



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
**ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ  
ΣΗΡΑΓΓΩΝ**



ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΣΠΟΥΔΑΣΤΩΝ  
ΘΕΟΔΩΡΟΥ ΕΥΦΡΟΣΥΝΗ  
ΠΑΠΑΘΑΝΟΥ ΚΑΛΛΙΟΠΗ

ΕΠΟΠΤΕΥΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ  
ΕΙΡΗΝΗ ΒΓΕΝΟΠΟΥΛΟΥ

ΠΑΤΡΑ 2013

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Αρχικά, νιώθουμε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε την επιβλέπουσα καθηγήτρια της πτυχιακής μας κα Ειρήνη Βγενοπούλου, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό που με τις ανεκτίμητες συμβουλές, την απαραίτητη καθοδήγηση, τις καίριες τοποθετήσεις και την πολύτιμη πείρα συνέβαλλε καθοριστικά στην εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Στην συνέχεια, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κ Ζαχαρία Χρήστου, Ειδικό Τεχνικό Προσωπικό, που με τις ουσιαστικές υποδείξεις του συντέλεσε στην ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Τέλος θα θέλαμε να εκφράσουμε την ευγνωμοσύνη μας στις οικογένειες μας για την υπομονή, την ενθάρρυνση και την υποστήριξη τους σε όλα τα χρόνια της φοιτητικής μας πορείας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζεται μια συνολική αντιμετώπιση της έννοιας της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος επένδυσης υπόγειων κατασκευών. Στην Εισαγωγή της εργασίας αυτής παρατίθενται οι βασικές έννοιες κατασκευής σηράγγων και οι βασικοί τρόποι και μεθοδολογίες κατασκευής της τελικής επένδυσης των σηράγγων.

- Στο 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο επεξηγούνται οι έννοιες που συνδέονται με την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος και οι απαιτήσεις που συνδέονται με την επίτευξη ανθεκτικότητας.
- Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναλύονται οι παράγοντες και τα μέτρα επίτευξης της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος.
- Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναπτύσσονται οι έννοιες του ινοοπλισμένου και του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος καθώς και οι απαιτήσεις για ανθεκτικότητα σε αυτά.
- Τέλος το 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο έχει να κάνει με τις φθορές του σκυροδέματος στην μόνιμη επένδυση σηράγγων, και πιο συγκεκριμένα με το που και πότε εμφανίζονται, για ποιο λόγο και ποιες είναι αυτές.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Επι τόπου σκυροδέτηση	5
1.2. Προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος	7
1.3. Μεταλλικά πλαίσια	9
1.4. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	11
1.5. Φορτίσεις τελικής επένδυσης σήραγγας	13
1.6. Απαιτήσεις σχεδιασμού της τελικής επένδυσης	16
1.7. Ζητήματα σχεδιασμού	17
1.8. Μηχανήματα διάνοιξης σηράγγων	19

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Εισαγωγή	22
2.2. Απαιτήσεις ανθεκτικότητας σκυροδέματος επένδυσης σηράγγων	26
2.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα σε διάρκεια	30
2.4.Ενανθράκωση σκυροδέματος	31
2.5.Η δράση και οι πηγές των χλωριόντων	31
2.6.Αντοχή σε σεισμό	32
2.7.Οι συνηθέστεροι διαβρωτικοί παράγοντες που επηρεάζουν την δομή του σκυροδέματος	32
2.8.Παρουσίαση των σημαντικότερων παραγόντων που επηρεάζουν την αντοχή της επισκευής	33
2.9.Συνοπτική παρουσίαση όλων των παραγόντων που επιδρούν στην αντοχή της επισκευής	35

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΕΤΡΑ ΕΠΙΤΕΥΞΗΣ ΤΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

3.1 Μέθοδοι συντήρησης	37
3.1.1 Μέθοδοι που δεν επιτρέπουν ή επιβραδύνουν την εξάτμιση του σκυροδέματος	37
3.1.2 Μέθοδοι που υποκαθιστούν το νερό που εξατμίζεται	39
3.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την διάρκεια συντήρησης	40
3.1.4 Πρόσθετα μέτρα συντήρησης όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι χαμηλή	40
3.1.5 Πρόσθετα μέτρα συντήρησης όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι υψηλή	41
3.2 Μέτρα επίτευξης	42
3.2.1 Υδατοστεγείς μεμβράνες	42
3.2.2 Προστατευτικά επιστρώματα στο σκυρόδεμα	43
3.2.3 Εμποτισμός του σκυροδέματος με πολυμερή	44
3.2.4 Επανακαλοποίηση του σκυροδέματος	44
3.2.5 Αφαίρεση χλωριόντων από το σκυρόδεμα	45
3.2.6 Αφαίρεση υγρασίας από το σκυρόδεμα	45

3.2.7 Καθοδική προστασία	45
--------------------------	----

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**

4.1 Παραγωγή και σύνθεση	47
4.2 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα	47
4.2.1 Γενικά	47
4.2.2 Παραγωγή	49
4.2.2.1 Σύνθεση ινοπλισμένου σκυροδέματος	49
4.2.2.2 Ιδιότητες ινοπλισμένου σκυροδέματος	50
4.2.3 Εφαρμογές ινοπλισμένου σκυροδέματος	51
4.2.4 Τρόποι εφαρμογής	52
4.2.4.1 Αεροστατική εφαρμογή	52
4.2.4.2 Μέθοδος αρχικής ανάμειξης	52
4.2.4.3 Μέθοδος ψεκασμών (εκτοξευόμενο ινοπλισμένο σκυρόδεμα)	52
4.2.4.4 Στερεοποίηση	52
4.3 Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα	53
4.3.1 Γενικά	53
4.4 Χαρακτηριστικά σύνθεσης και αναλογίας	54
4.5 Ιδιότητες εφαρμοσμένης μηχανικής στο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα	58
4.5.1 Σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα	59
4.5.2 Ερπυσμός	59
4.5.3 Συντελεστής θερμικής επέκτασης	60
4.5.4 Αντίσταση πυρκαγιάς	60
4.5.5 Ικανότητα διάρκειας	61
4.6 Κατηγορίες αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος	62
4.6.1 Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα με βάση τη μέθοδο σύνθεσης	62
4.6.2 Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα με βάση τη μέθοδο συμπύκνωσης	62
4.7 Ιδιότητες νωπού αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος	65
4.8 Ιδιότητες στερεού αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος	70

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΦΘΟΡΕΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

5.1 Ρωγμές	73
5.1.1 Αίτια ρωγμών	78
5.2 Αποσάθρωση	80
5.3 Ενανθράκωση	80
5.4 Συστολή ξήρανσης	81
5.5 Διάβρωση	81
5.5.1 Συνέπειες διάβρωσης	83
5.5.2 Μέτρα πρόληψης	83
5.6 Επίδραση χλωριόντων	84
5.6.1 Παράμετροι που επηρεάζουν τη διάβρωση του χάλυβα από χλωριόντα	84

## **ΕΠΙΛΟΓΟΣ**

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αποκατάσταση της συνέχειας μίας οδού διαμέσου ενός ορεινού όγκου αποτελεί ένα σημαντικό και συχνό πρόβλημα, άρρηκτα συνδεδεμένο με την ανθρώπινη κοινωνική, οικονομική και στρατιωτική δραστηριότητα. Έτσι δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι η κατασκευή σιηράγγων αρχίζει από τους προϊστορικούς ακόμα χρόνους και συνεχίζεται έως και σήμερα. Οι σιηραγγες χρησιμοποιούνται για την επέκταση και βελτίωση του οδικού και σιδηροδρομικού δικτύου μιας περιοχής ή χώρας και απαιτούν συνδυασμό επίλυσης γεωλογικών και εδαφικών προβλημάτων, με παράλληλο γνώμονα την επίτευξη καλύτερου αισθητικού αποτελέσματος. Η ανάλυση και ο σχεδιασμός σιηράγγων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, γεγονός που οφείλεται στο ότι αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον έδαφος κυρίως υπό σεισμικές φορτίσεις. Μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1980, η βασικότερη εμπειρία σιηράγγων σε οδικά έργα ήταν η μελέτη και κατασκευή των σιηράγγων Αρτεμισίου στην Τρίπολη και Μετσόβου στην Ήπειρο, όμως μετά το 1993 και μέχρι σήμερα η εξέλιξη στην μελέτη και την κατασκευή τους έχει υπάρξει ραγδαία. Συνεπώς η γνώση στον τομέα της επιστημονικής ανάλυσης και τον σχεδιασμό σιηράγγων ανανεώνεται συνεχώς, με τον εμπλουτισμό από τα συμπεράσματα και τις εμπειρίες από τα διεθνή συνέδρια και τις αναμορφούμενες κατασκευαστικές διατάξεις.

Οι σιηραγγες είναι μια οριζόντια ή περίπου οριζόντια εκσκαφή μέσα στο έδαφος, ενώ όταν η εκσκαφή γίνεται κατακόρυφα τότε ονομάζεται φρέαρ. Η διατομή μιας σιηραγγας αποτελείται από την οροφή, τα δύο πλευρικά τμήματα και τη βάση. Η διάνοιξη σιηράγγων μέσα σε άρρηκτο βράχο γίνεται συνήθως χωρίς υποστήριξη. Αντιθέτως όταν η διάνοιξη γίνεται μέσα σε βραχώμαζα τότε γίνεται χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, αγκυρίων βράχου οροφής, μεταλλικών πλαισίων ή και συνδυασμός κάποιων από τα παραπάνω. Σε κάποιο βάθος μέσα σε έναν ορεινό όγκο αναπτύσσονται τάσεις που οφείλονται στο βάρος των υπερκείμενων γαιών, οι οποίες προκαλούν μετακινήσεις των μεμονωμένων βραχωδών τεμαχίων. Συνεπώς κατά τη διάνοιξη σιηραγγας σε υψηλής αντοχής άρρηκτο βράχο με ψαθυρή θραύση είναι δυνατόν να εμφανισθεί το φαινόμενο της εκτίναξης τεμαχίων βράχου, ενώ αν το πέτρωμα παρουσιάζει πιο πλαστική συμπεριφορά θα υπάρξει πιο αργή μετατόπιση βραχωδών τεμαχίων που τελικά θα καταπέσουν μέσα στη σιηραγγα. Σε κάθε περίπτωση η διάνοιξη σιηραγγας προκαλεί μετακινήσεις στο περιβάλλον πέτρωμα που τείνουν να μειώσουν τη διατομή του ανοίγματος, ενώ οι τάσεις που επικρατούν στη γειτονική περιοχή είναι κυρίως εφελκυστικές. Η χρήση ικανής υποστήριξης, τόσο σε άμεση εφαρμογή αμέσως μετά τη διάτρηση που ονομάζεται προσωρινή υποστήριξη, όσο και με την εφαρμογή της τελικής υποστήριξης που καλείται **τελική επένδυση** γύρω από το άνοιγμα, μειώνει και τελικά ελαχιστοποιεί τις αναμενόμενες μετακινήσεις. Εκτός από αυτήν τη λειτουργία, η τελική επένδυση των σιηράγγων αναλαμβάνει το ρόλο της παραλαβής των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται με τη μορφή ενός τόκου (φαινόμενα θόλου) κατά τη διάνοιξη της σιηραγγας. Για να διασφαλιστεί η προσωρινή υποστήριξη του εδάφους κατά τη φάση της διάνοιξης της σιηραγγας χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα προσωρινά μέσα υποστήριξης, τα οποία περιλαμβάνουν τη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, χαλύβδινων πλαισίων και μεταλλικών αγκυρίων. Συνήθως θεωρείται ότι τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης παύουν να αναλαμβάνουν φορτία με την πάροδο του χρόνου μετά την κατασκευή της τελικής επένδυσης, επειδή:

- το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προσωρινής υποστήριξης έχει μεγαλύτερο ερπυσμό από το έγχυτο σκυρόδεμα της τελικής επένδυσης
- τα χαλύβδινα πλαίσια συνήθως δεν έχουν την απαραίτητη επικάλυψη και διαβρώνονται

- τα αγκύρια διαβρώνονται και έρπουν λόγω παρεμπόδισης της μετακίνησης της κεφαλής τους



**Εικόνα 1**

Είναι λοιπόν προφανής ο σημαντικός ρόλος της τελικής επένδυσης της σήραγγας. Πρόκειται για ένα κατασκευαστικό σύστημα το οποίο τοποθετείται μετά την εκσκαφή της σήραγγας και αναλαμβάνει να επιτελέσει τις ακόλουθες λειτουργίες:

- § παροχή υποστήριξης του εδάφους
- § ανάληψη μακροχρόνιων και υδραυλικών φορτίων
- § διατήρηση του ανοίγματος της σήραγγας
- § περιορισμός της εισροής εδαφικού ύδατος (στεγανότητα)
- § υποστήριξη των συστημάτων της σήραγγας (φωτισμός, εξαερισμός, πυροσβεστικός εξοπλισμός κλπ)
- § παροχή της βάσης για την τελική επιφάνεια της σήραγγας

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Η επένδυση μιας σήραγγας μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την αρχική σταθεροποίηση της εκσκαφής όσο και την μόνιμη υποστήριξη του εδάφους.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την επένδυση των σηράγγων ποικίλουν και μπορεί να είναι:

- § επί τόπου έγχυτο σκυρόδεμα
- § προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος
- § μεταλλικά πλαίσια
- § εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

## 1.1 Επί τόπου σκυροδέτηση

Η επί τόπου σκυροδετούμενη τελική επένδυση μιας σήραγγας συνήθως κατασκευάζεται σε μετέπειτα στάδιο από την αρχική υποστήριξη του εδάφους, και αποτελεί ενδεδειγμένη επιλογή τόσο για μαλακά εδάφη όσο και για σκληρό βράχο. Μπορεί να κατασκευαστεί είτε από οπλισμένο είτε από άοπλο σκυρόδεμα και μπορεί να λάβει οποιοδήποτε γεωμετρικό σχήμα, το οποίο προσδιορίζεται από τη μέθοδο διάτρησης και τις εδαφικές συνθήκες. Η μόνιμη επένδυση από έγχυτο σκυρόδεμα που εφαρμόζεται σε όλο το μήκος της σήραγγας αποτελεί εκτός από στατικό στοιχείο και στοιχείο της τελικής επιφάνειας του εσωτερικού της σήραγγας. Η κατασκευή της μόνιμης επένδυσης από έγχυτο επί τόπου σκυρόδεμα περιλαμβάνει:

- Την μεταφορά επί τόπου στο έργο και την αποθήκευση των απαραίτητων υλικών παραγωγής του σκυροδέματος (τσιμέντο, αδρανή, νερό, πρόσμικτα, πρόσθετα κλπ), των οπλισμών, συνδέσμων, στηριγμάτων, κονιαμάτων, σωλήνων ενεμάτων, ρητινών επισκευής, άμμου κλπ καθώς και κάθε άλλου υλικού που απαιτείται για την πλήρη παραγωγή και εφαρμογή της μόνιμης επένδυσης σηράγγων και της θεμελίωσής της.
- Την διάθεση και μεταφορά του εργατικού δυναμικού και του μηχανικού εξοπλισμού που είναι απαραίτητοι για την παρασκευή, ανάμιξη, μεταφορά, διάστρωση, συμπύκνωση, δόνηση και συντήρηση του σκυροδέματος, τη δημιουργία αρμών, την εφαρμογή αμμοβολής καθώς και κάθε είδους ελέγχους και δοκιμές. Απαιτείται η διάθεση ειδικού σιδηρότυπου ή ξυλότυπου για την κατασκευή του θόλου και των λοιπών τμημάτων της σήραγγας (πχ θεμελίωση) καθώς και των εξωτερικών στοιχείων στα τεχνικά έργα διαμόρφωσης των στομιών της σήραγγας.

Τις εργασίες παραγωγής του σκυροδέματος, τοποθέτησης οπλισμού, έκχυσης, δόνησης κλπ του σκυροδέματος, προετοιμασίας για τις τσιμεντενέσεις επαφής χαμηλής πίεσης (2 έως 3 bar) και για την πλήρωση των κενών μεταξύ της μόνιμης επένδυσης και της εξωτερικής επιφάνειας (της επιφάνειας της στεγανωτικής μεμβράνης ή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή και του γεωυλικού), τοποθέτησης πλαστικών σωλήνων για την εκτέλεση των τσιμεντενέσεων επαφής, εκτέλεσης των τσιμεντενέσεων, διαμόρφωσης και πλήρωσης των αρμών, δημιουργίας σκοτίας στις θέσεις των αρμών ή/και στο ενδιάμεσο αυτών, επεξεργασίας της επιφάνειας του σκυροδέματος, καθώς και κάθε άλλη εργασία σχετικά με τους ελέγχους-μετρήσεις-δοκιμές που προδιαγράφεται στις ΠΕΤΕΠ και στη Μελέτη για την πλήρη παραγωγή κι εφαρμογή της μόνιμης επένδυσης της σήραγγας.



Η τελική επιφάνεια του σκυροδέματος της μόνιμης επένδυσης, αν δεν προβλέπεται διαφορετικά στην Μελέτη, θα πρέπει να είναι λεία, χωρίς ελαττώματα και κυψέλες. Επίσης, λαμβάνεται μέριμνα να τοποθετούνται στην επένδυση πριν από την σκυροδέτηση όλα τα προβλεπόμενα από την Μελέτη τεμάχια, τα οποία θα στηρίζονται κατάλληλα με εγκεκριμένη μέθοδο, για να εξασφαλίζεται ότι δεν θα μετατορισθούν κατά την διάρκεια της σκυροδέτησης. Τέτοια τεμάχια είναι όργανα, σωληνώσεις καλωδίων, οπλισμοί κλπ. Γενικά, όσον αφορά στα χρησιμοποιούμενα υλικά και στις εργασίες διάστρωσης, συμπύκνωσης, συντήρησης, καθώς και στις δειγματοληψίες, ελέγχους συμμόρφωσης και ποιοτικό έλεγχο του σκυροδέματος κατασκευής της μόνιμης επένδυσης σηράγγων, ισχύουν τα αναφερόμενα στις οικείες προδιαγραφές (Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος με τις τυχόν συμπληρώσεις και τροποποιήσεις του, Πρότυπα ΕΛΟΤ στα οποία αυτός παραπέμπει, κλπ).



**Εικόνα 2:** Τελική επένδυση σήραγγας με επί τόπου σκυροδέτηση.

Η ακολουθούμενη μέθοδος για την κατασκευή της τελικής επένδυσης αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

- Ø Προετοιμασία για τη διάστρωση του σκυροδέματος στο δάπεδο της σήραγγας
- Ø Τοποθέτηση οπλισμών σκυροδέματος μόνιμης επένδυσης
- Ø Διάστρωση σκυροδέματος σε θεμέλια
- Ø Εκτέλεση σκυροδέτησης
- Ø Αρμοί συστολής ή διαστολής
- Ø Κατασκευή ξυλότυπου ή μεταλλότυπου
- Ø Διάστρωση σκυροδέματος στις παρειές και στους θόλους της επένδυσης
- Ø Συμπύκνωση σκυροδέματος

Ø Επεξεργασία και επισκευή της επιφάνειας του σκυροδέματος μόνιμης επένδυσης

## **1.2 Προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος**

Η τελική επένδυση από προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος χρησιμοποιείται τόσο για την προσωρινή υποστήριξη όσο και για την τελική στήριξη του εδάφους. Η τεχνική περιλαμβάνει την μεταφορά στο έργο προκατασκευασμένων τεμαχίων υπό την μορφή κυκλικών τόξων τα οποία συναρμολογούνται στην εξωτερική επιφάνεια του διατηρητικού μηχανήματος διαμορφώνοντας έτσι έναν δακτύλιο. Εάν κριθεί απαραίτητο μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα υποστηρικτικό σύστημα δύο φάσεων ως το αρχικό μέσο υποστήριξης του εδάφους. Στην περίπτωση αυτή τα προκατασκευασμένα τεμάχια είναι ελαφρώς οπλισμένα, ενώ στη δεύτερη φάση της τελικής επένδυσης χρησιμοποιείται έγχυτο σκυρόδεμα. Η τελική επένδυση από προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος μπορεί βέβαια να εφαρμοστεί και ως υποστηρικτικό σύστημα μίας φάσης όπου τα τεμάχια παρέχουν και την αρχική και την τελική υποστήριξη του εδάφους. Στην περίπτωση αυτή ο σχεδιασμός και η κατασκευή της τελικής επένδυσης υπόκειται σε αυστηρούς περιορισμούς, ενώ τα τεμάχια μεταφέρονται στο έργο με ενωμένα με εμβύσματα και ήλους ώστε να περιοριστεί η εισροή νερού μέσα στη σήραγγα.



**Εικόνα 3:** Τελική επένδυση σήραγγας με προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος.

Η ακολουθούμενη μέθοδος για την κατασκευή της τελικής επένδυσης αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

- Κατασκευή προκατασκευασμένων στοιχείων.

Πρέπει να γίνεται είτε σε υφιστάμενη βιομηχανική μονάδα είτε σε ειδική εγκατάσταση παραγωγής σχεδιασμένη για το σκοπό αυτό. Οι Τεχνικές Εθνικές Προδιαγραφές ΠΕΤΕΠ 12-04-03-00 ορίζουν ότι οι εγκαταστάσεις αυτές και τα συστήματα παραγωγής θα πρέπει να διαθέτουν Σύστημα Διασφάλισης Ποιότητας και Ποιοτικού Ελέγχου τα οποία να συμμορφώνονται με τους Ελληνικούς Κανονισμούς σχετικά με τα υλικά, τις συνθέσεις, την εφαρμογή, την ωρίμανση και την αποθήκευση των υλικών των σκυροδεμάτων, των προκατασκευασμένων στοιχείων και των στερεωτικών υλικών.

Η γραμμή παραγωγής τύπου carousel πρέπει να είναι εξοπλισμένη με τα ακόλουθα:

- Εξοπλισμό μεταφοράς
- Καλούπια εξοπλισμένα με δονητή
- Σύστημα διανομής σκυροδέματος
- Θάλαμο συντήρησης



**Εικόνα 4**

Τα καλούπια που τοποθετούνται στη γραμμή παραγωγής θα τοποθετούνται τμηματικά εμπρός από κάθε θέση εργασίας πριν μεταφερθούν στο θάλαμο συντήρησης και επιστρέψουν στην γραμμή για το νέο κύκλο.

- Συντήρηση, ξεκαλούπωμα, αποθήκευση των προκατασκευασμένων στοιχείων.

Πριν την απομάκρυνση των στοιχείων από τα καλούπια πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι το σκυρόδεμα έχει αποκτήσει ικανοποιητική αντοχή έτσι ώστε να προστατεύεται το στοιχείο από οποιαδήποτε ζημιά κατά τη μεταφορά του. Η ανάπτυξη της αντοχής του σκυροδέματος κατά τη σκλήρυνσή του επηρεάζεται αποφασιστικά από τη θερμική επεξεργασία του. Γενικά για το ξεκαλούπωμα και την ασφαλή μεταφορά των στοιχείων απαιτείται αντοχή του σκυροδέματος 12 έως 20 MPa.

- Συναρμολόγηση των προκατασκευασμένων στοιχείων.

Τα προκατασκευασμένα στοιχεία πριν την εγκατάσταση επιθεωρούνται για τυχόν ζημιές και για τη σωστή θέση των στεγανωτικών παρεμβυσμάτων, ενώ τα στοιχεία με ελαττώματα δεν τοποθετούνται. Όλες οι πλευρές των προκατασκευασμένων τομεακών τεμαχίων πρέπει να καθαρίζονται παντελώς από ξένα υλικά και θραύσματα πριν 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 της διατομής της σήραγγας. Η ανέγερση της μόνιμης επένδυσης πρέπει να γίνεται με ειδικής κατασκευής μηχανικό σύστημα ή με χειροκίνητο σύστημα υποβοηθούμενο με μηχανικά μέσα.

- Στεγάνωση των προκατασκευασμένων στοιχείων.

Οι αρμοί διαμόρφωσης του κάθε δακτυλίου αλλά και μεταξύ των γειτονικών δακτυλίων στεγανώνονται με συνθετικά παρεμβύσματα τα οποία προσαρμόζονται σε συνεχή εγκοπή στην περιοχή του αρμού.

### **1.3 Μεταλλικά πλαίσια**

Αποτελούν γενικά μια ασυνεχή υποστήριξη που αποτελείται από δακτυλίους οι οποίοι απέχουν μεταξύ τους ώστε να λειτουργούν ανεξάρτητα.

Οι μορφές των μελών που τα αποτελούν, προσαρμόζονται στο περίγραμμα του ανοίγματος όσο το δυνατόν περισσότερο. Κατά συνέπεια, όπου το περίγραμμα είναι καμπύλο τα μέρη διαμορφώνονται στην ακριβή μορφή του περιγράμματος.

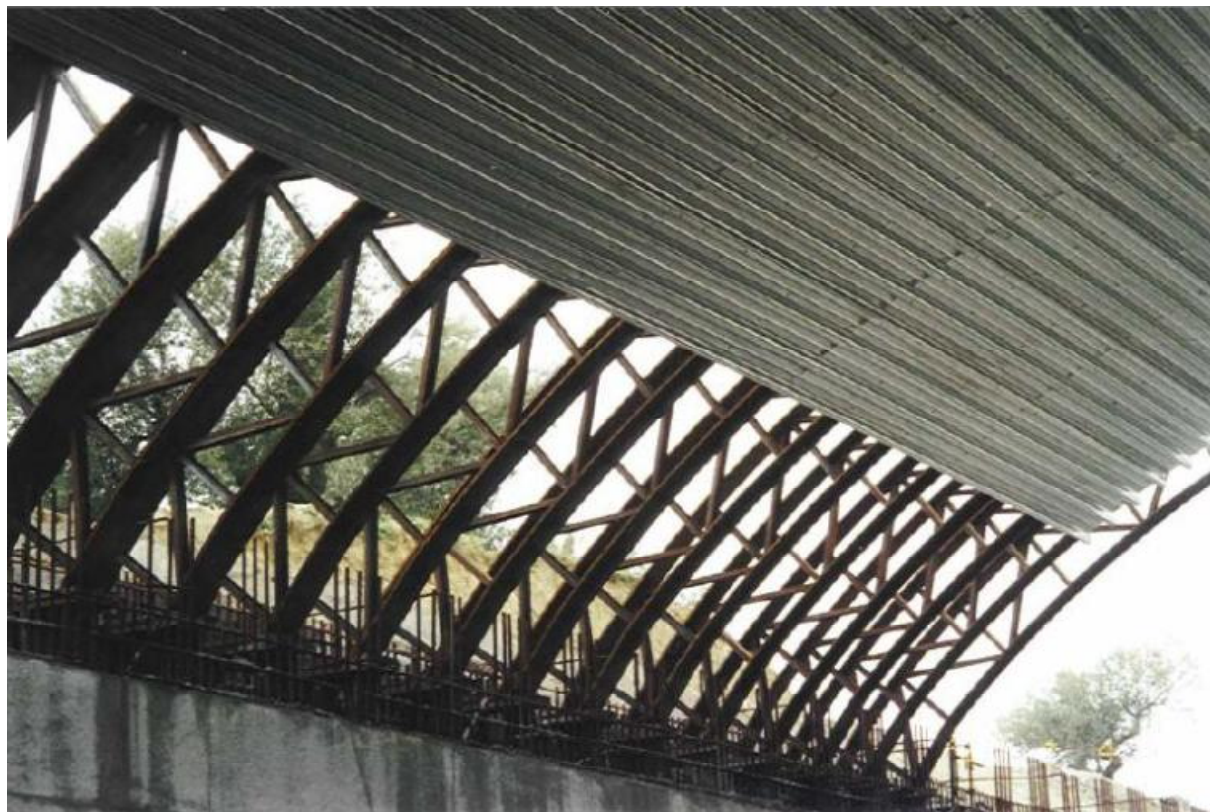


**Εικόνα 5**

Ο όρος πλαίσιο χαρακτηρίζει τη δύσκαμπτη, ασυνεχή κατά μήκος του υπογείου ανοίγματος, κατασκευή που τοποθετείται στο τοίχωμά του για την υποστήριξή του.

Τα περισσότερα από τα πλαίσια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προστασία, υποστήριξη, ή ενίσχυση σύμφωνα με τον τύπο της βραχομάζας και το μέγεθος του ανοίγματος. Διακρίνονται σε:

- Βαριά Πλάισια
- Ελαφρά Πλάισια



**Εικόνα 6 :** Σήραγγα Αιγίου

#### **1.4 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα**

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι ένα σκυρόδεμα που εφαρμόζεται υπό πίεση στην επιφάνεια της τελικής επένδυσης της σήραγγας και χρησιμοποιείται συχνά ως μέσο αρχικής υποστήριξης. Η πρόοδος στην τεχνολογία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οδήγησε στη χρήση του για την διαμόρφωση της τελικής επένδυσης σηράγγων. Μπορεί να εφαρμοστεί πάνω στο εκτεθειμένο έδαφος, στον χάλυβα οπλισμού, σε συγκολλημένο πλέγμα χάλυβα καθώς και σε μεταλλικά πλαίσια, ενώ χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ήλους και μπορεί να περιέχει μεταλλικές ή συνθετικές ίνες.

Η υποστήριξη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αποτελεί μια πολύ ευέλικτη κατασκευαστική μέθοδο, καθώς μπορεί να εφαρμοστεί ανεξάρτητα από τη γεωμετρία του φορέα, δεν χρειάζονται καλούπια, η συνεργασία της με άλλα στοιχεία, όπως αγκύρια, μεταλλικά πλαίσια, ράβδοι οπλισμού κλπ. είναι άριστη, ενώ η τελική κατασκευή μπορεί να γίνει σε διάφορα στάδια, ανάλογα με τη περίπτωση. Η ευελιξία αυτή είναι και το κλειδί της νέας μεθόδου αναφορικά με τη μείωση κόστους και χρόνου, αλλά ταυτόχρονα είναι και ο λόγος που πρέπει να εφαρμοστεί ένα διαφορετικό πακέτο απαιτήσεων για την επιτυχημένη εφαρμογή της. Οι απαιτήσεις αυτές έχουν να κάνουν με τη σχεδιαστική μέθοδο υποστήριξης, το μοντέλο της σύμβασης που θα χρησιμοποιηθεί και τη δομή της αλυσίδας: πελάτης – σύμβουλος πελάτη – επίβλεψη – ανάδοχος, ή οποία είναι κρίσιμη για την εξέλιξη των εργασιών.



**Εικόνα 7**

Το σκυρόδεμα που θα χρησιμοποιηθεί σαν μέρος της τελικής επένδυσης, θα πρέπει οπωσδήποτε να έχει ικανοποιητική ποιότητα και ανθεκτικότητα. Έτσι, ο σωστός χειρισμός της εισροής νερού, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για τη προσέγγιση της μεθόδου κατασκευής σηράγγων με μονολιθικό κέλυφος. Εάν οι τοπικές συνθήκες στο μέτωπο, προσομοιάζουν με έντονη βροχόπτωση, τότε η εφαρμογή της μεθόδου αυτής καθίσταται αδύνατη. Η συστηματική διάτρηση μπροστά από το μέτωπο σε συνδυασμό με την εφαρμογή της μεθόδου της προενεμάτωσης (pre-injection), μπορούν να δώσουν λύση σε αυτό το πρόβλημα. Το να βασιστεί κάποιος στη μέθοδο των προενεματώσεων και στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για να έχει μια τελείως στεγνή σήραγγα στη περίοδο χρήσης της, αποτελεί συνήθως ουτοπία. Σε ορισμένες σήραγγες, μερικές σταγόνες μπορεί να είναι αποδεκτές, ενώ σε άλλες όχι. Η συνειδητοποίηση της κατάστασης αυτής από την αρχή, θα οδηγήσει στη λήψη των σωστών μέτρων και στην επιτυχία του αρχικού σχεδιασμού.

Σε σύγκριση με τη παραδοσιακή μέθοδο, με τη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σαν προσωρινή υποστήριξη (το πάχος και η ποιότητα του οποίου είναι πολύ κοντά στην ικανοποίηση της ολικής στατικής απαίτησης) και της τελικής επένδυσης με έγχυτο σκυρόδεμα μεγάλου πάχους, η χρήση της μεθόδου της επένδυσης σηράγγων με μονολιθικό κέλυφος από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, μπορεί να είναι έως και 50% οικονομικότερη.



**Εικόνα 8:** Τελική επένδυση σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στη σήραγγα στο Lehigh της Pennsylvania.

### 1.5 Φορτίσεις τελικής επένδυσης σήραγγας

Ο καθορισμός των φορτίων που αναλαμβάνει η τελική επένδυση σε μία σήραγγα είναι μία σύνθετη διαδικασία, για την οποία μέχρι σήμερα δεν υπάρχει μία ευρέως αποδεκτή μέθοδος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα φορτία που προέρχονται από το περιβάλλον γεωυλικό δεν είναι μονοσήμαντα καθορισμένα, αλλά είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του συστήματος γεωυλικού – μέτρα άμεσης υποστήριξης – τελική επένδυση και εξαρτώνται από το χρόνο. Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική παρουσίαση και σχολιασμός των φορτίων που αναλαμβάνει η τελική επένδυση των σηράγγων και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό.

- *Ιδιο βάρος της επένδυσης*

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνεται κάθε άλλη πρόσθετη κατασκευή που θα παραμείνει μόνιμα στο έργο, πέραν της τελικής επένδυσης. Επίσης στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα φορτία που αναλαμβάνονται αρχικά από τα μέτρα άμεσης υποστήριξης, όπως είναι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, τα αγκύρια και τα μεταλλικά πλαίσια, τα οποία μεταφέρονται σταδιακά στην τελική επένδυση της σήραγγας μέσα στην τεχνική διάρκεια ζωής του έργου. Το ποσοστό των φορτίων που μεταφέρεται στην τελική επένδυση εξαρτάται από τις παραδοχές σχεδιασμού, τα χαρακτηριστικά των υλικών και τις γεωτεχνικές συνθήκες. Η φόρτιση της τελικής επένδυσης από τα αγκύρια οφείλεται κυρίως στη βαθμιαία αποφόρτισή τους με το χρόνο λόγω παγίωσης της κεφαλής τους, σε περίπτωση που η σήραγγα διανοίγεται σε γεωυλικό με ερπυστική συμπεριφορά και δευτερογενώς στη μακροχρόνια διάβρωσή τους, ενώ η φόρτιση από τα χαλύβδινα πλαίσια στην ανεπαρκή κάλυψη και στην επικράτηση δυσμενών γεωτεχνικών συνθηκών, όπως η διαβρωτική δράση του υπόγειου νερού σε όξινο περιβάλλον.



