



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**«ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΩΣ ΤΕΛΙΚΗ
ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ:**

ΤΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΤΗΣ ΔΕΗ Α.Ε.»

**ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.**

Επιβλέπουσα: Γιούτα – Μήτρα Παρασκευή,

Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2024

ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:
«ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΩΣ ΤΕΛΙΚΗ
ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ:
ΤΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΤΗΣ ΔΕΗ Α.Ε.»

Υποβλήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος σπουδών του
Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων έργων» του
Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με συμμετέχουσες Σχολές:
Μεταλλειολόγων - Μεταλλουργών Μηχανικών ΕΜΠ
Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ
Αγρονόμων Και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής ΕΜΠ

Ημερομηνία προφορικής εξέτασης: 08/07/2024

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Γιούτα-Μήτρα Παρασκευή, Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό ΕΜΠ
(Επιβλέπουσα)

Νομικός Παύλος, Καθηγητής Σχολής Μεταλλειολόγων – Μεταλλουργών Μηχανικών
ΕΜΠ

Βουγιούκας Εμμανουήλ, Επίκουρος Καθηγητής Σχολής Πολιτικών Μηχανικών
ΕΜΠ

© Σωτηροπούλου Δήμητρα, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:
«ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΩΣ ΤΕΛΙΚΗ
ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ:
ΤΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΤΗΣ ΔΕΗ Α.Ε.»

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τη συγγραφέα (dimitra_sotiropoulou@yahoo.gr). Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τη συγγραφέα και σε καμία περίπτωση δεν εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ ΑΕ).

Σε εκείνους τους Δασκάλους μου, όλων των βαθμίδων εκπαίδευσης,
που μέσα από την αγάπη τους για τη δουλειά τους
με δίδαξαν να συνεχίζω

Ευχαριστίες

Για την ολοκλήρωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Σταθά Ιωάννη, Διευθυντή του ΥΗΣ Λάδωνα, για την διάθεση του πολύτιμου ιστορικού αρχείου των ΥΗΕ Λάδωνα και Άγρα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Παπαχατζάκη Χαρά, Πολιτικό Μηχανικό της ΔΕΗ ΑΕ για τη διάθεση των στοιχείων των τεχνικών προδιαγραφών σχετικά με τα ΥΗΕ Ιλαρίωνα, Μεσοχώρας, Μετσοβίτικου, Πολύφυτου και Συκιάς.

Οι επί μέρους λίστες υποέργων και σιηράγγων που παρουσιάζονται ανά ΥΗΕ, καθώς και τα στοιχεία που τις συνοδεύουν στους αντίστοιχους πίνακες προέρχονται από την αντίστοιχη λίστα της ΔΕΗ ΑΕ, η οποία συντάχθηκε το 2002 από τον κ. Αναστασόπουλο Κωνσταντίνο, Τομεάρχη Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών της ΔΕΗ ΑΕ.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή της Σχολής Μεταλλειολόγων - Μεταλλουργών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κ.Νομικό Παύλο, για τις πολύτιμες κατευθύνσεις και τις απαραίτητες γνώσεις εξεύρεσης, οργάνωσης και κατανόησης του αντικειμένου της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, στα πλαίσια του προγράμματος σπουδών του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων» του ΕΜΠ. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Επιβλέπουσα κ. Γιούτα-Μήτρα Παρασκευή, Ε.Δι.Π. της Σχολής Μεταλλειολόγων - Μεταλλουργών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη συνεργασία μας κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας.

Περίληψη

Ένα από τα μέτρα υποστήριξης για την προσωρινή και μόνιμη επένδυση υπόγειων έργων αποτελεί το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ινοπλισμένο ή μη, με ή χωρίς ενσωματωμένο δομικό πλέγμα, κυρίως σε σήραγγες, θαλάμους, φρέατα και στοές. Η υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, προσδίδει στα υπόγεια έργα όλα τα πλεονεκτήματα των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, αλλά και του τρόπου εφαρμογής του, τόσο στο τελικό αποτέλεσμα όσο και στη διαδικασία κατασκευής τους.

Συγκεκριμένα, λόγω της σύστασής του και εξαιτίας του χαμηλού συντελεστή νερού προς τσιμέντο (N/T) αποτελεί υλικό υψηλών αντοχών, ενώ δεν απαιτείται κατά την εφαρμογή του τοποθέτηση ξυλότυπου, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τους χρόνους και το κόστος κατασκευής. Λόγω του τρόπου διάστρωσής του με εκτόξευση υπό πίεση, εφαρμόζεται με την ίδια ευκολία ακόμη και σε επιφάνειες με μεγάλες κλίσεις ή κατακόρυφες. Παρουσιάζει πολύ καλή πρόσφυση με τις υφιστάμενες στρώσεις σκυροδέματος και με τους βραχώδεις γεωλογικούς σχηματισμούς. Η δε παρουσία των ενσωματωμένων ινών στο εσωτερικό του μείγματός του αυξάνει την ολκιμότητα, την ανθεκτικότητα και την αντοχή του εκτοξευμένου σκυροδέματος, ενώ περιορίζει το φαινόμενο της ρωγμάτωσης, είτε πριν την έναρξή της δημιουργίας των αρχικών μικρορωγμών είτε περιορίζοντας την εμφάνιση των ήδη διαμορφούμενων ασυνεχειών. Η επίδραση του υλικού και του σχήματος των ινών στις μηχανικές ιδιότητες του εφαρμοζόμενου δομικού υλικού προσελκύει ακόμη και σήμερα το ενδιαφέρον της παγκόσμιας έρευνας. Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι δύναται σε κάθε περίπτωση να δώσει την επιθυμητή τελική επιφάνεια στην κατασκευή, καθώς επιστρώνεται και μορφοποιείται κατά το οριζόμενο στα σχέδια μελέτης τελικό αισθητικό αποτέλεσμα και το καθορισμένο είδος χρήσης και λειτουργίας του έργου.

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία καταγράφηκαν περιπτώσεις, κατά τις οποίες χρησιμοποιήθηκε το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως τελική επένδυση σηράγγων ανά τον κόσμο, καθώς και η ποιοτική εξέλιξή του συν τω χρόνω. Αναλύθηκαν οι μέθοδοι σχεδιασμού του, οι οποίες αρκούνται μέχρι και σήμερα σε εμπειρικές μεθόδους και εργαστηριακά αποτελέσματα, όπως η μέθοδος Q, η μέθοδος RMR. Παρατίθενται οι ισχύοντες Διεθνείς Κανονισμούς και Πρότυπα, όπως το Πρότυπο ASTM, ομοίως από εμπειρικά στοιχεία. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στο σχεδιασμό του υλικού με τη βοήθεια αναλυτικών εξισώσεων, που βασίζεται σε προσομοιώσεις υποβαλλόμενων σε φόρτιση προσομοιωμάτων υλικού και εξαγωγή αποτελεσμάτων με πεπερασμένα στοιχεία.

Στη συνέχεια, αναλύεται ο μηχανισμός ενίσχυσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με ίνες από χάλυβα, ο οποίος βασίζεται στη θεωρία σύνθετης μηχανικής και στη θεωρία απόστασης ινών. Οι εν λόγω θεωρίες αποτελούν τους δύο βασικούς πυλώνες, όλων των υπόλοιπων αναλύσεων που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα στη Διεθνή Βιβλιογραφία.

Από τα πιο σημαντικά στοιχεία που επηρεάζουν το σχεδιασμό, την εφαρμογή και το χρόνο ζωής του υλικού που εξετάζεται είναι οι διαβρωτικοί παράγοντες και ο τρόπος που αυτοί επενεργούν στο ινοπλισμένο - ή μη - εκτοξευόμενο σκυρόδεμα από τη στιγμή της εφαρμογής του και για όλο το χρόνο ζωής του εκάστοτε έργου. Τα διάφορα φαινόμενα διάβρωσης ξεχωριστά, οι αιτίες που τα προκαλούν, ο μηχανισμός εξέλιξής τους, τα άμεσα αλλά και τα τελικά αποτελέσματα τόσο στη μικροδομή του υλικού όσο και στο σύνολο της κατασκευής που αυτό εφαρμόζεται είναι κάποια από τα σημεία που αναλύθηκαν στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Η παρουσία ύδατος και οι εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες συνδέονται άρρηκτα με τη διαμόρφωση και την εξέλιξη των φαινομένων διάβρωσης στο εσωτερικό και στην επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Στη συνέχεια, εξετάστηκε εκτενώς η εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ινοπλισμένου ή μη, ως μόνιμη επένδυση υπόγειων έργων στην Ελλάδα.

Διαπιστώθηκε ότι κατά κύριο λόγο η πλειοψηφία τους ανήκει στη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ ΑΕ), όπου και γίνεται εκτενής αναφορά κατόπιν συλλογής ιστορικών, τεχνικών και κατασκευαστικών στοιχείων των Υδροηλεκτρικών Έργων. Χαρακτηριστικό είναι ότι υπάρχουν περιπτώσεις σηράγγων που εφαρμόστηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως προσωρινή επένδυση, λειτουργώντας επιτυχώς για πολλά έτη ως μόνιμη επένδυση και μέχρι η τελευταία να κατασκευαστεί, όπως για παράδειγμα στο Υδροηλεκτρικό Έργο του Μετσοβίτικου.

Καταγράφηκε ταυτόχρονα η σύσταση μείγματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος, οι κοκκομετρικές καμπύλες διαβάθμισης των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν στην παραγωγή του, ο τρόπος εφαρμογής του, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε και γενικότερα το σύνολο των Τεχνικών Προδιαγραφών για τα υπόγεια έργα της ΔΕΗ ΑΕ, με έμφαση στην προσωρινή (ελλείπει μόνιμης τελικής επένδυσης) και μόνιμη επένδυση σηράγγων από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ινοπλισμένο ή μη. Καταγράφηκαν οι Πρότυπες Προδιαγραφές, οι οποίες όρισαν και τα όρια αντοχής του υλικού σε θραύση, κάμψη, ρωγμάτωση και οι Πρότυπες Δοκιμές που εκτελέστηκαν στο παρελθόν, πριν την κατασκευή των καταγεγραμμένων έργων.

Επιπλέον, συλλέχθηκαν στοιχεία που αφορούν συντηρήσεις, σχέδια, κατασκευαστικές λεπτομέρειες, δοκιμές αντοχής σε θραύση εκτοξευμένου σκυροδέματος και φωτογραφικό υλικό της παρούσας κατάστασης σηράγγων που επιλέχθηκαν.

Από τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν και ελλείπει καταγεγραμμένων συντηρήσεων αστοχιών, η γενική εικόνα για τις μηχανικές ιδιότητες του εκτοξευμένου σκυροδέματος συν τω χρόνω είναι πολύ καλή και η εφαρμογή του χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα, ανεξάρτητα από τις εναλλαγές των γεωλογικών σχηματισμών και την παρουσία ύδατος στις κατασκευές που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό διαμόρφωσης της επένδυσης, μόνιμης και προσωρινής.

Abstract

Fiber - reinforced (or not), included integrated structural steel mesh (or not), shotcrete is a commonly used temporary and permanent lining of underground works, specially tunnels, chambers, shafts and adits.

Shotcrete is a high-resistance, quick application and no formwork required material, reducing build time and total cost, due its mix composition and the low water-to-cement ratio (W/C). It is easily applicable, even at steep slopes or vertical surfaces, due to the spraying method. It is characterized by extremely high cohesion to the existing concrete layers and rock mass. Specially the fiber reinforced shotcrete shows increased ductility, durability and toughness, while controlling shrinking and cracking. Material and shape effect of fibers in shotcrete attracts the international research interests. Furthermore, reinforced fiber shotcrete final surface may be equal to fair-face concrete, if required, according to the approved designs and the general project's use.

Shotcrete final lining tunnels around the world and shotcrete final lining strength over time are specifically mentioned. A lot of empirical design methodologies and many laboratory analyses have been developed over the years, for example the Q method and the RMR method. International Standards, such as ASTM Standard and general construction procedures have also been applied and are included in this Thesis. Further simulations of more advanced material models have provided further results of shotcrete behavior, using the Finite Element Method (FEM). Additionally, Fiber reinforced shotcrete strengthening mechanism of materials is based on Composite Mechanics Theory and Fiber Spacing Theory.

Among the most important effect on the design, application and life time of shotcrete are the corrosive factors, which causes the future construction's wearing. The various corrosion phenomena causes, their microscopic and macroscopic mechanism and their final effects are the next point of this Postgraduate Diploma Thesis' analysis. The environmental conditions, such as the atmospheric air and final surface temperature, relative humidity (RH) and groundwater are inextricably linked to reinforced shotcrete internal and external deterioration process.

Subsequently, the shotcrete permanent lining, fiber-reinforced or not, of underground projects in Greece was extensively researched. The majority of them belong to the Public Power Corporation (PPC SA) and this Postgraduate Diploma Thesis includes an extensive reference of historical, technical and construction data of these Hydroelectric Projects. It is important that there are cases of tunnels where temporary shotcrete lining was constructed and remained without any failures for many years as a permanent lining, as for example in the Metsovitiko Hydroelectric Project.

This reference focused on shotcrete mixture's composition, its aggregates gradation curves, the application method, the used equipment and generally Technical Specifications for the underground works, with an emphasis on the temporary and specially final shotcrete tunnels' lining, fiber reinforced or not. The Specifications and Technical Standards listed also define the material 's fracture toughness, bending and tensile strength as well as the shotcrete's quality tests. Additionally, data regarding construction's maintenance, design, as build construction details, shotcrete fracture quality tests and a photo gallery of the existing condition of underground tunnels included.

From data collected and in the absence of failure maintenance data records, the general conclusion is the high mechanical shotcrete tunnels' final lining properties over time and its easy wet-mix process, regardless of the geological alternations and the presence of aquifer.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Η ιστορία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος	19
1.1 Παγκόσμια ιστορικά στοιχεία	19
1.2 Ιστορικά στοιχεία στον Ελλαδικό χώρο	22
Κεφάλαιο 2: Εφαρμογή εκτοξευόμενου και ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην τελική και προσωρινή επένδυση σηράγγων	23
2.1 Γενικές εφαρμογές σκυροδέματος	23
2.2 Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μόνιμη επένδυση σηράγγων	23
2.2.1. Γενικά στοιχεία	23
2.2.2. Εφαρμογή ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην	28
μόνιμη υποστήριξη σήραγγας	28
Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός της μόνιμης επένδυσης βράχου με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος ενισχυμένου με ίνες	35
3.1. Σχεδιασμός εκτοξευόμενου σκυροδέματος με την μέθοδο Q	36
3.2. Σχεδιασμός εκτοξευόμενου σκυροδέματος με την μέθοδο RMR	38
3.3. Σχεδιασμός εκτοξευόμενου σκυροδέματος σύμφωνα με τους Διεθνείς Κανονισμούς	39
3.4. Σχεδιασμός εκτοξευόμενου σκυροδέματος με Αναλυτικές εξισώσεις	39
Κεφάλαιο 4: Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	43
4.1 Ο μηχανισμός ενίσχυσης	43
4.2 Θεωρία σύνθετης μηχανικής	48
4.3 Θεωρία απόστασης ινών	49
4.4 Συμπεράσματα σχετικά με το σχεδιασμό και την εφαρμογή του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος στη μόνιμη επένδυση σηράγγων	51
Κεφάλαιο 5: Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος	53
5.1 Έκπλυση	54
5.2 Ενανθράκωση:	56
5.3 Διάβρωση από θειικά:	57
5.4 Ψύξη-απόψυξη:	59
5.5 Ηλεκτροχημική διάβρωση	61
5.6 Αντίδραση αλκαλικών συσσωματωμάτων	62
5.7 Συστολή ξήρανσης και ρωγμάτωση	63
5.8 Θερμοκρασία / έκθεση σε φωτιά	63
5.9 Μικροοργανισμοί	64
5.10 Παρατηρήσεις σχετικά με τους φθοροποιούς παράγοντες στο	65

εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως τελική επένδυση σηράγγων.....	65
Κεφάλαιο 6: Υδροηλεκτρικά έργα ΔΕΗ ΑΕ με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε προσωρινή και κυρίως μόνιμη επένδυση υποστήριξης υπόγειων κατασκευών.....	67
6.1 Υδροηλεκτρικά έργα από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην περιοχή του ποταμού Αχελώου.....	68
6.1.1 Υδροηλεκτρικό έργο Συκιάς.....	69
6.1.2 Έργο εκτροπής Αχελώου	73
6.1.3 Υδροηλεκτρικό έργο Κρεμαστών	75
6.1.4 Υδροηλεκτρικό έργο Στράτου	78
6.1.5 Υδροηλεκτρικό έργο Μεσοχώρας	80
6.2 Υδροηλεκτρικά έργα από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην περιοχή του ποταμού Άραχθου και Μετσοβίτικου	84
6.2.1 Υδροηλεκτρικό έργο Μετσοβίτικου.....	84
6.3 Υδροηλεκτρικά έργα από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην περιοχή του ποταμού Αώου.....	85
6.3.1 Υδροηλεκτρικό έργο πηγών Αώου.....	85
6.4 Υδροηλεκτρικά έργα από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην περιοχή του ποταμού Αλιάκμονα	90
6.4.1 Υδροηλεκτρικό έργο Ιλαρίωνα	90
6.4.2 Υδροηλεκτρικός Σταθμός Ασωμάτων	92
6.4.3 Υδροηλεκτρικό Έργο Πολυφύτου	95
6.5 Υδροηλεκτρικά έργα από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην περιοχή του ποταμού Νέστου	101
6.5.1 Υδροηλεκτρικό έργο Θησαυρού.....	101
6.5.2 Υδροηλεκτρικό έργο Πλατανόβρυσης.....	108
Κεφάλαιο 7: Τεχνικά στοιχεία και προδιαγραφές για τις σήραγγες της ΔΕΗ ΑΕ με τελική επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....	111
7.1 Εκσκαφές	111
7.2 Ελεγχόμενες ανατινάξεις.....	113
7.3 Απομάκρυνση υδάτων από τα υπόγεια έργα.....	113
7.4 Φωτισμός χώρων Υπόγειων Εκσκαφών	114
7.5 Αερισμός χώρων Υπόγειων Εκσκαφών	114
7.6 Σύστημα ένδειξης κεραυνών.....	115
7.7 Μέτρα πυρασφάλειας	115
7.8 Μέτρα ασφαλείας προσωπικού	116
7.9 Διάφορα μέτρα υποστήριξης (αγκύρια, πλαίσια, δοκοί προπορείας).....	117
7.10 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....	126

7.10.1	Κοκκομετρία αδρανών και ελάχιστη αντοχή θραύσης	126
7.10.2	Δοκιμές ποιοτικού ελέγχου εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	128
7.10.3	Εξοπλισμός εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος	130
7.10.4	Εξειδίκευση χειριστών εξοπλισμού εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος	130
7.10.5	Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε συνθήκες ψυχρού καιρού 131	
7.10.6	Προετοιμασία εφαρμογής επιφάνειας εκτοξευόμενου σκυροδέματος	131
7.10.7	Ανάμειξη και εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος	132
7.10.8	Αρμοί κατασκευής και αρμοί διακοπής εκτοξευόμενου σκυροδέματος 134	
7.10.9	Επισκευή και συντήρηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	134
7.10.10	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες (Steel Fiber Shotcrete) 134	
7.10.11	Εκτοξευόμενο ινοσκυρόδεμα.....	136
7.10.12	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε περιοχές με χαλύβδινα υποστηρίγματα 137	
7.11	Όργανα μετρήσεων μετακινήσεων και συγκλίσεων βράχου	138
7.12	Ανοχές ασφαλείας και μέτρα αντιμετώπισης πραγματοποιούμενων συγκλίσεων	138
7.13	Περιπτώσεις ράβδων αγκύρωσης που εφαρμόστηκαν σε υπόγειες εκσκαφές.....	139
7.14	Βαφή επιφανειών από σκυρόδεμα και επίχρισμα	139
7.15	Περιβαλλοντική προστασία- απόρριψη υλικών και καθαρισμός	140
Κεφάλαιο 8: Επιπλέον στοιχεία για υπόγειες κατασκευές υδροηλεκτρικών έργων από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (γεωλογία περιοχής, στοιχεία κατασκευής και εφαρμογής μελέτης, παρούσα κατάσταση).....		141
8.1	Γεωλογικοί Σχηματισμοί - στοιχεία κατασκευής και εφαρμογής Μελέτης στο ΥΗΕ Μεσοχώρας	141
8.2	Σχέδια εφαρμογής υπόγειων υποέργων με τελική επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Πολύφυτου, του ποταμού Αλιάκμονα	142
8.3	Τεχνικά στοιχεία ΥΗΕ Μετσοβίτικου και αποτελέσματα δοκιμών θραύσης άοπλου εκτοξευόμενου σκυροδέματος	149
8.4	Στοιχεία υποέργων με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Ιλαρίωνα, στην περιοχή της λεκάνης Ελάτης του ποταμού Αλιάκμονα	154
Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα		157
Αντί επίλογου.....		167
Μία αξιολογη ιστορική αναδρομή των ΥΗΕ έργων Λάδωνα και Άγρα		
Πηγές-Αναφορές:.....		188

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1: Η πρώτη μηχανή εκτοξευόμενου σκυροδέματος	19
Εικόνα 2: Μία από τις πρώτες μηχανές εκτοξευόμενου σκυροδέματος εν έτει 1914	19
Εικόνα 3:Συνεργείο έτοιμο για εργασία το 1925, μία από τις πρώτες «εκπαιδευμένες εμπειρικά» ομάδες εργασίας για την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, Yogy, 2002.....	20
Εικόνα 4: Ακροφύσιο προσαρμοσμένο στο κεφάλι του τεχνίτη κατά την κατασκευή δεξαμενής νερού το 1919, Yogy, 2000.....	21
Εικόνα 5: Χρονική εξέλιξη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος	24
Εικόνα 6: Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην προσωρινή και μόνιμη επένδυση σηράγγων	25
Εικόνα 7: Vereina- Ελβετία, σημείο διασταύρωσης.....	26
Εικόνα 8: Rivarolo-Ιταλία, εφαρμογή της υδατοστεγανής εκτοξευόμενης στρώσης	26
Εικόνα 9: Strathfield – Αυστραλία, Εφαρμοσμένο ενισχυμένο με συνθετικές ίνες εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε σήραγγα προσπέλασης.....	27
Εικόνα 10: Προτεινόμενος οπλισμός για την τελική επένδυση σήραγγας.....	29
Εικόνα 11: Εργαστηριακός έλεγχος δοκιμίου ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος	33
Εικόνα 12: Το σύστημα Q για το σχεδιασμό υποστήριξης βράχου (Grimstad et al)	37
Εικόνα 13: Παραδείγματα μορφών αστοχίας εκτοξευόμενου σκυροδέματος	40
Εικόνα 14: Προετοιμασία δοκιμίων	41
Εικόνα 15: Δοκίμιο έτοιμο για εκτέλεση δοκιμής και δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής με ακτινική ρωγμάτωση	41
Εικόνα 16: Ίνες που χρησιμοποιήθηκαν σε πειραματικές μετρήσεις και δοκιμές Από αριστερά προς τα δεξιά: Dramix 3D, Dramix 4D, BarChip 54, Minibar	42
Εικόνα 17: Εξέλιξη ρωγμάτωσης στην επένδυση σήραγγας	44
Εικόνα 18: Διάγραμμα καμπτικού φορτίου – παραμόρφωσης διαφόρων τύπων ινοπλισμένου σκυροδέματος.....	45
Εικόνα 19: Ο μηχανισμός στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα για την πρόληψη της διάδοσης ρωγμών	46
Εικόνα 20: Μηχανικό προσομοίωμα περιορισμού ρωγμάτωσης σε φαθυρό υλικό σκυροδέματος ενισχυμένου με ίνες.....	50
Εικόνα 21: Φαινόμενο έκπλυσης	55
Εικόνα 22: Φαινόμενο Πυροσυσσωμάτωσης	57
Εικόνα 23:Επίδραση θεικών στη μόνιμη επένδυση σήραγγας.....	59
Εικόνα 24: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με βλάβη από έκθεση σε κύκλους ψύξης - απόψυξης.....	61
Εικόνα 25: Δείγματα διάβρωσης χάλυβα σε οπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα..	62
Εικόνα 26: Σχηματισμός ρωγμών σε δομή υπόγειας διάβασης λόγω αντίδρασης αλκαλικών συσσωματωμάτων	63
Εικόνα 27: Επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος που έχει υποστεί εκτεταμένη πυρκαγιά	64
Εικόνα 28: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα υπό επίδραση μικροοργανισμών	65
Εικόνα 29: Γεωγραφικός εντοπισμός ΥΗΕ με σήραγγες από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στον Ελλαδικό χώρο	67
Εικόνα 30:Υδροηλεκτρικά Έργα Αχελώου	68

Εικόνα 31: Έργα Αχελώου της ΔΕΗ ΑΕ.....	68
Εικόνα 32: Φράγμα ΥΗΕ Συκιάς	69
Εικόνα 33: ΥΗΕ Άνω Αχελώου 0	70
Εικόνα 34: Είσοδος σήραγγας εκτροπής φράγματος Συκιάς.....	71
Εικόνα 35: Έξοδος σήραγγας εκτροπής φράγματος Συκιάς.....	71
Εικόνα 36: ΥΗΕ στην περιοχή της Συκιάς	72
Εικόνα 37: Έξοδος σήραγγας εκτροπής στο Πευκόφυτο	74
Εικόνα 38: Προκατασκευασμένα στοιχεία μόνιμης επένδυσης στην έξοδο της σήραγγας εκτροπής Αχελώου στη θέση Δρακότρυπα Θεσσαλίας.....	74
Εικόνα 39: Σήραγγα Πευκόφυτου	75
Εικόνα 40: Χάρτης ΥΗΕ Κρεμαστών.....	76
Εικόνα 41: Χάρτης ΥΗΕ Κρεμαστών.....	76
Εικόνα 42: Χάρτης ΥΗΕ στην περιοχή του Στράτου.....	78
Εικόνα 43: ΥΗΕ στην περιοχή του Στράτου	78
Εικόνα 44: Περιοχή Στράτου	79
Εικόνα 45: ΥΗΕ Μεσοχώρας Θεσσαλίας	80
Εικόνα 46: Είσοδος οδικής σήραγγας Πλακαριών.....	81
Εικόνα 47: Σήραγγα προσαγωγής Μεσοχώρας-Θέση Γλύστρα – Σήραγγα μεταφοράς νερού στον σταθμό παραγωγής ενέργειας.....	82
Εικόνα 48: Σήραγγα Μεσοχώρας.....	83
Εικόνα 49: Είσοδος σήραγγας ΥΗΕ Μετσοβίτικου	84
Εικόνα 50: Σήραγγα ΥΗΕ Μετσοβίτικου.....	85
Εικόνα 51: Χάρτης ΥΗΕ ποταμού Αώου	86
Εικόνα 52: Τεχνητή λίμνη Πηγών ποταμού Αώου	87
Εικόνα 53: Υπόγειος υδροηλεκτρικός σταθμός (2X110MW) και σήραγγα καλωδίων από τις γεννήτριες προς τον υποσταθμό.	88
Εικόνα 54: Σήραγγα φυγής από τον ΥΗΣ Αώου προς τον Μετσοβίτικο ποταμό.....	88
Εικόνα 55: Οδική σήραγγα προσπέλασης προς τους υδροστρόβιλους.....	88
Εικόνα 56: Βοηθητική σήραγγα στα δεξιά της κύριας χάραξης της σήραγγας προσπέλασης του ΥΗΕ Αώου	89
Εικόνα 57: Φράγμα και εκχειλιστής ΥΗΕ Ιλαρίωνα.....	90
Εικόνα 58: Έξοδοι σηράγγων εκχειλιστή ΥΗΕ Ιλαρίωνα	90
Εικόνα 59: Τομή κατά μήκος του άξονα της κουρτίνας τσιμεντενέσεων και των αντίστοιχων σηράγγων στην Λόγγα Ελάτης.....	91
Εικόνα 60: Σήραγγα εκτροπής- τσιμεντενέσεων , εκσκαφή εκχειλιστή- ΥΗΕ Ιλαρίωνα	92
Εικόνα 61: Ταμιευτήρας Αγ. Βαρβάρας και ομώνυμο φράγμα ΒΑ των Ασωμάτων..	93
Εικόνα 62: Τεχνητές λίμνες Ασωμάτων και Σφηκιάς ποταμού Αλιάκμονα	93
Εικόνα 63: Φράγμα Ασωμάτων.....	94
Εικόνα 64: Τεχνητή Λίμνη Πολύφυτου	96
Εικόνα 65: Φράγμα Πολύφυτου	96
Εικόνα 66: ΥΗΣ Πολυφύτου.....	96
Εικόνα 67: Τεχνητή Λίμνη Πολύφυτου	97
Εικόνα 68: Αναρτημένο διάγραμμα εγκαταστάσεων.....	97
Εικόνα 69: Σήραγγα πρόσβασης στον ΥΗΣ Πολύφυτου	97
Εικόνα 70: Υπόγειος θάλαμος δικλείδων διαχείρισης ύδατος εντός ΥΗΣ Πολύφυτου - είσοδος προσπέλασης θαλάμου μέσω σηράγγων	98
Εικόνα 71: Αγωγός Προσαγωγής Πολύφυτου προς ΥΗΣ Πολύφυτου	99

Εικόνα 72: Μέθοδος RBR	99
Εικόνα 73: Μέθοδος RBR	100
Εικόνα 74: Χάρτης ΥΗΕ ποταμού Νέστου	101
Εικόνα 75: Κόκκινο δάσος της δασικής πεύκης στο Αρκουδόρεμα	102
Εικόνα 76: Ταμιευτήρας φράγματος ΥΗΕ Θησαυρού.....	102
Εικόνα 77: Φράγμα ΥΗΕ Θησαυρού-είσοδος οδικής σήραγγας	103
Εικόνα 78: Φράγμα ΥΗΕ Θησαυρού.....	103
Εικόνα 79: Θυροφράγματα ΥΗΕ Θησαυρού	104
Εικόνα 80: Γενική άποψη του φράγματος ΥΗΕ Θησαυρού	104
Εικόνα 81: Φρέαρ αναπήδησης εκχειλιστή ΥΗΕ Θησαυρού σε λειτουργία.....	104
Εικόνα 82: Υπόγειος Σταθμός Παραγωγής ΥΗΕ Θησαυρού	105
Εικόνα 83: Οδική σήραγγα ΥΗΕ Θησαυρού.....	105
Εικόνα 84: Σήραγγα προσπέλασης προς τον ΥΗΣ Θησαυρού.....	106
Εικόνα 85: Μόνιμη οδός προσπέλασης του ΥΗΕ Θησαυρού- Τμήμα Γ- Κατασκευή οδικής σήραγγας/1993-1995.....	106
Εικόνα 86: Χάρτης ΥΗΕ Πλατανόβρυσης	108
Εικόνα 87: Φράγμα ΥΗΕ Πλατανόβρυσης	108
Εικόνα 88: Σιδηρόδρομος με άξονα παράλληλο του ποταμού Νέστου.....	109
Εικόνα 89: Ταμιευτήρας ΥΗΕ Πλατανόβρυσης	109
Εικόνα 90: Οδική σήραγγα πλησίον ΥΗΕ Πλατανόβρυσης	110
Εικόνα 91: Είσοδος σήραγγας πλησίον ΥΗΕ Πλατανόβρυσης.....	110
Εικόνα 92: Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης αδρανών εκτοξευόμενου σκυροδέματος τεχνικών Προδιαγραφών ΥΗΕ έργων ΔΕΗ ΑΕ	127
Εικόνα 93: Χάρτης περιοχής ΥΗΕ Πολύφυτου	143
Εικόνα 94: Σχέδιο χάραξης σηράγγων προσπέλασης ΥΗΕ Πολύφυτου της Εταιρείας Electro-Watt.....	143
Εικόνα 95: Σχέδιο χάραξης σήραγγας προσαγωγής και υπόγειων θαλάμων ΥΗΕ Πολύφυτου	144
Εικόνα 96: Σχέδιο χάραξης σήραγγας προσπέλασης ΥΗΕ Πολύφυτου και ανατολική τομή της σήραγγας προσπέλασης F-F.....	144
Εικόνα 97: Σχέδιο ανατολικής τομής F-F σήραγγας προσπέλασης ΥΗΕ Πολύφυτου	145
Εικόνα 98: Σχέδιο δυτικής τομής E - E σήραγγας προσπέλασης ΥΗΕ Πολύφυτου	146
Εικόνα 99: Σχέδια διατομών κατασκευαστικής στοάς «παραθύρου 1» ΥΗΕ Πολύφυτου, από την εκσκαφή έως τη σκυροδέτηση με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	147
Εικόνα 100: Σχέδια διατομών κατασκευαστικής στοάς «παραθύρου 3» ΥΗΕ Πολύφυτου, από την εκσκαφή έως τη σκυροδέτηση με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	148
Εικόνα 101: Σχέδιο συναρμογής κατασκευαστικών στοών με τη βασική σήραγγα προσαγωγής ΥΗΕ Πολύφυτου.....	149
Εικόνα 102: Σκαρίφημα κάτοψης τμήματος σήραγγας που παραμένει με επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος μέχρι τη σημερινή εποχή, στο ΥΗΕ Μετσοβίτικου..	149
Εικόνα 103: Σχέδιο διατομής τμήματος σήραγγας που παραμένει με επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος μέχρι τη σημερινή εποχή, στο ΥΗΕ Μετσοβίτικου..	150
Εικόνα 104: Φωτογραφίες τμήματος σήραγγας που παραμένει με επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος μέχρι τη σημερινή εποχή, στο ΥΗΕ Μετσοβίτικου..	150
Εικόνα 105: Φωτογραφία αριστερής σήραγγας προς σταθμό παραγωγής και δεξιάς σήραγγας προς την αντίστοιχη προσαγωγή.....	151
Εικόνα 106: Μεταλλική σήραγγα προσαγωγής	151

Εικόνα 107: Διάγραμμα κατανομή πλήθους υπόγειων έργων με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ανά ΥΗΕ	160
Εικόνα 108: Διάγραμμα ποσοστιαίας γεωγραφικής κατανομής ΥΗΕ με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	161
Εικόνα 109: Διάγραμμα συνολικής κατανομής ανοίγματος διατομής σε σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	164
Εικόνα 110: Τεχνητή λίμνη στην περιοχή των χωριών Άγρα, Βρύττων και Νησίου	168
Εικόνα 111: ΥΗΕ Άγρα	168
Εικόνα 112: Τεχνητή Λίμνη Άγρα	169
Εικόνα 113: Υδροβιότοπος Λίμνης Άγρα	169
Εικόνα 114: ΥΗΕ Άγρα στο Ν. Πέλλας	170
Εικόνα 115: ΥΗΣ Άγρα	170
Εικόνα 116: Σημείο υδροληψίας από την Τεχνητή Λίμνη Άγρα, σήραγγα προσαγωγής, αγωγός πτώσης μεταφοράς των υδάτων από τη σήραγγα προσαγωγής στον ΥΗΕ Σταθμό Άγρα	171
Εικόνα 117: Γεωλογικός Χάρτης περιοχής ΥΗΕ Άγρα	172
Εικόνα 118: Σκαρίφημα ΥΗΕ Άγρα	173
Εικόνα 119: Σκαρίφημα κάτοψης και τομής υπερχειλιστή ΥΗΕ Άγρα	173
Εικόνα 120: Τυπική διατομή σήραγγας ελεύθερης ροής Οστρόβου-Νησίων ΥΗΕ Άγρα	174
Εικόνα 121: Τυπική διατομή σήραγγας υπό πίεση ΥΗΕ Άγρα	174
Εικόνα 122: Σύσταση κονιαμάτων ΥΗΕ Άγρα	175
Εικόνα 123: Παρασκευή ενέματος στην στοά 2 ΥΗΕ Άγρα	175
Εικόνα 124: Ερευνητικές γεωτρήσεις επί του πλησιέστερου της λίμνης υπερκείμενου εδάφους της σήραγγας στο εργοτάξιο Αρνίσσης του ΥΗΕ Άγρα	176
Εικόνα 125: Χάρτης Πελοποννήσου	177
Εικόνα 126: Χάρτης Λίμνης Λάδωνα	177
Εικόνα 127: Πηγές ποταμού Λάδωνα, κατασκευές και αναψυχή κατά μήκος του ποταμού Λάδωνα	178
Εικόνα 128: Πηγές ποταμού Λάδωνα, κατασκευές και αναψυχή κατά μήκος του ποταμού Λάδωνα	178
Εικόνα 129: Τεχνητή Λίμνη Λάδωνα	179
Εικόνα 130: Φράγμα βαρύτητας ΥΗΕ Λάδωνα	179
Εικόνα 131: ΥΗΕ Λάδωνα	180
Εικόνα 132: Γενικό πλάνο του ΥΗΕ Λάδωνα	180
Εικόνα 133: Γενικό πλάνο φράγματος Λάδωνα	181
Εικόνα 134: Είσοδος στοάς προσπέλασης - σκαρίφημα υποστηρίξεως λόγω γεωλογικών σχηματισμών μειωμένων ανοχών, τμήμα κύριας σήραγγας προσαγωγής με φρέαρ πρόσβασης και εξαερισμού	181
Εικόνα 135: Υπόγειοι θάλαμοι ΥΗΕ Λάδωνα	182
Εικόνα 136: Ερευνητικές υπόγειες στοές ΥΗΕ Λάδωνα	182
Εικόνα 137: Ερευνητικές υπόγειες στοές, διάφραγμα στεγανοποίησης φράγματος και διάφραγμα στεγανοποίησης περιμετρικά των σηράγγων ΥΗΕ Λάδωνα	183
Εικόνα 138: Εφαρμογή επένδυσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά θέσεις στο χρονικό διάστημα 1951-1955 κατά την κατασκευή του ΥΗΕ Λάδωνα	183
Εικόνα 139: Εφαρμογή επένδυσης τσιμεντενέσεων επαφής στο διάστημα 1951-1955 κατά την κατασκευή του ΥΗΕ Λάδωνα	184

Εικόνα 140: Επισκέψιμη στοά προσπέλασης σήραγγας προσαγωγής ΥΗΕ Λάδωνα	184
Εικόνα 141: Εσωτερικό σήραγγας προσαγωγής ΥΗΕ Λάδωνα πριν και μετά τις εργασίες καθαρισμού στο εσωτερικό της, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν το έτος 2010	185
Εικόνα 143: Σκαρίφημα κάτοψης φράγματος ΥΗΕ Λάδωνα	186
Εικόνα 144: Σκαρίφημα κατακόρυφης τομής φράγματος ΥΗΕ Λάδωνα	186
Εικόνα 145: Σκαριφήματα δεξαμενής υπερχείλισης ΥΗΕ Λάδωνα	187

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1: Παραδείγματα σηράγγων στην κατασκευή των οποίων έχει χρησιμοποιηθεί εκτοξευόμενο (ινοπλισμένο ή μη) σκυρόδεμα	26
Πίνακας 2: Συγκριτικός πίνακας ξηρής και υγρής μεθόδου ανάμειξης και παρασκευής εκτοξευόμενου σκυροδέματος	28
Πίνακας 3: Πίνακας βασικών στοιχείων Μεθόδου RMR	38
Πίνακας 4: Σύσταση τεσσάρων τύπων ινοπλισμένου σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν σε εργαστηριακές δοκιμές	45
Πίνακας 5: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Συκιάς.....	73
Πίνακας 6: Σήραγγα προσπέλασης ενδιάμεσου μετώπου, με επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως παραμένουσα συν τω χρόνω υποστήριξη, στη σήραγγα εκτροπής Αχελώου	75
Πίνακας 7: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Κρεμαστών.....	77
Πίνακας 8: Σήραγγα με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Στράτου	79
Πίνακας 9: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Μεσοχώρας.....	81
Πίνακας 10: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Μεσοχώρας.....	82
Πίνακας 11: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Μεσοχώρας.....	83
Πίνακας 12: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Μετσοβίτικου	85
Πίνακας 13: Σήραγγα με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ πηγών Αώου ποταμού.....	89
Πίνακας 14: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ πηγών Αώου ποταμού.....	89
Πίνακας 15: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Ιλαρίωνα.....	92
Πίνακας 16: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Ασωμάτων.....	95
Πίνακας 17: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Ασωμάτων.....	95
Πίνακας 18: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Πολύφυτου	101
Πίνακας 19: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Θησαυρού	107
Πίνακας 20: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Θησαυρού	107
Πίνακας 21: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Θησαυρού	107
Πίνακας 22: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Πλατανόβρυσης.....	110
Πίνακας 23: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών εκτοξευόμενου σκυροδέματος... ..	126

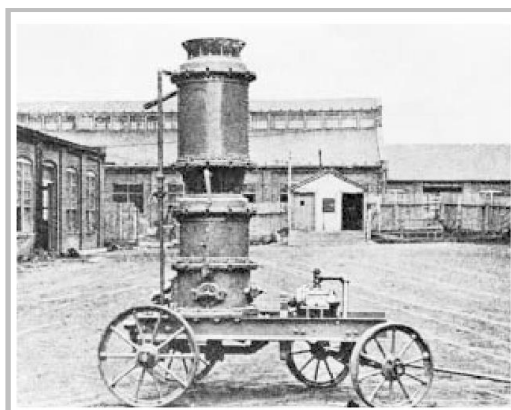
Πίνακας 24: Διερχόμενο % μάζας αδρανών με βάση την κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών των Τεχνικών Προδιαγραφών	126
Πίνακας 25: Ελάχιστη αντοχή θραύσης ανά κατηγορία εκτοξευόμενου σκυροδέματος (MPa) για το σύνολο των ΥΗΕ έργων	127
Πίνακας 26: Ελάχιστη αντοχή θραύσης ανά κατηγορία εκτοξευόμενου σκυροδέματος (MPa), για τα ΥΗΕ Μετσοβίτικου και Ιλαρίωνα	128
Πίνακας 27: Δοκιμές ποιοτικού ελέγχου ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος	130
Πίνακας 28: Τεχνικές προδιαγραφές ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά ASTM C-78 και ASTM C-1018 - 89	135
Πίνακας 29: Σήραγγες με επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συν τω χρόνω στο ΥΗΕ Μεσοχώρας	142
Πίνακας 30: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Πολύφυτου	142
Πίνακας 31: Αποτελέσματα αντοχής σε θραύση άοπλου εκτοξευμένου σκυροδέματος από το εφαρμοσμένο υλικό στο Φράγμα του ΥΗΕ Μετσοβίτικου	153
Πίνακας 32: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Ιλαρίωνα	154
Πίνακας 33: Κατανομή πλήθους υπόγειων έργων με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ανά ΥΗΕ	160
Πίνακας 34: Ποσοστιαία γεωγραφική κατανομή ΥΗΕ με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....	160
Πίνακας 35: Κατανομή γεωλογικών σχηματισμών μέσω των οποίων διανοίχθηκαν οι σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....	161
Πίνακας 36: Κατανομή ανοίγματος διατομής σε σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....	163
Πίνακας 37: Συνολική κατανομή ανοίγματος διατομής σε σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....	163
Πίνακας 38: Σήραγγες ΥΗΕ Άγρα	172
Πίνακας 39: Σήραγγα προσαγωγής ΥΗΕ Λάδωνα	185

Κεφάλαιο 1: Η ιστορία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος

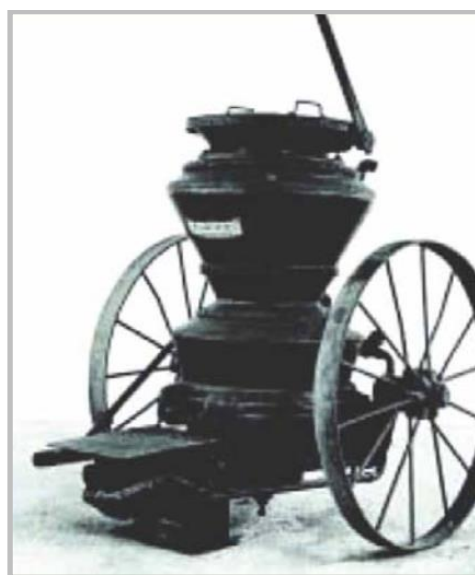
1.1 Παγκόσμια ιστορικά στοιχεία

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αποτέλεσε και αποτελεί υλικό σκυροδέτησης για έργα επεμβάσεων, ενισχύσεων και κατασκευής προσωρινής και μόνιμης επένδυσης σε υπόγεια έργα, όπως σήραγγες, φρέατα, στοές προσπέλασης, υδροηλεκτρικούς σταθμούς, κα.

Η πρώτη μηχανή εκτοξευόμενου σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε από τον Carl Akeley εν έτη 1907, για την επανεπένδυση του Μουσείου Πεδίου ή Μουσείο Φυσικής Ιστορίας στο Σικάγο του Ιλινόις. Παρουσιάστηκε το 1910 στην έκθεση τσιμέντου στη Νέα Υόρκη. Αποτέλεσε την πρώτη μηχανή ξηράς ανάμειξης. Ο δημιουργός της την ονόμασε “plaster gun”, αλλά παρά τις προσδοκίες του η μηχανή σταμάτησε να λειτουργεί λόγω συσσώρευσης υλικού στους σωλήνες διοχέτευσης του υλικού μετά την πρώτη ώρα λειτουργίας της... Παρόλα αυτά, είχε ήδη ξεκινήσει να γράφεται η ιστορία της τεχνολογίας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος..



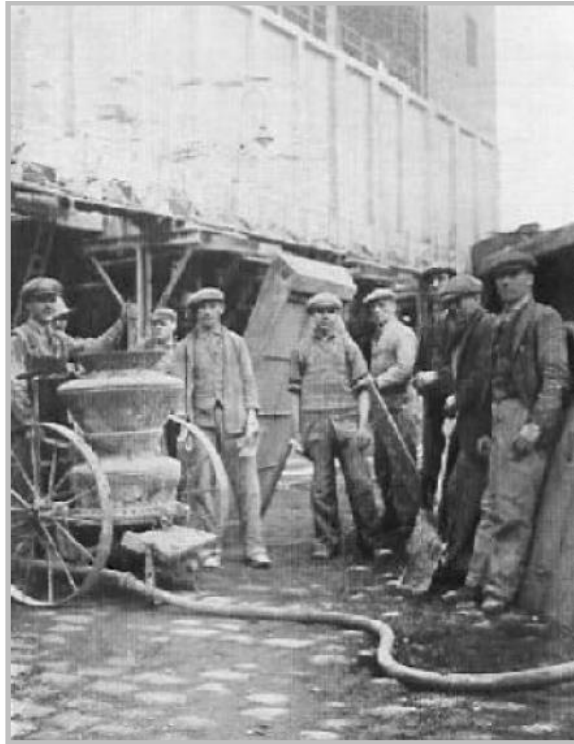
Εικόνα 1: Η πρώτη μηχανή εκτοξευόμενου σκυροδέματος (J.J.Shiderel, Portland Cement Association, Skokie IL)



Εικόνα 2: Μία από τις πρώτες μηχανές εκτοξευόμενου σκυροδέματος εν έτει 1914 (Teichert P. (2003), Dry-mix guns, Shotcrete Magazine, Winter 2003)

Ο επόμενος «κηδεμόνας» της μηχανής “plaster gun” υπήρξε μία κατασκευαστική Εταιρεία στο Allentown, που την μετονόμασε σε “Cement Gun” και η ίδια παρέμεινε στον κατασκευαστικό κλάδο με το όνομα “Cement Gun Company”. Το υλικό που δημιουργεί και προωθεί στην αγορά των κατασκευών έχει πλέον το όνομα “gunite”! Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με την πρώτη του μορφή έδωσε το έναυσμα στην Εταιρεία να αναπτυχθεί ραγδαία με έργα επισκευών και κατασκευές σηράγγων στη Β. Αμερική.

Στην παρακάτω φωτογραφία παρουσιάζεται συνεργείο έτοιμο για εργασία στην εποχή του 1925, που αποτέλεσε και μία από τις πρώτες «εκπαιδευμένες εμπειρικά» ομάδες εργασίας για την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε κατασκευές.



Εικόνα 3:Συνεργείο έτοιμο για εργασία το 1925, μία από τις πρώτες «εκπαιδευμένες εμπειρικά» ομάδες εργασίας για την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, Yogy, 2002 («Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών», Στέφανος Η. Δρίτσος)

Χαρακτηριστικό των πρώιμων βημάτων στην εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ήταν η εκτόξευσή του με το ακροφύσιο προσαρμοσμένο στο κεφάλι του τεχνίτη.



Εικόνα 4: Ακροφύσιο προσαρμοσμένο στο κεφάλι του τεχνίτη κατά την κατασκευή δεξαμενής νερού το 1919, Yoggy, 2000
(«Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών», Στέφανος Η. Δρίτσος)

Τα επόμενα χρόνια και κυρίως μετά το 1925, η τεχνική εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος επεκτάθηκε στην Ευρώπη και στον υπόλοιπο κόσμο με τετραψήφιο αριθμό μηχανών εφαρμογής και τριψήφιο αριθμό χωρών που είχαν να αναδείξουν έργα από εκτοξευόμενο σκυροδέμα. Στην Ελβετία η μηχανή του Carl Akeley αντικαθίσταται με αντίστοιχη που χρησιμοποιεί την τεχνολογία του Αρχιμήδειου κοχλία επιτυγχάνοντας έτσι πιο εύκολη και γρήγορη χρήση σε σχέση με τον προϋπάρχοντα τύπο, φτάνοντας την παραγωγή στα 3 m³ την ώρα (George Senn).

Στο σημείο αυτό πλέον το αρχικά εφαρμοζόμενο ξηρό μίγμα από άμμο και τσιμέντο αντικαθίσταται από ένα νέο προϊόν που μπορεί να είναι κονίαμα ή σκυρόδεμα και υιοθετείται πλέον το 1951 από το ACI (American Concrete Institute) με το όνομα "Shotcrete".

Σήμερα, ο όρος "shotcrete" εξακολουθεί να αντιστοιχίζεται στην έννοια που υιοθετήθηκε το 1951 "ως «...το σκυρόδεμα ή το κονίαμα που εκτοξεύεται με μεγάλη ταχύτητα σε μία επιφάνεια...»(ACI com.506, 1990), ανεξάρτητα από τη μέθοδο παραγωγής του" («Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών», Στέφανος Η. Δρίτσος)

Τα επόμενα χρόνια, η μηχανή εκτοξευόμενου σκυροδέματος εξελίχθηκε σε μηχανή περιστρεφόμενου κάδου (Meynadier & Cie AG, Ζυρίχη), η χρήση των αδρανών περιορίστηκε σε μέγιστο μέγεθος κόκκων 20 mm και η παραγωγή της ξεπέρασε τα 10 m³/h. Το κόστος της κυμάνθηκε από 10.000 έως 20.000 €.

Τις τελευταίες δεκαετίες, υπήρξε ιδιαίτερη πρόοδος ως προς τις ιδιότητες του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με τη χρήση επιπλέον πρόσμικτων και βελτιωτικών (ρρευτοποιητές με σκοπό την αύξηση εργασιμότητας και αντλησιμότητας, επιταχυντές για την αύξηση της πρώιμης αντοχής και μείωση της αναπήδησης και άλλα πρόσμικτα για τη βελτίωση της πρόσφυσης και την αναστολή της ενυδάτωσης). Η δε χρήση πρόσμικτων στη σύσταση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οδήγησε και στην εφαρμογή της μεθόδου υγρής ανάμειξης, όπου το νερό προστίθεται πλέον στο μείγμα και όχι στο ακροφύσιο εκτόξευσης του υλικού. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως στα υπόγεια έργα, λόγω του ότι η σκόνη που διαφεύγει στον περιβάλλοντα χώρο είναι σημαντικά μειωμένη συγκριτικά με τις αντίστοιχες διαφυγές στη μέθοδο ξηράς ανάμειξης, στοιχείο ιδιαίτερα χρήσιμο σε κλειστούς υπόγειους χώρους όπως για παράδειγμα στο εσωτερικό των σηράγγων. Η μέθοδος υγρής ανάμειξης τείνει να περιορίσει και ανταγωνίζεται επάξια την προγενέστερη μέθοδο της ξηρής ανάμειξης ακόμη και σε επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών.

Μία ακόμη ιδιαίτερα σημαντική εξέλιξη στην τεχνολογία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αποτέλεσε, από το 1960 και μετά, η παραγωγή του ινοπλισμένου

εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Μελετήθηκε και εφαρμόστηκε η προσθήκη ινών από χάλυβα, πολυπροπυλένιο, γυαλί, άνθρακα, αραμίδιο, πολυεστέρα, νάιλον, και φυσικά υλικά όπως το ξύλο (Kapellorouλος 2001), με σκοπό τη βελτίωση της αντοχής του υλικού σε κάμψη και τον περιορισμό της ενδεχόμενης ρωγμάτωσης.

1.2 Ιστορικά στοιχεία στον Ελλαδικό χώρο

Στον Ελλαδικό χώρο, με την έντονη παρουσία των ασβεστολιθικών πετρωμάτων στο μεγαλύτερο τμήμα των επιφανειακών και υπόγειων γεωλογικών σχηματισμών, εξασφαλίζεται μεγάλο μέρος της πρώτης ύλης για την παραγωγή τσιμέντου και αδρανών. Παράλληλα η έντονη σεισμική δραστηριότητα και η πληθώρα έντονης γεωλογικής και τεκτονικής δραστηριότητας που λαμβάνει χώρα αυξάνει τις απαιτήσεις για την εξέλιξη των μεθόδων και υλικών ενίσχυσης κατασκευών, για τη μελέτη της συμπεριφοράς του σκυροδέματος συν τω χρόνω και για την ανάπτυξη τεχνολογιών σκυροδέματος με αυξημένες αντοχές σε μηχανική καταπόνηση.

Αναφορές για χρήση του τσιμέντου με διάφορες μορφές μειγμάτων υπήρξαν από την Αρχαία Ελλάδα όπου και χρησιμοποιούνταν κυρίως μείγματα ασβέστη. Από τον 1ο αιώνα μ.Χ. οι Ρωμαίοι βελτίωσαν αυτό το μείγμα προσθέτοντας ηφαιστειογενές υλικό από την περιοχή Pozzuoli, κοντά στη Νάπολη και παρατηρώντας την πήξη του σε συνδυασμό με το νερό.

Τα επόμενα χρόνια και ο Ελλαδικός κατασκευαστικός κλάδος ενσωμάτωσε τις καινοτόμες αλλαγές που επήλθαν από την Ευρώπη και συγκεκριμένα από την Αγγλία. Από τα μέσα του 1700 μ.Χ. χρησιμοποιήθηκε το πρώτο σύγχρονο σκυρόδεμα από βότσαλα και αλεσμένα τούβλα με υδραυλική κονία και από το 1824 το Portland τσιμέντο που χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα. Τον 20ο αιώνα η αντικατάσταση της αργίλου με καολίνη έφερε την παραγωγή λευκού τσιμέντου και το 1908 η χρήση μίγματος ασβεστόλιθου και βωξίτη πρόσφερε στον κατασκευαστικό κλάδο τσιμέντο αντοχής σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες και υψηλές θερμοκρασίες.

Η προσπάθεια δημιουργίας προτύπων και χρήσης κανόνων και μεθόδων εφαρμογής οδήγησε στη Σύνταξη του Κανονισμού Τεχνολογίας σκυροδέματος με την πρώτη έκδοση το 1985, αναθεωρήσεις και νεότερη έκδοση αυτή του 2016. Παράλληλα, η προσαρμογή του Κανονισμού στα Ευρωπαϊκά Πρότυπα επέφερε αλλαγές, βελτιώσεις και προσθήκες, όπως για παράδειγμα την εισαγωγή των κατηγοριών καθίζησης στον ΚΤΣ-97 το 2002.

Κεφάλαιο 2: Εφαρμογή εκτοξευόμενου και ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην τελική και προσωρινή επένδυση σηράγγων

2.1 Γενικές εφαρμογές σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα είναι κονίαμα που ως συνδετικό του χρησιμοποιείται το τσιμέντο.

Οι μορφές που χρησιμοποιείται το σκυρόδεμα στην κατασκευή είναι οι παρακάτω:

- Ωπλισμένο σκυρόδεμα
- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Shotcrete)
- Εμφανές σκυρόδεμα (Face face concrete)
- Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα - (Self Compacting Concrete - SCC)
- Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα
- Σκυρόδεμα πλήρωσης Ορυγμάτων – Τάφρων (CLSM): (Controlled Low Strength Material)
- Σκυρόδεμα ταχείας πήξης
- Σκυρόδεμα Υψηλών Αντοχών
- Έγχρωμα Σκυροδέματα, κ.α.

Οι ανάγκες του έργου κάθε φορά καθορίζει τις απαιτήσεις του υλικού επομένως και τη μορφή του σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθεί.

2.2 Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μόνιμη επένδυση σηράγγων

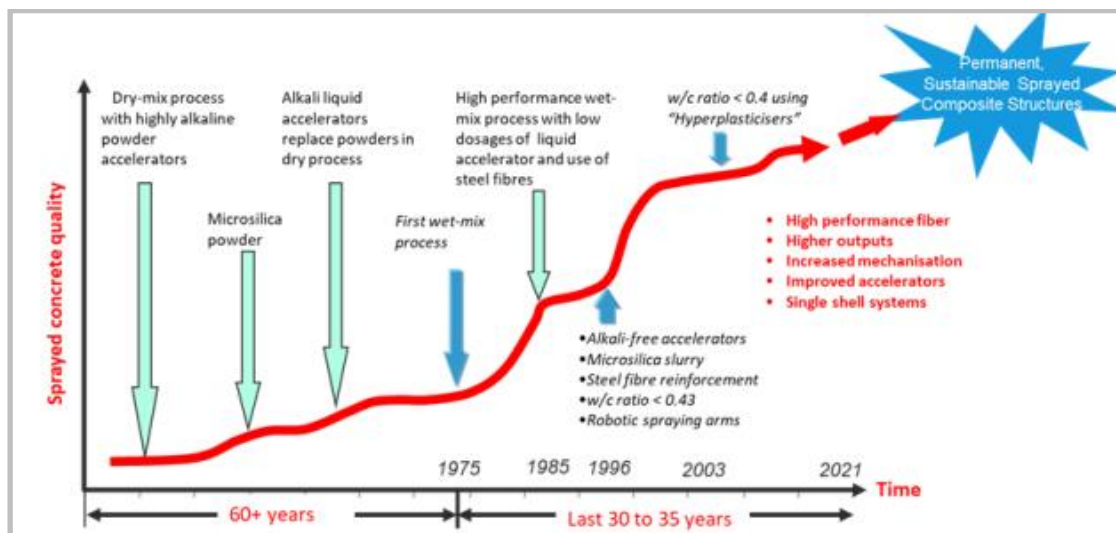
2.2.1. Γενικά στοιχεία

Στην παρούσα εργασία θα εξεταστεί η σύσταση, η παραγωγή, η εφαρμογή και γενικότερα η χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στα υπόγεια έργα στην προσωρινή (ελλείπει μόνιμης τελικής επένδυσης) και κυρίως στη μόνιμη επένδυση σηράγγων. Ως μόνιμη επένδυση προτιμάται σε μικρού μήκους ή ακανόνιστου σχήματος σήραγγες με πολλές διασταυρώσεις, οι οποίες συναντώνται σε αστικές σήραγγες υπόγειων σιδηροδρόμων, όπως για παράδειγμα στο έργο Crossrail του Λονδίνου, όπου διανοίχτηκε και κατασκευάστηκε σε μαλακά εδάφη. Σε συνδυασμό με την τοποθέτηση εκτοξευόμενων υδατοστεγανών μεμβρανών, η μόνιμη επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος δίνει τη δυνατότητα της διεύρυνσης εφαρμογής του ως προς το μέγεθος και το σχήμα των σηράγγων, δίνοντας τη δυνατότητα για ακόμη περισσότερες κατασκευαστικές δυνατότητες ακόμα και σε σχέση με την συμβατική μέθοδο μόνιμης επένδυσης σηράγγων.

Γενικά, χρησιμοποιείται όπου η πρόσβαση είναι δύσκολη για να ολοκληρωθεί η σκυροδέτηση ή και σε κατασκευές που απαιτείται γρήγορη εφαρμογή και σύντομοι χρόνοι ολοκλήρωσης εργασιών. Η υποστήριξη των γεωλογικών σχηματισμών στην εξόρυξη και στη διάνοιξη σηράγγων είναι ίσως η πιο σημαντική εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Επίσης χρησιμοποιείται σε επισκευές, σταθεροποίηση εδάφους, πισίνες, θόλους και ακόμη και στη δόμηση οικιών. Στην περίπτωση σηράγγων, που έχουν διανοιχθεί σε μη ομοιόμορφους γεωλογικούς σχηματισμούς, μαλακό βράχο ή εδάφη, έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως προσωρινή υποστήριξη. Στη διάνοιξη σηράγγων σε σκληρό βράχο, ωστόσο, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συχνά χρησιμοποιείται και ως μόνιμη επένδυση.

Για περισσότερο από 35 χρόνια η χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος θεωρείται κατά περίπτωση ιδανική και προτιμάται έναντι της χρήσης άλλων μορφών σκυροδέματος. Σε αυτό συνέβαλε κατά κύριο λόγο η βελτίωση των μεθόδων

εφαρμογής του και των τεχνικών χαρακτηριστικών του συν τω χρόνω όπως καταγράφεται και μέσα από την παραπάνω ιστορική αναδρομή. Πιο συγκεκριμένα ο κατασκευαστικός κλάδος προχώρησε σε μηχανοποιημένες μεθόδους σκυροδέτησης, χρησιμοποιήθηκαν βελτιωμένες συνθέσεις, πρόσμικτα, ενισχυμένες χαλύβδινες ίνες, εκτοξευόμενες στεγανοποιητικές μεμβράνες (SAWM), εκπαίδευση των τεχνιτών και όλων των σχετιζόμενων με την εφαρμογή του εργαζομένων, κ.α.



Εικόνα 5: Χρονική εξέλιξη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος

(«Use of Steel Fiber Reinforced Sprayed Concrete in the Final Lining of Conventionally Excavated Tunnels», William "Bill" Geers, P.E. Bekaert Corporation, Marietta, GA, USA Benoit De Rivaz Bekaert Corporation)

Όσον αφορά την διάνοιξη και κατασκευή σηράγγων, ανάλογα με το είδος και τα χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών που συναντά το εκάστοτε έργο, τη γεωμετρία του, τη θέση και την ποσότητα των υπόγειων υδάτων στην περιοχή επιλέγεται και η κατάλληλη μέθοδος διάνοιξης, τα στάδια εκσκαφής και τα χαρακτηριστικά της υποστήριξης.

Η χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως υποστήριξη σηράγγων έχει αναπτυχθεί παράλληλα με την τεχνολογία διάνοιξης σηράγγων. Συγκεκριμένα, η «Νέα Αυστριακή μέθοδος διάνοιξης σηράγγων (NATM), που αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1960, επέτρεψε, διατηρώντας την αντοχή του βράχου που περιβάλλει τη σήραγγα, στα φορτία της σήραγγας να παραλαμβάνονται τόσο από το βράχο (ενεργοποίηση αντοχής περιβάλλουσας βραχώμαζας) όσο και από την ίδια τη σήραγγα (υποστήριξη). Περίπου την ίδια εποχή, η ανάπτυξη της μηχανικής διάνοιξης σήραγγας (Tunnel Boring Machine - TBM) επιτάχυνε την πρόοδο αυτών των έργων, χρησιμοποιώντας το υλικό του σκυροδέματος. Ωστόσο, η ιδιαίτερη γεωμετρία, η γεωλογική ανομοιογένεια, ο διαφορετικός ανά σημείο βαθμός κερματισμού (π.χ. κατακερματισμένος βράχος και με παρουσία υπόγειων υδάτων) των γεωλογικών σχηματισμών δημιούργησαν την ανάγκη για τη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην υποστήριξη σηράγγων. Από τη δεκαετία του 1980, το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόζεται πιο συχνά ως μόνιμη επένδυση σε σήραγγες που διανοίγονται σε σκληρό βράχο. Παράλληλα προτάθηκαν η μέθοδος Q (Barton et al., 1974) και RMR (Bieniawski, 1976). Εκείνη την εποχή εφαρμόζεται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως προσωρινή επένδυση μέχρι η μόνιμη να παραλάβει το σύνολο των φορτίων του περιβάλλοντα βράχου.

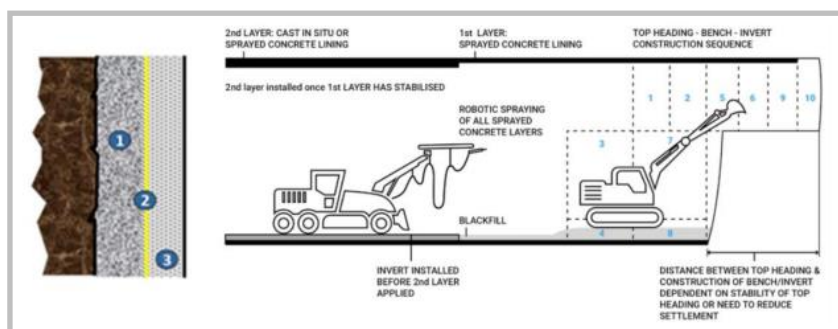
Μέχρι πριν κάποια χρόνια, στο σχεδιασμό της μόνιμης υποστήριξης των σηράγγων δεν λαμβανόταν υπόψη η συμβολή της προσωρινής επένδυσης από απλό ή με πλέγμα-οπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η αντιμετώπιση αυτή δημιουργήθηκε κυρίως από τον ελλιπή εγκιβωτισμό του πλέγματος από το υλικό του σκυροδέματος με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κενά μεταξύ της προσωρινής επένδυσης και του πετρώματος, καθώς και προβλήματα ελλιπούς αντιδιαβρωτικής προστασίας του

πλέγματος. Επιπλέον, δεν είχαν πραγματοποιηθεί συν τω χρόνω ιδιαίτεροι ποσοτικοί υπολογισμοί προσδιορισμού της συνεισφοράς της προσωρινής υποστήριξης στην μακροπρόθεσμα διαμορφωμένη μόνιμη υποστήριξη της κατασκευής σηράγγων.

Μοναδική αναφορά για αυτό αποτέλεσε το σύστημα Q για την ταξινόμηση της βραχώμαζας που αναπτύχθηκε στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI) το 1974 από περίπου 200 περιπτώσεις σηράγγων κυρίως στις Σκανδιναβικές χώρες (Barton et al., 1974). Η εξέλιξη αυτής της επιστημονικής προσπάθειας ολοκληρώθηκε το 1993 όπου και το σύστημα ταξινόμησης ενημερώθηκε περιλαμβάνοντας περισσότερες από 1000 σήραγγες (Grimstad και Barton, 1993).

Αυτά τα εμπειρικά συμπεράσματα επέτρεψαν να αντικατασταθεί ο χαλύβδινος οπλισμός από σύστημα υποστήριξης με ξυλεία ή ενισχυμένο έγχυτο σκυρόδεμα, με τη χρήση αγκυρών βράχου ή ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Από τα παραπάνω γίνεται εύκολα κατανοητό ότι το εν λόγω σύστημα ταξινόμησης έδωσε τη δυνατότητα για εμπειρικό σχεδιασμό και μακροπρόθεσμα παραμελήθηκε.

Οι προαναφερόμενες όμως εξελίξεις στην τεχνολογία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, κυρίως τα τελευταία 15 χρόνια, κατέστησαν δυνατή την κατασκευή της τελικής επένδυσης σηράγγων επίσης από υψηλής αντοχής οπλισμένο με ίνες χάλυβα εκτοξευόμενο σκυροδέμα, με συνολικά διπλή επένδυση από το ίδιο υλικό, αντικαθιστώντας το στρώμα του έγχυτου σκυροδέματος που εφαρμοζόταν επί της προσωρινής επένδυσης από εκτοξευόμενο.



- 1: προσωρινή επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- 2: στεγανοποιητική μεμβράνη
- 3: μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυροδέμα, που αντικατέστησε το έγχυτο

Εικόνα 6: Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην προσωρινή και μόνιμη επένδυση σηράγγων (Πηγή: «Use of Steel Fiber Reinforced Sprayed Concrete in the Final Lining of Conventionally Excavated Tunnels», William "Bill" Geers, P.E. Bekaert Corporation, Marietta, GA, USA Benoit De Rivaz Bekaert Corporation)

Η νεότερη αυτή μέθοδος εφαρμογής της τελικής επένδυσης οδήγησε σε οικονομικότερη κατασκευή της μόνιμης υποστήριξης σηράγγων, ανθεκτική, στεγανή και με τελική επιφάνεια που ομοιάζει με αυτές του έγχυτου σκυροδέματος. Ήδη το 2001 η ομάδα εργασίας 12 της ITA-AITES δημοσίευσε περίπου 150 περιπτώσεις έργων σε 11 χώρες που χρησιμοποιήθηκε το εκτοξευόμενο σκυροδέμα ως μόνιμη επένδυση. Επίσης η ίδια ομάδα εργασίας συγκέντρωσε παρόμοιες πληροφορίες μέχρι και το έτος 2015, όπως παρατίθενται παρακάτω:

ΕΡΓΟ	ΧΩΡΑ	ΕΙΔΟΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ	ΕΤΟΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ ΕΡΓΟΥ	ΧΡΗΣΗ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ
VEREINA	ΕΛΒΕΤΙΑ	ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗ	1999	ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ	ΒΡΑΧΟΣ
HINDHEAD	ΗΝΩΜΕΝΟ ΒΑΣΙΛΕΙΟ	ΟΔΙΚΗ	2009	ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ	ΕΔΑΦΟΣ
GEVINGAS	ΝΟΡΒΗΓΙΑ	ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗ	2011	ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ	ΒΡΑΧΟΣ
ELIZABETH LINE	ΗΝΩΜΕΝΟ ΒΑΣΙΛΕΙΟ	ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗ	2015	ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ	ΕΔΑΦΟΣ
RIVALORO	ΙΤΑΛΙΑ	ΟΔΙΚΗ	2015	ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ	ΒΡΑΧΟΣ
STRATHFIELD	ΑΥΣΤΡΑΛΙΑ	ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗ	2015	ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ	ΒΡΑΧΟΣ
SEYMOUR CAPILANO	ΒΟΡΙΑ ΑΜΕΡΙΚΗ	ΠΡΟΣΔΙΩΓΗΣ	2015	ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ	ΒΡΑΧΟΣ
SERRA DO CAFEZAL	ΒΡΑΖΙΛΙΑ	ΟΔΙΚΗ	2017	ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ	ΒΡΑΧΟΣ/ΕΔΑΦΟΣ
CHUQUICAMATA	ΧΙΛΗ	ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗ	2018	ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ	ΒΡΑΧΟΣ
KINGSGROVE RAMPS	ΑΥΣΤΡΑΛΙΑ	ΟΔΙΚΗ	2020	ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ	ΒΡΑΧΟΣ

Πίνακας 1: Παραδείγματα σηράγγων στην κατασκευή των οποίων έχει χρησιμοποιηθεί εκτοξευόμενο (ινοπλισμένο ή μη) σκυρόδεμα



Εικόνα 7: Vereina- Ελβετία, σημείο διασταύρωσης ("Permanent Sprayed Concrete Linings", ITA Working Group 12 and ITAtech. - Longrine-Avignon, France: International Tunneling and Underground Space Association, 2020)



Εικόνα 8: Rivarolo-Ιταλία, εφαρμογή της υδατοστεγανής εκτοξευόμενης στρώσης ("Permanent Sprayed Concrete Linings", ITA Working Group 12 and ITAtech. - Longrine-Avignon, France: International Tunneling and Underground Space Association, 2020)



Εικόνα 9: Strathfield – Αυστραλία, Εφαρμοσμένο ενισχυμένο με συνθετικές ίνες εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε σήραγγα προσπέλασης (“Permanent Sprayed Concrete Linings”, ITA Working Group 12 and ITAtech. - Longrine-Avignon, France: International Tunneling and Underground Space Association, 2020)

Κατά κύριο λόγο η μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόστηκε σε οδικές και μεταλλευτικές σήραγγες σε ποσοστό έργων κατά 30%, ενώ σε σήραγγες μετρό χρησιμοποιήθηκε μόλις σε ποσοστό 5%. (ITA-AITES, συλλογή δεδομένων)
Γεωγραφικά, κατανέμονται σε ποσοστό περίπου 50% στις Ευρωπαϊκές χώρες, ενώ το αμέσως μεγαλύτερο ποσοστό 25% καταλαμβάνουν η Αυστραλία μαζί με τη Ν. Ζηλανδία. Ακολουθούν οι Ασιατικές χώρες σε ποσοστό 20%. (ITA-AITES, συλλογή δεδομένων)

Σύμφωνα και με στοιχεία που παρατίθενται από τη Διεθνή ένωση Σηράγγων και Υπόγειων Έργων (ITA WG12 & ITAtech, 2020), η χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μόνιμη επένδυση σηράγγων μειώνει το κόστος και το αποτύπωμα άνθρακα σε σχέση με τους παραδοσιακούς τρόπους επένδυσης και ταυτόχρονα αυξάνει τη βιωσιμότητα των υπόγειων χώρων που κατασκευάζονται.

Μέχρι σήμερα η μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει χρησιμοποιηθεί σε ποικίλα είδη γεωλογικών σχηματισμών, ενώ μέχρι το 2017 περισσότερα από 1500 χιλιόμετρα είχαν επενδυθεί με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε έργα που κατασκευάστηκαν, κυρίως στην Ευρώπη και στην Αυστραλία. Στα υπόλοιπα μέρη, τα ανόμοια εφαρμοζόμενα πρότυπα ή οι κατά περιοχή διαφορετικές κατασκευαστικές πρακτικές παρά τα όμοια πρότυπα δεν επέτρεπαν την ευρεία διάδοση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μόνιμη επένδυση.

Μέχρι και το 2020, σύμφωνα με την Διεθνή Ένωση Σηράγγων (ITA), ευρύτερη εφαρμογή από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως τελική επένδυση γνωρίζει το έγχυτο σκυρόδεμα ως δευτερεύουσα μόνιμη επένδυση, αλλά και τα προκατασκευασμένα στοιχεία στη μηχανική διάνοιξη σηράγγων (TBM).

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως μόνιμη επένδυση έχει παρόμοια σύσταση με το κοινό σκυρόδεμα με τη διαφορά ότι περιέχει επιπλέον επιταχυντές για πιο άμεση ολοκλήρωση της ενυδάτωσης και ότι εξ ορισμού εφαρμόζεται με εκτόξευση του υλικού επάνω στην επιφάνεια εφαρμογής του. Είναι ακριβώς το ίδιο υλικό με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προσωρινής επένδυσης με την επιπλέον απαίτηση ο χρόνος ζωής του να συμπίπτει με το χρόνο ζωής του έργου της σήραγγας που εφαρμόζεται. Επίσης, περιέχει μεγαλύτερη ποσότητα τσιμέντου από το έγχυτο σκυρόδεμα και μικρότερου μεγέθους αδρανή. Όλα τα παραπάνω αποδίδουν και τις ανάλογες ιδιότητες στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα όσον αφορά την ανθεκτικότητά του, αλλά και τα φαινόμενα συστολής ξήρανσης και ερπυσμού.

