology and design systems.
- ΥΥΜΔ (-). «Μέθοδος Ανάλυσης Επικινδυνότητας Οδικών Σηράγγων χωρίς εμπλοκή οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα», Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, Διοικητική Αρχή Σηράγγων.

## Κεφάλαιο 13

### 13. Παράρτημα

Πίνακας 13-1. Μεταροπές μονάδων

Μέγεθος	Μονάδες Imperial (Αγγλοσαξωνικές)	Μονάδες SI
Μήκος	1 in	0.025400 m
	1 ft	0.30480 m
	1 mile	1609.3 m
Εμβαδόν	1 in <sup>2</sup>	0.64516 × 10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup>
	1 ft <sup>2</sup>	0.092903 m <sup>2</sup>
	1 acre	4046.9 m <sup>2</sup>
Όγκος	1 in <sup>3</sup>	0.387 × 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
	1 ft <sup>3</sup>	0.028317 m <sup>3</sup>
	1 US gallon	3.7854 × 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
Μάζα	1 lbm	0.4536 kg
Πυκνότητα	1 lbm/in <sup>3</sup>	27680 kg/m <sup>3</sup>
Διαπερατότητα	1ft/year	0.9659 × 10 <sup>-8</sup> m/s
Παροχή	1 ft <sup>3</sup> /s	0.02832 m <sup>3</sup> /s
Δύναμη	1 lbf	4.4482 N (kg·m/s <sup>2</sup> )
Πίεση, τάση	psi (lbf/in <sup>2</sup> )	6894.8 Pa (N/m <sup>2</sup> )
Μοναδιαίο βάρος	1 lbf/ft <sup>3</sup>	0.1571 kN/m <sup>3</sup>
Ενέργεια (και ροπή)	1 ft lbf	1.3558 J (N·m)
Ενέργεια	1 Btu	1055.1 J
Ισχύς	1 ft lbf/s	1.3558 W (N·m/s)
Ισχύς	1 Btu/hr	0.29307 W
Αγωγιμότητα	1 Btu/ft hr °F	1.7307 W/m °C
	1 Btu/in hr °F	20.769 W/m °C
Πυκνότητα θερμικής ροής	1 Btu/in <sup>2</sup> hr	454.26 W/m <sup>2</sup>
Ειδική θερμότητα	1 Btu/lbm °F	4186.8 J/kg °C
Θερμοκρασία	1 °F	5/9 °C
	Temp °F	9/5 × Temp °C +32°
		9/5 × Temp °K -459.67°
Απόλυτο μηδέν	-459.67 °F	-273.15 °C
Επιτάχυνση της βαρύτητας	32.174 ft/s <sup>2</sup>	9.8066 m/s <sup>2</sup>
Ατμοσφαιρική πίεση	14.694 psi	0.10132 × 10 <sup>6</sup> Pa
Σταθερά Stefan-Boltzmann	0.1714 × 10 <sup>-8</sup> Btu/hr ft <sup>2</sup> °R <sup>4</sup>	5.669 × 10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> °K <sup>4</sup>
	°R=°F+459.67	°K=°C+273.15

Πίνακας 13-2. Σχέσεις μεταξύ ελαστικών σταθερών και ταχυτήτων για ισότροπα μέσα

Μετα-βλητές	E μέτρο Young	$\nu$ λόγος Poisson	K μέτρο ολικό	G μέτρο διάτμησης	$\lambda$ σταθερά Lamé	$\alpha$ P-ταχύτητα	$\beta$ S-ταχύτητα	$\beta/\alpha$
(E, $\nu$ )	-	-	$\frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}$	$\frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$	$\frac{E \cdot \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$	$\sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)\rho}}$	$\sqrt{\frac{E}{2(1 + \nu)\rho}}$	$\sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}}$
E,K	-	$\frac{3K - E}{6K}$	-	$\frac{3KE}{9K - E}$	$3K \left( \frac{3K - E}{9K - E} \right)$	$\sqrt{\frac{3K(3K + E)}{\rho(9K - E)}}$	$\sqrt{\frac{3KE}{\rho(9K - E)}}$	$\sqrt{\frac{E}{3K + E}}$
E,G	-	$\frac{E - 2G}{2G}$	$\frac{EG}{3(3G - E)}$	-	$G \left( \frac{E - 2G}{3G - E} \right)$	$\sqrt{\frac{G(4G - E)}{\rho(3G - E)}}$	$\sqrt{\frac{G}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{3G - E}{4G - E}}$
$\nu, K$	$3K(1 - 2\nu)$	-	-	$\frac{3K}{2} \cdot \left( \frac{1 - 2\nu}{1 + \nu} \right)$	$3K \cdot \left( \frac{\nu}{1 + \nu} \right)$	$\sqrt{\frac{3K(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)}}$	$\sqrt{\frac{3K}{2\rho} \cdot \left( \frac{1 - 2\nu}{1 + \nu} \right)}$	$\sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}}$
$\nu, G$	$2G(1 + \nu)$	-	$\frac{2G(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)}$	-	$G \left( \frac{2\nu}{1 - 2\nu} \right)$	$\sqrt{\frac{2G}{\rho} \left( \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} \right)}$	$\sqrt{\frac{G}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}}$
$\nu, \lambda$	$\lambda \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{\nu}$	-	$\lambda \left( \frac{1 - 2\nu}{2\nu} \right)$	$\lambda \left( \frac{1 + \nu}{3\nu} \right)$	-	$\sqrt{\frac{\lambda}{\rho\nu} (1 - \nu)}$	$\sqrt{\frac{\lambda (1 - 2\nu)}{\rho \cdot 2\nu}}$	$\sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}}$
K,G	$\frac{9KG}{3K + G}$	$\frac{3K - 2G}{2(3K + G)}$	-	-	$K - \frac{2G}{3}$	$\sqrt{\frac{K + \frac{4G}{3}}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{G}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{G}{K + \frac{4G}{3}}}$
K, $\lambda$	$9K \left( \frac{K - \lambda}{3K - \lambda} \right)$	$\frac{\lambda}{3K - \lambda}$	-	$\frac{3}{2}(K - \lambda)$	-	$\sqrt{\frac{3K - 2\lambda}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{3(K - \lambda)}{2\rho}}$	$\sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{K - \lambda}{K - \frac{2\lambda}{3}} \right)}$
G, $\lambda$	$G \left( \frac{3\lambda + 2G}{\lambda + G} \right)$	$\frac{\lambda}{2(\lambda + G)}$	$\lambda + \frac{2G}{3}$	-	-	$\sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{G}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{G}{\lambda + 2G}}$
$\alpha, \beta$	$\rho\beta^2 \left( \frac{3\alpha^2 - 4\beta^2}{\alpha^2 - \beta^2} \right)$	$\frac{\alpha^2 - 2\beta^2}{2(\alpha^2 - \beta^2)}$	$\rho \left( \alpha^2 - \frac{4}{3}\beta^2 \right)$	$\rho\beta^2$	$\rho(\alpha^2 - 2\beta^2)$	-	-	-

## **Ευρετήριο**