- *Ωθήσεις από το περιβάλλον τη σήραγγα γεωυλικό*

Η φόρτιση της τελικής επένδυσης από το περιβάλλον γεωυλικό μπορεί να είναι είτε έμμεση, λόγω της σταδιακής απενεργοποίησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης κατά τη διάρκεια ζωής του έργου (διάβρωση αγκυρίων και μεταλλικών πλαισίων, αυξημένος ερπυσμός εκτοξευόμενου σκυροδέματος κτλ), είτε άμεση λόγω της χρονικά εξαρτημένης συμπεριφοράς του περιβάλλοντος γεωυλικού, δηλαδή να οφείλεται στα φαινόμενα της διόγκωσης και του ερπυσμού του γεωυλικού εκ των διατμητικών τάσεων από τη διάνοιξη της σήραγγας. Ερπυσμός (όπως θα αναφερθεί και σε επόμενο κεφάλαιο) είναι το φαινόμενο της συνεχούς αύξησης των παραμορφώσεων του γεωυλικού υπό σταθερό εντατικό πεδίο. Η κατασκευή, όμως, της τελικής επένδυσης παρεμποδίζει την εκδήλωση των μακροχρόνιων παραμορφώσεων, με αποτέλεσμα τη συνεχή και αυξανόμενη φόρτισή της. Έντονη ερπυστική συμπεριφορά παρουσιάζουν κυρίως τα εδαφικά υλικά και οι μαλακοί ή αποσαθρωμένοι βράχοι. Το μέγεθος των φορτίων λόγω ερπυσμού εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του γεωυλικού και το ύψος υπερκειμένων, καθώς και το χρόνο κατασκευής της τελικής επένδυσης. Το φαινόμενο της διόγκωσης παρουσιάζεται σε ορισμένους αργιλικούς εδαφικούς σχηματισμούς ή σε βραχώμαζες με μεγάλη περιεκτικότητα σε ορισμένα αργιλικά ορυκτά. Η εκσκαφή της σήραγγας προκαλεί μείωση της μέσης τάσης στην πλαστική περιοχή και ανάπτυξη αρνητικής πίεσης πόρων με αποτέλεσμα την απορρόφηση ποσότητας ύδατος από το γεωυλικό και τη διόγκωσή του. Εφόσον η κατασκευή της τελικής επένδυσης δεν επιτρέπει την εξέλιξη του φαινομένου, παρατηρείται ανάπτυξη πιέσεων του γεωυλικού σε αυτή.

- *Υδροστατική πίεση*

Οι υδατικές πιέσεις στην τελική επένδυση της σήραγγας εξαρτώνται από τη θέση της σε σχέση με τον υδροφόρο ορίζοντα, από τον τρόπο κατασκευής και από τη λειτουργία της σήραγγας. Διακρίνονται σε εξωτερικές όταν η σήραγγα βρίσκεται κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (υδροστατικές πιέσεις, πιέσεις λόγω ροής ύδατος) και σε εσωτερικές σε περίπτωση που η σήραγγα λειτουργεί ως αγωγός νερού υπό πίεση. Συνήθως για την αποτόνωση των υδατικών πιέσεων κατασκευάζεται ειδικό σύστημα αποστράγγισης με γεωυφάσματα των οποίων, όμως, η αποτελεσματικότητα μέσα στην τεχνική διάρκεια ζωής του έργου διακατέχεται από μεγάλη αβεβαιότητα. Η πιθανή παροδική έμφραξη του συστήματος αποστράγγισης προτείνεται να λαμβάνεται υπόψη ως ομοιόμορφα κατανεμημένη και κάθετη στον φορέα πίεση 50 MPa.

- *Φορτία από υπερκείμενες ή παρακείμενες κατασκευές*

Η κατηγορία αυτή πρέπει να περιλαμβάνει τις κατασκευές που υφίστανται καθώς και αυτές που είναι δυνατόν να υπάρξουν στο μέλλον.

- *Κινητά φορτία λειτουργίας*

Τα φορτία αυτά αντιστοιχούν σε οχήματα SLW60 όσα και ο αριθμός των λωρίδων κυκλοφορίας.

- *Συστολή ξήρανσης*

Η επίδραση της συστολής ξήρανσης επιτρέπεται να λαμβάνεται υπόψη κατά τους υπολογισμούς ως ομοιόμορφη πτώση θερμοκρασίας κατά την παράγραφο 6.3.2.6 του ΕΚΩΣ.

- *Ομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας*

Θα λαμβάνεται, σύμφωνα με την παράγραφο 8.3.2.6 του ΕΚΩΣ 2000,  $\Delta T = \pm (2/3) 20 = \pm 13^{\circ}\text{C}$ , λόγω του υπόγειου χαρακτήρα του έργου. Ως μέση θερμοκρασία κατασκευής μπορεί, εκλείπει ακριβέστερων στοιχείων, να ληφθεί η  $t_m = 10^{\circ}\text{C}$ . Στις δυο ακραίες ίνες του φορέα προτείνεται να λαμβάνεται, ελλείψει ακριβέστερων στοιχείων, διαφορά θερμοκρασίας από τη μέση τιμή,  $\Delta T = \pm 7.5^{\circ}\text{C}$ .

- *Τυχόν φορτία από κατασκευαστικές δραστηριότητες στην επιφάνεια*

## Û Έκρηξη

Μπορεί να συμβεί μέσα στη σήραγγα κατά την διέλευση εκρηκτικών υλών. Για την περίπτωση αυτή είναι αποδεκτή η τοπική βλάβη της τελικής επένδυσης από την δράση του εκρηκτικού φορτίου, υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει κίνδυνος αλυσιδωτής κατάρρευσης του θόλου και είναι αποδεκτή η εκ των υστέρων δομική αποκατάσταση της βλάβης. Ως δράση σχεδιασμού θα ληφθεί πίεση  $100 \text{ kN/m}^2$ , μειούμενη στο μηδέν, εντός ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου. Επίσης η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει το φορτίο από πρόσκρουση οχήματος (χωρίς πρόκληση βλάβης) με επιβολή φορτίου  $60 \text{ kN/m}^2$  κατανεμημένο σε πλάτος 1.5 μέτρων και σε ύψος 1.5 μέτρων πάνω από την στάθμη του οδοστρώματος.

## Û Σεισμός

Η συμπεριφορά των σηράγγων σε σεισμό εξαρτάται κυρίως από την ακαμψία της σε σχέση με το περιβάλλον γεωυλικό., Συνήθως το περιβάλλον γεωυλικό είναι πολύ «άκαμπτο» σε σχέση με την τελική επένδυση της σήραγγας, με αποτέλεσμα το έργο να παρακολουθεί την κίνηση του γεωυλικού, χωρίς την ανάπτυξη επιπλέον φορτίων. Συνεπώς, η σεισμική φόρτιση των σηράγγων ανάγεται σε κινηματική επιβολή των σεισμικών παραμορφώσεων του εδάφους, οι οποίες όμως παραλαμβάνονται ευχερώς από τους αρμούς της τελικής επένδυσης. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ιδιαίτερος η περίπτωση στην οποία ο σεισμός συνοδεύεται με μόνιμες μετακινήσεις των σχηματισμών που διασχίζει η σήραγγα. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να συναντηθεί σε κλιτυοσήραγγες, όπου είναι πιθανή η δημιουργία κατολίσθησης λόγω σεισμού και στις σήραγγες που διασχίζουν ενεργά ρήγματα. Συμπερασματικά, ο σεισμός είναι μια φόρτιση που πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερος υπόψη :

**α)** στις περιοχές των στομίων των σηράγγων

- β) σε σήραγγες όπου το ύψος των υπερκειμένων δεν ξεπερνά το μισό της ισοδύναμης διαμέτρου της διατομής εκσκαφής
- γ) σε σήραγγες εντός κλιτύων εφόσον αναγνωρισθεί κίνδυνος εμφάνισης μηχανισμού γενικευμένης αστάθειας
- δ) σε περιοχές διέλευσης της σήραγγας που χαρακτηρίζονται από την παρουσία πιθανών ενεργών ρηγμάτων
- ε) σε σήραγγες εντός ιδιαίτερα μαλακών ή χαλαρών εδαφικών σχηματισμών
- στ) σε θέσεις διασταυρώσεων σηράγγων που βρίσκονται πλησίον σημαντικών ενεργών σεισμικών ρηγμάτων.

## 1.6 Απαιτήσεις σχεδιασμού της τελικής επένδυσης

Η επένδυση μιας σήραγγας είναι ένα δομικό σύστημα που διαφέρει από τα υπόλοιπα λόγω του γεγονότος ότι η αλληλεπίδραση με το περιβάλλον έδαφος είναι μια ακέραια πλευρά της συμπεριφοράς τους, της ευστάθειας τους και της καθολικής ικανότητάς τους για ανάληψη φορτίων. Η απώλεια ή η έλλειψη της υποστήριξης που παρέχεται από το περιβάλλον έδαφος μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία ή κατάρρευση της επένδυσης. Οι απαιτήσεις σχεδιασμού μιας σήραγγας συνίστανται στις παρακάτω:

- Ανθεκτικότητα

Οι σήραγγες είναι ακριβές κατασκευές που προορίζονται για μακροχρόνια χρήση, καθώς το να τεθεί εκτός λειτουργίας μια σήραγγα μπορεί να προκαλέσει τεράστια οικονομική ζημιά. Συνεπώς οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες και τα υλικά πρέπει να επιλεγθούν ώστε να αντέχουν τις συνθήκες που υφίστανται σε υπόγειες κατασκευές. Επίσης απαιτούν έλεγχο, επιθεώρηση, συντήρηση και αποκατάσταση σε μεγαλύτερο βαθμό από τις υπόλοιπες κατασκευές. Παρόλα αυτά, οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες και τα υλικά πρέπει να είναι τέτοια ώστε η αναμενόμενη συντήρηση να απλοποιείται όσο το δυνατόν και να επιτυγχάνεται μακροχρόνια ανθεκτικότητα.

Οι σήραγγες αυτοκινητοδρόμων είναι πιθανόν να εκτεθούν σε ακραία περιστατικά όπως πυρκαγιές, τα οποία προκύπτουν από συμβάντα μέσα στη σήραγγα. Ο σχεδιασμός της επένδυσης της σήραγγας πρέπει να λαμβάνει υπόψη την επίδραση μιας πυρκαγιάς στην επένδυση ώστε αυτή να είναι ικανή να αντέξει την υπερθέρμανση λόγω της φωτιάς για κάποιο χρονικό διάστημα χωρίς απώλεια της στατικής ικανότητας. Το μέγεθος του χρονικού αυτού διαστήματος είναι συνάρτηση της έντασης της αναμενόμενης πυρκαγιάς καθώς και του χρόνου αντίδρασης του πυροσβεστικού δυναμικού. Η επένδυση της σήραγγας πρέπει επίσης να υποστεί όσο λιγότερες ζημιές γίνεται ώστε η σήραγγα να τεθεί πάλι σε λειτουργία όσο το δυνατόν συντομότερο. Η προστασία από την πυρκαγιά μπορεί να διασφαλιστεί από την επικάλυψη του σκυροδέματος, τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες της επιφάνειας της σήραγγας και επίσης με την τοποθέτηση πλαστικών ινών στα μείγματα σκυροδέματος.

- Σκυρόδεμα υψηλής πυκνότητας

Το σκυρόδεμα υψηλής πυκνότητας παράγεται μέσω της χρήσης πολύ λεπτόκοκκου τσιμέντου και με την αντικατάσταση κάποιων υλικών όπως ιπτάμενη τέφρα και σκωρίες υψικαμίνων. Η περιεκτικότητα σε τσιμέντο σε ένα σκυρόδεμα υψηλής πυκνότητας είναι πολύ μεγάλη και το

γεγονός αυτό καθιστά δύσκολο το χειρισμό του ακόμα και σε ιδανικές συνθήκες. Απαιτούνται πολύπλοκα μείγματα με διάφορα πρόσμικτα και προσεκτικός έλεγχος του προστιθέμενου νερού για να διατηρήσει το σκυρόδεμα την πλαστικότητά του και να μπορεί να τοποθετηθεί στους ξυλότυπους. Επίσης η υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο συνεπάγεται υψηλή απαιτούμενη θερμοκρασία για την επίτευξη ρευστότητας. Ο προσεκτικός χειρισμός αυτών των υλικών είναι απαραίτητος για την παραγωγή ενός τελικού προϊόντος που θα ανταποκρίνεται στα απαιτούμενα ποιοτικά πρότυπα, ενώ τυχόν απροσεξίες ή ακατάλληλοι χειρισμοί μπορεί να προκαλέσουν εκτεταμένες ρηγματώσεις εξαιτίας συστολής ξήρανσης. Οι ρωγμές λόγω συστολής ξήρανσης μπορούν να μειώσουν την αποτελεσματικότητα του σκυροδέματος, να επηρεάσουν την ανθεκτικότητά του και πιθανόν να το καταστήσουν μη χρήσιμο (βλ.κεφ.5.4). Το υψηλής πυκνότητας σκυρόδεμα, εντούτοις, μπορεί να αποδειχθεί ενδεδειγμένη και επικερδής επιλογή σε πολλές κατασκευές σήραγγων, καθώς μπορεί να περιορίσει την εισροή εδαφικού νερού και να παρέχει σημαντική προστασία έναντι χημικής επίθεσης. Επίσης το υψηλής πυκνότητας σκυρόδεμα πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με προσεκτική επιθεώρηση και αυστηρή εφαρμογή των κατασκευαστικών διατάξεων κατά την κατασκευή.

- Προστασία έναντι διάβρωσης

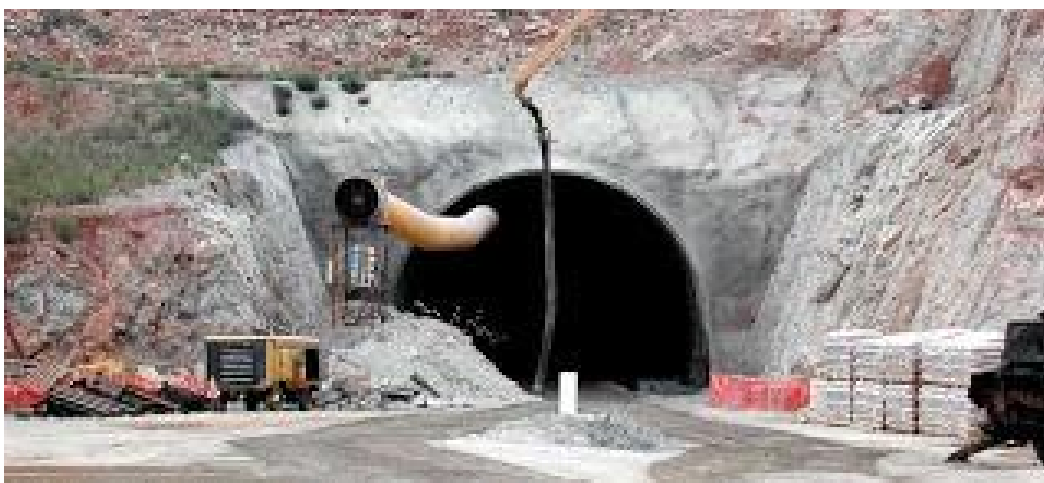
Η διάβρωση αναφέρεται στα προϊόντα χάλυβα που είναι εγκιβωτισμένα μέσα στο σκυρόδεμα. Το εδαφικό νερό, τα χημικά του εδάφους, τυχόν διαρροές, τα καυσαέρια των οχημάτων, χημικά προστασίας από τον παγετό, το νερό της βροχής, διαβρωτικά βακτήρια καθώς και άλλες ουσίες είναι όλες αιτίες διάβρωσης των μετάλλων. Ο σχεδιασμός της επένδυσης μιας σήραγγας πρέπει να προβλέπει τρόπους για αποφυγή ή περιορισμό των αιτίων που προκαλούν διάβρωση. Η προστασία έναντι διάβρωσης μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω τοποθέτησης επικαλύψεων όπως εποξειδικές ρητίνες, χρώματα κλπ. Επίσης το σκυρόδεμα υψηλής πυκνότητας μπορεί να παρέχει προστασία του χάλυβα οπλισμού. Η επικάλυψη του σκυροδέματος πρέπει να έχει τέτοιο μέγεθος ώστε να ελαχιστοποιήσει την εισροή νερού, το οποίο είναι συστατικό όλων σχεδόν των διεργασιών διάβρωσης. Εντούτοις, η αύξηση της επικάλυψης του σκυροδέματος αυξάνει το πάχος της επένδυσης της σήραγγας και συνεπώς και το μέγεθος της εκσκαφής και το συνολικό κόστος της σήραγγας. Συνεπώς η αύξηση της επικάλυψης του σκυροδέματος πρέπει να αξιολογείται όσον αφορά στην αύξηση του κόστους της σήραγγας σε σχέση με το όφελος που εξασφαλίζει. Ένας άλλος τρόπος προστασίας έναντι διάβρωσης είναι η καθοδική προστασία, όπου χρησιμοποιείται ένα εξωτερικό υλικό συνδεδεμένο σε ηλεκτρικό κύκλωμα, με σκοπό να προσανατολίσει την διάβρωση στο υλικό αυτό και να προστατεύσει το κυρίως υλικό που είναι το σκυρόδεμα. Τα καθοδικά συστήματα είναι πολύ αποτελεσματικά όταν είναι επαρκώς σχεδιασμένα, εγκατεστημένα και συντηρημένα. Τα εξωτερικά υλικά πρέπει να αντικαθίστανται τακτικά και ο ηλεκτρικός εξοπλισμός να επισκευάζεται επίσης τακτικά.

## 1.7 Ζητήματα σχεδιασμού

Όπως ειπώθηκε και πιο πάνω, η επένδυση μιας σήραγγας είναι ένα κατασκευαστικό σύστημα που διαφέρει από τα υπόλοιπα κατασκευαστικά συστήματα λόγω του γεγονότος ότι η αλληλεπίδρασή της με το περιβάλλον έδαφος είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι της συμπεριφοράς της, της ευστάθειάς της και της καθολικής ικανότητάς της για ανάληψη φορτίων. Η ικανότητα της επένδυσης να παραμορφώνεται υπό την επίδραση φορτίων είναι μια συνάρτηση της σχετικής

δυσκαμψίας της επένδυσης και του περιβάλλοντος εδάφους. Συνήθως, επένδυση μια σήραγγας κατασκευάζεται πιο εύκαμπτη από το περιβάλλον έδαφος, καθώς αυτή η ευκαμψία επιτρέπει στην επένδυση να παραμορφώνεται καθώς παραμορφώνεται το περιβάλλον έδαφος μετά την διάνοιξη της σήραγγας. Αυτή η παραμόρφωση επιτρέπει στο περιβάλλον έδαφος να επιστρατεύσει την αντοχή του και να σταθεροποιηθεί. Η παραμόρφωση της επένδυσης της σήραγγας επιτρέπει στις ροπές που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας να ανακατανεμηθούν έτσι ώστε η κύρια καταπόνηση στην επένδυση να είναι η ώθηση και το αξονικό φορτίο. Ο περισσότερο αποτελεσματικός σχεδιασμός επένδυσης μιας σήραγγας είναι αυτός που προσδίδει στην επένδυση υψηλή ευκαμψία και πλαστιμότητα.

Η επένδυση μιας σήραγγας διατηρεί την ευστάθειά της και την ικανότητα ανάληψης φορτίου διαμέσου της επαφής με το περιβάλλον έδαφος. Καθώς τα φορτία εφαρμόζονται σε ένα τμήμα της επένδυσης, η επένδυση ξεκινά να παραμορφώνεται και κατά τη διαδικασία αυτής της παραμόρφωσης αναπτύσσει παθητικές πιέσεις κατά μήκος των υπολοίπων τμημάτων της. Η παθητική αυτή πίεση αποτρέπει το λυγισμό ή την κατάρρευση της επένδυσης. Επίσης, η πλαστιμότητα της επένδυσης επιτρέπει το σχηματισμό αρθρώσεων στα σημεία υψηλών ροπών ώστε να μειώνονται οι ροπές κάμψης και η πρωτεύουσα καταπόνηση να είναι η αξονική. Αυτή η πλαστιμότητα παρέχεται στο σκυρόδεμα της επένδυσης διαμέσου του σχηματισμού ρηγματώσεων στο σκυρόδεμα. Η ελλιπής όπλιση ή η μη όπλιση βοηθούν στην έναρξη των ρηγματώσεων. Επίσης, οι κατασκευαστικοί αρμοί στα τοξωτά στοιχεία σκυροδέματος παρέχουν επίσης πλαστιμότητα.



**Εικόνα 9**

Κάθε σήραγγα είναι μοναδική. Οι εδαφικές συνθήκες, οι τρόποι και οι μέθοδοι διάνοιξης, οι συνθήκες φόρτισης, οι διαστάσεις της σήραγγας και τα υλικά κατασκευής ποικίλουν από σήραγγα σε σήραγγα. Κάθε σήραγγα πρέπει να αποτιμάται και να σχεδιάζεται με βάση τα δικά της στοιχεία, καθώς αυτά είναι που θα καταστήσουν την κατασκευή επιτυχή και τη σήραγγα λειτουργική.

- Η επιλογή των υλικών κατασκευής της επένδυσης της σήραγγας πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να διευκολύνει τη μεταφορά και την διαχείρισή τους μέσα στον περιορισμένο χώρο της σήραγγας. Τα κομμάτια των υλικών πρέπει να είναι μικρά και το μήκος τους πρέπει να

ελέγχεται ώστε να επιτρέψει τη διακίνησή τους μέσα στην κατακόρυφη και διαμήκη γεωμετρία της σήραγγας. Επίσης πρέπει να είναι μη τοξικά και μη εύφλεκτα.

- Οι λεπτομέρειες κατασκευής πρέπει να διαμορφώνονται έτσι ώστε να διευκολύνουν την κατασκευή. Για παράδειγμα, οι επικλινείς κατασκευαστικοί αρμοί σε επί τόπου σκυροδέτηση μπορούν να περιορίσουν τη δυσκολία που προκύπτει από την κατασκευή ενός διαφράγματος έναντι σε μία μη κανονική διανοιγμένη επιφάνεια.
- Οι διαδικασίες κατασκευής πρέπει να καθορίζονται έτσι ώστε να είναι κατάλληλες για τις συνθήκες που θα συναντηθούν μέσα στην σήραγγα. Οι συνθήκες αυτές συνήθως περιλαμβάνουν την ύπαρξη νερού, είτε εδαφικού είτε ρέοντος.

Οι κατασκευαστικοί αρμοί στην επένδυση των σηράγγων τοποθετούνται για να διευκολύνουν την κατασκευή. Η επί τόπου σκυροδέτηση απαιτεί κατασκευαστικούς αρμούς οι οποίοι μπορούν να είναι επικλινείς ή σχηματιζόμενοι. Τα προκατασκευασμένα τοξωτά στοιχεία σκυροδέματος μπορούν να έχουν βιδωμένους μέσω ήλων αρμούς. Οι αρμοί στην επένδυση των σηράγγων παρέχουν επίσης μείωση των τάσεων που προκαλούνται λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών. Οι επί τόπου σκυροδετούμενες επενδύσεις πρέπει να έχουν αρμούς συστολής κάθε 9 μέτρα, και αρμούς συστολής κάθε 37 μέτρα.

## 1.8 Μηχανήματα διάνοιξης σηράγγων

Τα μηχανήματα διάνοιξης σηράγγων είναι τα εξής:

- TBM
- EPB
- OFS

Πιο αναλυτικά:

### TBM

Το Μηχάνημα Διάτρησης Σηράγγων - TBM (Tunnel Boring Machine) κλειστού τύπου για σκληρά πετρώματα σχεδιάστηκε από την MITSUBISHI Ιαπωνίας και κατασκευάστηκε από την NEYRPIC FRAMATOME MECHANIQUE (NFM) Γαλλίας. Το μήκος του TBM, συμπεριλαμβανομένων των βαγονιών υποστήριξης και του κλειδιού California είναι 150μ. και το συνολικό βάρος του είναι 1.650 τόνοι.

Το TBM χωρίζεται σε 2 τμήματα:

- ✓ Την κεφαλή κοπής και τη νδιπλή αρθρωτή ασπίδα(πρόσθια και οπίσθια ασπίδα που διατρυπούν το έδαφος και κατασκευάζουν την σήραγγα.
- ✓ Τα βαγόνια υποστήριξης για την παροχή ενέργειας και την κάλυψη των απαιτήσεων ανεφοδιασμού του TBM.



**Εικόνα 10**

### **EPB**

Το EPB σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τη Γερμανική εταιρία HERRENKNECHT A.G., ώστε να λειτουργεί σε ετερογενή εδάφη.

Το EPB χωρίζεται σε δύο κύρια τμήματα:

- ✓ Την κεφαλή ολομέτωπης κοπής με ασπίδα
- ✓ Το σύστημα υποστήριξης(back – up)



**Εικόνα 11**

### **OFS**

Τα μηχανήματα τύπου Ανοικτής Ασπίδας (OFS) χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη σιράγγων σε χαλαρά εδάφη. Παρέχουν αρχική υποστήριξη στη στέψη του εδάφους και του μετώπου της εκσκαφής, τα οποία υποστηρίζονται από το περίβλημα της ασπίδας και τις πλάκες προπορείας. Το OFS του Μετρό της Αθήνας, στο οποίο είχε δοθεί αρχικά το όνομα «ΔΑΦΝΗ», σχεδιάστηκε από την εταιρεία HERRENKNECHT GmbH, για εκσκαφή σε πετρώματα με μέγιστη Αντοχή

Ανεμπόδιστης Θλίψης (UCS) της τάξης των 120 Pa. Είχε συνολικό μήκος 150 μ. με τα βαγόνια υποστήριξης και λειτουργούσε υπό ατμοσφαιρική πίεση.

Η ασπίδα αποτελείται από δύο κύρια μέρη:

- ✓ Πρόσθιο τμήμα διαμέτρου 9.495 χιλιοστά και μήκους 7.920 χιλιοστά, που περιλαμβάνει τις Πλάκες Προπορείας, τον Εκσκαφέα Σημειακής Κοπής, δύο Καδοφόρους Εκσκαφείς, δύο Τηλεσκοπικά Γεωτρύπανα, Έμβολα Υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, δύο Θαλάμους Ελέγχου και τον Μεταφορικό Κοχλία υλικών εκσκαφής.
- ✓ Οπίσθιο τμήμα διαμέτρου 9.460 χιλιοστά και μήκους 3.415 χιλιοστά, που περιλαμβάνει το Σύστημα Εγκατάστασης των Προκατασκευασμένων Στοιχείων δακτυλίων, τα Σημεία Έκχυσης του Πρωτογενούς Ενέματος, το Διάφραγμα Μόνωσης τύπου συρματόβουρτσας και τον Εξοπλισμό Άντλησης Υδάτων.



**Εικόνα 12**



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

#### 2.1 Εισαγωγή

Ανθεκτικότητα μιας κατασκευής θεωρούμε την αντίσταση της κατασκευής στην απώλεια κάποιων σημαντικών ιδιοτήτων της στη διάρκεια του χρόνου. Ανθεκτικότητα του σκυροδέματος θεωρούμε την αντίσταση του ,στην απώλεια της αντοχής του και στην αύξηση της διαπερατότητας του, στη διάρκεια του χρόνου. Το σκυρόδεμα αποτελεί το προστατευτικό περιβάλλον του σιδηροπλισμού και είναι το φυσικό εμπόδιο στην επαφή του οπλισμού με τα διάφορα διαβρωτικά συστατικά του περιβάλλοντος(οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου)και άλλες ουσίες που βοηθούν την διάβρωση όπως τα χλωριόντα.

Με την πάροδο του χρόνου το σκυρόδεμα μπορεί να χάσει την προστατευτική του ικανότητα π.χ λόγω ενανθράκωσης ,δηλ .αντίδρασης του διοξειδίου του άνθρακα με το υδροξείδιο του ασβεστίου που είναι ένα από τα τρία κύρια συστατικά του τσιμέντου που έχει σκληρυνθεί .Το αλκαλικό περιβάλλον που υπάρχει εσωτερικά μειώνεται  $\text{PH}<9$ , οπότε αρχίζει η διάβρωση του οπλισμού που λαμβάνει χώρα κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις. Η ταχύτητα δράσης εξαρτάται από τις συνθήκες περιβάλλοντος έκθεσης του σκυροδέματος καθώς και της σχέσης νερού/τσιμέντου ,επικάλυψης οπλισμού ,περιεκτικότητα τσιμέντου ,μεγίστου κόκκου αδρανών. Άλλες ουσίες που συντελούν στη διάβρωση του σκυροδέματος είναι τα χλωριόντα (περιβάλλον θαλάσσιο) λόγω του πορώδους του σκυροδέματος και των μεγάλων τριχοειδών πόρων εντός της μάζας του από μεγάλο συντελεστή νερού/τσιμέντο.

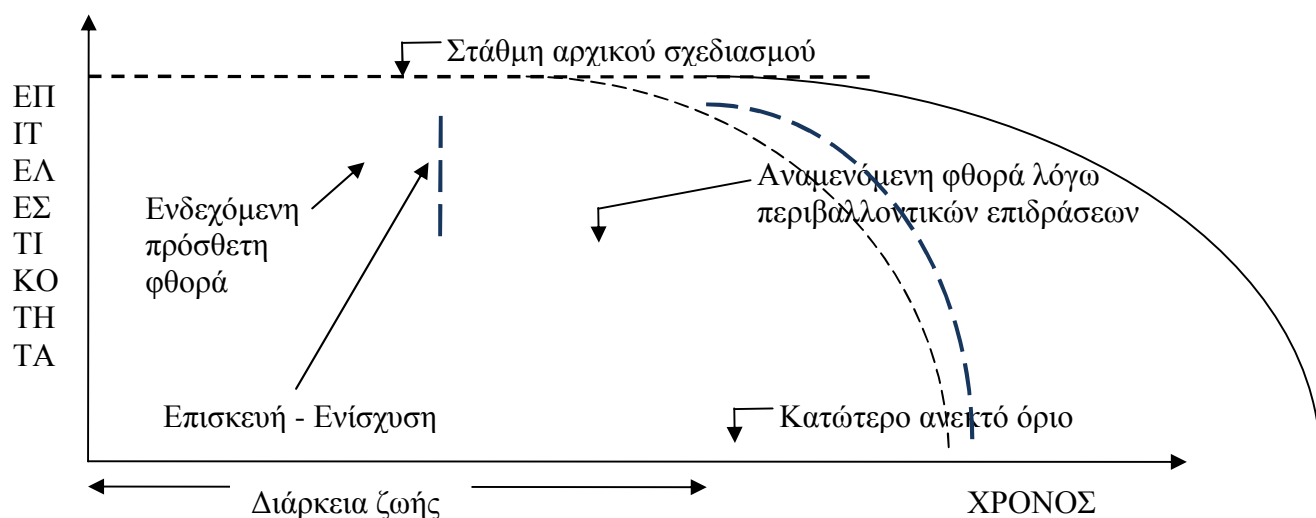
Η ανθεκτικότητα των κατασκευών εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- *Σχεδιασμός της κατασκευής:* Κατά την φάση του σχεδιασμού πρέπει εκτός από τις μηχανικές δράσεις να λαμβάνεται υπόψη το περιβάλλον εκθέσεως και οι αναμενόμενες επιρροές στο σκυρόδεμα. Ο σχεδιασμός σε ανθεκτικότητα αφορά την εκλογή του είδους του τσιμέντου, την επικάλυψή, την ποιότητα του σκυροδέματος (χαρακτηριστική αντοχή, διαπερατότητα, περιεκτικότητα σε αέρα) κ.λπ.
- *Φάση κατασκευής:* Έχει τεράστια σημασία να τηρηθούν οι σχεδιαζόμενες επικαλύψεις, να γίνει σωστή συμπύκνωση και συντήρηση, ώστε να επιτύχουμε την απόκτηση της προβλεπόμενης ποιότητας σκυροδέματος και να μειώσουμε τις πιθανότητες γηράνσεως.
- *Επιθεώρηση και συντήρηση της κατασκευής:* Όταν μετά από τακτή επιθεώρηση διαπιστωθούν φθορές στο σκυρόδεμα π.χ. από απολέπιση, αποφλοιώση, ρηγμάτωση, κηλίδες σκουριάς κ.λπ., και ληφθούν έγκαιρα μέτρα ώστε να ανασταλεί ή περαιτέρω φθορά, η κατασκευή διατηρείται σε καλή κατάστασή για ένα πολύ μεγαλύτερο διάστημα, αποφεύγονται δε οι δυσάρεστες εκπλήξεις από ενδεχόμενες δραματικές ενδείξεις μειωμένης αντοχής.

**Επιτελεστικότητα** (performance) μιας κατασκευής ονομάζουμε την ταυτόχρονη εκπλήρωση των εξής απαιτήσεων:

- Ασφάλεια, δηλαδή ικανότητα αναλήψεως των επιβαλλόμενων δράσεων, αλλά και αντοχή σε κόπωση.
- Λειτουργικότητα, δηλαδή ικανοποίηση των σκοπών λειτουργίας του κτιρίου π.χ. περιορισμός των παραμορφώσεων, στεγανότητα, περιορισμός κραδασμών κ.λπ.
- Αισθητική εμφάνισή π.χ. αποφυγή εμφανών ρηγματώσεων, διατήρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, του χρώματος κ.λπ.

Φθορά ονομάζεται κάθε απώλεια επιτελεστικότητας μέσα στον χρόνο. Διάρκεια ζωής μιας κατασκευής ονομάζεται ο ελάχιστος χρόνος στον οποίο ή κατασκευή ικανοποιεί τις απαιτήσεις μιας επιτελεστικότητας, οι οποίες σχετίζονται με την κανονική χρήση της. Ο χρόνος αυτός μπορεί να εξασφαλιστεί είτε λόγω καλής αρχικής ποιότητας είτε λόγω επανειλημμένων επεμβάσεων όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



**Σχήμα 1 :** Επέμβαση σε μια κατασκευή για να αντιμετωπισθεί τυχόν επιταχυνόμενη φθορά και να επιτευχθεί η αρχικά υπολογισμένη διάρκεια ζωής.