Ο τρόπος παρασκευής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πραγματοποιείται είτε κατά την ξηρή, είτε κατά την υγρή μέθοδο. Κατά την ξηρή μέθοδο το απαιτούμενο για το μείγμα νερό εισάγεται στο ακροφύσιο εκτόξευσης, ενώ κατά την υγρή μέθοδο το μείγμα παρασκευάζεται με προκαθορισμένη αναλογία νερού προς τσιμέντο (N/T). Η ξηρή μέθοδος εφαρμόζεται πιο πολύ σε μεταλλεία, ενώ η υγρή μέθοδος σε τεχνικά

έργα που απαιτούν μεγάλες ποσότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Σε κάθε περίπτωση, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, το είδος και το κόστος της κατασκευής καθορίζουν τη βέλτιστη μέθοδο παρασκευής του χρησιμοποιούμενου υλικού. Παρακάτω παρατίθενται κάποια στοιχεία συγκριτικά για τις μεθόδους που προαναφέρθηκαν:

Παράγων	Τεχνική	Ξηρή μίξη	Υγρή πυκνής ροής
Δημιουργία σκόνης		Σημαντική	Αμελητέα
Αναπήδηση		Σημαντική (15-50%)	Μικρή (<10%)
Παραγωγή		Μικρή προς μέτρια (3÷10 m ³ /h)	Υψηλή (>10m ³ /h)
Κόστος εξοπλισμού		Μικρό	Υψηλό
Επί τόπου εξοπλισμός		Σημαντικός	Μικρός
Έτοιμο σκυρόδεμα		Έτοιμο το ξηρό μίγμα	Ναι
Ομοιογένεια		Μέτρια	Υψηλή
Περιοχές με ροή νερού		Κατάλληλότερο	Με δυσκολία εφαρμογής
Διατήρηση για περίοδο		Μεγάλη	Με χρήση σταθεροποιητή μέχρι 48 ώρες

Πίνακας 2: Συγκριτικός πίνακας ξηρής και υγρής μεθόδου ανάμειξης και παρασκευής εκτοξευόμενου σκυροδέματος («Υποστήριξη Υπόγειων Έργων», Α. Σοφινός, 2015)

Ο τρόπος εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος συνδέεται άρρηκτα με τα τελικά χαρακτηριστικά του και καθορίζεται από τα πρότυπα EN 14487-2 (2006), Αυστριακό πρότυπο εκτοξευόμενου σκυροδέματος (2013) και το ACI 506R-16. Το τελευταίο εστιάζει στην χειροκίνητη εκτόξευση αλλά οι βασικές αρχές και τα περισσότερα πρότυπα αναφέρονται στη μηχανική εφαρμογή. Εξετάζοντας επίσης τη μόνιμη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα επένδυση θέτουμε κριτήρια που τίθενται στην μόνιμη επένδυση κάθε άλλης κατηγορίας σκυροδέματος, οπότε και εφαρμόζονται ο Ευρωκώδικας 2 (EN 1992-1-1(2004)), ο ACI318 (ACI2019), υπό κανονικές συνθήκες φόρτισης. Για την εξέταση της βραχυπρόθεσμης φόρτισης τα παραπάνω πρότυπα δεν εφαρμόζονται πλήρως καθώς έχουν συνταχθεί για περιπτώσεις όπου το σκυρόδεμα φορτίζεται πλήρως, αφού έχει παρέλθει ένα χρονικό διάστημα. Όσα αναφέρονται παρακάτω αφορούν τη μέθοδο υγρής ανάμειξης και μηχανικής εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

2.2.2. Εφαρμογή ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην μόνιμη υποστήριξη σήραγγας

Από τις αρχές του 20ου αιώνα, όπως προαναφέρθηκε, το εκτοξευόμενο ινοπλισμένο σκυρόδεμα προτάθηκε για χρήση στην Ευρώπη. Μετά από αρκετά δεκαετίες, σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ίνες χάλυβα και σκυρόδεμα ερευνήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς στην κατασκευή σηράγγων σε όλη την Ευρώπη. Στα μέσα του 20ου αιώνα, ανεπτυγμένες χώρες όπως η Σουηδία και η Ιαπωνία είχαν πραγματοποιήσει προηγμένη έρευνα για την εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε έργα μηχανικού, με σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών του χαρακτηριστικών.

Έρευνες απέδειξαν ότι το εκτοξευόμενο ινοπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να επιταχύνει τους χρόνους κατασκευής και την έγκαιρη υποστήριξη της επιφάνειας του πετρώματος που περιβάλλει τη σήραγγα πριν αποτονωθεί η περιβάλλουσα βραχώμαζα. Η ενσωμάτωση χαλύβδινων ινών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται ως υποστήριξη μπορεί να εφαρμοστεί σε δύο κατηγορίες περιπτώσεων:

- ❖ Σε μαλακούς γεωλογικούς σχηματισμούς και ιδιαίτερα στην κατασκευή σηράγγων με σημαντικές παραμορφώσεις στον περιβάλλοντα βράχο. Το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται ως άμεση υποστήριξη

στην μικρή παραμόρφωση του περιβάλλοντα βράχου ως προληπτικό μέτρο για την ενδεχόμενη κατάρρευσή του.

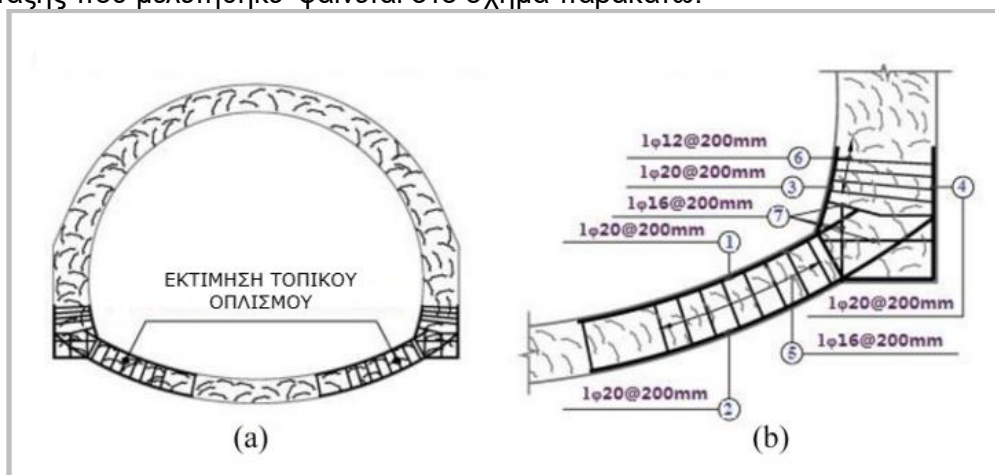
- ❖ Σε σκληρούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται ως μόνιμη υποστήριξη.

Η νέα αυστριακή μέθοδος διάνοιξης σηράγγων και η αντίστοιχη Νορβηγική καθορίζουν ότι η υποστήριξη σήραγγας πρέπει να είναι έγκαιρη, ακριβής στην εφαρμογή της, εύκαμπτη και παραμορφώσιμη. Στην Ιαπωνία έχει χρησιμοποιηθεί το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για αποκατάσταση βλαβών και στο Ηνωμένο Βασίλειο αντικατέστησε τα χαλύβδινα πλέγματα στην ενίσχυση σηράγγων. Στην Κίνα προωθείται πλέον η χρήση του σε σήραγγες και ορυχεία.

Οι Johnson et al διεξήγαγαν μελέτη σχετικά με την εφαρμογή του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο σχεδιασμό επένδυσης σηράγγων. Πραγματοποίησαν μια τρισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων στην αξονική κατεύθυνση της σήραγγας Lee του Λονδίνου και ανέλυσαν την αντοχή του υλικού σε ρωγμάτωση, αποδεικνύοντας την υψηλή του ανθεκτικότητα. Στην πραγματικότητα, η αρχική ρωγμάτωση στο ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εξελίχθηκε πολύ αργά και όταν το πλάτος των ρωγμών υπερέβαινε τα 0,5 mm, ένα φαινόμενο «αποσκλήρυνσης» λάμβανε χώρα. Το φαινόμενο αυτό (“strain softening phenomenon”) αντιστοιχίζεται σε μείωση της αντοχής του υλικού υπό αυξανόμενη καταπόνηση και παρατηρείται συνήθως σε συνεχές επίπεδο και σε υπό αστοχία σχεδόν ψαθυρά υλικά, συμπεριλαμβανομένων σύνθετων υλικών όπως το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Παρόλα αυτά το παραπάνω φαινόμενο εξελίσσεται πολύ αργά και δεν προκαλεί οποιαδήποτε απώλεια αντοχής.

Το χαρακτηριστικό στην παραπάνω ανάλυση ήταν ότι οι Johnson et al αντικατέστησαν την ενίσχυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με ινοπλισμένο υψηλών προδιαγραφών και συγκεκριμένα με περιεκτικότητα σε ίνες χάλυβα 30–45 kg/m³. Αυτή η μελέτη σχεδιασμού είχε ως αποτέλεσμα να κατασκευαστεί το έργο της σήραγγας Lee με οικονομία περίπου 1700 τόνων χαλύβδινων ινών.

Οι Tiberti et al διεξήγαγαν μελέτη για τη βελτιστοποίηση της σταθερότητας τοπικά και της αντοχής του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην αποκόλληση της επένδυσης σήραγγας, συνδυάζοντας χάλυβα και χαλύβδινες ίνες σε σκυρόδεμα (20 kg/m³, κυβική αντοχή σε θλίψη $f_{cm}=52.5$ MPa). Υπό ιδιαίτερα αυξημένο φορτίο, αυτός ο συνδυασμός έδειξε βελτιωμένη μηχανική συμπεριφορά. Το σκαρίφημα της διάταξης που μελετήθηκε φαίνεται στο σχήμα παρακάτω:



Εικόνα 10: Προτεινόμενος οπλισμός για την τελική επένδυση σήραγγας

(a) βάση από χαλύβδινο οπλισμό + χαλύβδινες ίνες (b) Λεπτομέρεια των οπλισμών που τοποθετούνται στην πιο κρίσιμη περιοχή της επένδυσης

(“The strengthening theory of steel fiber reinforced concrete and its application in tunnel engineering: A review”, Junchao Yang, Yuanhang Zhang and Jian Huang, Journal of Engineered Fibers and Fabrics, Volume 19: 1–17, 2024)

Η μελέτη διαπίστωσε ότι η ενσωμάτωση ινών χάλυβα στο σκυρόδεμα κατανέμει τις εσωτερικές τάσεις, μειώνοντας έτσι τις εσωτερικές ρωγμές στη δομή του υλικού. Επιπλέον, ο συνδυασμός οπλισμού και ινών χάλυβα μειώνουν την απαιτούμενη ποσότητα χάλυβα, μειώνοντας το κόστος της κατασκευής και τον απαιτούμενο χρόνο εργασίας.

Οι Chiaia et al διεξήγαγαν επίσης έρευνα που απέδειξε την αποτελεσματικότητα της εγκατάστασης χαλύβδινων ινών στο σκυρόδεμα, μέσω της μείωσης της επέκτασης ρωγμάτωσης στην τελική επένδυση σιμωτών ακόμη και αν η τοποθέτηση χαλύβδινου οπλισμού είναι ιδιαίτερα μειωμένη. Παρόλα αυτά, πρότειναν την εγκατάσταση ελάχιστου χαλύβδινου οπλισμού (ράβδων) υπέρ της ασφαλείας.

Κάποιες βασικές προϋποθέσεις για την ορθή εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι:

- ❖ Πιστοποιημένοι τεχνίτες κατάλληλα εκπαιδευμένοι στην ορθή εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
- ❖ Επαρκής φωτισμός και αερισμός του χώρου εφαρμογής.
- ❖ Σωστός εξοπλισμός ατομικής προστασίας (ΜΑΠ).
- ❖ Κατάλληλος εξοπλισμός Πρώτων Βοηθειών.
- ❖ Επαρκής ποσότητα νερού κοντά στη θέση εκτόξευσης σκυροδέματος.
- ❖ Κατάλληλες και επαρκείς στο πλήθος δοκιμές του εφαρμοζόμενου μείγματος υλικού και επιπλέον δοκιμές για τον έλεγχο της ποσότητας του επιταχυντή.
- ❖ Κατάλληλες και επαρκείς στο πλήθος δοκιμές σκυροδέματος (δελτία παραλαβής, μέγιστος λόγος Ν/Τ = 0.5, εργασιμότητα περίπου 600 mm (EN 12350-5:2009), θερμοκρασία μεταξύ 15 and 22°C κατά την άφιξη, οπτικός έλεγχος για εντοπισμό διαχωρισμού).
- ❖ Κατά την εκτόξευση η ποσότητα του επιταχυντή να είναι τέτοια ώστε να αναπτύσσονται οι κατάλληλες δυνάμεις και η απαιτούμενη φέρουσα ικανότητα (EN 14487).
- ❖ Εκτόξευση σε φανώματα σε τοίχο ή δάπεδο για επιβεβαίωση των πρώιμων αντοχών με μετρήσεις.
- ❖ Κατάλληλα μέτρα σε συνθήκες παγετού ($\leq 5^{\circ}$ C) και ακραίων καιρικών φαινομένων.
- ❖ Εξοπλισμός σε καλή κατάσταση, επαρκώς συντηρημένος και ορθά καθαρισμένος.
- ❖ Έναρξη εκτόξευσης κατά τα πρότυπα της Ευρωπαϊκής Ομοσπονδίας Εθνικών Ενώσεων Εκπροσώπησης Παραγωγών (EFNARC : European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete).
- ❖ Ενημερωμένοι χειριστές για τη γεωμετρία της εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο έργο καθώς και για ειδικές περιπτώσεις εφαρμογής που άπτονται ειδικών επιπλέον μέτρων ασφαλείας.
- ❖ Ολοκληρωμένες και εγκεκριμένες εργασίες προετοιμασίας της επιφάνειας εφαρμογής του υλικού (ο βράχος ή η επιφάνεια εκτοξευόμενου σκυροδέματος που θα εκτοξευθεί το νέο υλικό απαιτεί πλύση και καθαρισμό, το μαλακό έδαφος δεν απαιτεί πλύση γιατί προκαλούνται απώλειες τεμαχών βράχου, σχηματισμοί ευαίσθητοι στο νερό δεν υπόκεινται σε καθαρισμό, η προδιαβροχή εκτελείται κατά περίπτωση)

Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να εξασφαλίζεται, μέσω της κατάλληλης απόστασης (περίπου 1-2 m) και γωνίας (όσο το δυνατόν 90°) του ακροφυσίου, η ελάχιστη παραγωγή σκόνης, η ελάχιστη αναπήδηση εκτοξευόμενου υλικού και η μέγιστη

συνάφεια με την επιφάνεια προς την οποία εκτοξεύεται το σκυρόδεμα. Το απαιτούμενο πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος θα καθορίσει τον αριθμό των στρώσεων που θα εφαρμοστούν στην προς επένδυση επιφάνεια. Δύο ή περισσότερες στρώσεις, έναντι μίας, εξασφαλίζουν την αποφυγή χαλάρωσης ή απολέπισης, αρκεί η προηγούμενη στρώση να μπορεί να υποστηρίξει την επανάληψη της εφαρμογής επί αυτής και να έχει ήδη περάσει στην έναρξη ωρίμανσης και σκλήρυνσης. Επίσης, πριν την εφαρμογή της επόμενης στρώσης, κυρίως σε περίπτωση διαρρεόντων υδάτων ή υγρασίας θα πρέπει να εξασφαλίζεται η κατάλληλη μέθοδος προετοιμασίας. Οι διαδοχικές στρώσεις σε κάποιες περιπτώσεις εφαρμόζονται με διαφορά μηνών. Για τη μείωση του κινδύνου ανάπτυξης δυνάμεων λόγω της συστολής ξήρανσης που επηρεάζουν σημαντικά τη συνάφεια μεταξύ των διαδοχικών στρώσεων θα πρέπει να σχεδιάζεται ορθά το μείγμα και να ελέγχεται με δοκιμές, να τηρείται η γεωμετρία της επένδυσης, να καθαρίζεται πλήρως η επιφάνεια εφαρμογής και να διαβρέχεται η επιφάνεια εφαρμογής για την αποφυγή προσρόφησης ύδατος από το νέο υλικό και την ανεπαρκή του σκλήρυνση.

Ένεκα του μόνιμου χαρακτήρα της επένδυσης, θα πρέπει να υπάρχει σε κάθε περίπτωση η μέριμνα ώστε να αποφευχθεί η διάβρωση του οποιουδήποτε οπλισμού τοποθετείται, δυσκολία που αντιμετώπιζαν από την αρχή όλοι οι κατασκευαστές στα χαλύβδινα πλαίσια και στο πλέγμα της προσωρινής επένδυσης. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται συνθετικές ίνες ή ίνες από χάλυβα, αντικαθιστώντας τις ράβδους οπλισμού στο ρόλο της ενίσχυσης. Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν ράβδοι οπλισμού αυτές θα πρέπει να εγκιβωτίζονται εξολοκλήρου στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για την αποφυγή της διάβρωσής τους συν τω χρόνω.

Η τελική επιφάνεια στις περισσότερες περιπτώσεις θα πρέπει να εξομαλύνεται και να καλύπτονται οι προεξέχουσες χαλύβδινες ίνες με στρώση υλικού πάχους συνήθως 25 έως 50 mm πάχος.

Όσον αφορά την προστασία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος από την υπερβολική ξήρανση και σύμφωνα με τη Νορβηγική Οδηγία, θα πρέπει να προστατεύεται όσο ακόμη παραμένει νωπό για τουλάχιστον 4 ημέρες με διαβροχή και με τον κατάλληλο αερισμό της σήραγγας.

Όσον αφορά δε το σχεδιασμό της κατασκευής των σηράγγων, κατά την ολοκλήρωσή του λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση επένδυσης και εδάφους, ενώ αποτελεί σημαντικό στοιχείο του η ελάχιστη δυνατή διαταραχή του εδάφους, εξασφαλίζοντας όσο το δυνατόν τη διατήρηση της ήδη υπάρχουσας αντοχής του. Επίσης, η τελική ισορροπία εδάφους και συστήματος υποστήριξης επιτρέπει την αυτοϋποστήριξη του πετρώματος, που εξασφαλίζεται από την απαιτούμενη ολκιμότητα της στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που το περιβάλλει. Ταυτόχρονα, η απαραίτητη αποστράγγιση υδάτων δια μέσου της τελικής επένδυσης προσφέρει στην κατασκευή ανθεκτικότητα και βιωσιμότητα σε όλη τη διάρκεια του χρόνου ζωής του έργου για τον οποίο σχεδιάστηκε.

Στα πρώτα βήματα σχεδιασμού της μόνιμης επένδυσης σηράγγων με ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, εφαρμόστηκαν δύο τρόποι εφαρμογής ως απλή υποστήριξη:

- ❖ Σε ένα βήμα μίας στρώσης για σήραγγες μικρής διαμέτρου ή για σήραγγες που κατασκευάζονται σε σταθερές και ξηρές συνθήκες γεωλογικών σχηματισμών
- ❖ Σε δύο βήματα δύο στρώσεων, όπου η πρώτη στρώση επιτυγχάνει τη σχετική σταθερότητα του γεωλογικού σχηματισμού και η δεύτερη σε πλήρη συνάφεια με την πρώτη, επιτυγχάνει με τη σειρά της την απαιτούμενη φέρουσα ικανότητα και υδατοστεγανότητα.

Σήμερα, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόζεται ως τελική επένδυση σηράγγων με τους παρακάτω τρεις τρόπους:

- ❖ Επένδυση διπλού κελύφους (DSL), ενός για την προσωρινή επένδυση και ενός για τη λειτουργία της μόνιμης.
- ❖ Σύνθετες επενδύσεις κελύφους (CSL): αποτελείται από μια πρωτεύουσα επένδυση, μία εκτοξευόμενη υδατοστεγανή μεμβράνη και μία εκτοξευόμενη δευτερεύουσα επένδυση, που είναι σε πλήρη συνάφεια με την αρχική και υποστηρίζει ένα ποσοστό του τελικού υπερκείμενου φορτίου.
- ❖ Επένδυση μονού κελύφους (SSL): μία ενιαία επένδυση αναλαμβάνει τα προσωρινά και μακροπρόθεσμα μόνιμα φορτία. Κατασκευάζεται σε διάφορες στρώσεις και χρησιμοποιείται συχνά στην κατασκευή σηράγγων με μικρό υδροστατικό φορτίο.

Οι απαιτήσεις για την πρώτη στρώση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που αντιστοιχίζεται στην προσωρινή επένδυση είναι η ανθεκτικότητα, η υδατοστεγανότητα και η βραχυπρόθεσμη φέρουσα ικανότητα φορτίου. Οι απαιτήσεις για την τελική επένδυση είναι ομοίως οι ίδιες με τη διαφορά της απαίτησης μακροπρόθεσμης πλέον φέρουσας ικανότητας. Η απαιτούμενη συνάφεια μεταξύ των στρώσεων επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη της απαραίτητης τραχύτητας στην επιφάνεια της πρώτης στρώσης, επάνω στην οποία εφαρμόζεται η τελική επένδυση. Η συνάφεια των στρώσεων επίσης ενισχύεται με αργή και σταδιακή ξήρανση και πρώιμη θερμική συρρίκνωση, συνεπώς και με τον ανάλογο σχεδιασμό της σύστασης μείγματος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ώστε να επιτυγχάνεται μειωμένη θερμότητα ενυδάτωσης και πρώιμη σκλήρυνση της εκάστοτε εφαρμοζόμενης στρώσης.

Ωστόσο, επειδή το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόζεται σε πολλαπλές στρώσεις και σε διακριτές διαδοχικές χρονικές στιγμές κατά τις οποίες εφαρμόζεται παράλληλα και ο απαραίτητος οπλισμός, η συνάφεια μεταξύ των στρώσεων θα πρέπει να είναι επαρκής ώστε η συνολική στρώση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος να προσομοιάζει στη μηχανική και δομική του λειτουργία ως μία μονολιθική στρώση οπλισμένου σκυροδέματος. Η εν λόγω απαίτηση ορίζει και τους σχετικούς περιορισμούς στην επί μέρους διαδοχική εφαρμογή των στρώσεων, στον καθαρισμό των επιφανειών που εφαρμόζεται κάθε φορά η νέα στρώση, στην τεχνολογία σκυροδέματος και στην εξασφάλιση των ελάχιστων απαιτούμενων εφελκυστικών και διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια μεταξύ των διαδοχικά εφαρμοζόμενων στρώσεων υλικού, τις οποίες η βιβλιογραφία τις ορίζει της τάξης των 1,5 MPa. (Gall, Zeidler, Munfah, Cerulli, 2004)

Τα φορτία στην επένδυση αξιολογούνται με γεωτεχνική ανάλυση, ενώ σε γεωτεχνικό επίπεδο, δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ των συνηθισμένων επενδύσεων από οπλισμένο σκυρόδεμα και από ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Όσον αφορά την ανθεκτικότητα, αυτή επιτυγχάνεται με την εξασφάλιση της υδατοστεγανότητας ώστε να αποφεύγεται η εξαλλοίωση του υλικού από διαρρέοντες διαβρωτικούς παράγοντες. Η μέγιστη αποδεκτή διαπερατότητα επιτυγχάνεται με την κατάλληλη σύνθεση του μείγματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Το μέγιστο άνοιγμα μικρορωγμών με βάση το σχεδιασμό καλό είναι να διατηρείται στα 0,1 mm ή στα 0,03 mm κατά τον Ευρωκώδικα 2.

Οι ίνες από χάλυβα κατανέμονται σε όλη την έκταση επένδυσης από σκυρόδεμα, γεγονός που δίνει σε αυτό το είδος υποστήριξης πλεονέκτημα έναντι της αντίστοιχης με οπλισμένο σκυρόδεμα από ράβδους χάλυβα. Η ομοιόμορφη κατανομή των ινών προσδίδει αντίστοιχα και ομοιόμορφη κατανομή στις επιβαλλόμενες εφελκυστικές τάσεις που με τη σειρά τους επιτρέπουν περισσότερες ομοιόμορφα κατανεμημένες μικρορωγμές, περιορισμένου πλάτους και βάθους.

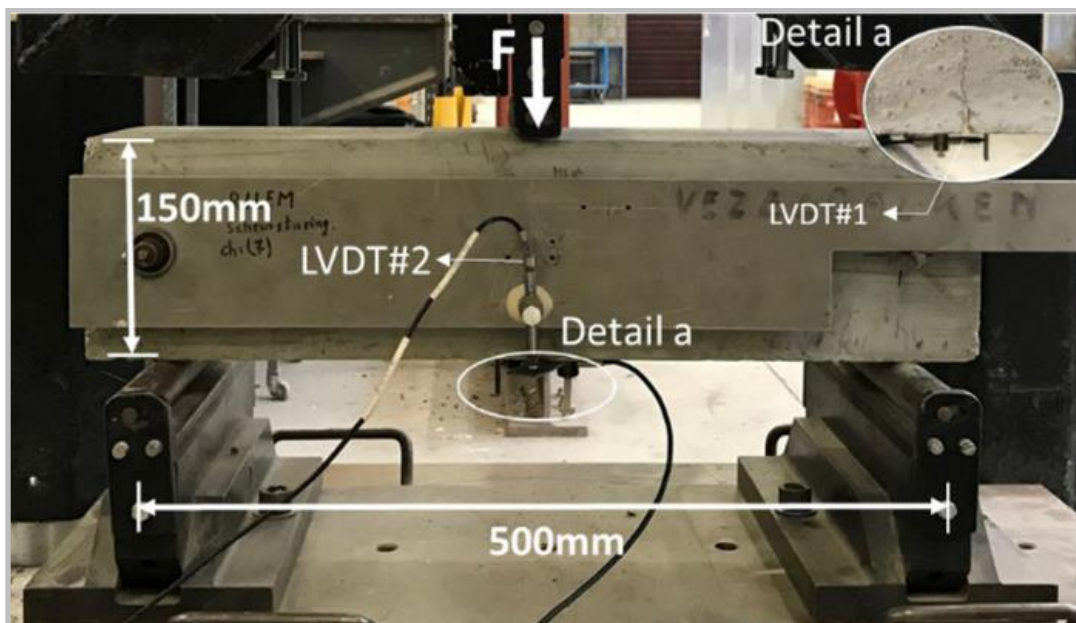
Όσον αφορά τα υπόγεια έργα που εξετάζουμε οι ίνες που ενσωματώνονται στο σκυρόδεμα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- ❖ Ίνες από χάλυβα: αύξηση φέρουσας ικανότητας, έλεγχος ρωγμάτωσης επένδυσης
- ❖ Συνθετικές μικροΐνες : αύξηση πυραντοχής και αποφυγή ρωγμάτωσης λόγω πλαστικής συστολής ξήρανσης

❖ Συνθετικές ίνες: σε προσωρινές κατασκευές με μεγάλες παραμορφώσεις Στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της μόνιμης επένδυσης σηράγγων μπορούν να προστεθούν συνθετικές μικροΐνες σε συνδυασμό με τις χαλύβδινες ίνες, ώστε εκτός από την απαιτούμενη φέρουσα ικανότητα να επιτευχθεί και η σχετική πυραντοχή του υλικού.

Κατά το πρότυπο ISO 13270 οι χαλύβδινες ίνες είναι κατάλληλο υλικό οπλισμού με συντελεστή θερμικής διαστολής ίσο με αυτόν του σκυροδέματος, το μέτρο ελαστικότητάς τους είναι τουλάχιστον 5 φορές υψηλότερο από το αντίστοιχο του σκυροδέματος και ο ερπυσμός των κανονικών ινών χάλυβα μπορεί να συμβεί μόνο πάνω από 370 °C (698 °F). Επίσης, οι ίνες θα πρέπει να συμμορφώνονται με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 14889-1, ενώ όσες φέρουν σήμανση CE ανήκουν στο σύστημα 1 (Ίνες δομικής χρήσης). Εμφανίζουν ελάχιστη αντοχή υλικού σε εφελκυσμό 1800 MPa, ενώ οι ανοχές διαστάσεων ακολουθούν επίσης τα πρότυπα EN 14889-1 και ISO 13270. Το μήκος των ινών αντιστοιχίζεται σε περίπου 35 mm και ο λόγος των διαστάσεών τους, μήκους προς διάμετρο, θα πρέπει να είναι $(L / D) = 65$. Το ελάχιστο βάρος των γαλβανισμένων ινών 30 g/m².

Στο Ευρωπαϊκό πρότυπο EN14487-1 ορίζονται οι διαφορετικοί τρόποι προσδιορισμού της ολκιμότητας του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος σχετικά με την παραμένουσα αντοχή και τη φέρουσα ικανότητα του υλικού υποστήριξης. Η παραμένουσα αντοχή του υλικού προδιαγράφεται κατά το σχεδιασμό και στις κατασκευαστικές εφαρμογές είναι και η ιδιότητα που θα καθοριστεί για τον έλεγχο φέρουσας ικανότητας και ανθεκτικότητας της κατασκευής. Ο εργαστηριακός έλεγχος του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πραγματοποιείται με δοκιμές κάμψης για τον προσδιορισμό του λόγου τάση/παραμόρφωση με δοκιμή τριών σημείων. Από αυτές τις δοκιμές μπορούμε να προσδιορίσουμε την εφελκυστική αντοχή σε κάμψη του υλικού. Οι δοκιμές κάμψης τριών σημείων εκτελούνται συνήθως σύμφωνα με το πρότυπο EN 14651, το οποίο είναι το πρότυπο αναφοράς για την σήμανση CE σε ίνες χάλυβα για κατασκευαστές στην Ευρώπη, στην Ασία και στη Μέση Ανατολή.



Εικόνα 11: Εργαστηριακός έλεγχος δοκιμίου ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Test set-up of the three-point bending test according EN 14651. | Download Scientific Diagram (researchgate.net))

Αυτή η δοκιμή έχει ονομαστεί “Model Code 2010”, είναι σχετικά απλή και ανεξάρτητη από τα χαρακτηριστικά των ινών του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Μεταγενέστερα καθιερώθηκε μία νέα δοκιμή που συνδύαζε το οριζόμενα από το πρότυπο EN 14651

με τα πλεονεκτήματα της δοκιμής EN 14488-5 (μικρότερη διασπορά). Η νέα δοκιμή χρησιμοποιούσε δοκίμια που προσομοίαζαν πληρέστερα την πραγματική κατάσταση στην κατασκευή ως προς την κατανομή των ινών μέσα στο σκυρόδεμα, προϋποθέτει εύχρηστα σε διαστάσεις δοκίμια, δεν απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό εργαστηρίου.

Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός της μόνιμης επένδυσης βράχου με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος ενισχυμένου με ίνες

Η συνεχόμενη προσπάθεια για τις όσο το δυνατόν λιγότερο δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τον κατασκευαστικό κλάδο έχει οδηγήσει σε νέες μεθόδους κατασκευής, σε παρασκευή και χρήση νέων υλικών και σε νέα πρότυπα και μεθόδους ελέγχου. Παράλληλα αποτελεί και ένας από τους βασικούς στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης να καταφέρει να καταστεί κλιματικά ουδέτερη έως το 2050, με μηδενικές εκπομπές αερίων που συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (GHG), ταυτόχρονα με την ανάγκη επέκτασης των αστικών κέντρων και αύξησης της δόμησής τους. Όλα τα παραπάνω έχουν ως συνέπεια οι ιδιοκτήτες, οι δημόσιοι φορείς, οι μηχανικοί και οι εταιρείες παραγωγής δομικών υλικών να συντονίζονται σε μία κοινή προσπάθεια για την μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την κατασκευή. Επομένως, και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του υλικού του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που χρησιμοποιείται στην υποστήριξη και ενίσχυση των σηράγγων.

Σε αυτή την κατεύθυνση, οι Johansson et al διερεύνησαν την αντικατάσταση των παραδοσιακά χρησιμοποιούμενων αγκυρίων βράχου από χάλυβα από αντίστοιχα με ίνες υάλου.

Ένα επόμενο σημείο εξέτασης αποτέλεσε η παρακολούθηση και μέτρηση της εφαρμοζόμενης ποσότητας υλικού εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Σταθερά σημεία με τοποθετημένες ράβδους γνωστού μήκους στην επιφάνεια εφαρμογής συνέβαλαν στον έλεγχο του πάχους εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Οι Bjurjeland et al κατέληξαν ότι η μεταβολή του πάχους της εφαρμοζόμενης στρώσης είναι πολύ σημαντική και ότι υπάρχει η τάση για εκτόξευση μεγαλύτερης ποσότητας από την απαιτούμενη επάνω στην επιφάνεια εφαρμογής. Οι Westlesen and Krutrök, μελέτησαν τον έλεγχο της ποσότητας του υλικού, ώστε να μειωθούν οι επιπλέον ποσότητες που εφαρμόζονταν χωρίς λόγο. Χρησιμοποίησαν ένα ρομπότ εκτόξευσης υλικού με ενσωματωμένο έναν αισθητήρα (LiDAR). Με αυτό τον τρόπο γινόταν σάρωση της επιφάνειας εφαρμογής, έπειτα της ίδιας επιφάνειας με το εκτοξευμένο υλικό και συντασσόταν ο αντίστοιχος χάρτης κατανομής του πάχους της επένδυσης. Την ίδια πληροφορία συγκέντρωναν οι μελετητές και από τη χρήση ραντάρ που είχαν τη δυνατότητα να διεισδύουν στο έδαφος. Στις μέρες μας, η επιστημονική κοινότητα εστιάζει σε κινητά συστήματα χαρτογράφησης.

Από το 1980, σε σήραγγες κατασκευασμένες σε βράχο υψηλής αντοχής η κυρίαρχη μέθοδος υποστήριξης αποτελείτο από ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (FRS) σε συνδυασμό με αγκύρια βράχου, με βασικό όφελος την εξοικονόμηση του χρόνου εργασιών.

Σε κάθε περίπτωση, η μηχανική συμπεριφορά ενός βράχου που εκσκάπτεται προβλέπεται δύσκολα λόγω της αβεβαιότητας από την παρουσία διαφορετικής ποιότητας, γεωμετρίας και προσανατολισμού ασυνεχειών που αυτός φέρει. Κατά συνέπεια και ο σχεδιασμός της υποστήριξής του εμφανίζει την αντίστοιχη δυσκολία. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, να χρησιμοποιούνταν εμπειρικές μέθοδοι σε συνδυασμό με αριθμητικές αναλύσεις.

Αυτές οι μέθοδοι περιελάμβαναν και τον τύπο των ινών που χρησιμοποιούνταν κάθε φορά ως οπλισμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Στη Νορβηγία, συνθετικές και χαλύβδινες ίνες επιτρέπονταν στην κατασκευή σηράγγων στο έδαφος, ενώ σε υποθαλάσσιες σήραγγες επιτρέπονταν μόνο συνθετικές ίνες λόγω απαιτήσεων ανθεκτικότητας σε υγρό περιβάλλον. Ωστόσο έπειτα από περιστατικά όπου οι ίνες επέπλεαν στην επιφάνεια του ωκεανού και αποτέλεσαν παράγοντα μόλυνσης, απαγορεύτηκε η χρήση και εφαρμογή τους (Νοέμβριος 2015).

Στη Σουηδία, από το 1980 υπάρχει μεγάλη ανάπτυξη θεωρητικής και εμπειρικής γνώσης σχετικά με τη δομική συμπεριφορά και την ανθεκτικότητα των χαλύβδινων ινών οι οποίες αποτελούν και το μόνο τύπο ινών που χρησιμοποιούνται και

εφαρμόζονται ως σπλισμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Στην Αυστραλία χρησιμοποιούνται ίνες από χάλυβα και από συνθετικό υλικό (Bernard, E. 2009), ενώ το 1990 ξεκίνησε η χρήση ινών από βασάλτη σε έργα πολιτικού μηχανικού, υλικό φιλικό προς το περιβάλλον και μη διαβρωτικό. Έρευνα σχετικά με τη δομική τους συμπεριφορά, την ανθεκτικότητα και το περιβαλλοντικό αποτύπωμά τους εκπονήθηκε από τους Mohaghegh A., Afroz et al και Fiore et al.

Επομένως και στην κατασκευή της υποστήριξης μιας σήραγγας η επιλογή χρήσης ινών δίνει τη δυνατότητα μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά την κατασκευή του έργου αλλά και κατά τη διάρκεια ζωής του. Ταυτόχρονα όμως θα πρέπει να εξασφαλίζεται, κυρίως κατά τη χρήση εναλλακτικών μορφών ινών ότι αυτές πληρούν τις απαιτήσεις φέρουσας ικανότητας, ανθεκτικότητας και παραμορφωσιμότητας του σχεδιασμού του έργου, θέμα που μελετάται στην παρούσα φάση σε τρέχον ερευνητικό πρόγραμμα στο KTH Royal Institute of Technology με την υποστήριξη της Σουηδικής Διοίκησης Μεταφορών (Trafikverket). Ο στόχος της εν λόγω έρευνας αντιστοιχίζεται στη διερεύνηση των τύπων ινών που είναι κατάλληλες προς χρήση σε οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες σε βράχο υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων. Η εν λόγω έρευνα μελετά διάφορες μεθόδους σχεδιασμού εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως προς τη φέρουσα ικανότητα και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, συνδυάζοντας τα συστήματα ταξινόμησης βραχώμαζας Q και RMR με το απαιτούμενο πάχος στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος και την ποσότητα των ενσωματωμένων σε αυτό ινών.

Όπως προαναφέρθηκε η μόνιμη υποστήριξη σηράγγων που διανοίγονται σε υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων βράχο, αποτελείται από αγκύρια βράχου και πλέον από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ενισχυμένο με χαλύβδινες ίνες. Για τον πλήρη σχεδιασμό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πρέπει να καθορίζεται η ολκιμότητα και το πάχος της εφαρμοζόμενης στρώσης του υλικού που εκφράζονται ως απορροφούμενη ενέργεια (ενδόθερμες χημικές αντιδράσεις / εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης) ή ως παραμένουσα αντοχή σε κάμψη. Αυτό δεν αποτελεί απλό εγχείρημα, αφού το φορτίο που εφαρμόζεται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εξαρτάται από την παραμόρφωση της βραχώμαζας και την αλληλεπίδρασή της με την υποστήριξη. Αυτός είναι και ο λόγος που λόγω της πολυπλοκότητας του σχεδιασμού της υποστήριξης οι κώδικες που έχουν καθιερωθεί όπως ο Ευρωκώδικας 7 είναι ανοιχτοί σε διάφορες μεθόδους σχεδιασμού, εμπειρικές, αναλυτικές και μεθόδους παρατήρησης.

Οι μέθοδοι σχεδιασμού κάθε έργου διαφέρουν μεταξύ έργων και μελετητών και η επιλογή τους σχετίζεται με την εξοικείωση του μηχανικού και την εμπιστοσύνη του στους ισχύοντες κανονισμούς και πρότυπα. Στη Σουηδία, ο σχεδιασμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος γίνεται με τη θεώρηση μίας ελάχιστης παραμένουσας αντοχής σε κάμψη που απαγορεύει αυστηρά τη χρήση εμπειρικών μεθόδων, όπως για παράδειγμα τη μέθοδο Q, ενώ σε άλλες χώρες χρησιμοποιούνται κατά κόρον οι εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού.

3.1. Σχεδιασμός εκτοξευόμενου σκυροδέματος με την μέθοδο Q

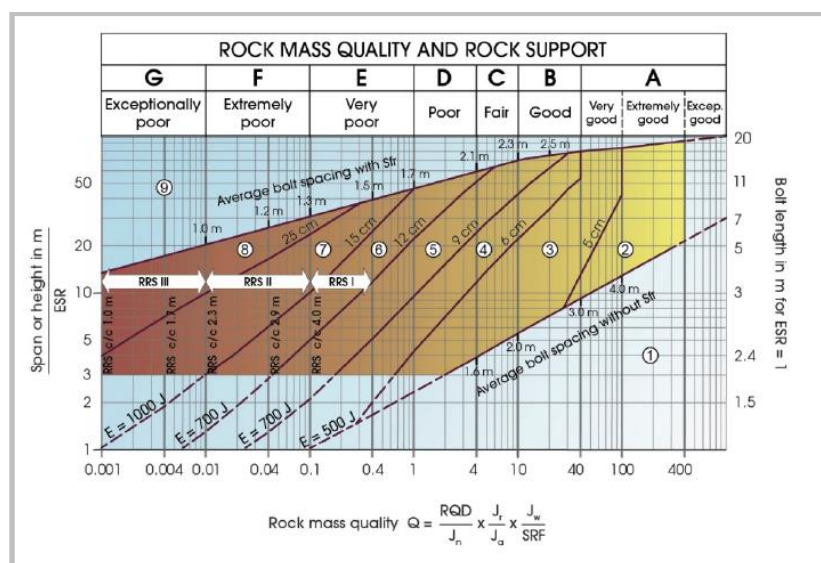
Ο σχεδιασμός υποστήριξης βράχου με εμπειρικές μεθόδους βασίζεται συνήθως σε συστήματα ταξινόμησης βραχώμαζας. Δύο ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα είναι το σύστημα αξιολόγησης βραχώμαζας (RMR), που αναπτύχθηκε από τον Bieniawski και η μέθοδος Q, από τους Barton et al. Στη μέθοδο Q, η ποιότητα της βραχώμαζας υπολογίζεται με βάση την αναλογία μεταξύ τριών ομάδων παραμέτρων, που αντιπροσωπεύουν τη δομή του βραχώδους όγκου, την τραχύτητα και τον βαθμό εναλλαγής των ασυνεχειών και των ενεργών τάσεων.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Η υποστήριξη προσδιορίζεται με βάση την τιμή Q και την ισοδύναμη διάσταση, που είναι ο λόγος μεταξύ ενός ενεργού μήκους και του λόγου υποστήριξης εκσκαφής ESR (αντίστροφος του συντελεστή ασφαλείας). Το ενεργό μήκος καθορίζεται για την οροφή και τις παρειές χωριστά και ο λόγος ESR αντιστοιχίζεται στη χρήση της σήραγγας και στο συντελεστή ασφαλείας. Οι σχετικές τιμές και η ισοδύναμη διάσταση της σήραγγας μελετήθηκαν σε συνδυασμό με το είδος υποστήριξης για περισσότερες από 200 περιπτώσεις. Σε συνδυασμό με τη σχετική μελέτη του Terzaghi, συντάχθηκε μία σχετική θεωρητική συλλογιστική με βάση τη μέγιστη πίεση υποστήριξης που αναπτυσσόταν. Η πίεση υποστήριξης ήταν ανεξάρτητη από τη γεωμετρία της σήραγγας, ενώ εξαρτιόταν μόνο από την ποιότητα του βραχώδους σχηματισμού. Εφόσον υπολογίζεται η πίεση υποστήριξης P μπορεί να προσδιοριστεί και η απόσταση μεταξύ συστηματικά τοποθετημένων αγκυρών βράχου (a) σε συνάρτηση με την τάση διαρροής καθενός f_{bolt} από τη σχέση:

$$a = \sqrt{\frac{f_{bolt}}{P}}$$

Ο προσδιορισμός του φορτίου που επιβάλλεται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε συνδυασμό με αγκύρια βράχου είναι πολύ περίπλοκος. Το απαιτούμενο πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος εξαρτάται από την κάθε περίπτωση που εξετάζεται και δεν υπάρχουν συγκεκριμένες συστάσεις σχετικά με τις ίνες που ενσωματώνονται στο εσωτερικό του. Σε επόμενες αναθεωρήσεις προστέθηκαν αποτελέσματα από μεγάλο αριθμό έργων σηράγγων από Νορβηγία, Ελβετία και Ινδία. Ένα επιπλέον κριτήριο απορρόφησης ενέργειας για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προστέθηκε κατόπιν δοκιμών σε φατνώματα, σύμφωνα με το Πρότυπο EFNARC.

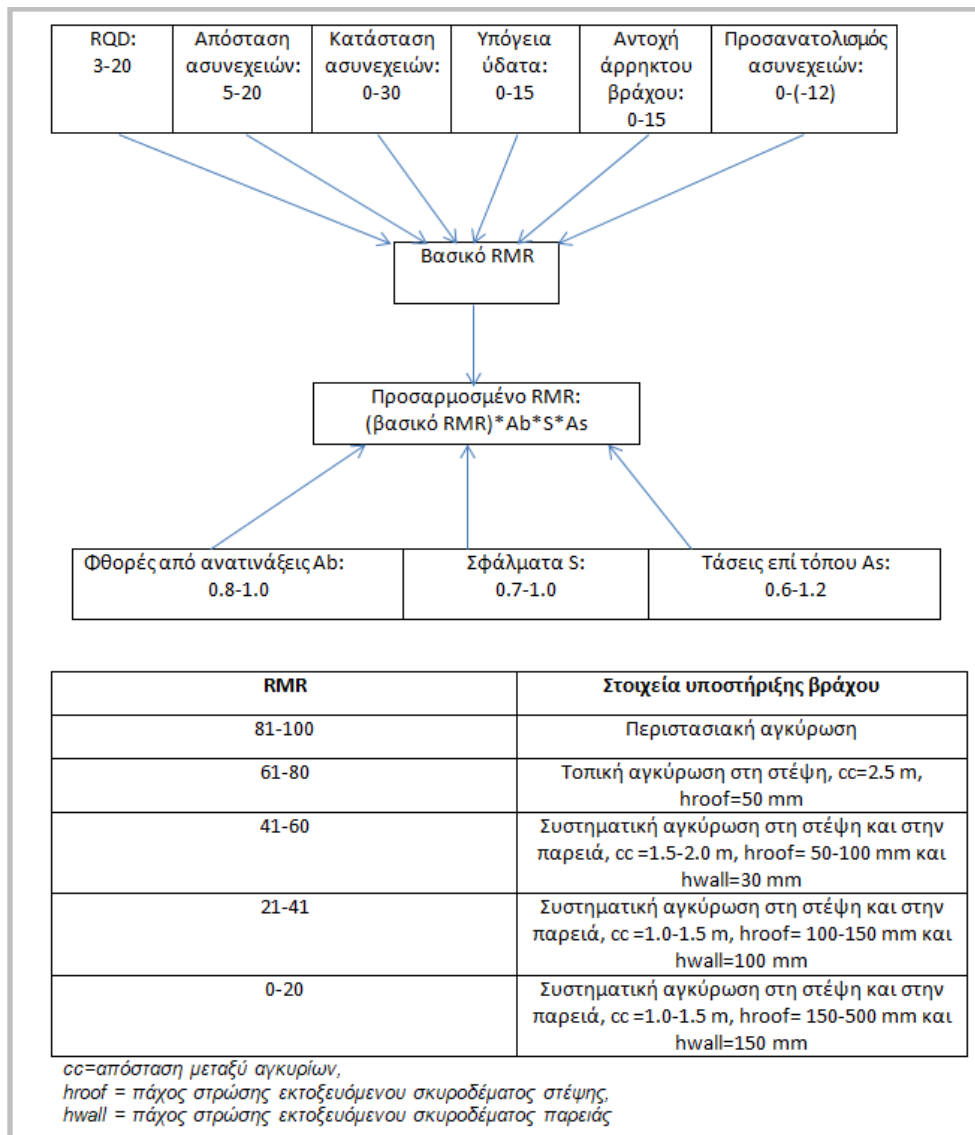


Εικόνα 12: Το σύστημα Q για το σχεδιασμό υποστήριξης βράχου (Grimstad et al) ("On the Design of Permanent Rock Support Using Fibre-Reinforced Shotcrete", Andreas Sjölander, Anders Ansell and Erik Nordström)

Γενικά, δεν υπάρχει συγκεκριμένη θεωρία συσχέτισης μεταξύ της τιμής Q, της ισοδύναμης διάστασης και της απαιτούμενης απορρόφησης ενέργειας ή κάποιο συγκεκριμένο πρότυπο σχετικά με τα όρια μεταξύ των απαιτούμενων επιπέδων απορρόφησης ενέργειας. Επιπλέον, το σύστημα Q παρέχει ένα συνιστώμενο μήκος και μία απόσταση μεταξύ των αγκυρών με και χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ενισχυμένο με ίνες (S_{fr} - Εικόνα 12).

3.2. Σχεδιασμός εκτοξευόμενου σκυροδέματος με την μέθοδο RMR

Το σύστημα ταξινόμησης RMR αναπτύχθηκε από τον Bieniawski και επικαιροποιήθηκε αρκετές φορές συν τω χρόνω. Η βασική τιμή RMR βασίζεται στο άθροισμα έξι παραμέτρων που αντιπροσωπεύουν την αντοχή του άρρηκτου βράχου, την ταξινόμηση του πυρήνα της γεώτρησης (RQD), την απόσταση των ασυνεχειών, την κατάσταση των ασυνεχειών, τα υπόγεια ύδατα και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών της βραχώμαζας. Στη συνέχεια, η βασική τιμή RMR προσαρμόζεται και καθορίζεται και από τα αποτελέσματα των ανατινάξεων, την τάση επί τόπου και κάποια μεγάλα τυχηματικά σφάλματα. Κάθε παράμετρος καθορίζεται από συγκεκριμένο εύρος τιμών και με βάση την τιμή RMR, το πέτρωμα χωρίζεται σε πέντε διαφορετικές κατηγορίες που κυμαίνονται από πολύ καλής έως πολύ πτωχής ποιότητας πέτρωμα οπότε και ανάλογα με αυτές καθορίζεται και το είδος της υποστήριξης (μήκος και απόσταση μεταξύ των αγκυριών, πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος). Κανένα στοιχείο δεν παρατίθεται σχετικά με την ενέργεια απορρόφησης και την παραμένουσα αντοχή σε κάμψη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



Πίνακας 3: Πίνακας βασικών στοιχείων Μεθόδου RMR
 ("On the Design of Permanent Rock Support Using Fibre-Reinforced Shotcrete", Andreas Sjölander, Anders Ansell and Erik Nordström)

3.3. Σχεδιασμός εκτοξευόμενου σκυροδέματος σύμφωνα με τους Διεθνείς Κανονισμούς

Σε ορισμένες χώρες έχουν αναπτυχθεί Εθνικοί Κανονισμοί με βάση τον εμπειρικό σχεδιασμό της υποστήριξης βράχου. Παράλληλα με μία επικαιροποίηση στο Q σύστημα ταξινόμησης, ο Parworth F. συσχέτιζε εμπειρικά την τιμή Q, την κατηγορία ταξινόμησης βράχου και το επίπεδο απόδοσης ανθεκτικότητας (TPL). (Sjölander, Ansell and Nordström, 2023)

Εδώ η ερμηνεία του TPL αντιστοιχίζεται σε ισοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που κατατάσσεται στις κατηγορίες I-V με βάση την παραμένουσα αντοχή σε κάμψη υπό σταθερές κατακόρυφες μετατοπίσεις. Το TPL εξήχθη από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1018 (που έχει πλέον καταργηθεί) με μήκος δοκιμίου 300 mm και παραμένουσα αντοχή προσδιοριζόμενη μεταξύ των κατακόρυφων μετατοπίσεων $\delta_1 = 0,5 \text{ mm}$ και $\delta_2 = 2,0 \text{ mm}$.

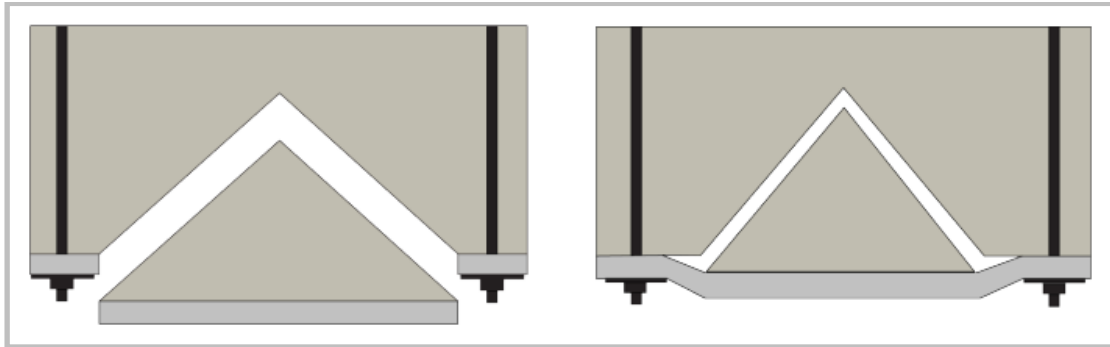
Στη Σουηδία, ένας προκαταρκτικός σχεδιασμός υποστήριξης βασίζεται συχνά στη μέθοδο Q. Στη συνέχεια, αριθμητικές προσομοιώσεις ή αναλυτικές εξισώσεις χρησιμοποιούνται για την επαλήθευση της φέρουσας ικανότητας της υποστήριξης. Σύμφωνα με τους Κανονισμούς της Αυστραλίας, για το σχεδιασμό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος συνιστάται να προσδιοριστούν η παραμένουσα αντοχή σε κάμψη (όταν αναμένονται ή γίνονται αποδεκτές μικρές παραμορφώσεις) ή αλλιώς η απορρόφηση ενέργειας.

Συνοψίζοντας, ένας σχεδιασμός που βασίζεται στη μέθοδο Q ή στο σύστημα RMR ορίζει ένα απαιτούμενο πάχος στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος και μία ορισμένη ειδική απορρόφηση ενέργειας, εάν χρησιμοποιείται το σύστημα Q. Ο έλεγχος ποιότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος θα πρέπει επομένως να βασίζεται σε δοκιμές τετράγωνων φατνωμάτων ή στρογγυλών προδιαγεγραμμένων δοκιμίων (RDP). Δεν υπάρχει λεπτομερής θεωρία πίσω από το απαιτούμενο πάχος ή την απορρόφηση ενέργειας σε οποιοδήποτε από τα συστήματα αυτά.

Ωστόσο, λίγες περιπτώσεις αστοχίας σηράγγων αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Σε περιπτώσεις σηράγγων στη Νορβηγία πχ. στη σήραγγα Hannekleiv, ο λόγος της αστοχίας ήταν η υπερεκτίμηση των αντοχών του βράχου. Οι εμπειρικές μέθοδοι οδηγούν κατά βάση σε ασφαλή σχεδιασμό. (Sjölander, Ansell and Nordström, 2023)

3.4. Σχεδιασμός εκτοξευόμενου σκυροδέματος με Αναλυτικές εξισώσεις

Ο πρωταρχικός μηχανισμός υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος έγκειται στο ότι θα πρέπει να είναι σε θέση να φέρει το φορτίο από ένα μικρό τμήμα βράχου, είτε μέσω της συνάφειάς του στην επιφάνεια του βράχου είτε μέσω της καμπτικής ή διατμητικής του φέρουσας ικανότητας.



Εικόνα 13: Παραδείγματα μορφών αστοχίας εκτοξευόμενου σκυροδέματος
 αριστερά, αστοχία σε διάτμηση και δεξιά, αστοχία σε κάμψη
 ("On the Design of Permanent Rock Support Using Fibre-Reinforced Shotcrete", Andreas Sjölander, Anders Ansell and Erik Nordström)

Για την περίπτωση υποστήριξης με αγκύρια βράχου σε κάναβο, το μέγιστο μέγεθος του τεμάχου θα μπορούσε να προσδιοριστεί με βάση την απόσταση μεταξύ των αγκυριών. Για το σχεδιασμό εκτοξευόμενου σκυροδέματος με αναλυτικές εξισώσεις, πολλοί ερευνητές βασίζονται στα αποτελέσματα των Barrett και McCreath, (Sjölander, Ansell and Nordström, 2023) όπου οι πιθανοί τρόποι αστοχίας για μια επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που υπόκειται σε φορτίο τεμάχου βράχου παρουσιάζονται με βάση την παρατήρηση σε πειραματικά αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία. Κάθε κατάσταση αστοχίας αντιμετωπιζόταν ξεχωριστά και για κάθε τέτοια περίπτωση αναπτύσσονταν αναλυτικές εξισώσεις. Στην προκειμένη περίπτωση, εξεταζόταν η καμπτική αστοχία γιατί η διατμητική αστοχία και η συνάφεια δεν επηρεάζονταν άμεσα από την περιεκτικότητα ινών του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η δε εφελκυστική αντοχή του βράχου αμελούνταν και αντί για αυτή χρησιμοποιούνταν η παραμένουσα αντοχή σε κάμψη. Ο λόγος είναι ότι το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εμφανίζει συνήθως συμπεριφορά "strain softening" (σημαντική μείωση της αντοχής σε διάτμηση με αυξανόμενη καταπόνηση). Έτσι, μειώνεται η φέρουσα ικανότητά του μετά την έναρξη της ρωγμάτωσης. Για να προχωρήσουμε στο σχεδιασμό θεωρούμε ένα μηχανικό δισδιάστατο προσομοίωμα, στο οποίο εφόσον οι ίνες στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατανομούνται τυχαία, αποδεχόμαστε ότι η παραμένουσα αντοχή σε κάμψη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι η ίδια και στις δύο κατευθύνσεις εντός του επιπέδου. Η εν λόγω παραδοχή είναι υπέρ της ασφαλείας και επομένως αποδεκτή για το σχεδιασμό που εκτελείται.

Επομένως, ο σχεδιασμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος βασίζεται συχνά σε ένα προσομοίωμα δοκού, στο οποίο το μέγεθος του τεμάχου και το μήκος της δοκού καθορίζονται από την απόσταση των αγκυριών βράχου.

Η φέρουσα ικανότητα ροπής για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα δίνεται από τον τύπο:

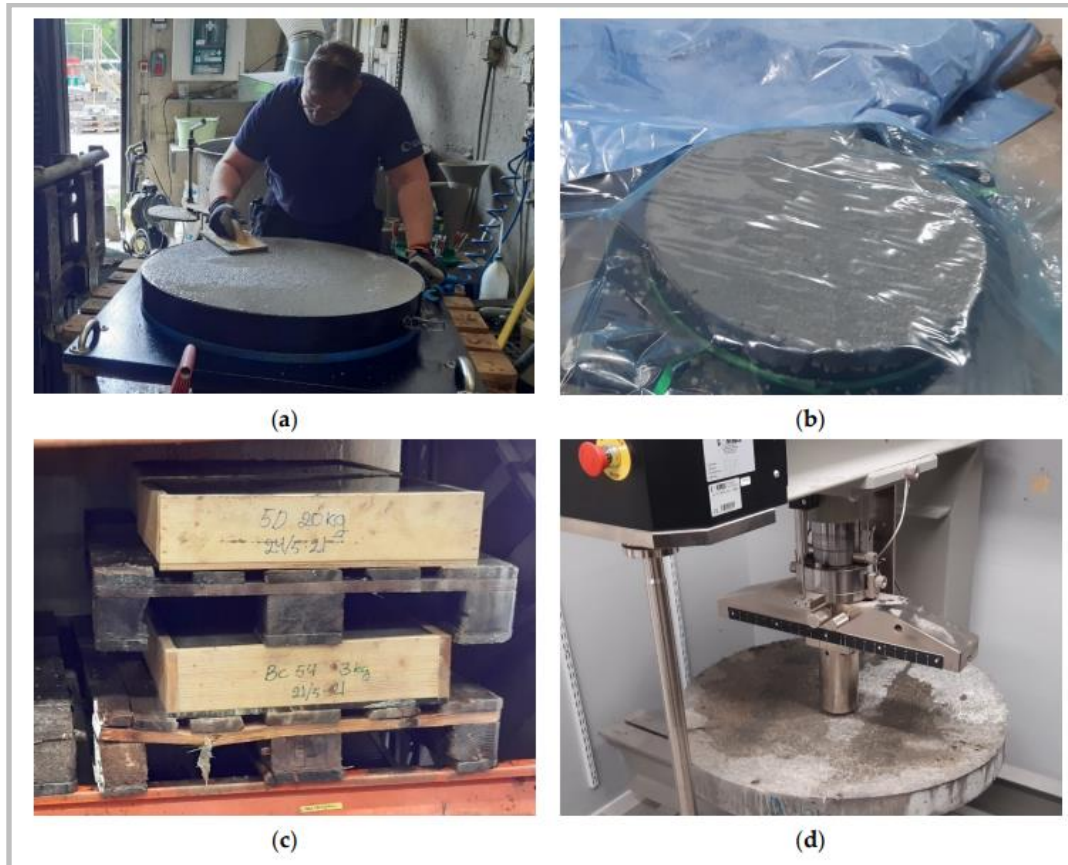
$$M_{Rd} = W \times f_{re}$$

όπου f_{re} είναι η παραμένουσα αντοχή κάμψης, εξαρτώμενη από την περιεκτικότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε ίνες.

Σε αυτή την περίπτωση του σχεδιασμού με τη χρήση αναλυτικών εξισώσεων είναι κάθε φορά απαραίτητες οι επί τόπου δοκιμές για να επαληθευτεί η σωστή τιμή της παραμένουσας σε κάμψη αντοχής f_{re} . Σύμφωνα με το πρότυπο EN 14487-1, πρέπει να ελέγχονται τουλάχιστον τρία δοκίμια για κάθε 500 έως 2000 m² εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Ο σχεδιασμός με αναλυτικές εξισώσεις μειονεκτεί στο ότι παρουσιάζει υψηλή διασπορά στα αποτελέσματα και καταλήγει σε συντηρητικές τιμές για την τιμή f_{re} οι οποίες, έχουν σαν αποτέλεσμα έναν κοστοβόρο σχεδιασμό και ένα υψηλό αποτύπωμα άνθρακα.

Επειδή οι σήραγγες αποτελούν έργα με χρόνο ζωής 100 ετών και άνω, οι ίνες πρέπει επίσης να είναι μακροπρόθεσμα ανθεκτικές και να διατηρούν τη φέρουσα

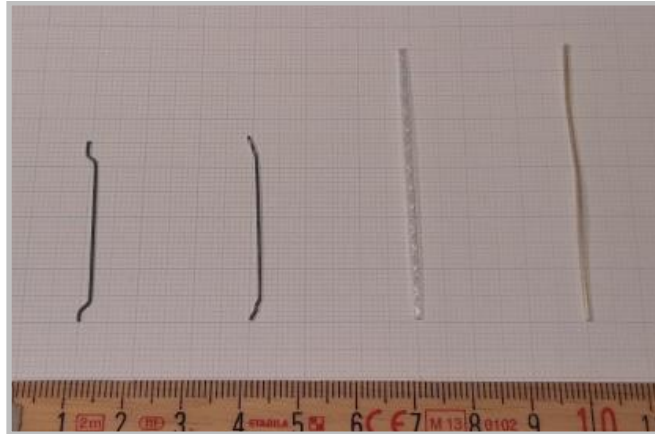
ικανότητά τους συν τω χρόνω παράλληλα με την εξέλιξη του φαινομένου του ερπυσμού ή της αποτόνωσης. Επομένως, ο σχεδιασμός της υποστήριξης από ινοπλισμένο εκτοξεύσιμο σκυρόδεμα καταλήγει να απαιτεί την εξεύρεση της βέλτιστης οικονομικής λύσης από έναν συνδυασμό συγκεκριμένης περιεκτικότητας σε ίνες, ορισμένου πάχους στρώσης εφαρμογής υλικού και συγκεκριμένης γεωμετρίας κανάβου αγκυρίων. Σημαντική είναι η συμβολή των εργαστηριακών δοκιμών.



Εικόνα 14: Προετοιμασία δοκιμών
 α-Προετοιμασία των δοκιμών, β-αποθήκευση του δείγματος, γ-αποθήκευση δειγμάτων κατά τη σκλήρυνση, δ-εργαστηριακή συσκευή δοκιμών
 ("Laboratory testing of shotcrete with fibres of steel, basalt or synthetic materials", Muralidharan Rengarajan, KTH royal institute of technology)



Εικόνα 15: Δοκίμιο έτοιμο για εκτέλεση δοκιμής και δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής με ακτινική ρωγμάτωση
 ("Laboratory testing of shotcrete with fibres of steel, basalt or synthetic materials", Muralidharan Rengarajan, KTH royal institute of technology)



Εικόνα 16: Ίνες που χρησιμοποιήθηκαν σε πειραματικές μετρήσεις και δοκιμές
Από αριστερά προς τα δεξιά: Dramix 3D, Dramix 4D, BarChip 54, Minibar
("Laboratory testing of shotcrete with fibres of steel, basalt or synthetic materials", Muralidharan Rengarajan, KTH royal institute of technology)

Κεφάλαιο 4: Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

4.1 Ο μηχανισμός ενίσχυσης

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα (SFRC) είναι όπως προαναφέρθηκε ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο δομικό υλικό. Στο παρόν κεφάλαιο θα εξεταστεί ο μηχανισμός βλάβης του σκυροδέματος και η επίδραση των ινών στο μηχανισμό ανάπτυξης ρωγμών.

Επίσης, λόγω του ότι το σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από εύκολη χύτευση, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, καλή αντοχή και σχετικά χαμηλό κόστος, όταν συνδυάζεται με διάφορα υλικά από χάλυβα, εμφανίζει σημαντικά αυξημένη δομική φέρουσα ικανότητα. Είναι επίσης απλό στη χρήση του κατά την κατασκευή, έχει συμπαγή δομή και υψηλή πρώιμη αντοχή, καθιστώντας το ιδανικό για την κατασκευή σηράγγων ιδιαίτερα σε δύσκολες γεωλογικές συνθήκες, παρουσιάζοντας μεγάλες ανοχές σε παραμορφώσεις και συγκλίσεις.

Άλλωστε, η κατασκευή σηράγγων σε πολύπλοκες γεωλογικές συνθήκες απαιτεί από το υλικό υποστήριξης να διαθέτει ενισχυμένη αντοχή σε εφελκυσμό και σε ρωγμάτωση και προδιαγραφές υδατοστεγανότητας.

Το σκυρόδεμα που ενισχύεται με την προσθήκη ινών τροποποιεί και βελτιώνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά τρόπο που αυξάνει την εφελκυστική του αντοχή, τις ανοχές σε παραμόρφωση και την ανθεκτικότητά του. Χαρακτηρίζεται από τις χρήσιμες στην κατασκευή ιδιότητες του συνηθισμένου σκυροδέματος, με ταυτόχρονα αυξημένη την αντίστασή του σε ρωγμάτωση, λόγω της παρουσίας χαλύβδινων ινών. Κατά συνέπεια, εμφανίζει και αυξημένο χρόνο ζωής σε σχέση με το απλό σκυρόδεμα.

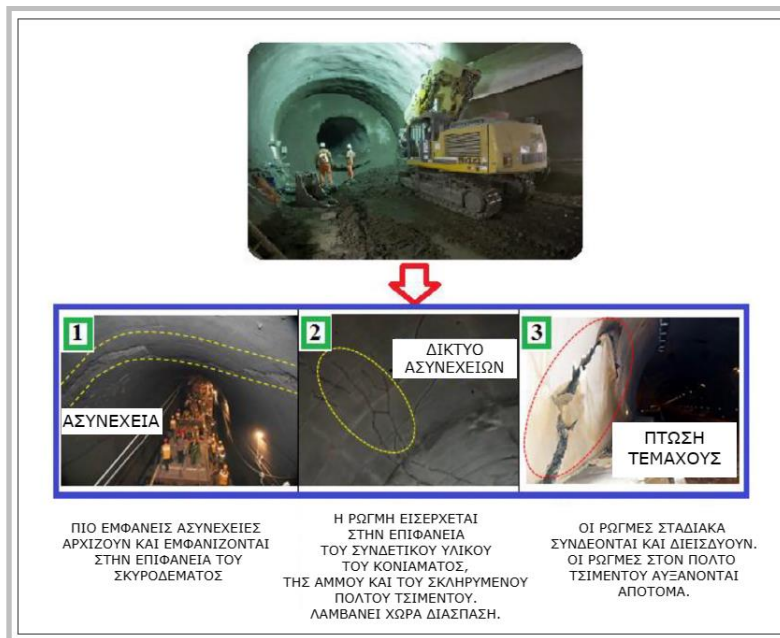
Το μείγμα του σκυροδέματος μπορεί να θεωρηθεί ως η σύνθεση από τρία τμήματα-φάσεις: ένα τμήμα που είναι η βάση, ένα τμήμα διασκορπισμένου υλικού και ένα συνδετικό τμήμα. Κατά την έκχυση, η ροή του σκυροδέματος και η συστολή ξήρανσης του πολτού περιορίζονται από τα συσσωματώματα, τα οποία δημιουργούν μια λανθάνουσα επιφάνεια σύνδεσης μεταξύ της βάσης και του υπόλοιπου διασκορπισμένου υλικού. Οι μηχανικές ιδιότητες των παραπάνω φάσεων - τμημάτων και των συνδέσεών τους που περιγράφονται επηρεάζουν και τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Αυτές οι συνδέσεις σταδιακά σχηματίζουν μικρορωγμές, οι οποίες αντιστοιχίζονται σε επιφάνειες αδυναμίας.

Το σκυρόδεμα φέρει πλήθος ρωγμών, αλλά και άλλων βλαβών, όπως εγκλείσματα σκωρίας, φυσαλίδες, οπές και φαινόμενα διαχωρισμού. Η συγκέντρωση τάσεων στο άκρο κάθε προϋπάρχουσας ρωγμής προκαλεί την περαιτέρω ρωγμάτωση του σκυροδέματος. Η έναρξη της αστοχίας του σκυροδέματος από τις μικρορωγμές αποδεικνύει ότι αποτελεί ένα ανομοιόμορφο υλικό με σημεία βλαβών, η έκταση των οποίων καθορίζεται και από την αντοχή και την ικανότητα του σκυροδέματος να παραμορφώνεται.

Με εξοπλισμό μεγαλύτερης ανάλυσης από ένα συνηθισμένο μικροσκόπιο έχει αποδειχθεί ότι το σκυρόδεμα φέρει ρωγμές χωρίς να υποβληθεί σε κάποιου είδους φόρτιση. Αυτές οι εν γένει ρωγμές αντιστοιχίζονται σε δύο κατηγορίες: στις τυχαία κατανεμημένες μικρορωγμές που συνδέονται άρρηκτα με την αντοχή του σκυροδέματος σε εφελκυσμό και θλίψη και σε συγκεκριμένες μακροσκοπικές ρωγμές συγκεκριμένης κατεύθυνσης που προσδίδουν χαρακτηριστικά ανισοτροπίας στο υλικό του σκυροδέματος.

Η τελική αστοχία του σκυροδέματος είναι η διαδικασία της έναρξης και επέκτασης των αρχικών μικρορωγμών, που δημιουργούν μεγαλύτερες ασυνέχειες, οι οποίες με τη σειρά τους καθιστούν το σκυρόδεμα ασταθές και τελικά επιρρεπές στην αστοχία. Κατά την εξέλιξη του φαινομένου της αστοχίας σκυροδέματος, διακρίνονται τρία επίπεδα με βάση τη δομή του υλικού και την εμμονή των ασυνεχειών. Το αρχικό επίπεδο αστοχίας αντιστοιχίζεται στην έναρξη πολλαπλών, βραδέως αναπτυσσόμενων και εκτεταμένων ασυνεχειών στη διεπαφή μεταξύ αδρανών και κονιάματος. Το επόμενο επίπεδο εξέλιξης της αστοχίας σκυροδέματος περιλαμβάνει

την αλλοίωση του συνδετικού υλικού του κονιάματος που αντιστοιχίζεται σε επέκταση της ρωγμάτωσης σε αυτό. Στο στάδιο αυτό ξεκινά ο διαχωρισμός των συστατικών άμμου και του πολτού τσιμέντου που έχει ήδη σκληρυνθεί. Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο της αστοχίας διαχωρίζεται πλέον το σκληρυμένο κονίαμα και οι ασυνέχειες συνενώνονται σταδιακά και συνδέονται πλέον μεταξύ τους, οδηγώντας σε απότομη αύξηση του ποσοστού των ασυνεχειών εντός του πολτού τσιμέντου. Διατηρώντας σταθερή φόρτιση, τελικά το σκυρόδεμα αστοχεί πλήρως.



Εικόνα 17: Εξέλιξη ρωγμάτωσης στην επένδυση σήραγγας (Τροποποιημένη εικόνα από αναφορά "The strengthening theory of steel fiber reinforced concrete and its application in tunnel engineering: A review", Junchao Yang, Yuanhang Zhang and Jian Huang, Journal of Engineered Fibers and Fabrics, Volume 19: 1–17, 2024)

Στα πλαίσια του περιορισμού εμφάνισης ρωγμάτωσης σε κατασκευές, επομένως και στο εσωτερικό του σκυροδέματος, έχει διερευνηθεί η επιρροή της ενσωμάτωσης ινών στο μείγμα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πριν την εφαρμογή του στο έργο. Η παρουσία των ινών από χάλυβα εντός του σκυροδέματος συμβάλλει στην αύξηση της αντίστασης του υλικού έναντι της διάδοσης των ασυνεχειών, λόγω των υψηλότερων μηχανικών χαρακτηριστικών σε σχέση με το υλικό που τις περιβάλλει και πιο συγκεκριμένα αναστέλλουν και καθυστερούν την ανάπτυξη μικρορωγμών στο σκυρόδεμα. Παράλληλα αυξάνουν την ολκιμότητά του και την αντοχή του σε κρούση και εφελκυσμό.

Σχετική έρευνα έχει αποδείξει ότι η ενσωμάτωση των ινών στο σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του νερού στα σημεία όπου δύναται να σημειωθεί απώλεια ύδατος και παρεμπόδιση της εσωτερικής μετακίνησης ύδατος, συρρικνώνοντας τους τριχοειδείς πόρους και μειώνοντας έτσι τις ενεργές τάσεις. Παράλληλα, το υψηλό μέτρο ελαστικότητας των χαλύβδινων ινών ενισχύει την πρόσφυση και τη μηχανική συνάφεια με το τσιμέντο, αυξάνοντας την εφελκυστική αντοχή του υλικού έναντι της ανάπτυξης ασυνεχειών, οπότε και μειώνοντας τελικά την εμφάνιση των μικρορωγμών όπως προαναφέρθηκε. Συγκεκριμένα, διαπερνώντας οι ίνες τις αρχικές μικρορωγμές στο εσωτερικό του σκυροδέματος και λόγω της πρόσφυσης που αναπτύσσεται στις διεπιφάνειες επαφής τους με το σκυρόδεμα, αναπτύσσεται ένα πεδίο τάσεων που αντιτίθεται στις συγκεντρωμένες τάσεις γύρω από τις ασυνέχειες, οπότε και αναστέλλει τη διάδοση και τη διαστολή των τελευταίων εντός του σκυροδέματος.

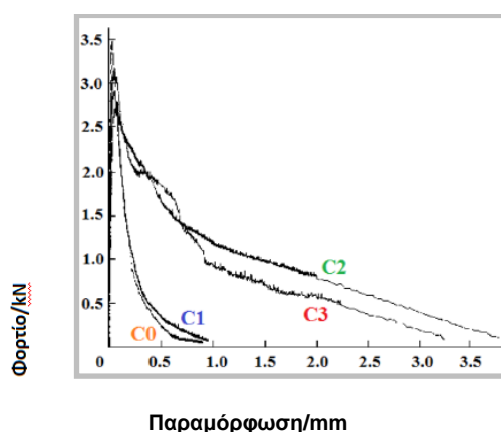
Περαιτέρω έρευνα (Yang, 2024) απέδειξε ότι η επίδραση της προσθήκης ινών στο σκυροδέμα εξαρτάται και από τη γεωμετρία τους και κυρίως από το μέγεθός τους (“size-effect”). Πιο συγκεκριμένα, η 28 ημερών αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος αναφοράς έχει οριστεί περίπου στα 60 MPa, με δύο είδη ινών χάλυβα, διαφορετικής διαμέτρου, ένα είδος με την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη διάμετρο ινών και το άλλο με μικρότερης διαμέτρου ίνες της τάξης των 0,17 mm. Όσον αφορά την ποσότητα ινών που ενσωματώνεται, ο αριθμός των λεπτότερων ινών ανά μονάδα όγκου είναι σημαντικά μεγαλύτερος σε σχέση με τον αριθμό των ινών μεγαλύτερης διαμέτρου, περιορίζοντας έτσι καλύτερα τη διάδοση των ασυνεχειών και υποβοηθώντας τη δημιουργία πρόσθετων λεπτότερων ρωγμών. Επίσης, αποδείχτηκε ότι οι ίνες από άνθρακα επιδρούν λιγότερο στην ανθεκτικότητα και στη σκληρότητα του σκυροδέματος σε σχέση με τις ίνες από χάλυβα.