Όσον αφορά στην ζωή των κατασκευών μπορούν να διακριθούν οι εξής έννοιες:

- *Τεχνική διάρκεια ζωής*, που είναι ο χρόνος κατά τον οποίο η κατασκευή πληροί όλες τις απαιτήσεις επιτελεστικότητας.
- *Οικονομική διάρκεια ζωής*, που είναι ο χρόνος κατά τον οποίο η κατασκευή εξυπηρετεί τους χρήστες της μέχρι να εκτιμηθεί ότι η αντικατάστασή της είναι οικονομικά περισσότερο συμφέρουσα από ότι η διατήρησή της σε λειτουργία με συνεχείς συντηρήσεις, επισκευές και αλλαγές χρήσεως.
- *Λειτουργική διάρκεια ζωής*, που είναι ο χρόνος κατά τον οποίο η κατασκευή γίνεται λειτουργικά άχρηστη επειδή άλλαξαν οι απαιτήσεις των χρηστών της, π.χ. αύξηση των επιβαλλόμενων φορτίων. Η λειτουργική διάρκεια ζωής καθορίζεται από πολιτικούς, κοινωνικούς και ιστορικούς παράγοντες (π.χ. διατηρητέα κτίρια) και όχι από οικονομικούς ή επιστημονικούς.

Από τις παραπάνω έννοιες, σημασία για τον Μηχανικό που ασχολείται με την κατασκευή σηράγγων έχει η τεχνική διάρκεια ζωής (ανθεκτικότητα των κατασκευών). Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι διάφοροι παράγοντες μπορεί να υπαγορεύσουν την απαιτούμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής. Για παράδειγμα, μια θαλάσσια εξέδρα για άντληση πετρελαίου δεν χρειάζεται να έχει διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 80 έτη, γιατί έχει εκτιμηθεί ότι το πετρέλαιο θα έχει εξαντληθεί με το τέλος αυτής της περιόδου, το κόστος της εξέδρας θα έχει αποσβεσθεί και η τεχνολογία εκμεταλλεύσεως θα έχει αλλάξει σημαντικά. Αυτό που απαιτείται είναι να μην δημιουργηθούν προβλήματα μέσα στο χρονικό διάστημα της οικονομικής διάρκειας ζωής του έργου. Παρακάτω δίνονται μερικά στοιχεία για την διάρκεια ζωής διαφόρων κατηγοριών έργων από οπλισμένο σκυρόδεμα:

Είδος κατασκευής	% Κατασκευών	Διάρκεια ζωής
Οικίες	65	30-80
Εργοστάσια	30	50-80
Γέφυρες, Σήραγγες, Σιλό	4	60-100
Λιμενικά έργα, φράγματα	1	30-100

**Πίνακας 1 :** Εκτίμηση διάρκειας ζωής για διάφορα είδη κατασκευών.

Για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής μιας κατασκευής υπεισέρχονται πολλές αβεβαιότητες και επομένως ο υπολογισμός της διάρκειας ζωής δεν είναι εύκολος. Μερικές από τις αβεβαιότητες αυτές οφείλονται στις εξής αιτίες:

- Τυχόν σφάλματα κατά την φάση του σχεδιασμού. Οι κανονισμοί μελέτης και κατασκευής κτιρίων δίνουν πολύ λίγες οδηγίες για τις «λειτουργικές απαιτήσεις των κατασκευών». Οι λειτουργικές απαιτήσεις πρέπει να εκφράζονται ποσοτικά ως οριακές τιμές ενός ή περισσοτέρων μετρήσιμων βασικών ιδιοτήτων των μελών της κατασκευής, όπως λ.χ. μέγιστο βέλος κάμψεως. Ο υπολογισμός, κατά τη φάση του σχεδιασμού, του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο αυτές οι απαιτήσεις μπορούν να ικανοποιούνται είναι πολύ σύνθετο πρόβλημα.\

- Το ίδιο το σκυρόδεμα ως υλικό μπορεί να ποικίλει πάρα πολύ. Η κατασκευή, η συντήρηση και η προστασία σε σκυροδέματα της ίδιας ποιότητας (ίδια χαρακτηριστική αντοχή, ίδια αναλογία υλικών) μπορεί να διαφέρουν πάρα πολύ, αλλάζοντας αισθητά την αντίστοιχη διάρκεια ζωής.
- Το περιβάλλον δεν μπορεί να καθορισθεί με ακρίβεια (π.χ. θερμοκρασία, συγκέντρωση προσβλητικής ουσίας κλπ.), ώστε να παρασκευασθεί σκυρόδεμα απόλυτα ανθεκτικό στην προσβλητικότητα του περιβάλλοντος. Γι' αυτόν τον λόγο, διακρίνονται μερικές πρότυπες κατηγορίες περιβάλλοντος, τις οποίες το πραγματικό περιβάλλον προσεγγίζει ικανοποιητικά. Υπάρχει επίσης η πιθανότητα το περιβάλλον να αλλάξει μελλοντικά λόγω π.χ. της γενικότερης αλλαγής του κλίματος ή και της εγκατάστασης βιομηχανικών μονάδων στην περιοχή του έργου.
- Οι μηχανισμοί φθοράς δεν έχουν γίνει απόλυτα γνωστοί και δεν έχει μελετηθεί πλήρως η επίπτωση πάνω στη φέρουσα ικανότητα των υλικών. Πρόβλεψη της διάρκειας ζωής μπορεί να γίνει μόνο όταν ο μηχανισμός φθοράς και η εξέλιξή της μέσα στον χρόνο είναι γνωστοί με κάθε λεπτομέρεια. Είναι όμως δυνατόν ο μηχανισμός φθοράς να αλλάξει με τον χρόνο. Για παράδειγμα, η διάβρωση του χάλυβα όταν το σκυρόδεμα διαβρωθεί και πάψει να υπάρχει προστασία στον χάλυβα.
- Τα υλικά και η κατασκευή έχουν διαφορετική διάρκεια ζωής. Ένα υλικό δεν κατασκευάζεται για ένα συγκεκριμένο περιβάλλον ώστε είναι δυνατόν σε διαφορετικά περιβάλλοντα εκθέσεως το ίδιο υλικό να έχει διαφορετική διάρκεια ζωής. Επιπλέον είναι δυνατόν η κατασκευή να αλλοιώσει πολύ το πραγματικό περιβάλλον λόγω του μικροπεριβάλλοντος το οποίο δημιουργείται μετά την κατασκευή. Μ' αυτόν τον τρόπο, η αρχικά εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μπορεί να είναι απόλυτα εσφαλμένη.

Εντούτοις, οι αβεβαιότητες αυτές μπορούν να αντιμετωπισθούν με **πιθανοτικές** και **στατιστικές** μελέτες. Οι στατιστικές μελέτες αφορούν τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Έχουν μεγάλη σημασία κυρίως για τον οικονομικό σχεδιασμό. Με τις πιθανοτικές μελέτες επιχειρείται να διαπιστωθεί με βάση ορισμένα προσομοιώματα η αλληλεπίδραση μεταξύ περιβάλλοντος και υλικού, ώστε να υπάρχουν σαφείς ενδείξεις για την εξέλιξη της φθοράς μέσα στον χρόνο. Συνήθως εκτελούνται επιταχυνόμενες δοκιμές στο εργαστήριο (οι οποίες πάντως μπορεί να αλλοιώσουν τον μηχανισμό φθοράς και να δώσουν εσφαλμένα αποτελέσματα). Γίνεται τελικά φανερό ότι για τις συνήθεις κατασκευές κατά την φάση του σχεδιασμού τους, είναι εξαιρετικά δύσκολο να γίνει μια ακριβής ποσοτική εκτίμηση της διάρκειας ζωής τους.



**Εικόνα 13**

## **2.2 Απαιτήσεις ανθεκτικότητας σκυροδέματος επένδυσης σηράγγων**

Η ανθεκτικότητα μιας επένδυσης σήραγγας είναι η ιδιότητά της να επιτελεί ικανοποιητικά τη λειτουργία της μέσα στο περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται κατά τη διάρκεια της αναμενόμενης διάρκειας ζωής της. Τα χρησιμοποιούμενα υλικά προς την επίτευξη αυτού του σκοπού πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μπορεί η επένδυση να διατηρήσει την ακεραιότητά της και να προστατεύσει τα υπόλοιπα υλικά που βρίσκονται κάτω από την επιφάνειά της.

Ο καθορισμός της απαιτούμενης διάρκειας ζωής της επένδυσης μιας σήραγγας είναι σημαντικός στο σχεδιασμό, όχι μόνο για τον καθορισμό των αναμενόμενων φορτίσεων αλλά και για την επίτευξη της μακροχρόνιας ανθεκτικότητας. Ως επί του παρόντος δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη οδηγία όσον αφορά στον τρόπο σχεδιασμού ενός υλικού ώστε αυτό να ανταποκριθεί στην αναμενόμενη διάρκεια ζωής, εντούτοις ο νέος Ευρωπαϊκός Κανονισμός για το Σκυρόδεμα αναφέρεται σε αυτό το πρόβλημα. Ο Κανονισμός αυτός κατά κάποιον τρόπο προτείνει διάφορες αναλογίες ανάμειξης και τιμές επικάλυψης οπλισμού για επίτευξη διάρκειας ζωής σχεδιασμού από 50 έως 100 έτη.

Ένα στοιχείο που μπορεί να προσδώσει στην επένδυση μιας σήραγγας αυξημένη αντοχή έναντι διαφόρων επιθετικών παραγόντων είναι η ύπαρξη δακτυλιοειδούς ενέματος μεταξύ του διανοιγμένου όγκου της σήραγγας και της εξωτερικής κυρτής επιφάνειάς της ή ακόμα και η ύπαρξη άλλων προστατευτικών επικαλύψεων όπως το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Συνήθως βέβαια αυτά τα στοιχεία του κατασκευαστικού συστήματος της επένδυσης μιας σήραγγας θεωρούνται εφεδρικά σε όρους διάρκειας ζωής, και αυτό επειδή η ακριβής και αξιόπιστη εκτίμηση π.χ. της ποιότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που διαστρώνεται με μεγάλη ταχύτητα είναι δύσκολη, ομοίως και η εκτίμηση του κατά πόσο η περιμετρική επικάλυψη με ένεμα είναι πλήρης. Δύο επιπλέον ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό της διάρκειας ζωής της επένδυσης μιας σήραγγας είναι η στεγανότητα της κατασκευής και η αντοχή σε πυρκαγιά, καθώς και τα δύο επηρεάζουν το σχεδιασμό της μόνιμης επένδυσης μιας σήραγγας.

Η επένδυση μιας σήραγγας μπορεί να εκτεθεί σε πολλά και ποικίλα επιθετικά περιβάλλοντα, συνεπώς τα ζητήματα ανθεκτικότητας πρέπει να δρομολογούνται σε άμεση συνάρτηση όχι μόνο με τον τόπο του έργου και συνεπώς και το γεωλογικό περιβάλλον του αλλά και με την χρήση της σήραγγας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.2. Τα πρότυπα των υλικών, του σχεδιασμού και των κατασκευαστικών λεπτομερειών που απαιτούνται για τη διασφάλιση των απαιτήσεων ανθεκτικότητας μπορεί να διαφέρουν, και πολλές φορές να έρχονται σε σύγκρουση. Σε αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να γίνει κάποιος συμβιβασμός ώστε να επιλεγεί η καλύτερη δυνατή λύση με βάση την διαθέσιμη τεχνολογία και τεχνογνωσία.

Εσωτερικοί παράγοντες (κανονική χρήση)	Σημαντική επιρροή στην ανθεκτικότητα
Δρόμος / σιδηρόδρομος	Χλωρίδια (άλατα αποπάγωσης)
Θαλάσσιες εκβολές	Χλωρίδια θαλασσινού νερού, τριβή
Σωλήνες αποχέτευσης	Οξέα, θειώδη
Σωλήνες απορροής νερών βροχής	Τριβή
Πόσιμο νερό	Στεγανότητα
Καλώδια	Στεγανότητα
Ζώνες εισόδου	Παγετός, ενανθράκωση
Εσωτερικοί παράγοντες (καταστάσεις συναγερμού)	Σημαντική επιρροή στην ανθεκτικότητα
Δρόμος / σιδηρόδρομος	Πυρκαγιά, διαρροές
Καλώδια	Πυρκαγιά
Εξωτερικοί παράγοντες	Σημαντική επιρροή στην ανθεκτικότητα
Φυσικά εδάφη	
Αργιλώδεις σχισμές (κινητό νερό)	Θειώδη
Άμμοι / χάλικες (κινητό νερό)	Μολυσματικά στοιχεία από άλλες πηγές
Εγκαταλελειμμένες βιομηχανικές περιοχές	Διάφορα μολυσματικά στοιχεία, θειώδη, οξέα

**Πίνακας 2:** Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα επενδύσεων σηράγγων.

Οι επί τόπου σκυροδετούμενες επενδύσεις σηράγγων χρησιμοποιήθηκαν πρώτη φορά στο Ηνωμένο Βασίλειο στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Τα προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος εισήχθησαν την ίδια περίπου περίοδο αλλά έγιναν ευρέως χρησιμοποιούμενα το 1930. Συνεπώς υπάρχει εμπειρία μόλις 70 έως 100 ετών σχετικά με την συμπεριφορά του σκυροδέματος πάνω στην οποία μπορεί να βασιστεί ο σχεδιασμός για ανθεκτικότητα μιας επένδυσης σήραγγας. Οι

κατασκευαστικές λεπτομέρειες του σχεδιασμού, η παραγωγή και τοποθέτηση του σκυροδέματος καθώς και το περιβάλλον λειτουργίας της επένδυσης της σήραγγας αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν την ανθεκτικότητά της. Επιπροσθέτως, το σκυρόδεμα είναι ένα εγγενώς ποικιλόμορφο υλικό, οπότε για να προσδιορισθούν και να σχεδιαστούν οι απαιτήσεις ανθεκτικότητας, πρέπει να γίνουν κάποιες υποθέσεις σχετικά με την έκταση της έκθεσης σε επιδεινωτικούς παράγοντες, όπως επίσης και σχετικά με την ποικιλότητα της συμπεριφοράς του ίδιου του υλικού της επένδυσης. Οι παράγοντες που γενικά επηρεάζουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος και πρέπει να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό και την όπλιση της επένδυσης μιας σήραγγας είναι:

- **Το περιβάλλον λειτουργίας :** Η διείδυση των χλωριόντων μπορεί να γίνει είτε σε ξηρό περιβάλλον είτε σε περιβάλλον με μεγάλο ποσοστό υγρασίας. Η διείδυση χλωριόντων σε υγρό περιβάλλον είναι η συνηθέστερη και πιο σοβαρή μορφή διείδυσης
- **Το σχήμα και ο όγκος του σκυροδέματος**
- **Η επικάλυψη του χάλυβα**
- **Ο τύπος τσιμέντου**
- **Ο τύπος των αδρανών**
- **Ο τύπος και η δοσολογία των προσθέτων του μείγματος**
- **Η περιεκτικότητα σε τσιμέντο και ο λόγος Νερό/Τσιμέντο:** Μικρός λόγος Ν/Τ εξασφαλίζει πυκνό σκυρόδεμα με μικρή διαπερατότητα. Το σκυρόδεμα θα πρέπει να περιέχει περισσότερο από 8% C<sub>3</sub>A κ.β. τσιμέντου ώστε να δεσμεύσει τα χλωριόντα. Οι προσμίξεις στο σκυρόδεμα επηρεάζουν την ικανότητα του σκυροδέματος να δεσμεύσει τα χλωριόντα.
- **Η ανθρώπινη εργασία, π.χ. δόνηση, συμπύκνωση τελειώματα.**
- **Η διαπερατότητα, το πορώδες και η ικανότητα διάχυσης θερμότητας του τελικού σκυροδέματος.**
- **Μόνωση:** Η απώλεια λειτουργικής υγρασιμότητας ή ακόμα και η έλλειψη συντήρησής της, αφού σίγουρα μια στρώση μόνωσης δεν είναι λειτουργική για πάντα, οδηγεί σε απώλεια του βασικού ίσως από πλευράς επιφάνειας φράγματος υγρασίας σε μία συνήθη κατασκευή. Το δώμα της. Στις παλαιότερες δε κατασκευές η συνήθης πρακτική να διέρχονται των υποστυλωμάτων οι πλαστικές υδρορροές απορροής ομβρίων υδάτων, αποβαίνει καταστρεπτική για το σκελετό, αφού είναι πλέον βέβαιη η έστω και μικρή απώλεια από τις πλαστικές σωληνώσεις όπου πλέον η υγρασία ή ακόμα και το νερό δε χρειάζεται να εισχωρήσει στο στοιχείο του σκελετού αφού βρίσκεται ήδη στο εσωτερικό του.

Το γεωμετρικό σχήμα και ο όγκος του σκυροδέματος της επένδυσης μιας σήραγγας είναι γενικά σημαντικοί παράγοντες επειδή οι επενδύσεις σήραγγων έχουν γενικά λεπτά τοιχώματα και πιθανόν εκτίθενται σε σημαντικές εξωτερικές υδραυλικές πιέσεις, οι οποίες αυξάνουν την εισροή επιθετικών παραγόντων μέσα στο σκυρόδεμα.

Ειδικά για τις σήραγγες οπλισμένου σκυροδέματος, οι απαιτήσεις για το υλικό σχεδιασμού της τελικής επένδυσης είναι τρεις:

## 1. Αντοχή σε πυρκαγιά

Θερμική αντοχή ονομάζεται η ικανότητα των υλικών να διατηρούν σχεδόν αμετάβλητες βασικές μηχανικές τους ιδιότητες (πχ αντοχές, μέτρο ελαστικότητας) σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες. Πολλά υλικά ουσιαστικά αχρηστεύονται σε θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες από το σημείο ανάφλεξης (π.χ. ξύλο, ορισμένα πολυμερή) ή από το σημείο τήξης (π.χ. μέταλλα, ορισμένα πολυμερή, γυαλί). Με τον όρο αντοχή σε πυρκαγιά αποδίδεται η ικανότητα των υλικών να μην παραμορφώνονται σημαντικά και να διατηρούν μεγάλο μέρος της αντοχής τους όταν υποβάλλονται σε πυρκαγιά και στο συνδυασμό πυρκαγιάς και νερού πυρόσβεσης (που έχει ως αποτέλεσμα την απότομη ψύξη του υλικού) επί αρκετές ώρες. Με βάση το ενδεχόμενο ανάφλεξης, τα υλικά διακρίνονται σε άκαυστα (π.χ. κεραμικά μέταλλα), πυρανθεκτικά (υλικά που καίγονται με δυσκολία και μόνο παρουσία φλογών, όπως το ξύλο που έχει διαποτιστεί με ειδικά υγρά), και καύσιμα (υλικά που συντηρούν από μόνα τους την καύση, όπως είναι τα περισσότερα υλικά οργανικών ενώσεων).

Κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς τα συνηθέστερα προβλήματα που παρουσιάζονται είναι ενδεικτικά:

1. Η εκρηκτική απόσχιση, δηλαδή η θραύση τμήματος του σκυροδέματος επικάλυψης λόγω της βίαιης ανάπτυξης πιέσεων από την εξάτμιση του περιεχόμενου νερού στο σκυρόδεμα
2. Η θερμική διαστολή του σκυροδέματος που επίσης οδηγεί σε θραύση
3. Η μείωση των τάσεων συνάφειας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος
4. Η μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα οπλισμού
5. Η ανομοιόμορφη μεταβολή τάσεων στο σκυρόδεμα λόγω της απότομης ψύξης κατά τη κατάσβεση
6. Η πιθανή επικάθιση χλωριδίων λόγω της καύσης καλωδιώσεων και λοιπών στοιχείων κατασκευασμένων από PVC

## 2. Ανθεκτικότητα σε διάρκεια

Ανθεκτικότητα σε διάρκεια είναι η ικανότητα των υλικών να αντιστέκονται στην αλλοίωση των φυσικών, μηχανικών και χημικών χαρακτηριστικών τους κάτω από τη δράση κλιματικών συνθηκών της ατμόσφαιρας και εν γένει περιβαλλοντικών επιδράσεων όπως υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία, άνεμος, θερμοκρασιακές μεταβολές, παγετός, χημικές ουσίες. Βάσει του παραπάνω ορισμού η ανθεκτικότητα σε διάρκεια περιλαμβάνει εν μέρει και τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

Ειδικά για την περίπτωση του παγετού αναφέρεται ότι κατά την πήξη του το νερό που είναι ενδεχομένως εγκλωβισμένο στους πόρους ενός υλικού αυξάνεται σε όγκο, με αποτέλεσμα την άσκηση ισχυρών δυνάμεων στα τοιχώματα των πόρων και γενικότερα στη μάζα του υλικού. Έτσι, αντοχή σε παγετό είναι η ικανότητα ενός κορεσμένου με νερό υλικού να υποστεί διαδοχικούς κύκλους (περίπου 25-40) πήξης και τήξης του νερού χωρίς να παρουσιάσει εμφανή σημεία βλάβης. Δηλαδή πρέπει η απώλεια βάρους λόγω απότριψης να μην ξεπερνά το 5% του αρχικού βάρους και να μην μειωθεί η μηχανική του αντοχή πάνω από το 25% της αρχικής τιμής. Από τα πορώδη υλικά, ανθεκτικότερα σε παγετό είναι εκείνα που έχουν κλειστούς πόρους και τα υλικά με μεγάλους και σχετικά ευθύγραμμους πόρους.

Ένα άλλο φαινόμενο που σχετίζεται με την ανθεκτικότητα των υλικών σε διάρκεια αφορά την επιφανειακή φθορά (π.χ. σε οδοστρώματα, δάπεδα, πεζοδρόμια ή άλλες κατασκευές που



υφίστανται τη μηχανική δράση νερού και ανέμου). Το φαινόμενο της επιφανειακής φθοράς σχετίζεται με την σκληρότητα ενός υλικού δηλαδή την αντίσταση που προβάλλει η επιφάνειά του στη χάραξη από άλλο σώμα. Η σκληρότητα ενός υλικού καθορίζεται συνήθως από τη σκληρομετρική κλίμακα του Mohs. Η κλίμακα αυτή έχει 10 βαθμίδες, σε καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί ένα γνωστό ορυκτό που χαράζει το αμέσως προηγούμενο και χαράζεται από το αμέσως επόμενο. Τελευταίο στην κλίμακα αυτή είναι το διαμάντι.

## **2.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΔΙΑΡΚΕΙΑ.**

**1. ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ.** Όπως είναι η αντοχή συνδεδεμένη με το τριχοειδές πορώδες έτσι είναι και η ανθεκτικότητα. Με αποτέλεσμα να την επηρεάζουν οι ίδιοι παράγοντες όπως ο λόγος νερού N/T, πορώδες και η συντήρηση.

### **2. ΦΥΣΙΚΑ ΑΙΤΙΑ**

#### *ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΦΘΟΡΑ*

ο **Απότριψη** Από την κυκλοφορία πεζών ή οχημάτων.

ο **Υδροφθορά** Από στο νερό το οποίο περιέχει αιωρούμενα σωματίδια.

ο **Σπηλαίωση** Εμφανίζεται όταν νερό κινείται με μεγάλη ταχύτητα παράλληλα σε επιφάνεια της οποίας η γεωμετρία αλλάζει ξαφνικά, με αποτέλεσμα τη δημιουργία καταστροφικών φυσαλίδων.

*ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ.* Για μέτρια διαβρωτικό περιβάλλον το άνοιγμα των ρωγμών δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει τα 0,3mm. Για πολύ διαβρωτικό πρέπει να περιορίζεται περαιτέρω ανάλογα με την διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος.

ο **Μεταβολή όγκου λόγω**

- Θερμοκρασίας ή Υγρασίας
- Πίεσης λόγω κρυστάλλωσης αλάτων στους πόρους

ο **Επιβαλλόμενα φορτία** Σχεδιασμού, Υπερφόρτωση, Ερπυσμού.

ο **Επιβαλλόμενες παραμορφώσεις** Διαφορικών καθιζήσεων ή σεισμού

ο **Ακραίες θερμοκρασίες**

- Παγετός. Η ικανότητα του σκυροδέματος να υποστεί τη δράση του παγετού χωρίς φθορά εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα του.
- Πυρκαγιάς. Εξαρτάται από πόλους παράγοντες, οι οποίοι σχετίζονται με την ποιότητα του τσιμεντοπολτού και των αδρανών που αποσυντίθενται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες.

### **3. ΧΗΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ**

#### *ΥΔΡΟΛΥΣΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΟΛΤΟΥ*

ο **Μαλακό νερό.** Το νερό τις βροχής περιέχει ελάχιστα ιόντα ασβεστίου. Σε επαφή με το σκυρόδεμα το νερό διαλύει τα προϊόντα ασβεστίου που υπάρχουν στον τσιμεντοπολτού προκαλώντας τη χαλάρωση του ιστού του σκυροδέματος.

*ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΜΑΖΑΣ* Μηχανισμοί φθοράς του σκυροδέματος με βάση την ανταλλαγή ιόντων.

ο **Σχηματισμός διαλυτών αλάτων ασβεστίου**

ο **Σχηματισμός αδιάλυτων αλάτων ασβεστίου**

ο **Επίδραση διαλυμάτων μαγνησίου**

*ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ.* Οδηγούν στο σχηματισμό προϊόντων που προκαλούν διόγκωση στο σκυρόδεμα, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων και παραμορφώσεων.

- ο Επίδραση θεϊκών αλάτων
- ο Αντίδραση αλκαλίων-αδρανών
- ο Διάβρωση οπλισμών
- ο Ενυδάτωση κρυσταλλικών MgO, CaO

### 3. ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ

Από τη δράση φυτικών ή ζωικών μικροοργανισμών. Επειδή στη χώρα μας είναι εξαιρετικά σπάνιο το ενδεχόμενο σταδιακής αποσύνθεσης του σκυροδέματος λόγω εναλλαγών πήξεως-τήξεως του νερού των πόρων, ή λόγω προσβολής των αδρανών από την αλκαλικότητα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Έτσι το κύριο αν όχι το μοναδικό πρόβλημα του οπλισμένου σκυροδέματος από απόψεως ανθεκτικότητας σε διάρκεια είναι η **διάβρωση των οπλισμών**. Από την οποία προκαλείται ο σχηματισμός προϊόντων οξειδωσης και τα οποία λόγω της αύξησης του όγκου τους μπορεί να προκαλέσουν ρηγμάτωση. Η διάβρωση των οπλισμών μπορεί να γίνει είτε με την **ενανθράκωση** του σκυροδέματος είτε από τα **χλωριόντα**.

#### 2.4 ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.

Οι ράβδοι οπλισμού προστατεύονται από την διάβρωση μέσω ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος ένδρου οξειδίου του σιδήρου, που δημιουργείται λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του σκυροδέματος που τις περιβάλλει. Η αλκαλικότητα αυτή χαρακτηρίζεται από μία τιμή του pH γύρω στο 12.5, που αντιστοιχεί στην υπό συνήθη θερμοκρασία συγκέντρωση ισορροπίας του υδροξειδίου του ασβεστίου  $\text{Ca(OH)}_2$ , στο νερό των πόρων. Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου μπορεί να διατηρηθεί τοπικά από ιόντα χλωρίου, αν η συγκέντρωση των τελευταίων υπερβαίνει το 0.4 έως 0.6 % του βάρους του τσιμέντου, ή να διαλυθεί γενικά, λόγω μείωσης της αλκαλικότητας του σκυροδέματος γύρω από την ράβδο, σε τιμές του pH κάτω από 9.0. Τότε λέμε ότι ο χάλυβας του οπλισμού αποπαθητικοποιήθηκε δηλαδή δεν απολαμβάνει πλέον την παθητική προστασία που του προσέφερε η αλκαλικότητα του σκυροδέματος. Η μείωση του pH του σκυροδέματος σε τιμές κάτω του 9.0 οφείλεται στην χημική αντίδραση του  $\text{Ca(OH)}_2$  του νερού των πόρων ( και γενικότερα του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού) με το διοξείδιο του άνθρακος ( $\text{CO}_2$ ) της ατμόσφαιρας, που σταδιακά διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη μετατροπή του  $\text{Ca(OH)}_2$  σε ανθρακικό ασβέστιο. Η όλη διαδικασία ονομάζεται **ενανθράκωση** του σκυροδέματος. Είναι αξιοσημείωτο να πούμε ότι η ενανθράκωση, η οποία για το οπλισμένο σκυροδέμα έχει δυσμενείς επιπτώσεις, στον ατμοσφαιρικό αέρα οδηγεί στην σκλήρυνση του ασβέστη.

#### 2.5 Η ΔΡΑΣΗ ΚΑΙ ΟΙ ΠΗΓΕΣ ΤΩΝ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ

Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου μπορεί να διατηρηθεί τοπικά από ιόντα χλωρίου,  $\text{Cl}^-$ , αν η συγκέντρωση των τελευταίων υπερβεί το 0,4% έως 0,6% του βάρους του τσιμέντου. Τα

χλωριόντα μπορεί να προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος είτε από το εξωτερικό περιβάλλον που περικλείει το σκυρόδεμα.

Τα χλωριόντα που μπορεί να διατρήσουν το προστατευτικό στρώμα προέρχονται από το **εσωτερικό του σκυροδέματος**, εάν έχουν χρησιμοποιηθεί συλλεκτά αδρανή από παράλιες ή θαλάσσιο νερό για το σκυρόδεμα (όχι ασυνήθιστη πρακτική στη νησιωτική Ελλάδα), ή από προσθετά βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριούχα άλατα. Χλωριόντα από το **εξωτερικό περιβάλλον** είναι πολύ συνηθισμένα σε παραθαλάσσιες περιοχές, όπου και σε μεγάλες αποστάσεις από την ακτή ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει χλωριούχα άλατα, ιδίως αν οι επικρατούντες άνεμοι κατευθύνονται από τη θάλασσα προς τη ξηρά. Στις περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη χιονόπτωση, βασική πηγή χλωριόντων είναι τα χλωριούχα άλατα που ρίχνουν στους δρόμους για την τήξη του χιονιού. Χλωριόντα άλατα μπορεί να προέρχονται επίσης και από τα επιταχυντικά πήξης που χρησιμοποιούνται το χειμώνα επειδή το σκυρόδεμα πήζει αργά η καθόλου.

Η ενανθράκωση και η διείδυση των χλωριόντων δεν είναι ανεξάρτητες διαδικασίες, καθώς η πρώτη επιταχύνει σημαντικά τη δράση των χλωριόντων : Το  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  του τσιμεντοπολτού αντιδρά με τα χλωριόντα και τα δεσμεύει, περιορίζοντας την ποσότητα αυτών που διαχέονται προς τον οπλισμό κάτω από 0,4% έως 0,6% που απαιτείται για τη διάτρηση του προστατευτικού οξειδίου. Με την αντίδραση όμως του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  κατά την ενανθράκωση τα δεσμευμένα χλωριόντα απελευθερώνονται προσβάλλοντας έτσι των χάλυβα.

## 2.6 ANTOXH SE ΣΕΙΣΜΟ

Η επίδραση των σεισμικών φαινομένων πέραν των εμφανών στατικών προβλημάτων που μπορεί να δημιουργήσουν, προκαλούν και μία ακόμα σοβαρότερη ζημιά σε φέροντα στοιχεία από σκυρόδεμα. Σοβαρότερη γιατί είναι αρχικά αφανής και μπορεί να επιδρά για αρκετά χρόνια. Αποδιοργανώνουν με τις μικρομετακινήσεις των στοιχείων τη εσωτερική τους συνοχή δημιουργώντας πολλές φορές μικρορηγματώσεις τριχοειδούς φύσης, αφανείς στο γυμνό ή μη έμπειρο μάτι, ικανές όμως να αποτελέσουν τη κερκόπορτα του σκελετού για την εισροή στο εσωτερικό του υγρασίας αλλά και χλωριόντων της ατμόσφαιρας που αυτομάτως ξεκινούν την εσωτερική διαδικασία διάβρωσης. Οι αποκολλήσεις του σκυροδέματος συχνά στις γύρω περιοχές του οπλισμού, αποτελούν μόνο το αποτέλεσμα της εσωτερικής διάβρωσης του στοιχείου, την αποκάλυψη δηλαδή ενός φαινομένου που δρα για σημαντικό χρονικό διάστημα, και όχι την απαρχή του.

## 2.7 Οι ΣΥΝΗΘΕΣΤΕΡΟΙ "διαβρωτικοί παράγοντες" που φυσιολογικά επηρεάζουν αρνητικά τη δομή του σκυροδέματος είναι:

- Η γήρανση λόγω ηλικίας

Στη βιβλιογραφία ως βέλτιστη διάρκεια σταθερής θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος αναφέρονται τα 50 έτη. Η σημαντικότερη όμως επισήμανση είναι ότι η στατιστική αυτή παρατήρηση αφορά σε "ιδανικές συνθήκες" ήτοι σε τεχνητό περιβάλλον εργαστηρίου και όχι στο περιβάλλον που έχουμε δημιουργήσει και μέσα στο οποίο λειτουργούν πρακτικά οι κατασκευές μας. Τι σημαίνει όμως το πρακτικό περιβάλλον σε αντιδιαστολή με το τεχνητό; Αν αφαιρέσουμε τον παράγοντα "κακοτεχνία" που πρακτικά αφήνει απροστάτευτη τη κατασκευή έναντι οιασδήποτε διάβρωσης και μάλιστα σε σύντομο χρονικό διάστημα, τότε θα παρατηρήσουμε στατιστικά ότι μια τυπική κατασκευή με Φέροντα Οργανισμό από Οπλισμένο Σκυρόδεμα θα αρχίσει να χρίζει συντήρησης και παρακολούθησης πρακτικά μετά από περίπου 30 έτη από τη κατασκευή της.