Σε δοκιμές εργαστηρίου (Yang, 2024) εξετάστηκαν οι παρακάτω τέσσερις τύπους ινοπλισμένων σκυροδεμάτων, με διαφορετική ποσότητα ινών ανά περίπτωση:

ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ									
Κωδικός μείγματος	Ποσοστό μείγματος (kg/m ³)				mw/mb	Υπερρρευτοποιητής (kg/m ³)	Ίνες από άνθρακα	Ίνες από χάλυβα μεγαλύτερης διαμέτρου	Ίνες από χάλυβα μικρότερης διαμέτρου %
	Τσιμέντο	Πυριτική παυτάλη	Χαλίκι	Άμμος					
C0	485	25	1077	688	0,35	2			
C1	485	25	1077	688	0,35	4	0,5		
C2	485	25	1077	688	0,35	2,5		0,5	
C3	485	25	1077	688	0,35	3			0,5

Πίνακας 4: Σύσταση τεσσάρων τύπων ινοπλισμένου σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν σε εργαστηριακές δοκιμές (“The strengthening theory of steel fiber reinforced concrete and its application in tunnel engineering: A review”, Junchao Yang, Yuanhang Zhang and Jian Huang, Journal of Engineered Fibers and Fabrics, Volume 19: 1–17, 2024)

Η σχέση μεταξύ του φορτίου κάμψης και παραμόρφωσης, παρουσιάστηκε μέσω του παρακάτω διαγράμματος:



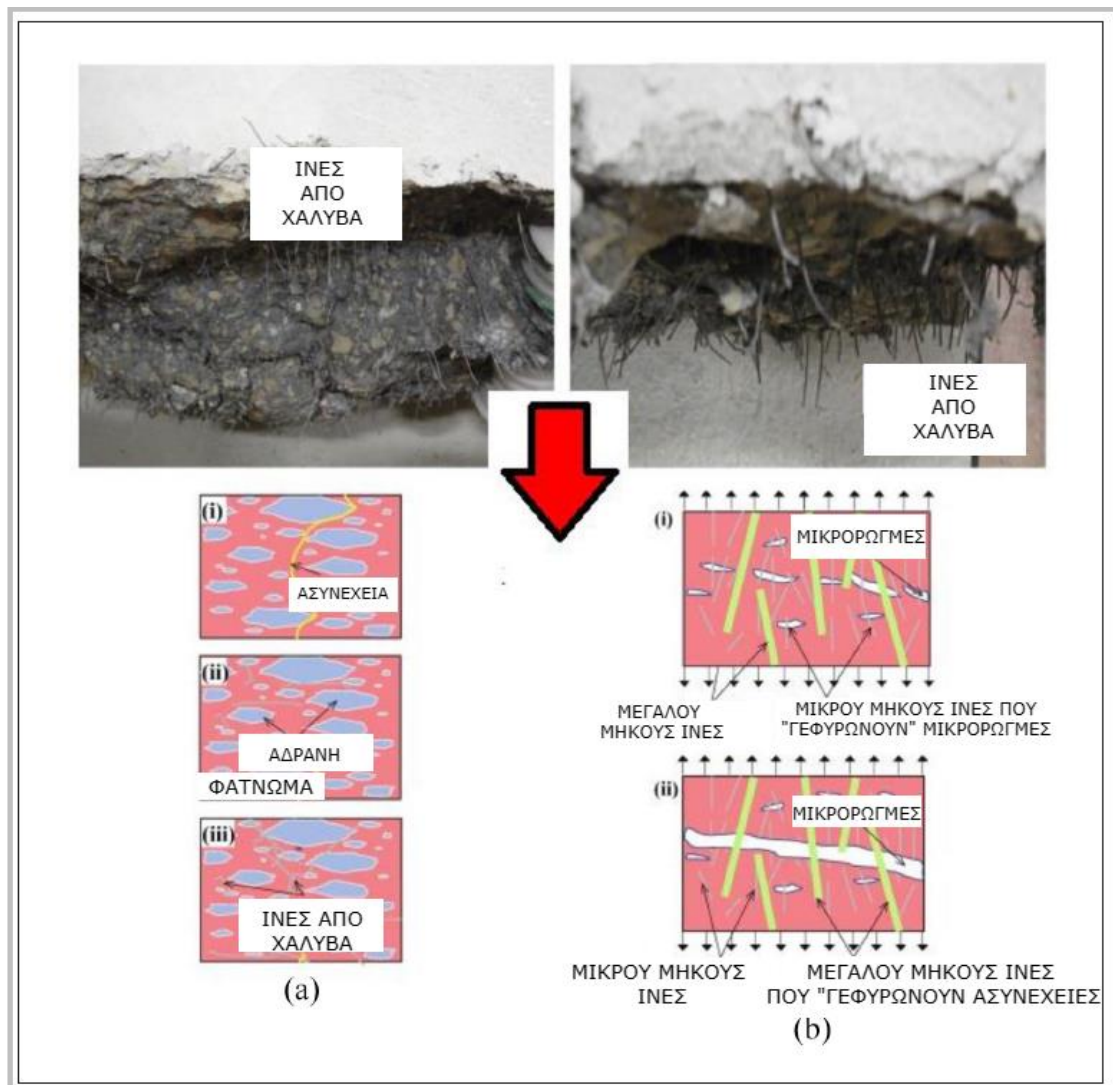
Εικόνα 18: Διάγραμμα καμπτικού φορτίου – παραμόρφωσης διαφόρων τύπων ινοπλισμένου σκυροδέματος (“The strengthening theory of steel fiber reinforced concrete and its application in tunnel engineering: A review”, Junchao Yang, Yuanhang Zhang and Jian Huang, Journal of Engineered Fibers and Fabrics, Volume 19: 1–17, 2024)

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι για το ίδιο επιβαλλόμενο φορτίο, τη μικρότερη παραμόρφωση εμφανίζει ο τύπος σκυροδέματος χωρίς την ενσωμάτωση ινών στο εσωτερικό του μείγματος ή αυτός με ενσωματωμένες ίνες άνθρακα, ενώ τη

μεγαλύτερη παραμόρφωση – άρα και ολκιμότητα- εμφανίζει ο τύπος με ενσωματωμένες χαλύβδινες ίνες.

Επίσης, η ίδια παραμόρφωση αναπτύσσεται για μικρότερο επιβαλλόμενο φορτίο στον τύπο σκυροδέματος με ενσωματωμένες χαλύβδινες ίνες μικρότερης διαμέτρου, γεγονός που σημαίνει ότι αυτός ο τύπος σκυροδέματος παραμορφώνεται πιο άμεσα και παρουσιάζει μεγαλύτερη ολκιμότητα, επομένως και μεγαλύτερη αντοχή έναντι ψαθυρής θραύσης και εν τέλει επικείμενης αστοχίας του δομικού υλικού.

Επομένως, η κύρια λειτουργία των ινών χάλυβα, βελονοειδούς σχήματος, είναι ο περιορισμός των μικρορωγμών στο σκυρόδεμα, ακόμη και αυτών που δεν είναι εύκολα ορατές με απλό οπτικό έλεγχο, καθώς προχωρά η σκλήρυνση του μείγματος. Οι μικρορωγμές αυτές κατανέμονται σε όλη την έκταση της διεπιφάνειας μεταξύ των μεγάλου μεγέθους αδρανών και των κόκκων άμμου, εντός του σκυροδέματος. Όταν το μήκος της μικρορωγμής επεκτείνεται και η εμμονή της ξεπερνά την απόσταση των ινών, η ίνα λειτουργεί ως «γέφυρα» και μεταφέρει την τάση κατά μήκος της ασυνέχειας αυτής.



Εικόνα 19: Ο μηχανισμός στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα για την πρόληψη της διάδοσης ρωγμών (α) στα συστατικά μείγματος και (β) στη γεωμετρία μικρορωγμών, ασυνεχειών και ινών από χάλυβα (Τροποποιημένη εικόνα από αναφορά "The strengthening theory of steel fiber reinforced concrete and its application in tunnel engineering: A review", Junchao Yang, Yuanhang Zhang and Jian Huang, Journal of Engineered Fibers and Fabrics, Volume 19: 1–17, 2024)

Ο μηχανισμός αυτός έχει ως αποτέλεσμα ένα πιο συνεχές και ομοιόμορφο πεδίο καταπόνησης στο εσωτερικό του σκυροδέματος, μειώνοντας τη συγκέντρωση τάσεων στο άκρο κάθε μικρορωγμής και περιορίζοντας έτσι την περαιτέρω επέκτασή τους. Ωστόσο, όταν το μήκος της μικρορωγμής είναι μικρότερο από την απόσταση των ινών, η ίνα έχει το ρόλο του εμποδίου για την επέκταση της μικρορωγμής, αναγκάζοντάς τη να αλλάξει την κατεύθυνση επέκτασης της εμμονής της ή να δημιουργήσει πρόσθετες λεπτότερες ρωγμές μέσω της ίνας. Ο εν λόγω μηχανισμός καθιστά τη διεύρυνση και διάδοση των μικρορωγμών μία διαδικασία με μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας, επομένως και πιο δύσκολη να ολοκληρωθεί. Υπό την προϋπόθεση ότι προϋπάρχουν μικρορωγμές και διάσπαρτα μικροκενά στο εσωτερικό του σκυροδέματος, μετά την επιβολή φορτίου, οι περιοχές συγκέντρωσης τάσεων μετατοπίζονται πλέον σε γειτονικά σημεία από αυτά που προαναφέρθηκαν και αποτελούν διάσπαρτες ενδεικτικές «ασυνέχειες» στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Αν το επίπεδο συγκέντρωσης τάσεων σε αυτά τα σημεία ξεπερνά τη φέρουσα ικανότητα του υλικού, πραγματοποιείται μία ταχεία επέκταση της εμμονής της αρχικής ασυνέχειας, με αποτέλεσμα την ξαφνική θραύση να πραγματοποιείται ακόμη και όταν το εξωτερικό επιβαλλόμενο φορτίο είναι μικρότερο από την φέρουσα ικανότητα του υλικού.

Επομένως, η ενσωμάτωση των χαλύβδινων ινών στο σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσης τάσεων στα άκρα των μικρορωγμών, οπότε και ο κύριος μηχανισμός τους καταλήγει να έχει «προληπτική» δράση επί του φαινομένου της διάδοσής τους.

Αρκετοί ερευνητές έχουν διερευνήσει τη συσχέτιση μεταξύ των διαφόρων τιμών περιεκτικότητας σε ίνες χάλυβα CF50 και της συστολής ξήρανσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος. (Yang, 2024) Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι ίνες χάλυβα μπορούν να εμποδίσουν αποτελεσματικά τη συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, το σκυρόδεμα, που περιέχει συγκεκριμένο ποσοστό όγκου 1,5% χαλύβδινων ινών εμφανίζει ένα χαρακτηριστικό ποσοστό συστολής ξήρανσης σε διαφορετικές ηλικίες σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα και η ικανότητά του να μειώσει τη συστολή ξήρανσης μπορεί να αυξηθεί περίπου 20%. Επομένως η ενσωμάτωση ινών από χάλυβα ενισχύουν σημαντικά την αντίσταση του σκυροδέματος σε συστολή ξήρανσης.

Στην πραγματικότητα, οι ίνες χάλυβα μπορούν να εμποδίσουν την εμφάνιση ασυνεχειών στο σκυρόδεμα, αλλά και να αυξήσουν την παραμορφωσιμότητά του. Στα παρακάτω σκαριφήματα παρουσιάζεται δοκίμιο ινοπλισμένου σκυροδέματος που υποβάλλεται σε κάμψη, δημιουργούνται πολυάριθμες διάσπαρτες ρωγμές και οι ίνες συνεχίζουν να αντιστέκονται στην εφελκυστική δράση του εξωτερικά επιβαλλόμενου φορτίου:

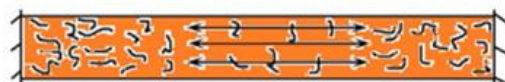
A) το σκυρόδεμα συστέλλεται και η αντοχή εφελκυσμού ενεργοποιείται στο εσωτερικό του



B) Όταν η τάση εφελκυσμού του απλού σκυροδέματος φτάσει στην αντοχή σε εφελκυσμό, μπορεί να εμφανιστούν μεγάλες ρωγμές και ασυνέχειες



Γ) Συστολή ξήρανσης ινοπλισμένου σκυροδέματος, εφελκυστική τάση των ινών στις ρωγμές



Δ) Ρωγμές εμφανίζονται όταν η τάση εφελκυσμού στο σκυρόδεμα φτάσει στην αντοχή εφελκυσμού του και οι ίνες που διασχίζουν τη ρωγμή μεταδίδουν την αντοχή εφελκυσμού στο μη ραγισμένο τμήμα, δημιουργώντας μια νέα μικρορωγμή, αλλά το ινοπλισμένο σκυρόδεμα δεν θραύεται. (10)

Με αυτό τον τρόπο οι ίνες απορροφούν περισσότερη ενέργεια από το έργο που παράγεται από το εξωτερικά επιβαλλόμενο φορτίο και έτσι ενισχύεται η ανθεκτικότητα του δομικού υλικού έναντι μεγαλύτερων φορτίσεων. Η καμπτική αντοχή της αρχικής ρωγμής αποτελεί το δείκτη της φέρουσας ικανότητας του σκυροδέματος για την έναρξη της ρωγμάτωσης σε αυτό.

Όταν για παράδειγμα η περιεκτικότητα σε ίνες χάλυβα φτάνει τα 160 kg/m^3 το φορτίο έναρξης ρωγμάτωσης αυξάνεται περίπου 100% και συνεχίζει να αυξάνεται με γεωμετρική πρόοδο με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες. Αντίθετα, η ενσωμάτωση υπερβολικής ποσότητας ινών μπορεί να δυσχεράνει τη διασπορά τους, προκαλώντας αρνητικά αποτελέσματα σχετικά με τη συστολή ξήρανσης και την αντοχή σε ρωγμάτωση του σκυροδέματος.

Οι ίνες χάλυβα διασκορπίζονται ομοιόμορφα στο φάτνωμα του σκυροδέματος πριν από τη δημιουργία ασυνεχειών. Με την εφαρμογή εξωτερικού φορτίου που οδηγεί σε ρωγμάτωση, οι χαλύβδινες ίνες μπορούν να εμποδίσουν αποτελεσματικά το σχηματισμό μικρορωγμών, ενισχύοντας έτσι την αρχική αντοχή έναντι ρωγμάτωσης. Μόλις συμβεί η ρωγμή, μερικές χαλύβδινες ίνες «γεφυρώνουν» τη ρωγμή και παραλαμβάνουν τη δύναμη που μεταδίδεται μέσω του σκυροδέματος, επιβραδύνοντας τη διαδικασία διάδοσης των ρωγμών. Αυτό μετριάζει σημαντικά τα φαινόμενα συγκέντρωσης τάσεων και ενισχύει την ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού.

Οι βασικές αρχές που διέπουν το μηχανισμό στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα προέρχονται από τις θεωρίες των συνθετικών ινοπλισμένων και των μεταλλικών ινοπλισμένων υλικών. Υπάρχουν δύο βασικά θεωρητικά πλαίσια που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη του μηχανισμού του ινοπλισμένου σκυροδέματος: η σύνθετη θεωρία μηχανικής και η θεωρία απόστασης ινών. Η σύνθετη θεωρία μηχανικής μελετά τις ιδιότητες, τη συμπεριφορά και τη χρήση των σύνθετων υλικών, δύο ή περισσότερων ξεχωριστών συστατικών, τα οποία σε συνδυασμό προσφέρουν βελτιωμένες ιδιότητες σε σύγκριση με τα επιμέρους συστατικά. Η αρχή της θεωρίας της απόστασης των ινών βασίζεται στην παραδοχή της ομοιόμορφης κατανομής των ινών, έτσι ώστε η αντίσταση στη ρωγμή να είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη μέση απόσταση.

Αυτές οι θεωρίες ακολουθούν διαφορετική οπτική για τον ρόλο της ενίσχυσης των ινών χάλυβα στο σκυρόδεμα, αλλά τελικά φτάνουν σε αποτελέσματα που είναι σε συμφωνία. Άλλες θεωρίες μπορούν να θεωρηθούν ως επεκτάσεις ή εναλλαγές αυτών των δύο βασικών θεωριών. Στη σύγχρονη έρευνα, έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στο συσχετισμό της μικροδομής των ινών χάλυβα με τη μακροσκοπικό μηχανισμό λειτουργίας τους στο εσωτερικό το σκυροδέματος. (Yang, 2024)

4.2 Θεωρία σύνθετης μηχανικής

Οι βασικές παραδοχές της θεωρίας σύνθετης μηχανικής είναι:

- ❖ Οι ίνες είναι μόνιμα και ομοιόμορφα διατεταγμένες παράλληλα και ευθυγραμμισμένα με την κατεύθυνση της δύναμης.
- ❖ Οι ίνες συνδέονται με το συμπαγές υπόστρωμα, και τα δύο παραμορφώνονται όμοια με την ίδια τροπή: $\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f$, με μηδενική σχετική μετακίνηση μεταξύ τους.
- ❖ Τόσο οι ίνες όσο και το υπόστρωμα παραμορφώνονται ελαστικά με όμοιες πλευρικές παραμορφώσεις.

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, το φορτίο που εφαρμόζεται στο μείγμα δίνεται από τη σχέση:

$$f_c = \sigma_c * A_c$$

Το φορτίο που εφαρμόζεται στο σκελετό του δομικού υλικού δίνεται από τον τύπο:

$$f_m = \sigma_m * A_m$$

Το φορτίο που εφαρμόζεται στις ίνες δίνεται από τον τύπο:

$$f_f = \sigma_f * A_f$$

Στους τύπους A είναι το εμβαδόν διατομής, σ είναι η εφαρμοζόμενη τάση, ενώ οι δείκτες c, m, f αντιπροσωπεύουν το μείγμα, το σκελετό και τις ίνες του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

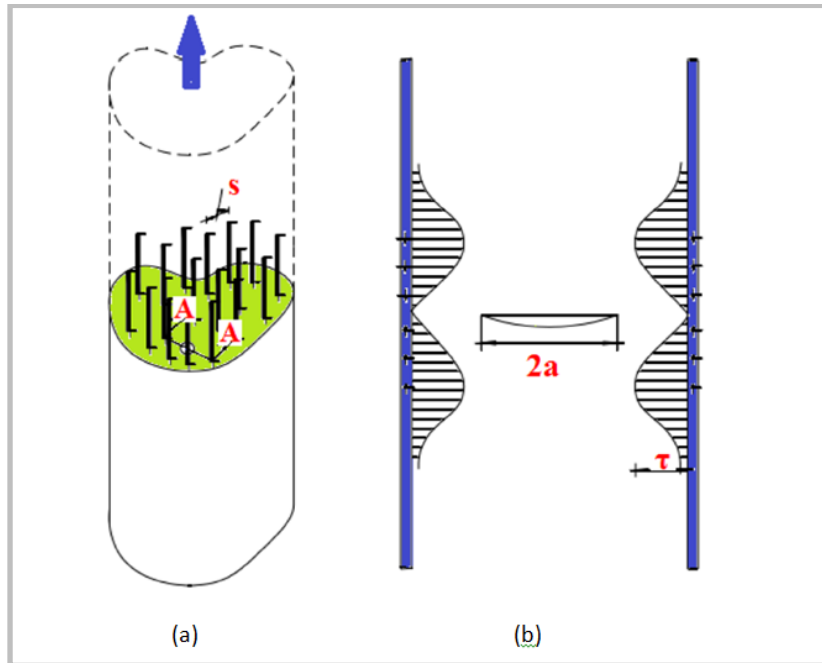
Μελέτες έχουν αποδείξει ότι στην ελαστική περιοχή, οι ίνες που ενσωματώνονται σε ένα σύνθετο μείγμα δομικού υλικού παραμορφώνονται το ίδιο με το σκελετό του μείγματος. Οπότε και ανεξάρτητα από τα συστατικά υλικά, εάν η κατεύθυνση του φορτίου είναι ευθυγραμμισμένη με τον προσανατολισμό των ινών, η τάση ή το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού είναι στενά συνδεδεμένα με την τάση ή το μέτρο ελαστικότητας κάθε συστατικού υλικού (ή φάσης) και την αντίστοιχη μεταβολή όγκου. Δεδομένου ότι το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή των χαλύβδινων ινών είναι σημαντικά υψηλότερες από αυτές του σκυροδέματος, ο ενισχυτικός δομικός ρόλος του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι πλέον σαφής.

4.3 Θεωρία απόστασης ινών

Η θεωρία της απόστασης ινών εξετάζει την απόσταση μεταξύ τους ως παράγοντα που επηρεάζει το μηχανισμό ενίσχυσης του σκυροδέματος από αυτές. Η απόσταση μεταξύ των ινών επηρεάζει τη μεταφορά τάσεων και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Επομένως και τα χαρακτηριστικά του φαινομένου της ρωγμάτωσης, καθώς και την τελική αντοχή του υλικού. Η θεωρία βασίζεται σε παραδοχές που ορίζουν ότι το σκυροδέμα είναι ισότροπο και ομοιογενές υλικό, ενώ οι ίνες κατανέμονται ομοιόμορφα και τυχαία. Η θεωρία της απόστασης ινών προτείνει ένα θεωρητικό προσομοίωμα που υπολογίζει την τελική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος σχετικά με την απόσταση και την περιεκτικότητα ινών, καθώς και άλλες παραμέτρους. Η θεωρία αυτή εφαρμόστηκε από τους Samy, Mangat, Hannant, Naaman et al (Yang,2024) και άλλους και βασίστηκε στις αρχές της μηχανικής για τη γραμμική ελαστική θραύση.

Πιο συγκεκριμένα, αποδείχτηκε ότι προκειμένου να βελτιωθεί η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, που είναι ψαθυρό υλικό, είναι απαραίτητο να μειωθούν στο ελάχιστο το μέγεθος και την ποσότητα των εσωτερικών τοπικών βλαβών που φέρει, ώστε να μειωθεί η φόρτιση στο πεδίο των τάσεων στα άκρα των ασυνεχειών. Αυτό επιτυγχάνεται μετά την ενσωμάτωση των ινών στο ψαθυρό υλικό του σκυροδέματος, με τις οποίες ενισχύεται η φέρουσα ικανότητά του έναντι της έναρξης και της διάδοσης της ρωγμάτωσης, τόσο πριν όσο και μετά την επιβολή της φόρτισης.

Ο Romualdi (Yang,2024) εξέτασε την περίπτωση του συνεχούς ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες ενσωματωμένες ομοιόμορφα προς την ίδια κατεύθυνση, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 20: Μηχανικό προσομοίωμα περιορισμού ρωγμάτωσης σε ψαθυρό υλικό σκυροδέματος ενισχυμένου με ίνες (a) προσομοίωμα με ενσωματωμένες ίνες, (b) τομή A-A

("The strengthening theory of steel fiber reinforced concrete and its application in tunnel engineering: A review", Junchao Yang, Yuanhang Zhang and Jian Huang, Journal of Engineered Fibers and Fabrics, Volume 19: 1–17, 2024)

Η απόσταση των ινών είναι S , η ακτίνα της ασυνέχειας είναι a και αυτή εμφανίζεται στο κέντρο της περιοχής που περικλείεται από τις ίνες. Υπό εφελκυστική τάση, αναπτύσσεται μία κατανομή τάσης τ , γύρω από τις ίνες που περικλείουν την ασυνέχεια, η οποία παράγει μία αντίθετη τάση στο άκρο της ρωγμής, οπότε και μειώνει τη δράση των συγκεντρωμένων τάσεων σε αυτά τα σημεία, περιορίζοντας την περαιτέρω διάδοση της ασυνέχειας. Στη συνέχεια, εκτελέστηκαν καμπτικές και εφελκυστικές δοκιμές (Yang, 2024) στην κατεύθυνση των ινών χάλυβα των δοκιμών και αποδείχθηκε ότι η ανθεκτικότητα του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος καθορίζεται από τη μέση απόσταση των ινών. Στη συνέχεια, οι Romualdi και Mandel εφάρμοσαν αυτές τις δοκιμές σε ομοιόμορφα κατανεμημένες με χαοτικό τρόπο ίνες. Τα πειραματικά αποτελέσματα ήταν σύμφωνα με την θεωρητική ανάλυση, αποδεικνύοντας έτσι την αξιοπιστία της θεωρίας απόστασης ινών.

Ο Romualdi πρότεινε η εφελκυστική αντοχή των ινών χάλυβα του ινοπλισμένου σκυροδέματος να είναι αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της απόστασης των ινών. Οι εργαστηριακές δοκιμές απέδειξαν ότι η μέγιστη απόσταση των ινών για τη βελτίωση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος ήταν 0,5 ίντσες (1,27 cm). Αντίθετα, όταν η απόσταση των ινών είναι μικρότερη από 0,3 ίντσες (0,76 cm), η εφελκυστική αντοχή αυξάνεται απότομα. (Yang, 2024)

Η θεωρία της απόστασης ινών είναι μια εμπειρική θεωρία που εφαρμόζεται στο σκυροδέμα με ίνες χάλυβα. Ωστόσο, έχει περιορισμούς καθώς παραβλέπει την επίδραση του μήκους της ίνας στην τελική ενίσχυση του σκυροδέματος. Διάφορες θεωρίες ινοπλισμένου σκυροδέματος και πειραματικές αναλύσεις δεδομένων δείχνουν ότι η ενίσχυση που προσφέρει η ενσωμάτωση των ινών χάλυβα στο σκυροδέμα εξαρτάται και από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της αντοχής του μείγματος τσιμέντου, της αναλογίας μήκους προς διάμετρο ινών χάλυβα (l/d), του ποσοστού κατά όγκο (% κ.ο.) ινών χάλυβα στο δομικό υλικό, της συνάφειας μεταξύ χαλύβδινων ινών και μείγματος και της κατανομής και του προσανατολισμού των χαλύβδινων ινών στο μείγμα.

4.4 Συμπεράσματα σχετικά με το σχεδιασμό και την εφαρμογή του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος στη μόνιμη επένδυση σηράγγων

- ❖ Η προσθήκη κατάλληλης ποσότητας χαλύβδινων ινών στο σκυρόδεμα μπορεί να ενισχύσει την αντοχή και την ανθεκτικότητά του εμποδίζοντας το σχηματισμό και τη διάδοση του φαινομένου της ρωγμάτωσης. Κατά συνέπεια, το σκυρόδεμα επιδεικνύει ένα είδος «αποσκληρυμμένης συμπεριφοράς», δηλαδή μεγαλύτερη αντοχή έναντι ρωγμάτωσης και έναντι κόπωσης υπό συνεχόμενη φόρτιση, καθώς και αύξηση ολκιμότητας.
- ❖ Η υπάρχουσα θεμελιώδης θεωρία του οπλισμένου σκυροδέματος από χαλύβδινες ίνες (SFRC) είναι μια επέκταση και εφαρμογή ενισχυμένου σκυροδέματος με πλαστικές ίνες και ομοίως με μεταλλικές ίνες. Ο μηχανισμός ενίσχυσης του SFRC εξηγείται κυρίως από δύο βασικές θεωρίες: τη θεωρία σύνθετης μηχανικής και τη θεωρία απόστασης ινών. Αυτές οι θεωρίες εξηγούν την ενισχυτική επίδραση των ινών χάλυβα στο σκυρόδεμα από διαφορετικές οπτικές γωνίες, αλλά τα συμπεράσματά τους είναι μεταξύ τους σε συμφωνία.
- ❖ Άλλες θεωρίες μπορεί να θεωρηθούν ως εξελιγμένες των δύο προηγούμενων θεωριών και βασίζονται σε αυτές. Παρά τις πολυάριθμες μελέτες σχετικά με τον μηχανισμό ενίσχυσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος από ίνες χάλυβα, η πολυπλοκότητά του οφείλεται στο ότι το δομικό αυτό υλικό αποτελείται από παραπάνω από μία φάσεις, είναι πολυσύνθετο και ετερογενές. Επομένως, η φύση του καθιστά δύσκολη την καθιέρωση μιας ολοκληρωμένης θεωρίας που να εξετάζει το αποτέλεσμα των διαφόρων μεθόδων κατασκευής, των διαφορετικών σχημάτων των ινών χάλυβα και των πιο χονδροκόκκων αδρανών που απαρτίζουν την κοκκομετρική καμπύλη του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται. Ως εκ τούτου, ο μηχανισμός ενίσχυσης του σκυροδέματος με ενσωμάτωση ινών χάλυβα είναι ακόμη υπό συζήτηση, ανάπτυξη και βελτίωση στην παγκόσμια επιστημονική κοινότητα.
- ❖ Οι ιδιότητες του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πληρούν τις απαιτήσεις που ορίζει η νέα Αυστριακή μέθοδος διάνοιξης σηράγγων και χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές χώρες. Εκτός από την ενίσχυση της μόνιμης υποστήριξης σήραγγας, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα σε συνδυασμό με οπλισμό από ράβδους χάλυβα, μειώνει την απαιτούμενη ποσότητα του χαλύβδινου οπλισμού, οπότε και μειώνει το κόστος των απαιτούμενων πόρων σε υλικά και εργασία για την ολοκλήρωση των αντίστοιχων τεχνικών έργων.
- ❖ Η ποσότητα και το μέγεθος των ινών χάλυβα μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης του σκυροδέματος στο οποίο ενσωματώνονται. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι η αντοχή του κονιάματος, το σχήμα των ινών, η επιλογή των πρόσθετων στο μείγμα κονιάματος, η εφαρμοζόμενη τεχνολογία κατά την ανάμειξη και εφαρμογή του υλικού. Ο βαθμός επιρροής των προαναφερομένων ποικίλλει και τα αποτελέσματα είναι αλληλένδετα μεταξύ τους. Παρόλα αυτά είναι δύσκολο να καθιερώσει δοκιμή που να περιγράφει πλήρως τις μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος λαμβάνοντας υπόψη όλους τους ανωτέρω παράγοντες, ιδίως στο πλαίσιο της εφαρμογής του ως μόνιμης υποστήριξης σήραγγας. Λόγω των περιορισμών που τίθενται στην εκάστοτε κατασκευή, στον εξοπλισμό και στην τεχνολογία των εργαστηριακών δοκιμών, η έρευνα σε αυτόν τον τομέα θεωρείται ακόμη και στις ημέρες μας ανεπαρκής.
- ❖ Παρά το γεγονός ότι πολυάριθμες πειραματικές δοκιμές και αντίστοιχες αναλύσεις έχουν αποδείξει την αυξημένη ολκιμότητα και την ικανότητα καθυστέρησης και αποτροπής διάδοσης της ρωγμάτωσης του εκτοξευόμενου

σκυροδέματος με ενσωματωμένες ίνες χάλυβα (SFRC), παραμένει επιτακτική ανάγκη η συνδυαστική ενσωμάτωση μικρής ποσότητας ράβδων οπλισμού από χάλυβα κυρίως σε συγκεκριμένα σημεία της διατομής μόνιμης επένδυσης σήραγγας λόγω της ανομοιόμορφης πρακτικά κατανομής των χαλύβδινων ινών στο SFRC. Δυστυχώς, δεν υπάρχουν καθιερωμένα και κοινώς αποδεκτά πρότυπα αναφοράς, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη διεξοδική διερεύνηση της ομοιομορφίας του SFRC στη διαδικασία εκτόξευσης και εφαρμογής του.

- ❖ Η ενσωμάτωση χαλύβδινων ινών στο σκυρόδεμα έχει αποδειχθεί από πολυάριθμα πειράματα και τεκμηριωμένες πηγές ότι έχει ως αποτέλεσμα την διεύρυνση του πεδίου εφαρμογής των εσωτερικών τάσεων, οπότε και τη μείωση της συχνότητας εμφάνισης εσωτερικών ασυνεχειών στις κατασκευές που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, ο συνδυασμός χαλύβδινων ράβδων οπλισμού και ινών από το ίδιο υλικό μπορεί να μειώσει τη χρήση χάλυβα, καθιστώντας την μέθοδο αυτή μία από αυτές που κατά κύριο λόγο προτιμούνται από τον κατασκευαστικό κλάδο. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μόνιμη υποστήριξη σήραγγας, χρειάζεται να διερευνηθεί περαιτέρω η ενίσχυση των ασθενέστερων σημείων των κατασκευαστικών αρμών και η ανθεκτικότητα του SFRC στα σημεία αυτά έναντι σεισμικής φόρτισης.

Κεφάλαιο 5: Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως μόνιμη επένδυση στην κατασκευή σηράγγων εκτίθεται σε διάφορους εξωτερικούς φυσικούς ή χημικούς παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την ανθεκτικότητά του. Η ανασταλτική επίδραση των χαλύβδινων ινών στην εξέλιξη του φαινομένου της ρωγμάτωσης του σκυροδέματος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ανοίγματος των ρωγμών και της βλάβης που προκαλούν ορισμένοι από τους διαβρωτικούς παράγοντες (π.χ. ιόντα χλωρίου στα υπόγεια ύδατα) στο σκυρόδεμα, οπότε και τη βελτίωση της ανθεκτικότητας του υλικού που χρησιμοποιείται στην επένδυση της σήραγγας.

Η γνώση των παραγόντων υποβάθμισης της ποιότητας του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος καθώς και του τρόπου δράσης τους σε αυτό είναι ζωτικής σημασίας, ώστε να εφαρμόζονται στρατηγικές πρόληψης και προστασίας του δομικού υλικού και να παρατείνεται ο χρόνος ζωής του, επομένως και των έργων στα οποία εφαρμόζεται.

Η υποβάθμιση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της προσωρινής επένδυσης μπορεί να επηρεάσει άμεσα την ανθεκτικότητα της μόνιμης επένδυσης, εφόσον το υλικό της προσωρινής επένδυσης βρίσκεται σε άμεση επαφή με τον περιβάλλοντα βράχο και είναι ο πρώτος δέκτης του ενδεχόμενου διηθούμενου ύδατος. Για αυτό το λόγο σε υποστήριξη διπλού κελύφους εγκαθίστανται υδατοστεγανές επενδύσεις μεταξύ μόνιμης και προσωρινής επένδυσης, όπως προαναφέρθηκε. Σε βάθος χρόνου όμως, αυτές οι υδατοστεγανές επενδύσεις μπορούν να καταστούν εύθραυστες και να μην ανταποκρίνονται στο ρόλο για τον οποίον τοποθετήθηκαν. Σε κάθε περίπτωση, εάν η στρώση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της μόνιμης επένδυσης δεν προστατεύεται επαρκώς, τίθεται σε ενδεχόμενο κίνδυνο η ακεραιότητα του υλικού και επομένως και η ασφαλής λειτουργία του έργου σε βάθος χρόνου.

Όλα τα παραπάνω οδήγησαν στη μελέτη της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος και των περαιτέρω εφαρμογών του για κατασκευαστικούς, οικονομικούς, περιβαλλοντολογικούς λόγους, αλλά κυρίως για λόγους ασφαλείας. Ειδικά για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και με βάση τη γνώση για το σκυρόδεμα γενικότερα, λαμβάνονται ταυτόχρονα υπόψη ο σχεδιασμός σύστασης του μείγματος, οι ιδιότητές του, οι μέθοδοι δοκιμών και οι αρχές των Προτύπων και Κανονισμών. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω:

- ❖ Η διαδικασία σκυροδέτησης, που καθορίζει το βαθμό συμπίεσης, δηλαδή τη μικροδομή του δομικού υλικού. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία σκυροδέτησης είναι η επιλογή της μεθόδου εφαρμογής (μηχανοποιημένη ή χειροκίνητη), η εμπειρία του χειριστή του ακροφύσιου, η πίεση του πεπιεσμένου αέρα, όπως και η ποσότητα των πρόσμικτων στο μείγμα.
- ❖ Η χρήση επιταχυντών (π.χ. πυριτικά), ρευστοποιητών και υπερευστοποιητών (π.χ. υδροξυκαρβοξυλικά και πολυκαρβονικά οξέα και τα άλατά τους), που επηρεάζει την αντλησιμότητα του μείγματος, την καθυστέρηση σκλήρυνσης μεταξύ ανάμειξης και εκτόξευσης και τη μικροδομή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
- ❖ Τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας εφαρμογής (π.χ. παρουσία ύδατος, τύπος πετρώματος, προηγούμενη στρώση εκτοξευμένου σκυροδέματος, κ.α.) σε συνδυασμό με τις συνθήκες του περιβάλλοντος (π.χ. θερμοκρασία, ατμοσφαιρικός αέρας, υγρασία, κ.α.) καθορίζουν τους εν δυνάμει διαβρωτικούς παράγοντες του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
- ❖ Οι παραμορφώσεις που λαμβάνουν χώρα στη βραχόμαζα, καθορίζουν το επίπεδο συνάφειας μεταξύ βράχου και εκτοξευόμενου σκυροδέματος και κατ'επέκταση τις ενδεχόμενες ασυνέχειες του υλικού επένδυσης ή τις διατμητικές αστοχίες μεταξύ βράχου και υλικού. Σε εξαιρετικά δυσμενείς περιπτώσεις,

επιφέρουν μερική αστοχία και εκμηδένιση της συνάφειας μεταξύ των στρώσεων της επένδυσης.

- ❖ Οι συνθήκες ωρίμανσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στους υπόγειους χώρους εφαρμογής του. Η φυσική υγρασία ενδέχεται να προκαλέσει ανομοιογενή ενυδάτωση του υλικού και να καταστήσει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα επιρρεπές στους εξωτερικούς διαβρωτικούς παράγοντες. Για παράδειγμα η έκθεση σε θειικά οδηγεί σε υπερκορεσμό σε ένυδρα θειικά άλατα ασβεστίου (π.χ. γύψος) με δυσμενείς συνέπειες διάβρωσης της επένδυσης.

Ωστόσο, η πληθώρα των φυσικών και χημικών παραγόντων που επιδρούν μεμονωμένα αλλά και συνδυαστικά, έχουν ποικίλα αποτελέσματα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ενώ σε πολλές περιπτώσεις αγνοείται η μακροπρόθεσμη επιρροή τους στο υλικό υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες κατά κανόνα είναι μεταβαλλόμενες. Παρακάτω αναλύονται κάποιοι από τους βασικότερους από αυτούς τους διαβρωτικούς παράγοντες με σημαντική επίδραση στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, επομένως και στο κόστος της κατασκευής στην οποία χρησιμοποιείται.

5.1 Έκπλυση

Η έκπλυση είναι μια διαδικασία όπου ένα στερεό μείγμα διαλύεται, με σχηματισμό στερεού υπολείμματος και ιόντων. Συμβαίνει όταν ένα υποκορεσμένο υδατικό διάλυμα διαπερνά το πορώδες ενός δραστικού υλικού με τσιμέντο, όπως το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Διαταράσσεται η ισορροπία του συστήματος, αποσυντίθενται οι φάσεις του μείγματος, αυξάνεται το πορώδες, μειώνεται η αντοχή και τελικά το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αποσυντίθεται. Ακολουθεί η ανάπτυξη μικρορωγμών στην ζώνη που έχει αποσυντεθεί και ξεκινά η χημική εξασθένιση και διάβρωση της πάστας του τσιμέντου.

Λόγω της συνεχόμενης έκπλυσης συγκεντρώνονται μεγάλες συγκεντρώσεις διαβρωτικών υλικών εντός του πορώδους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με αποτέλεσμα να διαχέονται εκτός πορώδους και έτσι να επεκτείνεται το φαινόμενο της διάβρωσης. Η έκπλυση επιδρά στα αδρανή υλικά, είτε μέσω της απώλειας της συνάφειας μεταξύ πάστας τσιμέντου και αδρανών λόγω έκπλυσης της περιβάλλουσας πάστας, είτε μέσω διάλυσης των ίδιων των αδρανών.

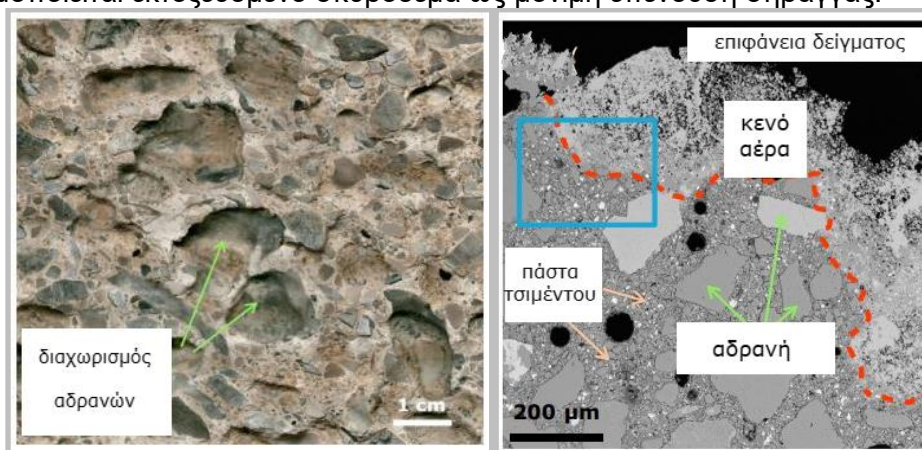
Η έκπλυση επίσης ενδέχεται να λαμβάνει χώρα κατά τη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, αλλά λόγω της ταχύτητας που πραγματοποιείται θεωρείται ασήμαντο φαινόμενο τόσο για το σκυρόδεμα όσο και για το σύστημα αποστράγγισης. Σε συνθήκες υψηλών τάσεων θα πρέπει να μετράται η διαπερατότητα του ύδατος, ενώ σε χαμηλότερες πιέσεις επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αρκεί να μετράται η τριχοειδής εισρόφιση ύδατος από το δομικό υλικό.

Ο βαθμός έκπλυσης επηρεάζεται από την ειδική διαλυτότητα των συστατικών μείγματος, τη διαπερατότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, την παροχή ροής ύδατος, τη χημική σύνθεση του διαλύτη (π.χ. pH και ιοντική ισχύς) και τη θερμοκρασία. Η παρουσία οξέων αυξάνει τη χημική διάλυση λόγω της αντίδρασης του με τα αλκαλικά συστατικά του ένυδρου τσιμέντου και ορισμένα αδρανή, όπως ο ασβεστόλιθος. Τέτοια οξέα εντοπίζονται σε υπόγεια ύδατα και όξινα εδάφη με θειικά, ανθρακικά κ.α., στην όξινη βροχή, σε λύματα από βιομηχανίες, στο θαλάσσιο νερό. Ένα οξύ που βρίσκεται στο φυσικό νερό συχνά είναι το ανθρακικό οξύ, που σχηματίζεται από τη διάλυση αερίου CO₂ σε νερό.

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της έκπλυσης στην εξέλιξή του είναι το αρχικό πορώδες του υλικού και η διάχυση των ιόντων ασβεστίου Ca²⁺. Κατά την έκπλυση δημιουργείται περαιτέρω δίκτυο πορώδους, δηλαδή δίκτυο μετακίνησης του νερού στο εσωτερικό του δομικού υλικού. Με προσθήκη πρόσθετων, όπως η πυριτική παιπάλη, η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία υφικαμίνου μειώνεται η ποσότητα του ασβεστίου και μαζί με αυτή και ο βαθμός έκπλυσης του

(εκτοξευόμενου) σκυροδέματος. Με την προσθήκη επιταχυντών και επιβραδυντών επηρεάζεται επίσης ο βαθμός έκπλυσης στο σκυρόδεμα. Παρόλα αυτά οι επιταχυντές που περιέχουν αλκάλια, σήμερα χρησιμοποιούνται ελάχιστα, με μία από τις δυσμενείς τους επιπτώσεις να είναι η υποβοήθηση της διαδικασίας της ενανθράκωσης. Επίσης, το κατάλληλο είδος των αδρανών που εμπεριέχονται στο μείγμα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μπορεί να αυξήσει την αντοχή του στη φυσική και χημική διάβρωση. Το είδος των αδρανών που μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλο (ασβεστόλιθος, δολομίτης, άμμος, χαλίκι) εξαρτάται κυρίως από τη φυσικοχημικές συνθήκες που επικρατούν στην εκάστοτε σήραγγα, οι οποίες με τη σειρά τους ελέγχονται από την ένταση της αλληλεπίδρασης νερού-βράχου και των σχετικών καιρικών συνθηκών.

Η έκπλυση, όπως γίνεται φανερό από τα παραπάνω, συνδέεται με τη μηχανική φθορά του σκυροδέματος, δηλαδή με τη μείωση της σκληρότητάς του, της αντοχής, της ενέργειας θραύσης του και την αύξηση της ευθραυστότητάς του (Bellego et al,2000), ενώ η εκτεταμένη ρωγμάτωση επιδεινώνει τα παραπάνω αποτελέσματα (Gerard and Marchand,2000). Στις περισσότερες σήραγγες, η έκπλυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος εμποδίζεται από τη λεγόμενη «λύση ομπρέλας», με χρήση μονωτικών μεμβρανών τοποθετημένων μεταξύ του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μόνιμης και προσωρινής επένδυσης, αποτελούμενες από γεωύφασμα και μεμβράνη από πολυμερές PVC ή PE. Οι εκτοξευόμενες μεμβράνες είναι μία μέθοδος ενίσχυσης υδατοστεγανότητας κυρίως σε εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως τελική επένδυση σηράγγων. Παρόλα αυτά, δεν προτιμάται λόγω έλλειψης σχετικών Κανονισμών και αβεβαιότητας χρόνου ζωής του υλικού των μεμβρανών μακροπρόθεσμα. Σε κάθε περίπτωση, όταν απαιτείται ιδιαίτερη στεγανότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε ιδιαίτερα διαβρωτικές συνθήκες, η μέγιστη τιμή διείσδυσης, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 7031, είναι 50 mm και η υδατοδιαπερατότητα μικρότερη από 1012 m/s. Σημαντικό είναι ότι εάν το τοποθετούμενο δομικό υλικό εκτίθεται σε συνθήκες κατηγορίας ΧΑ3, απαιτούνται ειδικά μέτρα προστασίας από διαβρωτικούς παράγοντες και συνιστάται να μην χρησιμοποιείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως μόνιμη επένδυση σήραγγας.



Εικόνα 21: Φαινόμενο έκπλυσης

Συσσωματώματα που εκπλένονται από δείγμα που εκτίθεται σε μαλακό νερό και χαμηλή θερμοκρασία (αριστερά) και μικροδομή της εκπλυθείσας επιφάνειας (δεξιά)

(Τροποποιημένη εικόνα από αναφορά “Durability of shotcrete for underground support– Review and update”, Isabel Galan , Andre Baldermann, Wolfgang Kusterle, Martin Dietzel, Florian Mittermayr, Construction and Building Materials, Volume 202, 2019)

5.2 Ενανθράκωση:

Η ενανθράκωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αναφέρεται στη χημική διαδικασία όπου προϊόντα της ενυδάτωσης σκυροδέματος κατά τη διαδικασία σκλήρυνσής του αντιδρούν με το ατμοσφαιρικό CO_2 , σε περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από υψηλό ποσοστό υγρασίας. Κατά τη διεργασία αυτή το pH της πάστας τσιμέντου αλλάζει από 12,6 ή υψηλότερη τιμή σε περίπου 8, εάν ενανθρακωθεί πλήρως. Η ενανθράκωση συχνά οδηγεί σε πύκνωση της μικροδομής εξαιτίας της μείωσης πορώδους, το οποίο αποτελεί πλεονέκτημα σε μη ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Στο ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ωστόσο, μπορεί να είναι ένα μεγάλο μειονέκτημα εάν το μέτωπο ενανθράκωσης προχωρήσει μέχρι τη χαλύβδινη ενίσχυση του σκυροδέματος, λόγω επικείμενης διάβρωσης εξαιτίας του λιγότερο αλκαλικού περιβάλλοντος (μείωση PH).

Ένα άλλο φαινόμενο σχετικό με τη χημική αντίδραση ενανθράκωσης, ιδιαίτερα σημαντικό στην υποστήριξη σηράγγων, είναι πυροσυσσωμάτωση. Σε αυτή την περίπτωση, η έκπλυση ασβεστίου στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή η παροχέτευση ασβεστίου από τα υπόγεια ύδατα, προκαλεί την συσσώρευση μαζών ανθρακικού ασβεστίου στην άντυγα της σήραγγας ή στο σύστημα αποστράγγισής της, γεγονός που εμποδίζει την ορθή λειτουργία του έργου γενικότερα. Η μηχανική ή χημική απομάκρυνση των μαζών CaCO_3 αποτελεί επιτακτική ανάγκη και η προληπτική συντήρηση έργων σηράγγων για την αποφυγή της αύξησης υδροστατικών πιέσεων, τεχνικών προβλημάτων και κατ'επέκταση επιπλέον κοστοβόρων εργασιών κατά τη διάρκεια ζωής του έργου.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης είναι η χημική σύσταση του ύδατος που έρχεται σε επαφή με το σκυρόδεμα και διεισδύει σε αυτό και η παροχή του, η σύνθεση της πάστας τσιμέντου, η διαπερατότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, το ποσοστό υγρασίας, η παρουσία ή απουσία χημικών αναστολέων και η θερμοκρασία περιβάλλοντος (Kusterle et al, 2019). Επίσης η κατανομή βροχοπτώσεων στην περιοχή του εκάστοτε έργου σήραγγας ελέγχει τα χαρακτηριστικά των ανθρακικών αποθέσεων από κρυστάλλους ασβεστίτη, καθώς καθορίζει και τις τρεις κατηγορίες υδάτων αποστράγγισης στο εσωτερικό των σηράγγων (μη αλλοιωμένα υπόγεια ύδατα που προκύπτουν κατόπιν αλληλεπίδρασης με τα περιβάλλοντα πετρώματα, διαλύματα με PH μεταξύ 9 και 11, αποστραγγιζόμενα ύδατα με PH μεταξύ 11 και 13).





Εικόνα 22: Φαινόμενο Πυροσυσσωμάτωσης

Πυροσυσσωμάτωση στα τοιχώματα σήραγγας (1^η αριστερά), σχηματισμός πυροσυσσωμάτωσης σε σωλήνα αποστράγγισης (2^η δεξιά) και σε σωλήνα αποστράγγισης σήραγγας (3^η)

(Τροποποιημένη εικόνα από αναφορά “Durability of shotcrete for underground support– Review and update”, Isabel Galan , Andre Baldermann, Wolfgang Kusterle, Martin Dietzel, Florian Mittermayr, Construction and Building Materials, Volume 202, 2019)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι φανερό ότι είναι επιτακτική ανάγκη η λήψη κατάλληλων μέτρων για την αντιμετώπιση του φαινομένου της πυροσυσσωμάτωσης και της προστασίας των έργων που συναντάται συχνά ως φαινόμενο διάβρωσης, όπως τα υπόγεια έργα και ιδιαίτερα οι σήραγγες. Η κατάλληλη σύνθεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την μείωση του φαινομένου της έκπλυσης και κατ'επέκταση του φαινομένου της πυροσυσσωμάτωσης είναι ένας από τους τρόπους πρόληψης επέκτασης του φαινομένου. Επίσης, η κατά το δυνατόν αποφυγή ανάμειξης και επαφής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με αλκαλικά διαλύματα ή με υπόγεια ύδατα που περιέχουν ανάλογη σύσταση, προστατεύει από το σχηματισμό των ανθρακικών αλάτων, ενώ αντίστοιχα αποτελέσματα μπορεί να αποφέρει η παρουσία του CO₂ εντός προκαθορισμένων ορίων, αναστέλλοντας τη μαζική κατακρήμνιση του CaCO₃ στα τοιχώματα της σήραγγας. Περαιτέρω προληπτικά μέτρα αποτελούν η συχνή και επισταμένη παρακολούθηση του έργου, η βελτιστοποίηση των συστημάτων αποστράγγισης σηράγγων και η χρήση αναστολέων (υγρό πολυασπάρτικό οξύ και στεραιή βάση από polysuccinimid - PSI) για την αποτροπή των ανάλογων χημικών αντιδράσεων.

Ο ποσοτικός προσδιορισμός έκπλυσης - πυροσυσσωμάτωσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ελέγχεται με τη μέθοδο της δοκιμής RV, όπου σε δοκίμια του υλικού με συγκεκριμένο ποσοστό υγρασίας μετράται ανά κύκλο 24, 48 και 120 ωρών το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η συγκέντρωση Ca²⁺ καθορίζει την έκπλυση και το δυναμικό πυροσυσσωμάτωσης του δοκιμίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

5.3 Διάβρωση από θειικά:

Η διάβρωση από θειικά στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα αντιστοιχίζεται σε μία σύνθεση και αλληλουχία αντιδράσεων έκπλυσης, διάλυσης και καθίζησης μεταξύ θεικών ιόντων και ένυδρου αργιλικού ασβεστίου που προϋπήρχαν στο εσωτερικό της πάστας τσιμέντου. Παρόλα αυτά εξετάζουμε την εξωτερική επίδραση των θεικών και όχι τα φαινόμενα από την αρχική σύσταση του υλικού.

Η επαφή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με υπόγεια ύδατα ή με υδατικά διαλύματα από συστήματα αποστράγγισης, καθιστά τα ενυδατωμένα συστατικά του σε συνεχή αλληλεπίδραση με ιόντα SO₄²⁻. Άλλοι παράγοντες που συμβάλουν στο φαινόμενο είναι η διαπερατότητα και η σύσταση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (π.χ. περιεκτικότητα σε αργιλικά) και οι περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. υγρασία και θερμοκρασία, CO₂). Τα πιο συχνά θειικά άλατα που εμπλέκονται στο φαινόμενο είναι του ασβεστίου, μαγνησίου και ασβεστίου. Ως βασικό αποτέλεσμα αυτών των γρήγορα εξελισσόμενων αντιδράσεων είναι ο σχηματισμός γύψου και εντριγκίτη με

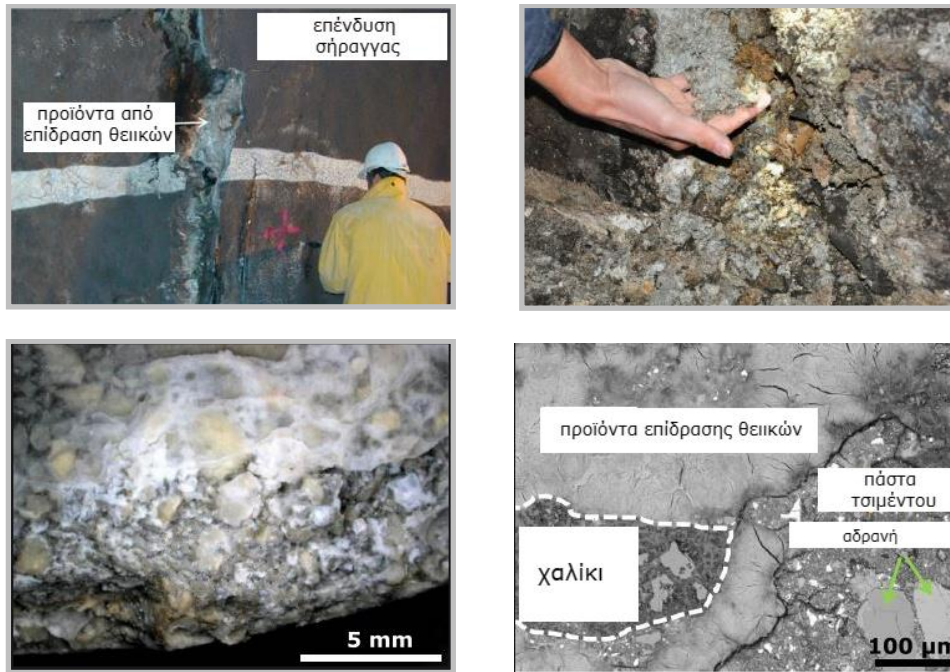
την αντίστοιχη αύξηση όγκου και το σχηματισμό και επέκταση ρωγμών, την απώλεια αντοχής και την πλήρη αποσύνθεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Άλλοι λιγότερο συνηθισμένοι τύποι θειικών αλάτων είναι ο θεναρδίτης και ο μιραβιλίτης που καθιζάνουν εντός του πορώδους, οδηγώντας τελικά σε περαιτέρω επέκταση των αντιδράσεων σχηματισμού τους και τελικά εκτεταμένη βλάβη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Σημαντική είναι επίσης η συμβολή των προσμίξεων, ιδίως των επιταχυντών χωρίς αλκαλικά που περιέχουν αργιλικά και θειικά διαλύματα. Η επίδραση των προσμίξεων μελετάται ακόμη στις μέρες μας και μέχρι στιγμής προτιμώνται επιταχυντές χωρίς αλκαλικά λόγω της μακροπρόθεσμης ανάπτυξης αντοχής και την επίδρασή τους στη μείωση εκπλυσιμότητας και πυροσυσσωμάτωσης σε συστήματα αποστράγγισης.

Μέχρι και στις μέρες μας δεν υπάρχει καθορισμένη σύσταση εκτοξευόμενου σκυροδέματος με παρουσία προσμίξεων, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις η βλάβη του εφαρμοσμένου δομικού υλικού οφείλεται σε λανθασμένο τρόπο εκτόξευσης του υλικού. Για παράδειγμα, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ξηράς ανάμειξης (με ιπτάμενη τέφρα) αποδίδει πολύ λιγότερο από το συνηθισμένο σκυρόδεμα όταν εκτίθεται συνδυαστικά στην επίδραση θειικών και κύκλους γήρανσης-διαβροχής. Στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, οι ίνες από χάλυβα εξαλείφουν τις τάσεις που προκύπτουν λόγω της διόγκωσης από τη δημιουργία εντριγκίτη και γύψου, αυξάνοντας την απόδοσή του ως δομικού υλικού.

Οι βλάβες που προκλήθηκαν λόγω επίθεσης θειικών ταξινομήθηκαν σε τρία στάδια, τη δράση του εντριγκίτη, την παράλληλη δράση εντριγκίτη και γύψου και τελικά τη δράση γύψου (Wang et al,2016). Δυστυχώς προς το παρόν, δεν υπάρχει ακόμη ευρέως αποδεκτή και κατάλληλη μέθοδος εργαστηριακής δοκιμής που προσομοιώνει πλήρως όλες τις διαφορετικές πτυχές της επίδρασης των θειικών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Επομένως, από όλα τα παραπάνω καθίσταται φανερό ότι δεν επαρκεί η σύσταση μείγματος που να είναι ανθεκτική χημικά στη δυσμενή επίδραση θειικών, αλλά θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη και ο μηχανισμός ανταπόκρισης του δομικού υλικού από τη στιγμή έναρξης επιβολής του εξωτερικού φορτίου και η αρχική του κατάσταση μετά την εξέλιξη της σκλήρυνσης. Για παράδειγμα, σημεία επιρρεπή στην επίδραση των θειικών θα μπορούσαν να είναι περιοχές ρωγμάτωσης ή σημεία με εμφανές το φαινόμενο της συστολής ξήρανσης, μη στεγανά σημεία στην επιφάνεια εφαρμογής ή και στην τελική επιφάνεια του εφαρμοσμένου υλικού, όπως αρμοί διαστολής, τοπικές βλάβες ή κακής ποιότητας εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Στις περιοχές αυτές η τριχοειδής εισρόφηση υδάτων είναι ο τρόπος που εισχωρούν τα διαβρωτικά μέσα για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο εσωτερικό του. Επιπλέον, η επαφή της επένδυσης της σήραγγας με τον ατμοσφαιρικό αέρα μπορεί να προκαλέσει το φαινόμενο της εξάτμισης και της κυκλικής ξήρανσης-διαβροχής προκαλώντας επίσης τη χημική και φυσική φθορά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Για την αποτροπή όλων των παραπάνω και κατ' επέκταση για την διατήρηση της καλής ποιότητας του εφαρμοσμένου δομικού υλικού στο χρόνο ζωής του έργου θα πρέπει να αποτρέπεται ο σχηματισμός ρωγμών και η δημιουργία ασφράγιστων κατασκευαστικών αρμών, να αποφεύγεται η εκροή υπόγειων υδάτων (αργή ροή ή στάγδην) μέσω της επένδυσης της σήραγγας, ώστε να μη δημιουργούνται συμπυκνώματα και επιβλαβείς σχηματισμοί, να εξασφαλίζεται χαμηλό πορώδες και σωστή σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και να αποφεύγονται τα τριχοειδή φαινόμενα. Επίσης, θα πρέπει να κρατείται χαμηλή τιμή του λόγου νερού προς τσιμέντο (W/T), περίπου στο 0,45 και να χρησιμοποιούνται κατάλληλα πρόσθετα από τέφρα, σκωρία υψικάμινου και πυριτική παιπάλη, για μείωση της διαπερατότητας του εκτοξευμένου σκυροδέματος.



Εικόνα 23: Επίδραση θεικών στη μόνιμη επένδυση σήραγγας
 (Τροποποιημένη εικόνα από αναφορά “Durability of shotcrete for underground support– Review and update”, Isabel Galan , Andre Baldermann, Wolfgang Kusterle, Martin Dietzel, Florian Mittermayr, Construction and Building Materials, Volume 202, 2019)

5.4 Ψύξη-απόψυξη:

Η κυκλική ψύξη - απόψυξη και η έκθεση σε άλατα απόψυξης μειώνουν την ανθεκτικότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η βλάβη σχετίζεται με τη διόγκωση του νερού καθώς παγώνει στο εσωτερικό του πορώδους του σκυροδέματος. Έτσι υποβιβάζεται το εσωτερικό του υλικού με την επέκταση ρωγμάτωσης και τελικά μείωση του μέτρου ελαστικότητάς του. Ταυτόχρονα παρουσιάζεται επιφανειακή απολέπιση κυρίως στα σημεία επαφής με τα άλατα και απώλεια συνάφειας μεταξύ της πρώτης στρώσης σκυροδέματος και βράχου.

Πολλοί μηχανισμοί έχουν προταθεί ως υπεύθυνοι για την υποβάθμιση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που εκτίθεται σε παγετό, όπως η διαστολή λόγω μετατροπής του διαρρέοντος ύδατος στο εσωτερικό πορώδες σε πάγο, η δημιουργία κρυστάλλων πάγου, η επέκταση υγρασίας στο εσωτερικό του υλικού, η υδροστατική πίεση που προκαλείται από την κίνηση του νερού μέσα στο πορώδες του σκυροδέματος και η διαστολή των επιφανειακών πόρων λόγω μετατροπής του νερού σε πάγο στο εσωτερικό τους, που αναγκάζει το νερό να εισέλθει προς το ενδότερο πορώδες του υλικού.

Σύμφωνα με τον Chatterji (1999) ο πάγος διεισδύει σε πορώδη υλικά με τη μορφή διακλαδισμένων κρυστάλλων ενθυλακώνοντας μη παγωμένο νερό. Κατά τη διάρκεια περαιτέρω ψύξης, το νερό αυτό αναπτύσσει υψηλή υδροστατική πίεση που προκαλεί τη βλάβη. Με πειραματικές μετρήσεις διαστολής (Kusterle et al, 2019), ακουστικών εκπομπών και θερμοδομετρία σε διάφορους τύπους σκυροδέματος, ο Kaufmann (2004) πρότεινε ένα προσομοίωμα για να περιγράψει τη διαδικασία ψύξης-απόψυξης ενός υγρού σε ένα σύστημα πόρων χωρισμένο σε πέντε φάσεις έναρξης ψύξης (0 έως 5 °C), αύξηση του νερού που έχει μετατραπεί σε πάγο, ανακατανομή διαλύματος πόρων, απόψυξη και κορεσμός. Κάθε φάση συμβάλλει στη φθορά του σκυροδέματος και σχετίζεται με την κατανομή του πορώδους και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως το ποσοστό υγρασίας και τη θερμοκρασία. Επίσης από άλλους μελετητές έχει αποδειχθεί ότι το μέγεθος των αδρανών, η σύσταση της πάστας

τσιμέντου, η περιεκτικότητα σε τσιμέντο, νερό και αέρα επηρεάζει την αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στον παγετό.

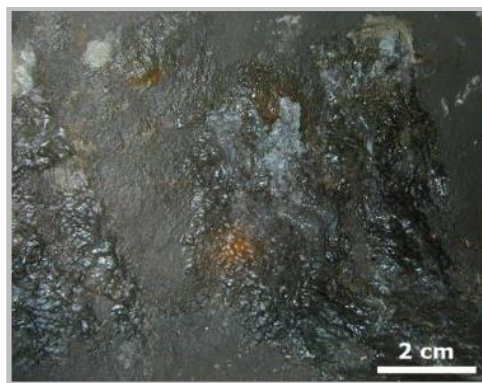
Ενδεικτικά χαρακτηριστικά της βλάβης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος από κύκλους ψύξης – απόψυξης είναι η μείωση του μέτρου ελαστικότητας και του βάρους του υλικού. Επίσης, έχει παρατηρηθεί η καλύτερη ανταπόκριση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε συνθήκες παγετού έναντι σκυροδέματος χωρίς επιταχυντές, λόγω των μικροπόρων που σχηματίζονται με την εκτόξευση και ισοσταθμίζουν την πίεση που δημιουργείται από το «παγωμένο πορώδες» του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η σύνθεση του νερού είναι άλλος ένας παράγοντας που επηρεάζει την αντίστοιχη ανταπόκριση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, καθώς υψηλότερη συγκέντρωση ιόντων θα μειώσει το σημείο πήξης όπου το νερό από υγρό θα μετατραπεί σε πάγο. Οι επιταχυντές δρουν δυσμενώς στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα, γιατί μειώνουν την αντοχή του στα άλατα που προκύπτουν από την απόψυξη και αυξάνουν τη συστολή ξήρανσης.

Πιο συγκεκριμένα για τις σήραγγες, όπου το εκτοξευόμενο σκυροδέμα εκτίθεται στο διαρρέον νερό από το βράχο και σε χαμηλές θερμοκρασίες, οι επιπτώσεις που προαναφέρθηκαν προλαμβάνονται με την επένδυσή τους με διπλό κέλυφος επένδυσης ενισχυμένο με άλατα απόψυξης.

Στη Φινλανδία και τη Νορβηγία έχει αναπτυχθεί η μέθοδος “pore protection factor method” για τον υπολογισμό του πορώδους και της περιεκτικότητας σε υγρασία, και συνεπώς για την αξιολόγηση της αντοχής σε κύκλους ψύξης – απόψυξης (Kusterle et al, 2019). Αυτή η μέθοδος ακολουθεί ένα πρωτόκολλο κορεσμού σε νερό, ξήρανσης, κορεσμού υπό πίεση σε συνδυασμό με μετρήσεις περιεκτικότητας υγρασίας, μέγιστης απορρόφησης, όγκου και πυκνότητας, ξηρού βάρους και μακροπορώδους. Επίσης, ακουστικές εκπομπές και μετρήσεις θερμοκρασίας έδωσαν νέα στοιχεία για την ανάπτυξη μικρορωγμάτωσης στη διεπιφάνεια εκτοξευόμενου σκυροδέματος και βράχου σε συνθήκες ψύξης-απόψυξης, ενώ η υπολογιστική τομογραφία αποτελεί καινοτομία στη μελέτη της μικρομηχανικής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Για την πρόληψη των δυσμενών επιπτώσεων των συνθηκών παγετού στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα θα πρέπει να ακολουθούνται τα παρακάτω:

- ❖ Επαρκής διοχέτευση αέρα στο εσωτερικό του μείγματος υλικού σε συμφωνία με το πρότυπο EN 480-11, λαμβάνοντας υπόψη ότι μεγάλο ποσοστό αέρα από το εσωτερικό του απομακρύνεται κατά την εκτόξευση.
- ❖ Ενσωμάτωση πρόσθετων εντός του μείγματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος τα οποία δημιουργούν εσωτερικό ομοιογενές σύστημα κενών αέρα. Η μείωση αντοχής από την ανακατανομή των κενών αέρα αντισταθμίζονται με την προσθήκη πυριτικής πλαισίωσης (Choi et al -2016).
- ❖ Ενίσχυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα, για έλεγχο της επέκτασης ρωγμάτωσης λόγω ανακατανομής των τάσεων που αναπτύσσονται με το φαινόμενο ψύξης-απόψυξης.
- ❖ Αύξηση της αναλογίας χονδρόκοκκων αδρανών
- ❖ Ενσωμάτωση πρόσθετων για βελτίωση της αντοχής του υλικού στον παγετό (π.χ. οργανικές ρητίνες, ίνες, κα)



Εικόνα 24: Εκτοξευόμενο σκυροδέμα με βλάβη από έκθεση σε κύκλους ψύξης - απόψυξης (Τροποποιημένη εικόνα από αναφορά “Durability of shotcrete for underground support– Review and update”, Isabel Galan , Andre Baldermann, Wolfgang Kusterle, Martin Dietzel, Florian Mittermayr, Construction and Building Materials, Volume 202, 2019)

5.5 Ηλεκτροχημική διάβρωση

Η ενίσχυση από χάλυβα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος προστατεύεται από το ίδιο το σκυροδέμα που τον περιβάλλει, από το υψηλό pH του διαλύματος στο εσωτερικό του πορώδους και από το παθητικό κάλυμμα επάνω στην επιφάνεια οπλισμού.

Η ενανθράκωση και η παρουσία χλωρίου διαβρώνουν το χάλυβα. Εκτός από την επίδραση στον οπλισμό χάλυβα, η διείσδυση χλωρίου αυξάνει τη διαλυτότητα των φάσεων του τσιμέντου τοπικά, ενώ η ενανθράκωση οδηγεί τοπικά σε αλλαγή όγκου και αντοχής στο μέτωπο της ενεργού ενανθράκωσης. Η διάβρωση του χάλυβα διακρίνεται από το σχηματισμό ρωγμών και τη συσσώρευση σκουριάς τόσο στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-χάλυβα, όσο και στην επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Προχωρώντας αυτή η φθορά έχει σαν αποτέλεσμα να σχηματίζονται μεγαλύτερα κενά και ρωγμές και τελικά να προκαλείται τοπική θραύση του οπλισμού. Στην περίπτωση της ενανθράκωσης, η αντίδραση μεταξύ διαλυμένων βασικών συστατικών της πάστας τσιμέντου και του ατμοσφαιρικού CO₂ οδηγεί σε μείωση των τιμών pH από 12–13 σε τιμή μικρότερη από 8. Έτσι το μέτωπο ενανθράκωσης προχωρά μέχρι τον οπλισμό, όπου και τον διαβρώνει. Ο κυρίαρχος μηχανισμός που διέπει τη διάβρωση του χάλυβα είναι ηλεκτροχημικής φύσεως, λόγω του ότι για να πραγματοποιηθεί απαιτείται η ηλεκτροχημική διαφορά δυναμικού όπου η οξειδωση του χάλυβα αντιστοιχίζεται σε αναγωγή μίας άλλης ουσίας επίσης στην επιφάνεια του χάλυβα.

Η αντοχή στην ηλεκτροχημική διάβρωση εξαρτάται κυρίως από τη σύνθεση του συνδετικού υλικού και από τη διαπερατότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που με τη σειρά της ελέγχεται από τον τύπο του τσιμέντου, τη σκλήρυνση, το ποσοστό υγρασίας, κ.α.

Για την περίπτωση των σπράγγων που εφαρμόζεται ινοπλισμένο κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος, η διάβρωση από ενανθράκωση και διείσδυση χλωρίου δεν είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη συγκριτικά με την επίδραση θειικών, οπότε και για αυτό το λόγο τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται απλά για την αξιολόγηση των κατηγοριών εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Σε ειδικές περιπτώσεις όπου η διείσδυση Cl⁻ στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα είναι έντονη, το πάχος της στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι σημαντική παράμετρος για το χρόνο ζωής του έργου. Στη Νορβηγία, το ελάχιστο πάχος των στρώσεων εκτοξευόμενου σκυροδέματος αυξήθηκε από 2-5 cm σε 6 cm από το 1997 έως το 2010 για την πρόληψη της ενανθράκωσης, της ηλεκτροχημικής διάβρωσης και της επίθεσης νερού με μεγάλη περιεκτικότητα σε άλατα. Το 2011 για

να αυξηθεί ο χρόνος ζωής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος από 50 σε 100 έτη, το πάχος στρώσης του αυξήθηκε στα 8 cm.

Επίσης, υψηλής απόδοσης εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αποδείχτηκε (Kusterle et al, 2019) ότι περιείχε παιπάλη πυριτίου, χαμηλότερο λόγο w/c και περίπου 8% επιταχυντή χωρίς αλκαλικά. Ο τύπος και η δοσολογία του επιταχυντή καθορίζουν την αναλογία αργιλικών προς θειικά, που ελέγχει την ικανότητα διείσδυσης χλωρικών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Στην περίπτωση του νοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος έχει παρατηρηθεί ότι οι ίνες πολλές φορές δεν επηρεάζονται από ηλεκτροχημική διάβρωση. Το μήκος τους (1-6 cm), η σύνθεση και η κατανομή τους στο εσωτερικό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος καθορίζουν και την αντοχή τους στη διάβρωση καθώς και τις μηχανικές ιδιότητες του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Σε επιθετικά περιβάλλοντα, όπου οι χαλύβδινες ίνες διαβρώνονται, προτείνεται η χρήση συνθετικών ινών.

Σχετικά με την ενανθράκωση και τη διείσδυση ιόντων Cl⁻ στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόζεται το πρότυπο ASTM C1202.



Εικόνα 25: Δείγματα διάβρωσης χάλυβα σε οπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Τροποποιημένη εικόνα από αναφορά “Durability of shotcrete for underground support– Review and update”, Isabel Galan , Andre Baldermann, Wolfgang Kusterle, Martin Dietzel, Florian Mittermayr, Construction and Building Materials, Volume 202, 2019)

5.6 Αντίδραση αλκαλικών συσσωματωμάτων

Η αντίδραση αλκαλικών συσσωματωμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική σε εργασίες εκσκαφής, όπου τα αδρανή για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εξάγονται επί τόπου, οπότε και το φαινόμενο λαμβάνει χώρα μεταξύ της πολύ αλκαλικής πάστας τσιμέντου και των αδρανών. Το αποτέλεσμα είναι η διαστολή και επέκταση των ρωγμών, οπότε και οι αλλοιωμένες επιφάνειες εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Για να πραγματοποιηθεί η αντίδραση θα πρέπει οπωσδήποτε να περιέχονται αλκαλικά, πυριτικά, υψηλό ποσοστό υγρασίας και νερό. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία πηκτής στα ανοίγματα των ρωγμών, γύρω από τα αδρανή και στην επιφάνεια του αλλοιωμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η πηκτή αυτή που δημιουργείται έχει τη δυνατότητα να απορροφήσει περισσότερη ποσότητα νερού με αποτέλεσμα το φαινόμενο της διόγκωσης και την διεύρυνση προϋπάρχουσων ρωγμών.

Δοκιμές και αντίστοιχες εφαρμογές (Kusterle et al, 2019) έχουν δείξει ότι επιταχυντές με αργιλική βάση οδήγησαν σε μεγαλύτερη βλάβη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε σχέση με τους επιταχυντές χωρίς αλκαλικά. Επομένως, οι συστάσεις με στόχο τη μείωση της αντίδρασης αλκαλικών συσσωματωμάτων ορίζουν τον περιορισμό της περιεκτικότητας σε αλκαλικά, τη χρήση ιπτάμενης τέφρας, σκωρίας υψικαμίνου και πυριτικής παιπάλης στο μείγμα εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



Εικόνα 26: Σχηματισμός ρωγμών σε δομή υπόγειας διάβασης λόγω αντίδρασης αλκαλικών συσσωματωμάτων (Τροποποιημένη εικόνα από αναφορά “Durability of shotcrete for underground support– Review and update”, Isabel Galan , Andre Baldermann, Wolfgang Kusterle, Martin Dietzel, Florian Mittermayr, Construction and Building Materials, Volume 202, 2019)

5.7 Συστολή ξήρανσης και ρωγμάτωση

Το φαινόμενο συστολής ξήρανσης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σχετίζεται με την ανθεκτικότητά του, επειδή μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό ρωγμών, οι οποίες στη συνέχεια κάνουν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ευάλωτο στην έκπλυση, στην ενανθράκωση ή τη διάβρωσή του από θειικά. Επιπλέον, η ρωγμάτωση συνδυάζεται και με επιβαλλόμενες τάσεις από μεταβολές θερμοκρασίας ή εφελκυστικές φορτίσεις ή πρώιμες παραμορφώσεις της βραχόμαζας.

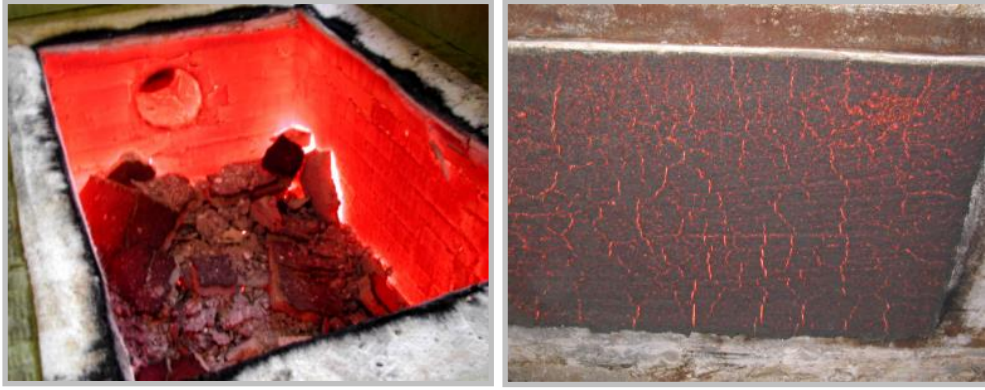
Η συστολή ξήρανσης αντιστοιχίζεται σε απώλεια μηχανικών αντοχών του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, της συνάφειας μεταξύ της πάστας τσιμέντου και αδρανών, ενώ σε μακροσκοπικό επίπεδο εκφράζεται με την απώλεια μονολιθικότητας μεταξύ των στρώσεων εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Οι κύριες αιτίες συστολής ξήρανσης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι ο μικρότερος όγκος των ενυδατωμένων προϊόντων σε σύγκριση με τον συνολικό όγκο των άνυδρων συστατικών και του νερού προσθετικά και η εξάτμιση του νερού από το εσωτερικό του μείγματος του δομικού υλικού.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της συστολής ξήρανσης είναι η σύσταση του μείγματος, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, το πάχος στρώσης εφαρμογής, η σκλήρυνση και ο χρόνος μεταξύ εφαρμογής των διαδοχικών στρώσεων. Το είδος και η περιεκτικότητα των επιταχυντών είναι άλλος ένας παράγοντας επιρροής στο φαινόμενο της συστολής ξήρανσης. Επιταχυντές χωρίς αλκαλικά οδηγούν σε μεγαλύτερη συστολή ξήρανσης. Ακόμη, υψηλότερα ποσοστά αναπήδησης οδηγούν σε εντονότερα φαινόμενα συστολής ξήρανσης γιατί αυξάνεται ο λόγος πάστα τσιμέντου προς αδρανή που επιφέρει εντονότερη συστολή ξήρανσης. Τέλος, η χρήση οπλισμού και κυρίως η ενσωμάτωση ινών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μειώνει τη ρωγμάτωση που οφείλεται στο φαινόμενο της συστολής ξήρανσης.

5.8 Θερμοκρασία / έκθεση σε φωτιά

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι πυράντοχο και σχεδόν άκαυστο υλικό. Στην έκθεση σε φωτιά η πάστα τσιμέντου υπόκειται σε θερμική διαστολή και στη συνέχεια σε συρρίκνωση λόγω της απώλειας ύδατος από το εσωτερικό της. Επίσης σε περίπτωση πυρκαγιάς σε εσωτερικό χώρο όπως για παράδειγμα στο εσωτερικό σηράγγων, η συσσώρευση ατμών προκαλεί αύξηση των επιβαλλόμενων πιέσεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, γεγονός που προκαλεί ακόμα και τη θραύση του. Ταυτόχρονα, ο χαλύβδινος οπλισμός χάνει τα αρχικά μηχανικά του χαρακτηριστικά.



Εικόνα 27: Επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος που έχει υποστεί εκτεταμένη πυρκαγιά (αριστερά) Φάτνωμα δοκιμίου με προστατευτική στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά από έκθεση σε δοκιμή εκτεταμένης πυρκαγιάς. Το προστατευτικό στρώμα δεν άντεξε στη δοκιμή και επήλθε η πλήρης καταστροφή του και (δεξιά) Φάτνωμα δοκιμίου με προστατευτικό στρώμα εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά από έκθεση σε δοκιμή σοβαρής πυρκαγιάς- (Τροποποιημένη εικόνα από αναφορά “Durability of shotcrete for underground support– Review and update”, Isabel Galan , Andre Baldermann, Wolfgang Kusterle, Martin Dietzel, Florian Mittermayr, Construction and Building Materials, Volume 202, 2019)

Οι πιο βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην έκθεση σε φωτιά είναι ο βαθμός κορεσμού του πορώδους, η κατανομή του μεγέθους του, το πάχος στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, τα επιβαλλόμενα φορτία και το είδος των αδρανών. Το υψηλότερο πορώδες του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που δημιουργείται από τον κινούμενο στο εσωτερικό του αέρα βοηθά στην απελευθέρωση της πίεσης στους πόρους του σε περίπτωση έκθεσής του σε υψηλή θερμοκρασία. Τέλος οι επιταχυντές με αλκαλικά είναι πιο ευαίσθητοι στη θερμοκρασία, ενώ οι επιταχυντές με αλκάλια χαρακτηρίζονται από υψηλότερη θερμομονωτική ικανότητα.

Στην κατασκευή σηράγγων ειδικά, οι ενσωματωμένες από χάλυβα ίνες αυξάνουν την ολκιμότητα και την ανθεκτικότητα της στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και αποτρέπουν τη θραύση της. Οι ίνες από πολυμερισμένο υλικό δημιουργούν ένα δίκτυο μικρορωγμών στην πήξη όπου και χρησιμεύει για την εκτόνωση της πίεσης υπό συνθήκες πυρκαγιάς. Για αυτό το λόγο και σε κάποιες περιπτώσεις υφιστάμενων σηράγγων έχει εφαρμοστεί αντίστοιχη στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως πυροπροστασία.

5.9 Μικροοργανισμοί

Οι μικροοργανισμοί (π.χ. βακτήρια, μύκητες) επιδρούν στην ανθεκτικότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Κάποια μικρόβια (π.χ. bacillus sphaericus, sporosarcina pasteurii, κ.α.) προκαλούν καθίζηση CaCO_3 , σε ασυνέχειες και στην επιφάνεια του εφαρμοσμένου υλικού, κάτι που μειώνει την δυνατότητα διάβρωσης από άλλους δυσμενείς παράγοντες που προαναφέρθηκαν. Βέβαια, η επιρροή κάποιων από αυτούς τους μικροοργανισμούς δεν είναι θετική καθώς προκαλούν αισθητική υποβάθμιση της επιφάνειας της τελικής επένδυσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, υποβάθμιση του εσωτερικού αέρα, κυρίως σε υπόγεια έργα και βιο-υποβάθμιση του υλικού με οργανικά και ανόργανα οξέα να αποικοδομούν την πάστα τσιμέντου και τα αδρανή με έντονη έκπλυση. Ο καταβίβασμός της τιμής του pH σε τιμές μικρότερες του 3, αλλά και η διάβρωση των ινών από χάλυβα αποτελούν κάποια ακόμη αποτελέσματα της δράσης των μικροοργανισμών στην επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



Εικόνα 28: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα υπό επίδραση μικροοργανισμών
(Τροποποιημένη εικόνα από αναφορά “Durability of shotcrete for underground support– Review and update”, Isabel Galan , Andre Baldermann, Wolfgang Kusterle, Martin Dietzel, Florian Mittermayr, Construction and Building Materials, Volume 202, 2019)

5.10 Παρατηρήσεις σχετικά με τους φθοροποιούς παράγοντες στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως τελική επένδυση σηράγγων

- ❖ Απαιτείται η σωστή ενυδάτωση που αποτελεί δύσκολο εγχείρημα στην περίπτωση των υπόγειων έργων και ιδιαίτερα των σηράγγων, αλλά και η διατήρηση των Τεχνικών προδιαγραφών
- ❖ Η σωστή εκτόξευση με σύγχρονο εξοπλισμό μπορεί να αυξήσει την ποιότητα του σκυροδέματος και να επιτρέψει σπανιότερα την κυριαρχία των διαβρωτικών παραγόντων σε διαμορφούμενη ρωγμάτωση
- ❖ Επιπλέον μηχανικά φορτία, ρωγμές και η κακή εφαρμογή κατά την εκτόξευση αυξάνει την ευπάθεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στους διαβρωτικούς παράγοντες.
- ❖ Οι περισσότεροι κίνδυνοι διάβρωσης περιλαμβάνουν διαδικασίες διάλυσης και σε πολλές περιπτώσεις συνδέονται με μεταβολές περιβαλλοντικών συνθηκών.
- ❖ Βασικοί παράμετροι του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που καθορίζουν την έκταση φθοράς από τους διαβρωτικούς παράγοντες είναι το πορώδες και η διαπερατότητά του. Οι μεταβολές στη διαμόρφωση του πορώδους οφείλονται στον τρόπο εκτόξευσης και στην περιεκτικότητα σε επιταχυντές.
- ❖ Τα ζητήματα ανθεκτικότητας θα είναι πιο έντονα σε κατακόρυφες εφαρμογές, ειδικά στα ανώτερα σημεία, καθώς το νερό θα ρέει προς τα κάτω, π.χ. έντονα φαινόμενα έκπλυσης.
- ❖ Ο κίνδυνος βλάβης σε παγετό, από την άλλη πλευρά, μπορεί να είναι χειρότερος σε οριζόντια μέρη, όπου θα συσσωρευτεί νερό, οδηγώντας σε κορεσμό.
- ❖ Η ανομοιογένεια των φαινομένων εκτοξευόμενου σκυροδέματος θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη κατά την εξαγωγή πυρήνων, καθώς οι μέσες τιμές από διάφορες ζώνες χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μπορεί να μην είναι χρήσιμες για την αξιολόγηση.
- ❖ Η παρακολούθηση της εξέλιξης της φθοράς του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και ο συνδυασμός των πειραματικών και υπολογιστικών δεδομένων είναι απαραίτητοι για την αξιολόγηση των δεικτών κορεσμού και την πρόβλεψη πιθανών κινδύνων.
- ❖ Παραδείγματα υφιστάμενων ανθεκτικών κατασκευών με εκτοξευμένο σκυρόδεμα και οι συνθήκες έκθεσής τους σε διαβρωτικούς παράγοντες, είναι χρήσιμο να λαμβάνονται υπόψη για την πρόληψη μελλοντικών φθορών

- ❖ Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού της επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυροδέμα, η αντοχή της επένδυσης μπορεί να εκφραστεί είτε ως η παραμένουσα αντοχή μετά την έναρξη της θραύσης, αντοχή βασισμένη σε δοκιμές όπως EN14561 (2007) ή ASTM C1609/C1609M (2012) ή ως η απορρόφηση ενέργειας βάσει δοκιμών φατνωμάτων κατά EN14488 (2006) ή ASTM C1550 (2012).
- ❖ Η επίδραση των διαβρωτικών παραγόντων είναι αμελητέα σε μικρά πλάτη ρωγμών ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του έργου, αλλά αρκετά έντονη σε μεγάλα πλάτη ρωγμών.
- ❖ Από δείγματα εκτοξευόμενου σκυροδέματος ενισχυμένου με συνθετικές ίνες, αποδείχτηκε ότι δεν υπήρξε μεταβολή στην αντοχή του σε διάστημα 10 ετών έκθεσης σε διαβρωτικούς παράγοντες, ανεξάρτητα από το πλάτος ρωγμών σε λειτουργική κατάσταση. Επομένως, κατά το σχεδιασμό της επένδυσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ο καταλληλότερος τύπος ινών που θα εγγυάται την πλήρως λειτουργική διάρκεια ζωής για την οποία σχεδιάστηκε το έργο υπό τις αναμενόμενες συνθήκες έκθεσης σε διαβρωτικούς παράγοντες.
- ❖ Η χρήση ορισμένων τύπων ινών σε δυσμενείς διαβρωτικές συνθήκες μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικά χαμηλότερη αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε προχωρημένη ηλικία από ό, τι απαιτείται και μετράται στις 28 ημέρες.

Κεφάλαιο 6: Υδροηλεκτρικά έργα ΔΕΗ ΑΕ με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε προσωρινή και κυρίως μόνιμη επένδυση υποστήριξης υπόγειων κατασκευών

Στα πλαίσια της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας έχει πραγματοποιηθεί έρευνα σχετικά με την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως τελική επένδυση υπόγειων έργων. Διαπιστώθηκε ότι το συγκεκριμένο υλικό δεν έχει εφαρμοστεί συστηματικά και εκτεταμένα στον Ελλαδικό χώρο, ως τελική επένδυση. Συγκεκριμένα, κατόπιν συλλογής των στοιχείων των έργων που εφαρμόστηκε ως μόνιμη υποστήριξη, διαπιστώθηκε ότι η πλειοψηφία αυτών ανήκει στη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ ΑΕ) και αντιστοιχίζεται κυρίως σε φρέατα, σήραγγες, στοές προσπέλασης και θαλάμους συγκεκριμένων υδροηλεκτρικών έργων της Επιχείρησης.

Τα Υδροηλεκτρικά έργα που συναντάται η χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μόνιμη επένδυση υπόγειων κατασκευών ανήκουν γεωγραφικά στην κοιλάδα του Αχελώου στη Θεσσαλία, στην περιοχή του Άραχθου, του Μετσοβίτικου ποταμού και στις πηγές του Αώου στην Ήπειρο. Επίσης, έχει χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχα έργα στις λίμνες του ποταμού Αλιάκμονα στη Μακεδονία και σε σημεία του ποταμού Νέστου στα σύνορα Μακεδονίας και Θράκης.



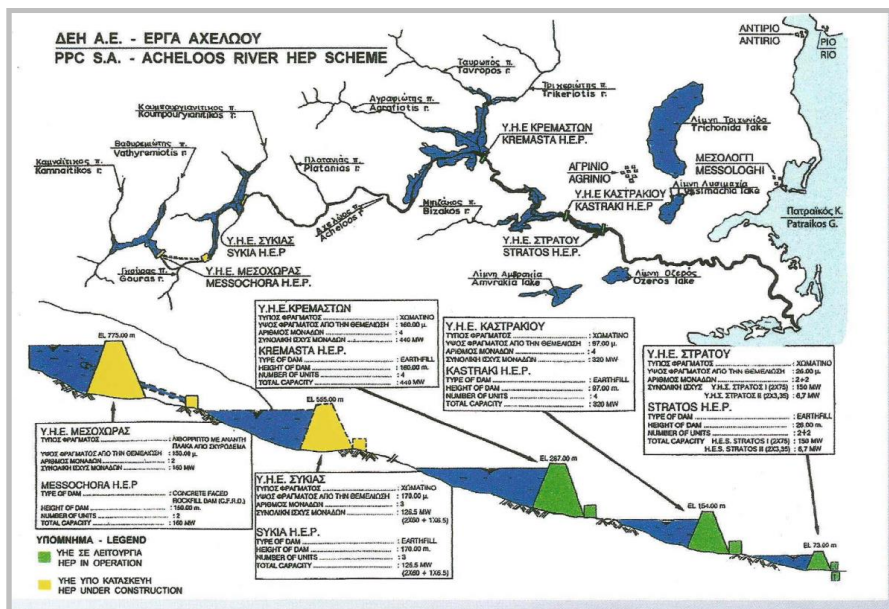
Εικόνα 29: Γεωγραφικός εντοπισμός ΥΗΕ με σήραγγες από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στον Ελλαδικό χώρο
1-ΥΗΕ Συκιάς, 2-Σήραγγα εκτροπής Αχελώου, 3-ΥΗΕ Κρεμαστών, 4-ΥΗΕ Στράτου, 5-ΥΗΕ Μεσοχώρας, 6-ΥΗΕ Μετσοβίτικου, 7-ΥΗΕ Αώου, 8-ΥΗΕ Ιλαρίωνα, 9-ΥΗΕ Ασωμάτων, 10-ΥΗΕ Πολύφτου, 11- ΥΗΕ Θησαυρού, 12-ΥΗΕ Πλατανόβρυσης, 13-ΥΗΕ Άγρα, 14-ΥΗΕ Λάδωνα

6.1 Υδροηλεκτρικά έργα από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην περιοχή του ποταμού Αχελώου

Τα Υδροηλεκτρικά έργα εκτροπής του ποταμού Αχελώου συνέβαλαν σημαντικά στην ανάπτυξη της καλλιέργειας γης στη Θεσσαλική πεδιάδα μέσω της εκτεταμένης άρδευσης της και αποτέλεσαν τις εγκαταστάσεις της ενεργειακής αξιοποίησης των υδάτων του ποταμού.



Εικόνα 30: Υδροηλεκτρικά Έργα Αχελώου (<https://www.ypethe.gr/archive/ydroilektrika-erga-ahelooy>)



Εικόνα 31: Έργα Αχελώου της ΔΕΗ ΑΕ («Αχελώος, το υδροηλεκτρικό συγκρότημα», ΔΕΗ ΑΕ, 2015)

6.1.1 Υδροηλεκτρικό έργο Συκιάς

Στο Υδροηλεκτρικό έργο Συκιάς, στα σύνορα των νομών Καρδίτσας και Άρτας, έχει κατασκευαστεί φράγμα ύψους 150 m με εκχειλιστή και θυροφράγματα, σταθμός ηλεκτροπαραγωγής, ταμιευτήρας, σήραγγες εκτροπής και προσαγωγής, καθώς και οδικές σήραγγες. Η μελέτη εκπονήθηκε από την Διεύθυνση Ανάπτυξης Υδροηλεκτρικών Έργων της ΔΕΗ ΑΕ και κατασκευάστηκε από την Εταιρεία ΑΕΓΕΚ ΑΕ.

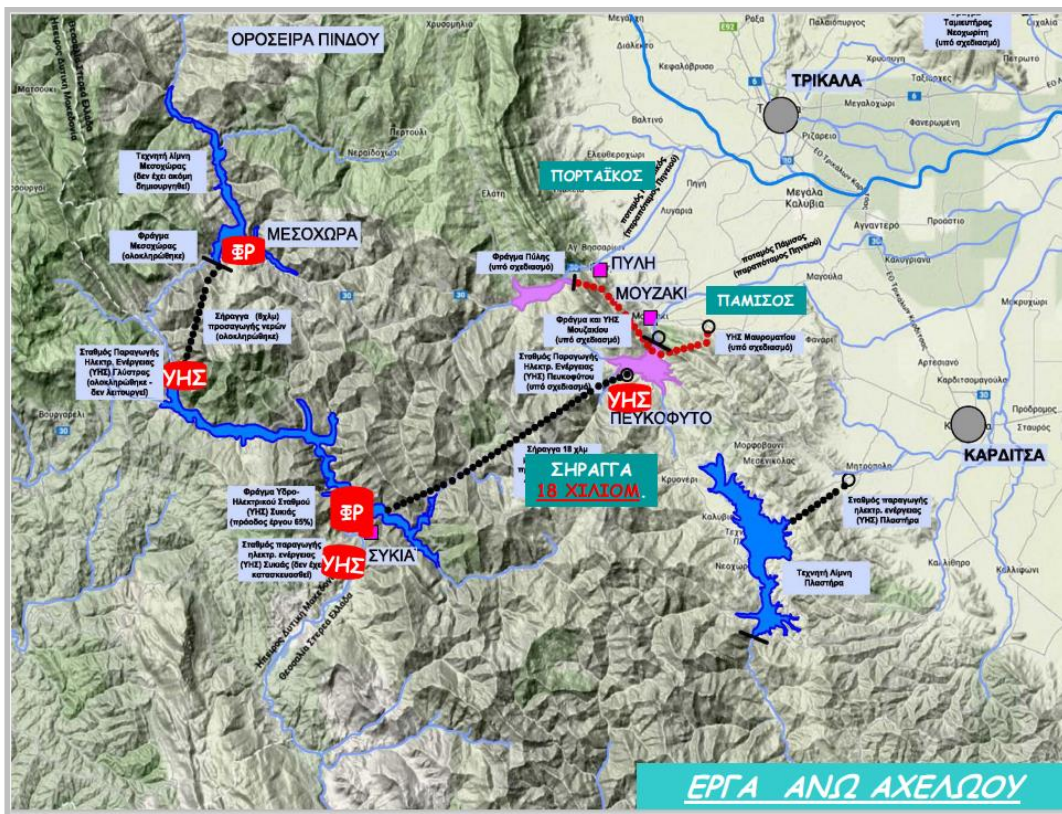


Εικόνα 32: Φράγμα ΥΗΕ Συκιάς
(1997 - 2012 Φωτογραφίες Φράγματος Συκιάς, <https://www.ypethe.gr/archive/perissoteres-plirofories-fragma-sykias>)

Στη σήραγγα εκτροπής Νο 2 και σε μήκος 605 m από τα 17,3 km του συνολικού μήκους, με εμβαδόν εκσκαφής 97 m² και ωφέλιμο εμβαδόν 94 m² πεταλοειδούς σχήματος, έχει χρησιμοποιηθεί εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χαλύβδινα πλαίσια με αγκύρια στην προσωρινή επένδυση και οπλισμένο σκυρόδεμα μόνο στο δάπεδο κατά την μόνιμη επένδυση. Η υπόλοιπη διατομή παρέμεινε χωρίς επένδυση, ενώ προβλέπεται να επενδυθεί με σκυρόδεμα στο μέλλον, αποδεικνύοντας ότι η προσωρινή επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα λειτούργησε συν τω χρόνω ως η μοναδική μορφή επένδυσης της εν λόγω σήραγγας. Η εκσκαφή πραγματοποιήθηκε με συμβατική διάτρηση και ανατινάξεις. Αποτελεί τμήμα της συνολικής σήραγγας εκτροπής με υδροληψία από τον ταμιευτήρα του έργου και εκβολή στην περιοχή της Δρακότρυπας Θεσσαλίας, ανάντη του αντίστοιχου ΥΗΕ Κρεμαστών. Το έργο ολοκληρώθηκε το 1985.

Από γεωλογικής άποψης η σήραγγα εκτροπής διαπερνά σχηματισμούς Κρητιδικών ασβεστόλιθων που αντιστοιχούν σε ιζηματογενή πετρώματα, με κύρια αιτία διάβρωσης τη μετατροπή τους σε καρστ. Αποτελούν αδιαπέρατους σχηματισμούς

εκτός αν είναι καρστικοποιημένοι, παρουσιάζουν διακλάσεις, ή κενά καρστ μεταξύ των στρώσεών τους, οπότε και μετατρέπονται σε γεωλογικούς σχηματισμούς με μειωμένη αντοχή και σταθερότητα. Στην καρστικοποιημένη μορφή τους αποτελούν ζώνη μεταβίβασης εισροής υδάτων στο εσωτερικό σήραγγας ή ζώνη κορεσμένη υδάτων, ως αποτέλεσμα σταθερής αποστράγγισης του υδροφόρου ορίζοντα.



Εικόνα 33: ΥΗΕ Άνω Αχελώου

(Η συμβολή των έργων στον ενεργειακό σχεδιασμό της χώρας, «Εκμετάλλευση των Υδροηλεκτρικών Σταθμών ως Έργων Πολλαπλού Σκοπού», Ι. Αργυράκης, Γενική Διεύθυνση Παραγωγής / Διεύθυνση Υδροηλεκτρικής Παραγωγής, ΔΕΗ ΑΕ, ΤΕΕ & Περιφερειακό Τμήμα ΤΕΕ Ηπείρου, <https://www.ypethe.gr/archive/ydroilektrika-erga-aheloy>)

ΕΙΣΟΔΟΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΕΚΤΡΟΠΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΣΥΚΙΑΣ



1997

Εικόνα 34: Είσοδος σήραγγας εκτροπής φράγματος Συκιάς
(«1997-2012_foto_ergoy_sykias», [ΥΗΕ Συκιάς | Υ.ΠΕ.ΘΕ. \(ypethe.gr\)](#))

ΕΞΟΔΟΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΕΚΤΡΟΠΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΣΥΚΙΑΣ

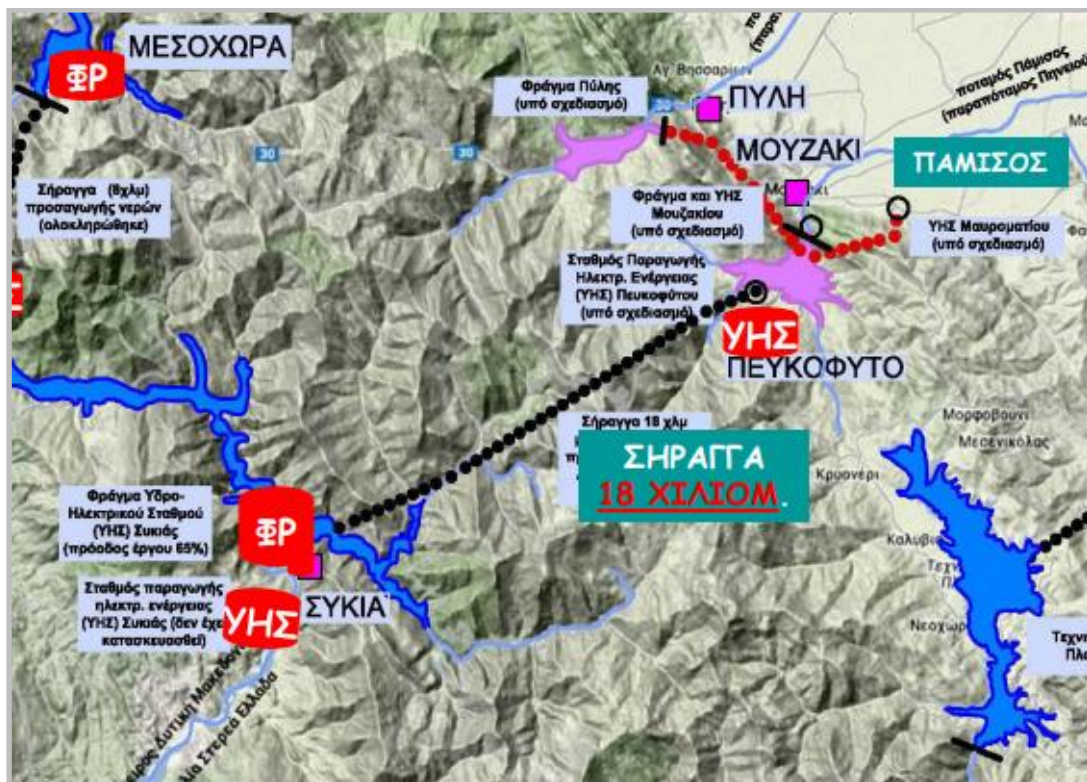


1999

Εικόνα 35: Έξοδος σήραγγας εκτροπής φράγματος Συκιάς
(«1997-2012_foto_ergoy_sykias», [ΥΗΕ Συκιάς | Υ.ΠΕ.ΘΕ. \(ypethe.gr\)](#))

Στο ίδιο έργο θα εξεταστούν επιπλέον έξι οδικές σήραγγες, που έχουν παραμείνει χωρίς εφαρμογή επένδυσης όσον αφορά τη μόνιμη επένδυση, ενώ στην προσωρινή έχει εφαρμοστεί εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χαλύβδινα πλαίσια και αγκυρώσεις σε διατομή πεταλοειδούς σχήματος. Οι εκσκαφή τους πραγματοποιήθηκε με τις συμβατικές μεθόδους διατρήσεων και ανατινάξεις σε διατομή 48 m² για όλες και 64 m² για την οδική σήραγγα 2. Αποτελούν έργα διαφορετικής έκτασης καθώς τα μήκη τους ποικίλουν από 90 m έως 520 m, μεταβάλλοντας και το αντίστοιχο κόστος των επί μέρους έργων από 32 σε 172 εκατομμύρια δραχμές (95.000€~505.000€). Τα εν λόγω επί μέρους έργα ολοκληρώθηκαν τα έτη 1987-1989.

Η εκσκαφή τους συνάντησε κρητιδικούς ασβεστόλιθους, ενώ οι οδικές σήραγγες 3, 4 και 4α διαπέρασαν και σχηματισμούς φλύσχη και πυριτιωμένων ιλυόλιθων. Οι τελευταίοι αποτέλεσαν σχηματισμούς με μειωμένη αντοχή και αστάθεια σε πρηνή, ενώ στην κατασκευή σήραγγας είναι υπαίτιοι για προβλήματα παραμορφώσεων και διογκώσεων, αυξάνοντας τις απαιτήσεις άμεσης και ενισχυμένης υποστήριξης.



Εικόνα 36:ΥΗΕ στην περιοχή της Συκιάς

(Η συμβολή των έργων στον ενεργειακό σχεδιασμό της χώρας, «Εκμετάλλευση των Υδροηλεκτρικών Σταθμών ως Έργων Πολλαπλού Σκοπού», Ι. Αργυράκης, Γενική Διεύθυνση Παραγωγής / Διεύθυνση Υδροηλεκτρικής Παραγωγής, ΔΕΗ ΑΕ, ΤΕΕ & Περιφερειακό Τμήμα ΤΕΕ Ηπείρου <https://www.ypethe.gr/archive/ydroilektrika-erga-aheloooy>)

Αν και για έργο της Συκιάς, κατόντη του έργου της Μεσοχώρας, έχει εκπονηθεί μεγάλος αριθμός κατασκευαστικών μελετών και Μελετών Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων, αυτό παραμένει ημιτελές παρόλο που αποτελεί το βασικό έργο για την εκτροπή του Αχελώου προς τη Θεσσαλία. (έγγραφο Υπουργείου Υποδομών και Μεταφορών υπ.αρ.πρωτ.Β-501/18-09-2020)

Η ολοκλήρωσή του θα απέφερε οφέλη τόσο ως έργο εκτροπής όσο και ως σταθμός παραγωγής ενέργειας πληρώνοντας τον ταμιευτήρα της Συκιάς και προσθέτοντας επιπλέον 126,5 MW στο σύστημα και 530 GWh ενέργειας ετησίως.

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
Εκτροπή No 2	Υδραυλική	Κρητιδικό Ασβεστόλιθοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	605	Πεταλοειδές	97	94	1988	ΥΓΕ Συκιάς-σήραγγες εκτροπής και συναφή έργα	ΔΕΗ/ΔΑΥΕ	ΑΕΓΕΚ ΑΕ
Οδική No 1	Οδική	Κρητιδικό Ασβεστόλιθοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	330	Πεταλοειδές	64	59	1987	ΥΓΕ Συκιάς-σήραγγες εκτροπής και συναφή έργα	ΔΕΗ/ΔΑΥΕ	ΑΕΓΕΚ ΑΕ
Οδική No 2	Οδική	Κρητιδικό Ασβεστόλιθοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	154	Πεταλοειδές	48	44	1988	ΥΓΕ Συκιάς-σήραγγες εκτροπής και συναφή έργα	ΔΕΗ/ΔΑΥΕ	ΑΕΓΕΚ ΑΕ
Οδική No 3	Οδική	Κρητιδικό Ασβεστόλιθοι πρώτος φλύσχης	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	221	Πεταλοειδές	48	44	1989	ΥΓΕ Συκιάς-σήραγγες εκτροπής και συναφή έργα	ΔΕΗ/ΔΑΥΕ	ΑΕΓΕΚ ΑΕ
Οδική No 4	Οδική	Ασβεστόλιθοι Πυριτωμένοι Ιλυόλιθοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	199	Πεταλοειδές	48	44	1989	ΥΓΕ Συκιάς-σήραγγες εκτροπής και συναφή έργα	ΔΕΗ/ΔΑΥΕ	ΑΕΓΕΚ ΑΕ
Οδική No 4α	Οδική	Ασβεστόλιθοι πρώτος φλύσχης	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	91	Πεταλοειδές	48	44	1989	ΥΓΕ Συκιάς-σήραγγες εκτροπής και συναφή έργα	ΔΕΗ/ΔΑΥΕ	ΑΕΓΕΚ ΑΕ
Οδική No 5	Οδική	Κρητιδικό Ασβεστόλιθοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	521	Πεταλοειδές	48	44	1989	ΥΓΕ Συκιάς-σήραγγες εκτροπής και συναφή έργα	ΔΕΗ/ΔΑΥΕ	ΑΕΓΕΚ ΑΕ

Πίνακας 5: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΓΕ Συκιάς

6.1.2 Έργο εκτροπής Αχελώου

Το έργο σήραγγας εκτροπής Αχελώου από το ΥΓΕ Συκιάς ως το ΥΓΕ Πευκόφυτου διασχίζει τη ζώνη της Πίνδου, όπου σε κάποιο σημείο κατά μήκος της ξεκινά μία σήραγγα προσπέλασης ενδιάμεσου μετώπου μήκους 1,2 km η οποία και σχεδιάστηκε για να εξυπηρετήσει κατασκευαστικούς και ερευνητικούς σκοπούς. Αποτέλεσε ένα επιμέρους έργο που ολοκληρώθηκε το 1987 με συνολική δαπάνη 292 εκατομμύρια δραχμές (~860.000 €), από Μελετητές της Διεύθυνσης Ανάπτυξης Υδροηλεκτρικών Έργων της ΔΕΗ ΑΕ και κατασκευαστές της Εταιρείας Εγνατία ΑΤΕ. Σχεδιάστηκε με διατομή εκσκαφής εμβαδού 19,5 m² με συμβατικές μεθόδους διάνοιξης και ανατινάξεις. Η τελική διατομή της σήραγγας προσπέλασης αντιστοιχίστηκε σε διατομή πεταλοειδούς σχήματος ωφέλιμου εμβαδού 18,0 m². Η προσωρινή επένδυση αποτελούνταν από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, χαλύβδινα πλαίσια με τις απαιτούμενες αγκυρώσεις, ενώ δεν έχει μέχρι στιγμής τοποθετηθεί μόνιμη υποστήριξη. Προκατασκευασμένα στοιχεία επένδυσης που παραμένουν στην έξοδο της σήραγγας εκτροπής Αχελώου στην τοποθεσία Δρακότρυπα Θεσσαλίας υπάρχει ενδεχόμενο να αποτελούν την μόνιμη επένδυση σχεδιασμού τόσο της σήραγγας εκτροπής όσο και της σήραγγας προσπέλασης μετώπου οι οποίες αναφέρονται πιο πάνω. Κάλλιστα θα μπορούσε να εφαρμοστεί και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για την ολοκλήρωσή τους.

ΕΞΟΔΟΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΕΚΤΡΟΠΗΣ (ΠΕΥΚΟΦΥΤΟ)



1999

Εικόνα 37: Έξοδος σήραγγας εκτροπής στο Πευκόφυτο
(«1997-2012_foto_ergoy_sykias», ΥΓΕ Συκιάς | Υ.ΠΕ.ΘΕ, (ypethe.gr))



Εικόνα 38: Προκατασκευασμένα στοιχεία μόνιμης επένδυσης στην έξοδο της σήραγγας εκτροπής Αχελώου στη θέση Δρακότρυπα Θεσσαλίας
(2018 09 17 Η Σήραγγα εκτροπής Αχελώου - YouTube)

Το έργο που εξετάζουμε συνάντησε κατά την εκσκαφή του ιλυόλιθους, ασβεστόλιθους, κερατόλιθους και φλύσχη της ζώνης Πίνδου. Όπως προαναφέρθηκε ο ασβεστόλιθος αποτελεί σχηματισμό αντοχών εκτός ζωνών καρστ αλλά και πιθανού εκτεταμένου δικτύου ασυνεχειών, που επηρεάζουν τη διαπερατότητά του.

Οι αναφορές που έχουμε για ιλυόλιθους σε συνδυασμό με ασβεστόλιθο, ενδεχομένως με εναλλαγές ενστρώσεων οδηγεί σε μειωμένες αντοχές στις περιοχές που εμφανίζονται ασυνέχειες, με μικρή όμως εμμονή. Η ευστάθεια σε αυτή την περίπτωση είναι ιδιαίτερα μειωμένη, ιδιαίτερα στην περίπτωση δυσμενών κλίσεων στρωμάτωσης.

Ο φλύσχος, σχηματισμός από εναλλαγές στρωμάτων ψαμμιτών και ιλυολίθων, ενέχει τον κίνδυνο των φαινομένων σύνθλιψης σε σήραγγα και της σύγκλισης οροφής ειδικά αν είναι ιδιαίτερα διατμημένος, ενώ αποτελεί κυρίως στεγανό σχηματισμό.



Εικόνα 39: Σήραγγα Πευκόφυτου
(<https://www.ypethe.gr/archive/perissoteres-plirofories-siragga-peykofytoy>)

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΑΡΧΙΚΗ (ΠΡΟΣΩΡΙΝΗ) ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
Προσπέλασης ενδιάμεσου μετώπου σήραγγας εκτροπής Αχελώου	Ερευνητική Κατασκευαστική	Ιλυόλιθοι, Ασβεστόλιθοι, Κερατόλιθοι και πρώτος Φλύσχος ζώνης Πίνδου	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	1.187	Πεταλοειδές	19.5	18	Αγκύρια - Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα/ Χαλύβδινα Πλαίσια	Εκτροπή Αχελώου - Σήραγγα προσπέλασης ενδιάμεσου μετώπου	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	ΕΓΝΑΤΙΑ ΑΤΕ

Πίνακας 6: Σήραγγα προσπέλασης ενδιάμεσου μετώπου, με επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως παραμένουσα συν τω χρόνω υποστήριξη, στη σήραγγα εκτροπής Αχελώου

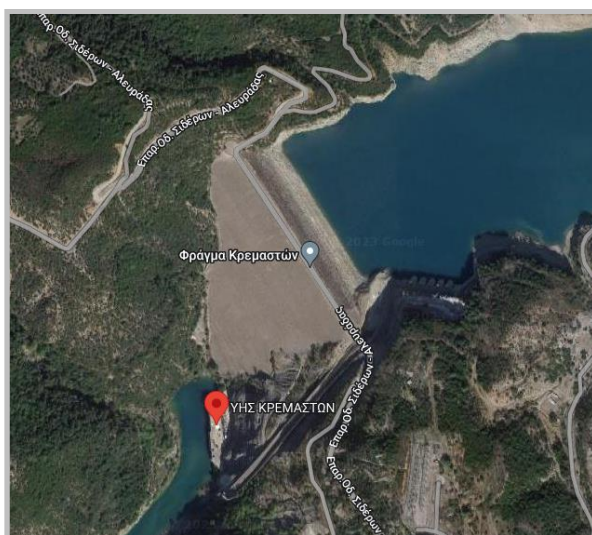
6.1.3 Υδροηλεκτρικό έργο Κρεμαστών

Νότια του ΥΗΕ Συκιάς έχει κατασκευαστεί το ΥΗΕ Κρεμαστών, που αποτελείται από την ομώνυμη τεχνητή λίμνη, το ομώνυμο φράγμα και τον Σταθμό παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας. Το έργο αυτό αποτέλεσε την πηγή ενέργειας για την εξόρυξη βωξίτη στη Βοιωτία και την παραγωγή αλουμινίου, τα οποία και εξάγουμε κατά κόρον πλέον ως χώρα στις μέρες μας. Ο ΥΗΣ Κρεμαστών είναι ο μεγαλύτερος

υδροηλεκτρικός σταθμός της Ελλάδας. Το έργο κατασκευάστηκε από την Εταιρεία Geotehnica.



Εικόνα 40: Χάρτης ΥΗΕ Κρεμαστών (ΥΗΣ ΚΡΕΜΑΣΤΩΝ - Χάρτες Google)



Εικόνα 41: Χάρτης ΥΗΕ Κρεμαστών (ΥΗΣ ΚΡΕΜΑΣΤΩΝ - Χάρτες Google)

Τα επί μέρους έργα που αναφέρονται παρακάτω αποτελούν αποστραγγιστικές σήραγγες (F, G, H, J, K, L, M, M-1), διαφόρων μηκών χάραξης από 99 έως 450 m, που εκσκάφηκαν με συμβατικές μεθόδους διατήσεων και ανατινάξεις με σχήμα διατομής ημικυκλικό και ορθογωνικό, εμβαδού χρήσης 5,5 m². Η προσωρινή υποστήριξη εφαρμόστηκε από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, χαλύβδινα πλαίσια και

αγκυρώσεις και η μόνιμη από εκτοξευόμενο και οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι σήραγγες αυτές ολοκληρώθηκαν το 1973.

Κατά την εκσκαφή τους διαπέρασαν ιλυόλιθους και κροκαλοπαγή. Η χαμηλή μηχανική αντοχή των ιλυολίθων και η πιο ψαθυρή συμπεριφορά των κροκαλοπαγών που οδηγεί σε ασυνέχειες με εμμονή ενέχουν τον κίνδυνο αστοχιών και απαιτούν άμεση υποστήριξη στην διάνοιξη και την κατασκευή σήραγγας. Τα πετρώματα αυτά αποτελούν αδιαπέρατους σχηματισμούς, εκτός από τις περιοχές των ασυνεχειών.

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
F	Αποστραγγιστική	Ιλυόλιθοι - Κροκαλοπαγή	Διατρήσεις - Αναπνάξεις	324	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	5,5	1973	ΥΠΕ Κρεμαστών	ΓΕΟΤΕΧΝΙΚΑ, Jugoslavia
G	Αποστραγγιστική	Ιλυόλιθοι - Κροκαλοπαγή	Διατρήσεις - Αναπνάξεις	450	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	5,5	1973	ΥΠΕ Κρεμαστών	ΓΕΟΤΕΧΝΙΚΑ, Jugoslavia
H	Αποστραγγιστική	Ιλυόλιθοι - Κροκαλοπαγή	Διατρήσεις - Αναπνάξεις	-	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	5,5	1973	ΥΠΕ Κρεμαστών	ΓΕΟΤΕΧΝΙΚΑ, Jugoslavia
J	Αποστραγγιστική	Ιλυόλιθοι - Κροκαλοπαγή	Διατρήσεις - Αναπνάξεις	140	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	5,5	1973	ΥΠΕ Κρεμαστών	ΓΕΟΤΕΧΝΙΚΑ, Jugoslavia
K	Αποστραγγιστική	Ιλυόλιθοι - Κροκαλοπαγή	Διατρήσεις - Αναπνάξεις	100	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	5,5	1973	ΥΠΕ Κρεμαστών	ΓΕΟΤΕΧΝΙΚΑ, Jugoslavia
L	Αποστραγγιστική	Ιλυόλιθοι - Κροκαλοπαγή	Διατρήσεις - Αναπνάξεις	-	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	5,5	1973	ΥΠΕ Κρεμαστών	ΓΕΟΤΕΧΝΙΚΑ, Jugoslavia
M	Αποστραγγιστική	Ιλυόλιθοι - Κροκαλοπαγή	Διατρήσεις - Αναπνάξεις	100	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	5,5	1973	ΥΠΕ Κρεμαστών	ΓΕΟΤΕΧΝΙΚΑ, Jugoslavia
M-1	Αποστραγγιστική	Ιλυόλιθοι - Κροκαλοπαγή	Διατρήσεις - Αναπνάξεις	99	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	5,5	1973	ΥΠΕ Κρεμαστών	ΓΕΟΤΕΧΝΙΚΑ, Jugoslavia

Πίνακας 7: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΠΕ Κρεμαστών

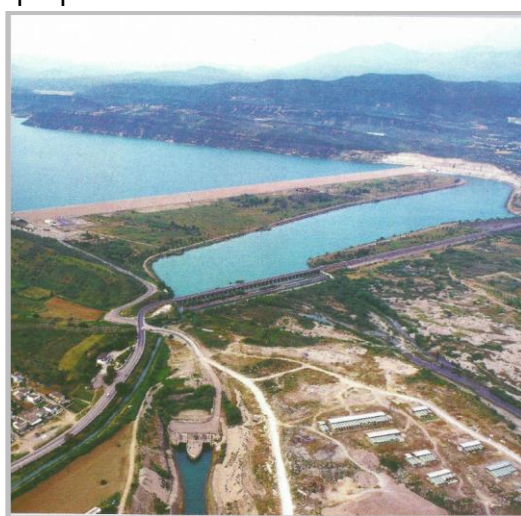
6.1.4 Υδροηλεκτρικό έργο Στράτου

Το ΥΗΕ Στράτου, κατάντη του ΥΗΕ Κρεμαστών, που δημιουργήσε την τεχνητή λίμνη Στράτου αποτελείται από το ΥΗΕ Στράτου Ι (με τέσσερις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής) και το ΥΗΕ Στράτου ΙΙ (με μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας). Εντοπίζεται στη Δυτική Στερεά Ελλάδα και συγκεκριμένα στο Νομό Αιτωλοακαρνανίας κοντά στο Αγρίνιο.



Εικόνα 42: Χάρτης ΥΗΕ στην περιοχή του Στράτου (Η συμβολή των έργων στον ενεργειακό σχεδιασμό της χώρας, «Εκμετάλλευση των Υδροηλεκτρικών Σταθμών ως Έργων Πολλαπλού Σκοπού», Ι. Αργυράκης, Γενική Διεύθυνση Παραγωγής / Διεύθυνση Υδροηλεκτρικής Παραγωγής, ΔΕΗ ΑΕ, ΤΕΕ & Περιφερειακό Τμήμα ΤΕΕ Ηπείρου, <https://www.ypethe.gr/archive/ydroilektrika-erga-aheloooy>)

Η έναρξη λειτουργίας του χρονολογείται το έτος 1989. Εξυπηρετεί την παραγωγή ενέργειας και καλύπτει τις αρδευτικές ανάγκες της περιοχής του νότιου τμήματος του ποταμού Αχελώου, ενώ η λεκάνη ηρεμίας του φράγματος Στράτου χρησιμοποιείται ακόμη και για ναυταθλητισμό.



Εικόνα 43: ΥΗΕ στην περιοχή του Στράτου (Η συμβολή των έργων στον ενεργειακό σχεδιασμό της χώρας, «Εκμετάλλευση των Υδροηλεκτρικών Σταθμών ως Έργων Πολλαπλού Σκοπού», Ι. Αργυράκης, Γενική Διεύθυνση Παραγωγής / Διεύθυνση Υδροηλεκτρικής Παραγωγής, ΔΕΗ ΑΕ, ΤΕΕ & Περιφερειακό Τμήμα ΤΕΕ Ηπείρου, <https://www.ypethe.gr/archive/ydroilektrika-erga-aheloooy>)

Αξίζει να σημειωθεί η συμβολή των τεχνητών φραγμάτων και λιμνών στην ανάπτυξη της χλωρίδας και της πανίδας των παρακείμενων περιοχών επομένως και στην αύξηση της βιοποικιλότητας.



Εικόνα 44: Περιοχή Στράτου

(Η συμβολή των έργων στον ενεργειακό σχεδιασμό της χώρας, «Εκμετάλλευση των Υδροηλεκτρικών Σταθμών ως Έργων Πολλαπλού Σκοπού», Ι. Αργυράκης, Γενική Διεύθυνση Παραγωγής / Διεύθυνση Υδροηλεκτρικής Παραγωγής, ΔΕΗ ΑΕ, ΤΕΕ & Περιφερειακό Τμήμα ΤΕΕ Ηπείρου, <https://www.ypethe.gr/archive/ydroilektrika-erga-ahelooy>)

Από τα επί μέρους έργα του ΥΗΕ Στράτου έχει επιλεγεί η βοηθητική σήραγγα μήκους 450 m και μεταβλητής διατομής που κατασκευάστηκε έως το 1986 από την Εταιρεία Cosint. Η μελέτη ολοκληρώθηκε από το Κλιμάκιο Μελέτης Υδροηλεκτρικών Έργων της ΔΕΗ ΑΕ, που αργότερα μετονομάστηκε σε Διεύθυνση Μελετών-Κατασκευών Υδροηλεκτρικών Έργων. Η συγκεκριμένη σήραγγα παραμένει ανεπένδυτη μετά την προσωρινή υποστήριξη που εφαρμόστηκε με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πλαίσια και αγκυρώσεις.

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΟΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
Βοηθητικές Σήραγγες	Κατασκευαστική	Φλύσχης	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	450	Πεταλοειδές	Μεταβλητό	Μεταβλητό	1986	ΥΗΕ Στράτου	ΔΕΗ / ΚΜΥ	COSINT

Πίνακας 8: Σήραγγα με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Στράτου

6.1.5 Υδροηλεκτρικό έργο Μεσοχώρας

Το ΥΗΕ Μεσοχώρας αποτελεί έργο υπό κατασκευή έως σήμερα και τοποθετείται γεωγραφικά στον άνω ρου του ποταμού Αχελώου κοντά στο ομώνυμο χωριό της Θεσσαλίας. Αποτελείται από τρεις μονάδες παραγωγής ενέργειας και η έναρξη του έργου τοποθετείται χρονολογικά το έτος 1986.

Ένα έργο σαν αυτό εξυπηρετεί, εκτός από την παραγωγή ενέργειας, την επάρκεια της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες αιχμής και μέγιστης κατανάλωσης, την παραγωγή καθαρής υδροηλεκτρικής ενέργειας και συνεπώς τη μείωση των ρύπων οξειδίου αζώτου, θείου και άνθρακα. Συντάσσεται με την Οδηγία 2001/77/ΕΚ της 27ης Σεπτεμβρίου 2001 («Πράσινη Βίβλος»), που αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Φέρει αποθηκευτική ικανότητα υδάτων της τάξης των 250 εκ. m³, οπότε και παρέχει αντιπλημμυρική προστασία στις κατάντη περιοχές της Μεσοχώρας.



Εικόνα 45: ΥΗΕ Μεσοχώρας Θεσσαλίας
(Μεσοχώρα - Χάρτες Google)

Από τα επιμέρους τεχνικά έργα του ΥΗΕ Μεσοχώρας, αυτά που θα αναφερθούν πιο αναλυτικά είναι μία σήραγγα τσιμεντενέσεων και αποστραγγίσεων, η οδική σήραγγα Πλακαριών, η σήραγγα προσπέλασης και αποστραγγίσεως στη θέση Γλύστρα, δύο κατασκευαστικές σήραγγες, η ενδιάμεσου μετώπου στη θέση Κορυφή και μία σήραγγα προσπέλασης μετώπου.

Η αποστραγγιστική σήραγγα και η οδική σήραγγα Πλακαριών εκσκάφτηκαν με συμβατικές μεθόδους διατρήσεων και ανατινάξεις, με σχήμα διατομής ημικυκλικό στη στέψη και ορθογωνικό στο δάπεδο. Για την προσωρινή τους υποστήριξη χρησιμοποιήθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, χαλύβδινα πλαίσια και αγκυρώσεις, ενώ η μόνιμη επένδυση ολοκληρώθηκε με οπλισμένο και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα το 1994 για την αποστραγγιστική και το 1991 για την σήραγγα Πλακαριών.

Η σήραγγα Πλακαριών, μήκους 1,3 km, εκσκάφτηκε με εμβαδόν διατομής 10 m² αφήνοντας διατομή ωφέλιμου εμβαδού μετά την τελική της διαμόρφωση 6,5 m². Η εκσκαφή συνάντησε εναλλαγές κερατόλιθων, ιλυολίθων και ασβεστολίθων της ζώνης της Πίνδου, σχηματισμούς αδιαπέρατους εκτός ασυνεχειών ή διαπερατούς στις περιοχές καρστ ασβεστολίθων. Εκτός από τους ιλυόλιθους, οι υπόλοιποι είναι σχηματισμοί καλή αρχικής μηχανικής αντοχής.



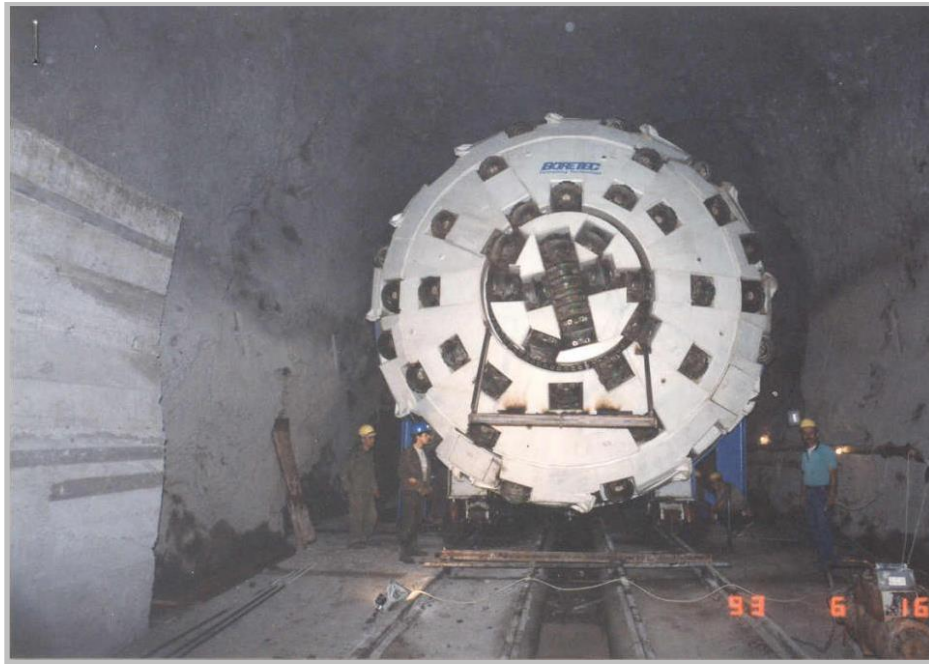
Εικόνα 46: Είσοδος οδικής σήραγγας Πλακαριών (Μεσοχώρα - Χάρτες Google)

Η αποστραγγιστική σήραγγα μήκους 318 m, εκσκαφής εμβαδού 64 m² και ωφέλιμου εμβαδού διατομής 47 m², συνάντησε ιλυόλιθους και κερατόλιθους της ζώνης της Πίνδου με τα πλεονεκτήματα της αυξημένης μηχανικής αντοχής των κερατόλιθων και τα μειονεκτήματα της μειωμένης μηχανικής αντοχής των ιλυόλιθων και των ασυνεχειών που συναντήθηκαν στους κερατόλιθους και στις επαφές των εναλλαγών των υπόλοιπων γεωλογικών σχηματισμών.

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
Τσιμ/σεων - Αποστρ/σεων	Τσιμ/σεων - Αποστρ/σεων	Εναλλαγές κερατολίθων Ιλυολιθων-Ασβεστολιθων Ιουρασικού Ζώνης Πίνδου	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	1289	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	10	6,5	1994	ΥΠΕ Μεσοχώρας - φράγμα, εκχειλιστής & συναφή έργα	ΔΕΗ / ΔΔΥΕ	Κ/Ξ ΜΕΤΩΝ Α.Ε. - ΑΕΓΕΚ Α.Ε.
Πλακαριών	Οδική	Ιλυόλιθοι-Κερατόλιθοι Ζώνης Πίνδου	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	318	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	64	47	1991	ΥΠΕ Μεσοχώρας - φράγμα, εκχειλιστής & συναφή έργα	ΔΕΗ / ΔΔΥΕ	Κ/Ξ ΜΕΤΩΝ Α.Ε. - ΑΕΓΕΚ Α.Ε.

Πίνακας 9: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΠΕ Μεσοχώρας (*ως τελική επένδυση στα στοιχεία της ΔΕΗ ΑΕ αναφέρεται «οπλισμένο σκυρόδεμα ή εκτοξευόμενο σκυρόδεμα»)

Η σήραγγα προσπέλασης και αποστραγγίσεως στη θέση Γλύστρα εκσκάφτηκε επίσης με συμβατικές μεθόδους διάνωσης και ανατινάξεις, με σχήμα διατομής πεταλοειδές και με εμβαδόν διατομής 55 m² (ωφέλιμο εμβαδόν χρήσης διατομής 50 m²). Η προσωρινή υποστήριξη εφαρμόστηκε με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πλαίσια και αγκυρώσεις περίπου το έτος 1993.



Εικόνα 47: Σήραγγα προσαγωγής Μεσοχώρας-Θέση Γλύστρα – Σήραγγα μεταφοράς νερού στον σταθμό παραγωγής ενέργειας
<http://wikimapia.org/#lang=el&lat=37.966700&lon=23.716700&z=12&m=w>

Η δυσκολία στην κατασκευή αυτής της σήραγγας έγκειται στους γεωλογικούς σχηματισμούς που συνάντησε και στο γεγονός ότι χωρικά αντιστοιχίζονται σε μία μεταβατική ζώνη από κρητιδικούς ασβεστόλιθους σε φλύσχη Πίνδου και πολύχρωμους αργιλόλιθους, ιλυόλιθους και κερατόλιθους. Εκτός από τις μέτριες με μειωμένες μηχανικές αντοχές των σχηματισμών και των στρωσιγενών εναλλαγών τους, που απαιτούν άμεση υποστήριξη και μικρό βήμα προχώρησης στην κατασκευή μια σήραγγας προστίθεται και η αυξημένη υδατοπερατότητα στις επαφές στρώσεων, στις περιοχές ασυνεχειών και στις περιοχές ασβεστολιθικού καρστ, ανάλογα με την θέση του υδροφόρου ορίζοντα ως προς την προς κατασκευή σήραγγα.

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
Προσπέλασης & αποστραγγίσεως στη θέση Γλύστρα	Κατασκευαστική - Αποστραγγιστική	Μεταβατική ζώνη από κρητιδικούς ασβεστόλιθους σε φλύσχη Πίνδου - Πολύχρωμοι αργιλόλιθοι, ιλυόλιθοι & κερατόλιθοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	210	Πεταλοειδές	55	50	1993	ΥΠΕ Μεσοχώρας - σήραγγα προσαγωγής	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	Κ/Ε ΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Ε. - ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ Α.Ε. - ΠΑΡΝΩΝ Α.Ε.

Πίνακας 10: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΠΕ Μεσοχώρας

Άλλες δύο σήραγγες στο ΥΠΕ Μεσοχώρας στις οποίες θα αναφερθούμε είναι μία σήραγγα ενδιάμεσου μετώπου στη θέση Κορυφή και μία σήραγγα προσπέλασης μετώπου για TBM. Η σήραγγα στη θέση Κορυφή αποτελεί κατασκευαστική σήραγγα και εκσκάφτηκε με συμβατικές μεθόδους διατρήσεων και με ανατινάξεις, για μήκος 544 m και εμβαδόν διατομής 36 m² (ελεύθερο εμβαδόν χρήσης διατομής 33 m²). Η προσωρινή υποστήριξη εφαρμόστηκε από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, μεταλλικά πλαίσια και αγκυρώσεις ενώ το έργο αυτό ολοκληρώθηκε το 1994 αφού καλύφθηκε το δάπεδο της σήραγγας με οπλισμένο σκυρόδεμα.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που διέσχισε μέχρι και την ολοκλήρωση της κατασκευής αντιστοιχούν σε τριαδικούς κερατόλιθους, ασβεστόλιθους και λατυποκροκαλοπαγή πετρώματα, ιουρασικούς κερατόλιθους και ασβεστόλιθους και πολύχρωμους αργιλόλιθους, ιλυόλιθους και κερατόλιθους. Οι εναλλαγές σχηματισμών καλής, μέτριας και μειωμένης μηχανικής αντοχής, το διαφορετικό ανά είδος σχηματισμού βάθος ασυνεχειών, καθώς και η εναλλαγή των αδιαπέρατων περιοχών με υδατοπερατές ασβεστολιθικών καρστ δημιουργούν αυξημένες απαιτήσεις υποστήριξης αλλά και την πρόβλεψη της αυξημένης υδατοστεγανότητας του έργου.

Η σήραγγα προσπέλασης μετώπου TBM, μήκους 211 m, αποτέλεσε μία κατασκευαστική σήραγγα που διανοίχτηκε με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής TBM μέσω ιλυολίθων, ασβεστολίθων και κερατολίθων. Αποτελούν αδιαπέρατους σχηματισμούς εκτός περιοχών καρστ και με ασυνέχειες με εμμονή στους κερατόλιθους, που αποτελούν σχηματισμούς με αυξημένη μηχανική αντοχή. Επιφανειακές είναι οι ασυνέχειες στους μικρότερης μηχανικής αντοχής ιλυόλιθους. Η διατομή της εν λόγω σήραγγας είναι κυκλικής διατομής, εμβαδού εκσκαφής 31 m² και αντίστοιχου ωφέλιμου 27 m². Η προσωρινή της επένδυση ολοκληρώθηκε με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πλαίσια και αγκυρώσεις κατά το έτος 1997.



Εικόνα 48: Σήραγγα Μεσοχώρας (Σήραγγες – Michaniki)

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
Ενδιάμεσου μετώπου στη θέση Κορυφή	Κατασκευαστική	Τριαδικοί Κερατόλιθοι - Ασβεστόλιθοι, Τριαδικό Λατυποκροκαλοπαγές Ιουρασικοί Κερατόλιθοι - Ασβεστόλιθοι Πολύχρωμοι Αργιλόλιθοι Πυριτωμένοι Ιλυόλιθοι - Κερτόλιθοι, Πολύχρωμοι Κερατόλιθοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	544	Πεταλοειδές	36,3	32,5	1994	ΥΠΕ Μεσοχώρας - σήραγγα προσαγωγής	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	Κ/Ε ΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Ε. - ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ Α.Ε. - ΠΑΡΝΩΝ Α.Ε.
Προσπέλασης μετώπου TBM	Κατασκευαστική	Ιλυόλιθοι - Ασβεστόλιθοι - Κερατόλιθοι	Διάνοιξη με TBM	211	Κυκλική	31,2	26,5	1997	ΥΠΕ Μεσοχώρας - σήραγγα προσαγωγής	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	Κ/Ε ΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Ε. - ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ Α.Ε. - ΠΑΡΝΩΝ Α.Ε.

Πίνακας 11: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΠΕ Μεσοχώρας (*ως τελική επένδυση στα στοιχεία της ΔΕΗ ΑΕ αναφέρεται «οπλισμένο σκυρόδεμα στο δάπεδο»)

6.2 Υδροηλεκτρικά έργα από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην περιοχή του ποταμού Άραχθου και Μετσοβίτικου

6.2.1 Υδροηλεκτρικό έργο Μετσοβίτικου

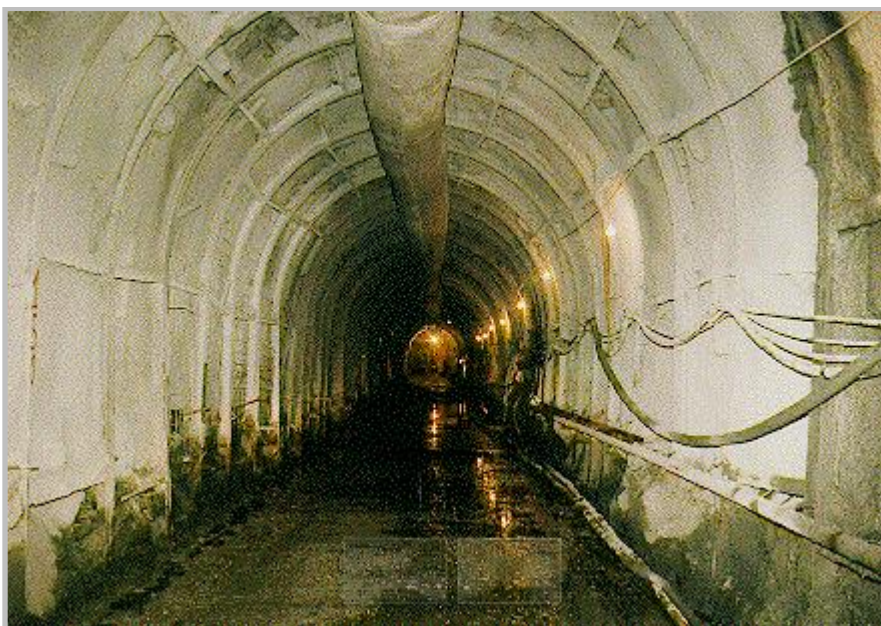
Το ΥΗΕ Μετσοβίτικου μελετήθηκε από τη Διεύθυνση Ανάπτυξης Υδροηλεκτρικών Έργων της ΔΕΗ ΑΕ και κατασκευάστηκε από την Εταιρεία Μηχανική ΑΕ. Το έργο αυτό περιλαμβάνει σήραγγες προσαγωγής, σήραγγες προσπέλασης, σταθμό παραγωγής και άλλα συναφή επί μέρους έργα. Η αξία του έργου ανήλθε στα 11,7 εκατομμύρια € και η ολοκλήρωσή του τοποθετείται χρονικά στο διάστημα 1996-1999. Τα επί μέρους τμήματα του έργου που έχουν επιλεχθεί στην παρούσα έκθεση είναι μία οδική σήραγγα προσπέλασης μήκους 257 m και μία κατασκευαστική μήκους 140 m, στην προσωρινή υποστήριξη των οποίων είχε εφαρμοστεί εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με μεταλλικά πλαίσια και τις απαραίτητες αγκυρώσεις.

Και οι δύο σήραγγες εκσκάφθηκαν με συμβατικές μεθόδους διάτρησης και με ανατινάξεις, ενώ απαντήθηκαν κροκαλοπαγείς σχηματισμοί σε ποσοστό 80% και ιλυόλιθοι σε ποσοστό 20%. Τα καλά συγκολλημένα κροκαλοπαγή πετρώματα εμφανίζουν μεγάλη μηχανική αντοχή και περισσότερες ρωγμές με μεγαλύτερη εμμονή, ενώ οι ιλυόλιθοι αποτελούν αδιαπέρατους σχηματισμούς, χαμηλότερης αντοχής με πιο ασθενή ρωγμάτωση που περιορίζεται με το βάθος. Οι πιο χαλαροί σχηματισμοί κροκαλοπαγών επιτρέπουν τη δημιουργία στο εσωτερικό τους υδροφόρου ορίζοντα, ενώ η διάβρωση του συνδετικού τους υλικού είναι μία από τις αιτίες που προκαλούν αστοχίες σε τεχνικά έργα που κατασκευάζονται στη ζώνη επιρροής τους. Οι στρωματώδεις ιλυολιθικοί σχηματισμοί αποτελούν περιοχές με μικρότερες μηχανικές αντοχές και είναι υπαίτιοι για διαφορικές καθιζήσεις και αστοχίες στην οροφή και στα τοιχώματα μιας σήραγγας.

Κατασκευαστικά υιοθετήθηκε και για τις δύο σήραγγες η ημικυκλική και η ορθογωνική διατομή αντίστοιχα, με εμβαδόν εκσκαφής 44 m² για την οδική και 36 m² για τη σήραγγα προσπέλασης. Το ωφέλιμο εμβαδόν αντιστοιχίζεται περίπου στα 36 m² και για τις δύο κατασκευές.



Εικόνα 49: Είσοδος σήραγγας ΥΗΕ Μετσοβίτικου (Σήραγγες – Michaniki)



Εικόνα 50: Σήραγγα ΥΗΕ Μετσοβίτικου
(Σήραγγες – Michaniki)

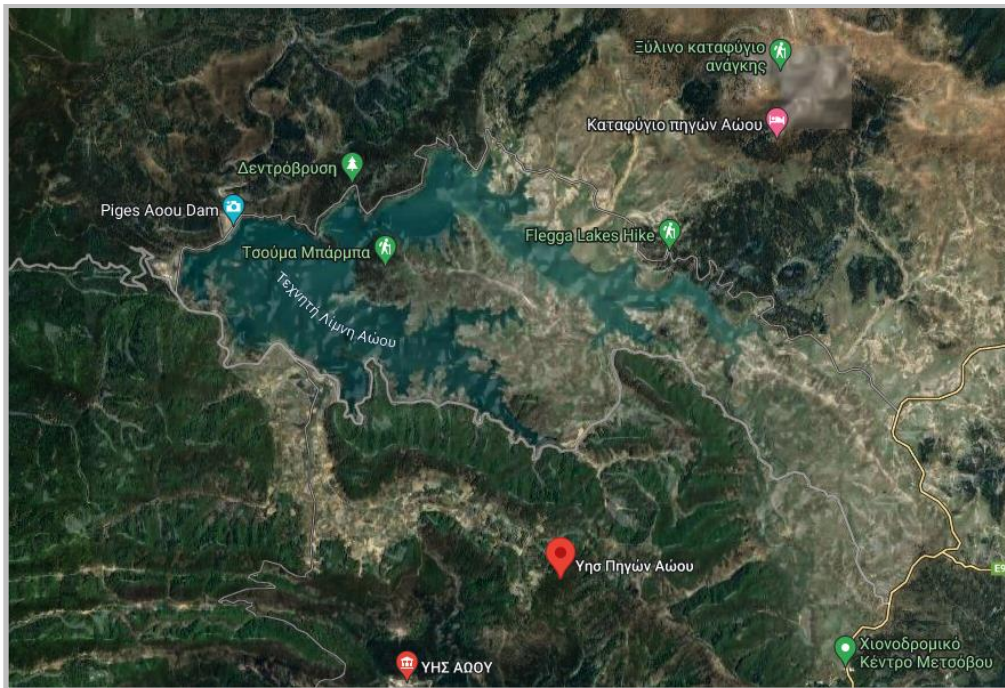
ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
Προσπέλασης	Οδική	Κροκαλοπαγή 80%, ιλυόλιθοι 20%	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	257	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	43,4	36	1998	ΥΗΕ Μετσοβίτικου	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	ΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Ε.
Κατασκευαστική	Κατασκευαστική	Κροκαλοπαγή 80%, ιλυόλιθοι 20%	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	140	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	35,7	35,7	1998	ΥΗΕ Μετσοβίτικου	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	ΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Ε.

Πίνακας 12: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Μετσοβίτικου (υπό κατασκευή)

6.3 Υδροηλεκτρικά έργα από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην περιοχή του ποταμού Αώου

6.3.1 Υδροηλεκτρικό έργο πηγών Αώου

Η Λίμνη Πηγών Αώου αποτελεί τεχνητή λίμνη που προήλθε από την κατασκευή του φράγματος στον ομώνυμο ποταμό του Νομού Ιωαννίνων. Εκτείνεται σε έκταση 11,5 km² και αποτελεί την πιο ορεινή λίμνη της Ελλάδας σε υψόμετρο 1.350 m. Αποτελεί τοπίο ιδιαίτερου φυσικού κάλους με κωδικό ΤΙΦΚ/ΑΤ3011035 (Τεχνητή Λίμνη Πηγών Αώου) και προστατευόμενη περιοχή «Natura 2000» (ζώνη ειδικής προστασίας με κωδικό GR1310002- «Βάλια Κάλντα και Τεχνητή Λίμνη Πηγών Αώου») με υπεύθυνο διαχειριστή της περιοχής τον Φορέα Διαχείρισης Εθνικού Πάρκου Βόρειας Πίνδου. Η Λίμνη ορίζεται ως «Ιδιαίτερος Τροποποιημένα Υδάτινο Σύστημα – ΙΤΥΣ» και έχει ενταχθεί στον κατάλογο των «Προστατευόμενων περιοχών εσωτερικών υδάτων αναψυχής» της ΛΑΠ Αώου. (Κέντρο Διεπιστημονική Έρευνας Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, «Η ολιστική προσέγγιση της διαχείρισης της Λίμνης Πηγών Αώου», Β. Κουρούτος, Φορέας Διαχείρισης Λίμνης Παμβώτιδας)



Εικόνα 51: Χάρτης ΥΗΕ ποταμού Αώου
(Χάρτης ΥΗΕ ποταμού Αώου - [ΥΗΕ Αώου](#) - [Χάρτες Google](#))

Η κατασκευή της πραγματοποιήθηκε από την Εταιρεία Nocon General Constructors A/S – Furuholmen στο διάστημα 1981-1991 και αποτελεί δικαιοδοσία της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.), από όπου και εκπονήθηκε η μελέτη και συγκεκριμένα από το Κλιμάκιο Μελέτης Υδροηλεκτρικών Έργων της Διεύθυνσης Ανάπτυξης Υδροηλεκτρικών Έργων. Κατ' εξαίρεση, το δάπεδο της οδικής σήραγγας προσπέλασης του Σταθμού Παραγωγής κατασκευάστηκε από την Εταιρεία Οδών & Οδοστρωμάτων ΑΕ.

Το έργο κατασκευάστηκε για την εκμετάλλευση των υδάτων των πηγών του Αώου ποταμού με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την άρδευση των παρακείμενων περιοχών, όπως του οροπεδίου Πολιτσών. Επίσης, παροχετεύει τον Υπόγειο Σταθμό Παραγωγής με σήραγγα μήκους 3 km και τον ποταμό Μετσοβίτικο με άλλη σήραγγα μήκους 2,90 km ενισχύοντας τη λειτουργία του ΥΗΣ Πουρναρίου.

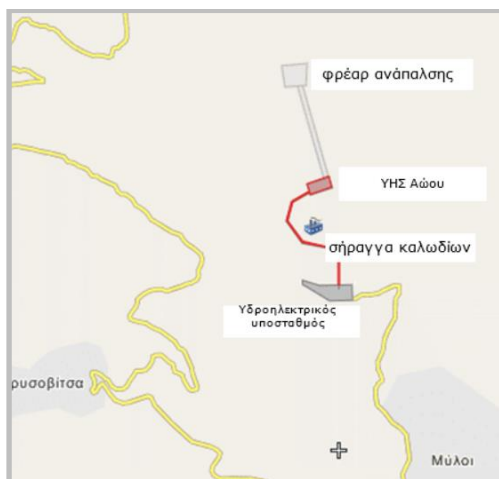


Εικόνα 52: Τεχνητή λίμνη Πηγών ποταμού Αώου
(<http://wikimapia.org/#lang=el&lat=37.966700&lon=23.716700&z=12&m=w>)

Από το έργο αυτό θα γίνει αναφορά στην οδική σήραγγα προσπέλασης Σταθμού παραγωγής, σε μία αποστραγγιστική κατασκευαστική σήραγγα του Συγκροτήματος παραγωγής και μία αντίστοιχη βοηθητική κατασκευαστική, για τις οποίες έχει χρησιμοποιηθεί εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια τόσο στην προσωρινή όσο και στη μόνιμη επένδυση. Μόνο στο δάπεδο της σήραγγας αποστράγγισης κατασκευάστηκε μόνιμη επένδυση με οπλισμένο σκυρόδεμα.

Και οι τρεις σήραγγες συνάντησαν στην εκσκαφή τους παχυστρωματώδεις φαμμίτες της ζώνης Πίνδου, σχηματισμούς μεγάλης μηχανικής αντοχής εκτός ζώνης ασυνεχειών λόγω των καλά συγκολλημένων κροκαλοπαγών. Διανοίχτηκαν με συμβατικές μεθόδους διάτρησης και ανατινάξεις. Οι ασυνέχειες εμφανίζουν εμμονή και είναι πολυπληθείς, καθώς τα καλά συγκολλημένα κροκαλοπαγή αποτελούν φαθουρούς σχηματισμούς. Σε αυτή την περίπτωση μειώνεται η μηχανική αντοχή των σχηματισμών και αυξάνεται η υδατοπερατότητα, αυξάνοντας παράλληλα τις απαιτήσεις συστημάτων υδατοστεγανότητας κατά την εγκατάσταση προσωρινής και μόνιμης επένδυσης στην κατασκευή της σήραγγας. Τις κατασκευαστικές απαιτήσεις αυξάνει η παρουσία ενδεχόμενως χαλαρά συγκολλημένων σχηματισμών, όπου και επιτρέπουν τη δημιουργία υδροφόρου οριζοντα υπερκείμενου, υποκείμενου ή παρακείμενου του κελύφους διατομής της σήραγγας με τα αντίστοιχα προβλήματα και κινδύνους, π.χ. εισροές υδάτων και φερτών συνδετικών υλικών στο εσωτερικό της, διογκώσεις και τοπικές αστοχίες τύπου καμινάδας, διαβρώσεις και αλλοιώσεις εκτοξευμένου σκυροδέματος συν τω χρόνω.

Το σχήμα της διατομής που εκσκαφτηκε και στη συνέχεια υποστηρίχθηκε ήταν ημικυκλικό και ορθογωνικό σε δάπεδο και κάτω παρειές. Η οδική σήραγγα προσπέλασης έχει μήκος 1,60 km, διατομή εκσκαφής 45 m² (με ωφέλιμο εμβαδόν 38 m²) και έτος ολοκλήρωσης έργου το 1982.