#### • Το έντονα αλκαλικό περιβάλλον της ατμόσφαιρας (μόλυνση)

Αναλύοντας τους παράγοντες που οδηγούν στη μείωση αυτή του προσδόκιμου για το σκυρόδεμα, τα περιβαλλοντικά κριτήρια είναι κυρίως τοπογραφικά. Οι μεν κατασκευές που έχουν κατασκευασθεί εντός των ορίων των μεγάλων αστικών κέντρων υποφέρουν από το έντονα αλκαλικό περιβάλλον, με κυριότερη τη χημική αλλοίωση του σκυροδέματος, αλλά και του επιχρίσματος που το προστατεύει, από το καυσαέριο, τους εν γένει ρύπους της ήδη βεβαρυμμένης βιομηχανικής ατμόσφαιρας, τα πάσης φύσεως χλωριόντα αλλά και τα πλούσια σε οξέα και θειικά άλατα νερά των γεωτρήσεων.

#### • Η έντονη θερμοκρασιακή εναλλαγή περιβάλλοντος

Σε βορειότερες περιοχές (εντός και εκτός αστικών κέντρων) η απότομη θερμοκρασιακή μεταβολή τόσο κατά τους χειμερινούς όσο και κατά τους καλοκαιρινούς μήνες σε συνδυασμό και πάλι με τα ιδιαίτερα πλέον υψηλά ποσοστά υγρασίας της χώρας μας δημιουργούν έντονες συστολοδιαστολές τόσο στο σκυρόδεμα όσο και στο προστατευτικό του επίχρισμα, με αποτέλεσμα την ευκολότερη διείσδυση υγρασίας στο εσωτερικό των στοιχείων και την ταχύτερη απομείωση της αντοχής τους. Έχει χαρακτηριστικά παρατηρηθεί ότι η απότομη θερμοκρασιακή μεταβολή κατά ~10oC διπλασιάζει σχεδόν τη ταχύτητα του φαινομένου της διάβρωσης στο σκυρόδεμα.

#### • Η εγγύτητα θαλάσσιου περιβάλλοντος

Οδηγούμενοι εκτός των βαριά αστικών ορίων, η εγγύτητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος αποτελεί σημαντικό απομειωτικό παράγοντα με τα μεγάλα ποσοστά άλατος του αέρα αλλά και τα ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά υγρασίας. Στις περιπτώσεις αυτές που τα πλούσια σε άλατα ποσοστά υγρασίας έρχονται σε επαφή με τα φέροντα στοιχεία, η ποιότητα του επιχρίσματος, το πάχος του αλλά και το πάχος της επικάλυψης του οπλισμού από σκυρόδεμα βάση Ελληνικού Κανονισμού Σκυροδέματος παίζουν το σημαντικότερο ρόλο, και δυστυχώς στις περισσότερες των περιπτώσεων η διάρκεια αυτού του ρόλου δεν ξεπερνά τη 30ετία.

### **2.8 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΗΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ**

## **ΣΥΜΒΙΒΑΣΤΟΤΗΤΑ**

Η συμβιβαστικότητα σε ένα σύστημα επισκευής μπορεί να ορισθεί ως η ισορροπία μεταξύ φυσικών , χημικών και ηλεκτροχημικών ιδιοτήτων αλλά και διαστάσεων μεταξύ επισκευής και υπάρχουσας επιφάνειας . Είναι γενικά αποδεκτό ότι οι ρηγματώσεις των υλικών επισκευής είναι πρωταρχικό πρόβλημα στον τομέα των επισκευών . Αυτές οι ρωγμές είναι κατά βάση το αποτέλεσμα της ασυμβιβαστότητας μεταξύ των υλικών επισκευής και της υπάρχουσας υπόβασης . Για να επιτύχουμε ανθεκτική επισκευή είναι απαραίτητο να λάβουμε υπ' όψη στο σχεδιασμό της τους παράγοντες που την επηρεάζουν ως αυτόνομο τμήμα του συνολικού συστήματος . Η συμβιβαστότητα μεταξύ του υλικού κατασκευής και της υπάρχουσας υπόβασης αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές συνιστώσες στο σύστημα επισκευής . Η συστολή ξήρανσης είναι μια μακροχρόνια μεταβολή διαστάσεων που σχετίζεται με την απομάκρυνση προσροφώμενου νερού από το ενυδατωμένο υλικό . Όπως και η συμβιβαστότητα , αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες της ανθεκτικότητας της επισκευής . Η σπουδαιότητα του ελέγχου της συστολής ξήρανσης λαμβάνεται όλο και περισσότερο υπ' όψη , ειδικά για τα υλικά από τσιμέντο. Αν η επισκευή συστέλλεται σε μεγάλο βαθμό και σπάει , οι όποιες προστατευτικές ή φέρουσες ικανότητες ιδιότητες (όταν η επισκευή φέρει φορτία ) , παύουν να υφίστανται . Όσο αυτό το φαινόμενο συνειδητοποιείται , τόσο αυξάνεται η απαίτηση για μικρή συστολή ξήρανσης στις επισκευές παγκοσμίως .

## **ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ**

Η διαπερατότητα των κονιαμάτων επισκευής σε ιόντα χλωρίου και διοξειδίου του άνθρακα , επιφέρει επιβλαβή επιρροή στον χάλυβα οπλισμού . Το πιο ευρέως διαδεδομένο μέγεθος μέτρησης της διαπερατότητας των ιόντων χλωρίου είναι ο συντελεστής εξάπλωσης , ο οποίος καθορίζεται άμεσα . Για τη μέτρηση του συντελεστή εξάπλωσης για τα ιόντα χλωρίου σε ένα κονίαμα χαμηλής διαπερατότητας μπορεί να απαιτηθούν αρκετά χρόνια .

## **ΠΡΟΣΚΟΛΛΗΣΗ**

Η προσκόλληση των κονιαμάτων στο σκυρόδεμα, είναι επίσης σημαντική για την ανθεκτικότητα των επισκευών . Πρέπει να είναι επαρκής για να κρατήσει την επισκευ- ασμένη περιοχή ανέπαφη . Η ελάχιστη συνιστώμενη τιμή είναι 0,8 N/mm<sup>2</sup>. Οι τιμές που αναπτύσσονται θα εξαρτώνται από την εφελκυστική αντοχή του ίδιου του κονιάματος και της υπόβασης , ενώ η αστοχία είναι πολύ πιθανό να μην συμβεί στην διαχωριστική γραμμή.

## **ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ**

Είναι γενικά αποδεκτό ότι η πιθανότητα ρηγμάτωσης υλικών επισκευών από τσιμέντο , μειώνεται με την μείωση του μέτρου ελαστικότητας . Αυτό γίνεται λόγω της επίδρασης του μέτρου ελαστικότητας στο μέγεθος των τάσεων που προκαλούνται από την συστολή ξήρανσης και των διατμητικών τάσεων λόγω ολίσθησης.

## **ΟΛΙΣΘΗΣΗ**

Η ολίσθηση των υλικών επισκευής με βάση το τσιμέντο ,είναι ουσιαστικά μερικώς ανακτώμενη πλαστική παραμόρφωση ,που λαμβάνει χώρα υπό την ύπαρξη υφιστάμενων τάσεων. Η πρωταρχική της επίδραση στα συστήματα επισκευής ανάγεται στην απελευθέρωση των τάσεων λόγω συστολής ξήρανσης(χαλάρωση).Οι αιτίες της ολίσθησης στο σύνολο τους είναι περίπλοκες . Είναι γενικά αποδεκτό ότι διάφοροι μηχανισμοί λαμβάνουν χώρα στον σχηματισμό της και η γνώση μας σχετικά μ'αυτούς είναι ανεπαρκής.

## **2.9 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ (ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΩΝ ΚΥΡΙΩΣ) ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΗΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ**

Κατατάσσοντας τους παράγοντες που επιδρούν άμεσα στην αντοχή της επισκευής σε 4 κατηγορίες, ανάλογα με τη φύση προέλευσης τους και το μέγεθος της βλάβης που επιτελούν, προκύπτουν τα παρακάτω συνοπτικά διαγράμματα.

### **(Α) ΦΥΣΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ**

- α) Μικρορωγμές μεταξύ της διεπιφάνειας σκυροδέματος-επισκευής
- β) Πλαστική συστολή
- γ) Καθίζηση
- δ) Συστολή ξήρανσης
- ε) Θερμική διαστολή-συστολή
- στ) Εξωτερικές θερμοκρασιακές μεταβολές
- η) Εσωτερική αύξηση της θερμοκρασίας
- θ) Αποφλοιώση λόγω εναλλαγής ψύξης-θέρμανσης

### **(Β) ΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ**

- α) Οξειδωτικές αντιδράσεις στον τσιμεντοπολτό
  - β) Επίδραση θεικού οξέος
  - γ) Διάβρωση οπλισμού σκυροδέματος
- Η διάβρωση του χάλυβα έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της διατομής της ράβδου κατά την ποσότητα του χάλυβα που μετατρέπεται σε σκουριά. Εκτός όμως από αυτό που είναι και το πιο προφανές η διάβρωση μειώνει επίσης και μάλιστα δυσανάλογα την ολκιμότητα του χάλυβα, γεγονός με πολύ δυσμενείς επιπτώσεις στη σεισμική συμπεριφορά του μέλους. Επιπλέον επειδή η σκουριά έχει 2 έως 6 φορές μεγαλύτερο όγκο από αυτόν του σιδηρού από τον οποίο έχει παραχθεί προκαλεί ρηγμάτωση αποτινάσσοντας την επικάλυψη, μειώνοντας ή και μηδενίζοντας την συνάφεια, και εκθέτοντας ακόμη περισσότερο τη ράβδο σε διάβρωση. Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι η μείωση της αντοχής, το γεγονός αυτό σε συνάρτηση με το ότι τα κτήρια αυτά έχουν κατασκευαστή χωρίς τη χρήση αντισεισμικού κανονισμού τα κάνει πιο ευάλωτα και καθιστά την επισκευή ή ενίσχυση τους αναγκαία.

### **(Γ) ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ**

- α) Φορτία σχεδιασμού
- β) Ολίσθηση
- γ) Τυχηματική υπερφόρτιση(δυσμενέστερος συνδυασμός)
- δ) Διαφορική καθίζηση(στην θεμελίωση)

- ε) Κόπωση της κατασκευής
- στ) Εκτροπή κτιρίου

**(Δ) ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ**

- α) Απότομες κινήσεις κατά την διάρκεια της κατασκευής της επισκευής
- β) Απειρία προσωπικού-κακοτεχνίες
- γ) Κινήσεις κατά την ανάμιξη των υλικών

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

#### Γενικά

Οι μέθοδοι συντήρησης αφορούν τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για:

1. τη δημιουργία των κατάλληλων συνθηκών υγρασίας και θερμοκρασίας για την πρόσκοπτη ενυδάτωση του τσιμέντου.
2. την αποφυγή ρηγματώσεων οφειλόμενων σε παρεμποδιζόμενες θερμοκρασιακές συστολοδιαστολές του νωπού ή μερικώς σκληρυμένου σκυροδέματος (μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος σε σχέση με την κατανομή της θερμοκρασίας στη μάζα του σκυροδέματος ή συστολή νωπού ή μερικώς σκληρυμένου σκυροδέματος από εξάτμιση του περιεχόμενου νερού).

Τονίζεται ότι η συντήρηση πρέπει να εφαρμόζεται εξίσου τόσο στις οριζόντιες όσο και στις κατακόρυφες επιφάνειες, ιδιαίτερα δε επισημαίνεται η συμβολή της συντήρησης στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος και επομένως η σημασία της για τα υποστυλώματα, τους κόμβους και άλλες στατικές σημαντικές περιοχές των κατασκευών.

*Οι κατάλληλες συνθήκες υγρασίας του σκυροδέματος εξασφαλίζονται με μεθόδους που:*

- δεν επιτρέπουν ή επιβραδύνουν την εξάτμιση του νερού του σκυροδέματος,
- που διατηρούν την περιεκτικότητα σε νερό του σκυροδέματος.

#### 3.1.1 Μέθοδοι που δεν επιτρέπουν ή επιβραδύνουν την εξάτμιση του νερού του σκυροδέματος

Για επιβράδυνση και συγκράτηση της υγρασίας χρησιμοποιούνται αδιάβροχα φύλλα (πλαστικά, σκληρυμένο χαρτί) ή ειδικά χημικά υγρά που τοποθετούνται ή ψεκάζονται στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Τα πλαστικά και αδιάβροχα ενισχυμένα φύλλα διαστρώνονται στην επιφάνεια του σκυροδέματος, έτσι ώστε να καλύπτουν πλήρως το σκυρόδεμα. Η επαφή διευκολύνεται αν στην επιφάνεια του σκυροδέματος υπάρχει ελεύθερο επιφανειακό νερό. Τα πλαστικά φύλλα πρέπει στις ενώσεις να επικαλύπτονται σε πλάτος τουλάχιστον 30 cm και να συγκρατούνται σταθερά πάνω στην επιφάνεια του σκυροδέματος με κατάλληλες διατάξεις.

Σε περιπτώσεις πλακών επί εδάφους πρέπει να επικαλύπτονται και οι κατακόρυφες επιφάνειες. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην πλήρη επικάλυψη των γωνιών και στην σταθερή στήριξη των πλαστικών φύλλων, ώστε αυτά να μην ανασηκώνονται από τον άνεμο ή από άλλες αιτίες. Σημειώνεται ότι τα πλαστικά φύλλα πρέπει να είναι τεντωμένα και να μην έχουν πτυχώσεις διότι είναι δυνατόν να δημιουργηθούν γεωμετρικές και χρωματικές αλλοιώσεις στην επιφάνεια. Αναφέρεται επίσης, ότι η επαφή των πλαστικών φύλλων με την επιφάνεια του νωπού σκυροδέματος μπορεί να αλλοιώσει την επιφανειακή υφή αυτού όταν το σκυρόδεμα είναι πολύ νεαρό και παραμορφώνεται πολύ εύκολα. Στις περιπτώσεις αυτές η επικάλυψη γίνεται μετά από κάποιο χρονικό διάστημα κατά το οποίο το σκυρόδεμα «έχει τραβήξει» αρκετά, ώστε να μην χαλάσει η υφή της επιφάνειάς του. Στο διάστημα αυτό για την αποφυγή επιφανειακής



ρηγμάτωσης στο νωπό σκυρόδεμα πρέπει να παρεμποδίζεται η εξάτμιση του νερού του σκυροδέματος με δημιουργία εκνεφωμένης ατμόσφαιρας στην περιοχή πάνω από την επιφάνεια του σκυροδέματος με νερό υπό μορφή νέφους ώστε να μην αλλοιώνεται η επιφάνειά του από την πτώση σταγόνων νερού.

Τα κατακόρυφα στοιχεία, όπως υποστύλωματα, τοιχία κλπ, μετά την αφαίρεση των πλευρικών στοιχείων πρέπει να καλύπτονται με πλαστικά φύλλα, τα οποία θα περιβάλλουν το στοιχείο ή θα στερεώνονται στην ελεύθερη επιφάνεια του σκυροδέματος, κατά τρόπο ώστε να εμποδίζουν την εξάτμιση, (κατ' αντιστοιχία με τα οριζόντια στοιχεία). Συνιστάται να καθυστερήσει όσο είναι πρακτικά δυνατόν η αφαίρεση των πλαϊνών των ξυλοτύπων και να διαβρέχονται αυτοί για να μην απορροφήσουν νερό από το σκυρόδεμα σε περίπτωση που, λόγω ξηρού περιβάλλοντος, στεγνώσουν. Σε περιπτώσεις ξηρού και θερμού καιρού η διαβροχή των ξυλοτύπων, κατά το διάστημα που αυτοί δεν έχουν αφαιρεθεί, είναι απαραίτητη. Τα πλαστικά φύλλα επαναχρησιμοποιούνται όσο είναι ικανά να συγκρατούν την υγρασία και τυχόν ζημιές τους επισκευάζονται με ειδική κόλλα.

Τα ειδικά υγρά ψεκάζονται στην επιφάνεια του σκυροδέματος, περίπου μια ώρα μετά την σκυροδέτηση και όταν στεγνώσουν σχηματίζουν στεγανή μεμβράνη που επιβραδύνει την απώλεια της υγρασίας από το σκυρόδεμα. Πρέπει να αποφεύγεται να ψεκάζονται στο στάδιο της εξίδρωσης ή σε σκυρόδεμα με ορατό νερό στην επιφάνειά του. Κρίσιμο στοιχείο για την πλήρη απόδοση των υλικών και την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης, είναι ο ψεκασμός της επιφάνειας στον κατάλληλο χρόνο. Ψεκάζονται αμέσως μετά την εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια του σκυροδέματος και την εξαφάνιση της γυαλάδας.

Πρόωρη εφαρμογή διαλύει τα ειδικά υγρά οπότε μειώνεται η αποτελεσματικότητά τους ή απαιτούνται μεγαλύτερες ποσότητες υλικού για την ίδια αποτελεσματικότητα, ενώ καθυστέρηση της εφαρμογής έχει σαν αποτέλεσμα την απορρόφηση τους από το σκυρόδεμα με τα ίδια αποτελέσματα. Σε δύσκολες περιπτώσεις ρηγμάτωσης πλαστικού σκυροδέματος είναι προτιμότερο ο ψεκασμός να γίνεται πριν εξατμιστεί το επιφανειακό νερό πλήρως αλλά υπάρχει ακόμη μια μικρή επιφανειακή «γυαλάδα». Όπου είναι εφικτό για ομοιόμορφη και πλήρη κάλυψη της επιφάνειας εφαρμόζονται σε δυο στρώσεις σε ορθή γωνία, ενδεχομένως και με διαφορετική απόχρωση στρώσεως.

Η χρήση έγχρωμων υγρών συντήρησης διευκολύνει τον έλεγχο της ομοιομορφίας του ψεκασμού από την ομοιομορφία του χρώματος της ψεκασμένης επιφάνειας. Σε επιφάνειες οι οποίες δέχονται ηλιακή ακτινοβολία πρέπει να ψεκάζεται υγρό συντήρησης με ανακλαστικές ιδιότητες (χρώμα λευκό ή αλουμινίου) για την ελαχιστοποίηση της αύξησης της θερμοκρασίας λόγω ακτινοβολίας. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των καταλλήλων υγρών των οποίων η απόδοση διαφοροποιείται ανάλογα με την σύνθεση του υγρού συντήρησης. Αναμειγνύονται πριν την χρήση τους και εφαρμόζονται ομοιόμορφα σύμφωνα με τις οδηγίες του παραγωγού. Ανάλογα με τον τύπο του υλικού και τις οδηγίες του παραγωγού εφαρμόζονται με το χέρι ή με μηχανή ψεκασμού με κατάλληλα ακροφύσια και πίεση 0,2 – 0,7 MPa. Σε μεγάλες επιφάνειες, για μεγαλύτερη ταχύτητα και ομοιόμορφη διασπορά του υλικού προτείνεται η χρήση μηχανής ψεκασμού ενώ για μικρές επισκευές μπορεί να εφαρμόζεται με πλατύ μαλακό πινέλο ή ρολό. Όταν η αδρότητα της ψεκαζόμενης επιφάνειας είναι μεγαλύτερη από την συνηθισμένη (π.χ. δάπεδα με αντιολισθητικές ιδιότητες ή επιφάνειες με ιδιαίτερες αρχιτεκτονικές διαμορφώσεις), τότε απαιτείται να ψεκάζεται μεγαλύτερη ποσότητα υλικού για να επιτευχθεί η επιδιωκόμενη κάλυψη, κατά τις οδηγίες του παραγωγού..

### 3.1.2 Μέθοδοι που υποκαθιστούν το νερό που εξατμίζεται

Κατάλληλες συνθήκες υγρασίας επιτυγχάνονται με συνεχή ή διακεκομμένη αλλά συχνή σε τακτά διαστήματα διαβροχή της επιφάνειας του σκυροδέματος με νερό, με πλημμύρισμα, με ατμό ή με επικάλυψη της επιφάνειας με συνεχώς διαβρεχόμενη λινάτσα ή ύφασμα. Η συντήρηση με υγρές λινάτσες έχει το πλεονέκτημα ότι προφυλάσσει ταυτόχρονα το σκυρόδεμα από την ηλιακή ακτινοβολία και την συνεπακόλουθη αύξηση της θερμοκρασίας του. Η απλή διαβροχή της επιφάνειας μπορεί να διατηρεί την επιφάνεια σε χαμηλή σχετικώς θερμοκρασία λόγω εξάτμισης αλλά ενίοτε σε περιπτώσεις κακής εφαρμογής, μπορεί να προκαλέσει ρηγματώσεις λόγω απότομων θερμοκρασιακών και υγρασιακών μεταβολών (θερμοκρασιακές και υγρασιακές συστολοδιαστολές).

#### Συντήρηση με νερό:

Η συντήρηση με νερό είναι οικονομική, γρήγορη, αποδοτική μέθοδος και δεν παρεμποδίζει την εξέλιξη των εργασιών εφ' όσον γίνεται με ορθό τρόπο. Εφιστάται η προσοχή στο γεγονός ότι η σποραδική διαβροχή είναι δυνατόν να προκαλέσει επιφανειακές ρηγματώσεις λόγω πρόκλησης θερμικού πλήγματος στο σκυρόδεμα (διαβροχή τις μεσημβρινές ώρες σε επιφάνεια ήδη ξηραμένη και εκτεθειμένη στον ήλιο). Η διακεκομμένη διαβροχή πρέπει να γίνεται σε συχνά διαστήματα, πριν να ξηραθεί και θερμανθεί η επιφάνεια του σκυροδέματος, και για τον σκοπό αυτό τα αυτόματα ψεκαστικά μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για πότισμα έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικά. Επισημαίνεται η ανάγκη να γίνεται η διαβροχή κατά ομοιόμορφο τρόπο, έτσι ώστε η κατασκευή να δέχεται την ίδια συντήρηση σε όλα τα σημεία και επίσης να αποφεύγονται τυχόν διαφορετικές υγρασιακής φύσεως παραμορφώσεις από θέση σε θέση. Αν η εφαρμογή της διαβροχής πρέπει να γίνει όταν το σκυρόδεμα είναι ακόμη εύκολα παραμορφώσιμο από τις σταγόνες του νερού, τότε πρέπει να χρησιμοποιούνται μηχανήματα εκνέφωσης, τα οποία παράγουν ιδιαίτερα μικρά σταγονίδια νερού που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα αμέσως πάνω από την επιφάνεια του σκυροδέματος και εμποδίζουν την εξάτμιση του νερού του σκυροδέματος. Η εκνέφωση παράγεται με ειδικά ακροφύσια και το παραγόμενο νέφος πρέπει να κατευθύνεται πάνω από την επιφάνεια του σκυροδέματος και όχι κατευθείαν πάνω σε αυτή, είναι δε αποτελεσματική όσο διάστημα υπάρχει. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα αποφυγής ύπαρξης ρεύματος αέρα πάνω από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Όταν το σκυρόδεμα αποκτήσει τέτοια αντοχή ώστε να μην αλλοιώνεται η επιφάνειά του από την πτώση σταγόνων νερού, τότε η εκνέφωση σταματάει και η συντήρηση γίνεται με διαβροχή με ψεκασμό. Επιβάλλεται επιτήρηση των εργασιών για την καλή λειτουργία του ψεκαστικού συστήματος και απρόσκοπτης τροφοδοσίας του νερού. Η συντήρηση οριζόντιων επιφανειών μπορεί να γίνει, επίσης, με πλημμύρισμα με την βοήθεια περιμετρικής ανύψωσης με χτίσιμο μίας σειράς τούβλων.

#### Συντήρηση με λινάτσες:

Αν στην Σύμβαση του έργου δεν αναφέρεται διαφορετικά και αν δεν προβλέπεται παγετός, η συντήρηση θα γίνεται με υγρές λινάτσες. Οι λινάτσες τοποθετούνται αφού το σκυρόδεμα αποκτήσει τέτοια αντοχή, ώστε να μην προκαλείται αλλοίωση στην επιφάνεια του σκυροδέματος, και διατηρούνται υγρές με τακτά καταβρέγματα. Όλες οι ελεύθερες επιφάνειες του σκυροδέματος πρέπει να καλύπτονται με λινάτσες, οι δε τυχόν αναγκαίες εργασίες (μετακίνηση προσωπικού) πρέπει να γίνονται πάνω στις λινάτσες. Ομοίως, οι κατακόρυφες επιφάνειες μετά την απομάκρυνση του ξυλοτύπου καλύπτονται πλήρως με υγρές λινάτσες που διατηρούνται υγρές με συχνά καταβρέγματα. Οι λινάτσες διατηρούνται συνεχώς υγρές για τουλάχιστον 7 ημέρες και

στη συνέχεια παραμένουν στην επιφάνεια του σκυροδέματος για άλλες 7 ημέρες χωρίς κατ' ανάγκη να καταβρέχονται. Αν οι λινάτσες απομακρυνθούν πριν από τη συμπλήρωση 14 ημερών από τη διάστρωση, για το χρονικό διάστημα από 7 μέχρι 14 ημέρες, το σκυροδέμα θα διαβρέχεται μέχρι κορεσμού της επιφάνειάς του δύο φορές την ημέρα και από τις 14 έως τις 28 ημέρες μία φορά την ημέρα.

### **3.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την διάρκεια συντήρησης**

Η διάρκεια της συντήρησης εξαρτάται από τον τύπο και την ποσότητα του τσιμέντου, τον λόγο N/T, τα χαρακτηριστικά των αδρανών, τα χημικά πρόσθετα, την θερμοκρασία σκυροδέματος, την συμπύκνωση και την αποδοτικότητα της μεθόδου συντήρησης για την συγκράτηση της υγρασίας.

Στα συνηθισμένα έργα, η συντήρηση με λινάτσες που διατηρούνται συνεχώς προβλέπεται διαρκείας 7 ημερών. Για σκυροδέματα ανθεκτικά σε επιφανειακή φθορά, σκυροδέματα μειωμένης υδατοπερατότητας, ή ανθεκτικά σε χημικές προσβολές, η εντατική συντήρηση πρέπει να έχει διπλάσιο χρόνο, δηλ 14 ημέρες. Σημειώνεται ότι για σκυροδέματα με τσιμέντα με αυξημένη περιεκτικότητα σε φυσικές ή τεχνητές ποζολάνες ή ιπτάμενες τέφρες (CEM II ή CEM IV) η απαίτηση για εντατική συντήρηση είναι αυξημένη έναντι αυτών με τσιμέντο τύπου CEM I. Όταν οι καιρικές συνθήκες είναι ευνοϊκές από πλευράς θερμοκρασίας και υγρασίας και δεν παρουσιάζεται εξάτμιση του νερού, τότε δεν απαιτείται εντατική συντήρηση. Οι καιρικές όμως συνθήκες μεταβάλλονται σε ωριαία και ημερήσια βάση αισθητά και επομένως δεν είναι δυνατόν να υιοθετηθούν οδηγίες με γενική ισχύ.

Η απόδοση των μέτρων συντήρησης και η πρόοδος της σκλήρυνσης του σκυροδέματος επί τόπου μπορεί να εκτιμηθεί με δοκίμια τα οποία παραμένουν δίπλα στο έργο «δοκίμια έργου» καθώς και με θερμομέτρα και υγρόμετρα (συνήθως με ηλεκτρονική καταγραφή) τα οποία ενσωματώνονται σε κατάλληλες θέσεις στο έργο και με βάση την αρχή της «ωρίμανσης» βοηθούν στην εκτίμηση της επι τόπου αντοχής ενώ παράλληλα καταγράφουν την πορεία της υγρασίας του σκυροδέματος.

### **3.1.4 Πρόσθετα μέτρα συντήρησης όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι χαμηλή**

Όταν οι θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά την σκυροδέτηση είναι μικρότερη από +5ο C πρέπει να λαμβάνονται ειδικά πρόσθετα μέτρα για την σύνθεση, την παραγωγή, την διάστρωση και την συντήρηση του σκυροδέματος, σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ 515 και με τις προσαρμογές που επέφερε η Υπουργική Απόφαση Δ14/50504 (ΦΕΚ 537 Β/2002).

Για να διατηρηθεί η θερμοκρασία κατά την συντήρηση στα αναγραφόμενα επίπεδα πρέπει να ληφθούν κατάλληλα προστατευτικά μέτρα τα οποία περιλαμβάνουν εκτός από μέτρα που αφορούν την σύνθεση και την παρασκευή του σκυροδέματος (αύξηση της ποσότητας του τσιμέντου, χρήση τσιμέντων τύπου R, χρήση ταχυπηκτικών προσθέτων, θέρμανση των υλικών κλπ) και μέτρα που αφορούν την προφύλαξη του διαστρωθέντος σκυροδέματος, έτσι ώστε η θερμοκρασία του να μην κατέλθει κάτω από τις αναγραφόμενες τιμές. Τα μέτρα αυτά περιλαμβάνουν κάλυψη των στοιχείων του δομήματος με στρώσεις από κατάλληλα μονωτικά υλικά με ιδιαίτερη μέριμνα στα στοιχεία μικρών διαστάσεων τα οποία είναι περισσότερο ευπαθή.

Ως μονωτικά υλικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί πληθώρα υλικών όπως πχ λινάτσες, υφάσματα, φύλλα πολυαιθυλενίου σε συνδυασμό με κάλυψη με άμμο ή άχυρα, διογκωμένη πολυστερίνη, φύλλα αφρώδους βινυλίου, αφρός πολυουρεθάνης και άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται ως μονωτικά.

Σε άλλες περιπτώσεις καλύπτεται το δόμημα εξωτερικά με πλαστικά φύλλα και εσωτερικά θερμαίνεται ο χώρος με κατάλληλα θερμαντικά σώματα. Αν το σκυρόδεμα μετά την περίοδο προφύλαξης εκτεθεί σε επανειλημμένους κύκλους ψύξεως κάτω του μηδενός και απόψυξης, ενώ βρίσκεται σε κρίσιμη κατάσταση κορεσμού, τότε η προφύλαξή του από την ψύξη πρέπει να συνεχιστεί μέχρις ότου αποκτήσει αντοχή σε θλίψη τουλάχιστον 24MPa για να μην διατρέχει κίνδυνο βλαβών. Για να μπορεί να αντεπεξέλθει στην θερμική καταπόνηση που δημιουργούν τα αντιπαγωτικά άλατα θα πρέπει να έχει αντοχή σε θλίψη μεγαλύτερη από 31 MPa. Η αντοχή του σκυροδέματος επι τόπου εκτιμάται με δοκίμια έργου. Ο χρόνος διατηρήσεως των καλουπιών προσαρμόζεται ή παρατείνεται αναλόγως. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην αποφυγή ξήρανσης της επιφάνειας του σκυροδέματος.

Κατά την διάρκεια των χαμηλών θερμοκρασιών είναι πιθανόν ο συνδυασμός σχετικώς υψηλής θερμοκρασίας σκυροδέματος (7-10 οC) με τη χαμηλή θερμοκρασία και σχετική υγρασία περιβάλλοντος (ΣΥ <40%) να προκαλέσει ταχεία εξάτμιση του σκυροδέματος και πρόκληση ρηγματώσεων «νωπού σκυροδέματος». Η διαβροχή με νερό στις περιπτώσεις αυτές δεν αποτελεί πρακτική λύση, λόγω του κινδύνου δημιουργίας πάγου, κυρίως στις θέσεις όπου το επιπλέον νερό απορρέει. Η άμεση κάλυψη με πλαστικά φύλλα θεωρείται ότι παρουσιάζει πολλά πρακτικά πλεονεκτήματα.

### **3.1.5 Πρόσθετα μέτρα συντήρησης όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή**

Όταν οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος κατά την σκυροδέτηση είναι υψηλές, πράγμα που συμβαίνει συνήθως το καλοκαίρι, πρέπει να λαμβάνονται ειδικά πρόσθετα μέτρα για την σύνθεση, την παραγωγή, την διάστρωση και την συντήρηση του σκυροδέματος τα οποία αναπτύσσονται στο Πρότυπο ΕΛΟΤ 517. Η διαδικασία παρασκευής και διάστρωσης του σκυροδέματος πρέπει να περιορίζεται χρονικά, ώστε να αποφεύγεται η άνοδος της θερμοκρασίας του μίγματος. Ο αριθμός των αρμών διακοπής εργασίας πρέπει να περιορίζεται στο ελάχιστο δυνατό. Οι επιφάνειες διακοπής εργασίας πρέπει να υφίστανται επιμελημένη επεξεργασία, όπως τράχυνση και επικάλυψη με βρεγμένες λινάτσες, για να διατηρηθεί η συγκολλητική ικανότητα του σκυροδέματος που έχει ήδη διαστρωθεί.

Επιπλέον, οι υψηλές θερμοκρασίες στο σκυρόδεμα ενέχουν κίνδυνο για :

- ταχύτερη πήξη,
- ταχεία εξάτμιση του νερού,
- δημιουργία θερμικών τάσεων κατά την ψύξη που ενδεχομένως επακολουθήσει τις βραδινές ή τις πρωινές ώρες της επόμενης ημέρας
- επίτευξη μικρότερων αντοχών σε μεγάλη ηλικία από εκείνες που επιτυγχάνονται με το ίδιο σκυρόδεμα σε κανονική θερμοκρασία.