Εικόνα 53:Υπόγειος υδροηλεκτρικός σταθμός (2X110MW) και σήραγγα καλωδίων από τις γεννήτριες προς τον υποσταθμό.
 Ο σταθμός βρίσκεται σε βάθος 440 μ. από την επιφάνεια του εδάφους και η υψομετρική διαφορά από το σημείο υδροληψίας μέχρι τις γεννήτριες είναι μεγαλύτερη από 600 μ.
 (<http://wikimapia.org/#lang=el&lat=37.966700&lon=23.716700&z=12&m=w>)



Εικόνα 54:Σήραγγα φυγής από τον ΥΗΣ Αώου προς τον Μετσοβίτικο ποταμό
 (<http://wikimapia.org/#lang=el&lat=37.966700&lon=23.716700&z=12&m=w>)



Εικόνα 55: Οδική σήραγγα προσπέλασης προς τους υδροστρόβιλους
 (Φωτογραφίες ΥΗΕ Αώου, <https://www.youtube.com/watch?v=wNva4nDnmuQ>)

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
Προσπέλασης Σταθμού Παραγωγής	Οδική	Παχυστρωματώδεις ψαμμίτες του Φλύσχη Πίνδου	Διατρήσεις - Αναπνάξεις	1615	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	45	38	1982	ΥΗΕ Πηγών Αώου	ΔΕΗ / ΔΜΚΥ - ΚΜΥ	NOCON GENERAL CONTRACTORS A/S - FURUHOLMEN - ΟΔΩΝ & ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Πίνακας 13: Σήραγγα με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ πηγών Αώου ποταμού

Η κατασκευαστική αποστραγγιστική σήραγγα του Συγκροτήματος Παραγωγής έχει μήκος χάραξης 32,4 m, διατομή εκσκαφής 7 m² με ωφέλιμο εμβαδόν 6,5 m² και ολοκληρώθηκε το έτος 1983. Η βοηθητική κατασκευαστική σήραγγα έχει μήκος χάραξης 147 m, διατομή εκσκαφής 20 m² με ωφέλιμο εμβαδόν το ίδιο και ολοκληρώθηκε επίσης το 1983.



Εικόνα 56: Βοηθητική σήραγγα στα δεξιά της κύριας χάραξης της σήραγγας προσπέλασης του ΥΗΕ Αώου (Φωτογραφίες ΥΗΕ Αώου, <https://www.youtube.com/watch?v=wNva4nDnmuQ>)

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
Αποστράγγισης του Συγκροτήματος Παραγωγής	Κατασκευαστικές	Παχυστρωματώδεις ψαμμίτες	Διατρήσεις - Αναπνάξεις	32,4	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	7	6,5	1983	ΥΗΕ Πηγών Αώου	ΔΕΗ / ΔΜΚΥ - ΚΜΥ	NOCON GENERAL CONTRACTORS A/S - FURUHOLMEN
Βοηθητικές	Κατασκευαστικές	Παχυστρωματώδεις ψαμμίτες	Διατρήσεις - Αναπνάξεις	147	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	20	20	1983	ΥΗΕ Πηγών Αώου	ΔΕΗ / ΔΜΚΥ - ΚΜΥ	NOCON GENERAL CONTRACTORS A/S - FURUHOLMEN

Πίνακας 14: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ πηγών Αώου ποταμού (*ως τελική επένδυση στα στοιχεία της ΔΕΗ ΑΕ αναφέρεται «οπλισμένο σκυρόδεμα στο δάπεδο»)

6.4 Υδροηλεκτρικά έργα από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην περιοχή του ποταμού Αλιάκμονα

6.4.1 Υδροηλεκτρικό έργο Ιλαρίωνα

Το ΥΗΕ Ιλαρίωνα εντοπίζεται νοτιοδυτικά της Κοζάνης και περιλαμβάνει το ομώνυμο φράγμα, τη σήραγγα εκτροπής (τμήμα της είναι κοινό με τη σήραγγα εκχειλιστή Νο 1), δύο σήραγγες εκχειλιστή μήκους 660 m η καθεμία, τη σήραγγα του εκκενωτή πυθμένα μεταβλητής διατομής, μία σήραγγα προσαγωγής μεταβλητής διατομής, τρεις αποστραγγιστικές σήραγγες, το φρέαρ θυροφραγμάτων, μία οδική σήραγγα, το σταθμό παραγωγής του ΥΗΕ και μία σήραγγα τσιμεντενέσεων μήκους 1687 m. Επιπλέον εργασίες στεγανοποίησης της θέσης του φράγματος και του ταμιευτήρα στην Ελάτη περιλαμβάνουν σήραγγες τσιμεντενέσεων. Στην περιοχή αυτή έχουν κατασκευαστεί και σήραγγες προσπέλασης.



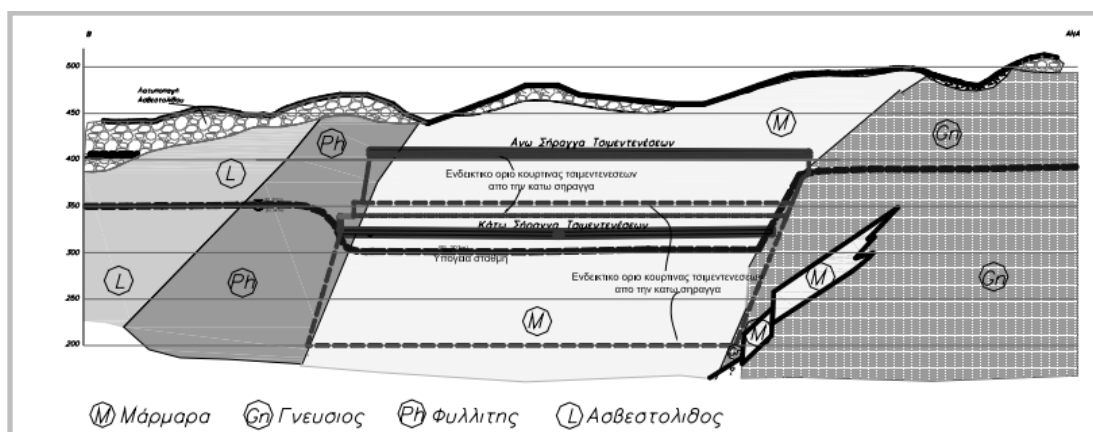
Εικόνα 57: Φράγμα και εκχειλιστής ΥΗΕ Ιλαρίωνα
(<http://wikimapia.org/#lang=el&lat=37.966700&lon=23.716700&z=12&m=w>)



Εικόνα 58: Έξοδοι σιράγγων εκχειλιστή ΥΗΕ Ιλαρίωνα
(<http://wikimapia.org/#lang=el&lat=37.966700&lon=23.716700&z=12&m=w>)

Το έργο μελετήθηκε από τη Διεύθυνση Ανάπτυξης Υδροηλεκτρικών Έργων της ΔΕΗ ΑΕ και κατασκευάστηκε από την Εταιρεία Μηχανική ΑΕ. Στην παρούσα αναφορά θα

αναφερθούν η αποστραγγιστική – στεγανοποιητική σήραγγα τσιμεντενέσεων μήκους 1700 m και η υδραυλική σήραγγα εκχειλιστή μήκους 119 m. Και οι δύο σήραγγες εκσκάφτηκαν με τις συμβατικές μεθόδους διατρήσεων και ανατινάξεων και στο μεγαλύτερο μέρος τους συνάντησαν ασβεστόλιθους μερικά ανακρυσταλλωμένους και έντονα τεκτονισμένους, καθώς και φυλλίτες. Οι φυλλίτες αποτελούν σχηματισμούς περιορισμένων μηχανικών αντοχών, αλλά ταυτόχρονα και μειωμένης υδατοπερατότητας. Το βασικό πρόβλημα στη διάνοιξη της σήραγγας του εκχειλιστή ήταν ο προσανατολισμός της σχιστότητας η οποία διατηρούσε κατεύθυνση εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας. Η προσωρινή της υποστήριξη ολοκληρώθηκε με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, μεταλλικά πλαίσια και αγκυρώσεις, με προϋποστήριξη σε ελάχιστα τμήματα, όπου απαιτούνταν. Στους σχηματισμούς των ασβεστολίθων η διάνοιξη πραγματοποιήθηκε τμηματικά σε δύο φάσεις με ολομέτωπη προχώρηση και ανατινάξεις. Οι παραμορφώσεις ήταν ελεγχόμενες και αναμενόμενες και σε ελάχιστα σημεία η διατομή ενισχύθηκε στην υποστήριξή της εκ των υστέρων. Η αντιμετώπιση των ιδιαίτερα υδατοπερατών περιοχών καρστ οδήγησε τους μελετητές σε κατασκευή κουρτίνας τσιμεντενέσεων μέσα από την αντίστοιχη σήραγγα.



Εικόνα 59: Τομή κατά μήκος του άξονα της κουρτίνας τσιμεντενέσεων και των αντίστοιχων σήραγγων στην Λόγγα Ελάτης

(1ο Πανελλήνιο συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων, ΤΕΕ, ΤΕΕ-Τμ.ΚΔΘ, 13-15 Νοεμβρίου, 2008: Λάρισα “ΥΠΕ – Ιλαρίωνα: Τα σημαντικότερα γεωλογικά και γεωτεχνικά προβλήματα που αντιμετώπισε η μελέτη και η κατασκευή μέχρι τώρα”, Library.tee.gr, www.tee.gr, Κ. Καραπαντελάκης, Γ. Εμμανουηλίδης, Β. Καραγιαννάκη, Χ. Μινόπετρος)

Η σήραγγα τσιμεντενέσεων κατασκευάστηκε με διατομή ημικυκλικού σχήματος διατομής ωφέλιμου εμβαδού 11 m^2 και οι κατασκευαστικές της εργασίες ολοκληρώθηκαν το 1995 με την εφαρμογή οπλισμένου σκυροδέματος στο δάπεδο της σήραγγας.



Εικόνα 60: Σήραγγα εκτροπής-τσιμεντενέσεων, εκσκαφή εκχειλιστή-ΥΗΕ Ιλαρίωνα (Σήραγγες – Michaniki)

Η κατασκευή της υδραυλικής σήραγγας του εκχειλιστή μεταβλητής διατομής με επιφάνεια από 141 m² έως 489 m² σταμάτησε επίσης το 1995 και παραμένει ακόμη ανεπένδυτη με την τότε εφαρμοζόμενη προσωρινή υποστήριξη, έχοντας προβλεφθεί να ολοκληρωθεί κάποια στιγμή μελλοντικά.

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
Τσιμεντ/σεων	Τσιμεντ/σεις - Αποστράγγιση	Επτονα Τεκτονισμένοι Ασβεστόλιθοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	1700	Ημικυκλικό	12,8	1995	ΥΗΕ Ιλαρίωνα	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	ΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Ε.
Εκχειλιστή	Υδραυλική	Ασβεστόλιθοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	119	Μεταβλητό	141-489	1995	ΥΗΕ Ιλαρίωνα	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	ΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Ε.

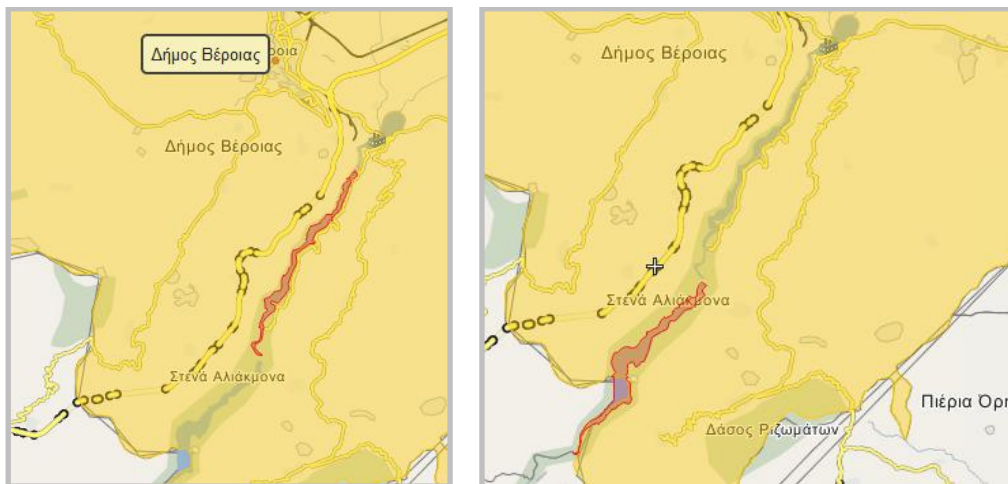
Πίνακας 15: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Ιλαρίωνα

6.4.2 Υδροηλεκτρικός Σταθμός Ασωμάτων

Βορειοανατολικά του ΥΗΕ Πολυφύτου εκτείνονται οι τεχνητές λίμνες Σφηκιάς και Ασωμάτων στις οποίες διοχετεύονται τα ύδατα του ποταμού Αλιάκμονα. Γεωγραφικά ανήκουν στην περιοχή του Δήμου Βέροιας. Στο βόρειο άκρο της Τεχνητής Λίμνης Ασωμάτων εντοπίζεται ο ομώνυμος ΥΗΣ και ανάντη αυτού ο ταμιευτήρας Αγίας Βαρβάρας, καθώς και το ομώνυμο χωμάτινο φράγμα μήκους 2,4 km, που αντικατέστησε την προϋπάρχουσα γέφυρα-φράγμα. Αποτελεί το κυριότερο από τα φράγματα του ποταμού Αλιάκμονα. Το ΥΗΕ Ασωμάτων ρυθμίζει την παροχή του ποταμού Αλιάκμονα, ενώ μέσω της λειτουργίας του πραγματοποιείται η ύδρευση της Θεσσαλονίκης και η άρδευση στις πεδιάδες Ημαθίας και Θεσσαλονίκης.



Εικόνα 61: Ταμειυτήρας Αγ. Βαρβάρας και ομώνυμο φράγμα ΒΑ των Ασωμάτων
(Ταμειυτήρας Αγ. Βαρβάρας (wikimapia.org))



Εικόνα 62: Τεχνητές λίμνες Ασωμάτων και Σφηκιάς ποταμού Αλιάκμονα
(Τεχνητή λίμνη Ασωμάτων και τεχνητή λίμνη Σφηκιάς ποταμού Αλιάκμονα - Wikimapia - Ας περιγράψουμε ολόκληρο τον κόσμο!))



Εικόνα 63: Φράγμα Ασωμάτων
(Φράγμα Ασωμάτων-Βέροια - YouTube)

Το έργο αυτό μελετήθηκε από το Κλιμάκιο Μελέτης Υδροηλεκτρικών Έργων της ΔΕΗ ΑΕ και κατασκευάστηκε από την Εταιρεία ΑΕΓΕΚ ΑΕ, ενώ ολοκληρώθηκε το 2007. Από το έργο αυτό αναφέρονται παρακάτω πιο συγκεκριμένα κάποιες από τις αποστραγγιστικές σήραγγες και τις αντίστοιχες των τσιμεντενέσεων (R1, DT-R2 αποστράγγισης, R3, LL- αποστραγγιστική σήραγγα στο κάτω (Low) επίπεδο του αριστερού(Left) αντερείσματος, LU - αποστραγγιστική σήραγγα στο άνω (Upper) επίπεδο του αριστερού (Left) αντερείσματος. Εκσκάφτηκαν με συμβατικές μεθόδους διάνοιξης και ανατινάξεις, με σχήμα διατομής ημικυκλικό και στο κάτω μισό της διατομής ορθογωνικό, εμβαδού 11-12 m² (ωφέλιμο εμβαδόν χρήσης σήραγγας περίπου 7 m²). Τα μήκη τους κυμαίνονται από 100 έως 350 m και η προσωρινή υποστήριξη κατασκευάστηκε από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, μεταλλικά πλαίσια και αγκυρώσεις.

Στην εξέλιξη των εκσκαφών των σιηράγγων αποστράγγισης και τσιμεντενέσεων, οι κατασκευαστές συνάντησαν γεωλογικούς σχηματισμούς από σερπετινίτες, βασάλτες και κατά περιοχή τόφφους. Οι σερπετινίτες που αποτελούν αποσαθρωμένους ολιβίνες παρουσιάζουν ολισθηρές επιφάνειες με μειωμένη διατμητική αντοχή, χαρακτηριστικά που μπορούν να οδηγήσουν σε κατά τόπους καταρρεύσεις και ολισθήσεις τύπου σφήνας, κατά την εκσκαφή σήραγγας.

Οι βασάλτες και οι τόφφοι αποτελούν ηφαιστειακά πετρώματα. Οι τόφφοι αποτελούν ένα γεωλογικό μείγμα συμπαγών και χαλαρών υλικών. Οι βασάλτες παρουσιάζουν αρκετά μεγάλο δίκτυο ρωγμών λόγω σκληρότητας και λόγω κενών ψύξεως. Διατάσσονται σε στρώσεις λάβας, τέφρας και άλλων ιζημάτων. Παρά τις υψηλές μηχανικές αντοχές που παρουσιάζουν, δημιουργούν ζώνες υψηλής περατότητας και σε εναλλαγές στρώσεων με υλικά χαμηλών αντοχών δημιουργούν ένα σύνολο ασταθές που ενδέχεται να δώσει διογκώσεις, καταρρεύσεις τύπου καμινάδας, υποσκαφές στα πρηνή, εισροές νερού ή διαφορικές καθιζήσεις.

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
R1	Αποστράγγιστων - Τσιμεντένεσων	Σερπεντινίτες - Βασάλτες	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	227	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	11,6	6,8	ΥΓΕ Ασωμάτων	ΔΕΗ / ΚΜΥ	ΑΕΓΕΚ Α.Ε.
DT-R2	Αποστράγγιση	Βασάλτες	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	100	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	11,6	6,8	ΥΓΕ Ασωμάτων	ΔΕΗ / ΚΜΥ	ΑΕΓΕΚ Α.Ε.

Πίνακας 16: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΓΕ Ασωμάτων

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
R3	Αποστράγγιση	Σερπεντινίτες - Βασάλτες - Τάφφοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	229	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	13	6,8	ΥΓΕ Ασωμάτων	ΔΕΗ / ΚΜΥ	ΑΕΓΕΚ Α.Ε.
LL	Τσιμεντένεσες - Αποστράγγιση	Σερπεντινίτες - Βασάλτες - Τάφφοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	351	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	12,6	6,8	ΥΓΕ Ασωμάτων	ΔΕΗ / ΚΜΥ	ΑΕΓΕΚ Α.Ε.
LU	Τσιμεντένεσες - Αποστράγγιση	Σερπεντινίτες - Βασάλτες	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	296	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	11,6	6,8	ΥΓΕ Ασωμάτων	ΔΕΗ / ΚΜΥ	ΑΕΓΕΚ Α.Ε.

Πίνακας 17: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΓΕ Ασωμάτων

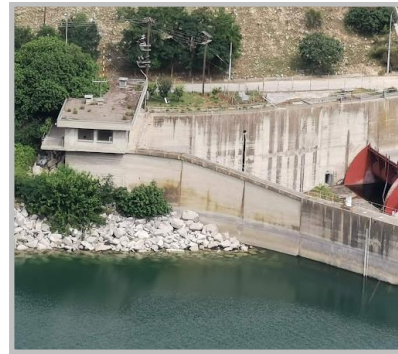
6.4.3 Υδροηλεκτρικό Έργο Πολυφύτου

Στο έργο αυτό συναντά κανείς την ομώνυμη τεχνητή λίμνη του ποταμού Αλιάκμονα, κοντά στην πόλη της Κοζάνης, στους Δήμους Κοζάνης και Σερβίων, η οποία κατασκευάστηκε το 1973, με έκταση ταμιευτήρα 73 km², ιδιοκτησίας της ΔΕΗ ΑΕ, καθώς και το ομώνυμο φράγμα. Επίσης περιλαμβάνει τον υπερχειλιστή, τη σήραγγα εκτροπής, τις εγκαταστάσεις υδροληψίας, τη σήραγγα προσαγωγής, τη δεξαμενή αναπάλσεως και το φρέαρ υπό πίεση. Το σύνολο των έργων της περιοχής συμπληρώνουν η Υψηλή Γέφυρα Σερβίων και η Μικρή Γέφυρα Ρυμνίου. Η λίμνη Πολυφύτου αποτελεί πλούσιο βιότοπο αρπακτικών πουλιών, ψαριών, ερπετών και άλλων μεταναστευτικών ειδών.

Η τεχνητή λίμνη δέχεται τα ύδατα του ποταμού Αλιάκμονα και των παρακείμενων χειμάρρων σε περίπτωση υπερχείλισης, οπότε και παρουσιάζει μεταβολές στάθμης ακόμα και της τάξης των 15 m. Προσφέρεται και χρησιμοποιείται για ψυχαγωγικές και αθλητικές δραστηριότητες (π.χ. ψάρεμα, κωπηλασία) και καλύπτει τις ανάγκες άρδευσης της περιοχής.



Εικόνα 64: Τεχνητή Λίμνη Πολύφουτου
(Φωτογραφίες ΥΗΕ Πολύφουτου, <https://www.youtube.com/watch?v=v3Tk1lvqJ0Q>)



Εικόνα 65: Φράγμα Πολύφουτου
(Φωτογραφίες φράγματος Πολύφουτου, <https://www.google.gr/maps/>)

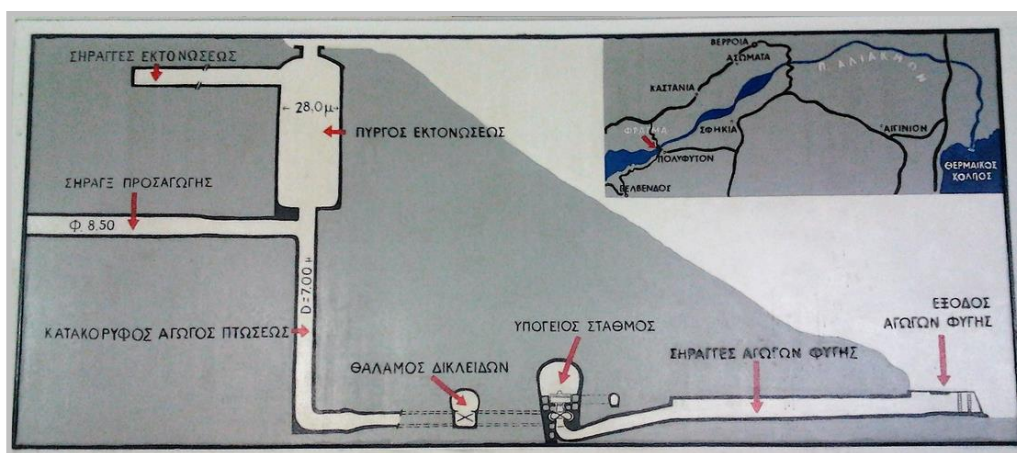
Επίσης στην περιοχή εντοπίζεται ο ΥΗΣ Πολυφύτου στον οποίο φτάνει το νερό με υπόγεια σήραγγα μέρος της οποίας είναι υπέργειο, και λειτουργεί από το 1975. Οι υπόλοιπες εγκαταστάσεις παραγωγής είναι επίσης υπόγειες. Το έργο μελετήθηκε από την Εταιρεία Electro-watt, που είχε αναλάβει και την επίβλεψη. Οι επί μέρους ανάδοχοι του έργου ήταν η Αθηναϊκή Εταιρεία Σκαπανεύς (Έργο Οδού Προσπέλασης), η Αθηναϊκή Κοινοπραξία Οδών & Οδοστρωμάτων-ΕΔΟΚ – ΕΤΕΡ (Έργα Πολιτικού Μηχανικού) και η Γαλλική Κοινοπραξία ALSTOM (Εξοπλισμός).



Εικόνα 66: ΥΗΣ Πολυφύτου
(Υδροηλεκτρικός σταθμός Πολύφουτου (wikimaria.org))



Εικόνα 67: Τεχνητή Λίμνη Πολύφουτου
(Φωτογραφίες ΥΗΕ Πολύφουτου, <https://lengen.gr/el/2017/06/12/ελληνικά-επίσκεψη-υδροηλεκτρικός-στ/>)



Εικόνα 68: Αναρτημένο διάγραμμα εγκαταστάσεων
(Φωτογραφίες ΥΗΕ Πολύφουτου, <https://lengen.gr/el/2017/06/12/ελληνικά-επίσκεψη-υδροηλεκτρικός-στ/>)



Εικόνα 69: Σήραγγα πρόσβασης στον ΥΗΣ Πολύφουτου
(Φωτογραφίες ΥΗΕ Πολύφουτου, <https://lengen.gr/el/2017/06/12/ελληνικά-επίσκεψη-υδροηλεκτρικός-στ/>)

Στο έργο αυτό χρησιμοποιήθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και οι απαιτούμενες αγκυρώσεις στην προσωρινή υποστήριξη (κατασκευαστικών, υδραυλικών, οδικών και βοηθητικών σηράγγων καλωδίων Η/Μ εξοπλισμού), καθώς και στη μόνιμη επένδυση, σε όσες σήραγγες έχουν ολοκληρωθεί κατασκευαστικά. Όλες διανοίχτηκαν με συμβατικές μεθόδους διατρήσεων και ανατινάξεις και επενδύθηκαν συνολικά ή μερικά μέχρι και το 1974.

Συγκεκριμένα, οι ενδιάμεσες βοηθητικές μικρές στοές εξυπηρετούν την πρόσβαση στο κυρίως έργο («παράθυρα 1,2,3») με μήκος άξονα 460 m και σχήμα διατομής ημικυκλικό και ορθογωνικό στο κάτω μισό τμήμα της διατομής. Παραμένουν ανεπένδυτες μέχρι και σήμερα.

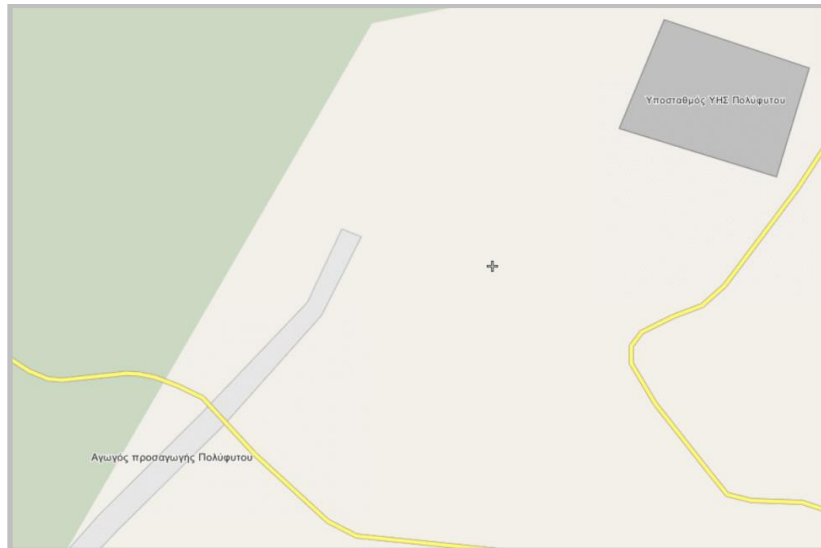
Οι σήραγγες προσπέλασης θαλάμου θυροφραγμάτων αποτελούν βοηθητικές κατασκευαστικές σήραγγες, μήκους 100 m, ομοίως με σχήμα ημικυκλικής και ορθογωνικής διατομής, με προσωρινή επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και αγκυρώσεων, ενώ ολοκληρώθηκαν ομοίως με εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος στη μόνιμη επένδυσή τους.



Εικόνα 70: Υπόγειος θάλαμος δικλείδων διαχείρισης ύδατος εντός ΥΗΣ Πολύφυτου - είσοδος προσπέλασης θαλάμου μέσω σηράγγων

(Υπόγειος θάλαμος δικλείδων διαχείρισης ύδατος ΥΗΣ Πολύφυτου,
<https://www.youtube.com/watch?v=1kzbVEVpMU>)

Παρόμοιος τρόπος κατασκευής ακολουθήθηκε για την ολοκλήρωση της τριπλής διακλάδωσης αγωγών προσαγωγής, πριν την είσοδο στο Σταθμό παραγωγής –μία διακλάδωση για κάθε μονάδα- που αποτελεί υδραυλική σήραγγα μήκους 160 m κυκλικής διατομής και με πανομοιότυπο τρόπο εφαρμογής προσωρινής και μόνιμης επένδυσης με τις προηγούμενες που αναφέρθηκαν (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκυρώσεις). Η προσαγωγή του νερού από την τεχνητή λίμνη στον ΥΗΣ Πολύφυτου γίνεται με αγωγή προσαγωγής, ενώ στο υπόλοιπο μήκος του αγωγού μεταφοράς το νερό κινείται σε σήραγγα).



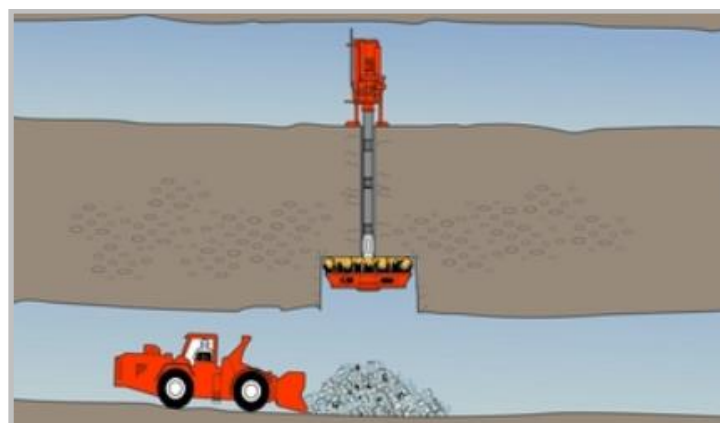
Εικόνα 71: Αγωγός Προσαγωγής Πολύφουτου προς ΥΗΣ Πολύφουτου
 (<http://wikimapia.org/#lang=el&lat=37.966700&lon=23.716700&z=12&m=w>)

Ο δρόμος περνάει κάτω από τον αγωγό κάνοντας ιδιαίτερη εντύπωση ότι ο αγωγός είναι υπερκείμενος των διερχομένων επισκεπτών.

Σε συνέχεια του ΥΗΣ έχουν κατασκευαστεί τρεις υδραυλικές σήραγγες αγωγών φυγής, μήκους 480 m, κυκλικής διατομής και προσωρινής υποστήριξης εκτοξευόμενου σκυροδέματος και αγκυρώσεων.

Η οδική σήραγγα προσπέλασης Σταθμού παραγωγής και η βοηθητική σήραγγα εγκατάστασης καλωδίων Η/Μ εξοπλισμού, διατομής ημικυκλικού και ορθογωνικού σχήματος έχουν περιοριστεί μόνο στην εφαρμογή της προσωρινής επένδυσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος και αγκυρώσεων.

Η υδραυλική σήραγγα εκχειλιστή διανοίχτηκε με κυκλικό σχήμα διατομής με τη μέθοδο RBR για εμβαδόν εκσκαφής διατομής 93-158 m² και ωφέλιμο εμβαδόν διατομής χρήσης σήραγγας 74-132 m². Έχει μήκος χάραξης άξονα 70 m και σε όλο το μήκος της εφαρμόστηκε προσωρινή επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και αγκυρών, παραμένοντας σε αυτή την φάση κατασκευής από το 1974 έως σήμερα, χωρίς εφαρμογή μόνιμης επένδυσης.



Εικόνα 72: Μέθοδος RBR
 (<https://www.waterpowermagazine.com/features/featureadvances-in-raise-boring/featureadvances-in-raise-boring-425484.html>)



Εικόνα 73: Μέθοδος RBR

(<https://www.waterpowermagazine.com/features/featureadvances-in-raise-boring/featureadvances-in-raise-boring-425484.html>)

Οι σήραγγες που προαναφέρθηκαν κατά τη φάση της κατασκευής τους συνάντησαν γεωλογικούς σχηματισμούς γρανιτογενέσιων, με πολύ υψηλές μηχανικές αντοχές. Αποτελούν σχηματισμούς με ετερογένεια λόγω της γνευσιακής φύσης των πετρωμάτων και σε μορφή έντονου τεκτονισμού αποσαθρώνονται ακανόνιστα σε βάθος, στην οριζόντια διεύθυνση. Οι ζώνες διάτμησης δημιουργούν πολύ κερματισμένες και αποσαθρωμένες ζώνες σε πλήρη έκταση και αποτελούνται από τεμάχια γνεύσιου με κατακερματισμένα - αργιλοποιημένα υλικά. Ο βαθμός αποσάθρωσης καθορίζει και τον τύπο του σχηματισμού με κλίμακα χαρακτηρισμού που ξεκινά από βράχο συμπαγή και εκτείνεται μέχρι και τους εδαφικούς σχηματισμούς ελάχιστων μηχανικών αντοχών.

Τα χαρακτηριστικά των αποσαθρωμένων γρανιτογενεσίων με μειωμένες μηχανικές αντοχές ενέχουν τους κινδύνους σύνθλιψης μετώπου, αστοχιών σύγκλισης, καταπτώσεων τύπου σφήνας, καταρροής βραχόμαζας και ολισθήσεων τεμαχίων βράχου, ιδιαίτερα αυτών που παρουσιάζουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την προχώρηση μετώπου.

Λόγω των πιο πάνω γεωλογικών και τεχνικογεωλογικών στοιχείων οι σήραγγες αυτές διανοίχτηκαν σε δυσμενές περιβάλλον όσον αφορά τόσο την εκσκαφή, όσο και την υποστήριξη του κελύφους της σήραγγας.

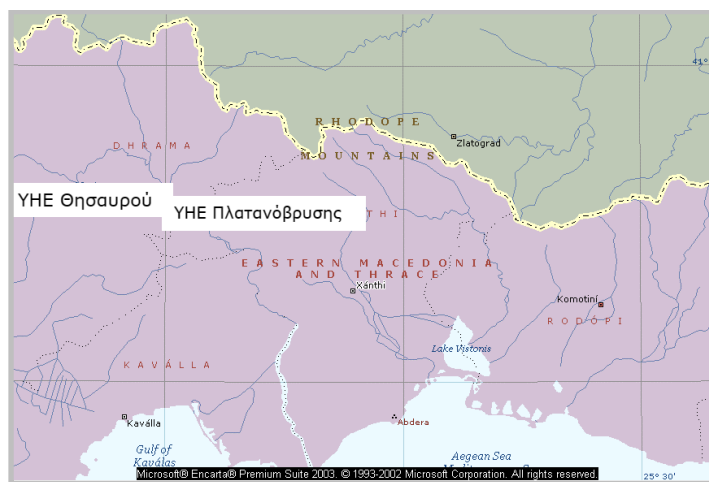
ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
"Παράθυρα" 1,2,3	Κατασκευαστικές	Γρανιτογενέοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	460	Ημικυκλική - Ορθογωνικό		ΥΗΕ Πολύφυτου	ELECTROWATT	ΕΔΟΚ ΕΤΕΡ & ΟΔΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ
Βοηθητικής προσπέλασης θαλάμου θυροφύτων	Κατασκευαστική	Γρανιτογενέοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	100	Ημικυκλική - Ορθογωνικό	1974	ΥΗΕ Πολύφυτου	ELECTROWATT	ΕΔΟΚ ΕΤΕΡ & ΟΔΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ
Τριπλής διακλάδωσης αγωγών Προσαγωγής	Υδραυλική	Γρανιτογενέοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	160	Κυκλική	1974	ΥΗΕ Πολύφυτου	ELECTROWATT	ΕΔΟΚ ΕΤΕΡ & ΟΔΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ
Αγωγών Φυγής (3)	Υδραυλικές	Γρανιτογενέοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	480	Κυκλική	1974	ΥΗΕ Πολύφυτου	ELECTROWATT	ΕΔΟΚ ΕΤΕΡ & ΟΔΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ
Προσπέλασης Σταθμού Παραγωγής	Οδική	Γρανιτογενέοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις		Ημικυκλική - Ορθογωνικό	1974	ΥΗΕ Πολύφυτου	ELECTROWATT	ΕΔΟΚ ΕΤΕΡ & ΟΔΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ
Καλωδίων	Εγκατάσταση Η/Μ εξοπλισμού	Γρανιτογενέοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις		Ημικυκλική - Ορθογωνικό	1974	ΥΗΕ Πολύφυτου	ELECTROWATT	ΕΔΟΚ ΕΤΕΡ & ΟΔΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ
Εκχειλιστή	Υδραυλική	Γρανιτογενέοι	Raise Boring	70	Κυκλική	1974	ΥΗΕ Πολύφυτου	ELECTROWATT	ΕΔΟΚ ΕΤΕΡ & ΟΔΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Πίνακας 18: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Πολύφυτου

6.5 Υδροηλεκτρικά έργα από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην περιοχή του ποταμού Νέστου

6.5.1 Υδροηλεκτρικό έργο Θησαυρού

Το ΥΗΕ Θησαυρού χωροθετείται στους Νομούς Δράμας, Καβάλας και Ξάνθης, με παροχή υδάτων από τον ποταμό Νέστο στη Βόρεια Ελλάδα. Η λειτουργία του χρονολογείται το 1998.



Εικόνα 74: Χάρτης ΥΗΕ ποταμού Νέστου

(Φωτογραφίες ΥΗΕ Θησαυρού - Δημοσίευση ΔΕΗ ΑΕ «ΥΗΕ Χώρας», [Χρήση Υδροηλεκτρική Ενέργεια | Υ.Π.Ε.ΘΕ. \(ypethe.gr\)](#))

Ως έργο συνδράμει στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στην ύδρευση, στην άρδευση, στην αντιπλημμυρική προστασία, στη διαχείριση βιοποικιλότητας, στην εξυπηρέτηση εγκαταστάσεων σταθμών συλλογής δεδομένων μετεωρολογίας και στη διατήρηση των οικοσυστημάτων της περιφέρειας Α. Μακεδονίας και Θράκης.

Ιδιαίτερη είναι η παρουσία της λεκάνης εγκλιματισμού ιχθυοπανίδας κατάντη του ΥΗΕ Πλατανόβρυσης με το όνομα «Αρκουδόρεμα», στην οποία έχει τοποθετηθεί αισθητήριο μέτρησης στάθμης υδάτων του ποταμού Νέστου.



Εικόνα 75: Κόκκινο δάσος της δασικής πεύκης στο Αρκουδόρεμα
(Ποτάμια / Αρκουδόρεμα-Βάλια-Κάλντα, [NaturaGraeca](#))

Στο ΥΗΕ Θησαυρού συναντούμε την ομώνυμη τεχνητή λίμνη έκτασης 20 km², που σχηματίστηκε με την κατασκευή του επίσης ομώνυμου φράγματος ύψους 180 m, το οποίο αποτελεί και το μεγαλύτερο λιθόρριπτο φράγμα της Ελλάδας και ένα από τα ψηλότερα γεωφράγματα της Ευρώπης.



Εικόνα 76: Ταμιευτήρας φράγματος ΥΗΕ Θησαυρού
(Φωτογραφίες ΥΗΕ Θησαυρού - <https://www.google.com/maps>)



Εικόνα 77: Φράγμα ΥΗΕ Θησαυρού-είσοδος οδικής σήραγγας 52)
(Φωτογραφίες ΥΗΕ Θησαυρού - <https://www.google.com/maps>)



Εικόνα 78: Φράγμα ΥΗΕ Θησαυρού
(Φωτογραφίες ΥΗΕ Θησαυρού - <https://www.google.com/maps>)

Επίσης έχει κατασκευαστεί ο εκχειλιστής με τα απαιτούμενα θυροφράγματα στο έργο εισόδου, που αποτελείται από τρεις διώρυγες συνολικού καθαρού πλάτους 41m και μήκους περίπου 350m, με το αντίστοιχο έργο εκτόξευσης στο κατάντη τμήμα του.



Εικόνα 79: Θυροφράγματα ΥΗΕ Θησαυρού
(Φωτογραφίες ΥΗΕ Θησαυρού - <https://www.google.com/maps>)



Εικόνα 80: Γενική άποψη του φράγματος ΥΗΕ Θησαυρού
(Φωτογραφίες ΥΗΕ Θησαυρού - <https://www.google.com/maps>)



Εικόνα 81: Φρέαρ αναπήδησης εκχειλιστή ΥΗΕ Θησαυρού σε λειτουργία
(Φωτογραφίες ΥΗΕ Θησαυρού - <https://www.microhydropower.gr>)

Ένα ακόμη τμήμα του έργου είναι ο πύργος υδροληψίας από όπου το νερό οδηγείται στον υπόγειο ΥΗΣ Θησαυρού για να καταλήξει στη διώρυγα φυγής και τελικά στο Νέστο Ποταμό. Κατάντη αυτών βρίσκεται το φράγμα της Πλατανόβρυσης, όπου και παροχετεύεται ο όγκος των υδάτων από το ΥΗΕ Θησαυρού. Τα τμήματα του έργου, η προσπέλαση προς αυτά καθώς και η ασφάλεια και καλή λειτουργία της κατασκευής διασφαλίζονται με σήραγγες .

Συγκεκριμένα, έχουν κατασκευαστεί σήραγγες αποστράγγισης και τσιμεντενέσεων, οδικές, προσπέλασης των Σταθμών, βοηθητικές εγκαταστάσεων Η/Μ εξοπλισμού και προσαγωγής.



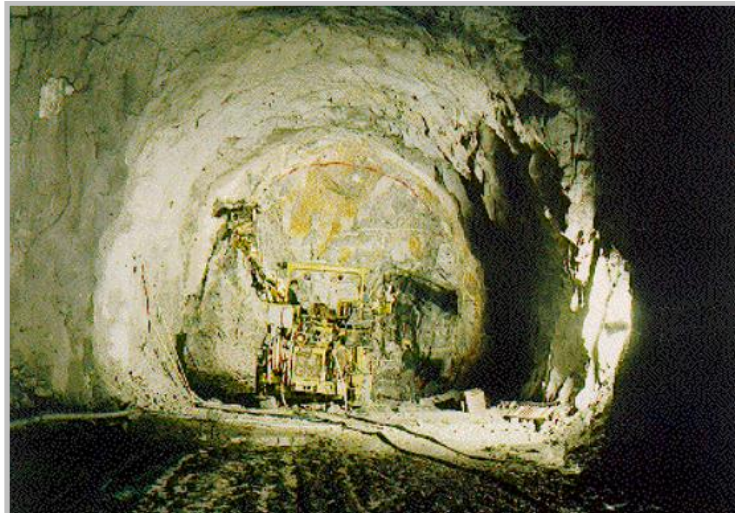
Εικόνα 82: Υπόγειος Σταθμός Παραγωγής ΥΗΕ Θησαυρού
(Φωτογραφίες ΥΗΕ Θησαυρού - <https://www.microhydropower.gr>)



Εικόνα 83: Οδική σήραγγα ΥΗΕ Θησαυρού
(Φράγμα ΥΗΕ Θησαυρού - <https://www.google.com/maps>)



Εικόνα 84: Σήραγγα προσπέλασης προς τον ΥΗΣ Θησαυρού (Φράγμα ΥΗΕ Θησαυρού - <https://www.google.com/maps>)



Εικόνα 85: Μόνιμη οδός προσπέλασης του ΥΗΕ Θησαυρού- Τμήμα Γ- Κατασκευή οδικής σήραγγας/1993-1995 (Michaniki – Construction Company)

Στην παρούσα αναφορά έχουν επιλεχθεί σήραγγες με μόνιμη επένδυση που κατασκευάστηκε εξ ολοκλήρου ή κατά τμήματα από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και η κατασκευή τους ολοκληρώθηκε στο διάστημα 1993-1996. Σε κάποιες περιπτώσεις έχει χρησιμοποιηθεί το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε συνδυασμό με οπλισμένο σκυρόδεμα στη μόνιμη επένδυση, ενώ για την προσωρινή υποστήριξη έχουν χρησιμοποιηθεί μεταλλικά πλαίσια, αγκυρώσεις και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Μέχρι το 1993 είχαν μελετηθεί από τη Διεύθυνση Ανάπτυξης Υδροηλεκτρικών Έργων της ΔΕΗ ΑΕ και κατασκευάστηκαν από την Κοινοπραξία Προοδευτική-ΤΕΒ-Σαραντόπουλος σήραγγες αποστραγγίσεων και τσιμεντενέσεων συνολικού μήκους 4.644 m, μία σήραγγα αποστραγγίσεων στο κάτω καθ' ύψος της διατομής επίπεδο, εκτεινόμενη παράλληλα στον άξονα της κύριας σήραγγας στο δεξί της αντέρεισμα σε μήκος 367 m και η οδική σήραγγα προσπέλασης του ΥΗΣ Θησαυρού μήκους 231 m. Όλες αυτές οι σήραγγες διανοίχτηκαν με σχήμα διατομής ημικυκλικό και στο κάτω τμήμα της διατομής ορθογωνικό. Οι σήραγγες αποστραγγίσεων και τσιμεντενέσεων κατασκευάστηκαν με ωφέλιμο εμβαδόν διατομής 8 m², η παρακείμενη σήραγγα

δεξιού αντερείσματος με ωφέλιμο εμβαδόν διατομής 30 m², ενώ μεγαλύτερη είναι η οδική σήραγγα προσπέλασης με ωφέλιμο εμβαδόν διατομής 36 m².

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
Τσιμεντέων Αποστράσεων	Τσιμεντέσεις - Αποστράγγιση	Γνεύσιοι - Γρανιτογένεσις	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	4644	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	10	8	1993	ΥΠΕ Θησαυρού - φράγμα και συναφή έργα	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	Κ/Ε ΘΗΣΑΥΡΟΥ (ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗ - ΤΕΒ - ΣΑΡΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ)
ADT-RL	Αποστράγγιση	Γνεύσιοι - Γρανιτογένεσις	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	367	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	34	30	1993	ΥΠΕ Θησαυρού - φράγμα και συναφή έργα	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	Κ/Ε ΘΗΣΑΥΡΟΥ (ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗ - ΤΕΒ - ΣΑΡΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ)
Προσπέλασης Σταθμού	Οδική	Γνεύσιοι - Γρανιτογένεσις	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	231	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	40	36	1993	ΥΠΕ Θησαυρού - φράγμα και συναφή έργα	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	Κ/Ε ΘΗΣΑΥΡΟΥ (ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗ - ΤΕΒ - ΣΑΡΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ)

Πίνακας 19: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΠΕ Θησαυρού

Ένα άλλο τμήμα του έργου ολοκληρώθηκε το 1996 από την Κοινοπραξία ΑΕΓΕΚ ΑΕ-ΜΕΤΩΝ ΑΕ, ενώ μελετητής παρέμεινε το Τμήμα Μελετών της ΔΕΗ ΑΕ. Αντίστοιχης προσωρινής και μόνιμης επένδυσης με τις προαναφερόμενες σήραγγες είναι και η σήραγγα προσπέλασης του θαλάμου ανάπασης μήκους 175 m, καθώς και τα ανοίγματα προσαγωγής της κύριας σήραγγας προσπέλασης συνολικού μήκους 454 m. Η οδική σήραγγα προσπέλασης του Σταθμού παραγωγής εκτείνεται σε μήκος 668 m, ενώ η αντίστοιχη του θαλάμου μετασχηματιστών εκτείνεται σε μήκος 77 m. Η σήραγγα εγκατάστασης Η/Μ εξοπλισμού είναι μικρότερου μήκους 60 m, διατομής ορθογωνικής, όπως και η οδική σήραγγα θαλάμου μετασχηματιστών. Οι υπόλοιπες έχουν κατασκευαστεί με σχήμα διατομής ημικυκλικό και στο κάτω τμήμα της διατομής ορθογωνικό.

Η σήραγγα προσπέλασης σταθμού ανάπασης και οι αντίστοιχες βοηθητικές προσαγωγής παρέχουν ωφέλιμο εμβαδόν διατομής 105 m², ενώ η επένδυση κάλυψε περίπου 6 m² από την αρχική διατομή εκσκαφής. Οι οδικές σήραγγες προσπέλασης σταθμών αντιστοιχίζονται σε ωφέλιμο εμβαδόν 55 και 27 m², ενώ η βοηθητική σήραγγα εγκατάστασης Η/Μ εξοπλισμού σε επιφάνεια 14 m².

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
"Παράθυρο" Προσαγωγής	Κατασκευαστικές	Γνεύσιοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	454	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	111	105	1996	ΥΠΕ Θησαυρού - συγκρότημα παραγωγής	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	Κ/Ε ΑΕΓΕΚ Α.Ε. - ΜΕΤΩΝ Α.Ε.
Προσπέλασης Θαλάμου Ανάπασης	Προσπέλασης	Γνεύσιοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	175	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	111	105	1996	ΥΠΕ Θησαυρού - συγκρότημα παραγωγής	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	Κ/Ε ΑΕΓΕΚ Α.Ε. - ΜΕΤΩΝ Α.Ε.

Πίνακας 20: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΠΕ Θησαυρού

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
Προσπέλασης Σταθμού Παραγωγής	Οδική	Γνεύσιοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	668	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	63	55	1996	ΥΠΕ Θησαυρού - συγκρότημα παραγωγής	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	Κ/Ε ΑΕΓΕΚ Α.Ε. - ΜΕΤΩΝ Α.Ε.
Προσπέλασης Θαλάμου Μετασχηματιστών	Οδική	Γνεύσιοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	77	Ορθογωνικό	31	26,5	1996	ΥΠΕ Θησαυρού - συγκρότημα παραγωγής	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	Κ/Ε ΑΕΓΕΚ Α.Ε. - ΜΕΤΩΝ Α.Ε.
Ζυγών Γεννητριών	Εγκατάσταση Η/Μ Εξοπλισμού	Γνεύσιοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	60	Ορθογωνικό	16	14,3	1996	ΥΠΕ Θησαυρού - συγκρότημα παραγωγής	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	Κ/Ε ΑΕΓΕΚ Α.Ε. - ΜΕΤΩΝ Α.Ε.

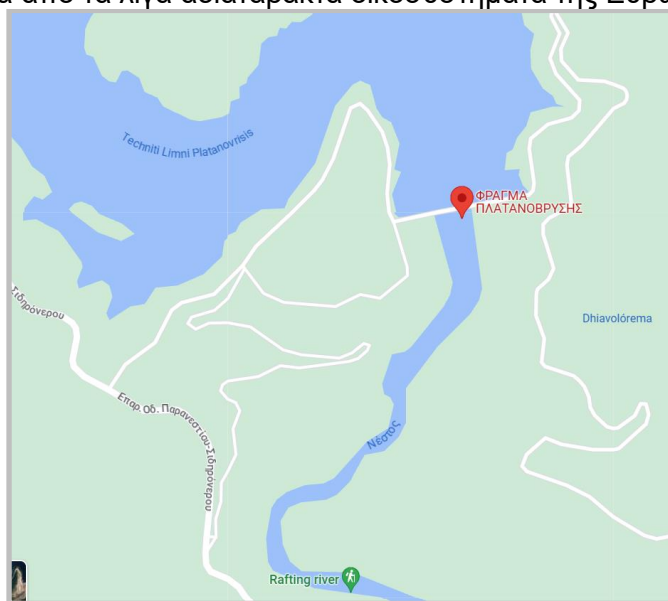
Πίνακας 21: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΠΕ Θησαυρού

Όλες οι προαναφερθείσες σήραγγες διανοίχτηκαν με συμβατικές μεθόδους διανοίξεων και με ανατινάξεις, σε περιβάλλον κυρίως γνεύσιων και τοπικά γρανιτογενεύσιων. Το γεωλογικό περιβάλλον που εκσκάφτηκαν και κατασκευάστηκαν

τα προαναφερόμενα έργα είναι όμοιο από γεωλογικής, τεχνικογεωλογικής, αλλά και κατασκευαστικής πλευράς με το αντίστοιχο του ΥΗΕ του Πολύφυτου, το οποίο αναφέρεται πιο πάνω.

6.5.2 Υδροηλεκτρικό έργο Πλατανόβρυσης

Το έργο ξεκίνησε να λειτουργεί το 1999 και βρίσκεται στο Δήμο Παρανεστίου. Συνδέεται με τον ποταμό Νέστο όπου εντοπίζεται και η τεχνητή λίμνη Πλατανόβρυσης, ο ΥΗΣ και το ομώνυμο φράγμα που κατασκευάστηκε από σκυρόδεμα για το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως κύριο υλικό η ιπτάμενη τέφρα του ΑΗΣ Πτολεμαΐδος, μειώνοντας το κόστος της κατασκευής. Στο ΥΗΕ Πλατανόβρυσης διοχετεύεται ο όγκος υδάτων του ΥΗΕ Θησαυρού, όπως προαναφέρθηκε στην αντίστοιχη ενότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα Στενά του Νέστου είναι προστατευόμενος βιότοπος Natura 2000, με κωδικό GR1120004, έκτασης 86,36 km² (56), ενώ το παρθένο δάσος Φρακτού έχει έκταση περίπου 120.000 στρέμματα και αποτελεί ένα από τα λίγα αδιατάρακτα οικοσυστήματα της Ευρώπης.



Εικόνα 86: Χάρτης ΥΗΕ Πλατανόβρυσης (ΦΡΑΓΜΑ ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗΣ - Χάρτες Google)



Εικόνα 87: Φράγμα ΥΗΕ Πλατανόβρυσης (ΦΡΑΓΜΑ ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗΣ - Χάρτες Google)



Εικόνα 88: Σιδηρόδρομος με άξονα παράλληλο του ποταμού Νέστου (Φράγμα ΥΗΕ Πλατανόβρυσης - <https://el.wikipedia.org/wiki/Νέστος>)



Εικόνα 89: Ταμιευτήρας ΥΗΕ Πλατανόβρυσης (ΦΡΑΓΜΑ ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗΣ - Χάρτες Google)

Επί μέρους τμήματα του έργου αντιστοιχίζονται σε σήραγγες επενδυμένες με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα τόσο στην προσωρινή όσο και στην μόνιμη επένδυση, όπως για παράδειγμα η οδική σήραγγα προσπέλασης σταθμού παραγωγής και η κατασκευαστική σήραγγα διάνοιξης κατώτατου επιπέδου αριστερού αντερείσματος της κύριας σήραγγας ("LL"), που ολοκληρώθηκαν το 1993.

Κατά την εκσκαφή χρησιμοποιήθηκαν συμβατικές μέθοδοι διάνοιξης και ανατινάξεις, ενώ μετά τη διαμόρφωση της τελικής υποστήριξης διαμορφώθηκε διατομή ημικυκλικού και κάτω ορθογωνικού σχήματος, εμβαδού 50 m^2 για την οδική σήραγγα και μόλις 10 m^2 για την κατασκευαστική σήραγγα διάνοιξης. Η οδική σήραγγα εκτείνεται σε μήκος 145 m και η σήραγγα διάνοιξης στα 108 m.



Εικόνα 90: Οδική σήραγγα πλησίον ΥΗΕ Πλατανόβρυσης
(ΦΡΑΓΜΑ ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗΣ - Χάρτες Google)



Εικόνα 91: Είσοδος σήραγγας πλησίον ΥΗΕ Πλατανόβρυσης
(ΦΡΑΓΜΑ ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗΣ - Χάρτες Google)

Οι εν λόγω σήραγγες εκσκάφτηκαν σε γεωλογικούς σχηματισμούς γρανιτογενευσίων, για τους οποίους αναφέρθηκαν αναλυτικά πιο πάνω γεωλογικά, τεχνικογεωλογικά και τεχνικής-κατασκευαστικής φύσεως στοιχεία.

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ
Προσπέλασης Σταθμού Παραγωγής	Οδική	Γρανιτογενεύσιοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	145	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	45-54	43-50	1993	ΥΗΕ Πλατανόβρυσης
Διάνοιξης LL	Κατασκευαστική	Γρανιτογενεύσιοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	108	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	10	-	1993	ΥΗΕ Πλατανόβρυσης

Πίνακας 22: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Πλατανόβρυσης

Κεφάλαιο 7: Τεχνικά στοιχεία και προδιαγραφές για τις σήραγγες της ΔΕΗ ΑΕ με τελική επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

7.1 Εκσκαφές

Στις εργασίες της εκσκαφής εκτός από τη συμβατική αφαίρεση του γεωλογικού υλικού που αποτυπώθηκε στα αντίστοιχα σχέδια και στην αντίστοιχη μελέτη των έργων περιλήφθηκαν επιπλέον το ξεσκάρωμα, η φόρτωση, η μεταφορά και η εκφόρτωση των προϊόντων εκσκαφής, για χρήση ή αποθήκευση για μελλοντική χρήση στην κατασκευή ή εναλλακτικά την απόθεσή τους σε χώρους εγκεκριμένους για την υγειονομική ταφή τους. Με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιούνταν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του εκάστοτε έργου. Χαρακτηριστικό είναι ότι υλικά που χρησίμευσαν για τις κατασκευές τμημάτων των έργων εκσκαφής χωριστά από τα υλικά προς απόρριψη.

Οι χώροι απόρριψης των προϊόντων εκσκαφής δεν εμπλέκονταν κατά κανέναν τρόπο με τμήματα ή το σύνολο των έργων, απαιτούνταν να δημιουργούν ομοιόμορφα και σταθερά πρανή, καλαίσθητο τελικά περιβάλλοντα χώρο, ισοπεδωμένο, εξομαλυμένο και διαμορφωμένο και αποστραγγισμένο με σκοπό την αποφυγή διάβρωσης υλικών και συσσώρευσης ύδατος. Όσον αφορά τα ακατάλληλα προϊόντα εκσκαφής, αυτά διαστρώνονταν στις εγκεκριμένες περιοχές απόρριψης με μέγιστο πάχος στρώσεων το 1,5 m, χωρίς επιπλέον συμπίκνωση πέραν της προκαλούμενης από τα μηχανήματα μεταφοράς και διάστρωσης. Ιδιαίτερη μέριμνα υπήρξε κατά την αποθήκευση, επαναφόρτωση και μεταφορά των υλικών με σκοπό την αποφυγή διαχωρισμού των βράχων και την ανάμειξή τους με υλικά που προορίζονται για διαφορετικές χρήσεις ή απόρριψη. Με το τέλος των εργασιών αποθήκευσης και επαναφόρτωσης, οι χώροι αποθήκευσης και επαναφόρτωσης καθαριζόνταν και διαμορφώνονταν με σταθερές κλίσεις.

Οι εκσκαφές με χρήση εκρηκτικών πραγματοποιήθηκαν από εξειδικευμένους και άρτια εκπαιδευμένους τεχνίτες υπό την επίβλεψη πεπειραμένων τεχνικών και πάντα σύμφωνα με του κανόνες ασφαλείας προσώπων, ιδιωτικής και δημόσιας περιουσίας. Οι εργασίες εκσκαφών με εκρηκτικά ελέγχονταν από φορητό επιταχυνσιογράφο και στην περίπτωση παρακείμενων κατασκευών από σκυρόδεμα η χρήση εκρηκτικών ορίστηκε να προκαλεί μέγιστη ταλάντωση σκυροδέματος 5 cm/sec. Οι εκτελούμενες παράλληλα με τις εκσκαφές μετρήσεις υποδείκνυαν αν υπήρχε ανάγκη να μειώνεται κατά περίπτωση η ποσότητα των εκρηκτικών ταυτόχρονης πυροδότησης, ώστε να τηρείται το όριο της μέγιστης ταλάντωσης σκυροδέματος στις παρακείμενες κατασκευές. Για τον ίδιο λόγο ορίστηκε και η ελάχιστη απόσταση πυροδότησης εκρηκτικών από υφιστάμενες κατασκευές σκυροδέματος να αντιστοιχεί στα 30 m.

Οι εκσκαφές πραγματοποιήθηκαν κατά τρόπο που να μην δίνουν διατομές ακανόνιστες, με προϋπόθεση την ελαχιστοποίηση υπερεκσκαφών, διαταραχής του εδάφους και επομένως και πρόκλησης αστάθειας σε αυτό, κερματισμού του βράχου επί του οποίου τοποθετήθηκε επένδυση οποιασδήποτε μορφής σκυροδέματος (π.χ. επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος) και της κατά οιονδήποτε τρόπο πρόκλησης φθορών σε παρακείμενες της εκσκαφής υφιστάμενες κατασκευές.

Σε περιπτώσεις που ο σχεδιασμός εκσκαφής με εκρηκτικά δεν πληρούσε τις προαναφερόμενες προϋποθέσεις υπήρξε αλλαγή σχεδιασμού, όπως για παράδειγμα μεταβολή της διαμέτρου και του μήκους των οπών των διατρημάτων, μεταβολή των χρόνων πυροδότησης των γομώσεων, χρήση ελαφρύτερης γόμωσης ή ακόμη και αντικατάσταση της μεθόδου εκσκαφής με εκρηκτικά με γραμμική διάτρηση και χρήση σφηνών ή και συμβατική μέθοδο εκσκαφής. Σε κάθε περίπτωση οι εφαρμοζόμενες μέθοδοι είχαν σαν αποτέλεσμα την παραγωγή υλικών κατάλληλων για χρήση σε τμήματα κατασκευής των ΥΗΕ έργων και επιβλέπονταν από Υπεύθυνο Σύμβουλο Ανατινάξεων.

Στις υπόγειες εκσκαφές περιλαμβάνονται όλα τα στοιχεία των έργων και κατασκευών που σχετίζονται με τη διάνοιξη σηράγγων για σήραγγες αποστράγγισης και τσιμεντενέσεων, θαλάμους, σήραγγες προσπέλασης, οδικές σήραγγες, κα.

Το σύνολο των υπόγειων εκσκαφών πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε με την περάτωση των εργασιών όλες οι προκύπτουσες επιφάνειες ήταν ομαλές, έφθαναν μετά το ξεσκάρωμα στο υγιές πέτρωμα και ανταποκρίνονταν στις ελάχιστες γραμμές εκσκαφής σύμφωνα με τα σχέδια της κάθε Μελέτης.

Οι παράγοντες που προσδιορίζονται για την εκτέλεση μιας εκσκαφής είναι:

- ❖ Οι μέθοδοι και οι τεχνικές ανάλογα με τον γεωλογικό σχηματισμό που εφαρμόζονται.
- ❖ Η θέση και η γεωμετρία της εκσκαφής
- ❖ Τα στάδια της εκσκαφής στα διάφορα μέτωπα και οι αναβαθμοί
- ❖ Το πάχος του σχηματισμού προς ανατίναξη και εκσκαφή
- ❖ Οι αποστάσεις και το μέγεθος των οπών των διατηρημάτων
- ❖ Η ποσότητα και το είδος του εκρηκτικού
- ❖ Το βάθος τοποθέτησης της γόμωσης
- ❖ Οι χρόνοι πυροδότησης
- ❖ Η αποτελεσματικότητα των διάφορων τεχνικών ελεγχόμενης ανατίναξης

Η ελάχιστη απόσταση πυροδότησης εκρηκτικών από υφιστάμενες κατασκευές σκυροδέματος είχε οριστεί όπως και στις υπέργειες κατασκευές στα 30 m, ενώ δεν εκτελούνταν καμία πυροδότηση εκρηκτικών πέριξ σκυροδέματος με ηλικία μικρότερη των 7 ημερών, ακόμη και σε απόσταση μεγαλύτερη από την ελάχιστη επιτρεπόμενη που προαναφέρεται. Η εκτέλεση των υπόγειων εκσκαφών πραγματοποιήθηκε κατά τρόπο που να αποφευχθούν οι υπερεκσκαφές και η χαλάρωση των παρακείμενων σχηματισμών πέρα από τα όρια των εκσκαφών που ορίζονταν στις αντίστοιχες Μελέτες. Σε κάθε περίπτωση οι προτάσεις για την ολοκλήρωση των εργασιών εκσκαφής ελέγχονταν από Ειδικό Σύμβουλο Ανατινάξεων, ενώ σε κάθε περίπτωση εφαρμόστηκαν όσο συντηρητικές μέθοδοι απαιτούνταν με σκοπό τον αναγκαίο περιορισμό του κρουστικού κύματος στον βράχο που περιέβαλλε τις υπόγειες κατασκευές.

Στο σύνολό τους οι υπόγειες εγκεκριμένες εκσκαφές εκτός μεμονωμένων περιπτώσεων ολοκληρώθηκαν με τις κατάλληλες κατά περίπτωση μεθόδους με εκρηκτικά, ενώ εξασφαλίστηκε ο κατάλληλος απαιτούμενος φωτισμός τους και ο επαρκής εξαερισμός τους καθ' όλη τη διάρκεια των εργασιών κατασκευής.

Υπόγειες εκσκαφές σε γεινίαση με άλλες υπόγειες κατασκευές εκτελούνται σταδιακά υπέρ της ασφαλείας, ενώ ο μέγιστος χρόνος αναμονής της εκσκαφής μέχρι την εφαρμογή της υποστήριξης περιλαμβανομένων των εργασιών ξεσκάρωματος ήταν οι 8 ώρες.

Όλες οι υπόγειες εκσκαφές πραγματοποιήθηκαν με τέτοιο τρόπο και με όλα τα αναγκαία μέτρα, ώστε αποφεύχθηκε η χαλάρωση, η διαταραχή και κάθε προοδευτική εξασθένηση του πετρώματος πέρα από το περιτύπωμα της διατομής των σχεδίων της εκάστοτε μελέτης έργου. Οι πραγματικές γραμμές εκσκαφής των διατομών, καθώς και η σύγκρισή τους με αυτές των εγκεκριμένων σχεδίων μελέτης κάθε έργου πραγματοποιήθηκε με φωτογραφικό ή ηλεκτρονικό μετρητικό εξοπλισμό και τις ανάλογες συσκευές και μεθόδους.

Επίσης χαρτογραφήθηκαν όλες οι επιφάνειες βράχου εκτός του πυθμένα και για αυτό το λόγο πριν από κάθε χαρτογράφηση προηγούνταν πλύση των επιφανειών εκσκαφής του βράχου που είχε κάθε φορά αποκαλυφθεί μετά την προηγούμενη χαρτογράφηση.

7.2 Ελεγχόμενες ανατινάξεις

Για την τελική και απαλή μετάτμηση η διάμετρος των οπών κυμαινόταν από 51 mm έως 89 mm, ενώ για την προρρηγμάτωση η αντίστοιχη διάμετρος κυμαινόταν από 51 mm έως 101 mm. Οι οπές αυτές γομώνονταν με φυσίγγια συνδεδεμένα με ακαριαία θρυαλλίδα. Η απόσταση των οπών, ο τύπος των φυσιγγίων, το γέμισμα, το τάπωμα και άλλες λεπτομέρειες της γόμωσης και της πυροδότησης προέκυπταν από δοκιμαστικές ανατινάξεις.

Οι οπές της απαλής μετάτμησης πυροδοτούνταν μαζί με την κύρια ανατίναξη, αλλά με κατάλληλη υστέρηση με την χρήση ηλεκτρικών πυροκροτητών. Όπου το επέτρεπε η κατηγορία του βράχου, μερικές οπές απαλής μετάτμησης δε γομώνονταν. Οι δε οπές τελικής μετάτμησης πυροδοτούνταν με ελάχιστη υστέρηση μεταξύ τους, ώστε να δημιουργούνται διατμητικές δυνάμεις κατά μήκος της περιφέρειας της ανατίναξης. Τέλος, οι οπές της προρρηγμάτωσης πυροδοτούνταν πριν από την κύρια ανατίναξη.

7.3 Απομάκρυνση υδάτων από τα υπόγεια έργα

Οι εργασίες του Αναδόχου για την απομάκρυνση των υδάτων σε κάθε φάση παρέμειναν υπό την έγκριση της Διευθύνουσας Υπηρεσίας, με μέριμνα την κατασκευή τους σε χώρους ελεύθερους ύδατος. Σε έργα που κατασκευάστηκαν σε περιοχές με συσσώρευση ύδατος περιμετρικά και ανάντη αυτών, η απομάκρυνση του όγκου των υδάτων καθορίστηκε με τρόπο που να εμποδίζεται η απώλεια λεπτόκοκκου υλικού από τις θεμελιώσεις και γενικότερα από το επίπεδο βάσης των υπόγειων έργων προς αποφυγή ενδεχόμενων καθιζήσεων. Βασική μέριμνα της Διευθύνουσας υπηρεσίας της ΔΕΗ ΑΕ υπήρξε η προστασία των έργων από τέτοιου είδους αστοχίες, στοιχείο που καθοριζόταν και στις διαμορφούμενες προδιαγραφές υποχρεώσεων και δικαιωμάτων των Αναδόχων κατασκευής των έργων. Οριζόταν ρητά ότι δεν προβλεπόταν η αμοιβή υλικών που απομακρύνθηκαν από ρεύματα ποταμών ή λόγω διαβρώσεων και υποσκαφών, θεωρώντας τα εν λόγω γεγονότα αστοχίες με ευθύνη του Αναδόχου και σε καμία περίπτωση αποτέλεσμα της Μελέτης Εφαρμογής της Διευθύνουσας Υπηρεσίας.

Επίσης, η κατασκευή των έργων προδιαγράφηκε με ιδιαίτερη μέριμνα για την διατήρηση της ευστάθειας των πρσανών, του δαπέδου των σηράγγων και των υπόλοιπων υπόγειων κατασκευών, καθώς και για την εκτέλεση όλων των εργασιών κατασκευής εν ξηρώ. Το νερό που δεν ελέγχθηκε από τα συστήματα άντλησης και εισήλθε σε σημεία που θα προκαλούσε δυσκολίες στην κατασκευή και λειτουργία των έργων προβλέφθηκε να συγκεντρώνεται σε τάφρους αποστράγγισης στα κατάλληλα σημεία ώστε να μην δημιουργείται πρόβλημα εισροής στο χώρο των έργων κατασκευής (π.χ. τάφροι αποστράγγισης στα ανάντη και κατάντη άκρα της κύριας εκσκαφής θεμελίωσης αναχωμάτων και κατασκευών όπως τα φράγματα). Η προγραμματισμένη μέριμνα και εξασφάλιση της στεγανότητας στο περιβάλλον των έργων εξασφαλίστηκε από την διατήρηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα τουλάχιστον 1,5 μέτρο κάτω από οποιοδήποτε συμπυκνωμένο ανάχωμα, από την επαναπλήρωση οποιασδήποτε εκσκαφής με υλικό που θα χαρακτηριζόταν από ιδιότητες πυκνότητας και διαπερατότητας όμοιες με τις αντίστοιχες του προϋπάρχοντος υλικού στο χώρο της εκσκαφής.

Κατά την κατασκευή των υπόγειων έργων της ΔΕΗ ΑΕ εγκαταστάθηκαν, συντηρήθηκαν και λειτούργησαν όλοι οι αγωγοί, διώρυγες, οχετοί, τάφροι αποστράγγισης, φρέατα συλλογής, αντλίες, πιεζόμετρα κατακόρυφου σωλήνα και όσες άλλες διατάξεις εγκαταστάσεων κρίθηκαν απαραίτητες για την διατήρηση των έργων ελεύθερων από εισροή υδάτων. Εφεδρικές γεννήτριες και εφεδρικές εγκαταστάσεις άντλησης εξασφάλισαν την υδατοστεγανότητα των έργων ακόμη και σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης κατά τη διάρκεια κατασκευής τους.

Στα τμήματα των έργων που επενδύθηκαν με σκυρόδεμα ή ειδικότερα με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και παρατηρήθηκε εισροή υδάτων από τεκτονισμένο βράχο χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα να παρεμποδιστεί η ροή αυτή από το υλικό επένδυσης, πραγματοποιήθηκαν εργασίες διάνοιξης («καλαφάτισμα»-πλήρωση αρμών με στεγανωτικά υλικά) ή εκτροπής των υδάτων μέσω σωλήνων, δοχείων ή άλλων εγκεκριμένων μεθόδων κατά τρόπο που στο σκυρόδεμα ή στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα δεν επιδρούσε διαβρωτικά το νερό λόγω επαφής μετά από διείδυση.

Μετά το πέρας των εργασιών, αφαιρέθηκαν όλα τα βοηθητικά προφράγματα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των σηράγγων εκτροπής. Κατασκευάστηκαν και συντηρήθηκαν οι προσωρινές οδοί προσπέλασης μέχρι τη στέψη των έργων εισόδου και εξόδου στις σήραγγες εκτροπής. Κατά τα λοιπά, προβλέφθηκε και πραγματοποιήθηκε η κατασκευή στεγανών διαφραγμάτων ή τάφρων όπου αυτό κρίθηκε αναγκαίο και πάντα με γνώμονα την υδατοστεγανότητα των υπόγειων έργων κατασκευής, π.χ. μέχρι το βράχο κάτω από θεμελιώσεις αδιαπέρατων ζωνών προφραγμάτων ή τσιμεντενέσεις σε περιβάλλοντες εδαφικούς σχηματισμούς σηράγγων.

7.4 Φωτισμός χώρων Υπόγειων Εκσκαφών

Κατά τη διάρκεια όλων των υπόγειων εκσκαφών και κατασκευών εξασφαλίστηκε επαρκής φωτισμός των σηράγγων και θαλάμων με επαρκή πρόβλεψη στοιχειώδους φωτισμού κατά τη διάρκεια διακοπής των εργασιών, όποτε και αν απαιτούνταν. Πιο συγκεκριμένα, σε απόσταση 150 μ από το μέτωπο εκσκαφής όλος ο εξοπλισμός λειτουργούσε με τάση 25 V με γείωση ή εναλλακτικά ως εναέριος μη γειωμένος. Οι λαμπτήρες ήταν ηλεκτρικοί και σε περίπτωση μη διαθεσιμότητάς τους, λαμπτήρες θυέλλης ή καρβιδίου.

7.5 Αερισμός χώρων Υπόγειων Εκσκαφών

Η ελάχιστη περιεκτικότητα σε O₂ του αέρα στο χώρο των υπόγειων έργων σε όλη τη διάρκεια των εργασιών εντός αυτών αντιστοιχίστηκε σταθερά σε ποσοστό 17% , ενώ η περιεκτικότητα σε ρύπους (επιβλαβή αέρια, ατμοί, σκόνη) διαμορφώθηκε σε ποσοστά που εξασφάλιζαν την υγεία των εργαζομένων με βασικούς παράγοντες καθορισμού του ασφαλούς μέγιστου ορίου της το χρόνο παραμονής των εργαζομένων στους υπόγειους χώρους, την επικρατούσα θερμοκρασία, τη διαμορφούμενη υγρασία και τα συνδυαστικά αποτελέσματα ρυπαντών.

Πιο συγκεκριμένα, τα μέγιστα όρια ρύπων κατά τη διάρκεια των εργασιών τα οποία εξασφάλισαν την καλή υγεία και ασφάλεια των εργαζομένων διαμορφώθηκαν ως εξής:

- ❖ 5 PPM* νιτρικών αερίων (μετρούμενο σαν NO₂) για περισσότερο από 10 min μετά από κάθε ανατίναξη στο εσωτερικό μιας υπόγειας εκσκαφής
- ❖ 30 PPM* νιτρικών αερίων σαν απόλυτο μέγιστο
- ❖ 100 PPM* μονοξειδίου του άνθρακα (CO) σαν απόλυτο μέγιστο
- ❖ 5000 PPM* διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σαν απόλυτο μέγιστο
- ❖ Όλα τα μέγιστα όρια ρυπαντών που καθορίζονταν από την κείμενη Νομοθεσία κατά την εξέλιξη της κατασκευής κάθε υπόγειου έργου όπως ίσχυε και όπως κατά περίπτωση και συν τω χρόνω τροποποιούνταν.

**PPM: Μέρη αερίου ανά εκατομμύρια μερών αέρα κατ' όγκο*

Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από τα προαναφερόμενα όρια επιτράπησαν μόνο σε αποστάσεις μικρότερες από 3 m από το σημείο εκροής τους από μηχανές εσωτερικής καύσης και μόνο στην περίπτωση που αυτές οι περιοχές των εκτός ορίων συγκεντρώσεων ρύπων παρέμεναν αποκλεισμένες από την παραμονή ή τη διέλευση οποιουδήποτε εργαζομένου του έργου.

Τα συστήματα αερισμού των σηράγγων λειτούργησαν ως συστήματα απαγωγής με πρόβλεψη ενδεχόμενης αντιστροφής του αέρα, όπου χρειάστηκε. Η μέγιστη

απόσταση του άκρου του σωλήνα αερισμού ορίστηκε στα 30 m από το μέτωπο, ενώ κατά περίπτωση και όπου απαιτήθηκε τοποθετήθηκαν στην κύρια γραμμή απαγωγής ανεμιστήρες ενίσχυσης του συνολικού συστήματος αερισμού του έργου, με βασικό στόχο την πλήρη απομάκρυνση του μολυσμένου αέρα.

Στα μέτωπα εργασίας επιτεύχθηκε η κυκλοφορία καθαρού αέρα με την τοποθέτηση και χρήση βοηθητικού συστήματος αερισμού. Επιπλέον, κατά την αποκομιδή των προϊόντων εκσκαφής εφαρμοζόταν συστηματική διαβροχή των υλικών στους χώρους απόθεσης με σκοπό την ελαχιστοποίηση της προκύπτουσας σκόνης από αυτά.

Ο σχεδιασμός του συστήματος αερισμού των σηράγγων σχεδιάστηκε με προβλεπόμενη ελάχιστη παροχή καθαρού αέρα ανά εργαζόμενο 3 m³/min. Στην περίπτωση χρήσης νιζελοκινητήρων, η ελάχιστη παροχή καθαρού αέρα ανά εργαζόμενο προβλέφθηκε αυξημένη από την προαναφερόμενη κατ'ελάχιστο κατά 3-6 m³/min για κάθε ισοδύναμο KW χρήσης ισχύος μηχανήματος εντός σήραγγας, ανάλογα το είδος του μηχανήματος και το καύσιμο με το οποίο λειτουργούσε. Σε καμία περίπτωση δεν επιτράπηκε η χρήση μηχανών εσωτερικής καύσης με χρήση καυσίμου βενζίνης ή υγροποιημένων υδρογονανθράκων (προπάνιο, βουτάνιο, προπυλένιο, βουταλένιο), ενώ τα πετρελαιοκίνητα μηχανήματα πληρούσαν σε όλες τις περιπτώσεις τις οριζόμενες από τους Διεθνείς Κανονισμούς Προδιαγραφές όπως του U.S. Bureau of Mines ή άλλων ισοδύναμων.

Για τους συστηματικούς ελέγχους τήρησης των απαιτούμενων προδιαγραφών αερισμού των σηράγγων έγινε χρήση κατ'ελάχιστον δύο καταγραφικών οργάνων ανά υπόγειο έργο με συνεχή ένδειξη της συγκέντρωσης του υδροξειδίου του θείου (H₂S) και τοποθετημένων σε θέσεις με μέγιστη απόσταση από τον πυθμένα της σήραγγας τα 15 cm. Τα εν λόγω όργανα έφεραν σειρήνα συναγερμού, αντιληπτή σε έκτακτη ανάγκη από το σύνολο των εργαζομένων, που προειδοποιούσε πάντα σε περίπτωση που η συγκέντρωση υδροξειδίου του θείου (H₂S) ξεπερνούσε τα 5 mg/l. Επιπλέον, είχε εγκατασταθεί σύστημα οργάνων για τη συνεχή καταγραφή του ποσοστού του χαμηλότερου ορίου έκρηξης (X.O.E. – Low Explosive limit) των αερίων ρύπων στην περιοχή κάθε έργου, μέχρι 30 cm από την στέψη της σήραγγας. Το εν λόγω σύστημα ενισχύθηκε από 2 καταγραφικά όργανα με συνεχείς ενδείξεις του X.O.E. σε δύο θέσεις στο εσωτερικό κάθε σήραγγας, σειρήνα συναγερμού και φωτεινό σύστημα κινδύνου, ώστε να προειδοποιούνται άμεσα οι εργαζόμενοι σε κάθε περίπτωση που το ποσοστό του X.O.E. υπερέβαινε το 5%. Το καλιμπράρισμα των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν στο εσωτερικό των σηράγγων πραγματοποιούνταν περιοδικά σε εξειδικευμένα εργαστήρια.

Σε κάθε περίπτωση υπέρβασης των επιτρεπόμενων ανώτατων ορίων των ρύπων είχε προβλεφθεί να τίθεται εκτός λειτουργίας ο εξοπλισμός εργασιών κατασκευής, να εγκαταλείπεται η σήραγγα από το σύνολο του προσωπικού εργασίας και να μην επιστρέφει στις θέσεις εργασίας του προτού να επανέλθουν οι συγκεντρώσεις των αερίων ρύπων σε ποσοστά χαμηλότερα από τα επιτρεπόμενα όρια.

7.6 Σύστημα ένδειξης κεραυνών

Σε όλη τη διάρκεια κατασκευής των σηράγγων λειτουργούσε εγκεκριμένο σύστημα ένδειξης κεραυνών τοποθετημένο στην περιοχή των στομίων. Για όλες τις συσκευές που ήταν εκτεθειμένες σε ενδεχόμενες ηλεκτρικές κενώσεις, υπήρχε πρόβλεψη προστασίας τους με αντίστοιχες περιοδικά ελεγχόμενες εγκαταστάσεις γείωσης.

7.7 Μέτρα πυρασφάλειας

Τα έργα επανδρώνονταν με οργανωμένη πυροσβεστική ομάδα εφοδιασμένη με εξοπλισμό για την αντιμετώπιση ενδεχόμενης προκύπτουσας πυρκαγιάς σε θέσεις εργασίας, σε προσωρινές κατασκευές, αποθηκευτικούς χώρους, χώρους κατοικίας,

ενώ τοποθετούνταν διάσπαρτοι πυροσβεστήρες με τη απαραίτητη περιοδική συντήρησή τους. Ο εξοπλισμός πυρόσβεσης ήταν τύπου ξηράς σκόνης και άλλων κατάλληλων χημικών ή μέσω συστημάτων άντλησης νερού.

7.8 Μέτρα ασφαλείας προσωπικού

Τα μέτρα ασφαλείας στο σύνολό τους ακολουθούν τους Ελληνικούς κανονισμούς και τη σχετική κείμενη Νομοθεσία, καθώς και τους Διεθνείς Κανόνες πρόληψης ατυχημάτων. Οι σχετικές οδηγίες για τα ΜΑΠ περιελάμβαναν την πολιτική, όλες τις διαδικασίες και το σύνολο των μέτρων που εξασφάλιζαν την ασφάλεια και την υγεία του προσωπικού. Η Υπηρεσία Ασφαλείας παρείχετο από έμπειρο, ικανό και ειδικά εκπαιδευμένο προσωπικό, το οποίο πριν από κάθε απαιτητική κατασκευαστική εργασία υπέβαλλε προς έγκριση ειδικό πρόγραμμα μέτρων ασφαλείας, ικανό και κατάλληλο για αυτή.

Από το σύνολο του προσωπικού εργασίας και των επισκεπτών στους χώρους των έργων απαιτούνταν απαραίτητα να γίνει χρήση κατάλληλου εξοπλισμού προσωπικής ασφαλείας, που είχε οριστεί στα εξής:

- ❖ Προστατευτικό κράνος κεφαλής
- ❖ Μπότες ή άρβυλα με χαλύβδινη προστατευτική θωράκιση στο εμπρόσθιο μέρος
- ❖ Ωτοασπίδες σε περιπτώσεις έκθεσης σε υψηλά επίπεδα θορύβου
- ❖ Προστατευτικά γυαλιά
- ❖ Προστατευτικές μάσκες
- ❖ Προστατευτικά ενδύματα και προστατευτικές αλοιφές από εξειδικευμένο ιατρό σε περιπτώσεις έκθεσης σε περιβάλλον τοξικών ουσιών και οποιονδήποτε βλαβερών ουσιών
- ❖ Προστατευτικά σχοινιά σε περίπτωση εκτέλεσης εργασιών σε σημεία με αυξημένο υψόμετρο χωρίς προστατευτικά κιγκλιδώματα ή δίχτυ ασφαλείας.

Σε κάθε περίπτωση απαγορεύονταν ελαφρά υποδήματα, όπως αθλητικά παπούτσια ή σανδάλια.

Επίσης, για το προσωπικό που εργαζόταν σε περιοχές στάσιμου νερού επιτρεπόταν αυστηρά η χρήση μόνο εξοπλισμού λειτουργίας με πετρελαιόαερα, συσσωρευτές και υδραυλικά, ενώ απαγορευόταν ρητά η χρήση ή η παραμονή του κοντά σε ηλεκτρικό εξοπλισμό με τάση λειτουργίας μεγαλύτερη από 24 V.

Σε περιπτώσεις εκτέλεσης ηλεκτρικής πυροδότησης, η εγκατάσταση του εξοπλισμού επέτρεπε τον έλεγχο πιθανών ηλεκτρικών εκκενώσεων, κατά τη διάρκεια κλιματικών φαινομένων, σε σημείο του εδάφους, ενώ προληπτικά και πριν από την ανάγκη λειτουργίας των εγκαταστάσεων ηλεκτρικής γείωσης, αναστέλλονταν οι εργασίες ηλεκτρικής πυροδότησης στο σύνολό τους για λόγους ασφαλείας.

Όσον αφορά τις εκρηκτικές ύλες (καψύλλια, θρυαλλίδες, κα) απαγορευόταν ρητά να αποθηκεύονται και να μεταφέρονται στην ίδια θέση, ενώ αποθηκεύονταν κατά τις οδηγίες της συσκευασίας τους σε χώρους εκτός σηράγγων, στοών, θαλάμων και φρεάτων.

Οι αποθήκες εκρηκτικών εγκαταστάθηκαν σε σημεία απομακρυσμένα από κατοικίες και χώρους εργασίας, προστατεύονταν με συρματοπλέγμα και πόρτες ασφαλείας, είχαν εξασφαλισμένο επαρκή αερισμό του χώρου και σύστημα προστασίας από ηλεκτρικές εκκενώσεις. Στην οροφή των χώρων αποθήκευσης είχε προβλεφθεί επαρκής κενός χώρος για αποτροπή της ανύψωσης της θερμοκρασίας σε επίπεδα που θα έθεταν αμφίβολη την ασφάλεια των χώρων.

Τα εκρηκτικά και οι πυροκροτητές μεταφέρονταν πάντα ξεχωριστά σε μεταλλικά κλειδωμένα κιβώτια επενδυμένα με ξύλο για να αποφεύγεται η επαφή των υλικών με τον μεταλλικό σκελετό τους. Τα ειδικά οχήματα μεταφοράς ήταν σημασμένα με έντονα χρώματα αναγνώρισης του περιεχομένου τους.

Το σύνολο των υλικών καταγραφόταν σε βιβλίο αποθήκης με υποχρέωση ενημέρωσης των Αρμόδιων Αρχών σε περίπτωση οποιασδήποτε κλοπής ή

απώλειάς τους, ενώ το υπεύθυνο προσωπικό για τη φύλαξη, μεταφορά και αποθήκευσή τους ήταν οπωσδήποτε εξειδικευμένο, κατάλληλα εκπαιδευμένο, έμπειρο και απόλυτης εμπιστοσύνης.

Οι ανατινάξεις στο σύνολό τους λάμβαναν χώρα μόνο με την έγκριση και την επίβλεψη έμπειρων, ικανών και ειδικών γομωτών σε συγκεκριμένες ώρες της ημέρας και με ιδιαίτερη έμφαση στο σήμα λήξης της ανατίναξης που αντιστοιχούσε στην πυροδότηση του συνόλου των εκρηκτικών και σε μη εναπομείνασες πλέον εκρήξεις. Η γόμωση και η πυροδότηση απαγορεύονταν σε κάθε περίπτωση καιρικών διαταραχών, όπως π.χ. καταιγίδων στις περιοχές των έργων με μέριμνα να ελαχιστοποιούνται οι δονήσεις εξαιτίας αυτών στην περιοχή του έργου. Η προστασία των παρακείμενων από τις ανατινάξεις χώρων επιτυγχανόταν με προσωρινές κατασκευές όπως λάστιχα αυτοκινήτων δεμένα μεταξύ τους με σχοινί, σχηματίζοντας με αυτόν τον τρόπο μία μορφή τοίχους προστασίας από τυχόν προϊόντα εκσκαφών που θα εκσφενδονίζονταν.

Στην περίπτωση χρήσης σιδηροδρομικών συρμών τις μηχανές έλξης χειρίζονταν εξειδικευμένο, πεπειραμένο και υγιές προσωπικό με ικανά αντανakλαστικά αντίδρασης σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Ο εξοπλισμός παρέμενε καλά συντηρημένος και διέθετε εξοπλισμό ασφαλείας για αποφυγή εκτροχιασμού για ελάχιστη κατηφορική κλίση 0,5% και ελάχιστη ανηφορική κλίση 1%. Ο χώρος εργασίας του οδηγού ήταν κατάλληλα ενισχυμένος σύμφωνα με την κείμενη Νομοθεσία.

Επιπλέον, όλα τα έργα διέθεταν τον απαιτούμενο εξοπλισμό έκτακτης ανάγκης, που απαραίτητα κατ' ελάχιστον αποτελούνταν από τα εξής:

- ❖ Δύο φορεία τραυματιών
- ❖ Τρεις μάλλινες κουβέρτες
- ❖ Μία συσκευή τεχνητής αναπνοής
- ❖ Μία φιάλη οξυγόνου
- ❖ Φαρμακευτικό υλικό αποστείρωσης και επίδεσης τραυμάτων
- ❖ Αναλγητικές ενέσεις

Σε κάθε έργο υπήρχε μία ειδικά εκπαιδευμένη ομάδα έκτακτης επέμβασης, όπου σε κάθε βάρδια δύο από τα μέλη της παραβρίσκονταν συνεχώς στα κύρια μέτωπα του κάθε Έργου, έτοιμα να παρέχουν τις πρώτες βοήθειες, να λειτουργήσουν τον εξοπλισμό πρώτων βοηθειών και πυρόσβεσης και να μετακινήσουν ενδεχόμενους τραυματίες, με συνολική εποπτεία των τοπικών συνθηκών.

7.9 Διάφορα μέτρα υποστήριξης (αγκύρια, πλαίσια, δοκοί προπορείας)

Με το πέρας της εκσκαφής και την ολοκλήρωση απομάκρυνσης των επισφαλών αποκολλημένων όγκων («ξεσκάρωμα») από την άντυγα της εκσκαφής ακολούθησε η υποστήριξη των έργων με αγκύρια βράχου, προεντεταμένες αγκυρώσεις, μεταλλικό πλέγμα, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, καθώς και επιπλέον μέτρα υποστήριξης στα στόμια των σηράγγων των ΥΗΕ έργων. Ενισχυμένα μέτρα υποστήριξης αποτέλεσαν τα χαλύβδινα πλαίσια, δικτυωτά πλαίσια (lattice girders), μεταλλικά ελάσματα (επίπεδα ή πτυχωτά, διάτρητα ή μη), μικροπάσσαλοι, εδαφοπάσσαλοι (jet-grouting), κ.α. Σε συγκεκριμένα τμήματα έργων τοποθετήθηκε υποστήριξη από έγχυτο ή προκατασκευασμένο σκυρόδεμα, τσιμεντενέσεις σταθεροποίησης κ.α. Πρόσθετα μέτρα υποστήριξης λήφθηκαν και στις περιπτώσεις διακοπής των εργασιών διάνοιξης των υπόγειων κατασκευών για χρόνους μεγαλύτερους από μία βάρδια εργασιών.

Ειδική μέριμνα αναχαίτισης των επιφανειακών απορροών λήφθηκε μέσω πρόσθετων αποστραγγιστικών μέτρων (όπως των οπών αποστράγγισης) στα στόμια και στις εισόδους όλων των υπόγειων κατασκευών.

Η υποστήριξη της οροφής και των τοιχωμάτων σηράγγων και θαλάμων διαμορφώθηκε από κατάλληλα υποστηρίγματα από μορφοχάλυβα με ειδική μορφή στις συναρμογές και διαπλατύνσεις των σηράγγων, καθώς και αγκύρια βράχου ή

προεντεταμένες αγκυρώσεις όπου απαιτήθηκε από τη μελέτη ή από τις γεωλογικές συνθήκες που συναντήθηκαν κατά την προχώρηση των εκάστοτε έργων. Η περίπτωση υπερεκκαφών στο μέτωπο ή στην οροφή της σήραγγας αντιμετωπιζόταν με τη χρήση παρενθεμάτων BULLFLEX (σάκοι από πολυαμίδια που πληρώνονταν με ένεμα αναλογίας W/C=1: 2,5) για την πλήρωση των κενών της κατάπτωσης.

Μία επιπλέον μορφή υποστήριξης αποτέλεσε το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ή χωρίς δομικό πλέγμα ή συρματοπλέγμα ή με χαλύβδινες ίνες ή «εκτοξευόμενο ινοσκυρόδεμα» (ινολισμένο) και πάντα σύμφωνα με τις εγκεκριμένες μελέτες εφαρμογής του εκάστοτε έργου, ως προς το είδος (τύπο και μέγεθος), τις θέσεις (αποστάσεις και λεπτομέρειες έδρασης) και τη σύνδεση των υποστηρίγματος μεταξύ τους.

Σε κάθε περίπτωση έκτακτης ανάγκης υποστήριξης, εφαρμόστηκαν άμεσα τα κατάλληλα μέτρα υποστήριξης, ενώ τα σχετικά σχέδια και υπολογισμοί υποβάλλονταν μεταγενέστερα από του Αναδόχους των έργων, δίνοντας με αυτόν τον τρόπο προτεραιότητα στην ασφάλεια των εργαζομένων και της κατασκευής, αλλά και στα κατασκευαστικά μέγιστα και ελάχιστα όρια της χάραξης που είχε προβλεφθεί.

Μόνιμα υποστηρίγματα από μορφοχάλυβα παρέμειναν στις αρχικές θέσεις τοποθέτησής τους μόνο όπου απαιτήθηκαν από την κατηγορία βράχου και πάντα υπέρ της ασφαλείας. Πίσω από τα μόνιμα υποστηρίγματα μορφοχάλυβα τοποθετήθηκαν όπου απαιτήθηκε χαλύβδινες αυλακωτές λαμαρίνες ή κατόπιν διαφορετικών εγκρίσεων των Μελετητών αντί των λαμαρίνων τοποθετήθηκαν ξυλοσανίδες («πασαβάδια»).

Σε κάθε περίπτωση, πριν από την τοποθέτηση των μόνιμων μέτρων υποστήριξης με αγκύρια, προεντεταμένες αγκυρώσεις και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ή χωρίς πλέγμα ολοκληρωνόταν η διαδικασία έγκρισης της εμπειρίας του κατασκευαστή των οποιωνδήποτε τύπων αγκύρωσης που εφαρμόζονταν στις υπόγειες εκσκαφές. Της επικύρωσης των εγκρίσεων προηγούνταν η υποβολή στοιχείων για τον εκάστοτε κατασκευαστή των αγκυρίων, μελέτη τοποθέτησης και στοιχεία δοκιμών για τα προτεινόμενα σε κάθε περίπτωση αγκύρια.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την άμεση υποστήριξη στους διάφορους τύπους πετρωμάτων που συναντούσαν τα έργα ακολουθήθηκαν συγκεκριμένα βήματα εργασιών εφαρμογής και ολοκλήρωσης της προσωρινής επένδυσης των υπόγειων εκσκαφών, τα οποία περιγράφονται παρακάτω.

Στους καλύτερης αντοχής σχηματισμούς η άμεση υποστήριξη αποτελούνταν από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου, ενώ η πρώτη στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος τοποθετούνταν αμέσως μετά την εκσκαφή και την απομάκρυνση των επισφαλών τεμαχίων βράχου που είχαν αποκολληθεί («ξεσκάρωμα») και πριν την τοποθέτηση των αγκυρίων βράχου.

Στους χαμηλότερης ποιότητας και μηχανικών χαρακτηριστικών σχηματισμούς προβλεπόταν και η τοποθέτηση και μεταλλικών πλαισίων. Σε αυτή την περίπτωση, η διάστρωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πραγματοποιούνταν πριν την απομάκρυνση των προϊόντων εκσκαφής κάθε βήματος προχώρησης και σε χρόνο μικρότερο της μισής ώρας (0,5 h) από τη διάνοιξη, για να αποφευχθεί η έντονη χαλάρωση της βραχώμαζας. Στη συνέχεια απομακρύνονταν τα προϊόντα εκσκαφής και τοποθετούνταν το χαλύβδινο πλαίσιο που σταθεροποιούνταν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με τάκους σκυροδέματος, μεταλλικές σφήνες ή παρενθέματα τύπου BULLFLEX. Η ενίσχυση της θεμελίωσης της διατομής άμεσης υποστήριξης πραγματοποιούνταν μέσω μικροπασσάλων ή φρεατοπασσάλων κατά την τοποθέτηση των πλαισίων, όπου ήταν απαραίτητο κατά τη Μελέτη και τα Σχέδια έργου, ενώ τοποθετούνταν και αγκύρια βράχου. Η προσωρινή υποστήριξη συμπληρωνόταν υποχρεωτικά πριν την έναρξη εργασιών για το επόμενο βήμα προχώρησης της εκσκαφής. Μία επόμενη φάση της υποστήριξης περιελάμβανε την ορθή και πλήρη πάκτωση του κάθε πλαισίου στη βάση έδρασής του, την κατά μήκος

διασύνδεση κάθε νέου τοποθετούμενου πλαισίου με το προηγούμενο μέσω διαμήκων συνδέσμων (διαδοκίδες), την τοποθέτηση επόμενων στρώσεων εκτοξευόμενου σκυροδέματος και την τοποθέτηση του συνόλου των αγκυρίων βράχου.

Το βήμα προχώρησης ήταν μεταβλητό εφόσον σχετιζόταν άμεσα από το είδος και τις αντοχές του κάθε σχηματισμού που υποστηριζόταν μετά την εκσκαφή. Σε κάθε περίπτωση οι εργασίες της προσωρινής υποστήριξης ολοκληρώνονταν πριν την απομάκρυνση του μετώπου εκσκαφής σε απόσταση μεγαλύτερη των 2 βημάτων προχώρησης.

Τα παραπάνω εφαρμόζονταν αυστηρά και στην περίπτωση που η διάνοιξη της διατομής σήραγγας γινόταν σε 2 φάσεις (οροφή, τοιχώματα, κτλ), ενδεχομένως με επί μέρους στάδια σε κάθε βήμα.

Σε περίπτωση που το επέβαλλαν οι αντοχές των πτωχής ποιότητας σχηματισμών εκτελούνταν εργασίες ενίσχυσης των μέτρων άμεσης υποστήριξης και πιο συγκεκριμένα:

- ❖ Τοποθετούνταν συμπληρωματικές στρώσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος
- ❖ Ενισχύονταν και πυκνώνονταν τα αγκύρια
- ❖ Ενισχύονταν η θεμελίωση των χαλύβδινων πλαισίων μετά τη Β' φάση των εκσκαφών με μικροπασσάλους και εδαφοπασσάλους
- ❖ Αυξάνονταν οι διαμήκεις ράβδοι στήριξής τους, πυκνώνονταν τα πλαίσια υποστήριξης ή αγκυρώνονταν τα ήδη υπάρχοντα.
- ❖ Κατασκευαζόταν ανάστροφο τόξο στο δάπεδο, το οποίο είχε εκσκαφτεί με καμπύλο σχήμα για την εξοάλυνση των τάσεων στις γωνίες
- ❖ Αντικαθίστατο τοπικά οι τυχόν αστοχίες των μέτρων άμεσης υποστήριξης

Σε ασθενείς σχηματισμούς με μικρό χρόνο αυτοϋποστήριξης και εφόσον δεν πραγματοποιούνταν ή δεν ήταν επιθυμητή από τη Μελέτη η προσωρινή αντιστήριξη του μετώπου στο κέντρο με πυρήνα άσκαφτου πετρώματος, ενισχυόταν το μέτωπο της εκσκαφής κατά την Α' φάση εκσκαφής (οροφή διατομής) πριν την επόμενη προχώρηση, ώστε να αποφευχθεί η κατάρρευσή του. Αντίστοιχα εφαρμόζονταν όπου ήταν απαραίτητο μέθοδοι ενίσχυσης του θόλου και των παρειών της σήραγγας, με κύρια αρχή λειτουργίας της ενίσχυσης υποστήριξης την προϋποστήριξη της εκσκαφής πριν από το μέτωπο.

Η ενίσχυση μετώπου πραγματοποιούνταν με τις εξής μεθόδους:

- ❖ Καλυπτόταν το μέτωπο με μία ή περισσότερες στρώσεις ινοπλισμένου ή μη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
- ❖ Τοποθετούνταν αγκύρια από ίνες υάλου (fiber-glass) με σκοπό την αύξηση της διατμητικής αντοχής του υλικού του μετώπου, μέσω προσαύξησης της συνοχής του. Η ελάχιστη διατμητική αντοχή των εν λόγω αγκυρίων ήταν 250 kN. Τα υλικά από τα οποία αποτελούνταν ικανοποιούσαν τις προδιαγραφές ASTM D 792 και ASTM D 3916.

Η ενίσχυση θόλου και παρειών εκσκαφής πραγματοποιούνταν με τις εξής μεθόδους:

- ❖ Τοποθέτηση χαλύβδινων δοκών προπορείας (Forepoling-Spiling)
Περιλάμβανε τη χρήση μεταλλικών δοκών προπορείας (κοίλοι σιδηροσωλήνες ή χαλύβδινες δοκοί διάφορων διατομών), τοποθετούμενους σε οπές που ανοίγονταν πριν το επόμενο βήμα προχώρησης του μετώπου. Ακολουθούσε πλήρωση με τσιμεντένεμα. Η τελική διάταξη της τοποθετούμενης υποστήριξης ήταν κολουροκωνικής μορφής («ομπρέλα») και είχε ως αποτέλεσμα την ασφαλή προχώρηση του μετώπου εκσκαφής για τα βήματα που εφαρμόζονταν. Η τοποθέτηση της ομπρέλας προπορείας για το επόμενο βήμα εξασφάλιζε την απαραίτητη επικάλυψη με το προηγούμενο βήμα τοποθετούμενων δοκών προπορείας, ώστε οι εργασίες στη σήραγγα εκτελούνταν συνεχώς υπό την προστασία της ομπρέλας προπορείας.
- ❖ Τοποθέτηση εδαφοπασσάλων (Jet-grouting)

Η μέθοδος αυτή εφαρμοζόταν σε ιδιαίτερα χαμηλής μηχανικής αντοχής εδάφη, όπως περιοχές με προϊόντα καταπτώσεων, ασύνδετους εδαφικούς σχηματισμούς, εδάφη με έντονα φαινόμενα ερπυσμού, κ.α. Περιελάμβανε την κατασκευή εδαφοπασσάλων από μείγμα τσιμεντενέματος και εδαφικών υλικών υπό πίεση, με κατάλληλο εξοπλισμό και αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων που καθορίζονταν από το είδος του εδαφικού σχηματισμού και από την απαίτηση της διατήρησης επαφής μεταξύ των γειτονικών. Το αποτέλεσμα των παραπάνω ήταν η δημιουργία κολουροκωνικής επιφάνειας από βελτιωμένο έδαφος («ομπρέλα») περιμετρικά του μετώπου. Η επόμενη «ομπρέλα» τοποθετούνταν με επαρκή επικάλυψη, με αποτέλεσμα οι εργασίες να εκτελούνται μονίμως υπό την ασφάλεια της ομπρέλας των εδαφοπασσάλων.

- ❖ Προενίσχυση πετρώματος με τσιμεντενέσεις – αποστραγγίσεις
Της εν λόγω μεθόδου προηγούνται επί τόπου εκτιμήσεις και εκτελείται με τσιμεντενέσεις σταθεροποίησης και διάτρηση αποστραγγιστικών οπών.

Τα **υποστηρίγματα από μορφοχάλυβα** αποτελούνταν από χαλύβδινα πλαίσια, πλάκες έδρασης, ράβδους αγκύρωσης ποδαρικών πλαισίων, πλάκες σύνδεσης, πλάκες ματίσματος, αυλακωτές χαλύβδινες λαμαρίνες, συνδετήριες δοκούς ή ράβδους και άλλα εγκεκριμένα υλικά και δομικά στοιχεία. Τα εν λόγω υλικά συνοδεύονταν από το σύνολο των απαιτούμενων συνδετήριων εξαρτημάτων, π.χ. κοχλίες, περικόχλια, σφήνες, σύνδεσμοι, συνδετήριες ράβδοι και λοιπά εξαρτήματα συναρμολόγησης, σύνδεσης και τοποθέτησης και σφήνωσης των πλαισίων. Τα πλαίσια στερεώνονταν ασφαλώς και «τακάρωνταν» ανά ίσες αποστάσεις στο εξωράχιό τους σε όλη τη διάρκεια της σκυροδέτησης και των υπόλοιπων εργασιών του εκάστοτε έργου. Η ξυλεία που χρησιμοποιήθηκε στις υπόγειες εκσκαφές αφαιρείτο πριν τη σκυροδέτηση, ενώ παρέμεναν στην αρχική θέση τοποθέτησής τους οι χαλύβδινες αυλακωτές λαμαρίνες. Στο σύνολο των υλικών περιλαμβάνονταν επίσης ξύλινα τεμάχια για την επίτευξη της ορθής στήριξης και επίτευξης πλήρους επαφής των υποστηριγμάτων μορφοχάλυβα με το υποστηριζόμενο σχηματισμό. Ο μορφοχάλυβας σε κάθε περίπτωση πληρούσε τα εγκεκριμένα καθιερωμένα ισοδύναμα Ευρωπαϊκά Πρότυπα και Προδιαγραφές της εκάστοτε χώρας κατασκευής και απαιτούνταν στο σύνολό του να αποτελεί καινούριο υλικό χωρίς οξειδώσεις. Οι δε ράβδοι αγκύρωσης των ποδαρικών των πλαισίων αποτελούσαν ράβδους με νευρώσεις από χάλυβα κατά την Πρότυπη προδιαγραφή ASTM A 615, Grade 60.

Κατά περίπτωση εγκρίθηκε και τοποθετήθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε περιοχές που επρόκειτο να τοποθετηθούν χαλύβδινα πλαίσια. Η χρήση αυτού του είδους υποστηριγμάτων περιοριζόταν στην υποστήριξη εκσκαφών σηράγγων, θαλάμων και των αντίστοιχων συναρμογών και διαπλατυνσεών τους, με τυπικές διατομές και ειδικά τεμάχια στα στόμια, στις συναρμογές και στις διευρύνσεις σηράγγων.

Οι μέγιστες επιτρεπόμενες ανοχές από τις προδιαγεγραμμένες από τη Μελέτη και τα Σχέδια κλίσεις και διαστάσεις είναι της τάξης των 2 cm. Επίσης, σε κάθε περίπτωση τα υποστηρίγματα τοποθετήθηκαν κατά τρόπο που δεν επηρέασαν την αντοχή, την υδατοστεγανότητα ή την τελική επιφάνεια της επένδυσης σκυροδέματος. Επίσης, όπου απαιτήθηκε τοποθετήθηκαν προσωρινές συνδετήριες δοκοί και αφαιρέθηκαν πριν τη σκυροδέτηση της επένδυσης, ενώ οι χαλύβδινες αυλακωτές λαμαρίνες στερεώνονταν στα υποστηρίγματα με βίδες.

Σε κάθε περίπτωση τα εγκεκριμένα μέτρα προστασίας τοποθετούνταν κατά τη διάρκεια της επόμενης βάρδιας από την βάρδια εκτέλεσης της ανατίναξης.

Σε συνδυασμό με τα υποστηρίγματα μορφοχάλυβα χρησιμοποιήθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με σκοπό την ελαχιστοποίηση της χαλάρωσης ή της εξαλλοίωσης βράχου και την αποφυγή καταπτώσεων τεμαχίων. Στο εξωράχιο των πλαισίων απαιτήθηκε κατά περίπτωση δομικό πλέγμα ή συρματόπλεγμα, διάστασης βρόγχων

τουλάχιστον 10 cm. Επίσης οι ξύλινες σανίδες (“πασαβάδια») τοποθετούνταν δικτυωτά στο εξωράχιο των υποστηριγμάτων μορφοχάλυβα.

Τα **αγκύρια βράχου** απαιτήθηκαν και τοποθετήθηκαν σε πρηνή υπόγειων εκσκαφών βράχου, επάνω από τα στόμια των σηράγγων, στις περιοχές έργων εισόδου στις σήραγγες και κατά θέσεις σε υπαίθριες εκσκαφές. Οι οπές διατρήθηκαν και μετά την πλήση τους και την τοποθέτηση των αγκυρίων καλύφθηκαν με απλό σκυρόδεμα ή εκτοξευόμενο ή παρέμειναν ακάλυπτες, ενώ οι οπές αγκυρίων βράχου που χρησιμοποιήθηκαν για την προσωρινή επένδυση πληρώνονταν με τσιμεντένεμα.

Τα εγκεκριμένα αγκύρια βράχου ήταν τυποποιημένα προϊόντα κατασκευαστών εκτός από τα αγκύρια τσιμενταρισμένης πάκτωσης. Οι εκθέσεις που τα συνόδευαν προέρχονταν από πραγματικές εργαστηριακές δοκιμές και αφορούσαν τις μηχανικές ιδιότητες, τις διαστάσεις και τα εξαρτήματα που τα συνόδευαν, καθώς και φυσικές και χημικές αναλύσεις. Κατά μέσο όρο όριζαν το ελάχιστο φορτίο διαρροής των χαλύβδινων αγκυρίων, εκτός από αυτά της τσιμενταρισμένης πάκτωσης, ως 200 kN. Σε κάθε αγκύριο το άκρο εκτός οπής βράχου έφερε κατάλληλο σπείρωμα με εξαγωνικό περικόχλιο βαρέως τύπου στο άκρο του, ροδέλα σκληρού χάλυβα, δύο ή περισσότερες σφηνοειδείς ροδέλες, χαλύβδινη πλάκα έδρασης επίπεδη ή ειδικού σχήματος με οπές ή εγκοπές για τις τσιμεντενέσεις. Αποτελούνταν από χάλυβα και ήταν τύπου διαστελλόμενης κεφαλής, Perfo, εποξειδικής ρητίνης, Swellex, πάκτωσης πληρωμένης από τσιμέντο ή για στερέωση πλέγματος. Ο χάλυβας για το σύνολο των προαναφερόμενων τμημάτων και εξαρτημάτων των αγκυρίων πληρούσε τις προδιαγραφές της Πρότυπης Προδιαγραφής ASTM A 675, Grade 90 και των ισοδύναμων Ευρωπαϊκών Προτύπων.

Τα ενεργητικά αγκύρια βράχου διαστελλόμενης κεφαλής, εποξειδικής ρητίνης ή τσιμενταρισμένης πάκτωσης επαρκούσαν σε φορτίο εργασίας 100 kN με συντελεστή ασφαλείας έναντι ορίου διαρροής 1,50 ή με συντελεστή ασφαλείας έναντι ορίου θραύσεως 1,75.

Τα παθητικά αγκύρια βράχου τύπου Perfo ήταν ονομαστικής διαμέτρου 25 mm και η αντοχή των πακτώσεων επέτρεπε την ανάπτυξη φορτίου ταυτιζόμενου με το όριο διαρροής του υλικού των αγκυρίων. Τα δε αγκύρια στερέωσης του πλέγματος εκτείνονταν σε μήκος 50 cm με σπείρωμα, ήταν μη ενέσιμα αγκύρια, ονομαστικής ορθοτρού 18 mm προσαρμοζόμενα σε οπές διατρημάτων τουλάχιστον 26 mm, πλήρη με διαστελλόμενη κεφαλή, περικόχλιο, ροδέλες και πλάκα έδρασης. Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε στις ράβδους και στα εξαρτήματά του ικανοποιούσε τα οριζόμενα στην Πρότυπη Προδιαγραφή ASTM A 615, Grade 60 και στα ισοδύναμα Ευρωπαϊκά Πρότυπα, ενώ κατά κύριο λόγο αντιστοιχίζονταν σε δομικό χάλυβα S500. Εξαρτήματα όπως περικόχλια και σπειρώματα καλύπτονταν με αντισκωρικό γράσο από την κατασκευή εργοστασίου και πριν την εφαρμογή τους στο έργο καθαρίζονταν επιμελώς. Μεταξύ ροδέλας και περικοχλίου ο σκληρός χάλυβας ήταν απαραίτητο να καθαριστεί και να επαλειφθεί με λιπαντικό γράσο που εξασφάλιζε την απαραίτητη λίπανση κατά τη χρήση τους.

Τα χαλύβδινα αγκύρια διαστελλόμενης κεφαλής φέρουν στο άκρο τους σπείρωμα και διαστελλόμενη κεφαλή από χάλυβα και σφυρηλατημένη εν θερμώ. Οι βάσεις έδρασης της κεφαλής αγκυρίων προδιαγράφηκαν και κατασκευάστηκαν ελάχιστης φέρουσας επιφάνειας 225 cm² για κάθε αγκύριο και ελάχιστου πάχους 7,5 mm. Κατασκευάζονταν από ελατό μορφοχάλυβα διατομής Π, τόσο για τις δοκούς όσο και για τις γωνίες.

Τα αγκύρια Perfo που προαναφέρθηκαν αποτελούνταν από διάτρητο σωλήνα στρογγυλής διατομής κομμένο σε δύο τεμάχια. Εντός του σωλήνα υπήρχε χαλύβδινη ράβδος με νευρώσεις και ο σωλήνας γεμιζόταν με τσιμεντοκονία. Η διάμετρος ράβδου ήταν 25 mm κατά τα οριζόμενα στην Προδιαγραφή ASTM A-675, Grade 90, με κωνική απόληξη στο ένα άκρο της σε μήκος 50 mm και σπείρωμα στο άλλο. Η τσιμεντοκονία ήταν σύστασης τσιμέντου, νερού και πλυμένης άμμου μεγέθους κόκκου 2,5 mm και με αναλογία νερού προς τσιμέντο ένα προς ένα. Τα δύο μισά του

σωλήνα με ελάχιστο ονομαστικό πάχος 1 mm γεμίζονταν με τσιμεντοκονία και δένονταν με σύρμα μέγιστου πάχους 0,5 mm. Ο γεμισμένος σωλήνας τοποθετούνταν στην οπή και στη συνέχεια η ράβδος οπλισμού στο εσωτερικό του σωλήνα με το χέρι ή με χειροπίστολο. Οι διαστάσεις που προδιαγράφηκαν ήταν οι εξής:

- ❖ Διάμετρος ράβδου: 25mm
- ❖ Εσωτερική διάμετρος σωλήνα: 32 mm
- ❖ Διάμετρος οπής: 34- 38 mm

Η πάκτωση ολοκληρωνόταν με εποξειδική ρητίνη αποτελούμενη από δύο συστατικά συσκευασμένα ξεχωριστά (π.χ. τύπου Celkite της Celkite Inc ή ισοδύναμο) ή σε κυλινδρική κάψουλα διπλού τοιχώματος, επαρκούς ικανότητας ανάπτυξης της απαιτούμενης συνάφειας μεταξύ αγκυρίου και βράχου.

Οι ράβδοι των αγκυρίων βράχου τύπου «πάκτωσης τσιμέντου» και τύπου Perfo ήταν ράβδοι με νευρώσεις από χάλυβα κατά την Πρότυπη προδιαγραφή ASTM A615, Grade 60.

Τα αγκύρια βράχου τύπου Swellex θα είναι κατασκευής τύπου ATLAS CORPO ή ισοδύναμης. Αποτελούνταν από χαλύβδινο σωλήνα πάχους 2 mm, ικανό να παραμορφωθεί με πίεση νερού μετά την τοποθέτησή του στην οπή και ενισχυμένο στα άκρα του με κοντούς δακτυλίους μήκους 41 mm σφραγισμένους με συγκόλληση. Τα υψηλής αντοχής ενέσιμα αγκύρια βράχου ήταν τύπου “spin lock” της Εταιρείας Williams Form Engineering corporation”, Grand Rapids, Michigan USA ή ισοδύναμα. Η φέρουσα ικανότητα των εν λόγω αγκυρίων ήταν 180 kN με ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας σε όριο διαρροής 1,50 ή ισοδύναμα με συντελεστή ασφαλείας έναντι ορίου θραύσης 1,75. Οι ελάχιστες διαστάσεις των πλακών έδρασης προδιαγράφηκαν 25*25*2,5 mm.

Τα αγκύρια βράχου δύνανται να χρησιμοποιηθούν για την αγκύρωση επενδύσεων από σκυρόδεμα. Για αυτό το λόγο οι κεφαλές των αγκυρίων διαθέτουν μούφες, ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση γάντζων από ράβδους οπλισμού ως επεκτάσεις της ράβδου του αγκυρίου ή εναλλακτικά γάντζο συγκολλημένο στην κεφαλή, Η εφελκυστική αντοχή και η φέρουσα ικανότητα των γάντζων και των εξαρτημάτων επέκτασης ράβδου οπλισμού (μούφες) ταυτιζόταν με αυτή των ράβδων του αγκυρίου. Στο εργοτάξιο υπήρχε μόνιμα διαθεσιμότητα τουλάχιστον 20 τεμαχίων για προεκτάσεις αγκυρίων βράχου μαζί με όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα, για κατασκευή προέκτασης αγκυρίου 50 cm ανά πάσα στιγμή και όταν απαιτούνταν. Για τα μικρά αγκύρια στερέωσης πλέγματος δεν απαιτούνταν ποτέ προεκτάσεις.

Στις υπόγειες εκσκαφές, η τοποθέτηση των αγκυρίων βράχου ολοκληρωνόταν το πολύ μέσα στη χρονική διάρκεια των 10 ωρών από την ολοκλήρωση ανατίναξη του εκάστοτε βήματος προχώρησης και πριν πυροδοτηθεί η ανατίναξη για το επόμενο βήμα προχώρησης. Η διάμετρος της οπής διατρήματος ικανοποιούσε την ανάγκη βέλτιστης πάκτωσης κατά περίπτωση και τύπο αγκυρίου και όπως καθοριζόταν από τις επί τόπου προκαταρκτικές δοκιμές εξόλκευσης.

Το βάθος του διατρήματος εκτεινόταν 15 cm περισσότερο σε σχέση με το θεωρητικό βάθος αγκύρωσης, ενώ καθαριζόταν σε όλη την έκτασή του από τα προϊόντα της διάτρησης (θραύσματα βράχου και λάσπες) με νερό υπό ελάχιστη πίεση 0,35 MPa.

Κατά την τοποθέτηση και αν δεν επαρκούσε το αγκύριο, υπήρχε η δυνατότητα αύξησης μήκους της οπής διατρήματος και του μήκους του αγκυρίου ή ακόμα και η χρήση τεμαχίων προέκτασης αγκύρωσης.

Πριν την τοποθέτηση των αγκυρίων βράχου με ένεμα, αφαιρούνταν με καθαρισμό οποιαδήποτε λιπαντικά εργοστασιακής κατασκευής από τη ράβδο, τοποθετούνταν οι σωλήνες ενέματος, κεντρωνόταν το αγκύριο εντός της οπής, σφραγιζόταν η οπή κάτω από την πλάκα έδρασης με τσιμεντοκονία ταχείας πήξης και τέλος πραγματοποιούνταν η ορθή τοποθέτηση της πλάκας έδρασης στο κονίαμα και στο βράχο και η στερέωση της με ροδέλες, γωνίες ή σφήνες. Ακολουθούσε η τάνυση του αγκυρίου. Η τοποθέτηση πραγματοποιούνταν με φροντίδα να μην βλαφθεί το σπείρωμα του προεξέχοντος κατά 5 cm άκρου αγκυρίου. Στην προεξοχή του άκρου

τοποθετούνταν η συσκευή δοκιμαστικής τάνυσης ή το συρματόπλεγμα με πρόσθετη πλάκα και περικόχλιο ή το δομικό πλέγμα. Οι σφηνοειδείς ροδέλες μεταξύ πλάκας έδρασης και ροδέλας χάλυβα τοποθετούνταν έτσι ώστε η επιφάνεια έδρασης του περικόχλιου να είναι κάθετη στο αγκύριο.

Τα περικόχλια περιστρέφονταν κατά τη μέτρηση της ροπής στρέψης καθώς γινόταν η περίσφιξη. Η τάνυση με προεπιλεγμένη ροπή στρέψης πραγματοποιούνταν με δυναμόκλειδο πεπιεσμένου αέρα ή μηχανικό δυναμόκλειδο. Εναλλακτικά, η τάνυση εκτελούνταν με υδραυλικό γρύλλο, ενώ σε περίπτωση ανάγκης με την εφεδρική συσκευή τάνυσης που πάντα υπήρχε σε κάθε εργοτάξιο. Αν κάποιο αγκύριο δεν τανυόταν με τη απαιτούμενη ροπή στρέψης επανατοποθετούνταν ή πραγματοποιούνταν η αντικατάστασή του με νέο.

Μετά την πλήρη αρχική τοποθέτηση μετρούνταν και καταγράφονταν οι ροπές στρέψης των αγκυρίων και γινόταν επανατάνυση σε όποια αγκύρια δεν είχαν πληρωθεί με ένεμα. Σε κάθε περίπτωση η τοποθέτησή τους ικανοποιούσε το ελάχιστο όριο γωνίας τοποθέτησης σε σχέση με τις επιφάνειες των ασυνεχειών ή την πιθανή διεύθυνση ολίσθησης ενδεχόμενων σφηνών, που είχε καθοριστεί στις 20°.

Τα ρητινικά αγκύρια τοποθετούνταν από εξειδικευμένο προσωπικό. Κατά την τοποθέτηση των αγκυρίων η χαλύβδινη ράβδος διείσδυε και περιστρεφόταν εντός του γεμισμένου με φυσίγγια ρητίνης διατρήματος, με αποτέλεσμα την διάχυση ρητίνης και την πλήρη επαφή βράχου και ράβδου.

Τα αγκύρια τύπου Swellex τοποθετούνταν με εισπίεση νερού στο κάτω άκρο τους, με πίεση διόγκωσης αγκυρίου ίση με 30 MPa, για το σκληρό βράχο, ενώ μειωνόταν για μαλακό και ψαθυρό βράχο.

Τα αγκύρια βράχου ήταν κατασκευασμένα από δομικό χάλυβα S500, με νευρώσεις. Αυτό το είδος αγκυρίων με πάκτωση από ένεμα («τσιμενταρισμένης πάκτωσης») τοποθετούνταν εντός της οπής και στη συνέχεια το κάτω μέρος πληρωνόταν με ένεμα σε μήκος καθοριζόμενο σε κάθε περίπτωση από δοκιμές εξόλκευσης και πάντα μεγαλύτερο από 1 m. Η εισπίεση του ενέματος γινόταν με αντλία ενέματος ελάχιστης ικανότητας 0,7 MPa. Έπειτα το αγκύριο τανυόταν στο απαιτούμενο φορτίο για συγκεκριμένες ημέρες μετά την προσθήκη ενέματος. Πριν την εισχώρηση του ενέματος στο αγκύριο μετρούνταν το φορτίο σε κάθε αγκύριο με μηχανικό δυναμόκλειδο ή με δυναμόκλειδο πεπιεσμένου αέρα ή υδραυλικό γρύλλο και οι μετρήσεις καταγράφονταν. Αγκύρια που τανυόνταν σε φορτίο μικρότερο από το απαιτούμενο επανατάνυονταν με το απαιτούμενο φορτίο με σύσφιξη περικόχλιου. Οι οπές αγκυρίων στην επιφάνεια του βράχου σφραγίζονταν. Η πλήρωση του αγκυρίου με ένεμα γινόταν αντιληπτή με την επιστροφή του ενέματος μέσα από το σωλήνα εξαέρωσης. Διαρροές ενέματος στο βράχο σφραγίζονταν με υλικό γύψου ή άλλων μέσων.

Το ένεμα αποτελείται από νερό και τσιμέντο σε λόγο νερού προς τσιμέντο 0,4 κατά βάρος και θα αναμειγνύεται σε αναδευτήρα υψηλής ταχύτητας για περισσότερο από 3 min πριν την εισπίεσή του στην οπή. Η πλήρωση των οπών με ένεμα γινόταν εντός διαστήματος 7 ημερών από την ολοκλήρωση της τάνυσης. Αγκύρια μη πληρωμένα με ένεμα παρέμεναν σκόπιμα χωρίς ένεμα μετά την τάνυσή τους ώστε να πραγματοποιούνται περιοδικά σε αυτά οι απαιτούμενοι έλεγχοι φορτίου.

Στα αγκύρια βράχου που χρησιμοποιήθηκαν στα μόνιμα μέτρα υποστήριξης δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην προστασία των κεφαλών τους από διάβρωση. Στις περιπτώσεις που οι κεφαλές τους δεν καλύπτονται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή ενσωματώνονταν σε σκυρόδεμα, αυτές προστατεύονταν με ασφαλτικά υλικά ή τσιμεντοκονίαμα.

Οι δοκιμές που έλαβαν χώρα στα αγκύρια βράχου διακρίνονταν σε προκαταρκτικές (καθορισμός ροπής στρέψης τάνυσης), συστηματικές δοκιμές ποιοτικού ελέγχου, επανατάνυσης και ειδικές δοκιμές. Ο εξοπλισμός των δοκιμών απαρτιζόταν από υδραυλικό γρύλλο και μετρητή, εξαρτήματα προσαρμογής του γρύλλου στο άκρο του αγκυρίου, υδραυλική αντλία, επιμηκυσιόμετρο, λιπαντικά, δυναμόκλειδα, συσκευή βαθμονόμησης για αυτά, κα.

Στις προκαταρκτικές δοκιμές η ροπή στρέψης τοποθέτησης αγκυρίου ήταν η ροπή που όταν εφαρμοζόταν στο αγκύριο προκαλούσε εφελκυστικό φορτίο ίσο με τα 2/3 του φορτίου διαρροής. Στις περιπτώσεις που τα αποτελέσματα των δοκιμών αποδείκνυαν αγκύρια μη ικανοποιητικής φέρουσας ικανότητας, αντικαθίσταντο από άλλα δείγματα αγκυρίων και πακτώσεων και ακολουθούσαν δοκιμές εκ νέου μέχρι να αποδεικνύονταν ως αγκύρια επαρκούς φέρουσας ικανότητας.

Στις συστηματικές δοκιμές ποιοτικού ελέγχου και επαναάνυσης γινόταν έλεγχος των φορτίων των αγκυρίων των υπαίθριων εκσκαφών, για να εντοπιστούν αγκύρια που ενδεχομένως είχαν επηρεαστεί από μεταγενέστερες εκσκαφές και πριν την εισαγωγή σε αυτά του ενέματος. Η μέτρηση της ροπής στρέψης που περιέστρεφε το περικόχλιο με στροφή μέχρι 5° (μοίρες) ήταν το βασικό αποτέλεσμα αυτών των δοκιμών.

Οι προεντεταμένες αγκυρώσεις βράχου εφαρμόστηκαν σε υπαίθριες εκσκαφές, επάνω από τα στόμια σηράγγων, σε άλλες υπόγειες εκσκαφές και όπου απαιτήθηκε από τη Μελέτη των έργων. Αποτελούνταν από τις κατασκευές έδρασης των κεφαλών αγκυρώσεων από οπλισμένο σκυρόδεμα, χαλύβδινες δοκούς ελασμάτων και άλλων χαλύβδινων εξαρτημάτων, καθώς και από σχετικά τμήματα προστασίας διαβρώσεων και ηλεκτρολύσεων, όπως για παράδειγμα διπλά πλαστικά περιβλήματα. Η τελική φέρουσα ικανότητα των προεντεταμένων αγκυρώσεων κυμαινόταν μεταξύ 400 και 600 kN και ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ορίου διαρροής αντιστοιχίστηκε σε 1,66. Τα συρματόσχοινα ήταν αυστηρά συνεχή χωρίς ματίσεις, φθορές, απαλλαγμένα από λιπαντικά και τοπικές οξειδώσεις. Η μεταφορά και φύλαξη στο εργοτάξιο γινόταν με κουλούρες διαμέτρου τουλάχιστον 1,5 m με την κατάλληλη προστασία από φθορές και διαβρωτικούς παράγοντες.

Η χαλύβδινη κεφαλή της αγκύρωσης επέτρεπε την τάνυση τμηματικά ή όλων ταυτόχρονα των ράβδων ή συρματόσχοινων και την απαιτούμενη τσιμεντένεση εντός της οπής. Το στατικό φορτίο αστοχίας της κεφαλής είχε προδιαγραφεί μεγαλύτερο από το άθροισμα των φορτίων θραύσης των συρματόσχοινων, ενώ το άκρο πάκτωσης αποτελείτο από ανθρακούχο χάλυβα. Με παρέμβυσμα διαχωριζόταν η περιοχή τάνυσης από την περιοχή πάκτωσης και αποτρεπόταν η έγχυση ενέματος εκτός της περιοχής πάκτωσης. Το φορτίο αποκόλλησης της πάκτωσης αντιστοιχίζόταν απαραίτητα σε φορτίο μεγαλύτερο ή ίσο με το φορτίο θραύσης του τένοντα. Ο σωλήνας τσιμεντένεσης ήταν από PVC, διάτρητος και καλυμμένος από λάστιχο.

Πριν την εγκατάσταση και χρήση των αγκυρώσεων πραγματοποιούνταν τουλάχιστον τρεις δοκιμές τάνυσης για τον έλεγχο της λειτουργίας τους στους διάφορους τύπους πετρωμάτων που συναντιόνταν στα έργα, οι οποίες και δε χρησιμοποιούνταν στο βασικό έργο. Στις δοκιμές εξεταζόταν η αξονική μετακίνηση της κεφαλής, οι οποιεσδήποτε άλλες μετακινήσεις της κεφαλής και το φορτίο τάνυσης. Οι οπές διατρημάτων για την εγκατάσταση των προεντεταμένων αγκυρώσεων ήταν διαμέτρου μεγαλύτερης από 76 mm και βάθους μεγαλύτερου κατά 50 cm σε σχέση με το απαιτούμενο βάθος αγκύρωσης. Μετά τη διάτρηση οι οπές διατρημάτων καθαρίζονταν με νερό από σκόνες ή υπολείμματα διάτρησης και με πεπιεσμένο αέρα από τα υπολείμματα νερού, σφραγίζονταν στεγανά και πριν την ενεμάτωση επαναλαμβάνονταν ο καθαρισμός τους.

Πριν την τοποθέτηση των προεντεταμένων αγκυρώσεων γίνονταν δοκιμές με πεπιεσμένο νερό και στις περιπτώσεις μεγάλης διαρροής νερού (μεγαλύτερη από 2 lt/min) εκτελούνταν τσιμεντένεση υπό πίεση και επαναλαμβανόμενες δοκιμές παροχέτευσης νερού για έλεγχο της στεγανότητας της οπής που επαναδιατρυόταν. Μόνο και αυστηρά μετά την επίτευξη πλήρους στεγανότητας της οπής, ολοκληρωνόταν η τοποθέτηση της αγκύρωσης με τα κατάλληλα αντιδιαβρωτικά υλικά, ενώ η τάνυση επιτρεπόταν τουλάχιστον 14 ημέρες μετά την τοποθέτηση της αγκύρωσης. Η τάνυση και ο έλεγχος ακολουθούσαν τον κανονισμό DIN 4125 και ισοδύναμα πρότυπα.

Οι ράβδοι αγκύρωσης που τοποθετήθηκαν αντιστοιχίζονταν σε διάμετρο ράβδου 25 mm, ενώ πριν την τοποθέτησή τους οι οπές πληρώνονταν με ένεμα που αντιστοιχούσε σε πυκνό μείγμα νερού και τσιμέντου με αναλογία μικρότερη από 0,5 κατά βάρος και λόγο άμμου με τσιμέντο ίσο με 3 κατά βάρος. Βασικός κανόνας εφαρμογής στην τοποθέτηση των ράβδων αγκύρωσης ήταν η δόνηση μετά την τοποθέτησή τους και η τελική ορθή πλήρωση της οπής με ένεμα.

Μία επιπλέον κατηγορία αγκυρίων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα αυτοδιατρυόμενα αγκύρια βράχου (self drilling) τύπου Wiborex ή IBO-ANKER, κυρίως στα πλέον προβληματικά εδάφη. Το υλικό που είχαν κατασκευαστεί ήταν χάλυβας S500, ελάχιστης εξωτερικής διαμέτρου 30 mm και ελάχιστης εσωτερικής διαμέτρου 11 mm, με εσωτερικό σπείρωμα σε όλο το μήκος τους. Στο άκρο του αγκυρίου ήταν προσαρμοσμένη κοπτική κεφαλή μεγαλύτερης διαμέτρου από αυτή του αγκυρίου, ώστε να διανοίγει διάτρημα ικανής διαμέτρου για να διεισδύσει το αγκύριο. Στο άλλο άκρο έφερε σπείρωμα διαμέτρου 25 mm, ειδική μεταλλική πλάκα και περικόχλιο. Μετά τη διάτρηση της οπής, ολοκληρωνόταν η διείσδυση του ενέματος σε χρόνο μικρότερο από μία ώρα (1 h) από την ολοκλήρωση διαμόρφωσης του διατρήματος.

Σε περιπτώσεις αστάθειας εδαφών σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνταν η τεχνική της τοποθέτησης των μεταλλικών δοκών προπορείας για την υποστήριξη του μετώπου και του άσκαφτου τμήματος της χάραξης σήραγγας. Οι ράβδοι τοποθετούνται σε οπές που ανοίγονταν από διατρητικά μηχανήματα (Jumbo) με τελική επιφάνεια τοποθέτησης κωνοειδούς σχήματος και με τρόπο που να εξασφάλιζε το βέλτιστο μήκος επικάλυψης με το επόμενο βήμα τοποθέτησης δοκών προπορείας. Στις οπές στη συνέχεια σε όλες τις περιπτώσεις εισπιεζόταν ένεμα, εκτός από τις περιπτώσεις έμφραξης των οπών λόγω κατάρρευσης των τοιχωμάτων.

Σε δυσμενέστερες συνθήκες αστάθειας εδαφών χρησιμοποιούνταν δοκοί προπορείας βαρέως τύπου (foreroling). Οι σωλήνες ήταν κοίλοι (tubo) με βαλβίδες εισπίεσης ενέματος εντός των διατρημάτων και ομοίως τοποθετημένοι σε διάταξη κωνοειδούς σχήματος και με γωνία κλίσης 20-50. Μετά την τοποθέτησή τους εισπιεζόταν το ένεμα εντός των διατρημάτων.

Αγκυρώσεις που δεν πληρούσαν τις προδιαγραφές κατά οποιονδήποτε τρόπο αφαιρούνταν και τοποθετούνταν νέες σε κοντινό σημείο με αυτές.

Στα μέτρα υποστήριξης υπόγειων και υπέργειων έργων χρησιμοποιήθηκε και **δομικό πλέγμα ή συρματόπλεγμα** καλυπτόμενο από εκτοξευόμενο ή έγχυτο σκυρόδεμα.

Σε καμία περίπτωση δεν χρησιμοποιήθηκε συρματόπλεγμα με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τη σταθεροποίηση υπαίθριων εκσκαφών. Το συρματόπλεγμα χρησιμοποιήθηκε σε «φρύδια» εκσκαφών με σκοπό την συγκράτηση κατάπτωσης μικρών τεμαχίων βράχου.

Με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε αυστηρά δομικό πλέγμα και σε απόσταση τουλάχιστον 3 cm από την επιφάνεια της βραχώμαζας που υποστηριζόταν.

Τα **χαλύβδινα μορφοελάσματα** όπου χρησιμοποιήθηκαν για την υποστήριξη του βράχου ακολουθούσαν αυστηρά τις προδιαγραφές του Προτύπου GSA G-40.21 GRADE 33G, με ελάχιστο βάρος 3,70 kg/m (2.5 lbs/ft). Η τοποθέτησή τους ακολουθούσαν απαραίτητα από πλάκες, περικόχλια, ροδέλες και ολοκληρωνόταν μετά την πλήρη τοποθέτηση των αγκυρίων βράχου. Ο μορφοχάλυβας των υποστηριγμάτων συμμορφωνόταν με το Πρότυπο Προδιαγραφών ASTM Designation A36, ενώ των υπόλοιπων εξαρτημάτων με την Πρότυπη Προδιαγραφή ASTM 675 GRADE90.

7.10 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

7.10.1 Κοκκομετρία αδρανών και ελάχιστη αντοχή θραύσης

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αποτέλεσε άλλο ένα μέτρο άμεσης και τελικής υποστήριξης των έργων. Αποτελεί το σκυρόδεμα που εφαρμόζεται σε μία επιφάνεια με εκτόξευση από ακροφύσια διαμορφώνοντας μία επιφάνεια υλικού σκυροδέματος επάνω στην επιφάνεια που εκτοξεύεται. Στην εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος συχνά εμφανίζεται το φαινόμενο της αναπήδησης, κατά το οποίο υλικό από αυτό που εκτοξεύεται δεν ενσωματώνεται στο εφαρμοζόμενο υλικό.

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόστηκε σε υπόγειες κατασκευές και πάντα μετά το τέλος της εκσκαφής και της αφαίρεσης των επισφαλών τεμαχίων βράχου («ξεσκάρωμα»).

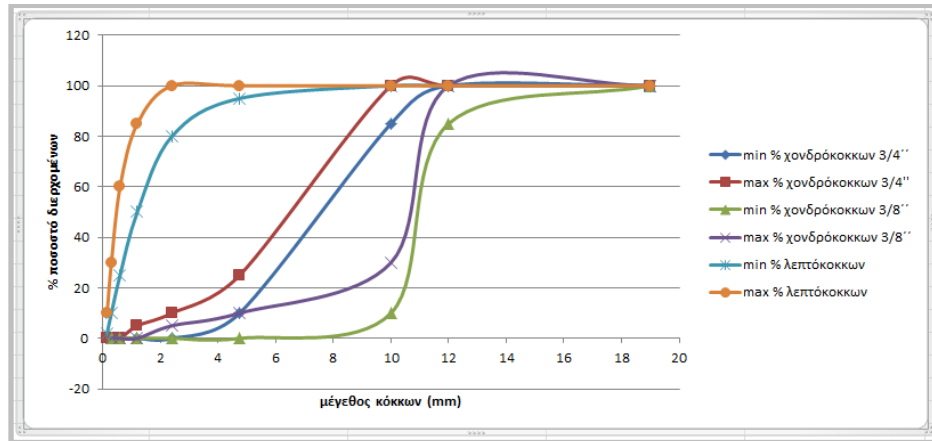
Σχετικά με τη σύσταση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ακολουθήθηκαν συγκεκριμένες προδιαγραφές. Πιο συγκεκριμένα αποτελούνταν από τσιμέντο, λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα αδρανή με ή χωρίς χαλύβδινες ίνες ή ίνες προπυλενίου, νερό και εγκεκριμένα πρόσμικτα. Τα χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα αδρανή ακολουθούσαν την κοκκομετρική διαβάθμιση του παρακάτω πίνακα:

κοκκομετρικές διαβαθμίσεις αδρανών εκτοξευόμενου σκυροδέματος				
Μέγεθος Αμερικάνικου Πρότυπου Κόσκινου, Τετραγωνικής Βρογχίδας		Διερχόμενο % μάζας αδρανών		
		Μόνο λεπτόκοκκα αδρανή	Μέγεθος χονδρόκοκκων αδρανών	
			No 8, έως 3/8"	No 4, έως 3/4"
2"		-	-	100
3/4"	(19 mm)	-	-	100
1/2"	(12 mm)	-	100	90-100
3/8"	(10 mm)	100	85-100	-
No 4	(4,75 mm)	95-100	10.-30	20-55
No 8	(2,4 mm)	80-100	0-10	0-10
No 16	(1,2 mm)	50-85	0-5	0-5
No 30	(600 μm)	25-60	-	-
No 50	(300 μm)	10. - 30	-	-
No 100	(150 μm)	2.-10	-	-

Πίνακας 23: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Τεύχη Τεχνικών Προδιαγραφών ΥΠΕ ΔΕΗ ΑΕ)

Μέγεθος κοσκίνου			Διερχόμενο % μάζας αδρανών					
			ελάχιστο ποσοστό % χονδρόκοκκων αδρανών μεγέθους 3/4"	μέγιστο ποσοστό % χονδρόκοκκων αδρανών μεγέθους 3/4"	ελάχιστο ποσοστό % χονδρόκοκκων αδρανών μεγέθους 3/8"	μέγιστο ποσοστό % χονδρόκοκκων αδρανών μεγέθους 3/8"	ελάχιστο ποσοστό % Λεπτόκοκκα	μέγιστο ποσοστό % Λεπτόκοκκα
6/8(3/4")	19	mm	100	100	100	100	100	100
4/8(1/2")	12	mm	90	100	100	100	100	100
3/8")	10	mm	90	100	85	100	100	100
(No 4)	4,75	mm	20	25	10	30	95	100
(No 8)	2,4	mm	0	10	0	10	80	100
(No 16)	1,2	mm	0	5	0	5	50	85
(No 30)	600	μ (1/1000 mm)	0	0	0	0	25	60
(No 50)	300	μ (1/1000 mm)	0	0	0	0	10	30
(No 100)	150	μ (1/1000 mm)	0	0	0	0	2	10

Πίνακας 24: Διερχόμενο % μάζας αδρανών με βάση την κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών των Τεχνικών Προδιαγραφών



Εικόνα 92: Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης αδρανών εκτοξευόμενου σκυροδέματος τεχνικών Προδιαγραφών ΥΗΕ έργων ΔΕΗ ΑΕ

Η % περιεκτικότητα σε νερό των αδρανών κατά την ενσωμάτωση στο μείγμα είχε οριστεί να είναι κάθε φορά μικρότερη από 5% του βάρους ξηραμένου σε φούρνο των αδρανών. Ο αέρας που χρησιμοποιούνταν για την εκτόξευση ήταν σταθερά καθαρός και απαλλαγμένος από έλαια. Το ταχυπηκτικό πρόσμικτο που χρησιμοποιούνταν ήταν το Sigunit της Sika ή ισοδύναμο εγκεκριμένο, το οποίο σε κάθε περίπτωση πληρούσε τις απαιτήσεις των Προδιαγραφών ASTM C-494. Απαγορευόταν σε οποιαδήποτε περίπτωση η χρήση πυριτικών (silicate) πρόσμικτων (τύπου υδρυάλου, κτλ).

Η κατηγορία του σκυροδέματος που χρησιμοποιούνταν καθοριζόταν ανάλογα με τον τύπο και τις ανάγκες του εκάστοτε έργου. Στα υπόγεια έργα και κυρίως στις σήραγγες χρησιμοποιήθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατηγορίας 2, μόνο με λεπτόκοκκα αδρανή και πολύ σπάνια κατά περίπτωση σκυρόδεμα κατηγορίας 3. Ομοίως και στα πρηνή υπέργειων εκσκαφών. Σε περίπτωση εφαρμογής κατηγορίας σκυροδέματος κατηγορίας 3 με πάχος στρώσης μεγαλύτερου των 2,5 cm σε κατακόρυφες ή υπερκείμενες επιφάνειες το σκυρόδεμα εφαρμοζόταν σε 2 ή περισσότερες στρώσεις με μέγιστο πάχος στρώσεις 2 cm. Σε περίπτωση εφαρμογής κατηγορίας σκυροδέματος κατηγορίας 1 και 2, το μέγιστο πάχος κάθε στρώσης ήταν 5 cm. Για επίπεδες ή ελαφρά κεκλιμένες επιφάνειες, το μέγιστο πάχος κάθε στρώσης ήταν 9 cm.

Οι αναλογίες τσιμέντου αδρανών και πρόσμικτου στο μείγμα κάθε κατηγορίας ικανοποιούσαν τον Κανονισμό ACI 214, ώστε να επιτυγχάνονται οι παρακάτω αντοχές σε θραύση:

Ελάχιστη αντοχή θραύσης μη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος (MPa)			
Κατηγορία εκτοξευόμενου σκυροδέματος	Μέγεθος χονδρόκοκκων αδρανών	Ελάχιστη αντοχή	
		8 ώρες	28 ημέρες
1	3/4 ίντσας - No 4	4	28,5
2	3/8 ίντσας - No 8 και λεπτόκοκκο αδρανές	4	28,5
3	μόνο λεπτόκοκκο αδρανές	4	28,5

Πίνακας 25: Ελάχιστη αντοχή θραύσης ανά κατηγορία εκτοξευόμενου σκυροδέματος (MPa) για το σύνολο των ΥΗΕ έργων

Σε κάποια έργα εφαρμόστηκαν οι κάτωθι προδιαγραφές ως προς την ελάχιστη αντοχή θραύσης (ΥΗΕ Μετσοβίτικου, ΥΗΕ Ιλαρίωνα):

Ελάχιστη αντοχή θραύσης μη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος (MPa)				
Κατηγορία εκτοξευόμενου σκυροδέματος	Μέγεθος χονδροκόκκων αδρανών	Ελάχιστη αντοχή θραύσης		
		8 ώρες	3 ημέρες	28 ημέρες
1	3/4 ίντσας - Νο 4	6	20	30
2	3/8 ίντσας - Νο 8 και λεπτόκοκκο αδρανές	6	20	30
3	μόνο λεπτόκοκκο αδρανές	6	20	30

Πίνακας 26: Ελάχιστη αντοχή θραύσης ανά κατηγορία εκτοξευόμενου σκυροδέματος (MPa), για τα ΥΗΕ Μεσοβίτικου και Ιλαρίωνα

Γενικά στην κατασκευή των έργων χρησιμοποιήθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με κοκκομετρική σύνθεση κατηγορίας 2 ή 3, σύμφωνα και με τα αναγραφόμενα στα Σχέδια. Σε ορισμένες περιπτώσεις και ύστερα από έγκριση του Μηχανικού ήταν δυνατόν να απαιτηθεί η χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος με κοκκομετρική σύνθεση Κατηγορίας 1.

Μείγματα εκτοξευόμενου σκυροδέματος δεν χρησιμοποιούνταν στα έργα παρά μόνο αφού εγκρίνονταν από το Μηχανικό. Οι αναλογίες των μιγμάτων τροποποιούνταν, σύμφωνα με τις οδηγίες του Μηχανικού, για να περιορισθεί στο ελάχιστο η αναπήδηση.

Ο λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T) εκτοξευόμενου σκυροδέματος επί τόπου κυμαινόταν 0,32 έως 0,45. Η αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στις 8 ώρες στα 4 MPa αποτέλεσε τη βασική ιδιότητα του υλικού στην άμεση υποστήριξη των υπόγειων εκσκαφών, η οποία επιτυγχανόταν με προσθήκη επιταχυντικού πρόσμικτου.

7.10.2 Δοκιμές ποιοτικού ελέγχου εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Οι δοκιμές και οι έλεγχοι πραγματοποιούνταν με τη λήψη τουλάχιστον 3 φατνωμάτων για κάθε κατηγορία εκτοξευόμενου σκυροδέματος τουλάχιστον 30 ημέρες πριν αρχίσει η εφαρμογή του κατά οποιονδήποτε τρόπο και σε οποιοδήποτε έργο, πριν προστεθεί οποιοδήποτε πρόσμικτο στο μείγμα, πριν χρησιμοποιηθεί για οποιονδήποτε λόγο νέος εξοπλισμός εφαρμογής και σε οποιαδήποτε περίπτωση η Διευθύνουσα Υπηρεσία των έργων όριζε την παρασκευή μείγματος που δεν ανταποκρινόταν στις κατά γενικό κανόνα εφαρμοζόμενες προδιαγραφές.

Ο τυπικός ποιοτικός έλεγχος, ο προσδιορισμός καταλληλότητας των πρόσμικτων και η έγκριση μελέτης σύνθεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ορίστηκε να διενεργείται με τη λήψη 3 φατνωμάτων ανά 100 m³ όγκου υλικού, ενός από εκτόξευση προς τα κάτω σε οριζόντια επιφάνεια, ενός από εκτόξευση σε κεκλιμένη ή κατακόρυφη επιφάνεια και ενός από εκτόξευση σε οριζόντια επιφάνεια προς τα επάνω.

Η παρασκευή των φατνωμάτων πραγματοποιούνταν σε τετράγωνο ξύλινο πλαίσιο από κόντρα πλακέ πάχους 2 cm, διαστάσεων 1,0 m x 1,0 m x 0,1 (βάθος) σε άκαμπτη βάση, στερεωμένο με ασφάλεια σε επιφάνεια βράχου, όμοια με αυτή που θα εφαρμοζόταν στο έργο το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή σε οποιαδήποτε άλλη εγκεκριμένη επιφάνεια. Το ξύλινο πλαίσιο πάχους τουλάχιστον 10 cm διαβρεχόταν και διαστρωνόταν με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε όλη την περιοχή που περιβαλλόταν από αυτό με τον ίδιο εξοπλισμό διάστρωσης και ανάμειξης που είχε οριστεί να χρησιμοποιηθεί στα έργα. Στη συνέχεια, όλα τα φατνώματα αφήνονταν αδιατάρακτα στη θέση διάστρωσης μέχρι την τελική πήξη του υλικού και κατόπιν μεταφέρονταν στο εργαστήριο του εργοταξίου, ώστε να παραμένουν προστατευμένα από οποιαδήποτε φθορά.

Άλλη μία μορφή εργαστηριακών δοκιμών αποτέλεσε και ο προσδιορισμός αντοχής θραύσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Ο συγκεκριμένος έλεγχος και οι σχετικές μετρήσεις πραγματοποιούνταν σε δοκίμια πυρήνων διαμέτρου 10 cm που αφαιρούνταν με κοπή από τα σκυροδετημένα φαντώματα λίγο πριν την εκτέλεση της κάθε δοκιμής. Συγκεκριμένα, από κάθε φάντωμα αφαιρούνταν μέχρι 4 πυρήνες (δοκίμια) διαμέτρου 10 cm, κάθετα προς το επίπεδο του φαντώματος, περίπου 48 ώρες μετά την εκτόξευση του σκυροδέματος. Κατά τη λήψη των δοκιμίων απαγορευόταν η παράλληλη κοπή ράβδων οπλισμού αν υπήρχε και η λήψη δοκιμίων σε αποστάσεις μικρότερες από 10 cm από τα άκρα του φαντώματος. Μετά τη λήψη των δοκιμίων, υπήρχε ιδιαίτερη μέριμνα για την προστασία των ακμών και των άκρων τους, ενώ αποθηκεύονταν κατάλληλα. Οι δοκιμές που εκτελούνταν ακολουθούσαν αυστηρά τις Προδιαγραφές κατά ASTM C – 192 και κατά κύρια λόγο ικανοποιούσαν τα παρακάτω:

- ❖ Θραύση δοκιμίων σύμφωνα με τα εξής:
 - 3 δοκίμια στις 8 ώρες
 - 1 δοκίμια στις 3 ημέρες (3 δοκίμια στις 3 ημέρες για το ΥΗΕ Μετσοβίτικου και για το ΥΗΕ Ιλαρίωνα)
 - 2 δοκίμια στις 7 ημέρες (3 δοκίμια στις 7 ημέρες για το ΥΗΕ Μετσοβίτικου και για το ΥΗΕ Ιλαρίωνα)
 - 3 δοκίμια στις 28 ημέρες
- ❖ Σε περίπτωση που εντοπιζόνταν οπές στα ληφθέντα δοκίμια αυτές πληρώνονταν χειρονακτικά με κατάλληλα υλικά παρόμοιας συνθέσεως με αυτή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
- ❖ Όπου απαιτήθηκε λήφθηκαν από ήδη διαστρωμένο εκτοξευόμενο σκυροδέμα 2 σειρές δοκιμίων διαμέτρου 10 cm σε συγκεκριμένες θέσεις που υποδεικνύονταν ανά έργο από τη Διευθύνουσα Υπηρεσία και θραύονταν στις 28 ημέρες, όπως και τα δοκίμια που λαμβάνονταν από τα φαντώματα.
- ❖ Η αντοχή σε θραύση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος θεωρούνταν ικανοποιητική αν ίσχυαν ταυτόχρονα:
 - Αποτελέσματα μικρότερης αντοχής σε θραύση από την οριζόμενη γίνονταν αποδεκτά μόνο εάν παρατηρούνταν σε μία (1) από τις πέντε (5) το πολύ δοκιμές και με συντελεστή διακύμανσης 15% σε δοκιμές για Έγκριση Μελέτης Σύνθεσης Σκυροδέματος και 20% για δοκιμές Ποιοτικού Ελέγχου.
 - Για κάθε σειρά έξι (6) διαδοχικών δοκιμών η συχνότητα εμφάνισης μέσου όρου αντοχής σε θραύση με τιμή μικρότερη από την απαιτούμενη κατά τις Προδιαγραφές δεν έπρεπε να υπερβαίνει το 1%.
- ❖ Σε περίπτωση που αποδεικνυόταν από τις δοκιμές ποιότητα υλικού κατώτερη από την προδιαγραφόμενη διακοπτόταν η εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος με την ελεγμένη σύνθεση, καθαιρούνταν κάθε διάστρωση και πραγματοποιούνταν εκ νέου εφαρμογή με νέα σύνθεση υλικού. Στη συνέχεια εκτελούνταν εκ νέου δοκιμές κατά τις προδιαγραφές αφού λαμβάνονταν όμοια με τα προαναφερόμενα δοκίμια από το υλικό της νέας σύνθεσης.