Η εξάτμιση του νερού του σκυροδέματος εκτός των κινδύνων που ενέχει για την δημιουργία ρηγματώσεων, είναι δυνατόν να στερήσει από τις επιφανειακές στρώσεις του σκυροδέματος το απαιτούμενο νερό για την προβλεπόμενη ενυδάτωση. Στις περιπτώσεις αυτές το

σκυρόδεμα παρουσιάζει μειωμένη ενυδάτωση με συνέπειες στην αντοχή αλλά κυρίως στην προστασία που παρέχουν οι επιφανειακές αυτές στρώσεις στον οπλισμό και στο ίδιο το σκυρόδεμα (αυξημένο πορώδες και αυξημένη διαπερατότητα). Είναι επομένως απαραίτητο να εντατικοποιηθούν ή να προσαρμοστούν κατάλληλα τα μέτρα για την συντήρηση του σκυροδέματος. Αν η συντήρηση γίνεται με διαβροχή, οι υψηλές θερμοκρασίες επιβάλλουν να γίνονται οι ψεκασμοί σε συχνότερα διαστήματα γιατί ο ρυθμός εξάτμισης είναι πολύ μεγαλύτερος. Ο κίνδυνος εμφάνισης ρηγματώσεων νωπού σκυροδέματος πριν ακόμη ολοκληρωθεί η τελική μόρφωση της επιφάνειας είναι μεγάλος. Στις περιπτώσεις αυτές η περιοχή πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια του σκυροδέματος και όχι κατευθείαν η επιφάνεια του σκυροδέματος, τροφοδοτείται με νερό υπό μορφή πολύ μικρών αιωρούμενων σταγονιδίων (εκνεφωμένο νερό). Με τον τρόπο αυτό αυξάνει τοπικά η σχετική υγρασία και ελαττώνεται ο ρυθμός εξάτμισης. Αντί της χρήσεως εκνεφωμένου νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί έγκαιρα υγρό συντήρησης για κάλυψη της επιφάνειας και μερική αδιαβροχοποίησή της. Εφιστάται η προσοχή ότι στις περιπτώσεις αυτές απαιτείται υγρό συντήρησης με μεγάλη ικανότητα παρεμπόδισης της εξάτμισης λόγω των ιδιαίτερα δυσμενών συνθηκών. Τα παραπάνω μέτρα είναι δυνατόν να πρέπει να συμπληρωθούν με τοποθέτηση αντιανέμιων πετασμάτων για τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου και σκιαδίων για την προφύλαξη από την ηλιακή ακτινοβολία και την συνεπαγόμενη αύξηση της θερμοκρασίας του σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα πρέπει να προφυλάσσεται από απότομη ελάττωση της θερμοκρασίας, η οποία μπορεί να συμβεί λόγω πτώσεως της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος τη νύχτα ή τις πρώτες πρωινές ώρες ή μετά από απογευματινή βροχή (ρυθμός μεγαλύτερος από 3oC/h). Η απότομη αυτή πτώση της θερμοκρασίας θα προκαλέσει ρηγματώση στο σκυρόδεμα.

## **3.2 ΜΕΤΡΑ ΕΠΙΤΕΥΞΗΣ ΤΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ**

Η εκ των υστερών αντιμετώπιση του προβλήματος της διάβρωσης των οπλισμών είναι πολύ πιο δαπανηρή από το να πάρουμε εξ αρχής τα απαραίτητα μέτρα και να τηρήσουμε τις αντίστοιχες κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Επιπλέον κατά τη διάρκεια των εργασιών μπορεί να διαταραχθεί η ομαλή λειτουργία του έργου. Η επιλογή της επέμβασης εξαρτάται από το αν οι παράγοντες που ευνοούν τη διάβρωση έχουν περιοριστεί στην επικάλυψη ή έχουν φτάσει μέχρι τους οπλισμούς, και αν ναι σε τι βαθμό έχουν αυτοί φθαρεί. Στο εμπόριο διατίθενται τα τελευταία χρόνια μια πληθώρα υλικών τα οποία θεωρούνται ότι καθυστερούν την εμφάνιση της διάβρωσης σε νέες κατασκευές ή την επιβραδύνουν στις υφιστάμενες ή προκαλούν ακόμα και επαναπαθητικοποίηση του οπλισμού που έχει αποπαθητικοποιηθεί λόγω ενανθράκωσης ή χλωριόντων. Μερικά από αυτά είτε είναι σε μορφή προσμείκτων (για νέες κατασκευές), είτε με τη μορφή διαλύματος που απλώνεται στην επιφάνεια με σκοπό το διαποτισμό της μάζας του σκυροδέματος, είτε σαν υλικά επικαλύψεων της επιφάνειάς του ώστε να στεγανοποιηθεί έναντι σε υγρά και αέρια.

### **3.2.1 ΥΔΑΤΟΣΤΕΓΕΙΣ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ**

Διατίθενται συνήθως σε έτοιμα βιομηχανοποιημένα φύλλα αλλά και σε υγρά υλικά. Τα υγρά υλικά είναι πιο ακριβά αλλά πιο εύχρηστα και πιο ακριβή στην εφαρμογή τους, η δε

ποιότητα της μεμβράνης μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Οι απαιτήσεις που ικανοποιεί είναι: εύκολη τοποθέτηση, καλή πρόσφυση με το υπόστρωμα, δεν αντιδρά με τα συστατικά του σκυροδέματος, εμποδίζει την διείσδυση των χλωριόντων και της υγρασίας υπό διάφορες συνθήκες. Η τοποθέτηση των μεμβρανών στο σκυρόδεμα θα πρέπει να γίνεται κάτω από καλές καιρικές συνθήκες και με αυστηρή τήρηση των κατασκευαστικών λεπτομερειών. Οι μεμβράνες κινδυνεύουν από της φυσαλίδες οι οποίες δημιουργούν από την διόγκωση της υγρασίας και των αέριων που παγιδεύονται στο σκυρόδεμα. Αντίθετα αυτές που δημιουργούνται μέσα στην μεμβράνη, δεν μειώνουν την προστασία του σκυροδέματος ως προς τη διείσδυση των χλωριόντων ή της υγρασίας. Οι καιρικές συνθήκες το πορώδες και η υγρασία του σκυροδέματος καθορίζουν την εμφάνιση των φυσαλίδων. Εφόσον αποφασίσουμε να χρησιμοποιήσουμε μεμβράνες θα πρέπει να γνωρίζουμε ότι δεν έχουν μεγάλη ανθεκτικότητα στο χρόνο και θα πρέπει σε τακτά χρονικά διαστήματα να τις αλλάζουμε, αυτό όμως δεν είναι και τόσο εύκολο πάντα.



**Εικόνα 14**

### 3.2.2 ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΑ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΑ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.

Τα επιστρώματα γίνονται από ειδικά σκυροδέματα υψηλής ποιότητας και αντοχής. Αυτά είναι Portland ή σκυρόδεμα με πρόσθετα πολυμερή. Σκοπός τους είναι να μειώσουν την διαπερατότητα που έχει το ήδη υπάρχον. Πριν την κατασκευή τους απαιτείται προετοιμασία του υποστρώματος ώστε να επιτευχθεί η συνεργασία μεταξύ παλιού και νέου υλικού. Η παρασκευή τους γίνεται επί τόπου ενώ πριν την τοποθέτησή του απαιτείται διαβροχή του υποστρώματος. Το πάχος τους είναι συνήθως 40-50mm. Είναι απαραίτητη η συντήρησή τους για 72 ώρες γιατί οι

υψηλές θερμοκρασίες του περιβάλλοντος προκαλούν πρόωρη ξήρανση του υποστρώματος και συστολή ξήρανσης η οποία αποτελεί τον σοβαρότερο κίνδυνο.

### 3.2.3 ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΠΟΛΥΜΕΡΗ.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όταν το περιβάλλον είναι πολύ διαβρωτικό ώστε να μειωθεί η διαπερατότητα του σκυροδέματος. Για το σκοπό αυτό γίνεται πλήρωση των κενών με πολυμερή σε βάθος 35-50mm. Η διαδικασία που ακολουθείται περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- § Καθαρισμός της επιφάνειας του σκυροδέματος από τυχών ξένες ουσίες
- § Άπλωμα άμμου στο σκυρόδεμα ώστε να αποφευχθεί το θερμικό σοκ του σκυροδέματος κατά την επακολουθούσα εφαρμογή υψηλών θερμοκρασιών
- § Ξήρανση του σκυροδέματος που πραγματοποιείται με διατήρηση υψηλών θερμοκρασιών για αρκετό χρονικό διάστημα (120 C° για 8 ώρες)
- § Σταδιακή απόψυξη του σκυροδέματος με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην απορροφηθεί υγρασία από το περιβάλλον (38 C° για 12-36 ώρες)
- § Αφαίρεση του αέρα από το σκυρόδεμα με εφαρμογή κενού
- § Προσθήκη μονομερούς
- § Προσθήκη αδιάβροχων μεμβρανών στην επιφάνεια, ώστε να εμποδίσουμε την εξάτμιση του μονομερούς
- § Θερμικός καταλυτικός πολυμερισμός του μονομερούς στους 74 C° για 5 ώρες

Το συνηθέστερο μονομερές είναι το μεθακρυλικό μεθύλιο διότι έχει μικρό ιξώδες, υψηλό σημείο βρασμού, εύκολο πολυμερισμό και δεν είναι τοξικό, έχει όμως υψηλό κόστος. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι εφαρμόζεται σ' όλα τα σκυροδέματα ανεξάρτητα από την ποιότητα ή την σύστασή του. Επίσης βελτιώνει όλες τις ιδιότητές του. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η ιδιαίτερη προσοχή που πρέπει να δείξουμε κατά τη διάρκεια της ξήρανσης του σκυροδέματος γιατί μπορεί να προκληθεί ρηγμάτωση. Επίσης απαιτείται ειδικός εξοπλισμός και εξειδικευμένο προσωπικό.

### 3.2.4 ΕΠΑΝΑΛΚΑΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στο ενανθρακωμένο σκυρόδεμα με σκοπό να αυξηθεί η αλκαλικότητά του η οποία έχει μειωθεί λόγω της ενανθράκωσης. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στην ηλεκτροδύναμη παρουσία εξωτερικού δυναμικού. Στην επιφάνεια του σκυροδέματος απλώνεται ένα αλκαλικό υλικό και ένα ηλεκτρόδιο το οποίο λειτουργεί ως άνοδος, ενώ ο χάλυβας του σκυροδέματος χρησιμοποιείται ως κάθοδος. Στη συνέχεια εφαρμόζοντας εξωτερικό ηλεκτρικό δυναμικό το αλκαλικό υγρό θα διεισδύσει στο σκυρόδεμα με άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση του PH του. Ποσότητα αλκαλικού υγρού περίπου 1,2 lt/m<sup>2</sup> μπορεί να επαναλκαλοποιήσει σκυρόδεμα με πορώδες 12% σε πάχος 1 cm. Η μέθοδος εφαρμόζεται για 14 ημέρες περίπου. Είναι απλή και η επιτυχία της μπορεί να ελεγχθεί. Μεγάλο μειονέκτημα της είναι ότι μπορεί να μείνουν περιοχές στις οποίες δεν υπάρχει αύξηση του pH.

### 3.2.5 ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Η μέθοδος έχει εφαρμοστεί για την αφαίρεση χλωριόντων από καταστρώματα γεφυρών όπου και αφαιρέθηκαν έως και το 90% των χλωριόντων. Τα χλωριόντα αφαιρούνται ηλεκτροχημικά μιας και η μέθοδος βασίζεται στην αρχή της ηλεκτροωσμώσεως. Έτσι λοιπόν χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλο ηλεκτρολύτη, μια ρητίνη ανταλλαγής ιόντων και ένα μεταλλικό πλέγμα το οποίο απλώνεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος, χρησιμεύοντας ως άνοδος ενώ ο οπλισμός δρα ως κάθοδος. Εφαρμόζοντας το δυναμικό τα χλωριόντα έλκονται από την θετικά φορτισμένη άνοδο με αποτέλεσμα να δεσμευτούν από την ρητίνη. Η μέθοδος είναι δαπανηρή, απαιτεί την εφαρμογή υψηλού δυναμικού που έχει όμως ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλων θερμοκρασιών στο σκυρόδεμα το οποίο κινδυνεύει να ρηγματωθεί, επιπλέον αυξάνεται η διαπερατότητα του σκυροδέματος κατά πέντε φορές και θα πρέπει να γίνει και εμποτισμός του σκυροδέματος με πολυμερή, τέλος αν εφαρμόσουμε μεγάλες πυκνότητες ρεύματος μειώνεται η αντοχή συνάφειας.

### 3.2.6 ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι η αφαίρεση της υγρασίας. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι το pH του σκυροδέματος να είναι υψηλό (μεγαλύτερο από 8), και το κονίαμα να περιέχει μικρές ποσότητες αλάτων. Η ξήρανση του πορώδους δεν μπορεί να γίνει όταν υπάρχουν πολύ λίγα ή πάρα πολλά. Η βέλτιστη περίπτωση είναι όταν η περιεκτικότητα σε άλατα είναι από 2-5%, ενώ η παρουσία θεικών ιόντων, επειδή διευκολύνουν τη διάσπαση του νερού, θεωρείται αρνητική για την εφαρμογή της μεθόδου. Η διαδικασία εφαρμογής είναι ίδια με αυτή που εφαρμόζεται για την αφαίρεση των χλωριόντων. Έτσι λοιπόν η διαφορά δυναμικού αναγκάζει τα ιόντα των αλάτων να κινηθούν προς τα ηλεκτρόδια, μεταφέροντας μαζί του και το νερό. Για να πραγματοποιηθεί η ξήρανση πρέπει η ένταση του ρεύματος που θα δημιουργηθεί να είναι τουλάχιστον ίση με 0,1 έως 1 A. Η μέθοδος είναι πολύ αργή, και αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό αν αναλογιστούμε ότι για να μειώσουμε την υγρασία ενός τοίχου από 50% σε 30% χρειάζεται να εφαρμοστεί για 6 μήνες. Τη διαδικασία αυτή την εφαρμόζουμε στις τοιχοποιίες όπου το κόστος είναι χαμηλό ενώ τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά.

### 3.2.7 ΚΑΘΟΔΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

Η καθοδική προστασία είναι η μόνη μέθοδος η οποία μπορεί να εγγυηθεί χρόνο ζωής της τάξεως των πέντε αιώνων καθώς είναι η μοναδική που μπορεί να αναστείλει και να αντιστρέψει το δυναμικό διάβρωσης, μηδενίζοντας θεωρητικά την ταχύτητά της. Άρχισε να εφαρμόζεται το 1900-1910 για την προστασία αγωγών στο έδαφος και μεταλλικών κατασκευών. Συνίσταται στην εφαρμογή δυναμικού αντίθετου με αυτό της διάβρωσης ώστε η μεταλλική κατασκευή να γίνει κάθοδος ενός ηλεκτρολυτικού κελιού. Με αυτόν τον τρόπο δεν είναι πλέον δυνατή η διεξαγωγή αντιδράσεων οξειδωσης των μετάλλων, αλλά αντιθέτως είναι δυνατή η πραγματοποίηση αντιδράσεων αναγωγής. Το δυναμικό του συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο απαιτεί η καθοδική προστασία εφαρμόζεται με δύο τρόπους, με την επιβολή τάσεων από μια **πηγή συνεχούς ρεύματος** και με τη χρησιμοποίηση ενός **μετάλλου ή κράματος υψηλότερου δυναμικού** από αυτό που θα προστατεύσουμε. Στο οπλισμένο σκυρόδεμα η καθοδική προστασία μπορεί να εφαρμοστεί και με τους δύο τρόπους. Για λόγους ευκολίας όμως χρησιμοποιείται η εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση (πρώτη μέθοδος). Σε αυτή ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται



με τον οπλισμό, ενώ ο θετικός με την κατάλληλη άνοδο. Το εξωτερικά εφαρμοζόμενο δυναμικό μηδενίζει την επίδραση των τοπικών γαλβανικών στοιχείων αλλά και την επίδραση των μακροστοιχείων. Στην επιφάνεια του χάλυβα δεν είναι πλέον δυνατή η διεξαγωγή οξειδωτικών δράσεων παρά μόνο αναγωγικών. Η διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου στο οπλισμένο σκυρόδεμα εξαρτάται από τη διάρκεια ζωής της ανόδου, και αυτό γιατί η αντικατάστασή της, όταν αυτή βρίσκεται μέσα στο σκυρόδεμα, είναι δύσκολη. Ο λόγος που συνήθως εγκιβωτίζουμε την άνοδο στο οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ότι έτσι έχουμε καλύτερα αποτελέσματα. Εκτός τοποθετείται μόνο στα θεμέλια ή σε τμήματα της κατασκευής που βρίσκονται μέσα στη θάλασσα. Αυτό καθορίζεται από παράγοντες όπως το υλικό κατασκευής της ανόδου, τη διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος και την τιμή του εφαρμοζόμενου δυναμικού. Η διάρκεια ζωής της καθοδικής προστασίας εξαρτάται από την διάρκεια ζωής των ανόδων. Τα διάφορα είδη ανόδων που υπάρχουν είναι:

- § Άνοδοι με μορφή πλέγματος
- § Αγωγήματα χρώματα
- § Αγωγήματα κονιάματα
- § Άνοδοι μεταλλικού επιστρώματος
- § Μεμονωμένες εσωτερικές άνοδοι

Στην καθολική προστασία χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια αναφοράς u947 για τη ρύθμιση του δυναμικού και τον έλεγχο της καλής λειτουργίας. Αυτά που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι τα εξής:

το ηλεκτρόδιο χαλκού / θεικού χαλκού,  
το ηλεκτρόδιο καλομέλανα και  
το ηλεκτρόδιο αργύρου / χλωριούχου αργύρου.

Στο οπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται το ηλεκτρόδιο αργύρου / χλωριούχου αργύρου. Οι μετασχηματιστές-ανορθωτές της καθοδικής προστασίας του οπλισμένου σκυροδέματος είναι συνήθως μονοφασική με πλήρη ανόρθωση. Η καθοδική προστασία έχει εφαρμοστεί και σε νοσοκομείο της Αθήνας. Η συνολική προστατευμένη επιφάνεια ανέρχεται σε 1000m<sup>2</sup>. Απαιτήθηκαν 650 m<sup>2</sup> ανόδων πέλματος τιτάνιου, 600m ελάσματος τιτάνιου για τη σύνδεση των ανόδων, τρία ηλεκτρόδια αναφοράς και τρεις μετασχηματιστές ανορθωτές.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Οι σύγχρονες μέθοδοι κατασκευής σήραγγων σε ασταθή υποστρώματα κάνουν χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος τα οποία άμεσα φέρουν φορτία ως εσωτερικές επενδύσεις της σήραγγας. Τα προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος, τα οποία αποκαλούνται τομείς σήραγγας (tunnel segments), επιτελούν αυτή τη λειτουργία.

#### 4.1 Παραγωγή και σύνθεση

Λόγω του πλήθους και του μεγάλου βάρους τους, οι τομείς σήραγγας παράγονται σχεδόν πάντα κοντά στην είσοδο της σήραγγας σε εξειδικευμένες εγκαταστάσεις προκατασκευής. Τα στοιχεία αυτά πρέπει να πληρούν προδιαγραφές υψηλής ακρίβειας. Η χρήση χαλύβδινων καλουπιών μεγάλου βάρους αποτελεί κανόνα κατά την παραγωγή τους. Επειδή η αποκαλούπωση λαμβάνει χώρα μετά από 5-6 ώρες και το σκυρόδεμα πρέπει να έχει ήδη θλιπτική αντοχή  $>15\text{N/mm}^2$ , **η επιτάχυνση ανάπτυξης των αντοχών είναι βασική.**

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για να γίνει αυτό. Κατά τη μέθοδο θέρμανσης με ατμό (ανακύκλωση θερμότητας), το σκυρόδεμα θερμαίνεται στους  $28-30^\circ\text{C}$  κατά την ανάμιξη (με ζεστό νερό ή ατμό), τοποθετείται στο καλούπι και φινίρεται. Ακολουθώς θερμαίνεται για περίπου 5 ώρες σε θάλαμο θέρμανσης στους  $50-60^\circ\text{C}$  για να αποκτήσει την απαραίτητη για την αποκαλούπωση αντοχή.

- Αδρανή
  - § Συνήθως 0-32mm στο εύρος του μεγέθους σύμφωνα με EN480-1
- Τσιμέντο
  - § Περιεχόμενο τσιμέντο 325 ή 350  $\text{kg/m}^3$
  - § CEM I 42.5 ή 52.5
- Τοποθέτηση

Το μίγμα νωπού σκυροδέματος έχει την τάση να πήζει γρήγορα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και με τον τρόπο αυτό η σωστή συμπύκνωση και το τελείωμα της επιφάνειας γίνεται δυσκολότερα.

Λόγω της ταχείας βιομηχανοποιημένης παραγωγής, συνήθως το νωπό παραγόμενο σκυρόδεμα είναι πλαστικό. Η απαιτούμενη αρχική αντοχή μπορεί να επιτευχθεί μόνο με χαμηλό λόγο νερού/τσιμέντο, ο οποίος πρέπει να είναι πάντα  $<0.48$ .

#### 4.2 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

##### 4.2.1 Γενικά

Το σκυρόδεμα που συντίθεται από υδραυλικά τσιμέντα, λεπτόκοκκα ή/και χονδρόκοκκα αδρανή και ασυνεχείς διακριτές ίνες ορίζεται ως ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Οι ίνες είναι μικρού μήκους, της τάξης των μερικών εκατοστών, και διαμέτρου που είναι συνήθως κλάσμα του χιλιοστού και διασκορπίζονται στη μάζα του υλικού κατά την ανάμιξη των συστατικών του, σε

ποσοστό της τάξης του 1-3% κ.ο. Συνήθως παρασκευάζονται από χάλυβα, πολυπροπυλένιο ή γυαλί, ενώ εφαρμογές βρίσκουν και ίνες από αλλά υλικά, όπως ο άνθρακας, η αραμιδίδη, ο πολυεστέρας, το νάιλον, και φυσικά υλικά, όπως το ξύλο. Ο βασικός ρόλος των ινών στο σκυρόδεμα είναι η αύξηση της παραμόρφωσης του υλικού κατά την αστοχία (που σχετίζεται με εφελκυστικές τάσεις) και ο περιορισμός γενικά της ρηγματώσης (π.χ. λόγω συστολής ξήρανσης), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις επιτυγχάνεται και (μικρή συνήθως) αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό. Αποτέλεσμα είναι κυρίως η αύξηση της δυσθραυστότητας του υλικού, δηλαδή της ικανότητας του να απορροφήσει ενέργεια κατά την παραμόρφωση, που αντιπροσωπεύεται από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτιού-παραμόρφωσης. Το εμβαδόν αυτό είναι συχνά 10-40 φορές μεγαλύτερο για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα από ότι στο άοπλο. Τα τελευταία χρόνια οι χρήσεις του ινοπλισμένου σκυροδέματος έχουν επεκταθεί σε παρά πολλές κατηγορίες έργων πολιτικού μηχανικού λόγω των βελτιωμένων μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων του σε σύγκριση με το συμβατικό άοπλο σκυρόδεμα.

Οι συνήθεις τύποι ινών που χρησιμοποιούνται είναι από γυαλί ή αραμιδίδη (που συχνά αναφέρεται ως κέβλαρ) ή άνθρακα με πολύ μικρή διάμετρο, της τάξης των 5 – 25 μm. Ως εκ τούτου τα υλικά αυτά παρουσιάζουν δύο επιπλέον σημαντικά πλεονεκτήματα. Έχουν εξαιρετικά υψηλή αντοχή σε διάβρωση και δεν επηρεάζονται από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Στον πίνακα 3 αξίζει να παρατηρηθεί το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή αλλά και η μικρή παραμόρφωση αστοχίας των σύνθετων υλικών σε σχέση με τον χάλυβα. Επίσης, για την περίπτωση ινών άνθρακα, πρέπει να επισημανθούν οι σχετικά μεγάλες τιμές του μέτρου ελαστικότητας καθώς και οι ιδιαίτερα μικρές τιμές της παραμόρφωσης αστοχίας τους. Είναι δε χαρακτηριστικό ότι στις περιπτώσεις υψηλού και πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας οι παραμορφώσεις αστοχίας είναι δραματικά μικρές.

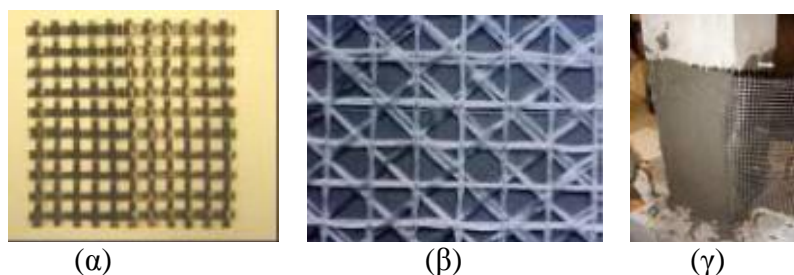
Η χρήση τους στην κατασκευή απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, σύνεση και σχολαστική επιβεβαίωση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών σε βάθος χρόνου.

Χαρακτηριστικό	ΙΟΠ-Άνθρακας	ΙΟΠ-Αραμιδίου	ΙΟΠ-Γυαλιού
Ανθεκτικότητα σε διάρκεια	Πολύ καλή	Καλή	Οριακή
Αντοχή σε κόπωση	Πολύ καλή	Καλή	Οριακή
Ανθεκτικότητα σε αλκαλικό περιβάλλον	Πολύ καλή	Καλή	Ακατάλληλο υλικό
Αντοχή σε κρούση	Μικρή	Πολύ καλή	Καλή
Αντοχή σε φθορά λόγω τριβής	Μέτρια	Πολύ καλή	Καλή
Γαλβανικό φαινόμενο	Ναι	Όχι	Όχι
Αντοχή σε υπεριώδεις ακτινοβολίες	Καλή	Μικρή	Καλή
Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup> )	~1,80	~2,50	~1,50
Κόστος (συγκριτικά μεταξύ τους)	Υψηλό	Μέτριο	Χαμηλό

**Πίνακας 3:** Ποιοτική αξιολόγηση ινοπλισμένων πολυμερών

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σήμερα στην κατασκευή με ποικίλες μορφές. Αρκετές είναι εξειδικευμένες επιλογές για ειδικές περιπτώσεις, ενώ πολλές βρίσκονται στο στάδιο διερεύνησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την κάλυψη ειδικών απαιτήσεων έχουν ήδη κατασκευαστεί αρκετές ολόσωμες κατασκευές από σύνθετα υλικά. Για εφαρμογές τους σε

συνλειτουργία με άλλα συμβατικά δομικά υλικά, όπως το σκυρόδεμα και η τοιχοποιία, θα μπορούσαν να ξεχωρίσουν οι ράβδοι ή πλέγματα ως οπλισμός σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος στις νέες κατασκευές.

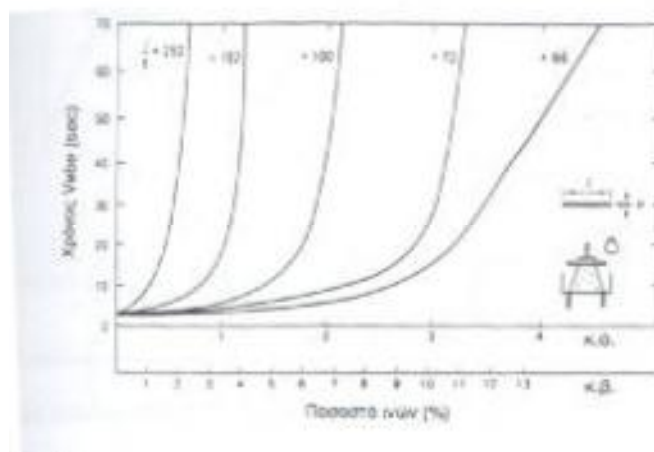


**Εικόνα 15** Πλέγματα ινών (α) δύο διευθύνσεων και (β) τεσσάρων διευθύνσεων. (γ) Εφαρμογή ινοπλεγμάτων σε κονίαμα στη βάση υποστυλώματος.

## 4.2.2 Παραγωγή

### 4.2.2.1 Σύνθεση Ινοπλισμένου σκυροδέματος

Η χρήση ινών στο σκυρόδεμα επιφέρει γενικά μείωση της εργασιμότητας, που είναι ανάλογη του ποσοστού ινών. Η σημαντική μείωση της ρευστότητας του νωπού σκυροδέματος, ακόμα και για μικρά ποσοστά ινών, είναι χαρακτηριστική, αρκεί να αναφερθεί ότι ποσοστό ινών χάλυβα ή γυαλιού γύρω στο 1,5% κ.ο. μπορεί να μειώσει την κάθιση από 200mm σε 25mm, χωρίς όμως να μειώνεται αναλογικά και η ευκολία διασταύρωσης ή συμπίκνωσης. Γι' αυτό η δόκιμη κάθισης θεωρείται ακατάλληλη για τη μέτρηση της εργασιμότητας του σκυροδέματος, ενώ πιο κατάλληλη θεωρείται η δόκιμη Vebe. Η επίδραση του λόγου μήκους προς διάμετρο της ίνας ( $l/d$ ) και του ποσοστού ινών χάλυβα στο χρόνο Vebe δίνεται στο Σχ.2



**Σχ 2** Επίδραση ποσοστού ινών και λόγου μήκους προς διάμετρο στο χρόνο Vebe

Είναι σαφές ότι αύξηση των παραμέτρων αυτών έχει δυσμενή αποτελέσματα για την εργασιμότητα, ενώ όπως προαναφέρθηκε βελτιώνει τη μηχανική συμπεριφορά. Επίσης έχει αποδειχθεί ότι, τουλάχιστον για ίνες χάλυβα, λόγοι ( $l/d$ ) πάνω από 100 προκαλούν αλληλεμπλοκές

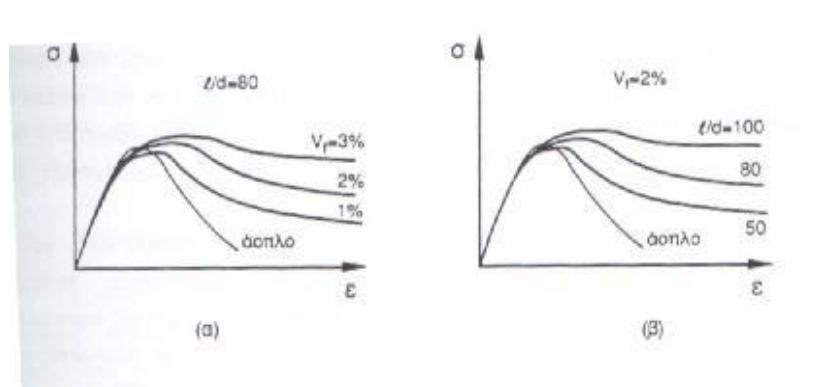
ινών και συσσωματώσεις που επιφέρουν ανομοιογένεια στη μάζα του σκυροδέματος, γι' αυτό και πρέπει να αποφεύγονται. Γενικά ο λόγος ( $l/d=100$ ) καθώς και το ποσοστό ινών 2% κ.ο. θεωρούνται άνω όρια για τις ίνες χάλυβα.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει αρνητικά την εργασιμότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι η αύξηση του μέγιστου κόκκου αδρανών, που δεν πρέπει να ξεπερνά τα 20mm. Τέλος, οι απαιτήσεις για καλή εργασιμότητα περιλαμβάνουν τη χρήση προσθέτων (π.χ. αερακτικά, ρευστοποιητικά), την αύξηση της ποσότητας τσιμεντοπολτού και τη χρήση ινών που είναι κολλημένες μεταξύ τους (ανά ομάδες των 10-30) με υδατοδιάλυτη κόλλα.

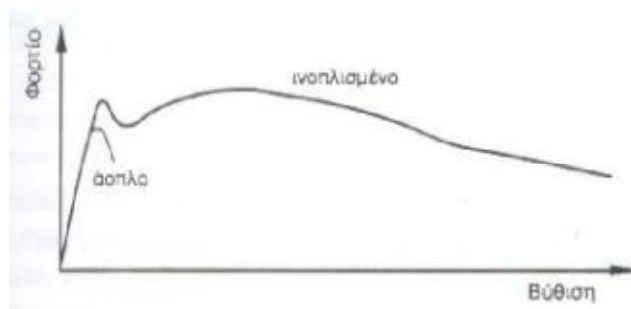
Για σύγκριση με το άοπλο σκυρόδεμα πρέπει η απαιτούμενη ποσότητα τσιμεντοπολτού να είναι μεγαλύτερη στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα από ότι στο άοπλο. Γενικά, σε σύγκριση με το άοπλο, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει περισσότερο τσιμέντο, μεγαλύτερο ποσοστό λεπτών αδρανών και χονδρά αδρανή με μικρότερο κόκκο. Για κάθε τύπο ινών η βέλτιστη σύνθεση προσδιορίζεται με διαδοχικές δοκιμές, φροντίζοντας να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις αντοχής, εργασιμότητας και ανθεκτικότητας σε διάρκεια.

#### 4.2.2.2 Ιδιότητες Ινοπλισμένου σκυροδέματος

Όπως αναφέρεται και παραπάνω, η αύξηση αντοχής του σκυροδέματος λόγω προσθήκης ινών είναι μικρή. Η αντοχή σε θλίψη αυξάνεται από ελάχιστα έως καθόλου (μάλιστα μπορεί και να μειωθεί όταν προκαλείται σημαντική μείωση της εργασιμότητας), ενώ οι αντοχές σε εφελκυσμό και κάμψη αυξάνονται λίγο περισσότερο. Η ευεργετική δράση των ινών αφορά βασικά τη δυσθραυστότητα, που αυξάνεται με το ποσοστό των ινών και το λόγο  $l/d$ . Χαρακτηριστικά της επίδρασης των ινών στη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος είναι τα αποτελέσματα του Σχ. 3, που αφορά σκυροδέματα οπλισμένα με λείες ίνες χάλυβα.



Σχ. 3 Επίδραση (α) ποσοστού ινών χάλυβα και (β) λόγου  $l/d$  στη θλιπτική αντοχή.



Σχ. 4 Επίδραση ινών στη συμπεριφορά σε κάμψη.

Λόγω της σημαντικής δυσθραυστότητας, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από αντοχή σε κρούση που ξεπερνά κατά πολύ αυτήν του άοπλου, μέχρι και τέσσερις φορές, ανάλογα με το ποσοστό και τον τύπο ινών (οι παραμορφωμένες ίνες δίνουν, γενικά, ευνοϊκότερα αποτελέσματα). Για τον ίδιο λόγο, αυξημένη είναι και η αντοχή σε κόπωση, κατά 30-90% περίπου έναντι αυτής του άοπλου. Εδώ σημειώνεται και η μείωση του πλάτους των ρωγμών λόγω κόπωσης.

Η επίδραση των ινών στο μέτρο ελαστικότητας είναι αμελητέα, ενώ μερικές φορές μπορεί να γίνει και δυσμενής, λόγω μείωσης της εργασιμότητας που μπορεί να επιφέρει εγκλωβισμένο αέρα. Οι παραμορφώσεις λόγω συστολής ξήρανσης και ερπυσμού είναι περίπου οι ίδιες με τις αντίστοιχες του άοπλου σκυροδέματος, ενώ γενικά ο έλεγχος της ρηγμάτωσης είναι καλύτερος.