Εκτός από τις δοκιμές ποιοτικού ελέγχου που περιγράφονται παραπάνω το εκτοξευόμενο σκυροδέμα με χαλύβδινες ίνες υποβαλλόταν και σε επιπλέον δοκιμές που παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Έλεγχος-Δοκιμή	Αποτελέσματα	Παρατηρήσεις
Δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό από κάμψη		ASTM C78-75
Δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό από κάμψη	καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης	ASTM 1018-85 (Flexural Toughness Index and First - Crack Strength of Third Point Loading)-Δείκτης αντοχής σε παραμόρφωση (toughness index)
Λήψη αντιπροσωπευτικών πυρήνων κατά τις οδηγίες του Μηχανικού	ομοιομορφία κατανομής ινών	
Συχνότητα δοκιμών		καθορίζεται από το Μηχανικό
Έλεγχος ομοιογένειας εκτοξευόμενου σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες		καθορίζεται από το Μηχανικό
Συχνότητα δοκιμών εκτοξευόμενου σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες		καθορίζεται από το Μηχανικό

Πίνακας 27: Δοκιμές ποιοτικού ελέγχου ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος

7.10.3 Εξοπλισμός εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν πλήρως καταγεγραμμένος σε κάθε εργοτάξιο και εγκεκριμένος πριν από κάθε είδους χρήση για την εφαρμογή του υλικού. Διατηρούνταν καθαρός και σε καλή κατάσταση λειτουργίας σε όλη τη διάρκεια κατασκευής των έργων. Τα μηχανήματα ήταν επαρκούς δυναμικότητας ώστε να περιοριστεί στο ελάχιστο η πιθανότητα καθυστερήσεων εκσκαφών και λοιπών εργασιών λόγω επέκτασης του χρόνου εργασιών της εκτόξευσης του σκυροδέματος. Ο κάθε φορά χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός επέτρεπε την ικανοποιητική ανάμειξη του ταχυπηκτικού πρόσμικτου λίγο πριν την εκτόξευση. Επίσης, εξασφαλιζόταν διαρκώς ο εφοδιασμός των μηχανημάτων με επαρκή ποσότητα αέρα και νερού και κατά τρόπο που οριζόταν από τον κατασκευαστή του εξοπλισμού, οπότε και ελεγχόταν διαρκώς για τις ενδεχόμενες απαραίτητες ρυθμίσεις και επιδιορθώσεις. Στις υπόγειες εκσκαφές χρησιμοποιούνταν εξοπλισμός υγρής ανάμειξης (wet mix), ενώ εξοπλισμός ξηρής ανάμειξης (dry mix) χρησιμοποιούνταν σε υπαίθριες εκσκαφές ή κατά περίπτωση σε υπόγειες και μόνο μετά από έγκριση. Η επάρκεια του εξοπλισμού στα μέτωπα εργασίας εξασφαλιζόταν τόσο από τον Κύριο του Έργου όσο και από τον Ανάδοχο.

7.10.4 Εξειδίκευση χειριστών εξοπλισμού εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Οι χειριστές των ακροφυσίων του εξοπλισμού εκτόξευσης υλικού ήταν έμπειροι χειριστές στην εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος με χονδρόκοκκα αδρανή ή εργάζονταν υπό την επίβλεψη αποδεδειγμένα έμπειρου στο αντικείμενο εργοδηγού ή εκπαιδευτή. Κάθε ομάδα εργασίας είχε αποδεδειγμένη και αποδεκτή από τη Διευθύνουσα Υπηρεσία του έργου εμπειρία σε κατακόρυφα φατνώματα δοκιμών πριν την έναρξη των εργασιών.

Το αποδεκτό εκτοξευμένο σκυρόδεμα αντιστοιχιζόταν σε πυκνό και ομοιόμορφο σκυρόδεμα χωρίς εμφανή και ογκώδη εγκλείσματα από υλικό αναπήδησης και χωρίς σημεία αδυναμίας πρόσφυσης μεταξύ των στρώσεων. Για αυτό το λόγο και οι χειριστές των ακροφυσίων υποχρεούνταν να εκτοξεύουν το υλικό με ομοιομορφία και με το μέγιστο δυνατό ποσοστό υγρασίας που διασφάλιζε τη μη αποκόλληση της στρώσης του υλικού από το βράχο που εφαρμοζόταν ή από την ήδη εφαρμοσμένη στρώση του εκτοξευμένου σκυροδέματος. Επίσης, είχαν εκπαιδευτεί για την

εφαρμογή του υλικού με τη διατήρηση του ακροφυσίου σε κάθετη προς την επιφάνεια εφαρμογής θέση και σε απόσταση που κυμαινόταν μεταξύ 0,5 m και 1,5 m (για το ΥΗΕ της Συκιάς) και μεταξύ 1,0 m και 1,5 m (για το ΥΗΕ της Μεσοχώρας-συναντάται και το ελάχιστο όριο των 0,60 m σε επί μέρους υποέργα). Έτσι επιτυγχανόταν η μέγιστη επιθυμητή συμπίκνωση και ομοιομορφία του υλικού. Διαφορετικές ελάχιστες και μέγιστες αποστάσεις του ακροφυσίου από την επιφάνεια εφαρμογής υλικού λάμβαναν χώρα μόνο κατόπιν απαίτησης από τα αποτελέσματα σχετικών δοκιμών ή ανάλογων κατευθύνσεων της κατασκευάστριας εταιρείας του εξοπλισμού.

Σε κάθε περίπτωση ο χειρισμός του εξοπλισμού γινόταν με τρόπο που εξασφάλιζε ότι στην περαιωμένη εργασία δεν θα υπάρχουν εγκλείσματα από υλικά αναπήδησης ή συσσωματώματα αδρανών. Σε περίπτωση που παρατηρούνταν τέτοια σημεία στην επιφάνεια διάστρωσης, αυτά απομακρύνονταν άμεσα και καθολικά.

7.10.5 Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε συνθήκες ψυχρού καιρού

Η ελάχιστη θερμοκρασία αέρα για να είναι επιτρεπτή η εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ήταν μηδέν βαθμοί Κελσίου (0° C). Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες λαμβάνονταν όλα τα απαραίτητα προστατευτικά μέτρα για τη διατήρηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 0° C, για διάστημα τουλάχιστον πέντε (05) ημερών από την ημέρα εφαρμογής του.

7.10.6 Προετοιμασία εφαρμογής επιφάνειας εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Η εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πραγματοποιούνταν σε επιφάνειες που προέκυψαν από εκσκαφή με διάνοιξη ή ανατίναξη και αφού ολοκληρωνόταν η απομάκρυνση επισφαλών όγκων βράχου («ξεσκάρωμα») και η απομάκρυνση αργιλικών και κατακερματισμένων υλικών σε υφιστάμενες της διάστρωσης διακλάσεις και διαμορφωμένα ρήγματα. Οι αποκαλυπτόμενες επιφάνειες μετά την αφαίρεση αυτών των υλικών καθαρίζονταν με πεπιεσμένο αέρα και νερό ή με άλλα μέσα τα οποία εξασφάλιζαν την πλήρη απομάκρυνση σκόνης, λάσπης, μπάζων, ελαίων, αποκολλημένων τεμαχίων, υλικών αναπήδησης ή χαλαρού βράχου και οποιονδήποτε άλλων επιβλαβών υλικών.

Στα σημεία που η επιφάνεια διάστρωσης εμφάνιζε συνεχείς διαρροές υδάτων και δεν υπήρχε η δυνατότητα πλήρους έμφραξης τους με εκτοξευόμενο σκυροδέμα, πραγματοποιούνταν έμφραξη της φλέβας με άλλης σύστασης υλικά ή η εκτροπή τους με σωλήνες, συλλεκτήρες και οποιαδήποτε άλλα μέσα απέτρεπαν τη διάβρωση, την επιρροή λόγω διήθησης των υδάτων στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα ή τη δυσμενή δράση του νερού στο υλικό λόγω υδροστατικών πιέσεων.

Στην περίπτωση που επρόκειτο για εκτόξευση σκυροδέματος επί υφιστάμενης στρώσης, εξασφαλιζόταν οπωσδήποτε η ολοκλήρωση της αρχικής πήξης της προηγούμενης στρώσης, η αφαίρεση όλων των επιφανειακών εκχύσεων και τοπικών σημειακών εκροών υλικού, των χαλαρών τεμαχίων και ακαθαρσιών, των επιβλαβών στοιχείων και των υλικών αναπήδησης πριν την έναρξη των νέων εργασιών εφαρμογής. Οι εν λόγω εργασίες πραγματοποιούνταν με σάρωθρα και με πλύσιμο των επιφανειών με νερό υπό πίεση.

Αν κρινόταν απαραίτητο, πριν την προετοιμασία επιφανειών πραγματοποιούνταν πλήρωση των επί μέρους κενών τοπικά με εκτοξευόμενο σκυροδέμα.

7.10.7 Ανάμειξη και εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Τα συστατικά του μείγματος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ζυγίζονταν με ακρίβεια πριν από την ανάμειξη με τα αδρανή σε πλήρη ανάμειξη πριν την προσθήκη του νερού και πριν την εναπόθεσή τους στον εξοπλισμό διάστρωσης του υλικού. Ομοίως και τα ταχυπηκτικά πρόσμικτα. Το τσιμέντο προστίθετο μέσα στο διάστημα μίας (01) ώρας πριν την διάστρωση, ενώ μίγματα, στα οποία το τσιμέντο είχε προστεθεί πολύ πριν, απορρίπτονταν και σε καμία περίπτωση δεν εφαρμόζονταν στην κατασκευή.

Ο χρόνος εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σχετικά με τους κύκλους προχώρησης υπόγειων εκσκαφών ήταν σε πλήρη εξάρτηση με τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας που η κατασκευή συναντούσε κατά την προχώρηση της εκσκαφής. Επίσης, απαγορευόταν η εφαρμογή του σε αντίξοες καιρικές συνθήκες, εκτός και αν είχε ληφθεί μέριμνα για την κάλυψη και προστασία της περιοχής εφαρμογής του υλικού.

Οποιοσδήποτε απαιτούμενος τοποθετημένος οπλισμός καλυπτόταν εξολοκλήρου από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ελάχιστο πάχος επικάλυψης 15 mm από ξυλότυπο ή σκυρόδεμα και συνολικά 25 mm από την τελική επιφάνεια του σκυροδέματος και χωρίς κενά πίσω από τις ράβδους οπλισμού.

Η εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πραγματοποιούνταν κατά τρόπο που να επιτυγχανόταν σταθερά:

- ❖ Η ελάχιστη δυνατή αναπήδηση.
- ❖ Η μέγιστη αναπήδηση είχε οριστεί στο 15% κατά όγκο εφαρμοζόμενου υλικού στις υπαίθριες κατασκευές και στο 25% στις περιοχές υπόγειων εκσκαφών.
- ❖ Η αποφυγή εγκλεισμάτων από υλικά αναπήδησης στην τελική επιφάνεια αλλά και σε κάθε στρώση του υλικού μετά την περαίωση των εργασιών
- ❖ Η ομαλή τελική επιφάνεια
- ❖ Η αποφυγή κοιλοτήτων
- ❖ Η ελαχιστοποίηση ρωγμάτων λόγω συστολής πήξης
- ❖ Η ορθή και ολοκληρωμένη πρόσφυση του υλικού στο βράχο ή σε όποια άλλη επιφάνεια εφαρμόζεται
- ❖ Η μέγιστη δυνατή αντίσταση του υλικού στη φθορά από παγετό και αντίξοες καιρικές συνθήκες

Για να επιτευχθούν όλα τα παραπάνω σε κάποιες περιπτώσεις λάμβαναν χώρα μικρές τροποποιήσεις των μειγμάτων, αποδεκτές διαμορφώσεις των επιφανειών εκτόξευσης και εφαρμογής, προσαρμογές του πάχους στρώσεων και των ποσοτήτων που εκτοξεύονταν από το ακροφύσιο ανά μονάδα επιφάνειας βράχου.

Κατά την εκτόξευση η ροή από το ακροφύσιο παρέμενε σταθερά συνεχής και ομοιόμορφη, όπως και ο ρυθμός εφαρμογής του σε οποιαδήποτε επιφάνεια. Τυχόν προεξοχές, φωλιές άμμου, περιοχές με αυξημένη υγρασία αφαιρούνταν και αποκαθίσταντο.

Το πάχος της στρώσης του σκυροδέματος μετά την εφαρμογή μετρούνταν με διεύθυνση ράβδου ή με εμπηγνυόμενα καρφιά στην επιφάνεια εφαρμογής του υλικού, των οποίων το μήκος ήταν γνωστό από πριν. Άλλο τρόπο μέτρησης αποτελούσε η λήψη δοκιμίων, η χρήση ηλεκτρονικών καταγραφικών μηχανημάτων πριν και μετά τη διάστρωση, η λήψη πυρήνων βάσει κανάβου, κ.α.

Η εφαρμογή πραγματοποιούνταν με στρώσεις υλικού για την δημιουργία των οποίων το ακροφύσιο ακολουθούσε διαφορετικές διαδρομές επάνω από την επιφάνεια διάστρωσης, αλλά πάντα με συνεχή ενιαίο τρόπο και στην απαιτούμενη απόσταση από την επιφάνεια εργασίας (0,5 m-1,5 m ή 1,0 m-1,5 m κατά τα οριζόμενα στις Τεχνικές Προδιαγραφές έκαστου έργου). Σε περίπτωση ασυνεχούς ροής από το ακροφύσιο, αυτό απομακρυνόταν μέχρις ότου η ροή να επανέλθει σε συνεχή. Η ορθή εφαρμογή του υλικού απαιτούσε να κρατείται το ακροφύσιο κάθετα στην επιφάνεια εφαρμογής, ενώ στην περίπτωση εφαρμογής επάνω σε πλέγμα το

ακροφύσιο κρατούνταν σε πιο μικρή απόσταση και υπό μικρή γωνία για να διεισδύει ευκολότερα το υλικό, να ενσωματώνεται στο πλέγμα και να αποφεύγεται όσο το δυνατόν το φαινόμενο της αναπήδησης.

Για τις κατηγορίες 1 και 2 του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, το μέγιστο πάχος κάθε μεμονωμένης στρώσης αντιστοιχίζόταν σε 80 mm, ενώ για επίπεδες ή κεκλιμένες επιφάνειες αντιστοιχίζόταν στα 90 mm. Σε πάχος στρώσης μεγαλύτερο από 80 mm το δομικό πλέγμα τοποθετούνταν στο μέσον της στρώσης και αγκυρωνόταν στην προηγούμενη εφαρμοσμένη στρώση με αγκύρια στερέωσης.

Το δομικό πλέγμα ικανοποιούσε απαραίτητα τις απαιτήσεις της Προδιαγραφής ASTM A-185 "Welded Steel Fabrics for Concrete Reinforcement" και των εκάστοτε Σχεδίων του έργου. Τα αγκύρια στερέωσης του δομικού πλέγματος ήταν μη ενέσιμα αγκύρια, μήκους 50 cm, ονομαστικής διαμέτρου 18 mm, πλήρη, με μηχανισμό πάκτωσης, περικόχλια, ροδέλες, πλάκες έδρασης, ελάχιστο πάχος 5 mm και ελάχιστη επιφάνεια στήριξης 150 cm². Σε όλα τα χαρακτηριστικά τους ικανοποιούσαν την Προδιαγραφή ASTM Designation A - 615 GRADE 60. Τοποθετούνταν ανάμεσα στα αγκύρια βράχου με αποτέλεσμα τη στερέωση του δομικού πλέγματος ανά 1,00 ή 1,5 μέτρο. Το δομικό πλέγμα στερεωνόταν και στα αγκύρια βράχου σε κάποια σημεία μετά την ενεμάτωση με επιπλέον ροδέλες, περικόχλια και πλάκες. Στα ματίσματα του πλέγματος είχε προβλεφθεί αλληλοεπικάλυψη τουλάχιστον 10 cm, ενώ οι αρμοί συστολής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατασκευάζονταν κάθε 20 m. Όπου απαιτείτο δομικό πλέγμα, η τοποθέτηση γινόταν σε ελάχιστη απόσταση τρία εκατοστά (3 cm) από την επιφάνεια της βραχομάζας. Για το λόγο αυτό εφαρμοζόταν κατ' αρχήν στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος μέσου πάχους τριών εκατοστών (3 cm), κατ' ευθείαν στην επιφάνεια της βραχομάζας. Το δε συρματόπλεγμα ικανοποιούσε την Προδιαγραφή ASTM A-392 "Zinc-coated, Steel, Chain-Link Fence Fabric", αποτελούνταν από πλέγμα βρόγχου 5 cm και σύρμα πάχους No9, US Standard Gage. Δεν χρησιμοποιούνταν συρματόπλεγμα σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τη σταθεροποίηση των υπαίθριων εκσκαφών, ενώ τοποθετούνταν για την προστασία από μικροκαταπτώσεις μικρών τεμαχίων βράχου.

Όπου απαιτούνταν στην κατασκευή πολύ μεγαλύτερο πάχος τελικής στρώσης από τα 8 cm, αυτό επιτυγχανόταν με αλλητάλληλες στρώσεις υλικού πάχους μικρότερου ή ίσου με 8 cm (ή 10 cm) η καθεμία. Η κάθε επόμενη στρώση διαστρωνόταν αφού η προηγούμενη είχε σκληρυνθεί πλήρως.

Σε επιφάνειες κατακόρυφες ή με μεγάλη κλίση (εκτός από τους θόλους των υπογείων έργων) η εκτόξευση πραγματοποιούνταν από κάτω προς τα επάνω σε οριζόντιες στρώσεις μέχρι να καλυφθεί η επιθυμητή επιφάνεια εφαρμογής. Στα άκρα των περιοχών εφαρμογής, όπου δεν ήταν δυνατόν να εφαρμοστεί περισσότερο υλικό, διαμορφώνονταν γραμμές με κλίση 45° ως προς τις παρακείμενες επιφάνειες.

Στα σημεία αποστραγγιστικών οπών και τοποθέτησης μετρητικών οργάνων είχαν ληφθεί όλα τα μέτρα προστασίας του εξοπλισμού από φθορές, για την αποφυγή έμφραξης των αποστραγγιστικών οπών από φερτά υλικά. Η διάνοιξη των ανακουφιστικών οπών πραγματοποιούνταν σε κάναβο 2,00 m * 2,00 m, με χρήση κρουστικού ή περιστροφικού εξοπλισμού, με ελάχιστη διάμετρο 50 mm για τις υπόγειες εκσκαφές και 76 mm για τις υπέργειες και βάθος οπής εντός του βραχώδους σχηματισμού τουλάχιστον 10 cm.

Επίσης πριν την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος λαμβάνονταν όλα τα μέτρα προστασίας των παρακείμενων κατασκευών.

Όσον αφορά τις διαρροές υδάτων από παρακείμενους στην επιφάνεια εφαρμογής αρμούς είχαν εγκατασταθεί σωλήνες διαφυγής υδάτων και είχε ολοκληρωθεί η σφράγιση των αρμών πριν την έναρξη των εργασιών εκτόξευσης. Τυχόν υγρές κηλίδες σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που είχε ήδη ολοκληρωθεί η σκλήρυνσή του αντιμετωπιζόταν με διάτρηση οπών μικρού βάθους για εκτόνωση των υδατικών πιέσεων στο εσωτερικό του υλικού.

Μετά την τελική εφαρμογή και πήξη του υλικού η ομάδα εργασιών προχωρούσε σε έλεγχο της επιφάνειας εφαρμογής. Σε περίπτωση περιοχών κακής συμπίκνωσης, έλλειψης συνάφειας, ξηρών περιοχών (απόμειξης), κενών, θυλάκων άμμου, διογκώσεων ή ανεπαρκούς αντοχής σε θλίψη πραγματοποιούνταν καθαίρεση του σαθρού υλικού και εκ νέου εκτόξευση σε επιφάνειες με διαστάσεις τουλάχιστον 30 cm x 30 cm.

Σε ανοικτές εκσκαφές, εφαρμοζόταν εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μόνο εφόσον είχαν ολοκληρωθεί οι ανατινάξεις σε απόσταση τουλάχιστον 30 m από την επικείμενη επιφάνεια εφαρμογής του υλικού.

Τα υλικά της αναπήδησης αφαιρούνταν πριν οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή σε παρακείμενη επιφάνεια και δεν επαναχρησιμοποιούνταν σε καμία περίπτωση. Επίσης, υπήρχε ειδική μέριμνα απομάκρυνσής τους ώστε να μην συσσωρεύονται σε ενώσεις πρανών και δαπέδων. Η αναπήδηση αποτελούσε φαινόμενο μη επιθυμητό κατά την εφαρμογή του υλικού και όταν παρατηρούνταν ότι συνέβαινε σε υπερβολικό βαθμό η αντιμετώπιση περιελάμβανε την αναθεώρηση των αναλογιών του μείγματος ή των διαδικασιών εφαρμογής του υλικού.

7.10.8 Αρμοί κατασκευής και αρμοί διακοπής εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Οι αρμοί κατασκευής και διακοπής κατασκευάζονταν με κλίση 45° προς την παρακείμενη επιφάνεια του εκτοξευμένου σκυροδέματος με μία καθαρή, κανονική ακμή. Και σε αυτή την περίπτωση απαιτούνταν η προετοιμασία του κεκλιμένου τμήματος και του παρακείμενου εκτοξευμένου σκυροδέματος πριν την εφαρμογή του νέου υλικού.

7.10.9 Επισκευή και συντήρηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Σε περιοχές με θύλακες αέρα, άμμο, ρωγματώσεις, αποκολλημένα τεμάχια αφαιρούνταν το εκτοξευμένο σκυρόδεμα μέχρι την υγιή επιφάνεια του βράχου ή μέχρι την υγιή επιφάνεια του εκτοξευμένου σκυροδέματος, προετοιμαζόταν η νέα προκύπτουσα επιφάνεια κατά τα προαναφερόμενα και γινόταν εκ νέου διάστρωση του υλικού.

Κατά τη σκλήρυνση και πήξη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και με την εμφάνιση των πρώτων στεγνών κηλίδων, πραγματοποιούνταν διαβροχή με νερό της στρώσης του υλικού (με ψεκασμό) κατ' ελάχιστον μία (01) φορά κάθε τέσσερις (04) ώρες και για διάστημα τουλάχιστον 7 ημερών. Συντήρηση με τοποθέτηση μεμβράνης πραγματοποιούνταν μόνο κατόπιν σχετικής εγκρίσεως καταλληλότητας και σε σπάνιες περιπτώσεις.

7.10.10 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες (Steel Fiber Shotcrete)

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες είναι το υλικό που προδιαγράφηκε στις προαναφερόμενες Τεχνικές Προδιαγραφές, στο οποίο έχει ενσωματωθεί κατά τη διάρκεια της ανάμειξης συγκεκριμένη ποσότητα χαλύβδινων ινών με συγκεκριμένες αναλογίες. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι ο ίδιος εξοπλισμός που προαναφέρθηκε με μικρές κατά περίπτωση τροποποιήσεις. Η ενσωμάτωση των χαλύβδινων ινών αύξησε την αντοχή σε παραμόρφωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και του προσέδωσε ιδιότητες ανάλογες του υλικού με ενσωματωμένο δομικό πλέγμα, οπότε και το αντικατέστησε επάξια κατά την κατασκευή.

Η προσθήκη χαλύβδινων ινών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είχε σαν αποτέλεσμα τα κάτωθι:

- ❖ Επίτευξη άμεσης υποστήριξης με ιδιαίτερη ταχύτητα εφαρμογής, με αποτέλεσμα την πλήρη ασφάλεια των υπόγειων κατασκευών και την έγκαιρη και ορθή αντιμετώπιση του φαινομένου της υπέρμετρης αποτόνωσης βραχόμαζας.
- ❖ Μείωση του χρόνου εφαρμογής της υποστήριξης σε σχέση με τον αντίστοιχο απαιτούμενο για την τοποθέτηση του δομικού πλέγματος, επομένως και του συνολικού χρόνου εκσκαφής και υποστήριξης ενός υπόγειου έργου.
- ❖ Αύξηση της ολκιμότητας, της δυσθραυστότητας και της φέρουσας ικανότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
- ❖ Περιορισμό του φαινομένου ρωγμάτωσης.

Η ποσότητα (σε kg) των χαλύβδινων ινών ανά κυβικό μέτρο (m^3) εκτοξευόμενου σκυροδέματος καθορίζονταν από την εκάστοτε εγκεκριμένη «μελέτη σύνθεσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος» μετά τις απαιτούμενες δοκιμές ποιοτικού ελέγχου του υλικού και τις συστάσεις της κατασκευάστριας εταιρείας των ινών. Η ελάχιστη περιεκτικότητα κάθε κυβικού μέτρου εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε χαλύβδινες ίνες είχε οριστεί στα 40 Kg.

Εκτός από τις προαναφερόμενες δοκιμές ποιοτικού ελέγχου το εκτοξευόμενο σκυροδέμα με χαλύβδινες ίνες υποβαλλόταν στις εξής επιπλέον δοκιμές:

- ❖ Δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό από κάμψη κατά την Πρότυπη Προδιαγραφή ASTM C 78-75.
- ❖ Δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό από κάμψη κατά την Πρότυπη Προδιαγραφή ASTM 1018 – 85 (Flexural Toughness Index and First – Crack Strength of Third - Point Loading), από την οποία προσδιορίζεται ο δείκτης αντοχής σε παραμόρφωση (Toughness Index) εκ της εξαγόμενης καμπύλης φορτίου – παραμόρφωσης.

Η ελάχιστη καμπτική αντοχή f κατά ASTM C 78, σε επτά [07] ημέρες, ο δείκτης ανθεκτικότητας I κατά ASTM C 1018 – 89 και η ελάχιστη θλιπτική αντοχή ικανοποιούσαν οπωσδήποτε τα όρια που παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Τεχνικές προδιαγραφές ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά ASTM C-78		
Ελάχιστη καμπτική αντοχή σε 7 ημέρες		
Ελάχιστη αντοχή κατά την πρώτη ρηγμάτωση f_1 (MPa)	5	
Ελάχιστη οριακή αντοχή θραύσης f_u (MPa)	6	
Ελάχιστη ισοδύναμη καμπτική αντοχή f_e (MPa)	4	
Δείκτης ανθεκτικότητας (toughness index) εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά ASTM C-1018-89		
Ελάχιστη τιμή I_5	5	
Ελάχιστη τιμή I_{10}	10	
Ελάχιστη τιμή I_{30}	25	
Ελάχιστη θλιπτική αντοχή (MPa) - ελάχιστη αντοχή σε θραύση		
Χρόνος ωρίμανσης	MPa	Παρατηρήσεις
Στις 8 ώρες	6	βασική ιδιότητα μειγμάτων ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος
Στις 2 ημέρες	20	βασική ιδιότητα μειγμάτων ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος
Στις 7 ημέρες	30	
Στις 28 ημέρες	40	

Πίνακας 28: Τεχνικές προδιαγραφές ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά ASTM C-78 και ASTM C-1018 - 89

Στα πλαίσια του ποιοτικού ελέγχου του υλικού επιβεβαιώνονταν από πυρηνοληψία ότι το εκτοξευόμενο σκυροδέμα με χαλύβδινες ίνες παρουσίαζε πλήρη ομοιομορφία στην κατανομή των ινών.

Οι χαλύβδινες ίνες έπρεπε ρητά να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της Πρότυπης Ευρωπαϊκής Προδιαγραφής 18-70 "Rolled Wires of Unalloyed Steel for General Applications" με ελάχιστο όριο θραύσης (N/mm² ή MPa) στα 1100 MPa. Κατά τα λοιπά, συμφωνούσαν με τα οριζόμενα στην Προδιαγραφή ASTM A820-90 "Standard Specification for Steel Fibers for Fiber Reinforced Concrete" και στην Προδιαγραφή ASTM C116-19, "Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete".

Το μήκος των χαλύβδινων ινών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κυμαινόταν μεταξύ 25-40 mm και το πάχος τους μεταξύ 0,40-0,60 mm. Ο ελάχιστος λόγος "μήκος /διάμετρος" χαλύβδινων ινών εκτοξευόμενου σκυροδέματος (aspect ratio) είχε οριστεί στην τιμή 60. Το σχήμα των χαλύβδινων ινών χαρακτηριζόταν από κεκαμμένα ή πεπλατυσμένα άκρα για την καλύτερη πρόσφυσή τους στο σκυρόδεμα. Σε κάθε περίπτωση, ακολουθούσαν τις οδηγίες της κατασκευάστριας εταιρείας, τα προδιαγραφόμενα στο Πρότυπο ISO 9001 και τις σχετικές σε κάθε έργο εγκρίσεις.

Η ανάμειξη των ινών σε κάθε περίπτωση πραγματοποιούνταν με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία συσσωματωμάτων, ενώ στη μελέτη σύνθεσης προσδιοριζόταν και ο εξοπλισμός που θα χρησιμοποιούνταν στην εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα, καθώς και ο κατάλληλος τροφοδότης ινών ("Fiber Feeder"). Σχετικές επί τόπου δοκιμές πριν την έναρξη κάθε έργου εξασφάλιζαν την συνεχή εφαρμογή του υλικού χωρίς διακοπές λόγω ενδεχόμενων συσσωματωμάτων χαλύβδινων ινών στο εσωτερικό του μείγματος του υλικού.

7.10.11 Εκτοξευόμενο ινοσκυρόδεμα

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αυτής της κατηγορίας ικανοποιούσε τις απαιτήσεις του προτύπου DIN 18551. Σύμφωνα με αυτό, καθορίζονταν βασικά στοιχεία ως προς τη σύνθεση, την επί τόπου ανάμειξη, τη διάστρωση και τη συντήρηση του δομικού υλικού.

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ήταν κατηγορίας C20/25, με τσιμέντο II-45 με λεπτόκοκκα αδρανή, εγκεκριμένα πρόσθετα και ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 12-19 mm. Οι ίνες προστίθεντο επί τόπου με αναλογία 1 kg ανά m³ ινοσκυροδέματος. Όλα τα υλικά που συνέθεταν το μείγμα ζυγίζονταν με ακρίβεια πριν την ανάμειξη. Μετά την υποβολή δελτίων τεχνικών χαρακτηριστικών και δειγμάτων ινών σε συνεργασία με την κατασκευάστρια εταιρεία τους και μετά από τις απαραίτητες εγκρίσεις από τη Διευθύνουσα Υπηρεσία, ακολουθούσαν οι απαραίτητες δοκιμές ποιότητας εκτόξευσης και στεγανοποίησης του ινοσκυροδέματος κατά τις προδιαγραφές του DIN 18551. Όποια δείγματα και η αντίστοιχη ποιότητα υλικού δεν ανταποκρινόταν στο πρότυπο υφίστατο τις απαραίτητες βελτιώσεις σύνθεσης και υποβαλλόταν εκ νέου σε δοκιμές.

Πριν την αποστολή του εξοπλισμού στο εργοτάξιο, η Διευθύνουσα υπηρεσία ενέκρινε τα εξής:

- ❖ Τον τύπο και το είδος των ειδικών μηχανημάτων ξηράς και υγρής ανάμειξης και εκτόξευσης.
- ❖ Τον υπόλοιπο απαραίτητο εξοπλισμό διάστρωσης και συντήρησης (π.χ. ελαστικό ρολό, δονητικό μυστήρι, κτλ) που θα χρησιμοποιούνταν στο έργο.

Σε κάθε περίπτωση εξασφαλιζόταν η καλή λειτουργία του συνόλου του εξοπλισμού και κυρίως η επαρκής ικανότητα εφαρμογής και διάστρωσης, ώστε να αποφεύγονται οι καθυστερήσεις. Αν ο εξοπλισμός δεν ικανοποιούσε τις απαιτήσεις καλής λειτουργίας συμπληρωνόταν ή και αντικαθίστατο. Οι χειριστές των ακροφύσιων ήταν υποχρεωτικά έμπειροι τεχνίτες σε παρόμοιες εφαρμογές, υπέβαλλαν τα πιστοποιητικά επάρκειάς τους στη Διευθύνουσα Υπηρεσία και συμμετείχαν σε αντίστοιχη επίδειξη ικανοτήτων πριν την συμμετοχή τους στο έργο.

Η μέθοδος εργασίας που ακολουθούνταν θα έπρεπε απαραίτητα να εξασφάλιζε τα εξής:

- ❖ Απόλυτη και ορθή πρόσφυση του υλικού στα πρηνή εκσκαφής ή στην ήδη εφαρμοσμένη στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, μέσω των κατάλληλων επί μέρους εργασιών και μέσω της απαραίτητης διαβροχής.
- ❖ Ελάχιστο όριο αναπήδησης, με τα υπολείμματα υλικού που προέρχονταν από την αναπήδηση να αφαιρούνται εξ ολοκλήρου και στο τέλος να απορρίπτονται.
- ❖ Αποφυγή δημιουργίας κοιλοτήτων και κενών εντός του διαστρωμένου υλικού.
- ❖ Ελάχιστο πλήθος ρωγμών.
- ❖ Ελάχιστη συστολή ξήρανσης.
- ❖ Διαμόρφωση λείας επιφάνειας U3 με ειδικό ελαστικό κύλινδρο και μυστρί.
- ❖ Συνεχή εργαστηριακό έλεγχο της σύνθεσης του εφαρμοζόμενου υλικού.
- ❖ Συνεχή συντήρηση της επιφάνειας των πρηνών για επτά (07) ημέρες με εγκατεστημένο σύστημα διαβροχής.

Οι ακμές των άνω περιοχών του υλικού που δεν θα καλύπτονταν από ινοσκυρόδεμα διαμορφώνονταν ώστε να σχηματίζουν κανονικές γραμμές με κλίση 45° ως προς τις παρακείμενες επιφάνειες.

Κάθε τμήμα που επρόκειτο να διαστρωθεί ελεγχόταν εκτενώς πριν τη διάστρωση για να εντοπιστούν τυχόν κοιλότητες με εγκλωβισμένο αέρα, αποκολλήσεις, ρωγμές και κάθε άλλο ελαττωματικό σημείο της περαιωμένης διάστρωσης υλικού. Σε περίπτωση εντοπισμού ελαττωμάτων οι ομάδες εργασίας προχωρούσαν στην καθαίρεση του μη ορθά διαστρωμένου υλικού, προετοιμασία της επιφάνειας και επανάληψη της εκτόξευσης σύμφωνα με όσα έχουν προαναφερθεί κατά τις Πρότυπες κάθε φορά Προδιαγραφές.

Οι αρμοί κατασκευής διαμορφώνονταν με κλίση 45° ως προς τις παρακείμενες επιφάνειες και καθαροί από οποιοδήποτε υλικό.

7.10.12 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε περιοχές με χαλύβδινα υποστηρίγματα

Σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτήθηκε η διάστρωση εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε περιοχές που είχαν υποστηριχθεί με χαλύβδινα πλαίσια υποστήριξης, η οποία λάμβανε χώρα κυρίως σε κερματισμένους βράχους και σε σχηματισμούς αργιλικής σύστασης. Η διάστρωση πραγματοποιούνταν μετά την αφαίρεση της τοποθετημένης ξυλείας και οποιονδήποτε άλλων παρενθεμάτων στα χαλύβδινα πλαίσια. Αν ήταν απαραίτητη η παραμονή κάποιων στις θέσεις υποστήριξης αυτά σταθεροποιούνταν με σφήνες. Η προετοιμασία της επιφάνειας λάμβανε χώρα σύμφωνα με τα όσα προαναφέρθηκαν και με ιδιαίτερη προσοχή στην αποφυγή πιθανής έκπλυσης της επιφάνειας του γεωλογικού σχηματισμού, κάτω από τα υποστηρίγματα των πλαισίων. Τα πάχη των στρώσεων του υλικού και η διαδικασία εκτόξευσης ορίζονταν ρητά κατόπιν έγκρισης της Υπηρεσίας.

Όπου το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε συνδυασμό με τα αγκύρια βράχου αποδεικνυόταν ανεπαρκές ως προς τις ανάγκες της υποστήριξης, γινόταν χρήση ελαφρών μεταλλικών δικτυωτών υποστηρίγμάτων (lattice girders), τα οποία ενσωματώνονταν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και δημιουργούσαν ένα εύκαμπτο πλαίσιο υποστήριξης. Η γρήγορη τοποθέτησή τους τα καθιστούσε ικανά να αναλάβουν φορτία, ώστε να αποτρέψουν την περαιτέρω από την επιτρεπόμενη αποτόνωση της βραχώμαζας, συνδράμοντας έτσι στη δημιουργία του φαινομένου του θόλου και στην αυτοϋποστήριξη του βράχου.

Τα μεταλλικά δικτυωτά πλαίσια αποτελούνταν από ράβδους δομικού χάλυβα διαμέτρου 10 mm η καθεμία, καινούριες, χωρίς οξειδώσεις και σύμφωνες με τις Προδιαγραφές ASTM A-615 GRADE 60 και τις Ευρωπαϊκές Προδιαγραφές.

7.11 Όργανα μετρήσεων μετακινήσεων και συγκλίσεων βράχου

Για την παρακολούθηση των μετακινήσεων εκσκαφών χρησιμοποιήθηκαν μηκυσιόμετρα, και άλλα όργανα τα οποία παρακολουθούνταν και συντηρούνταν περιοδικά ώστε να εξασφαλίζεται η ορθή λειτουργία τους και η αντίστοιχη αξιοπιστία των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, στις υπόγειες σήραγγες τοποθετούνταν αμέσως μετά την ολοκλήρωση της κάθε ανατίναξης και την αφαίρεση των επισφαλών επί μέρους τεμαχίων βράχου («ξεσκάρωμα») στην περιοχή τοποθέτησής τους. Η απόστασή τους από το μέτωπο της εκσκαφής οριζόταν σε κάθε περίπτωση μικρότερη από 4,5 m. Τα προεξέχοντα τμήματα των μηκυσιομέτρων προστατεύονταν από τυχόν φθορές λόγω διερχόμενων οχημάτων, εκτοξεύσεων τεμαχίων βράχου από ανατινάξεις παρακείμενων περιοχών και από οποιοσδήποτε κατασκευαστικές εργασίες, όπως για παράδειγμα από την εκτόξευση σκυροδέματος. Ιδιαίτερη έμφαση είχε δοθεί στον έλεγχο λειτουργίας και ευαισθησίας των εφαρμοζόμενων μετρητικών οργάνων και του συστήματος προειδοποίησης για τη λήψη διορθωτικών μέτρων, με τον κατάλληλο κάθε φορά εξοπλισμό.

Οι τύποι μετρήσεων που έλαβαν χώρα προγραμματισμένα ήταν:

- ❖ Γεωλογικές χαρτογραφήσεις
- ❖ Δοκιμές εξόλκευσης αγκυρίων
- ❖ Με μηκυσιόμετρα, ηλεκτρικά πιεζόμετρα δονούμενης χορδής, συσκευές μέτρησης διαρροών (weir)
- ❖ Με κυψέλες μέτρησης φορτίου αγκυρώσεων
- ❖ Με ακίδες μέτρησης σύγκλισης
- ❖ Με όργανα μέτρησης πίεσης πετρωμάτων
- ❖ Με όργανα μέτρησης παραμορφώσεων

Μετρήσεις εκτός των προγραμματισμένων λάμβαναν χώρα στις εξής περιπτώσεις:

- ❖ Γρήγορη προχώρηση εκσκαφής
- ❖ Απότομη μεταβολή χαρακτηριστικών βραχώμαζας
- ❖ Έντονη ανομοιογένεια του πετρώματος
- ❖ Μη σύγκλιση μετρήσεων

7.12 Ανοχές ασφαλείας και μέτρα αντιμετώπισης πραγματοποιούμενων συγκλίσεων

Κατά τη διάρκεια των εργασιών εκσκαφής και άμεσης υποστήριξης, οι διαστάσεις των εκσκαφών και της τελικής επιφάνειας της υποστήριξης όφειλαν να εξασφαλίζουν το τελικό περιτύπωμα της Μελέτης του έργου που θα προέκυπτε και μετά την τοποθέτηση της τελικής υποστήριξης. Για να εξασφαλιστεί αυτό είχαν οριστεί τα παρακάτω όρια ανοχών:

- ❖ Μέγιστη οριζοντιογραφική απόκλιση άξονα: $\pm 0,02$ m
- ❖ Μέγιστη υψομετρική απόκλιση άξονα: $\pm 0,01$ m

Κατά την εξέλιξη του φαινομένου των συγκλίσεων, η αντιμετώπιση ήταν συνεχώς εξαρτώμενη των γεγονότων, και στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτούσε ενέργειες παρατήρησης, μετρήσεων και εκ νέου περιορισμού τους. Πιο συγκεκριμένα:

- συγκλίσεις μικρότερες από 40%, δεν απαιτούσαν καμία ενέργεια
- συγκλίσεις μεταξύ 40% και 60% απαιτούσαν την εντατικοποίηση της παρακολούθησης
- συγκλίσεις μεταξύ 60% και 80% απαιτούσαν επανέλεγχο μέτρων και μεθόδων υποστήριξης
- συγκλίσεις μεγαλύτερες από 80% απαιτούσαν εφαρμογή πρόσθετων μέτρων υποστήριξης, όπως συμπληρωματικές στρώσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ενίσχυση και πύκνωση αγκύρωσης, εφαρμογή τεχνικής ανάστροφου τόξου, κ.α.

7.13 Περιπτώσεις ράβδων αγκύρωσης που εφαρμόστηκαν σε υπόγειες εκσκαφές

Οι ράβδοι αγκύρωσης στις υπόγειες εκσκαφές ακολούθησαν όλα τα προαναφερόμενα με ιδιαίτερη προσοχή ως προς την άμεση τοποθέτησή τους μετά τις εκσκαφές με σκοπό την ελαχιστοποίηση χαλάρωσης και παραμόρφωση της βραχώμαζας πέρα από τα επιτρεπόμενα όρια.

Η τοποθέτηση και πάκτωση με τσιμεντένεμα επακολουθούσε τις διαδικασίες διάτρησης και καθαρισμού των οπών και - όπως σε όλες τις τοποθετήσεις αγκυρώσεων - τις δοκιμές σε βράχο όμοιο με αυτόν της πραγματικής κατασκευής. Παχύρρευστο τσιμεντένεμα με ταχυπηκτικά αντλούνταν με αντλίες τύπου Bergjet ή άλλου εγκεκριμένου ισοδύναμου μέσω ελαστικού εύκαμπτου σωλήνα κατάλληλης διαμέτρου μέχρι τον πυθμένα της οπής. Στη συνέχεια εισπνεζόταν το τσιμεντένεμα και ο σωλήνας αποσυρόταν σταδιακά από το διάτρημα, μέχρι να πληρωθεί το διάκενο μεταξύ ράβδου οπλισμού και βράχου σε όλο το μήκος του διατρήματος. Στο σημείο αυτό ανασυρόταν ο σωλήνας και τοποθετούνταν η ράβδος οπλισμού, με τελική σφράγιση της οπής όπου απαιτούνταν από ταχυπηκτικό κονίαμα, ώστε να αποτραπεί η εκροή του ενέματος εκτός του διατρήματος. Οι ράβδοι αγκύρωσης παραλάμβαναν φορτίο μετά τη σκλήρυνση του ενέματος. Στις υπόγειες εκσκαφές οι αγκυρώσεις τοποθετούνταν με μεγάλη κλίση προς τα επάνω και για αυτό το λόγο το ένεμα απαιτούνταν να είναι παχύρρευστο για την αποφυγή διαφυγών και εκρών υλικού από τις οπές.

Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνταν όπως προαναφέρθηκε η τοποθέτηση αγκυρώσεων με σπείρωμα στο ένα άκρο τους και με τα υπόλοιπα εξαρτήματα, όπως ροδέλες, πλάκες έδρασης, κτλ. Αυτές τοποθετούνταν κυρίως για την στερέωση του δομικού πλέγματος και των χαλύβδινων μορφοελασμάτων.

Στις σήραγγες χρησιμοποιήθηκαν κατά περίπτωση και τα μεταλλικά ελάσματα Bernold, με μικρό χρόνο συναρμολόγησης, που κάμπτονταν στην απαιτούμενη καμπυλότητα και στερεώνονταν στα χαλύβδινα πλαίσια με χαλύβδινες ράβδους. Το πάχος τους κυμαινόταν από 1 έως 5 mm με αντίστοιχο βάρος ανά φύλλο ελάσματος από 10,5 έως 50,2 kg. Οι τυπικές διαστάσεις του ελάσματος ήταν 1,08*1,20 m.

7.14 Βαφή επιφανειών από σκυρόδεμα και επίχρισμα

Οι επιφάνειες στις οποίες παρατηρούνταν τυχόν διαρροές ελαίων ή άλλων λιπαρών ουσιών κατά την εγκατάσταση, μετακίνηση ή λειτουργία του εξοπλισμού στο χώρο της κατασκευής, βάφονταν άμεσα. Η βαφή των υπόλοιπων επιφανειών καθυστερούσε όσο το δυνατόν περισσότερο, ενώ αυτές προστατεύονταν από έλαια και οποιοσδήποτε άλλες λιπαρές ουσίες.

Η προετοιμασία των επιφανειών σκυροδέματος που απαιτήθηκε να καλυφθούν με βαφή προετοιμάζονταν κατάλληλα ως εξής:

- ❖ Καθαρισμό με βούρτσα και πλύσιμο των επιφανειών σκυροδέματος, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη πρόσφυση της βαφής.
- ❖ Εξασφάλιση ουδετερότητας επιφανειών σκυροδέματος με διάλυμα νερού που θα περιέχει 2% χλωριούχο ψευδάργυρο, 3% φωσφορικό οξύ (18,5 gr άνυδρου χλωριούχου ψευδαργύρου και 30 gr άνυδρου φωσφορικού οξέος στο ένα (01) λίτρο νερού) χωρίς να προηγηθεί πλύσιμο των επιφανειών.
- ❖ Η λήξη της προετοιμασίας των επιφανειών απείχε 72 ώρες από την έναρξη της βαφής τους ή και όσο περισσότερο χρόνο απαιτούνταν ώστε οι επιφάνειες που επρόκειτο να χρωματιστούν να μη φέρουν υγρασία.
- ❖ Οι επιφάνειες που επρόκειτο να καλυφθούν από βαφή, καθαρίζονταν από οποιαδήποτε τυχόν λιπαρή ουσία (γράσο, κ.α.) με τρίψιμό τους με νάφθα, βενζίνη και άλλα ειδικά για την εν λόγω χρήση υλικά. Το επάνθημα (λεπτό απόθεμα ορυκτών ουσιών πάνω στην επιφάνεια εδάφους) αφαιρούνταν με

διαβροχή και με διάλυμα υδροχλωρικού οξέος. Στη συνέχεια, οι αποθέσεις αφαιρούνταν με τρίψιμο και με πλύση ύδατος.

- ❖ Οι ρωγμές ή οι οπές στις επιχρισμένες επιφάνειες καλύπτονταν και ελεγχόταν ως προς το ποσοστό σε υγρασία με κατάλληλη συσκευή προσδιορισμού. Η μέγιστη περιεκτικότητα σε υγρασία είχε οριστεί σε ποσοστό 8%.
- ❖ Τα υλικά βαφής ήταν άριστης ποιότητας και παραδίδονταν σε καινούρια δοχεία, στα οποία αναγραφόταν η επωνυμία της κατασκευάστριας Εταιρείας, η ημερομηνία παρασκευής τους, το χρώμα, ο τύπος και οι οδηγίες χρήσης τους.
- ❖ Η επιλογή των χρωμάτων γινόταν από τη Διευθύνουσα Υπηρεσία, ενώ η ανάμειξη των χρωστικών ουσιών ολοκληρωνόταν στο εργοστάσιο παραγωγής τους με απαραίτητη προϋπόθεση να μην έχουν αλλοιωθεί και να πληρούν τις ιδιότητες της άριστης εφαρμογής τους (χωρίς να «δακρύνουν»). Αναμειγνύονταν κατά τρόπο που εξασφάλιζε την αποφυγή καθίζησης εντός των δοχείων.
- ❖ Η αποθήκευση των συσκευασιών των χρωμάτων πραγματοποιούνταν σε ασφαλείς αποστάσεις από εύφλεκτες ύλες.
- ❖ Στις επιφάνειες των σκυροδεμάτων και επιχρισμάτων που χρωματίζονταν εφαρμοζόταν αστάρι – στεγανοποιητικό, ώστε μία μοναδική μεταγενέστερη στρώση βαφής να αποδίδει ομοιόμορφη τελική επιφάνεια σκυροδέματος, χωρίς παραλλαγές χρωμάτων ή τοπικά σημεία που θα γυαλίζουν. Εναλλακτικά, εφαρμοζόταν αστάρωμα με ιδιαίτερο υπόστρωμα βαφής, ενώ μετά την τελική εφαρμογή της βαφής το αποτέλεσμα είχε οριστεί να είναι οπωσδήποτε ματ ή ημισιλπνή επιφάνεια.
- ❖ Στα δάπεδα σκυροδέματος χρησιμοποιούνταν ειδικός για τη χρήση τύπος υλικού με βάση ελαστικού.

Συνοπτικά, οι επιφάνειες σκυροδέματος σε παρειές δεν είχαν υποστεί καμία επεξεργασία, ή εναλλακτικά ουδετεροποίηση, αστάρωμα ή στεγάνωση. Ανάλογα με τις ανάγκες του έργου δεν είχαν καλυφθεί από καμία βαφή ή είχαν καλυφθεί από ελαιόχρωμα ή από βαφή τοίχων πλαστικής βάσης. Οι επιφάνειες σκυροδέματος στα δάπεδα καθαρίζονταν και στεγανοποιούνταν πριν τη βαφή τους με ελαστική βάση. Στις οροφές το σκυρόδεμα υφίστατο σε πρώτη φάση ουδετεροποίηση, αστάρωμα και στεγάνωση και στη συνέχεια λεία βαφή με πλαστική βάση.

7.15 Περιβαλλοντική προστασία- απόρριψη υλικών και καθαρισμός

Τα έργα ολοκληρώθηκαν με πολύ αυστηρούς όρους σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος κάτι που επιβεβαιώνεται και από τα Συμβατικά Τεύχη (Τεύχος Τεχνικών Προδιαγραφών). Τα έργα απαλλάσσονταν άμεσα από επικίνδυνους και αντιαισθητικούς σωρούς υλικών ή απορριμμάτων με όρους μεταφοράς και απόθεσης που συμμορφώνονταν με τις Αρχές και την κείμενη Νομοθεσία. Χαρακτηριστικό της περιβαλλοντικής πολιτικής της ΔΕΗ ΑΕ κατά την κατασκευή των έργων αποτέλεσε η προδιαγραφή παράδοσης της εκμεταλλεύσιμης ξυλείας, που ενδεχομένως και περιστασιακά προέκυπτε από τα έργα της, στις αρμόδιες Δασικές Αρχές για να διατεθεί από αυτές κατά λόγο αρμοδιότητάς τους. Η τελική απόθεση των υλικών πραγματοποιήθηκε προς εγκεκριμένους χώρους, όπου τα επιχώματά τους χρησίμευσαν κατά περίπτωση ως χώροι ταφής υλικών, πάντα κατά τα οριζόμενα στους αυστηρούς περιβαλλοντικούς όρους της Νομοθεσίας.

Η καύση υλικών - όπου αυτή υπήρξε αναγκαία και επιτράπη - πραγματοποιήθηκε με εγκεκριμένες μεθόδους και σύμφωνα με τους κανόνες πυρασφάλειας των χώρων, ενώ απαγορευόταν η παραμονή υπολειμμάτων τέφρας στις περιοχές των έργων κατά τρόπο που να δημιουργεί αντιαισθητική συγκέντρωση και βλαβερά λιμνάζοντα ύδατα. Τα υπολείμματα καύσης διατέθηκαν σε εγκεκριμένους χώρους από την Υπηρεσία και διευθετήθηκαν σε ομαλές γραμμές και κλίσεις πρανών.

Κεφάλαιο 8: Επιπλέον στοιχεία για υπόγειες κατασκευές υδροηλεκτρικών έργων από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (γεωλογία περιοχής, στοιχεία κατασκευής και εφαρμογής μελέτης, παρούσα κατάσταση)

8.1 Γεωλογικοί Σχηματισμοί - στοιχεία κατασκευής και εφαρμογής Μελέτης στο ΥΗΕ Μεσοχώρας

Σύμφωνα με τα διατιθέμενα στοιχεία στο ΥΗΕ Μεσοχώρας, στον ποταμό Αχελώο, χρησιμοποιήθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα Κατηγορίας 2, μέσου πάχους στρώσης μεταξύ 3 cm και 5 cm, στις 120ο του θόλου της σήραγγας. Η εφαρμογή του έγινε εντός 8 ωρών από την ολοκλήρωση της ανατίναξης. Οι εκσκαφές πραγματοποιήθηκαν σε μεσοστρωματώδεις και λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους, κερατόλιθους και εναλλαγές τους. Η βραχώμαζα χαρακτηριζόταν υγιής, ελαφρά ρωγματωμένη ή ελαφρά αλλοιωμένη, αλλά η αντοχή του πετρώματος ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από τις τάσεις που αναπτύσσονταν στην περίμετρο του ανοίγματος της εκσκαφής. Οι παραμορφώσεις ήταν ασήμαντες, χωρίς επιρροές υπόγειων υδάτων. Η προχώρηση του βήματος εκσκαφής ήταν μεγαλύτερη από 2,70 m.

Σε περιοχές της χάραξης με λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους, κερατόλιθους και ασβεστιτικούς ιλυόλιθους και εναλλαγές τους, μέτρια ρωγματωμένη βραχώμαζα και τα ίδια υπόλοιπα γεωλογικά χαρακτηριστικά που αναφέρονται πιο πάνω, εφαρμόστηκε μικρότερο βήμα προχώρησης από 2,70 m, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5 cm στις 180ο του θόλου της σήραγγας και σε 4 ώρες από την ολοκλήρωση της ανατίναξης. Τοποθετήθηκε δομικό πλέγμα με την κατάλληλη αγκύρωση στήριξης και επιπλέον στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5 cm.

Στις περιοχές της χάραξης της σήραγγας προσαγωγής όπου επικρατούσαν λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι, κερατόλιθοι, ιλυόλιθοι, αργιλόλιθοι και εναλλαγές τους με μέτριο τεκτονισμό και μέτριο βαθμό εξαλλοίωσης η αντοχή του πετρώματος ήταν κοντά ή ελάχιστα μεγαλύτερη από τις τάσεις στην περίμετρο της εκσκαφής, συνδυαζόμενη με μέτριες πλευρικές πιέσεις και παραμορφώσεις. Παρά τη μικρή επίδραση του νερού στην αντοχή και ευστάθεια των σχηματισμών, λόγω της γεωλογίας της περιοχής, το βήμα προχώρησης μειώθηκε στο 1,50 m και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόστηκε σε στρώση πάχους 5-6 cm, αμέσως μετά το ξεσκάρωμα και μόνο 4 ώρες μετά την ανατίναξη, ενισχυμένο με δομικό πλέγμα ή με χαλύβδινες ίνες.

Σε άλλα σημεία της χάραξης απαντήθηκαν γεωλογικοί σχηματισμοί χαμηλότερης ποιότητας, διατμημένοι ιλυόλιθοι και αργιλόλιθοι, με τεμάχια ασβεστόλιθων και ιλυοαργιλικούς ψαμμίτες, έντονα τεκτονισμένους και εξαλλοιωμένους. Οι αντοχές τους στην περίμετρο εκσκαφής ήταν όμοιες ή μικρότερες από τις τάσεις που εφαρμόζονταν περιμετρικά, ενώ παρατηρήθηκε έντονη επιρροή των υπόγειων υδάτων. Το βήμα προχώρησης μειώθηκε στο 1 m. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ήταν ινοπλισμένο, κατηγορίας 1 ή 2, μέσου πάχους 5 cm στο μέτωπο, στις παρειές και στο θόλο, ενώ εφαρμοζόταν αμέσως μετά την εκσκαφή. Στην περίπτωση αυτή η υποστήριξη εκτοξευόμενου σκυροδέματος ενισχυόταν με πλαίσια, πριν το μέτωπο να απομακρυνθεί περισσότερο από 2 m και το πάχος στρώσης αυξανόταν στα 7 cm, με απαραίτητα εφαρμογή 2ης στρώσης πριν την απομάκρυνση του μετώπου σε απόσταση μεγαλύτερη από 2 m. Αν εφαρμοζόταν μόνο ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή σκυρόδεμα με δομικό πλέγμα το πάχος κάθε στρώσης του αυξανόταν σε 10 cm.

Στους ακόμη χαμηλότερης ποιότητας σχηματισμούς που συναντήθηκαν κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας συναντήθηκαν διατμημένοι ιλυόλιθοι και αργιλόλιθοι, με τεμάχια ασβεστολίθων και ιλυοαργιλικών ψαμμιτών έντονα τεκτονισμένους και

εξαλλοιωμένους. Οι αντοχές τους στην περίμετρο εκσκαφής ήταν μικρότερες από τις τάσεις που εφαρμόζονταν περιμετρικά, ενώ παρατηρήθηκαν φαινόμενα αποκολλήσεων, διογκώσεων, παραμορφώσεων, υψηλών πλευρικών πιέσεων και έντονη παρουσία υπόγειων υδάτων. Το βήμα προχώρησης μειώθηκε κάτω από το 1 m. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόστηκε στο σύνολο της διατομής σε στρώση πάχους 7 cm, αμέσως μετά την εκσκαφή. Υποστηρικτικά τοποθετήθηκαν ελαφριά πλαίσια, ενώ σε άλλες περιπτώσεις ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή απλό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δομικό πλέγμα σε στρώση πάχους 12 cm. Η δεύτερη στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος εφαρμόστηκε σε πάχος 8 cm. Σε όλη την έκταση αυτής της τεχνικογεωλογικής ενότητας χρησιμοποιήθηκε υλικό κατηγορίας 1. Χαρακτηριστικό είναι ότι τα στοιχεία αυτά αφορούν την προσωρινή άμεση επένδυση της σήραγγας προσαγωγής, ενώ δεν υπάρχουν στοιχεία για την τελική της επένδυση, αφήνοντας ανοιχτό το ενδεχόμενο το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα να αποτέλεσε ταυτόχρονα και τη μόνιμη επένδυσή της, ανταποκρινόμενο άριστα στο ρόλο του μέχρι και σήμερα.

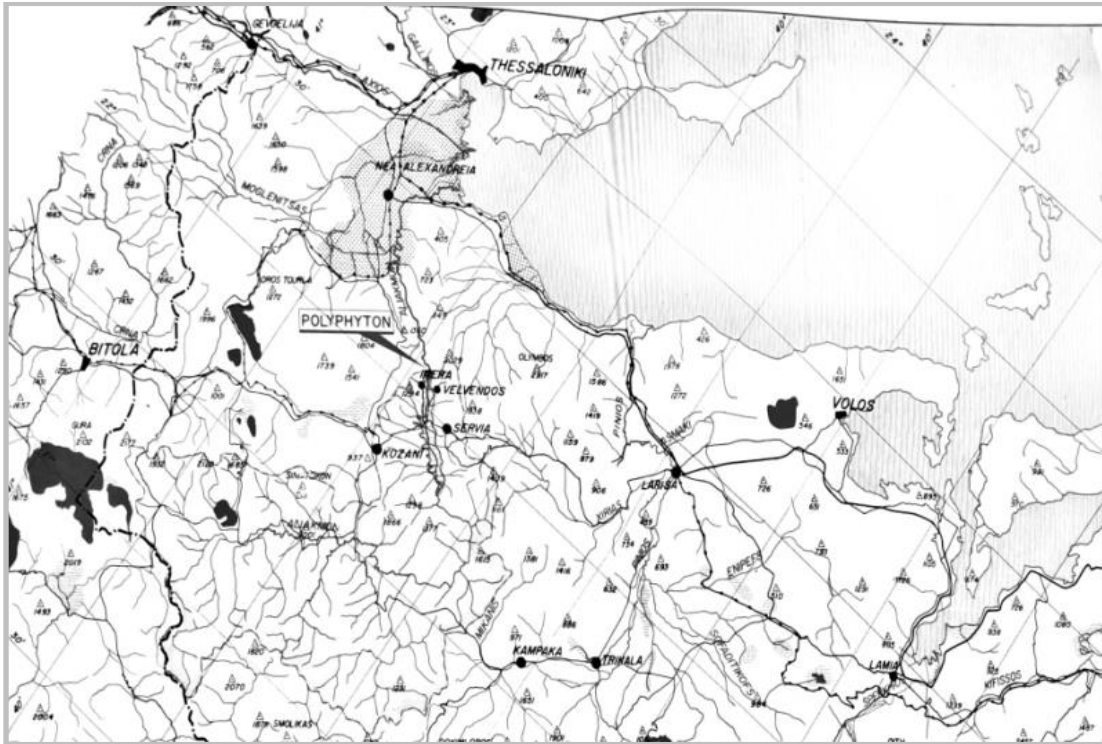
ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
Προσπέλασης & αποστραγγίσεως στη θέση Γλύστρα	Κατασκευαστική - Αποστραγγιστική	Μεταβατική ζώνη από κρηθικούς ασβεστόλιθους σε φλόσχη Πίνδου - Πολύχρωμοι αργιλόλιθοι, ιλυόλιθοι & κερατόλιθοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	210	Πεταλοειδές	55	50	1993	ΥΓΕ Μεσοχώρας - σήραγγα προσαγωγής	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	Κ/Ε ΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Ε. - ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ Α.Ε. - ΠΑΡΩΝ Α.Ε.

Πίνακας 29: Σήραγγες με επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συν τω χρόνω στο ΥΓΕ Μεσοχώρας (τμηματικά χωρίς εφαρμογή μόνιμης επένδυσης- υπό κατασκευή)

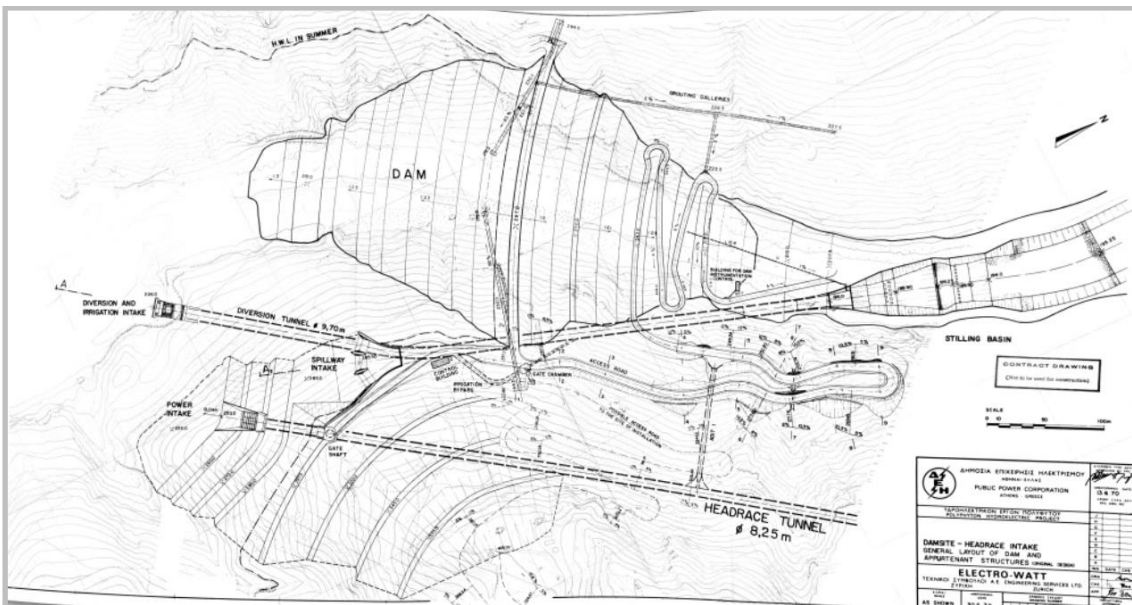
8.2 Σχέδια εφαρμογής υπόγειων υποέργων με τελική επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΓΕ Πολύφυτου, του ποταμού Αλιάκμονα

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
"Παράθυρα" 1,2,3	Κατασκευαστικές	Γρανιτογενέοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	460	Ημικυκλική - Ορθογωνικό		ΥΓΕ Πολύφυτου	ELECTROWATT	ΕΔΟΚ ΕΤΕΡ & ΟΔΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ
Βοηθητικής προσπέλασης θαλάμου θυροφρ/των	Κατασκευαστική	Γρανιτογενέοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	100	Ημικυκλική - Ορθογωνικό	1974	ΥΓΕ Πολύφυτου	ELECTROWATT	ΕΔΟΚ ΕΤΕΡ & ΟΔΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ
Τριπλής διακλάδωσης αγωγών Προσαγωγής	Υδραυλική	Γρανιτογενέοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	160	Κυκλική	1974	ΥΓΕ Πολύφυτου	ELECTROWATT	ΕΔΟΚ ΕΤΕΡ & ΟΔΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ
Αγωγών Φυγής (3)	Υδραυλικές	Γρανιτογενέοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	480	Κυκλική	1974	ΥΓΕ Πολύφυτου	ELECTROWATT	ΕΔΟΚ ΕΤΕΡ & ΟΔΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ
Προσπέλασης Σταθμού Παραγωγής	Οδική	Γρανιτογενέοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις		Ημικυκλική - Ορθογωνικό	1974	ΥΓΕ Πολύφυτου	ELECTROWATT	ΕΔΟΚ ΕΤΕΡ & ΟΔΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ
Καλωδίων	Εγκατάσταση Η/Μ εξοπλισμού	Γρανιτογενέοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις		Ημικυκλική - Ορθογωνικό	1974	ΥΓΕ Πολύφυτου	ELECTROWATT	ΕΔΟΚ ΕΤΕΡ & ΟΔΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ
Εκχειλιστή	Υδραυλική	Γρανιτογενέοι	Raise Boring	70	Κυκλική	1974	ΥΓΕ Πολύφυτου	ELECTROWATT	ΕΔΟΚ ΕΤΕΡ & ΟΔΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

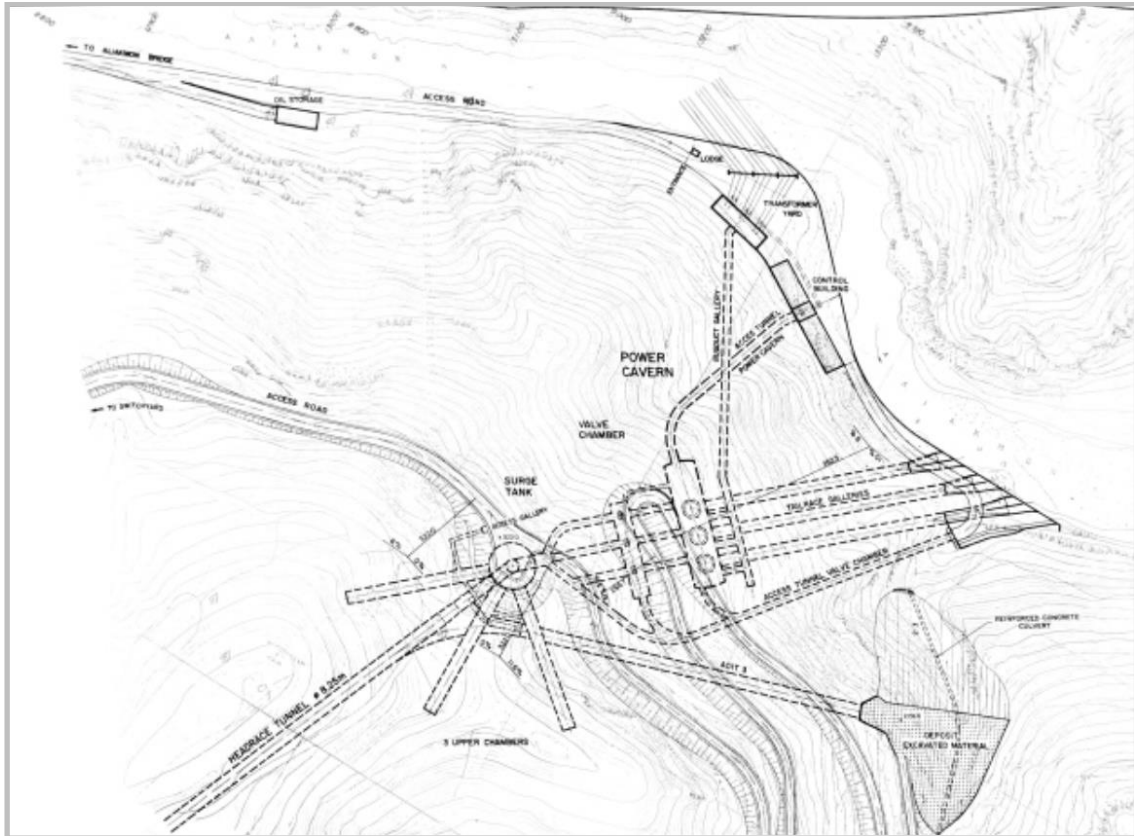
Πίνακας 30: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΓΕ Πολύφυτου



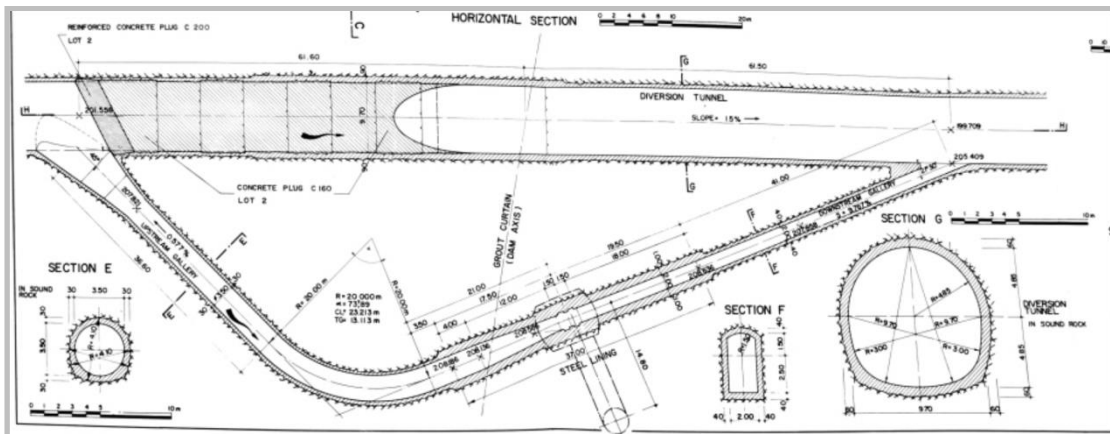
Εικόνα 93: Χάρτης περιοχής ΥΗΕ Πολύφυτου (Τεύχη Τεχνικών Προδιαγραφών ΥΗΕ ΔΕΗ ΑΕ)



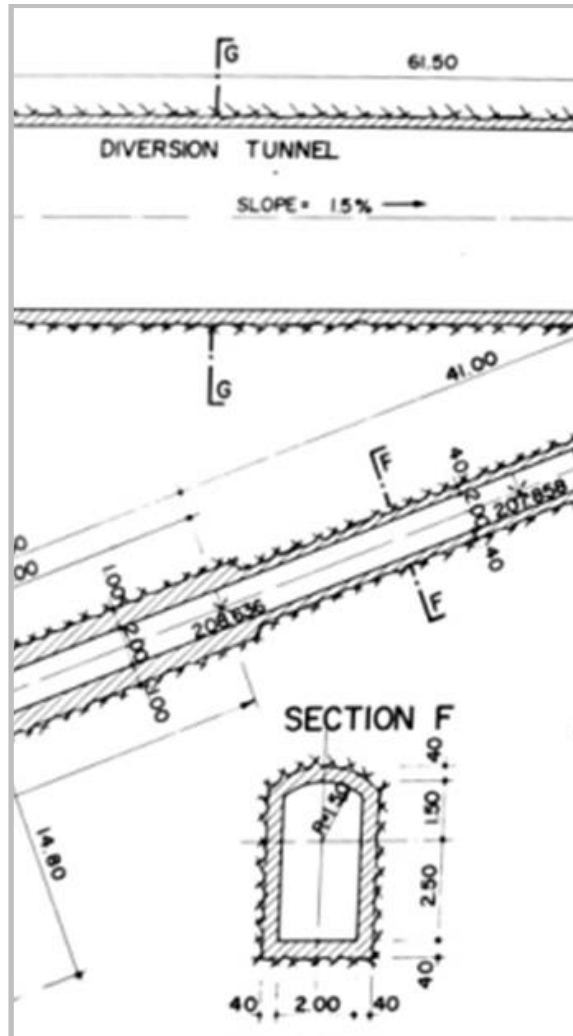
Εικόνα 94: Σχέδιο χάραξης σηράγγων προσπέλασης ΥΗΕ Πολύφυτου της Εταιρείας Electro-Watt (Τεύχη Τεχνικών Προδιαγραφών ΥΗΕ ΔΕΗ ΑΕ)



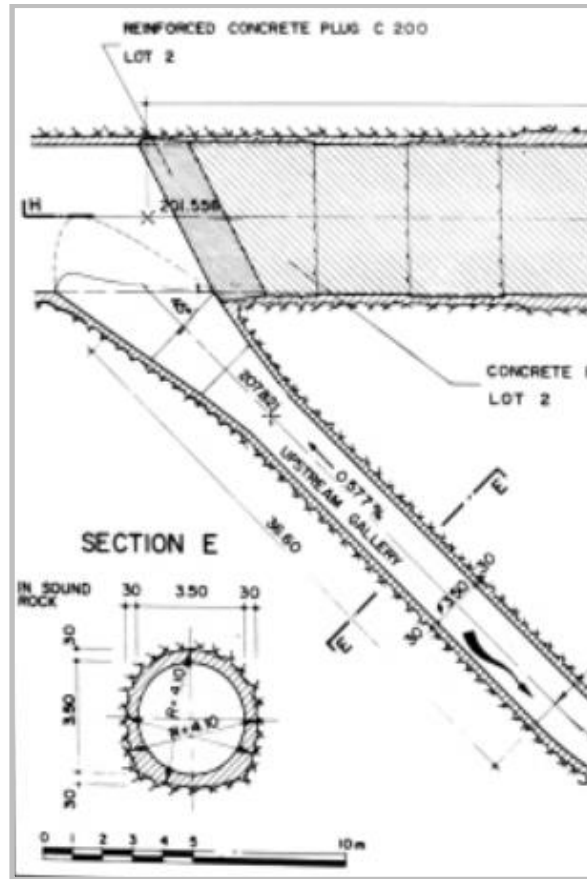
Εικόνα 95: Σχέδιο χάραξης σήραγγας προσαγωγής και υπόγειων θαλάμων ΥΗΕ Πολύφωτου (Τεύχη Τεχνικών Προδιαγραφών ΥΗΕ ΔΕΗ ΑΕ)