Η ανθεκτικότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε διάρκεια είναι γενικά πολύ καλή, κυρίως λόγω μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε τσιμέντο. Η τυχόν διάβρωση των ινών χάλυβα είναι μόνον επιφανειακή και χωρίς δυσμενείς επιπτώσεις, επειδή η διάμετρος των ινών είναι μικρή, και επομένως οι τάσεις λόγω διόγκωσης που προκαλούν τα οξειδία σιδηρού είναι αμελητέες. Οι δυσμενείς επιπτώσεις του αλκαλικού περιβάλλοντος του σκυροδέματος στις ίνες γυαλιού Ε επεκτείνονται και σε άλλους τύπους ινών, όπως είναι οι περισσότερο φυσικές ίνες και οι ίνες από ορισμένα συνθετικά πολυμερή.

#### 4.2.3 Εφαρμογές Ινοπλισμένου σκυροδέματος

Η ραγδαία εξέλιξη στην τεχνολογία του FRC (Fiber Reinforced Concrete) μεγάλωσε κατά πολύ μεγάλο βαθμό το εύρος των εφαρμογών. Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται μερικές από αυτές ανάλογα με το είδος των ινών.

Τύπος ινών	Εφαρμογές
Γυαλί	Επίχριση τοίχων πληρώσεως, σωλήνες υπονόμων, κελύφη, κονιάματα, πλαίσια τύπου sandwich, συστήματα περίφραξης.

Χάλυβας	Κυψελωτές μονάδες οροφής, επικάλυψη πεζοδρομίων, καταστρώματα γεφυρών, σωλήνες, διάδρομοι αεροδρομίων, δοχεία πίεσης, κατασκευές ανθεκτικές σε ανεμοριπές, επενδύσεις τούνελ, κατασκευή φλοιού πλοίου.
Πολυπροπυλένιο	Πάσσαλοι θεμελίωσης, προενταμένοι πάσσαλοι, επίχριση πλαισίων, επιράμματα δρόμων, μανδύες για υποβρύχιους σωλήνες.
Αμίαντος	Πλέγματα, σωλήνες, μονωτικά υλικά, πυρίμαχα υλικά, ελάσματα οροφής, επένδυση τοίχων.
Ανθρακας	Πτυχωτές μονάδες για κατασκευή ορόφων, μεμβρανοειδείς κατασκευές μονής και διπλής καμπυλότητας, σανίδες.
Φυσικές ίνες (καρύδας, sisal, bamboo, ζαχαροκάλαμο)	Σε κατασκευές χαμηλού κόστους – αντιπαρέρχεται στη μεγάλη ζήτηση κατοικίας σε τριτοκοσμικές χώρες, διαχωριστικοί τοίχοι.

**Πίνακας 4.** Εφαρμογές ανάλογα με τον τύπο ινών

#### 4.2.4 Τρόποι εφαρμογής

##### 4.2.4.1 Αεροστατική εφαρμογή

Αυτή η μέθοδος είναι βολική όταν οι ίνες περιέχονται σε λιγότερο από 1% κ.ο. Οι ίνες και το κονίαμα αντλούνται και εκτοξεύονται σε αυτή τη μέθοδο.

##### 4.2.4.2 Μέθοδος αρχικής ανάμιξης

Αυτή είναι μια συμβατική μέθοδος ανάμιξης. Αυτή η μέθοδος βρέθηκε να είναι λιγότερο αποτελεσματική από ότι η μέθοδος του ψεκασμού. Σε αυτή τη μέθοδο οι ίνες είναι αναμειγμένες στο κύλινδρο ανάμιξης μαζί με τσιμέντο πριν ή μετά τη προσθήκη νερού. Οι ίνες προστίθενται με μικρή προσθήκη. Η εργασιμότητα εξαρτάται από το μέγεθος του συνόλου, όγκος ινών κ.α.

##### 4.2.4.3 Μέθοδος ψεκασμού (Εκτοξευόμενο Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα)

Σε αυτή τη μέθοδο το τσιμεντοκονίαμα και οι ίνες ψεκάζονται ταυτόχρονα πάνω στο καλούπι. Είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος εφαρμογής στην Ελλάδα.

##### 4.2.4.4 Στερεοποίηση

Για στερεοποίηση, χρησιμοποιείται συνήθως λεπτός δονητής. Παρόλα αυτά, ο δονητής δεν ενδείκνυται καθότι μπορεί να αφήσει τρύπες στην επιφάνεια τους σκυροδέματος.

### 4.3 ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ( Self – Compacting Concrete)

#### 4.3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Με το πέρασμα των χρόνων το ενδιαφέρον για το απλό σκυρόδεμα επεκτάθηκε και στις ιδιότητες της επιφάνειάς του. Τα πρώτα παραδείγματα εμφανούς σκυροδέματος ήταν ακατέργαστες επιφάνειες κατευθείαν από το καλούπι, ενώ σήμερα υπάρχει μια ευρεία «γκάμα» μεθόδων, ώστε να ελέγχεται και να τροποποιείτε η τελική του εμφάνιση. Σήμερα, χρησιμοποιούνται πολλές τέτοιες τεχνικές, όπως η επεξεργασία με οξύ, η αμμοβολή, η σφυρήλατη τράχυνση, το ξεχόντρισμα κ.α.. Η επεξεργασία του σκυροδέματος μπορεί να είναι τέτοια, ώστε να φαίνεται σα να έχει εμφυτευτεί σε αυτό φωτογραφία.

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα είναι μία κατηγορία σκυροδέματος που εμφανίστηκε στον τεχνικό κόσμο στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Από τότε κερδίζει συνεχώς έδαφος και ενσωματώνεται στην σύγχρονη κατασκευαστική πραγματικότητα. Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα είναι ένας τύπος σκυροδέματος που ρέει στους ξυλότυπους χωρίς να παρουσιάσει διαχωρισμό, παραμένει ομοιογενές με αποτέλεσμα να μπορεί να γεμίσει ομοιόμορφα και πλήρως όλα τα σημεία του ξυλότυπου ρέοντας αποκλειστικά και μόνο λόγω του ίδιου βάρους του, χωρίς ανάγκη δόνησης ή συμπύκνωσης ή κάποιου άλλου είδους εξωτερική ενέργεια.

Όπως όλα τα είδη σκυροδέματος, έτσι και το αυτοσυμπυκνούμενο δεν είναι τυποποιημένο. Για αυτόν το λόγο κάθε τύπος αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος πρέπει να σχεδιάζεται έχοντας υπ' όψη τις συνθήκες του έργου που θα εφαρμοστεί. Ο καθορισμός των αναλογιών των συστατικών που θα χρησιμοποιηθούν για την παρασκευή του εξαρτάται από τις δομικές απαιτήσεις της κατασκευής όπως το σχήμα, οι διαστάσεις, η πυκνότητα του οπλισμού και οι συνθήκες κατασκευής. Στις συνθήκες κατασκευής περιλαμβάνονται οι μέθοδοι μεταφοράς, τοποθέτησης, φινιρίσματος και αγωγής του σκυροδέματος. Η ικανότητα του να αυτοσυμπυκνώνεται μόνο του, χωρίς δόνηση, το κάνει να ξεχωρίζει από τα άλλα σκυροδέματα. Όλες οι υπόλοιπες επιδόσεις του υπολογίζονται σαν να επρόκειτο για ένα συνήθη τύπο σκυροδέματος.

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα δημιουργήθηκε για να αντιμετωπίσει συγκεκριμένα προβλήματα, όπως:

- Ατέλειες συμπύκνωσης και δόνησης
- Ελλιπής σχεδίαση των κατασκευών που καθιστά αδύνατη την σωστή συμπύκνωση του σκυροδέματος
- Απαιτήσεις για ανθεκτικότητα στο χρόνο.

Το Phaeno Science Centre, επιστημονικό κέντρο στο Wolfsburg της Γερμανίας, συνολικής επιφάνειας 12.631τ.μ. είναι το μεγαλύτερο κτίριο που κατασκευάστηκε από ΑΣΣ (Self-compacting concrete) στην Ευρώπη. Χωρίς το νέο αυτό τύπο σκυροδέματος, οι διαφορετικές μορφές του κτιρίου θα ήταν δύσκολο να επιτευχθούν. Περισσότερα από 40.000 κομμάτια σκυροδέματος συνθέτουν το κτίριο, κάθε ένα από τα οποία έχει παραχθεί με εξαιρετική ακρίβεια σε προηγμένα προγράμματα computer. Ο κύριος όγκος του κτιρίου υψώνεται πάνω από το έδαφος με τη βοήθεια μιας σειράς από μπετονένιους κώνους, δημιουργώντας ένα τεχνητό περιβάλλον, που λειτουργεί ως δημόσιος χώρος στο επίπεδο του δρόμου. Ο ρευστός χώρος που δημιουργείται



στο εσωτερικό του παραπάνω κτιρίου, αλλά και στο άμεσο περιβάλλον του, δε θα μπορούσε να έχει επιτευχθεί με άλλο υλικό εκτός από το σκυρόδεμα.



**Εικονα 16** Phaeno Science Centre

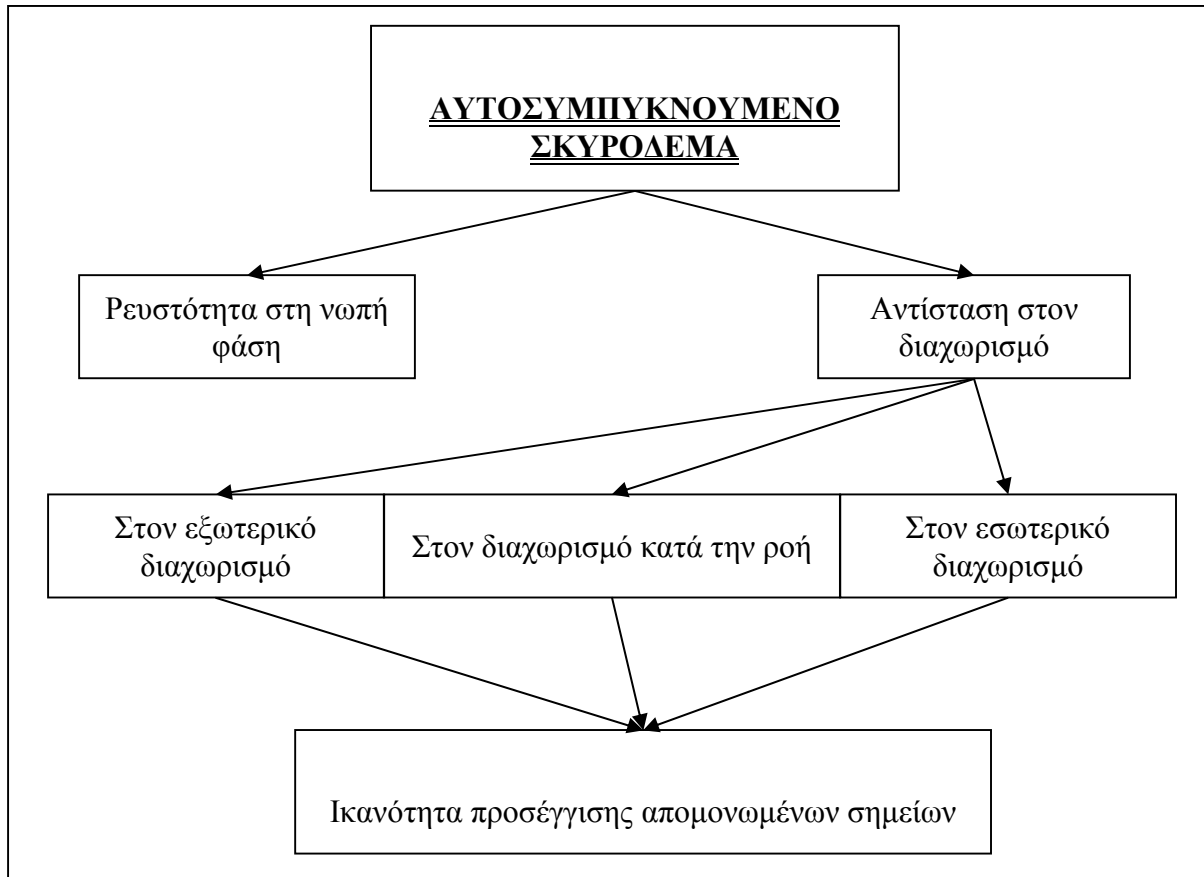
Αν και είναι δύσκολο να αντιληφθούμε πλήρως, ο τρόπος που κοιτάζουμε σήμερα τα πράγματα είναι διαφορετικός από αυτόν που τα κοιτάζαμε πριν μια δεκαετία. Είμαστε πιο εξοικειωμένοι με περίεργα σχήματα αφού οι οπτικές εικόνες είναι πλουσιότερες σε μια οθόνη υπολογιστή παρά σε μια τυπωμένη σελίδα.

Το σκυρόδεμα σε σχέση με άλλα οικοδομικά υλικά συμβάλλει σχετικά λιγότερο στην εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα, είναι ένα υλικό που προέρχεται από φυσικά υλικά, δεν χρειάζεται ειδικές επικαλύψεις και μπορεί εύκολα να καθαριστεί με οργανικές ουσίες. Η διαδικασία παρασκευής του κύριου συστατικού του όμως δεν παύει να ευθύνεται για το 5-10% των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Παγκοσμίως παράγονται ετησίως 2,35 δις τόνοι τσιμέντου – αρκετοί για να χτίσει ο κάθε άνθρωπος από 1 κυβικό μέτρο μπετόν. Αν μπορούσαμε να μειώσουμε τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που εκλύεται κατά τη παρασκευή του, μόνο κατά 10%, τότε η Γη θα κέρδιζε 5,2% από το σύνολο των εκπομπών, κάτι που αντιστοιχεί στο 1/5 του στόχου που είχε θέσει το Πρωτόκολλο του Κιότο.

#### **4.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα πρέπει να χαρακτηρίζεται από μεγάλη ρευστότητα στην νωπή φάση και χωρίς τάσεις διαχωρισμού. Αυτό συνεπάγεται ότι το σκυρόδεμα, όσον αφορά τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του, πρέπει να έχει σχετικά υψηλή συνεκτικότητα και χαμηλό πλαστικό ιξώδες. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του EN 206-1:2000 και να μην περιέχουν επιβλαβή

συστατικά που μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα, την ανθεκτικότητα και την διάβρωση του οπλισμού.



- **Τσιμέντο:**

Χρησιμοποιούνται όλοι οι τύποι τσιμέντου που συμμορφώνονται με τις προδιαγραφές του Ευρωπαϊκού Προτύπου και έχουν αποδειχθεί κατάλληλοι για την παραγωγή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Μια τυπική δοσολογία είναι 350-450kg τσιμέντου ανά κυβικό μέτρο. Δοσολογίες μεγαλύτερες μπορεί να προκαλέσουν συρρίκνωση ενώ μικρότερες μόνο αν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με πρόσθετα όπως πυριτική παιπάλη, ποζολάνες, ιπτάμενη τέφρα κ.ά. Ανάλογα με τον τύπο του τσιμέντου έχουμε και διαφορετικές συνθέσεις αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος.

- **Αδρανή:**

Τα αδρανή θα συμμορφώνονται με το Πρότυπο EN 12620:2002. Το μέγεθος των αδρανών εξαρτάται από την εφαρμογή και συνήθως είναι μικρότερο των 20mm. Το κατ' όγκο ποσοστό των χονδρόκοκκων αδρανών (με μέγιστη διάμετρο 25mm) οφείλει να περιορίζεται στα 340 lt για 1 m<sup>3</sup>, σε περίπτωση που σταθεί εμπόδιο στην διέλευση από πυκνές διατάξεις οπλισμών. Το κατ' όγκο ποσοστό των λεπτόκοκκων αδρανών μαζί με το τσιμέντο πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 170-

200lt/m<sup>3</sup>, ώστε αυτή η αυξημένη ποσότητα πάστας να αγκαλιάζει τους κόκκους των αδρανών και να εμποδίζει την απώλεια ρευστότητας του μίγματος. Η περιεκτικότητα των αδρανών σε υγρασία πρέπει να παρακολουθείται και να συνυπολογίζεται ώστε η ποιότητα του παραγόμενου σκυροδέματος να παραμένει σταθερή. Όσον αφορά την άμμο με μέγεθος κόκκου 0,125-4mm, που χρησιμοποιείται για την παραγωγή κοινού σκυροδέματος, είναι κατάλληλη για την παρασκευή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος.

- **Νερό ανάμιξης:**

Το νερό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή κοινού σκυροδέματος και συμμορφώνεται με το Πρότυπο EN 1008:2002 έχει αποδειχθεί κατάλληλο και για το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα.

- **Πρόσθετα:**

Χρησιμοποιούνται για την εξασφάλιση ικανοποιητικών ρεολογικών χαρακτηριστικών και παράλληλα την μείωση του κινδύνου διαχωρισμού. Τα κυριότερα πρόσθετα είναι τα εξής:

- § Παιπάλη πετρωμάτων, με διάμετρο κόκκων < 0,125mm κατά EN 12820:2002
- § Ιπτάμενη τέφρα, με ποσοστό διερχόμενο από το κόσκινο 45mm>75% κατά EN 450-1:2005, όπου είναι υλικό με ποζολανικές ιδιότητες πολύ λεπτής διαβάθμισης.
- § Πυριτική παιπάλη, κατά EN 13263-1:2005, όπου είναι υλικό εξαιρετικά λεπτόκοκκο με μέγεθος σωματιδίων 100 φορές μικρότερα από αυτά του τσιμέντου (περίπου < 1μm) ώστε να προσκολλάται επιφανειακά στα αδρανή και να γεμίζει τα κενά μεταξύ των σωματιδίων του τσιμέντου, προσδίδοντας συνεκτικότητα στο μίγμα.
- § Σκωρία υψικαμίνων, κατά B8 6699:1992, όπου είναι υλικό λεπτότατο προερχόμενο από κονιορτοποίηση παραπροϊόντων υψικαμίνων σιδηρομεταλλευμάτων.
- § Πληρωτικά γυαλιού, ανακυκλωμένο γυαλί με μέγιστο κόκκο 0,1mm.
- § Χρωστικές ουσίες, που χρησιμοποιούνται με βάση το EN 12878:2005.

- **Πρόσμικτα:**

Διακρίνονται στους υπερρρευστοποιητές και στους ευρέως φάσματος υδατικούς μειωτήρες. Οι υπερρρευστοποιητές είναι θεμελιώδεις συστατικό του αυτοσυμπυκνούμενου για την εξασφάλιση της κατάλληλης εργασιμότητας. Οι ευρέως φάσματος υδατικοί μειωτήρες καθώς μειώνουν το νερό αυξάνουν το λόγο N/T, άρα και την αντοχή, ενώ αποκαθίσταται η εργασιμότητα και η συνεκτικότητα. Η δραστηριότητα τους εξαρτάται από τον τύπο τους, την χρονική στιγμή εισαγωγής τους στο μίγμα, τη δοσολογία τους, τον λόγο N/T, την κοκκομετρική διαβάθμιση, το είδος των υπολοίπων τσιμεντοειδών υλικών, την θερμοκρασία του σκυροδέματος κ.ά.

- **Ρυθμιστικοί παράγοντες ιξώδους:**

Αποτελούν καινοτομία για το πεδίο των χημικών του σκυροδέματος, επιτρέποντας την παρασκευή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων

πληρωτικών. Συνήθως προστίθενται σε ποσοστό 0,1-0,2% κ.β. τσιμεντοειδών υλικών και διακρίνονται σε δύο τύπους. Στα βελτιωτικά άντλησης και στα διαλύματα πολυαιθυλενίου-γλυκόζης.

- **Αερακτικά:**

Η προσθήκη αερακτικού στο μίγμα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος προσφέρει προστασία έναντι ψύξης-απόψυξης και πρέπει να γίνεται αμέσως μετά την προσθήκη του υπερρευστοποιητή.

- **Ίνες:**

Οι μεταλλικές και πολυμερείς ίνες έχουν χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, αλλά μπορούν να μειώσουν την ικανότητα ροής και την διάβαση της δυνατότητας αυτής. Οι δοκιμές απαιτούνται επομένως για να καθιερώσουν το βέλτιστο τύπο, το μήκος και την ποσότητα και για να δώσουν όλες τις απαραίτητες ιδιότητες στο νωπό σκυρόδεμα. Οι πολυμερείς ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν τη σταθερότητα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, δεδομένου ότι βοηθούν στην αποτροπή του ραγίσματος λόγω της πλαστικής διακένωσης του σκυροδέματος. Ίνες από χάλυβα χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ρηγμάτωσης και για να τροποποιήσουν την ολκιμότητα/την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Οι μακριές πολυμερείς δομικές ίνες βελτιώνουν την αντίσταση σε πυρκαγιά και τη αντίσταση σε διαχωρισμό. Το μήκος και η ποσότητά τους επιλέγονται ανάλογα με τις δομικές απαιτήσεις. Εάν χρησιμοποιούνται ως υποκατάστατο της κανονικής ενίσχυσης, ο κίνδυνος παρεμπόδισης δεν ισχύει πλέον αλλά πρέπει να υπογραμμιστεί ότι η χρησιμοποίηση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με ίνες σε σχέση με την κανονική ενίσχυση αυξάνει σημαντικά τον κίνδυνο παρεμπόδισης. Περιεκτικότητες μέχρι και  $30\text{kg/m}^3$  ινών χάλυβα δεν υποβαθμίζουν τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ενώ για ίνες πολυπροπυλενίου η μέγιστη περιεκτικότητα είναι  $1\text{kg/m}^3$ .



**Εικόνα 17** Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα με ίνες από χάλυβα

Λόγος νερού/πούδρα: 0,8-1,1 κατ'όγκον
Συνολική ποσότητα λεπτού υλικού: 160-240 lt (400-600 kg)/m <sup>3</sup>
Περιεκτικότητα χονδρόκοκκων αδρανών: 28-35% του συνολικού όγκου του μίγματος
Ποσότητα νερού: Δεν υπερβαίνει τα 200 lt/m <sup>3</sup>
Περιεκτικότητα άμμου: Ισορροπεί τον όγκο των υπόλοιπων συστατικών

**Πίνακας 5** Ενδεικτικές αναλογίες υλικών αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος

#### **4.5 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΤΟ ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

Μερικές από τις ιδιότητες της εφαρμοσμένης μηχανικής, που ισχύουν για το κοινό σκυρόδεμα ισχύουν και για το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Όμως λόγω της διαφορετικής σύστασης και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του υπάρχουν κάποιες συγκρίσιμες ιδιότητες και κάποιες τυχόν διαφορές. Αυτά συνήθως καλύπτονται από τις ασφαλείς υποθέσεις στις οποίες βασίζεται η κατασκευή.

Η διάρκεια, η ικανότητα μιας συγκεκριμένης κατασκευής να αντισταθεί στις περιβαλλοντικές καταστάσεις κατά τη διάρκεια της ζωής της χωρίς να εξασθενήσει απαραίτητα η

απόδοση της, λαμβάνεται υπόψη συνήθως με τη διευκρίνιση των περιβαλλοντικών κατηγοριών. Αυτό οδηγεί στις περιοριστικές τιμές της συγκεκριμένης σύνθεσης και τις ελάχιστες συγκεκριμένες καλύψεις στην ενίσχυση. Στο σχέδιο συγκεκριμένων κατασκευών οι μηχανικοί μπορούν να αναφερθούν σε διάφορες ιδιότητες, οι οποίες είναι μέρος της προδιαγραφής. Οι πιο σχετικές είναι:

- Η θλιπτική αντοχή
- Το μέτρο ελαστικότητας
- Η εφελκυστική αντοχή
- Ο ερπυσμός
- Ο συντελεστής θερμικής επέκτασης
- Η αντίσταση σε πυρκαγιά και
- Η ικανότητα σε διάρκεια

#### **4.5.1 Σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα**

Τόσο η θλιπτική αντοχή του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, όσο και η εξέλιξή της συναρτήσει του χρόνου είναι απολύτως συγκρίσιμες με τα αντίστοιχα μεγέθη του κοινού σκυροδέματος, όταν η βάση σύγκρισης είναι ο λόγος νερού προς τσιμεντοειδή υλικά.

Βάσει πειραμάτων που έγιναν με σκοπό τη σύγκριση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με συμβατικό σκυρόδεμα, ίδιας ονομαστικής θλιπτικής αντοχής από 40 έως 80 MPa, σε δείγματα υποστυλωμάτων διαστάσεων 235 x 235 x 1400mm, προέκυψαν τα παρακάτω στοιχεία.

Συγκεκριμένα, για κοινό σκυρόδεμα ονομαστικής αντοχής 50 MPa παρατηρήθηκε γραμμική μείωση καθ' ύψος του δείγματος, τόσο της θλιπτικής αντοχής του όσο και του μέτρου ελαστικότητας του. Από τον πυρήνα που λήφθηκε από την βάση του δείγματος βρέθηκε  $f_c=53$  MPa και  $E_c=37$  GPa ενώ από τον πυρήνα της κορυφής  $f_c=46$  MPa και  $E_c=36$  GPa. Σε αντίθεση με το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα που παρουσίασε ομοιόμορφη κατανομή των ιδιοτήτων του, με τη θλιπτική αντοχή του να κυμαίνεται από 45-47 MPa και το μέτρο ελαστικότητας  $E_c$  να ισούται με 29GPa. Επίσης, προέκυψε ότι το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα έχει μεγαλύτερη ολκιμότητα σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα.

Αξίζει να αναφερθούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την χρήση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος σε γέφυρες. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε απότομη αύξηση της θλιπτικής αντοχής την 3<sup>η</sup> μέρα μετά την σκυροδέτηση, η οποία πλησιάζει το 80% της 28<sup>ης</sup> μέρας. Σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα η θλιπτική αντοχή του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος την 3<sup>η</sup> μέρα ήταν σχεδόν 100% μεγαλύτερη. Ακόμα από τα πειράματα που έγιναν αναφέρεται μία αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της τάξης του 30-45% πάνω από αυτή του συμβατικού.

Τόσο η εφελκυστική αντοχή του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος από διάρρηξη, όσο και η σχέση της με την θλιπτική αντοχή του είναι απολύτως συγκρίσιμες με τα αντίστοιχα μεγέθη του κοινού σκυροδέματος, όταν βάση της σύγκρισης είναι ο λόγος νερού προς τσιμεντοειδή υλικά.

#### **4.5.2 Ερπυσμός**

Ο ερπυσμός ορίζεται ως η βαθμιαία αύξηση στην παραμόρφωση (πίεση) με το χρόνο για μια σταθερή εφαρμοσμένη πίεση, λαμβάνοντας υπόψη άλλες χρονικά εξαρτημένες παραμορφώσεις που δεν συνδέονται με την εφαρμοσμένη πίεση, δηλ. διακένωση, διόγκωση και θερμική παραμόρφωση.

Η συμπίεση μειώνει τις δυνάμεις προσυμπίεσης στα συγκεκριμένα στοιχεία και προκαλεί μια αργή μεταφορά του φορτίου. Ο ερπυσμός πραγματοποιείται στην κόλλα τσιμέντου και επηρεάζεται από το πορώδες του που συσχετίζεται άμεσα με την αναλογία νερού/τσιμέντου. Κατά τη διάρκεια της ενυδάτωσης, το πορώδες της κόλλας του τσιμέντου μειώνεται για ένα δεδομένο σκυρόδεμα, συνεπώς ο ερπυσμός μειώνεται καθώς η δύναμη αυξάνεται. Ο τύπος τσιμέντου είναι σημαντικός εάν η ηλικία που θα φορτίζεται η κατασκευή καθορίζεται. Τα τσιμέντα που ενυδατώνουν γρηγορότερα θα έχουν την υψηλότερη δύναμη στην ηλικία της φόρτωσης, μιας χαμηλότερης αναλογίας πίεσης/δύναμης και ενός χαμηλότερου ερπυσμού. Λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας της κόλλας τσιμέντου, ο συντελεστής ερπυσμού για το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα μπορεί να αναμένεται να είναι υψηλότερος από ότι για το κανονικό σκυρόδεμα ίδιας αντοχής, αλλά τέτοιες διαφορές είναι μικρές και καλυμμένες από τις ασφαλείς υποθέσεις στους πίνακες και στους τύπους που παρέχονται στο σχετικό εφαρμοζόμενο Eurocode.

#### **4.5.3 Συντελεστής θερμικής επέκτασης**

Ο συντελεστής της θερμικής επέκτασης του σκυροδέματος είναι η πίεση που παράγεται στο σκυρόδεμα μετά από αλλαγή θερμοκρασίας.

Ο συντελεστής της θερμικής επέκτασης του σκυροδέματος ποικίλλει σε σχέση με τη σύνθεση, την ηλικία και την περιεκτικότητα σε υγρασία. Δεδομένου ότι ο όγκος του σκυροδέματος περιλαμβάνει το σύνολο, η χρησιμοποίηση ενός συνόλου με έναν χαμηλότερο συντελεστή θερμικής επέκτασης θα μειώσει το συντελεστή της θερμικής επέκτασης του προκύπτοντος σκυροδέματος. Η μείωση του συντελεστή της θερμικής επέκτασης οδηγεί σε μια ανάλογη μείωση της ενίσχυσης ελέγχου ρωγμών. Ενώ η σειρά του συντελεστή της θερμικής επέκτασης είναι από 8 έως 13 microstrains/K, το EN 1992-1-1 δηλώνει ότι, εκτός αν υπάρχει διαθέσιμη κάποια ακριβέστερη πληροφορία, μπορεί να ληφθεί 10 έως 13 microstrains/K. Το ίδιο πράγμα μπορεί να υποτεθεί στην περίπτωση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος.

#### **4.5.4 Αντίσταση πυρκαγιάς**

Το σκυρόδεμα είναι μη-εύφλεκτο υλικό το οποίο δεν βοηθάει στην εξάπλωση της φωτιάς. Δεν παράγει καπνό, τοξικά αέρια ή άλλα προϊόντα και εκπομπές κατά την καύση του. Έχει χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που το καθιστά άριστη ασπίδα κατά της πυρκαγιάς για παρακείμενα διαμερίσματα και υπό τυπικές συνθήκες πυρκαγιάς, διατηρεί μεγάλο ποσοστό της αντοχής του. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει απονεμίσει στο σκυρόδεμα τον υψηλότερο συντελεστή πυρκαγιάς (δηλαδή το χαρακτήρισε ως το καλύτερο υλικό κατά της φωτιάς).

Η αντίσταση πυρκαγιάς του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος είναι παρόμοια με το κανονικό σκυρόδεμα. Γενικά το σκυρόδεμα χαμηλής διαπερατότητας μπορεί να είναι περισσότερο επιρρεπές σε διαχωρισμό αλλά η δριμύτητα εξαρτάται από το συνολικό τύπο, τη συγκεκριμένη ποιότητα και την περιεκτικότητα σε υγρασία. Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα μπορεί εύκολα να επιτύχει τις ίδιες απαιτήσεις με το υψηλής αντοχής σκυρόδεμα χαμηλής

διαπερατότητας και έτσι θα αποδώσει με παρόμοιο τρόπο με οποιοδήποτε κανονικό υψηλής αντοχής σκυρόδεμα σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Η χρήση των ινών πολυπροπυλενίου στο σκυρόδεμα έχει αποδειχθεί ότι είναι αποτελεσματική στη βελτίωση της αντίστασης του διαχωρισμού. Ο μηχανισμός θεωρείται ότι οφείλεται στις ίνες που λειώνουν και που απορροφώνται στη μήτρα του τσιμέντου. Τα κενά ινών παρέχουν έπειτα τις θέσεις επέκτασης για τον ατμό, μειώνοντας κατά συνέπεια τον κίνδυνο διαχωρισμού. Οι ίνες πολυπροπυλενίου έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς με το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα.

#### 4.5.5 Ικανότητα διάρκειας

Η διάρκεια μιας συγκεκριμένης δομής συνδέεται πολύ με την διαπερατότητα του στρώματος επιφάνειας, καθώς αυτό παρεμποδίζει την είσοδο των επιβλαβών (CO<sub>2</sub>, χλωρίδιο, θειικό άλας, νερό, οξυγόνο, αλκάλια, οξέα, κ.λπ.). Στην πράξη, η διάρκεια εξαρτάται από την επιλογή των υλικών, τη συγκεκριμένη σύνθεση, από το βαθμό επίβλεψης κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης, της συμπίεσης, και της συντήρησης.

Η έλλειψη συμπίκνωσης της επιφάνειας, από προβλήματα κατά την δόνηση σε στενά σημεία μεταξύ του ξυλότυπου και των ράβδων σιδήρου του οπλισμού ή άλλων ένθετων (π.χ. συρματόσχοινα προέντασης) έχει αναγνωριστεί ως κύριος παράγοντας χαμηλής αντοχής οπλισμένου σκυροδέματος εκτεθειμένου σε επιθετικό περιβάλλον. Η αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος είναι ένας από τους κύριους λόγους για την εξέλιξη του SCC στην Ιαπωνία.

Παραδοσιακά το σκυρόδεμα υποβάλλεται σε συμπίεση μέσω της δόνησης, η οποία είναι μια ασυνεχής διαδικασία. Στην περίπτωση της εσωτερικής δόνησης, ακόμα και όταν εκτελείται σωστά, ο όγκος του σκυροδέματος μέσα στον τομέα της επιρροής του δονητή δεν λαμβάνει την ίδια ενέργεια συμπίεσης. Ομοίως, στην περίπτωση της εξωτερικής δόνησης, η συμπίεση που προκύπτει είναι ουσιαστικά ετερογενής, ανάλογα με την απόσταση στα σημεία που δονείται.

Το αποτέλεσμα της δόνησης είναι, επομένως, ένα σκυρόδεμα ανομοιόμορφα συμπιεσμένο στη δομή του και, επομένως, με διαφορετικές διαπερατότητες, γεγονός το οποίο ενισχύει την εκλεκτική είσοδο των επιθετικών ουσιών. Φυσικά, οι συνέπειες της μη ομοιογενούς δόνησης (διαχωρισμός κ.λπ.) έχουν ένα αρνητικό αποτέλεσμα στη διαπερατότητα και, ως εκ τούτου, στη διάρκεια.

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα με τις σωστές ιδιότητες θα είναι απαλλαγμένο από εκείνες τις ανεπάρκειες και θα οδηγήσει σε ένα υλικό με χαμηλή και ομοιόμορφη διαπερατότητα, που προσφέρει τα λιγότερα αδύνατα σημεία για τις επιβλαβείς ουσίες του περιβάλλοντος και, ως εκ τούτου, της μεγαλύτερης διάρκειας. Η σύγκριση της διαπερατότητας μεταξύ αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος και κανονικού σκυροδέματος με δόνηση θα εξαρτηθεί από την επιλογή των υλικών και του λόγου νερού/τσιμέντου.

Υπάρχουν μέθοδοι διερεύνησης, καθορισμένες είτε από εθνικά πρότυπα είτε με πρότυπα προτεινόμενα από το RILEM, της διαπερατότητας του σκυροδέματος, είτε στο εργαστήριο είτε στο χώρο εργασίας, ως δείκτες αντοχής.

- EN1992-1 και EN206-1 οι οποίοι καθορίζουν την αντοχή του σκυροδέματος με βάση περιβαντολογικές διαβαθμίσεις που οδηγούν την σύνθεση του σκυροδέματος σε οριακές τιμές και την επικάλυψη του οπλισμού σε πολύ χαμηλές τιμές.



## 4.6 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα κατηγοριοποιείται ανάλογα με τη μέθοδο σύνθεσής του αλλά και ανάλογα τον βαθμό συμπίκνωσης.

### 4.6.1 Το Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα με βάση την μέθοδο σύνθεσης

- Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα τύπου κονιάς: Οι αναλογίες του μίγματος είναι τέτοιες ώστε να ικανοποιείται η απαίτηση της αυτοσυμπύκνωσης, μειώνοντας τον λόγο νερού προς λεπτόκοκκα ( $d < 0,1\text{mm}$ ) και να υπάρχει επαρκής αντίσταση σε διαχωρισμό. Έτσι μειώνεται η πλαστικότητα η οποία όμως αποκαθίσταται με την προσθήκη υπερρευστοποιητών και αερακτικών. Τέτοιου τύπου ήταν τα πρώτα μίγματα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος.
- Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα με βάση τον ρυθμιστικό παράγοντα για το ιξώδες: Σε μίγματα χαμηλής ποσότητας συνδετικών κονιών, η αντίσταση σε διαχωρισμό εξασφαλίζεται με προσθήκη ρυθμιστή ιξώδους, ακόμα και λίγο πριν την διάστρωση. Η απαιτούμενη πλαστικότητα και πάλι εξασφαλίζεται από τους υπερρευστοποιητές και τα αερακτικά. Αυτός ο τύπος σκυροδέματος αποτελεί εξέλιξη του σκυροδέματος στις υποβρύχιες σκυροδετήσεις.
- Συνδυασμένος τύπος αυτοσυμπυκνόμενου σκυροδέματος: Η ρευστότητα του επιτυγχάνεται με βάση τα λεπτόκοκκα όπως και στον πρώτο τύπο. Παρουσιάζονται όμως σημαντικές ποιοτικές διακυμάνσεις ανάλογα σε αυτήν ανάλογα με τις αυξομειώσεις στην επιφανειακή υγρασία των αδρανών και την κοκκομετρική διαβάθμιση του λεπτόκοκκου κλάσματος. Αυτές οι διακυμάνσεις ελαχιστοποιούνται με χρήση ρυθμιστή ιξώδους.

### 4.6.2 Το Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα με βάση τον βαθμό συμπίκνωσης

- Κατηγορία 1: Για δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα, όπου οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των οπλισμών είναι μικρότερες από 60mm ή η ποσότητα του οπλισμού υπερβαίνει τα  $350\text{kg/m}^3$ .
- Κατηγορία 2: Για δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα, όπου οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των οπλισμών του είναι ενδιάμεσα στα 60mm και 200mm ή η ποσότητα του οπλισμού είναι από 100 έως  $350\text{kg/m}^3$ .
- Κατηγορία 3: Για δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα, όπου οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των οπλισμών του είναι μεγαλύτερες από 200mm ή η ποσότητα του οπλισμού είναι μικρότερη από  $100\text{kg/m}^3$ .

Μια τυπική αναλογία συστατικών για την παρασκευή του συνδυασμένου τύπου αυτοσυμπυκνόμενου σκυροδέματος σε Ευρώπη, Αμερική, Ιαπωνία παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

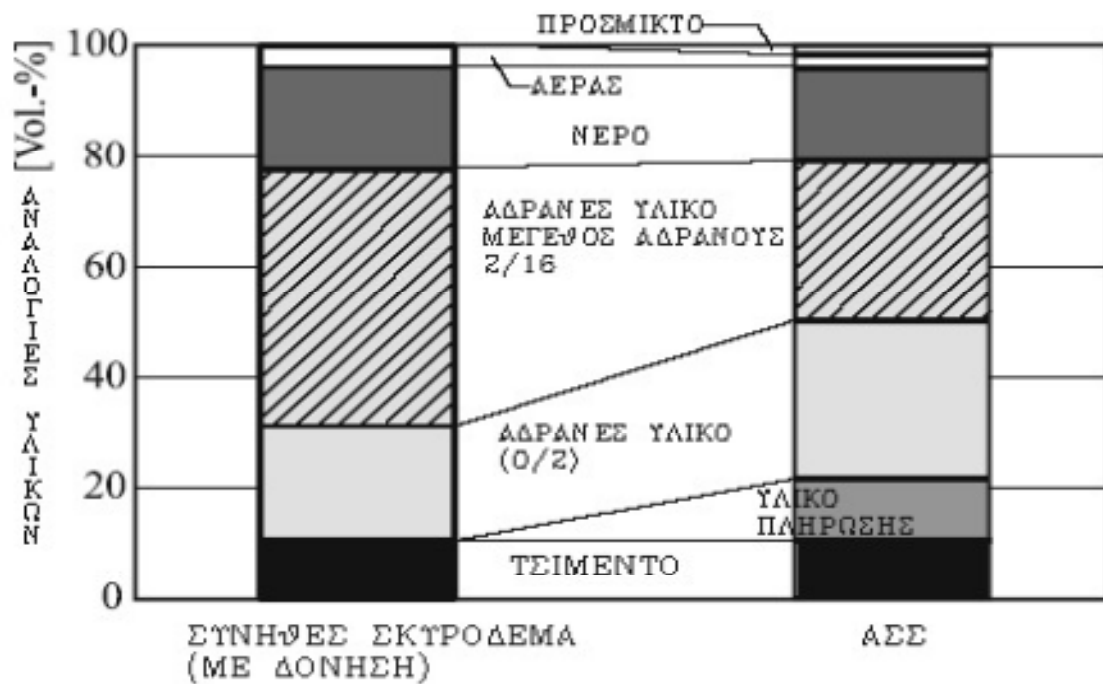
Συστατικά	Ευρώπη	Αμερική	Ιαπωνία
Νερό	200 kg	154 kg	175 kg
Τσιμέντο τύπου Portland	310 kg	416 kg	298 kg
Ιπτάμενη τέφρα	190 kg	0	206 kg
Λεπτόκοκκα Αδρανή	700 kg	1015 kg	702 kg
Χονδρόκοκκα Αδρανή	750 kg	892 kg	871 kg
Υδατικοί μειωτήρες	6,5 kg	2616 ml	10,6 kg
Ρυθμιστικοί παράγοντες Ιξώδους	7,5 kg	542 ml	0,0875 kg

**Πίνακας 6:** Τυπικές αναλογίες συστατικών για συνδυασμένο τύπο αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος.

Πρέπει να τονιστεί ότι το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα δεν είναι τυποποιημένο, επειδή πρέπει πρώτα να καθοριστούν οι δομικές απαιτήσεις και οι ειδικές συνθήκες του έργου στο οποίο θα εφαρμοσθεί. Ωστόσο υπάρχουν κανονισμοί όπως οι EFCA, EFNARC, οι οποίοι δίνουν διάφορες αναλογίες συστατικών. Οι ΠΕΤΕΠ (Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές) προτείνει τις αναλογίες του μίγματος με βάση τον EFNARC. Η σύνθεση κατά EFNARC δίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

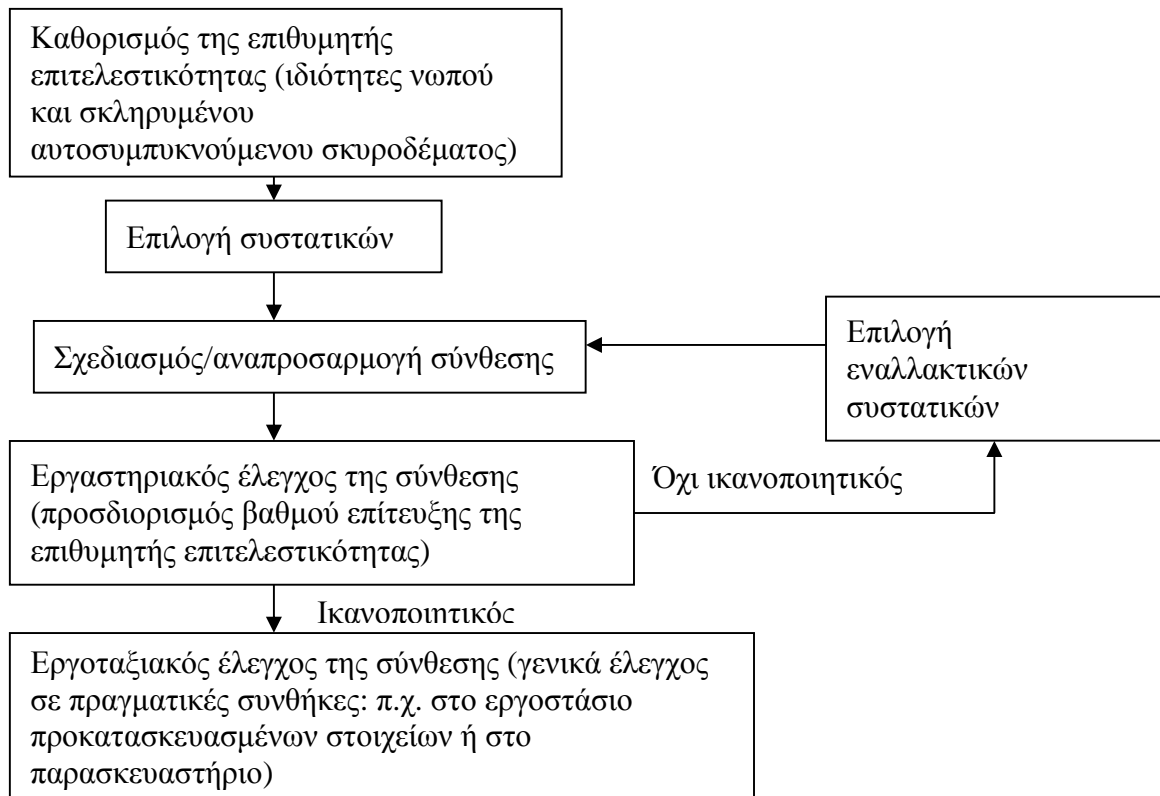
Λόγος νερού/τσιμέντου	0,8-1,10 κατ' όγκο
Συνολική ποσότητα σε κονία	160-240lt/m <sup>3</sup> ή 400-600kg/m <sup>3</sup>
Περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα αδρανή	280-350lt/m <sup>3</sup>
Περιεκτικότητα σε τσιμέντο	350-450kg/m <sup>3</sup>
Περιεκτικότητα σε νερό	<200lt/m <sup>3</sup>
Περιεκτικότητα σε πάστα	>400lt/m <sup>3</sup>
Περιεκτικότητα σε άμμο	50% κ.β. των συνολικών αδρανών

**Πίνακας 7:** Σύνθεση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος κατά EFNARC.



**Εικόνα 18 :** Σχηματική απεικόνιση της αναλογίας των υλικών για το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα σε σχέση με αυτές ενός κοινού σκυροδέματος.

Παρόλα αυτά όποια και να είναι η μέθοδος η οποία επιλέγεται για την διεξαγωγή της μελέτης σύνθεσης, τα βασικά βήματα μίας διαδικασίας προσδιορισμού των αναλογιών ανάμιξης για το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα δίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχημα 5

#### 4.7 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΩΠΟΥ ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το βασικό χαρακτηριστικό του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος είναι οι ιδιότητες που έχει όσο είναι ακόμα νωπό, καθώς στη στερεή του κατάσταση παρουσιάζει περίπου όμοιες ιδιότητες με αυτές του κοινού σκυροδέματος. Οι ιδιότητες του, όπως προαναφέρθηκαν είναι:

- Ροή αποκλειστικά λόγω του ίδιου βάρους του, χωρίς δόνηση
- Ροή μέσω στενών ανοιγμάτων και πλήρωση ξυλοτύπων με πυκνό οπλισμό
- Διατήρηση ομοιογένειας κατά την μεταφορά και τη διάστρωση.



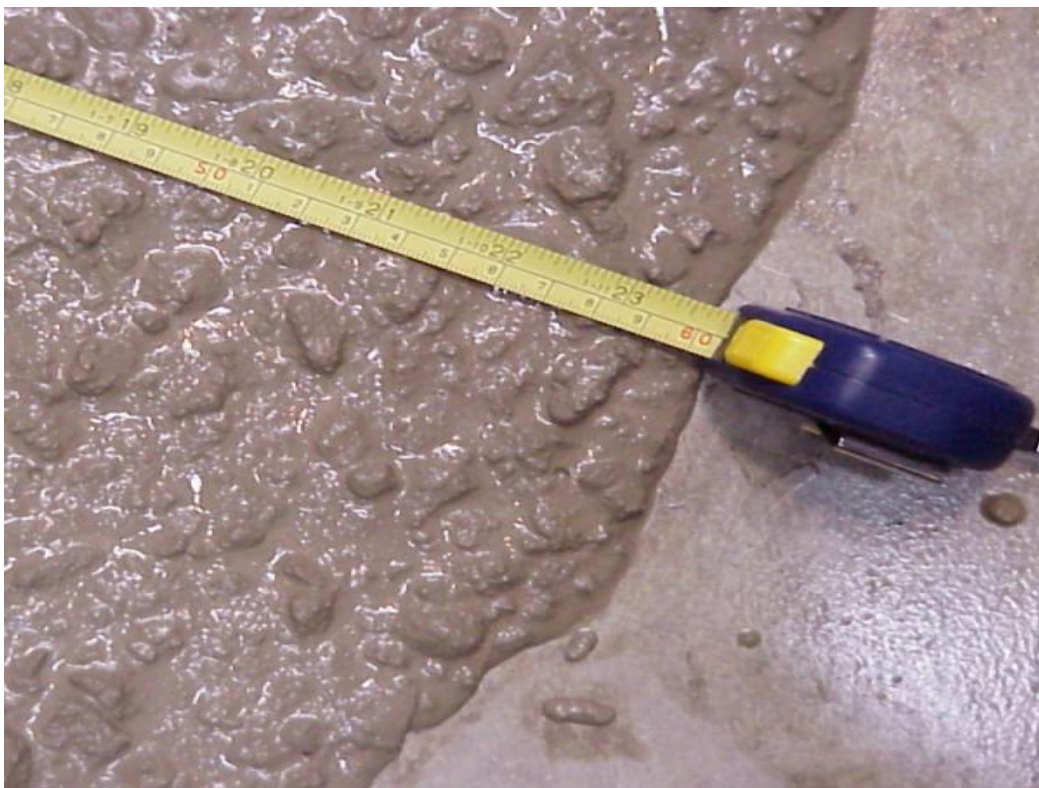
**Εικόνες 19-20** Ρεολογική ικανότητα του Αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος

Εκτός από αυτές τις βασικές ιδιότητες, για συγκεκριμένες εφαρμογές παρασκευάζονται μίγματα με αντίσταση σε απόπλυση και απαλλαγμένες από ατέλειες ελεύθερες επιφάνειες. Για την εκτίμηση των παραπάνω ιδιοτήτων δεν υπάρχει κάποια ομογενοποιημένη δοκιμή που να τις ελέγχει και τις δύο ταυτόχρονα. Οι κυριότερες δοκιμές είναι:

- Δοκιμές εξάπλωσης slump-flow: Με αυτόν τον τρόπο αξιολογείται η ικανότητα οριζόντιας ανεμπόδιστης ροής του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος για μίγματα όπου τα χονδρόκοκκα αδρανή έχουν  $d_{max} < 40\text{mm}$ . Ο εξοπλισμός είναι ο ίδιος με της δοκιμής κάθισης του κοινού σκυροδέματος. Η διαφορά είναι ότι το σκυρόδεμα του δοκιμίου δεν δονείται, και αντί να μετριέται η κάθιση της κορυφής της μάζας του σκυροδέματος σε σχέση με την κορυφή του μεταλλικού κώνου, μετριέται η διάμετρος του κύκλου εξάπλωσης του σκυροδέματος, η οποία αποτελεί μέτρο της ικανότητας πλήρωσης του νωπού αυτοσυμπυκνούμενο σκυροδέματος, δηλαδή δείχνει την ταχύτητα της ρευστότητας του. Έτσι ένα αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα με ικανοποιητική απόδοση πρέπει να έχει ένα υψηλό slump-flow ούτως ώστε η εξάπλωσή του σε διάμετρο 500mm ( ή την τελική τιμή του slump ) να επιτευχθεί σε ένα χρόνο από 10 έως 15 δευτερόλεπτα. Η μέθοδος αυτή είναι πιο διαδεδομένη λόγω της απλότητάς της.

<u>Μέθοδος Slump-flow</u>	
	<u>Αυτοσυμπυκνούμενο</u>
<u>Μέση Διάμετρος(D)</u>	<u>600mm &lt; D &lt; 750mm</u>
<u>Χρόνος (t)</u>	<u>5-12 sec ready-mix</u> <u>20-35 precast</u>

**Πίνακας 8:** Χαρακτηριστικά μεθόδου Slump-flow



**Εικόνες21-22:** Δοκιμή εξάπλωσης Slump-flow

- Δοκιμή V-Funnel: Είναι μία μέθοδος που εκτιμά την αντίσταση διαχωρισμού, χρησιμοποιώντας μία χοάνη σχήματος V και μετρώντας το χρόνο απορροής του μίγματος, για χονδρόκοκκα αδρανή με  $d_{max} < 25\text{mm}$ .

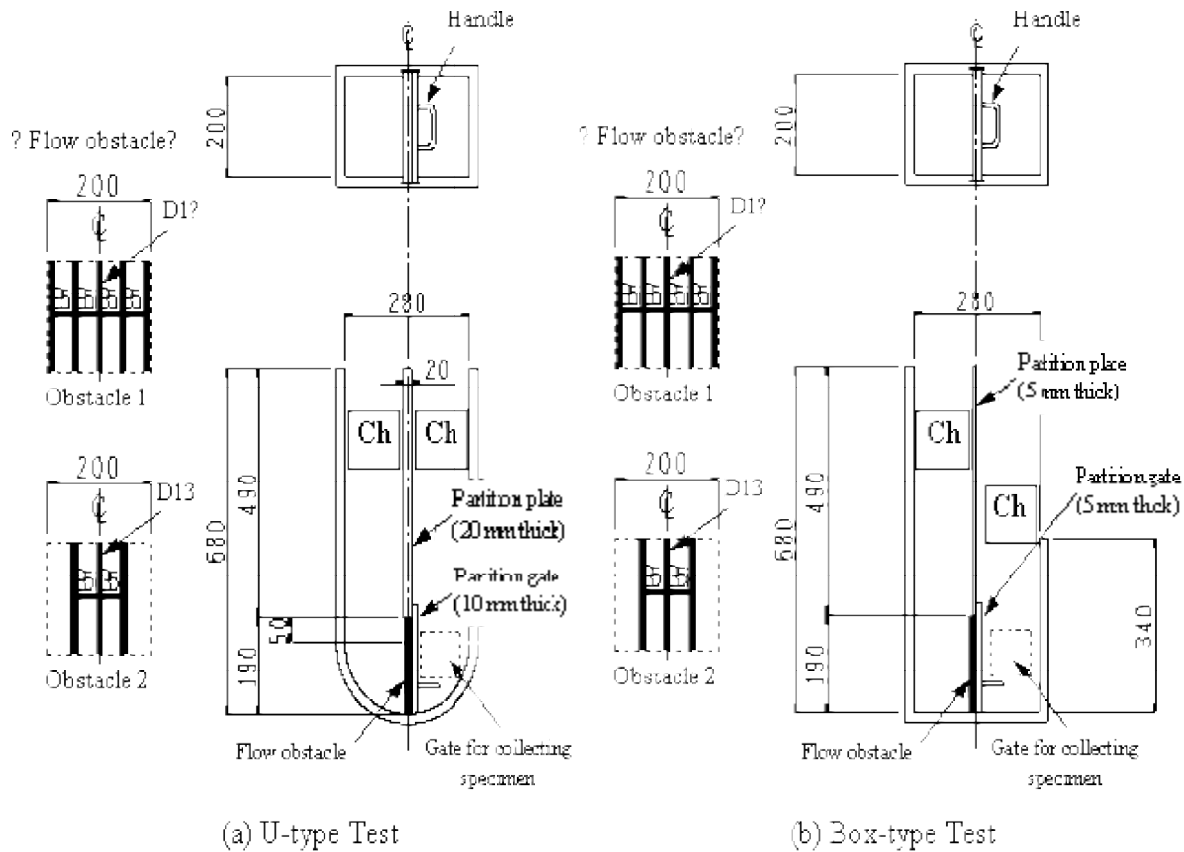


**Εικόνα 23:** Δοκιμή V-funnel

- Δοκιμή T-50: Άλλη μία δοκιμή που εκτιμά την αντίσταση διαχωρισμού. Εδώ υπολογίζεται ο χρόνος που απαιτείται για να εξαπλωθεί σε κύκλο διαμέτρου 500mm, στην δοκιμή εξάπλωσης που προαναφέρθηκε. Χαρακτηριστικές τιμές για τυπικά μίγματα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος δίνουν χρόνο T-50 περίπου 2-5 δευτερόλεπτα.
- Δοκιμή U-box και δοκιμή L-Box: Είναι μέθοδοι της ικανότητας ροής του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος μέσω εμποδίων, για μίγματα όπου τα χονδρόκοκκα αδρανή έχουν  $d_{max} < 25\text{mm}$ . Η συσκευή U-box αποτελείται από ένα μεταλλικό κουτί σε σχήμα U με δύο θαλάμους. Για να εμποδίζεται η ελεύθερη ροή από τον ένα θάλαμο στον άλλο παρεμβάλλεται μία εσχάρα οπλισμού, το μέγεθος και η πυκνότητα του οποίου εξαρτώνται από την ρευστότητα που απαιτείται. Καθώς το μίγμα μετακινείται και ανεξάρτητα από τον τύπο της εσχάρας οπλισμού η μέθοδος μετρά το ύψος H του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος στον δεύτερο θάλαμο σε συνάρτηση με τον χρόνο που χρειάζεται για να φθάσει εκεί. Επίσης μετράται η περιεκτικότητα χονδρόκοκκων αδρανών ανά  $\text{m}^3$  στην περιοχή της εσχάρας (G). Η τιμή G συγκρίνεται στην συνέχεια με την χαρακτηριστική τιμή  $G_0$  ώστε να εκτιμηθεί η ικανότητα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος για αντίσταση στον διαχωρισμό και κίνηση σε περιορισμένο χώρο. Ο λόγος  $G/G_0$  πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 0,9. Η συσκευή L-box μετρά την ίδια ιδιότητα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με οριζόντιο οπλισμό. Το σκυροδέμα εγχύεται μέσα σε ένα μεταλλικό κουτί σχήματος L. Η ροή του αυτοσυμπυκνούμενου περιορίζεται από μεταλλικές οριζόντιες ράβδους. Μετρώνται η



ταχύτητα κίνησης του σκυροδέματος, το ποσοστό των αδρανών που συγκρατώνται και ο χρόνος που χρειάζεται το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα μέχρι να ολοκληρώσει την διαδρομή.



Εικόνα 24 Δοκιμή U-box και L-box

#### 4.8 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΤΕΡΕΟΥ ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Τα βασικά συστατικά του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος είναι πρακτικά τα ίδια με αυτά του κοινού δονούμενου σκυροδέματος πέραν της ανάμιξης και βέβαια της χρήσης ειδικών προσμίκτων και προσθέτων όπως φάνηκε παραπάνω. Εργαστηριακοί έλεγχοι αλλά και πρακτικές εφαρμογές απέδειξαν ότι οι ιδιότητες του στερεού αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος είναι πράγματι παρόμοιες με αυτές του κοινού σκυροδέματος, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Λόγος νερό/τσιμέντο (%)	25-40
Περιεκτικότητα αέρα (%)	4,5-6
Θλιπτική Αντοχή (ηλικία 28 ημερών)(MPa)	40-80
Θλιπτική Αντοχή (ηλικία 96 ημερών)(MPa)	55-100
Εφελκυστική Αντοχή	2,4-4,8
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	30-36

**Πίνακας 9:** Ιδιότητες στερεού Αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΦΘΟΡΕΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα από τα υλικά κατασκευής σηράγγων που εξασφαλίζει και υψηλή αντοχή της κατασκευής και μεγάλη πλαστιμότητα (που στην χώρα μας είναι πολύ σημαντική αυτή η ιδιότητα, λόγω της υψηλής σεισμικής δραστηριότητας). Επίσης το σκυρόδεμα μπορεί και προστατεύει τον χάλυβα από τυχών φθορές όπως η διάβρωσή του από τις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες, αλλά αυτό δεν επιτυγχάνετε πάντα.

Φθορά υλικού μιας σήραγγας(οπλισμένου σκυροδέματος) είναι κάθε απώλεια μηχανικών, φυσικών, χημικών και βιοχημικών διεργασιών. Οι φθορές που προκαλούνται από την απώλεια μηχανικών διεργασιών είναι η ρηγμάτωση και η διάβρωση. Η ρηγμάτωση προκαλείται κυρίως από την αρχική συστολή, την αρχική καθίζηση, την άμεση φόρτιση και τις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις του σκυροδέματος. Η διάβρωση προκαλείται από την μηχανική απόξεση ή την σπηλαίωση του σκυροδέματος. Επίσης ρηγμάτωση προκαλείται και από τις φυσικές διεργασίες οι οποίες μπορεί να είναι, είτε οι θερμοκρασιακές μεταβολές, είτε η συστολή ξήρανσης, είτε από την επίδραση του παγετού στο σκυρόδεμα. Τέλος υπάρχουν δύο ειδών χημικές διεργασίες, αυτές που επιδρούν στον οπλισμό της σήραγγας και αυτές που επιδρούν στο σκυρόδεμα. Επειδή το περιβάλλον του σκυροδέματος είναι αλκαλικό, προστατεύει τον οπλισμό από την διάβρωση, μ' ένα λεπτό στρώμα οξειδίου του σιδήρου. Αυτό το στρώμα οξειδίου μπορεί να καταστραφεί είτε από την μείωση του PH του νερού που βρίσκεται στους πόρους του σκυροδέματος, είτε λόγω διείσδυσης χλωριόντων . Διάβρωση λόγω χλωριόντων συναντούμε κυρίως σε παράκτιες περιοχές ή σε περιοχές με χαμηλές θερμοκρασίες όπου χρησιμοποιείται αλάτι για να μην παγώνουν οι δρόμοι. Η διάβρωση από τις βιοχημικές διεργασίες οφείλεται κυρίως στην ανάπτυξη μικροοργανισμών στην επιφάνεια του μπετόν. Οι ρωγμές και η διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος, είναι από τις σημαντικότερες αιτίες απώλειας των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Επίσης η αποσάθρωση και η ενανθράκωση του σκυροδέματος, ο ερπυσμός, η συστολή ξηράνσεως και η επίδραση του χλωρίου στο σκυρόδεμα συμβάλουν στην απώλεια των μηχανικών, φυσικών, χημικών και βιοχημικών ιδιοτήτων του υλικού.

*Οι φθορές διακρίνονται σε:*

Φθορές 'ποσοτικής φύσης' οι οποίες είναι απόρροια ελλειπών ή και ανακριβών στοιχείων αφιρούντα κυκλοφοριακά, κλιματολογικά και περιβαλλοντικά δεδομένα.

Φθορές 'ποιοτικής φύσης' οι οποίες είναι συνέπεια κατασκευαστικών αποκλίσεων από την αρχική μελέτη. Εντοπίζονται σε χρήση υλικών κατώτερης ποιότητας ή ελλιπούς διαδικασίας κατασκευής.

Φθορές 'τυχαίας φύσης' οι οποίες εντοπίζονται σε τυχαία γεγονότα ή σε ακραία χρήση των δρόμων. Σεισμοί ή κατολισθήσεις λόγω σεισμών, όπως επίσης χρήση από γεωργικά ή άλλου είδους μηχανήματα που προκαλούν αθέλητες ζημιές.

## 5.1 ΡΩΓΜΕΣ

Η ύπαρξη των ρωγμών είναι αναπόσπαστο κομμάτι των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, αφού ουσιαστικά αποτελούν τα ορατά αποτελέσματα της παραμορφωσιμότητας ενός φορέα. Η ρηγματώση είναι σύμφυτη με τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, λόγω της μικρής του εφελκυστικής αντοχής. Η εμφάνιση όμως των ρωγμών δεν συνεπάγεται αυτόματα και έλλειψη λειτουργικότητας ή ανθεκτικότητας της κατασκευής ,γι' αυτό και η φύση τους χρήζει ιδιαίτερης προσοχής για διεξοδική διερεύνηση από τον ιθύνοντα μηχανικό. Δεν είναι λίγες οι φορές που οι ρωγμές λόγω υπέρβασης αντοχής αποτελούν ένδειξη στατικής ανεπάρκειας του φορέα και πιθανόν η όποια επισκευή, να επεκταθεί και σε περιοχές πέρα των ρωγμών. Αν κριθεί απαραίτητη η επισκευή της ρηγματωμένης περιοχής, εκτός από αισθητικής άποψης, ο μηχανικός θα επέμβει είτε απομακρύνοντας την αιτία είτε ενισχύοντας το δομικό φορέα.

Οι ρωγμές διακρίνονται σε ενεργές και μη-ενεργές. Στις ενεργές, οι οποίες έχουν και μεγαλύτερο βαθμό επικινδυνότητας, εξακολουθούν να υπάρχουν μετακινήσεις με άμεσο επακόλουθο την αύξηση του εύρους ή του μήκους τους. Η συνεχής εποπτεία αλλά και παρέμβαση κρίνονται απαραίτητες. Στις μη-ενεργές ρωγμές δεν παρουσιάζονται περαιτέρω μετακινήσεις και δεν προκαλούν ιδιαίτερη ανησυχία παρά μόνο σε περιπτώσεις διεύθυνσης της υγρασίας με συνέπεια διάβρωσης των ράβδων οπλισμού. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι ρωγμές καθ' εαυτές δεν αποτελούν πρόβλημα για την ασφάλεια της κατασκευής ,εφόσον το άνοιγμά τους περιορίζεται κάτω από ορισμένα όρια ,τα οποία καθορίζονται από τις απαιτήσεις για την εμφάνιση της κατασκευής, την προστασία των οπλισμών από διάβρωση και τη στεγανότητα. Το εύρος της ρωγμής που θεωρείται ανεκτό από άποψη εμφάνισης εξαρτάται από τη φύση του επιχρίσματος, αλλά και από το είδος χρήσης της κατασκευής.

Στον πίνακα παρατίθενται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τα μέγιστα αποδεκτά όρια εύρους ρωγμών για διάφορες συνθήκες περιβάλλοντος, όπου θα καθορίσουν και τη διαδικασία επισκευής τόσο για αισθητικούς όσο και για λειτουργικούς λόγους.

Συνθήκες Περιβάλλοντος Μέγιστο επιτρεπόμενο εύρος ρωγμής	
Ξηρό περιβάλλον	0,41mm
Υγρό περιβάλλον ή έδαφος	0,30mm
Χημικές προσβολές	0,18mm
Θαλάσσιες κατασκευές	0,15mm
Δεξαμενές	0,10mm

**Πίνακας 10:** Μέγιστο Επιτρεπόμενο Εύρος Ρωγμών



**Εικόνα 25 :** Όργανο μέτρησης εύρους ρωγμής

*Επίσης οι ρωγμές διακρίνονται σε:*

#### **Πλαστικές ρωγμές διακένωσης**

Οι πλαστικές ρωγμές διακένωσης εμφανίζονται περίπου μέσα σε μια ώρα (και σε περισσότερο από μία ώρα , εάν χρησιμοποιούνται επιβραδυντές πήξεως ) από την στιγμή που θα τοποθετηθεί το σκυρόδεμα μέσα στο καλούπι. Οι πλαστικές ρωγμές διακένωσης αρχίζουν να δημιουργούνται από την εκτεθειμένη (στις καιρικές συνθήκες) επιφάνεια του σκυροδέματος όπου η εξάτμιση του νερού της επιφάνειας γίνεται γρηγορότερα από τον χρόνο πήξεως του σκυροδέματος και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προκαλείται στένεμα του εξωτερικού στρώματος του σκυροδέματος και να δημιουργούνται οι ρωγμές .Το σκυρόδεμα έχει μία πλαστικότητα, όταν η πλαστικότητα αυτή είναι ανίκανη να παραλάβει τις φορτίσεις που δημιουργούνται, τότε το σκυρόδεμα ανακουφίζεται με το ράγισμα .



**Εικόνες 26-27** Ρηγμάτωση σκυροδέματος σε πλαστική κατάσταση

### **Ρωγμές διάβρωσης**

Οι διαδικασίες διάβρωσης που μπορούν να προκαλέσουν το ράγισμα περιλαμβάνουν το πάγωμα και το ξεπάγωμα, το βρέξιμο και την ξήρανση, τη θέρμανση και την ψύξη. Κάθε τύπος σκυροδέματος είναι πορώδης, που μόνο το πορώδες μπορεί να είναι υψηλό ή χαμηλό και, επομένως, θα απορροφήσει την υγρασία. Όταν εκτίθεται στην υπερβολικά χαμηλή θερμοκρασία, η υγρασία θα παγώσει και θα επεκταθεί, με συνέπεια την υδραυλική πίεση που τείνει να αναγκάσει τη συγκεκριμένη επιφάνεια για να ραγίσει. Οι διαδικασίες διάβρωσης που μπορούν να προκαλέσουν το ράγισμα στο σκυρόδεμα είναι το εναλλασσόμενο βρέξιμο και ξήρανση, η θέρμανση και η ψύξη. Και οι δύο διαδικασίες παράγουν τις αλλαγές όγκου στο σκυρόδεμα. Εάν οι αλλαγές όγκου είναι υπερβολικές, οι ρωγμές που μπορούν να εμφανιστούν, είναι παρόμοιες με εκείνες που συναντάμε στη διακένωση ξήρανσης και στις θερμικές πιέσεις.

### **Ρωγμές λόγω της οξείδωσης που προκαλείται από την επίθεση χλωριδίου στον οπλισμό του σκυροδέματος**

Όταν ο οπλισμός ενσωματώνεται στο σκυρόδεμα δεν διαβρώνεται κανονικά επειδή, βρίσκεται μέσα στο αλκαλικό περιβάλλον τσιμέντου και επειδή επικαλύπτεται από ένα προστατευτικό παθητικό στρώμα σκυροδέματος. Εντούτοις, εάν το βάθος της κάλυψης είναι ανεπαρκές ή το σκυρόδεμα είναι διαπερατό, το παθητικό στρώμα θα χωριστεί στην παρουσία υπερβολικών ποσών ιόντων χλωριδίου. Τα χλωρίδια μπορούν να προέλθουν από το χλωριούχο νάτριο (κοινό άλας) στις θαλάσσιες θέσεις ή από τις εφαρμογές απόψυξης, ή από τη χρήση ενός ιδιαίτερου χλωριδίου ασβεστίουμίξεων π.χ. (επιταχυντής), ή από το περιβάλλον χώμα, από τα μολυσμένα ύδατα ή απόβλητα.

**Ρωγμές λόγω της οξείδωσης του χάλυβα που προκαλείται από ενανθράκωση του σκυροδέματος.**

Η ενανθράκωση είναι μια διαδικασία στην οποία το διοξείδιο του άνθρακα (στην ατμόσφαιρα) αντιδρά και διαλύει το υδροξείδιο ασβεστίου στο ύδωρ πόρων της συγκεκριμένης δομής (σκυρόδεμα), με συνέπεια το σχηματισμό του ανθρακικού άλατος ασβεστίου και αυτή η αντίδραση αυξάνει την οξύτητα, δεδομένου ότι μειώνει το pH στην υγρασία του σκυροδέματος. Συνεπώς, ο χάλυβας ενίσχυσης διαβρώνεται, επειδή η αλκαλικότητα του σκυροδέματος μειώνεται εξ αιτίας της μείωσης του pH μέσω της ενανθράκωσης, που μειώνει την παθητικότητα γύρω από το χάλυβα.



**Εικόνα 28**

**Ράγισμα που οφείλεται στην οξείδωση του οπλισμού, που προκαλείται από την έκθεση στην υγρασία και στις ατμοσφαιρικές συνθήκες.**

Η ενίσχυση, ο χάλυβας προσυμπίεσης και τα περισσότερα από τα στοιχεία χάλυβα, εάν εκτεθούν στην υγρή ατμόσφαιρα, θα οξειδωθούν λόγω της χημικής αντίδρασης της οξείδωσης. Αυτή η αντίδραση θα συνεχιστεί ακόμα κι αν τέτοιος χάλυβας ενσωματώνεται στο σκυρόδεμα. Δεδομένου ότι η σκουριά καταλαμβάνει τον πολύ περισσότερο όγκο από το βασικό μέταλλο, η διαδικασία δημιουργεί την ακτινωτή επεκτατική πίεση στο περιβάλλον του σκυροδέματος και το σπάσιμο, που διαμορφώνει μια γραμμή ρωγμής αρχικά. Αυτό μπορεί περαιτέρω να οδηγήσει στο χωρισμό των φύλλων του σκυροδέματος (απελασματοποίηση).



**Εικόνα 29**

**Ρωγμές λόγω του αλκαλίου (στο τσιμέντο) που αντιδρά με ορισμένους αντιδραστικούς τύπους συνόλων.**

Μια σπάνια μορφή επέκτασης και ραγίσματος μπορεί να εμφανιστεί μετά από την αντίδραση μερικών μορφών πυριτίου και ανθρακικών αλάτων σε ορισμένα σύνολα με τα αλκάλια στο τσιμέντο. Η αντίδραση μεταξύ του πυριτίου και του αλκαλίου παράγει ένα πήκτωμα που καταλαμβάνει περισσότερο όγκο και ως εκ τούτου, προκαλεί την επέκταση και τις ρωγμές, (συνήθως που απομακρύνονται από την πηγή επέκτασης). Εντούτοις, αυτές οι ρωγμές μπορούν να ενώσουν άλλες και να διαμορφώσουν έναν « χάρτη» σχέδιο μη ανόμοιο crazing. Η αλκαλική συνολική αντίδραση, όπως τις επιθέσεις χλωριδίου και θεικού άλατος, μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο υπό τους υγρούς όρους. Ο θετικός προσδιορισμός μπορεί να γίνει μόνο με τη βοήθεια της εργαστηριακής δοκιμής στα δείγματα του σκυροδέματος που αφαιρέσαμε από τη δομή.

**Ρωγμές κατασκευής, φορτίων και χειρισμού**

Τα λάθη στην επεξεργασία, που συνδυάζεται με τις πιέσεις που προκαλούνται κατά τη διάρκεια της κατασκευής και από τις φορτίσεις, είναι μια σημαντική αιτία για τις ρωγμές στα μέλη προκατασκευασμένου σκυροδέματος. Αυτές οι ρωγμές μπορούν να εμφανιστούν στις μεταβλητές μορφές, τα μεγέθη και τις θέσεις του μέλους.





**Εικόνα 30**

### **5.1.1. ΑΙΤΙΑ ΡΩΓΜΩΝ**

Η μεγάλη ποικιλία των αιτιών που συνοδεύουν τις ρωγμές δυσχεραίνουν το έργο διερεύνησης τους, γι' αυτό και η στατική ανάλυση του εκάστοτε φορέα αποτελεί βασικό μέλημα του μηχανικού ώστε να αποκρυπτογραφήσει τον κίνδυνο μικρών ή μεγάλων προβλημάτων που "κρύβουν" τα αίτια τους.

Οι βασικότεροι παράγοντες που συμβάλλουν στην ανάπτυξη ρωγμών είναι οι ακόλουθες:

#### **Συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος.**

Ως γνωστόν, ο κορεσμένος με νερό τσιμεντοπολιτός σε συνθήκες υγρασίας υφίσταται απώλεια νερού και συστέλλεται με συνέπεια την πρόκληση ρηγματώσεων, οι οποίες αποτελούν μέσο για να περάσουν τόσο το διοξείδιο του άνθρακα όσο και τα χλωριόντα στον οπλισμό επιταχύνοντας τη διαδικασία της διάβρωσης.

#### **Διάβρωση των ράβδων οπλισμού του σκυροδέματος.**

Οφείλεται κυρίως στη μικρή επικάλυψη με σκυρόδεμα, στην κακή ποιότητα του σκυροδέματος, στο πορώδες της μάζας του σκυροδέματος, δηλαδή από την καλή συμπίκνωση για την αποφυγή κενών, την τιμή του λόγου νερού προς τσιμέντο, η οποία καθορίζει το αν ή όχι ο στερεός ιστός του σκληρυμένου τσιμεντοπολιτού έχει πολλούς πόρους κλπ.

#### **Ελλιπής οπλισμός.**

Δημιουργούνται ρωγμές λόγω υπέρβασης της αντοχής και η επισκευή τους είναι πιθανό να προκαλέσει προβλήματα στη δομική συμπεριφορά του μέλους, διότι περαιτέρω αύξηση της ροπής αντοχής της διατομής είναι πρακτικά αδύνατη.

### **Θερμοκρασιακές μεταβολές.**

Συνήθως πρόκειται για ακίνδυνες ρωγμές οι οποίες επισκευάζονται για αισθητικούς λόγους. Κυρίως σε κατασκευές μεγάλου μεγέθους, αύξηση της θερμοκρασίας του σκυροδέματος κατά την ενυδάτωση του τσιμεντοπολτού (λίγες ημέρες μετά τη σκυροδέτηση) προκαλεί ανάπτυξη εφελκυστικών παραμορφώσεων και ρηγμάτωση λόγω διαφοράς θερμοκρασίας των εξωτερικών επιφανειών (ψυχρότερες ) με το εσωτερικό (θερμότερο ) των στοιχείων. Το μέγεθος των εφελκυστικών παραμορφώσεων και τάσεων που πιθανόν να οδηγήσουν σε ρηγμάτωση εξαρτάται από το βαθμό περιορισμού των παραμορφώσεων της κατασκευής, το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, το συντελεστή θερμικής διαστολής, την αύξηση της θερμοκρασίας λόγω ενυδάτωσης και τη χαλάρωση των τάσεων λόγω ερπυσμού. Συνηθισμένη μέθοδος περιορισμού τάσεων είναι ο περιορισμός της θερμοκρασιακής μεταβολής που επιτυγχάνεται με πρόψυξη του σκυροδέματος με κρύα αδρανή κατά τη σκυροδέτηση, καθώς επίσης και με μερική αποκατάσταση του τσιμέντου με ποζολάνες.

### **Αυξημένα εξωτερικά φορτία.**

Περαιτέρω αύξηση της εξωτερικής φόρτισης από τα προβλεπόμενα οδηγεί σε ρηγμάτωση της κατασκευής.

### **Μη επαρκής συνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος.**

Εμφανίζεται μικρός αριθμός ρωγμών μεγάλου πλάτους στην περιοχή απώλειας της συνάφειας, συνήθως στις παρειές.

### **Ανεπαρκής συντήρηση και τελείωμα.**

Ως αποτέλεσμα ,η εξωτερική επιφάνεια είναι πλουσιότερη σε νερό από το εσωτερικό, παρουσιάζεται αρκετές εβδομάδες μετά τη σκυροδέτηση και γίνεται εμφανέστερη όταν η επιφάνεια έχει διαβραχεί. Πρόκειται για τριχοειδείς ρωγμές μικρού μήκους και πολύ μικρού βάθους-1 mm- στην επιφανειακή στρώση του σκυροδέματος. (“σκάσιμο”).

### **Πλαστική συστολή και πλαστική κάθιση.**

Το φαινόμενο της πλαστικής κάθισης παρουσιάζεται επί το πλείστον στο άνω άκρο υποστρώματος λόγω μεγάλης εξίδρωσης και συνθηκών απότομης αρχικής ξήρανσης. Η πλαστική συστολή εμφανίζεται συνήθως σε πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος λόγω μικρής εξίδρωσης, απότομης αρχικής ξήρανσης και ύπαρξης οπλισμού κοντά στην επιφάνεια.



**Εικόνα 31** : Ρηγμάτωση λόγω πλαστικής συστολής

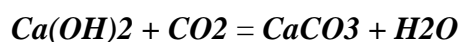
## 5.2 ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗ

Το φαινόμενο αποσάθρωσης του σκυροδέματος - εναπόθεση επιφανειακών αλάτων πρόκειται για ένα φυσικό προσωρινό φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται είτε ως άσπρη σκόνη (πούδρα) είτε ως ξεθώριασμα του χρώματος. Τα υδατοδιαλυτά άλατα του ασβεστίου συμπαρασύρονται στην επιφάνεια της πέτρας και αντιδρώντας με το διοξείδιο του άνθρακα σχηματίζουν ανθρακικό ασβέστιο. Αυτό μερικές φορές συμβαίνει όταν το σκυροκονίαμα της πέτρας διαβρέχεται και ελευθερώνεται νερό το οποίο παραμένει στην επιφάνεια.

Πέραν του αισθητικού αποτελέσματος δεν υπάρχουν άλλες επιζήμιες επιδράσεις. Αποτελεί σύνηθες φαινόμενο σε όλα τα ποιοτικώς καλά προϊόντα που περιέχουν υψηλά ποσοστά τσιμέντου. Τα σχηματιζόμενα άλατα μπορούν να απομακρυνθούν με την εφαρμογή αραιού διαλύματος υδροχλωρικού οξέως ή ειδικών χημικών διαλυμάτων. Αν τα άλατα παραμείνουν και μετά την εφαρμογή αραιού διαλύματος υδροχλωρικού οξέος τότε πρέπει να δοθεί ο απαιτούμενος χρόνος ώστε να απομακρυνθούν υπό την επίδραση των φυσιολογικών καιρικών συνθηκών.

## 5.3 ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ

Η «ασθένεια» του σκυροδέματος που ονομάζεται «ενανθράκωση» οφείλει την ονομασία της στην αλλαγή του υδροξειδίου του ασβεστίου που υπάρχει στο σκυρόδεμα σε ανθρακικό ασβέστιο μέσω της αντίδρασης:



Οι ράβδοι οπλισμού προστατεύονται από την διάβρωση μέσω ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος ένυδρου οξειδίου του σιδήρου, που δημιουργείται λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του σκυροδέματος που τις περιβάλλει. Η αλκαλικότητα αυτή χαρακτηρίζεται από μία τιμή του pH γύρω στο 12.5, που αντιστοιχεί στην υπό συνήθη θερμοκρασία συγκέντρωση ισορροπίας του υδροξειδίου του ασβεστίου  $Ca(OH)_2$ , στο νερό των πόρων. Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου μπορεί να διατηρηθεί τοπικά από ιόντα χλωρίου, αν η συγκέντρωση των

τελευταίων υπερβαίνει το 0.4 έως 0.6 % του βάρους του τσιμέντου, ή να διαλυθεί γενικά, λόγω μείωσης της αλκαλικότητας του σκυροδέματος γύρω από την ράβδο, σε τιμές του pH κάτω από 9.0. Τότε λέμε ότι ο χάλυβας του οπλισμού αποπαθητικοποιήθηκε (δηλαδή δεν απολαμβάνει πλέον την παθητική προστασία που του προσέφερε η αλκαλικότητα του σκυροδέματος). Η μείωση του pH του σκυροδέματος σε τιμές κάτω του 9.0 οφείλεται στην χημική αντίδραση του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  του νερού των πόρων ( και γενικότερα του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού) με το διοξείδιο του άνθρακος ( $\text{CO}_2$ ) της ατμόσφαιρας, που σταδιακά διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Η ενανθράκωση του σκυροδέματος είναι η αρχή της οδού διάβρωσης των οπλισμών.

Παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξη της ενανθράκωσης:

**α)** Η αυξημένη περιεκτικότητα του μπετόν σε τσιμέντο μειώνει την ταχύτητα ενανθράκωσης.

**β)** Σχέση νερού τσιμέντου (W/Z):

Το τσιμέντο δεσμεύει χημικά και φυσικά, περίπου το 0,4 του βάρους του σε νερό. Στην πράξη για να επιτυγχάνεται όμως εργασιμότητα συχνά αυξάνεται η σχέση αυτή σε 0,5 ή και 0,6. Το πλεονάζον και μη δυνάμενο να δεσμευτεί νερό εξατμίζεται αφήνοντας τον όγκο του σαν τριχοειδή και πόρους που αργότερα θα είναι η αφετηρία της ενανθράκωσης.

**γ)** Η σχετική υγρασία του αέρα καθώς και η ποιότητα και το πάχος της επικάλυψης.

#### 5.4 ΣΥΣΤΟΛΗ ΞΗΡΑΝΣΗΣ

Με τον όρο «συστολή ξηράνσεως» δηλώνεται η προοδευτική με την πάροδο του χρόνου παραμόρφωση (συστολή) του σκυροδέματος ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις οφειλόμενη στην προοδευτική με την πάροδο του χρόνου απομάκρυνση από τους πόρους του πήγματος μορίων νερού που δεν είναι χημικά συνδεδεμένα με το τσιμέντο. Τα μόρια αυτά, με την παρεμβολή τους μεταξύ των κρυστάλλων του πήγματος, αυξάνουν την απόσταση των τελευταίων και όταν απομακρυνθούν, οι κρύσταλλοι πλησιάζουν υπό την επιρροή των ελκτικών δυνάμεων (μοριακών δεσμών τύπου van der Waals) με συνέπεια τη συστολή του υλικού.

Η συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος είναι ένα φυσικό φαινόμενο, το οποίο, από μόνο του δεν συνιστά πρόβλημα. Προβλήματα ανακύπτουν όταν η συστολή ξήρανσης επέρχεται στην περιοχή ακλόνητων στοιχείων, όπως τοιχίων, υποστρωμάτων, παρακειμένων πλακών, υποκειμένων στρώσεων σκυροδέματος ή στην διεπιφάνεια με το έδαφος έδρασης της κατασκευής. Όταν αυτό συμβαίνει όταν δηλαδή η συστολή ξήρανσης είναι παρεμποδιζόμενη αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις στο σκυροδέμα και μόλις αυτές υπερβούν την εφελκυστική του αντοχή δημιουργούνται ρωγμές. **Το πρόβλημα λοιπόν δεν είναι η συστολή ξήρανσης, αλλά οι ρηγματώσεις λόγω συστολής ξήρανσης.**

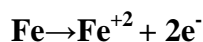
Η συστολή συνιστά μεταβολή του όγκου, ή άλλως, παραμόρφωση του σκυροδέματος. Παρά το ότι πολύ συχνά γίνεται αναφορά στην αντοχή ή φέρουσα ικανότητα του σκυροδέματος, πολύ σπάνια γίνεται αναφορά στην ικανότητα του σκυροδέματος να υποστεί παραμόρφωση χωρίς την εμφάνιση ρηγματώσεων, πράγμα που υποδηλώνει υπέρβαση της παραμόρφωσης θραύσης αυτού.

#### 5.5 ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η διάβρωση του χάλυβα έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της διατομής της ράβδου κατά την ποσότητα του χάλυβα που μετατρέπεται σε σκουριά. Εκτός όμως από αυτό που είναι και το

πιο προφανές η διάβρωση μειώνει επίσης και μάλιστα δυσανάλογα την ολκιμότητα του χάλυβα, γεγονός με πολύ δυσμενείς επιπτώσεις στη σεισμική συμπεριφορά του μέλους. Επιπλέον επειδή η σκουριά έχει 2 έως 6 φορές μεγαλύτερο όγκο από αυτόν του σιδήρου από τον οποίο έχει παραχθεί προκαλεί ρηγματώση αποτινάσσοντας την επικάλυψη, μειώνοντας ή και μηδενίζοντας την συνάφεια, και εκθέτοντας ακόμη περισσότερο τη ράβδο σε διάβρωση. Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι η μείωση της αντοχής, το γεγονός αυτό σε συνάρτηση με το ότι τα κτήρια αυτά έχουν κατασκευασθεί χωρίς τη χρήση αντισεισμικού κανονισμού τα κάνει πιο ευάλωτα και καθιστά την επισκευή ή ενίσχυση τους αναγκαία.

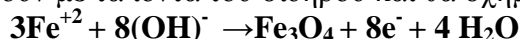
Είναι ένα σύνθετο χημικό και ηλεκτροχημικό φαινόμενο και για να πραγματοποιηθεί απαιτείται ένας ηλεκτρολύτης και μία ηλεκτρική σύνδεση. Το ρόλο του ηλεκτρολύτη παίζει το σκυρόδεμα το οποίο είναι γεμάτο μικρούς πόρους που περιέχουν υγρασία ενώ η ράβδος του χάλυβα παρέχει την ηλεκτρική σύνδεση. Το φαινόμενο της ηλεκτρολύσεως μπορεί να διακριθεί σε δύο απλές διαδικασίες: της ανόδου και της καθόδου. Η ανοδική και η καθοδική (ηλεκτροχημική) δράση συμβαίνουν ταυτόχρονα σε διαφορετικές περιοχές του χάλυβα, ενώ ένας αριθμός ηλεκτρονίων μετακινείται μέσα στον χάλυβα. Ο λόγος σχηματισμού στην επιφάνεια του χάλυβα ταυτόχρονα ανοδικών και καθοδικών περιοχών οφείλεται στην δημιουργία τοπικών γαλβανικών στοιχείων. Η άνοδος δημιουργείται στην περιοχή του χάλυβα όπου έχει καταστραφεί το προστατευτικό στρώμα οξειδίων έτσι ώστε τα άτομα του σιδήρου να μετατρέπονται σε ιόντα ,ελευθερώνοντας ηλεκτρόνια.



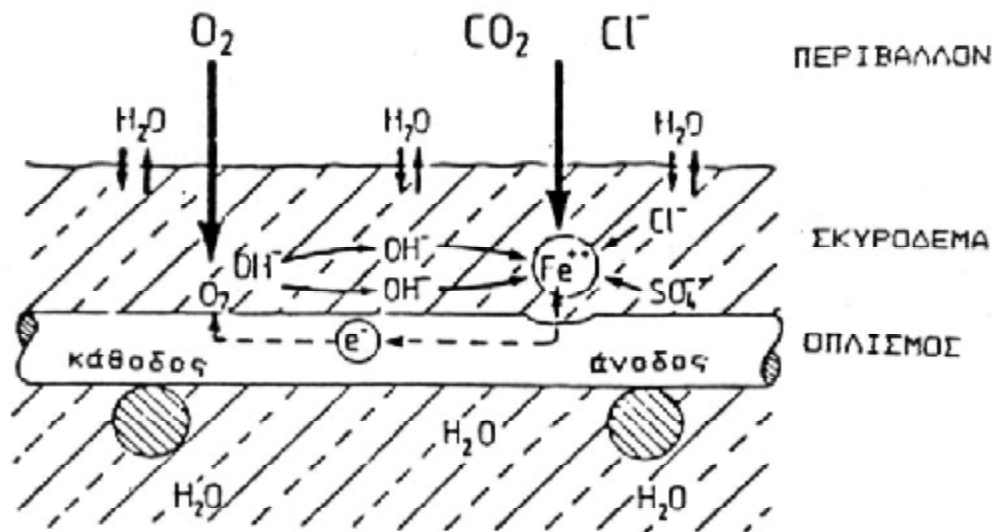
Τα ηλεκτρόνια λόγω διαφοράς δυναμικού που δημιουργείται κατευθύνονται προς την κάθοδο. Ως κάθοδος μπορεί να λειτουργήσει η περιοχή του χάλυβα που έχει νερό και οξυγόνο ανεξάρτητα αν έχει καταστραφεί το στρώμα οξειδίου, συνεπώς ολόκληρη η ράβδος. Εκεί αντιδρούν τα ηλεκτρόνια με το νερό και το οξυγόνο δίνοντας ιόντα υδροξυλίου.



Τα ιόντα υδροξυλίου κινούνται μέσα στο νερό των πόρων, από την περιοχή της καθόδου προς την άνοδο, όπου θα ενωθούν με τα ιόντα του σιδήρου και θα σχηματίσουν σκουριά.



Μετά την παραπάνω αντίδραση είναι δυνατόν να σχηματιστούν, διάφορα οξείδια του σιδήρου, π.χ. FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Συμπερασματικά, για τις αντιδράσεις οξειδώσεως έχουμε ότι οι ποσότητες νερού πριν και μετά παραμένουν σταθερές, το οξυγόνο είναι αυτό που καταναλώνεται για την διάβρωση του χάλυβα, ενώ το νερό βοηθά την διαδικασία ηλεκτρολύσεως.



**Σχήμα 6:** Σχηματισμός γαλβανικού στοιχείου στον σιδηροπλισμό σκυροδέματος, με αποτέλεσμα την διάβρωση του οπλισμού (κατά Evans)

### 5.5.1 ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Η διάβρωση του σιδηρού οπλισμού προκαλεί αύξηση του όγκου του με αποτέλεσμα τη δημιουργία εσωτερικών τάσεων και ρηγματώσεων .

Η ζημιά που προκαλείται είναι διπλή:

- Από την μία, με την οξείδωση του χάλυβα μειώνεται η ενεργός διατομή του και άρα μειώνεται η στατική επάρκεια της κατασκευής.
- Από την άλλη, οι ρηγματώσεις αυξάνουν τη διαπερατότητα του σκυροδέματος σε CO<sub>2</sub> δημιουργώντας έτσι τις προϋποθέσεις για νέες ρηγματώσεις και τη γρήγορη διάβρωση του οπλισμού.

Γενικά υπολογίζεται ότι το 5% του Ακαθάριστου Εθνικού Προϊόντος μιας σύγχρονης χώρας διατίθεται για αποκατάσταση τέτοιων βλαβών σε κατασκευές.

### 5.5.2 ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΛΗΨΗΣ

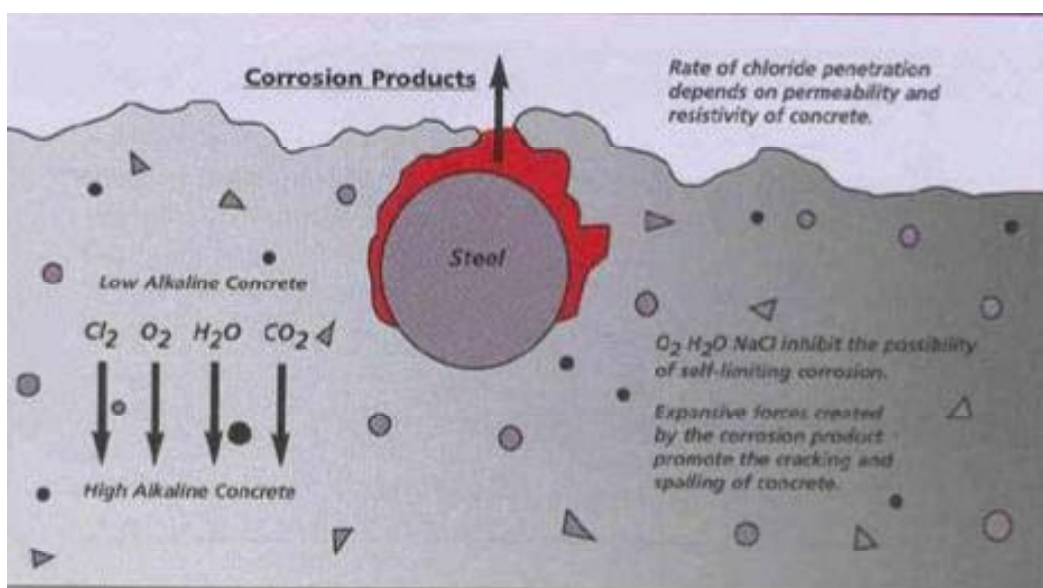
Τα μέτρα που πρέπει να λαμβάνονται για την πρόληψη των παραπάνω φαινομένων, είναι:

- Ø Τήρηση με ευλάβεια των απαραίτητων χαρακτηριστικών του σκυροδέματος που έχουν την μεγαλύτερη σημασία για την ανθεκτικότητά του, δηλαδή του μέγιστου λόγου νερού/τσιμέντου (N/T) και της ελάχιστης περιεκτικότητας σε τσιμέντο, όπως αυτά ορίζονται στον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος.
- Ø Τήρηση των προβλεπόμενων, από την στατική μελέτη, επικαλύψεων του οπλισμού σε όλα τα εξωτερικά στοιχεία του σκελετού με τη χρήση κατάλληλων αποστατήρων στις ράβδους του οπλισμού.
- Ø Πολύ καλή συμπίκνωση του σκυροδέματος, ώστε να μην παραμένουν μεγάλα κενά (φωλιές, αέρας) στη μάζα του σκυροδέματος.
- Ø Σχολαστική συντήρηση του σκυροδέματος αμέσως μετά τη διάστρωση.

## 5.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ

Τα χλωριόντα που μπορεί να διατρήσουν το προστατευτικό στρώμα οξειδίου όταν φτάσουν μέσω του νερού των πόρων μέχρι τον οπλισμό, μπορεί να προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος, αν έχουν χρησιμοποιηθεί συλλεκτά αδρανή από παραλίες ή θαλασσινό νερό μείξης(νησιωτική Ελλάδα),ή πρόσμικτα βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριούχα άλατα, είτε από το φυσικό περιβάλλον. Τα χλωριόντα μπορούν να διαπεράσουν το προστατευτικό στρώμα οξειδίων, μέσα από τους πόρους του στρώματος με μεγαλύτερη ευκολία από άλλα ιόντα, με αποτέλεσμα την τοπική ή γενική καταστροφή του επιφανειακού προστατευτικού οξειδίου και την έναρξη της οξειδωσής του.

Έχει παρατηρηθεί όμως ότι η ενανθράκωση και η διείσδυση χλωριόντων δεν είναι ανεξάρτητες διαδικασίες, και μάλιστα η πρώτη επιταχύνει σημαντικά τη δεύτερη. Όταν το υδροξείδιο του ασβεστίου του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού αντιδρά με τα χλωριόντα και τα δεσμεύει, περιορίζοντας την ποσότητα αυτών που διαχέονται προς τον οπλισμό, κάτω από την οριακή συγκέντρωση του 0.4-0.6%, που απαιτείται για την διάτρηση του προστατευτικού οξειδίου. Όταν όμως το υδροξείδιο του ασβεστίου μετατραπεί με την ενανθράκωση σε ανθρακικό ασβέστιο τα χλωριόντα που είχε δεσμεύσει ελευθερώνονται και διατίθενται πλέον για την προσβολή του χάλυβα.



Σχήμα 7: Απεικόνιση διείσδυσης χλωριόντων

### 5.6.1 Παράμετροι που επηρεάζουν τη διάβρωση του χάλυβα από χλωριόντα.

- Ποιότητα και πάχος της επικάλυψης.
- Περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο – προσθετά.
- Είδος και συγκέντρωση των χλωριόντων.
- Περιβάλλον.

## ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Όπως προκύπτει από τα περιγραφόμενα στα αντίστοιχα κεφάλαια της πτυχιακής εργασίας μας, όσον αφορά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος στην μόνιμη επένδυση σηράγγων, ο μελετητής οφείλει να λάβει υπεύθυνα τους παράγοντες της ανθεκτικότητας στους υπολογισμούς για ένα τέτοιο έργο. Εν συνεχεία ο ανάδοχος και ο φορέας υλοποίησης του έργου θα πρέπει να εξασφαλίζουν την τήρηση των σύγχρονων μεθόδων που εξελίσσονται μέρα με την μέρα, να είναι ενημερωμένοι για τις νέες τεχνολογίες και τα σύγχρονα υλικά τα οποία προσδίδουν καλύτερη ανθεκτικότητα στο έργο. Επίσης θα πρέπει να ακολουθούνται οι ευρωπαϊκή κανονισμοί και να λαμβάνονται υπ' όψιν οι κλιματολογικές συνθήκες, ανάλογα με την τοποθεσία του έργου. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε σήραγγα είναι μοναδική και γι' αυτόν τον λόγο πρέπει να αποτιμάται και να σχεδιάζεται με βάση τα δικά της στοιχεία, καθώς αυτά είναι που θα καταστήσουν την κατασκευή επιτυχή και την σήραγγα λειτουργική για τον τελικό χρήστη. Αυτό θα οδηγήσει και στην διάρκεια ζωής της κατασκευής (Life cycle) και στην μείωση κόστους συντήρησης.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] «Δράσεις σχεδιασμού επενδύσεως σηράγγων σύμφωνα με τις νέες οδηγίες και νεότερες εξελίξεις στο σχεδιασμό μόνιμων επενδύσεων σηράγγων», Θ. Πανουτσόπουλος, Ν. Μαλακάτας.
- [2] Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές για τη μόνιμη επένδυση σηράγγων από επί τόπου έγχυτο σκυρόδεμα, ΠΕΤΕΠ 12-04-01-00.
- [3] Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές για τη μόνιμη επένδυση σηράγγων με προκατασκευασμένα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα, ΠΕΤΕΠ 12-04-03-00.
- [4] «Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels», Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation .
- [5] «Επενδύσεις σηράγγων μονολιθικού κελύφους με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα», Θ. Β. Παναγιωτίδης, Πολιτικός Μηχανικός, Τμήμα Υπογείων Έργων BASF C.C. Ελλάς Α.Ε.
- [6] «Φόρτιση της μόνιμης επένδυσης σηράγγων από περιβάλλον έδαφος. Ανάλυση και διαστασιολόγηση μόνιμης επένδυσης σηράγγων», Καββαδάς, Μ. 2004 (επιμέλεια Τάσιος, Θ.Π.). Αθήνα: Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων & Υπογείων Έργων.
- [7] «Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος», Θ.Π. Τάσιος, Κ. Αλιγιάκη, Αθήνα 1993.
- [8] «Tunnel Lining Design Guide», The British Tunneling Society and The Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, 2004.
- [9] «Δομικά Υλικά», Θανάσης Χ. Τριανταφύλλου, 5<sup>η</sup> Έκδοση, 2002.
- [10] «Διάρκεια ζωής σκυροδέματος», Μαντέλος Αθανάσιος, διπλ. Πολ. Μηχανικός Ε.Μ.Π
- [11] «Αντοχή της επισκευής και παράγοντες που την επηρεάζουν», Παυλίδης Γιώργος – Ρήγα Ιωάννα
- [12] «Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος σε διάρκεια», Παναγιώτης Τσίκας – Χαράλαμπος Παπασπυριδάκος
- [13] Α.Ι. Σοφιανός 2012

[14] «attiko metro inside-Ενισχύσεις/ Επισκευές Κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, Διαδικασίες – Τεχνικές και Διαστασιολόγηση», Σ. Η. Δρίτσος , Πάτρα 2007.

[15] «Δομικά Υλικά», Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου, Πάτρα 2005, 7η Έκδοση.

[16] «Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος, μέρος III», Μιχαήλ Ν. Φαρδής ,Πάτρα 2008.

[17] «Ανθεκτικότητα του (οπλισμένου) σκυροδέματος σε διάρκεια, αφιέρωμα Μ.Φαρδής», (βιβλιογραφία 10 φοιτητικού συνεδρίου 2004)

[18] Περιοδικό Κτίριο Τεύχος 112,Άρθρο «Διάβρωση του σιδηρού οπλισμού», Μαυροειδής Π.

[19] ΤΕΙ ΠΑΤΡΑΣ – ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ-Δ. ΠΑΓΑΝΟΣ:  
ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ  
Ζ. ΧΡΗΣΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΤΕ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

### **ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ (LINKS)**

- 1) [www.houseservice.gr](http://www.houseservice.gr)
- 2) [www.episkeves.civil.upatras.gr](http://www.episkeves.civil.upatras.gr)
- 3) [www.eureka.lib.teithe.gr](http://www.eureka.lib.teithe.gr)
- 4) [www.catholicprotection.gr](http://www.catholicprotection.gr)
- 5) [www.google.gr](http://www.google.gr)
- 6) [www.tee.gr](http://www.tee.gr)