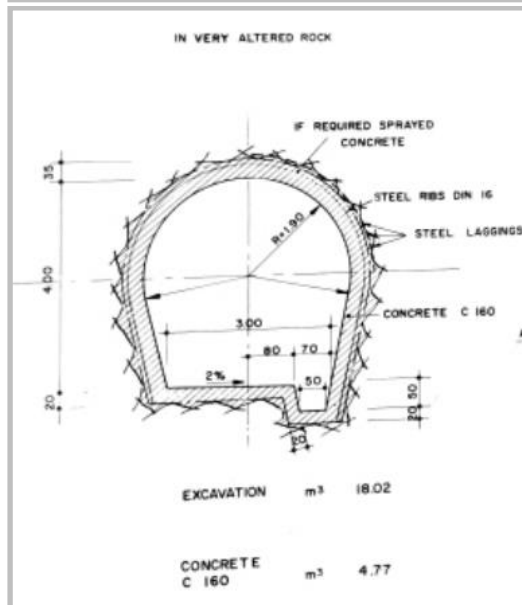
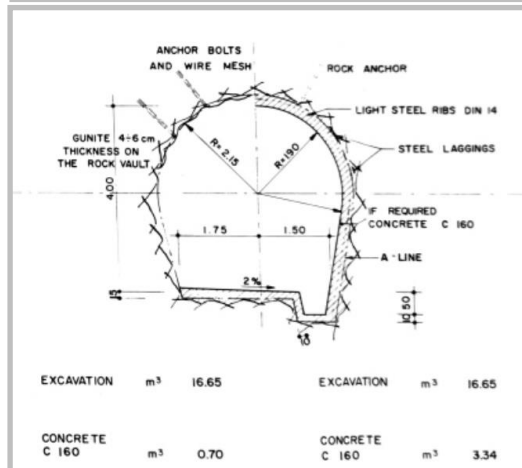
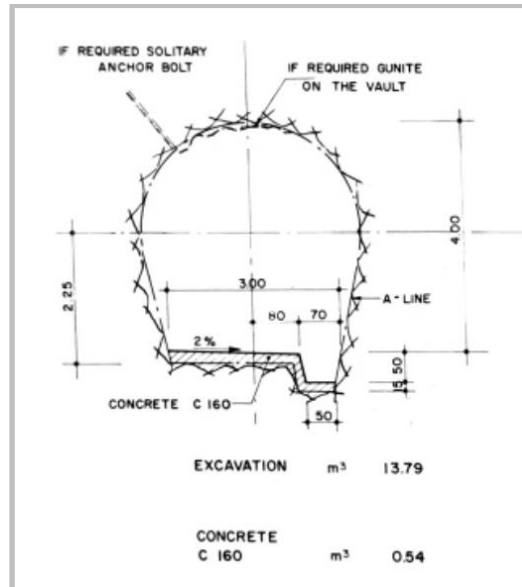
Εικόνα 96: Σχέδιο χάραξης σήραγγας προσπέλασης ΥΗΕ Πολύφωτου και ανατολική τομή της σήραγγας προσπέλασης F-F. (Τεύχη Τεχνικών Προδιαγραφών ΥΗΕ ΔΕΗ ΑΕ)



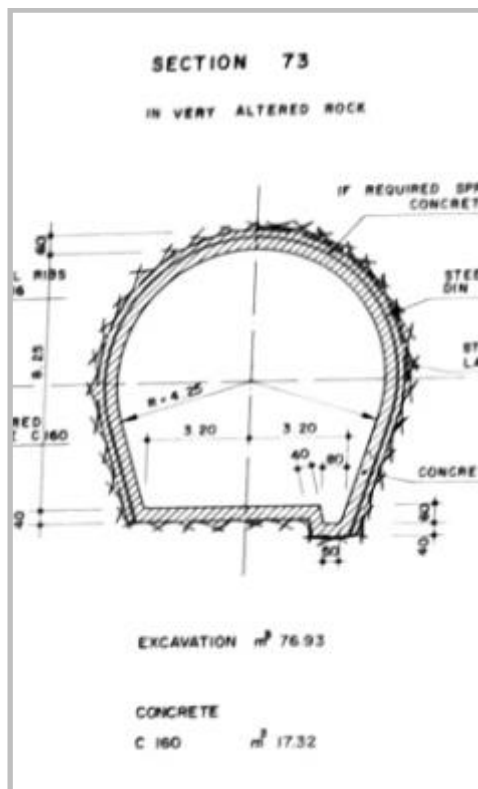
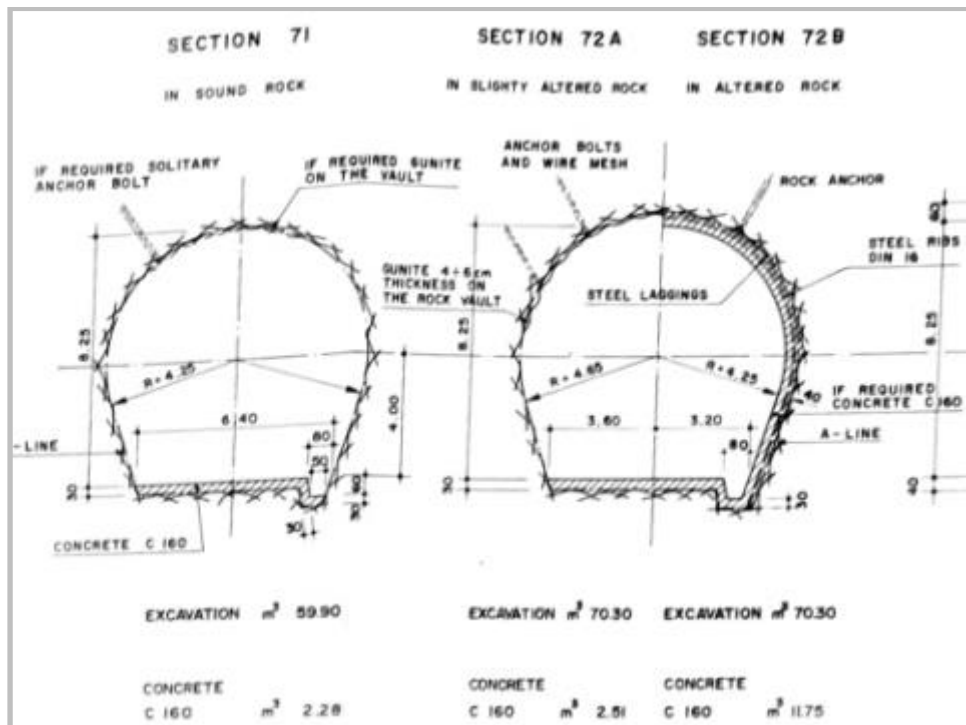
Εικόνα 97: Σχέδιο ανατολικής τομής F-F σήραγγας προσπέλασης ΥΗΕ Πολύφυτου (Τεύχη Τεχνικών Προδιαγραφών ΥΗΕ ΔΕΗ ΑΕ)



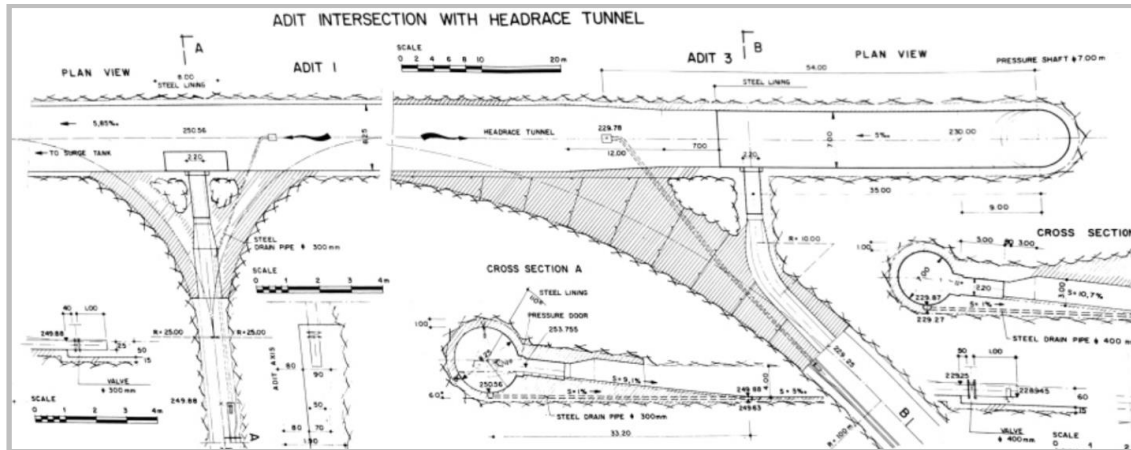
Εικόνα 98: Σχέδιο δυτικής τομής E - E σήραγγας προσπέλασης ΥΗΕ Πολύφυτου (Τεύχη Τεχνικών Προδιαγραφών ΥΗΕ ΔΕΗ ΑΕ)



Εικόνα 99: Σχέδια διατομών κατασκευαστικής στοάς «παραθύρου 1» ΥΓΕ Πολύφτου, από την εσκαφή έως τη σκυροδέτηση με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Τεύχη Τεχνικών Προδιαγραφών ΥΓΕ ΔΕΗ ΑΕ)



Εικόνα 100: Σχέδια διατομών κατασκευαστικής στοάς «παραθύρου 3» ΥΓΕ Πολύφυτου, από την εκσκαφή έως τη σκυροδέτηση με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Τεύχη Τεχνικών Προδιαγραφών ΥΓΕ ΔΕΗ ΑΕ)

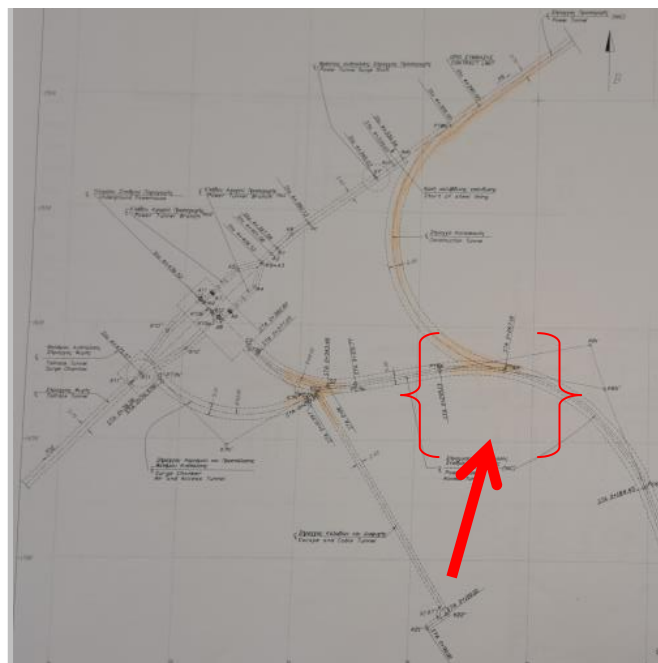


Εικόνα 101: Σχέδιο συναρμογής κατασκευαστικών στοών με τη βασική σήραγγα προσαγωγής ΥΗΕ Πολύφυτου (Τεύχη Τεχνικών Προδιαγραφών ΥΗΕ ΔΕΗ ΑΕ)

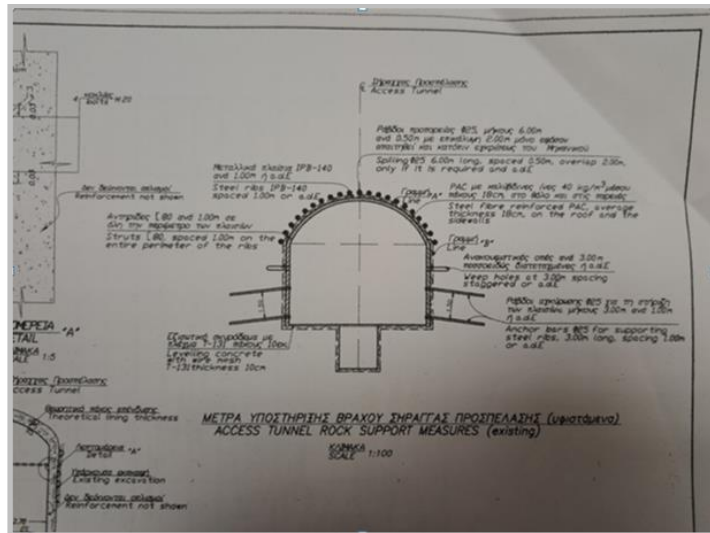
8.3 Τεχνικά στοιχεία ΥΗΕ Μετσοβίτικου και αποτελέσματα δοκιμών θραύσης άοπλου εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Στην χρονική συγκυρία συγγραφής της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας έχει επενδυθεί από οπλισμένο σκυρόδεμα το σύνολο των σηράγγων του έργου, εκτός από ένα τμήμα της σήραγγας προσπέλασης στο σημείο της σύνδεσής της με τη σήραγγα κατασκευής. Το εν λόγω τμήμα παραμένει μόνο με την επένδυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είχε εφαρμοστεί κατά το παρελθόν.

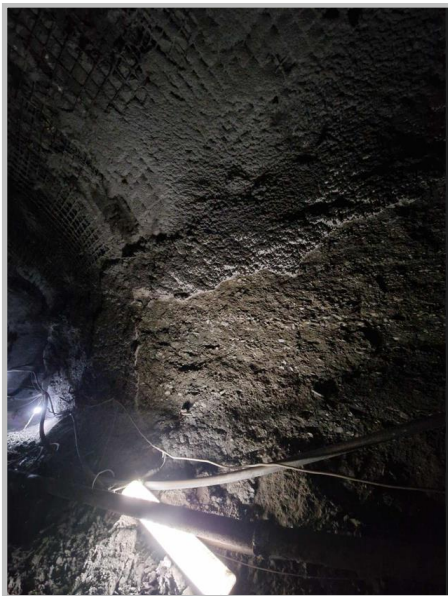
Κατά το παρελθόν, δεν υπήρξαν διαβρωτικοί παράγοντες παρά μόνο περιορισμένη παρουσία νερού. Για αυτό το λόγο δεν έχουν γίνει σχετικές μετρήσεις, έλεγχοι και δοκιμές διάβρωσης, καθώς η κατάσταση του εκτοξευμένου σκυροδέματος παραμένει πολύ καλή και με μηδενικές ενδείξεις αστοχιών.



Εικόνα 102: Σκαρίφημα κάτοψης τμήματος σήραγγας που παραμένει με επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος μέχρι τη σημερινή εποχή, στο ΥΗΕ Μετσοβίτικου (Τεύχη Τεχνικών Προδιαγραφών ΥΗΕ ΔΕΗ ΑΕ)



Εικόνα 103: Σχέδιο διατομής τμήματος σήραγγας που παραμένει με επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος μέχρι τη σημερινή εποχή, στο ΥΓΕ Μετσοβίτικου (Τεύχη Τεχνικών Προδιαγραφών ΥΓΕ ΔΕΗ ΑΕ)



Εικόνα 104: Φωτογραφίες τμήματος σήραγγας που παραμένει με επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος μέχρι τη σημερινή εποχή, στο ΥΓΕ Μετσοβίτικου (Φωτογραφικό υλικό ΔΕΗ ΑΕ)



Εικόνα 105: Φωτογραφία αριστερής σήραγγας προς σταθμό παραγωγής και δεξιάς σήραγγας προς την αντίστοιχη προσαγωγή
(Φωτογραφικό υλικό ΔΕΗ ΑΕ)



Εικόνα 106: Μεταλλική σήραγγα προσαγωγής
(Φωτογραφικό υλικό ΔΕΗ ΑΕ)

Από εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε άοπλο εκτοξευμένο σκυρόδεμα στο έργο έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

(ERGOTEST)	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΡΑΥΞΕΩΝ ΠΥΡΗΝΩΝ GUNITE (ΑΟΠΛΟ)				(ΦΡΑΓΜΑ ΜΕΤΣΟΒΙΤΙΚΟΥ)	
ΚΩΔΙΚΟΣ	ΘΕΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	3 ΗΜΕΡΩΝ (Μpa)	7 ΗΜΕΡΩΝ (Μpa)	28 ΗΜΕΡΩΝ (Μpa)
119-1	ΠΡΑΝΕΣ	C20/25	12/5/2016	*	35,10	42,80
119-2	ΠΡΑΝΕΣ	C20/25		*	25,40	24,70
119-3	ΠΡΑΝΕΣ	C20/25		*	31,50	37,40
119-4	ΠΡΑΝΕΣ	C20/25		*	24,60	31,50
119-5	ΠΡΑΝΕΣ	C20/25		*	30,20	41,70
119-6	ΠΡΑΝΕΣ	C20/25		*	20,20	26,20
255-1	ΠΡΑΝΕΣ	C20/25	25/7/2016	15,30	22,80	29,10
255-2	ΠΡΑΝΕΣ	C20/25		17,10	21,90	29,30
255-3	ΠΡΑΝΕΣ	C20/25		*	26,20	27,20
261-1	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗ	C20/25	27/7/2016	15,90	23,50	30,40
261-2	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗ	C20/25		17,50	25,60	28,20
261-3	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗ	C20/25		*	26,40	27,20
261-4	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗ	C20/25		*	*	*
261-5	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗ	C20/25		*	*	*
261-6	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗ	C20/25		*	*	*
384-1	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗ	C20/25	25/10/2016	*	23,20	32,20
384-2	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗ	C20/25		*	20,50	31,00
384-3	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗ	C20/25		*	21,40	30,60
660-1	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+196 ΕΩΣ ΧΘ 0+268	C20/25	17/11/2017	15,90	17,20	28,80
660-2	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+196 ΕΩΣ ΧΘ 0+268	C20/25		15,60	16,90	29,70
660-3	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+196 ΕΩΣ ΧΘ 0+268	C20/25		14,10	17,70	28,90
660-4	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+196 ΕΩΣ ΧΘ 0+268	C20/25		*	*	*
660-5	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+196 ΕΩΣ ΧΘ 0+268	C20/25		*	*	*
660-6	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+196 ΕΩΣ ΧΘ 0+268	C20/25		*	*	*
1155-1	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΞΟΝΑΣ 5 (ΚΑΤΑΝΤΗ)	C20/25	1/8/2019	14,80	19,60	26,40
1155-2	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΞΟΝΑΣ 5 (ΚΑΤΑΝΤΗ)	C20/25		14,90	20,20	25,50
1155-3	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΞΟΝΑΣ 5 (ΚΑΤΑΝΤΗ)	C20/25		15,10	19,50	24,50
1156-1	ΠΡΑΝΕΣ	C20/25	27/8/2019	15,00	20,20	27,20
1156-2	ΠΡΑΝΕΣ	C20/25		13,80	21,30	26,60
1156-3	ΠΡΑΝΕΣ	C20/25		14,00	19,50	25,30

289-1	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗ	C30/37	9/8/2016	22,00	*	29,90
289-2	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗ	C30/37		23,20	*	31,30
289-3	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗ	C30/37		*	*	31,60
289-4	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗ	C30/37		*	*	30,90
318-1	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗ	C30/37	9/9/2016	*	27,20	40,60
318-2	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗ	C30/37		*	26,60	35,00
318-3	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗ	C30/37		*	*	37,50
701-1	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+207,30 ΕΩΣ ΧΘ 0+208,30	C30/37	11/1/2018	20,90	24,60	31,40
701-2	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+207,30 ΕΩΣ ΧΘ 0+208,30	C30/37		19,60	24,80	30,50
701-3	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+207,30 ΕΩΣ ΧΘ 0+208,30	C30/37		22,10	25,90	30,00
704-1	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+222,30 ΕΩΣ ΧΘ 0+223,30	C30/37	29/1/2018	20,90	24,50	28,90
704-2	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+222,30 ΕΩΣ ΧΘ 0+223,30	C30/37		19,50	24,10	29,60
704-3	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+222,30 ΕΩΣ ΧΘ 0+223,30	C30/37		21,40	21,90	31,30
709-1	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+240 ΕΩΣ ΧΘ 0+241	C30/37	21/2/2018	15,70	18,60	24,50
709-2	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+240 ΕΩΣ ΧΘ 0+241	C30/37		14,20	17,10	25,70
709-3	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+240 ΕΩΣ ΧΘ 0+241	C30/37		14,70	17,60	26,80
720-1	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+123 ΕΩΣ ΧΘ 0+125	C30/37	27/3/2018	17,90	20,20	25,20
720-2	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+123 ΕΩΣ ΧΘ 0+125	C30/37		19,90	20,80	27,40
720-3	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΧΘ 0+123 ΕΩΣ ΧΘ 0+125	C30/37		17,60	22,20	26,90

Πίνακας 31: Αποτελέσματα αντοχής σε θραύση άοπλου εκτοξευμένου σκυροδέματος από το εφαρμοσμένο υλικό στο Φράγμα του ΥΗΕ Μετσοβίτικου (Υλικό αρχείου ΔΕΗ ΑΕ)

8.4 Στοιχεία υποέργων με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Ιλαρίωνα, στην περιοχή της λεκάνης Ελάτης του ποταμού Αλιάκμονα

Η περιοχή του έργου βρίσκεται κοντά στον ποταμό Αλιάκμονα, νότια της πόλης της Κοζάνης και σε απόσταση περίπου 35 km από το κέντρο της. Γεωλογικά η περιοχή βρίσκεται στο δυτικό όριο της Πελαγονικής ζώνης και στο Ανατολικό όριο του Βούρινου. Η περιοχή του φράγματος και των σηράγγων που ανήκουν στο έργο αποτελείται γεωλογικά από τα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα της Πελαγονικής.

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
Τσιμεντ/σεν	Τσιμεντ/σεις - Αποστράγγιση	Έντονα Τεκτονισμένοι Ασβεστόλιθοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	1700	Ημικυκλικό	12,8	1995	ΥΗΕ Ιλαρίωνα	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	ΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Ε.
Εκχειλιστή	Υδραυλική	Ασβεστόλιθοι	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	119	Μεταβλητό	141-489	1995	ΥΗΕ Ιλαρίωνα	ΔΕΗ / ΔΑΥΕ	ΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Ε.

Πίνακας 32: Σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο ΥΗΕ Ιλαρίωνα

Οι υπόγειες εκσκαφές των σηράγγων πραγματοποιήθηκαν στο μεγαλύτερο μήκος τους σε κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους (μάρμαρα) και σε πιο περιορισμένη έκταση σε γνεύσιους και φυλλίτες.

Οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι χαρακτηρίζονταν από υψηλή αντοχή άρρηκτου βράχου (40-100 MPa) και ήταν παχυστρωματώδεις ως μηδενικής μη διακριτής στρωμάτωσης. Κατά θέσεις εμφανίστηκαν κερματισμένοι λόγω των παρακατακόρυφων ασυνεχειών τους. Εντός των κρυσταλλικών ασβεστολίθων παρουσιάζονταν καρστικά έγκοιλα, κατά περιοχή πληρωμένων με ιλουαργιλικά υλικά.

Στους γνεύσιους και φυλλίτες υπήρχε έντονη η παρουσία χαλαζία υψηλής σκληρότητας τόσο στον ιστό των πετρωμάτων όσο και με τη μορφή φλεβών στο εσωτερικό τους. Οι σχηματισμοί αυτοί χαρακτηρίζονταν μέτρια έως έντονα αποσαθρωμένοι, κυρίως κοντά στις ζώνες ρηγμάτων της περιοχής.

Στην τεχνικογεωλογική μελέτη των σηράγγων ορίστηκαν κατ'ελάχιστον τρεις (03) κατηγορίες γεωλογικών σχηματισμών με βαθμονομήσεις GSI κατά Hoek & Μαρίνος Π. (2000), συνεκτιμώντας τις μετρήσεις συγκλίσεων από κατάλληλα όργανα τοποθετημένα σε απόσταση μικρότερη από τρία (03) μέτρα από το μέτωπο εκσκαφής κάθε σήραγγας. Σε εντονότερες εναλλαγές σχηματισμών κατά μήκος των σηράγγων ορίστηκαν περισσότερες κατηγορίες γεωλογικών σχηματισμών.

Οι τρεις βασικές κατηγορίες γεωλογικών σχηματισμών για τη σήραγγα εκχειλιστή του έργου παρατίθενται παρακάτω:

- **ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ Ι:**

Συνθήκες πετρώματος: συμπαγείς ως μέτρια κερματισμένοι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι (μάρμαρα) με πιθανή παρουσία περιορισμένων διαστάσεων καρστικών έγκοιλων, πληρωμένων ή μη. Υγιείς ως ελαφρά αποσαθρωμένοι γνεύσιμοι, συμπαγείς έως μέτρια κερματισμένοι. Σε ανυποστήρικτη διατομή παρατηρήθηκαν μεμονωμένες καταπτώσεις σφηνών μικρού μεγέθους, κυρίως από την οροφή, εάν το προκαλούσε ο προσανατολισμός των ασυνεχειών και η ταυτόχρονη παρουσία υδάτων.

Πιέσεις-παραμορφώσεις πετρώματος: Αντοχή πετρώματος σημαντικά μεγαλύτερη από τις πιέσεις στην περίμετρο εκσκαφής, ασήμαντες παραμορφώσεις, ασήμαντες πλευρικές τάσεις, μηδενική έως ελάχιστη σύγκλιση.

Ενδεικτική τιμή δείκτη GSI: Μεγαλύτερη του 50

Βήμα προχώρησης: 3 m

• **ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ II:**

Συνθήκες πετρώματος: κερματισμένοι ή με παρουσία, πληρωμένων ή μη, καρστικών έγκοιλων κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι. Υγιείς ως ελαφρά αποσαθρωμένοι φυλλίτες. Μέτρια αποσαθρωμένοι και κερματισμένοι γνεύσιοι. Κατά την εκσκαφή παρατηρήθηκε χαλάρωση του πετρώματος στην περίμετρο της διατομής καθώς και μικρές καταπτώσεις τεμαχών βράχου. Η παρουσία υδάτων ευνόησε τις τοπικές αστάθειες και αποκολλήσεις τεμαχών στην οροφή και στις παρειές των σηράγγων.

Πιέσεις-παραμορφώσεις πετρώματος: Αντοχή πετρώματος σχεδόν ίση με τις πιέσεις στην περίμετρο εκσκαφής, μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις.

Ενδεικτική τιμή δείκτη GSI: 30- 50

Βήμα προχώρησης: ≤ 2 m

• **ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ III:**

Συνθήκες πετρώματος: Κατακερματισμένοι ή με παρουσία, πληρωμένων ή μη, μεγάλων καρστικών έγκοιλων κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι. Υγιείς ως ελαφρά αποσαθρωμένοι φυλλίτες. Έντονα αποσαθρωμένοι και κερματισμένοι γνεύσιοι ή φυλλίτες. Ζώνες ρηγμάτων ή μεγάλων καρστικών έγκοιλων. Κατά την εκσκαφή παρατηρήθηκε χαλάρωση και ρωγμάτωση του πετρώματος σε όλη την περίμετρο της διατομής καθώς και καταπτώσεις τεμαχών βράχου. Η παρουσία υδάτων ευνόησε τις τοπικές αστάθειες και αποκολλήσεις τεμαχών στην οροφή και στις παρειές των σηράγγων.

Πιέσεις-παραμορφώσεις πετρώματος: Αντοχή πετρώματος σημαντικά μικρότερη από τις αναπτυσσόμενες τάσεις στην περίμετρο εκσκαφής, μεγάλες παραμορφώσεις.

Ενδεικτική τιμή δείκτη GSI: <30

Βήμα προχώρησης: ≤ 1 m

Η εκσκαφή του μεγαλύτερου μέρους της Σήραγγας Εκχειλιστή No 1 πραγματοποιήθηκε εντός των φυλλιτών με χρήση εξοπλισμού κοπής τύπου Road Header, ενώ σε άλλα τμήματα με χρήση εκρηκτικών και συνδυασμό μηχανικών μέσων (εντός ασβεστολίθων).

Στα κεκλιμένα τμήματα της εν λόγω σήραγγας ακολουθήθηκε η μέθοδος διάνοιξης φρεάτων με προδιάνοιξη φρέατος-πιλότου εντός της τελικής διατομής εκσκαφής με χρήση κατάλληλων μεθόδων διάνοιξης, όπως για παράδειγμα με χρήση της μεθόδου Raise Boring. Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνθηκε η δια βαρύτητας αποκομιδή των προϊόντων εκσκαφής.

Στο συγκεκριμένο ΥΗΕ, η χάραξη των σηράγγων βρέθηκε σε όλο το μήκος της επάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα και για αυτό το λόγο δεν υπήρξαν ιδιαίτερα προβλήματα εισροών υδάτων εντός των διατομών εκσκαφής κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Μικρές εισροές υδάτων έλαβαν χώρα στις περιπτώσεις μικρών επικρεμάμενων οριζόντων ή θυλάκων ύδατος ή ακόμη και σε περιόδους έντονων βροχοπτώσεων κυρίως στην κατηγορία πετρώματος III. Στην ίδια κατηγορία είχε τεθεί ως ιδιαίτερη απαίτηση το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα να καλύπτει τόσο τα μεταλλικά πλαίσια, όπου χρειαζόνταν να τοποθετηθούν, στο σύνολο της επιφάνειας διατομής.

Λόγω των μικρών διαστάσεων ανοίγματος των σηράγγων που κατασκευάστηκαν, η εκσκαφή πραγματοποιήθηκε σε πλήρη διατομή, εκτός από εξαιρέσεις στα Σχέδια Μελέτης όπου προέβλεπαν συγκεκριμένες κατά τόπους διευρύνσεις διατομής. Όλες οι εκσκαφές πραγματοποιήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε οι περιμετρικές επιφάνειες των περαιωμένων εκσκαφών ήταν ομαλές και ανταποκρίνονταν στις καθορισμένες ελάχιστες γραμμές εκσκαφής των εγκεκριμένων σχεδίων του έργου.

Σχετικά με την πραγματοποίηση εκσκαφών με εκρηκτικά, απαγορευόταν η χρήση τους σε απόσταση μικρότερη από 7,5 m από οποιοδήποτε σκυρόδεμα ηλικίας μικρότερης από επτά (07) ημέρες. Καταγράφονταν οι προκαλούμενες δονήσεις από τις εκρήξεις, οι οποίες πραγματοποιούνταν με μέγιστη ταχύτητα 5 mm/sec σε

περίπτωση σημείου πλησίον σκυροδέματος ηλικίας μικρότερης από επτά (07) ημέρες και με ταχύτητα 10 mm/sec πλησίον λοιπών περιπτώσεων σκυροδεμάτων. Τα παραπάνω δεν ίσχυαν σχετικά με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που τοποθετούνταν για την άμεση υποστήριξη των εκσκαφών.

Οι πραγματοποιούμενες εκσκαφές σε κάθε περίπτωση ελέγχονταν με λήψη δοκιμών σε αποστάσεις μεταξύ τους μέχρι 3 m και όσο το δυνατόν πιο κοντά στο μέτωπο εκσκαφής και πάντα πριν την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Λαμβάνονταν δοκίμια από 6 σημεία στην οροφή και από 4 σε κάθε παρειά της εκσκαφής.

Πριν τη έναρξη των υπόγειων εκσκαφών ολοκληρώνονταν όλες οι υπαίθριες εκσκαφές στις θέσεις των στομίων και είχαν εγκατασταθεί όλα τα απαραίτητα μέτρα υποστήριξης των πρανών. Στα στόμια των σηράγγων είχαν τοποθετηθεί προστατευτικά προπλάισια μπροστά από κάθε μέτωπο προσβολής. Τα εν λόγω πλαίσια ήταν από χάλυβα και επικαλύπτονταν από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Κατά την κύρια εκσκαφή και προχώρηση, εκτελούνταν γεωτρήσεις προπορείας στο κέντρο του πλέον προωθημένου μετώπου των σηράγγων στις περιπτώσεις δυσμενών γεωλογικών συνθηκών, εκτόνωσης αερίων, υδάτων υπό πίεση κτλ, υπέρ της ασφαλείας. Συγκεκριμένα για την απομάκρυνση υδάτων που συσσωρεύονταν στο μέτωπο εκσκαφής, πραγματοποιούνταν αντλήσεις προς τον τελικό αποδέκτη τους. Ανάμεσα στον τελικό φυσικό αποδέκτη και στα σημεία άντλησης των υδάτων από το εσωτερικό των σηράγγων παρεμβαλλόταν δεξαμενή καθίζησης για τον σχετικό καθαρισμό των υδάτων από έλαια μηχανημάτων και άλλους ρύπους που ενδεχομένως περιείχαν.

Η νομοθεσία με βάση την οποία συντάχθηκαν τα συμβατικά τεύχη και η Διακήρυξη του έργου και κατά την οποία αυτό εκτελέστηκε ήταν η εξής:

- Π.Δ. 1073/16.09.1981 «Περί μέτρων ασφαλείας κατά την εκτέλεση εργασιών εις εργοτάξια οικοδομικών και πάσης φύσεως έργων Πολιτικού Μηχανικού»
- ΦΕΚ 931B/31.12.1984, Π.Δ. 252/89 «Κανονισμός Μεταλλευτικών και Λατομικών εργασιών»
- ΦΕΚ 106B/02.05.1989 «Περί υγιεινής και ασφάλειας στα Υπόγεια Τεχνικά έργα»
- ΦΕΚ 59B/11.05.1965 «Κανονισμός Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων»
- ΦΕΚ 239B/11.05.1963
- ΦΕΚ 212A/29.08.1996, Π.Δ. 305/96 «Ελάχιστες προδιαγραφές ασφαλείας και υγείας που πρέπει να εφαρμόζονται στα προσωρινά ή κινητά εργοτάξια, σε συμμόρφωση προς τα παρακάτω σχετικά: την οδηγία 92/57/ΕΟΚ, σε συνδυασμό με την υπ.αριθμ.130159/07.05.1997 εγκύκλιο του Υπουργείου εργασίας και την εγκύκλιο 11 του ΥΠΕΧΩΔΕ (ΑΡ.ΠΡΩΤ. Δ16α/165/10/258/Α.Φ./19.05.1997)

Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας ήταν η εκτενής αναφορά των βασικών τεχνικών χαρακτηριστικών του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ινοπλισμένου και μη, οι αρχές σχεδιασμού της σύστασης του μείγματος υλικού και των έργων στα οποία αυτό εφαρμόζεται καθώς και η εκτεταμένη έρευνα του συνόλου των υπόγειων έργων στον Ελλαδικό χώρο, στα οποία εφαρμόζεται ως μόνιμη επένδυση. Η βάση δεδομένων που συντάχθηκε αντιστοιχίζεται σε υπόγεια έργα, στα οποία χρησιμοποιήθηκε το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως μόνιμη επένδυση, που στον Ελλαδικό χώρο αντιστοιχίζονται κυρίως στα υπόγεια έργα της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού Α.Ε. (ΔΕΗ ΑΕ), χωρίς αυτό να συνεπάγεται ότι δεν υπήρξαν χαρακτηριστικά παραδείγματα αντίστοιχων έργων και σε χώρες του εξωτερικού.

Συγκεκριμένα, η παγκόσμια ιστορία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ξεκινά από το 1907 και διαγράφει μία μακρά πορεία ανά τα χρόνια στον κατασκευαστικό κλάδο αποδεικνύοντας τα πολλαπλά οφέλη και τη συνεχή εξέλιξη τόσο των μηχανικών του χαρακτηριστικών όσο και του τρόπου και χρόνου εφαρμογής του. Ο σύντομος χρόνος και ο εύκολος τρόπος εφαρμογής με τη μέθοδο της εκτόξευσης, η βελτίωση των ιδιοτήτων του και κυρίως η αύξηση της δυσθραυστότητάς του δομικού υλικού με την ενσωμάτωση ινών οδήγησε στην ευρύτερη και συχνότερη εφαρμογή του συν τω χρόνω.

Στα πρώτα βήματα σχεδιασμού της μόνιμης επένδυσης υπόγειων έργων, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόστηκε σε μία στρώση για μικρά ανοίγματα και υδατοστεγανούς σχηματισμούς και σε δύο στρώσεις για πιο απαιτητικές συνθήκες υποστήριξης. Στις μέρες μας πλέον, υπάρχει η δυνατότητα πολλαπλών στρώσεων επένδυσης σε συνδυασμό με την εφαρμογή υδατοστεγανών μεμβρανών, χρήση πρόσμικτων και ενσωμάτωση ινών από χάλυβα ή από συνθετικά υλικά, ενώ έχουν θεσπιστεί και εφαρμόζονται Κανονισμοί και Πρότυπα, τόσο σε επίπεδο εργαστηριακών δοκιμών όσο και σε επίπεδο εφαρμογής του υλικού στα τεχνικά έργα (EN 14651, EN14487-1, κ.α.). Ο σχεδιασμός μόνιμης υποστήριξης βράχου για τις σήραγγες που χρησιμοποιήθηκε το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα βασιζόταν σε συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας, όπως το σύστημα αξιολόγησης βραχώμαζας (RMR), που αναπτύχθηκε από τον Bieniawski και η μέθοδος Q, από τους Barton et al. Οι παραπάνω μέθοδοι ήταν εμπειρικές, βασισμένες σε αποτελέσματα από συγκεκριμένα παραδείγματα έργων, ενώ το βασικότερο σημείο που υπολείπονταν ήταν το γεγονός ότι αδυνατούσαν να παράσχουν αποτελέσματα σχετικά με την ενέργεια απορρόφησης και την παραμένουσα αντοχή σε κάμψη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Εργαστηριακές δοκιμές σε συνδυασμό με στοιχεία από τις παραπάνω εμπειρικές μεθόδους έδωσαν ακριβέστερα αποτελέσματα για το σχεδιασμό, όπως για παράδειγμα το βέλτιστο πάχος στρώσης σκυροδέματος της επένδυσης.

Επόμενο βήμα στο σχεδιασμό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος υπήρξε η χρήση αναλυτικών εξισώσεων, η οποία όμως μειονεκτεί στο ότι παρουσιάζει υψηλή διασπορά στα αποτελέσματα και καταλήγει σε συντηρητικές τιμές για την παραμένουσα αντοχή σε κάμψη του υλικού, με αποτέλεσμα έναν κοστοβόρο σχεδιασμό και ένα υψηλό αποτύπωμα άνθρακα.

Ωστόσο, ελάχιστες είναι οι περιπτώσεις αστοχίας σηράγγων με επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι εμπειρικές μέθοδοι οδηγούν κατά βάση σε ασφαλή σχεδιασμό. Στην Ελλάδα, δεν έχει καταγραφεί αστοχία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στα Υδροηλεκτρικά Έργα της ΔΕΗ ΑΕ, ενώ στο εξωτερικό υπήρξαν μεμονωμένες περιπτώσεις που έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία, όπως για παράδειγμα στη σήραγγα Hannekleiv, στη Νορβηγία.

Ορόσημο στην ιστορία της ποιοτικής εξέλιξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αποτέλεσε η έναρξη ενσωμάτωσης ινών, αυξάνοντας την εφελκυστική του αντοχή, την ανοχή του σε παραμόρφωση, τη δυσθραυστότητά του και την αντίστασή του στην επέκταση της ρωγμάτωσης.

Συγκεκριμένα, διαπερνώντας οι ίνες τις αρχικές μικρορωγμές στο εσωτερικό του σκυροδέματος και λόγω της πρόσφυσης που αναπτύσσεται στις διεπιφάνειες επαφής τους με το σκυρόδεμα, αναπτύσσεται ένα πεδίο τάσεων που αντιτίθεται στις συγκεντρωμένες τάσεις γύρω από τις ασυνέχειες, οπότε και αναστέλλει τη διάδοση και τη διαστολή των τελευταίων εντός του σκυροδέματος. Επιπλέον, την επίδραση των ινών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα επηρεάζει το μέγεθος και το σχήμα τους.

Από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν (Yang et al, 2024) εξάχθηκαν διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης, για διάφορους τύπους ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος από τα οποία μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για το ίδιο επιβαλλόμενο φορτίο, τη μικρότερη παραμόρφωση εμφανίζει ο τύπος σκυροδέματος χωρίς την ενσωμάτωση ινών στο εσωτερικό του μείγματος ή το υλικό με ενσωματωμένες ίνες άνθρακα, ενώ τη μεγαλύτερη παραμόρφωση – άρα και ολκιμότητα - εμφανίζει ο τύπος με ενσωματωμένες χαλύβδινες ίνες. Επίσης, η ίδια παραμόρφωση αναπτύσσεται για μικρότερο επιβαλλόμενο φορτίο στον τύπο σκυροδέματος με ενσωματωμένες χαλύβδινες ίνες. Όλα τα παραπάνω καθιστούν εμφανή την επίδραση των ινών στην αύξηση της ολκιμότητας και της δυσθραυστότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Ένα επιπλέον στοιχείο του ρόλου των ινών αποτελεί η ικανότητά τους να εμποδίσουν αποτελεσματικά τη συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, το σκυρόδεμα, που περιέχει συγκεκριμένο ποσοστό όγκου 1,5% χαλύβδινων ινών εμφανίζει ένα χαρακτηριστικό ποσοστό συστολής ξήρανσης σε διαφορετικές ηλικίες σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα και η ικανότητά του να μειώσει τη συστολή ξήρανσης μπορεί να αυξηθεί περίπου 20%.

Η μελέτη του μηχανισμού της παρουσίας των ινών στο εσωτερικό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος βασίστηκε σε δύο θεωρίες, τη θεωρία της σύνθετης μηχανικής και της απόστασης ινών. Η θεωρία της σύνθετης μηχανικής εξετάζει την περίπτωση της θεώρησης μόνιμα και ομοιόμορφα διατεταγμένων ινών παράλληλων και ευθυγραμμισμένων με την κατεύθυνση της επιβαλλόμενης τάσης.

Η θεωρία της απόστασης ινών θεωρεί το σκυρόδεμα ισότροπο και ομοιογενές υλικό με ομοιόμορφη τυχαία κατανομή ινών και εξετάζει την απόσταση μεταξύ τους ως παράγοντα που επηρεάζει το μηχανισμό ενίσχυσης του σκυροδέματος από αυτές. Η απόσταση μεταξύ των ινών επηρεάζει τη μεταφορά τάσεων και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Και οι δύο θεωρήσεις εξηγούν την ενισχυτική επίδραση των ινών χάλυβα στο σκυρόδεμα από διαφορετικές οπτικές γωνίες, αλλά τα συμπεράσματά τους είναι ποιοτικά όμοια (Yang et al, 2024).

Συμπεραίνοντας από τα παραπάνω τον ενισχυτικό ρόλο των ινών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, εξάγεται το συμπέρασμα ότι δύνανται να αντικαταστήσουν ένα τμήμα του οπλισμού με χάλυβα που απαιτείται στις κατασκευές και επομένως να συμβάλλουν στη μείωση του κόστους των τεχνικών έργων. Παρόλα αυτά παραμένει επιτακτική ανάγκη η συνδυαστική ενσωμάτωση μικρής ποσότητας ράβδων οπλισμού από χάλυβα κυρίως σε συγκεκριμένα σημεία της διατομής μόνιμης επένδυσης σήραγγας λόγω της ανομοιόμορφης πρακτικά κατανομής των χαλύβδινων ινών. Δυστυχώς, δεν έχουν συνταχθεί και εγκριθεί πρότυπα αναφοράς, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη συνεχή παρακολούθηση της ομοιομορφίας του υλικού του ινοπλισμένου σκυροδέματος στη διαδικασία εφαρμογής του και κυρίως στην ενίσχυση των ασθενέστερων σημείων των κατασκευαστικών αρμών έναντι σεισμικής φόρτισης.

Η αρχική σύνθεση και ο σχεδιασμός του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος δεν είναι οι μόνοι παράγοντες όμως που θα καθορίσουν τη συμπεριφορά του υλικού σε ένα τεχνικό έργο. Κυρίαρχο ρόλο στο χρόνο ζωής του υλικού διαδραματίζουν και οι διαβρωτικοί παράγοντες επηρεάζοντας αρχικά την προσωρινή επένδυση που βρίσκεται σε επαφή με το βράχο και στη συνέχεια και τη μόνιμη, επομένως και καθορίζουν τη συμπεριφορά του υλικού συν τω χρόνω. Στα πλαίσια της μελέτης της χρονο-εξαρτώμενης συμπεριφοράς του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος, θα πρέπει με βεβαιότητα να ληφθούν υπόψη όλοι εκείνοι οι παράγοντες που επιδρούν σε αυτή και συγκεκριμένα ο τρόπος εφαρμογής- εκτόξευσης που καθορίζει και τις πιέσεις που δέχεται το νωπό υλικό, η χρήση επιταχυντών και επιβραδυντών, τα χαρακτηριστικά και το ποσοστό υγρασίας της επιφάνειας εφαρμογής του υλικού, οι παραμορφώσεις και οι ασυνέχειες του υλικού της βραχόμαζας, που μπορούν και να αποτελέσουν την αιτία της αύξησης του ποσοστού υγρασίας πέριξ και εντός του υλικού του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Στα υπόγεια έργα, βασικό παράγοντα επιρροής του υλικού αποτελούν οι συνθήκες ωρίμανσής του, που δύνανται να αποτελέσουν αιτία διάβρωσης από θειικά ή από ονομοιογενή ενυδάτωση του υλικού. Η ανομοιομορφη παρουσία υδάτων και άλλοι διαβρωτικοί παράγοντες μπορούν να οδηγήσουν σε πολλαπλά φαινόμενα εξαλλοίωσης του υλικού με τα αντίστοιχα αποτελέσματα στα μηχανικά του χαρακτηριστικά και στη συμπεριφορά του συν τω χρόνω. Πιο συγκεκριμένα, η έκπλυση, η ενανθράκωση, η διάβρωση από θειικά, η διαδικασία υποβολής του υλικού σε κύκλους ψύξης-απόψυξης, η ηλεκτροχημική διάβρωση, η συστολή ξήρανσης και η ρωγμάτωση είναι μερικά από τα δυσμενή αποτελέσματα που υποβιβάζουν την ποιότητα του υλικού και μειώνουν το χρόνο ζωής ενός υπόγειου τεχνικού έργου.

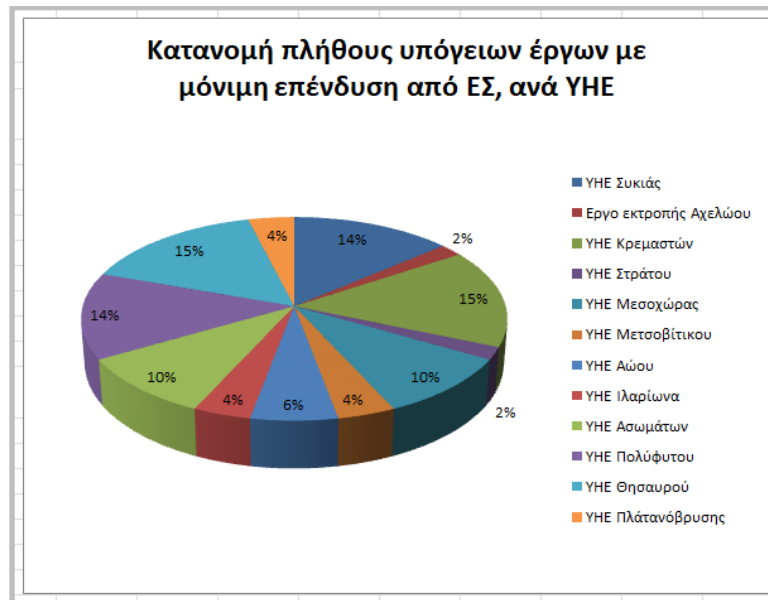
Επομένως οι περισσότεροι διαβρωτικοί παράγοντες σχετίζονται άμεσα με μεταβολές περιβαλλοντικών συνθηκών και δυσμενείς συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή του υπόγειου έργου, καθώς και με την αρχική σύσταση του μείγματος του υλικού (πορώδες, πρόσμικτα, λόγο νερού προς τσιμέντο, είδος ενσωματωμένων ινών, κα). Εκτός από τη φυσική έκθεση σε διαβρωτικούς παράγοντες, υφίστανται και οι ανθρωπογενείς αιτίες, όπως για παράδειγμα η επέκταση μίας πυρκαγιάς. Για την περίπτωση του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος, οι ίνες από πολυμερισμένο υλικό δημιουργούν ένα δίκτυο μικρορωγμών στην πήξη όπου και χρησιμεύει για την εκτόνωση της πίεσης υπό συνθήκες πυρκαγιάς. Αξίζει να αναφερθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις υφιστάμενων σηράγγων έχει εφαρμοστεί αυτού του είδους στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως πυροπροστασία.

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε για τον Ελλαδικό χώρο, όπως προαναφέρθηκε στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, είχε σκοπό ως πρώτο βήμα να συλλέξει όσο το δυνατόν περισσότερα στοιχεία για την παρουσία του ινοπλισμένου ή μη εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μόνιμη επένδυση στις σήραγγες. Η εξεύρεση τέτοιου είδους έργων στα Υδροηλεκτρικά έργα της ΔΕΗ, απέδωσε χρήσιμα στοιχεία όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μόνιμη επένδυση σηράγγων, σε συνδυασμό με τους γεωλογικούς σχηματισμούς που συναντήθηκαν στις περιοχές εκσκαφής τους.

Πιο συγκεκριμένα και μελετώντας την παρούσα βάση δεδομένων που συντάχθηκε εξάγουμε το συμπέρασμα ότι η γεωγραφική κατανομή (Εικόνα 29) των έργων, όπου και συνδέεται άμεσα και με το γεωλογικό χάρτη της Ελλάδας, διαμορφώνεται ως εξής:

ΥΠΕ ΕΡΓΟ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΥΠΟΕΡΓΩΝ ΜΕ ΜΟΝΙΜΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΑΠΟ ΕΣ	ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ
ΥΠΕ Συκιάς	7	Ηπειρωτική Ελλάδα
Εργο εκτροπής Αχελώου	1	Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΠΕ Κρεμαστών	8	Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΠΕ Στράτου	1	Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΠΕ Μεσοχώρας	5	Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΠΕ Μετσοβίτικου	2	Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΠΕ Αώου	3	Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΠΕ Ιλαρίωνα	2	Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΠΕ Ασωμάτων	5	Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΠΕ Πολύφυτου	7	Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΠΕ Θησαυρού	8	Βόρεια Ελλάδα
ΥΠΕ Πλάτανόβρυσης	2	Βόρεια Ελλάδα

Πίνακας 33: Κατανομή πλήθους υπόγειων έργων με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ανά ΥΠΕ

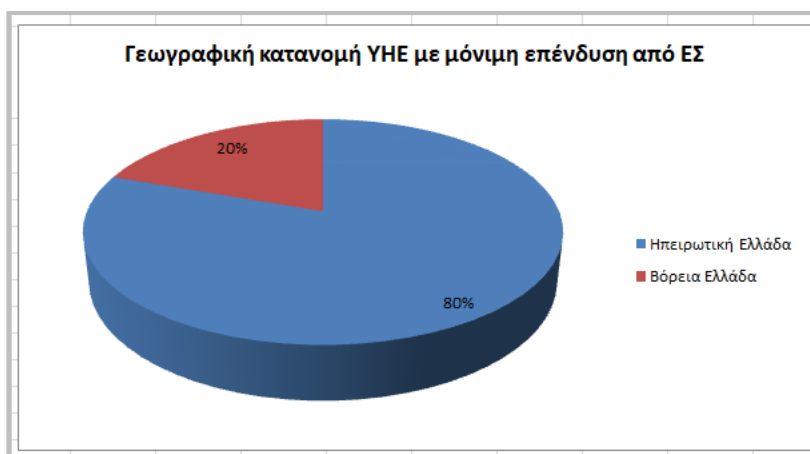


Εικόνα 107: Διάγραμμα κατανομή πλήθους υπόγειων έργων με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ανά ΥΠΕ

Παρατηρούμε ότι περίπου το 80% των έργων τοποθετείται στην κυρίως Ηπειρωτική Ελλάδα, με μόνο το 20% περίπου στη Βόρεια Ελλάδα.

ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΥΠΟΕΡΓΩΝ ΜΕ ΜΟΝΙΜΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΑΠΟ ΕΣ
Ηπειρωτική Ελλάδα	41
Βόρεια Ελλάδα	10

Πίνακας 34: Ποσοστιαία γεωγραφική κατανομή ΥΠΕ με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



Εικόνα 108: Διάγραμμα ποσοστιαίας γεωγραφικής κατανομής ΥΗΕ με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Το σύνολο των έργων διανοίχθηκε με συμβατικές μεθόδους διατρήσεων και ανατινάξεων ενώ η κατανομή των γεωλογικών σχηματισμών είχε ως εξής:

ΥΗΕ ΕΡΓΟ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΥΠΟΕΡΓΩΝ ΜΕ ΜΟΝΙΜΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΑΠΟ ΕΣ	Κύριος γεωλογικός σχηματισμός	ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ
ΥΗΕ Συκιάς	7	ασβεστόλιθος	Ηπειρωτική Ελλάδα
Εργο εκτροπής Αχελώου	1	λυόλιθος/ασβεστόλιθος	Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΗΕ Κρεμαστών	8	λυόλιθος	Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΗΕ Στράτου	1	φλύσχης	Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΗΕ Μεσοχώρας	5	λυόλιθος/ασβεστόλιθος	Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΗΕ Μετσοβίτικου	2	κροκαλοπαγή	Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΗΕ Αώου	3	ψαμμίτης	Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΗΕ Ιλαρίωνα	2	ασβεστόλιθος	Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΗΕ Ασωμάτων	5	σερπετινίτης/βασάλτης	Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΗΕ Πολύφυτου	7	γρανιτογενεύσιος	Β. Ηπειρωτική Ελλάδα
ΥΗΕ Θησαυρού	8	γενεύσιος	Βόρεια Ελλάδα
ΥΗΕ Πλάτανόβρυσης	2	γρανιτογενεύσιος	Βόρεια Ελλάδα

Πίνακας 35: Κατανομή γεωλογικών σχηματισμών μέσω των οποίων διανοίχθηκαν οι σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Παρατηρούμε ότι στην κυρίως Ηπειρωτική Ελλάδα η διάνοιξη των σηράγγων με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνάντησε κυρίως ασβεστόλιθο και ιλυόλιθο. Ο ασβεστόλιθος αποτελεί γεωλογικό σχηματισμό ικανοποιητικών αντοχών αλλά η παρουσία νερού δύναται να τον μετατρέψει σε καρστ και να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα αστάθειας τόσο κατά την εκσκαφή όσο και κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής του έργου, επομένως και της μόνιμης επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Ο ιλυόλιθος αποτελεί ένα υλικό με εν γένει μειωμένες μηχανικές ιδιότητες. Στη Βόρεια Ελλάδα συναντώνται γεωλογικοί σχηματισμοί με αυξημένες αντοχές (γνεύσιοι και γρανιτογνεύσιοι), αλλά σαφώς πιο ψαθυροί, με κίνδυνο απότομων θραύσεων και αστοχιών.

Τα ενδεχόμενα προβλήματα που θα μπορούσε να δημιουργήσει η παρουσία των εν λόγω σχηματισμών στα υπόγεια έργα που επενδύθηκαν με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι άλλη μία απόδειξη της επιτυχημένης παρουσίας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μόνιμη επένδυση σε αυτά.

Όσον αφορά το εμβαδόν διατομής εκσκαφής, επομένως και του ωφέλιμου εμβαδού χρήσης, παρατηρήθηκε ότι κατασκευάστηκαν σήραγγες μικρής σχετικά διατομής εμβαδού περίπου μέχρι και 10 m^2 (π.χ. αποστραγγιστικές), αλλά και σήραγγες μεγάλης διατομής ακόμη και εμβαδού 110 m^2 (π.χ. η σήραγγα προσπέλασης θαλάμου ανάπασης του ΥΗΕ Θησαυρού στη Θράκη). Το εύρος μεταβολής του ανοίγματος διατομής της σήραγγας, επομένως και οι απαιτήσεις της μόνιμης επένδυσης, αποδεικνύουν επανειλημμένα την ευελιξία και την επιτυχημένη ανταπόκριση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ως υλικό μόνιμης επένδυσης.

Συγκεκριμένα, μία κατανομή εύρους εμβαδού ανοίγματος διατομής για τις σήραγγες που φέρουν ως μόνιμη επένδυση εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει ως εξής:

ΥΠΕΡΓΩΝ	ΕΥΡΟΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΜΕ ΜΟΝΙΜΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΑΠΟ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ (m ²)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΥΠΟΕΡΓΩΝ ΜΕ ΜΟΝΙΜΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΑΠΟ ΕΣ ΕΝΤΟΣ ΕΥΡΟΥΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ
ΥΠΕΡΓΩΝ ΣΥΚΙΑΣ	0-10	0
	10-50	5
	50-100	2
	100-120	0
Εργο εκτροπής Αχελώου	0-10	0
	10-50	1
	50-100	0
ΥΠΕΡΓΩΝ ΚΡΕΜΑΣΤΩΝ	0-10	8
	10-50	0
	50-100	0
	100-120	0
ΥΠΕΡΓΩΝ ΜΕΣΟΧΩΡΑΣ	0-10	1
	10-50	2
	50-100	2
	100-120	0
ΥΠΕΡΓΩΝ ΜΕΤΣΟΒΙΤΙΚΟΥ	0-10	0
	10-50	2
	50-100	0
	100-120	0
ΥΠΕΡΓΩΝ ΑΪΟΥ	0-10	0
	10-50	5
	50-100	0
	100-120	0
ΥΠΕΡΓΩΝ ΙΛΑΡΙΩΝΑ	0-10	0
	10-50	1
	50-100	0
	100-120	1
ΥΠΕΡΓΩΝ ΑΣΩΜΑΤΩΝ	0-10	0
	10-50	5
	50-100	0
	100-120	0
ΥΠΕΡΓΩΝ ΘΗΣΑΥΡΟΥ	0-10	1
	10-50	4
	50-100	1
	100-120	2
ΥΠΕΡΓΩΝ ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗΣ	0-10	0
	10-50	2
	50-100	0
	100-120	0

Πίνακας 36: Κατανομή ανοίγματος διατομής σε σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Συνολικά στην πλειοψηφία των σηράγγων που εξετάζουμε η κατανομή του εύρους διατομής έχει ως εξής:

ΕΥΡΟΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΜΕ ΜΟΝΙΜΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΑΠΟ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ (m ²)	ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΥΠΟΕΡΓΩΝ ΜΕ ΜΟΝΙΜΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΑΠΟ ΕΣ ΕΝΤΟΣ ΕΥΡΟΥΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ
0-10	2
10-50	25
50-100	5
100-120	3

Πίνακας 37: Συνολική κατανομή ανοίγματος διατομής σε σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της βοηθητικής κατασκευαστικής σήραγγας στο ΥΗΕ Στράτου που κατασκευάστηκε με μεταβλητό άνοιγμα διατομής κατά μήκος του άξονα της σήραγγας.



Εικόνα 109: Διάγραμμα συνολικής κατανομής ανοίγματος διατομής σε σήραγγες με μόνιμη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Χαρακτηριστικό της επιτυχημένης εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μόνιμη επένδυση στις σήραγγες που εξετάζουμε είναι ότι παρά τις διαφορετικές περιπτώσεις εφαρμογής, επομένως και των διαφορετικών κατασκευαστικών απαιτήσεων, αναφερόμαστε σε έργα που κατασκευάστηκαν στο σύνολό τους στο διάστημα των ετών 1973-1996. Η ευελιξία και η επιτυχημένη εφαρμογή του υλικού αποδεικνύεται από τις διαφορετικές απαιτήσεις των έργων ως προς την μόνιμη επένδυση, καθώς και από το γεγονός ότι μέχρι σήμερα δεν έχουν σημειωθεί αστοχίες υλικού. Έκτοτε, έχοντας ήδη παρέλθει το διάστημα των 20 χρόνων από την κατασκευή αυτών των έργων και λαμβάνοντας υπόψη ότι γίνονται στον επιστημονικό χώρο προσπάθειες για τη βελτίωση της τεχνολογίας του υλικού, καθίσταται απόλυτα σαφές ότι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ινοπλισμένο ή μη, αποτελεί αποδεδειγμένα ένα υλικό με υψηλές προδιαγραφές όσον αφορά την εφαρμογή του στη μόνιμη επένδυση υπόγειων έργων.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα συγκεκριμένα έργα μας παρέχουν πληροφορίες των μηχανικών ιδιοτήτων, των τεχνικών χαρακτηριστικών και προδιαγραφών και του τρόπου σχεδιασμού και εφαρμογής του υλικού του εκτοξευμένου σκυροδέματος, με επιτυχημένη εκ των πραγμάτων ανταπόκριση στις απαιτήσεις της μόνιμης επένδυσής τους συν τω χρόνω, αποτελούν τη βάση δεδομένων για μελλοντικές επιμετρήσεις, εργαστηριακές δοκιμές και εκ νέου εφαρμογές του υλικού αυτού.

Πιο συγκεκριμένα, η κοκκομετρική διαβάθμιση και οι αντίστοιχες κοκκομετρικές καμπύλες που αναφέρονται και στο κεφάλαιο 7.10.1 της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, όριζαν την σύνθεση του μείγματος με κυρίως λεπτόκοκκα αδρανή ώστε να αποφεύγεται η αναπήδηση κατά την εφαρμογή και να εξασφαλίζεται η σωστή ανάμειξη και ροή του υλικού κατά την εκτόξευση. Η σύσταση του υλικού, καθώς και η ποσοτική αναλογία των πρόσμικτων ακολουθούσαν το Πρότυπο ASTM C-494. Στις σήραγγες χρησιμοποιήθηκε κυρίως σκυρόδεμα κατηγορίας 2, με μέγιστο πάχος στρώσης 5 cm. Σε επίπεδες ή ελαφρά κεκλιμένες επιφάνειες, το μέγιστο πάχος κάθε στρώσης ήταν 9 cm. Ο λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T) εκτοξευόμενου σκυροδέματος επί τόπου κυμαινόταν 0,32 έως 0,45.

Οι αναλογίες τσιμέντου αδρανών και πρόσμικτου στο μείγμα κάθε κατηγορίας ικανοποιούσαν τον Κανονισμό ACI 214, ώστε να επιτυγχάνεται ελάχιστη αντοχή σε θραύση του μη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος 30 MPa στις 28 ημέρες.

Οι δοκιμές για την επαλήθευση της ποιότητας του υλικού ακολουθούσαν αυστηρά τις Προδιαγραφές κατά ASTM C – 192 και όριζαν τη θραύση 3 δοκιμών στις 8 ώρες, 1 δοκιμίου στις 3 ημέρες, 2 δοκιμών στις 7 ημέρες και 3 δοκιμών στις 28 ημέρες. Κατά περίπτωση, ακολουθούσαν η θραύση λίγο περισσότερων δοκιμών για επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Οι δοκιμές αντοχής των δοκιμών σε εφελκυσμό και κάμψη πραγματοποιούνταν σύμφωνα με το Πρότυπο ASTM 1018-85.

Όσον αφορά τον εξοπλισμό εφαρμογής, αυτός ικανοποιούσε τις απαιτήσεις πλήρους ανάμειξης του μείγματος με τα πρόσμικτα πριν την εκτόξευση και την επαρκή παροχέτευση νερού και αέρα στο μείγμα. Το προσωπικό που το χρησιμοποιούσε ήταν εξειδικευμένο και κατάλληλα εκπαιδευμένο, ενώ κατά την εφαρμογή το ακροφύσιο ήταν κάθετο στην επιφάνεια που πραγματοποιούνταν η εκτόξευση σε απόσταση που κυμαινόταν ανά έργο από 0,5 m έως 1,5 m. Οι χαμηλές θερμοκρασίες κυρίως κατά τη διάρκεια του χειμώνα επέβαλαν την εφαρμογή του υλικού μόνο όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν μεγαλύτερη από 0 °C. Οποιοσδήποτε απαιτούμενος τοποθετημένος οπλισμός καλυπτόταν εξολοκλήρου από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ελάχιστο πάχος επικάλυψης 15 mm από τον ξυλότυπο ή το σκυρόδεμα και συνολικά 25 mm από την τελική επιφάνεια του σκυροδέματος και χωρίς κενά πίσω από τις ράβδους οπλισμού, ενώ οι επιφάνειες εφαρμογής καθαρίζονταν επιμελώς.

Σε κάθε περίπτωση που αποδεικνυόταν πως οι ιδιότητες του υλικού προς εφαρμογή δεν πληρούσαν τις απαιτήσεις, αυτό απορριπτόταν με ιδιαίτερη έμφαση σε περαιτέρω ελέγχους ακόμη και στο ήδη εφαρμοσμένο υλικό.

Όσον αφορά τον οπλισμό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, το δομικό πλέγμα ικανοποιούσε τις απαιτήσεις της Προδιαγραφής ASTM A-185 "Welded Steel Fabrics for Concrete Reinforcement". Οι τεχνικές προδιαγραφές του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος ικανοποιούσαν τις Προδιαγραφές ASTM C-78 και ASTM C-1018 – 89, όπου χαρακτηριστικό είναι ότι όριζαν αυστηρά στο ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ελάχιστη ισοδύναμη καμπτική αντοχή της τάξης των 4 MPa και ελάχιστη αντοχή σε θραύση της τάξης των 30 MPa, στο πέρασ του διαστήματος των 7 ημερών. Τα Πρότυπα που όριζαν την ποιότητα των χαλύβδινων ινών ήταν η Πρότυπη Ευρωπαϊκή Προδιαγραφής 18-70 "Rolled Wires of Unalloyed Steel for General Applications", η Προδιαγραφή ASTM A820-90 "Standard Specification for Steel Fibers for Fiber Reinforced Concrete" και η Προδιαγραφή ASTM C116-19, "Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete". Το ελάχιστο όριο θραύσης τους (N/mm² ή MPa) οριζόταν στα 1100 MPa. Το μήκος των χαλύβδινων ινών κυμαινόταν μεταξύ 25-40 mm και το πάχος τους μεταξύ 0,40-0,60 mm. Ο ελάχιστος λόγος "μήκος/διάμετρος" χαλύβδινων ινών εκτοξευόμενου σκυροδέματος (aspect ratio) είχε οριστεί στην τιμή 60. Τα αγκύρια ήταν σύμφωνα με την Προδιαγραφή ASTM Designation A - 615 GRADE 60.

Συνοψίζοντας και αξιολογώντας το σύνολο των πληροφοριών που μας παρέχουν τα ίδια τα έργα και η άρτια λειτουργική και τεχνική τους κατάσταση τόσο στο σύνολό τους όσο και από πλευράς τελικής επένδυσης, κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί η αξία και η ανάγκη της περαιτέρω έρευνας όσον αφορά τη συμπεριφορά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος συν τω χρόνω υπό ποικίλες μορφές φόρτισης και καταπονήσεων είτε αυτές προέρχονται από τις εναλλαγές των γεωλογικών σχηματισμών που ενδέχεται να συναντηθούν σε μελλοντική εκσκαφή σηράγγων είτε από σεισμικές φορτίσεις ή άλλα φυσικά φαινόμενα. Η πολυπλοκότητα των δεδομένων, αλλά και η ανάγκη στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων θα ήταν δυνατόν να ικανοποιηθεί από μελλοντικές προσπάθειες υπολογιστικής προσομοίωσης και χρήσης των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων. Παράλληλα, κατάλληλες εργαστηριακές δοκιμές και μετρήσεις, είναι ένα από τα βασικά βήματα για την

εξελισσόμενη έρευνα σχετικά με το σχεδιασμό της σύστασης και με τη βελτίωση της ποιότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ινοπλισμένου ή μη.

Αντί επίλογου....

Μία αξιόλογη ιστορική αναδρομή των ΥΗΕ έργων Λάδωνα και Άγρα ή αλλιώς..

Έργα χωρίς τελική επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αλλά με ιστορία που αξίζει να αναφερθεί..

** Υλικό αρχείου ΔΕΗ ΑΕ από τις εγκαταστάσεις του ΥΗΣ Λάδωνα, ευγενική παραχώρηση εκ μέρους του κ. Σταθά Ιωάννη, Διευθυντή του ΥΗΣ Λάδωνα, για τον ερευνητικό και εκπαιδευτικό σκοπό της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας.*

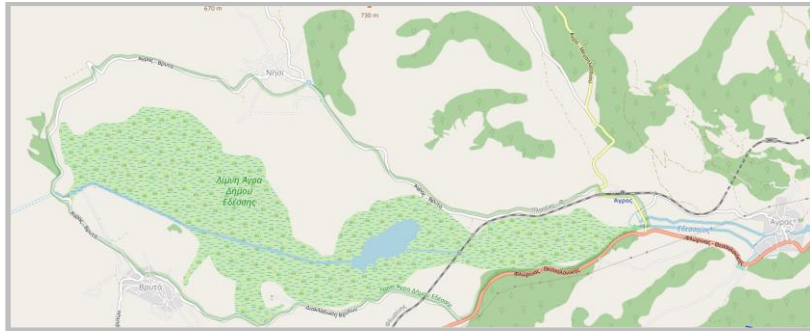
Η παρακάτω παράθεση στοιχείων αποτελεί μία ιστορική αναφορά των δύο μεγαλύτερων Υδροηλεκτρικών Έργων της ΔΕΗ ΑΕ, Άγρα και το Λάδωνα, τα οποία ήταν πρωτοποριακά τόσο ως προς τον όγκο των εργασιών που εκτελέστηκαν, όσο και ως προς το σύνολο των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του ΥΗΕ του Λάδωνα όπου η ολοκλήρωσή του χρονολογείται το 1955 και υπάρχουν αναφορές σε τεχνικές εκθέσεις της εποχής για κατά θέσεις εφαρμογή «σκυροδέματος υπό πίεση». Ενδεχομένως και να αποτελεί την πρώτη τμηματική εφαρμογή του υλικού του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην Ελλάδα οπότε και την πρώτη χρήση του αντίστοιχου πρωτοποριακού για την εποχή του εξοπλισμού εκτόξευσης.

Τα έργα αυτά σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν υπό την επίβλεψη της ιταλικής εταιρείας Societa Edison, που έδρευε στο Μιλάνο. Η επίσημη μετά σύμβασης ανάθεση της έναρξης των έργων στην ιταλική εταιρεία έγινε στα τέλη του 1950, οπότε και ξεκίνησε αμέσως ο σχεδιασμός τους. Η κατασκευή ξεκίνησε το καλοκαίρι του 1951. Η βασική δομή και ο σχεδιασμός των εγκαταστάσεων του έργου υποβλήθηκε με έκθεση και εγκρίθηκε από την ECA (Economic Cooperation Administration, που μετονομάστηκε αργότερα σε «Foreign Operation Administration» - FOA) και την Ελληνική κυβέρνηση, μαζί με όποιες τροποποιήσεις κρίθηκαν απαραίτητες από περαιτέρω λεπτομερείς μελέτες.

Για να εξασφαλιστεί η προσπέλαση στις περιοχές κατασκευής των έργων κατασκευάστηκαν περίπου 20 km οδών προσπέλασης και ολοκληρώθηκε η συντήρηση και η διαπλάτυνση 100 km υφιστάμενων οδών. Εργάστηκαν 3.450 εργατοτεχνίτες που διέμεναν σε οικίσκους που κατασκευάστηκαν στην περιοχή για αυτό το σκοπό. Κατασκευάστηκαν προσωρινοί πετρελαιοκίνητοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 4200 KW, για τις ανάγκες των εργοταξίων. Τέλος οι αυξημένες ανάγκες σε σκυρόδεμα καλύφθηκαν από εγκαταστάσεις στην περιοχή των έργων, δυναμικότητας παραγωγής σκυροδέματος 500-600 m³ ημερησίως.

Υδροηλεκτρικό έργο Άγρα

Το ΥΗΕ Άγρα περιλαμβάνει τον ΥΗΣ της ΔΕΗ ΑΕ στην Πέλλα κοντά στην Έδεσσα και το Σταθμό Ηλεκτρικού Ρεύματος του Άγρα, που βρίσκονται στην ευρύτερη λεκάνη απορροής του ποταμού Αλιάκμονα. Η λίμνη Άγρα (παλαιότερη ονομασία «Τυρφώνας Νησίου») έκτασης 47.379,7 στρεμμάτων αποτελεί την «τεχνητή λίμνη Άγρα» ή «λίμνη Άγρα – Βρυττών - Νησίου» που δημιουργήθηκε το 1955 από εργασίες της ΔΕΗ ΑΕ και από την κατασκευή του ομώνυμου φράγματος. Η τροφοδοσία της με νερό μέχρι και το 1990 γινόταν μέσω σήραγγας από την λίμνη Βεγορίτιδα εμβαδού 30 km². Το έργο πρακτικά ολοκληρώθηκε άμεσα, εκτός από τη σήραγγα Οστρόβου, η οποία ολοκληρώθηκε στις αρχές του 1955. Το εργοστάσιο άρχισε να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια τον Ιούλιο του 1954.



Εικόνα 110: Τεχνητή λίμνη στην περιοχή των χωριών Άγρα, Βρύττων και Νησίου
(Χάρτης τεχνητής λίμνης των χωριών Άγρα, Βρύττων και Νησίου και χάρτης ΥΗΕ Άγρα - [Way: ΥΗΣ Άγρα \(923010952\)](#) | [OpenStreetMap](#))

Η λεκάνη Βεγορίτιδας είναι μια υδρολογική λεκάνη 398,99 km² και συγκεντρώνει το μεγαλύτερο αριθμό λιμνών στη χώρα (Βεγορίτιδα, Πετρών, Χειμαδίτιδα, Ζάζαρη), ενώ στην έκτασή της εντοπίζεται το εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της ΔΕΗ με την τροφοδοσία του να γίνεται από τις πηγές των Βρυττών, του Νησίου και τα νερά των χειμάρρων Μουζαρέμ Χάνι, Καρυδιάς και Νησίου. Το έργο μελετήθηκε από την Εταιρεία Societa Edison – Milano.



Εικόνα 111: ΥΗΕ Άγρα
(Χάρτης τεχνητής λίμνης των χωριών Άγρα, Βρύττων και Νησίου και χάρτης ΥΗΕ Άγρα - [Way: ΥΗΣ Άγρα \(923010952\)](#) | [OpenStreetMap](#))



Εικόνα 112: Τεχνητή Λίμνη Άγρα
(Τεχνητή λίμνη Άγρα - https://el.wikipedia.org/wiki/Λίμνη_Άγρα)



Εικόνα 113: Υδροβιότοπος Λίμνης Άγρα
(Τεχνητή λίμνη Άγρα - [Τεχνητή Λίμνη Άγρα](#) - Χάρτες Google)

Η λίμνη Βεγορίτιδα, εντός της ομώνυμης κλειστής λεκάνης δέχεται σήμερα τα νερά των λιμνών Ζάζαρης, Χειμαδίτιδας και Πετρών, μέσω τάφρων, διώρυγων, σηράγγων και του ποταμού Σουλού. Αποτελεί εξαιρετικό υδροβιότοπο με διάφορα σπάνια είδη πουλιών και ψαριών, εντάσσεται στη ζώνη προστασίας NATURA 2000 με κωδικό GR1340004 και αποτελεί καταφύγιο θηραμάτων σύμφωνα με τον Ν.177/75.



Εικόνα 114: ΥΗΕ Άγρα στο Ν. Πέλλας
(Φωτογραφίες ΥΗΕ Άγρα - <https://energypress.gr/news/ananeothike-gia-10-hronia-i-aero-gia-toys-yis-agra-kai-edessaioy>)



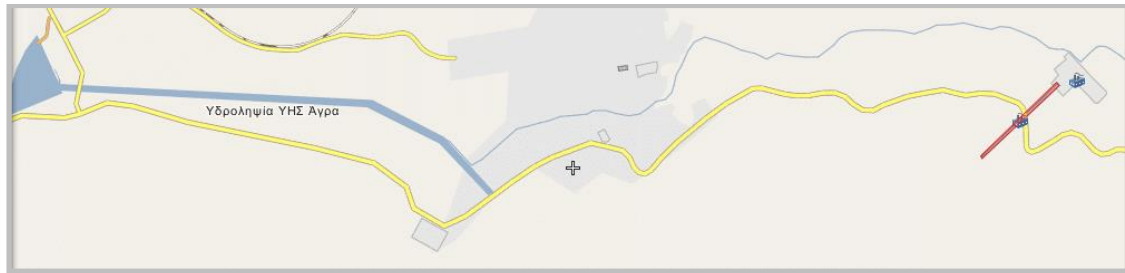
Εικόνα 115: ΥΗΣ Άγρα
(ΥΗΣ Άγρα - Χάρτες Google)

102) Από όλα τα τμήματα του έργου, κάποιες σήραγγες παρέμειναν ανεπένδυτες, ενώ στην προσωρινή τους υποστήριξη χρησιμοποιήθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πλαίσια και αγκυρώσεις, ανάλογα με την χρήση της σήραγγας και τα χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών που συνάντησε η κατασκευή τους.

Συγκεκριμένα, οι υδραυλικές σήραγγες των Λιμνών Νησιού και Βεγορίτιδας, συνολικού μήκους 6.106 m, πεταλοειδούς σχήματος διατομής και ωφέλιμου εμβαδού 3,1 m², υποστηρίχθηκαν προσωρινά με ξύλινα υποστυλώματα και χαλύβδινα πλαίσια. Ολοκληρώθηκαν το 1953 με μόνιμη επένδυση, που οι αναφορές την ορίζουν ως “υλικό σκυροδέματος”.

Στο έργο έχει επίσης κατασκευαστεί σήραγγα προσπέλασης μήκους 95 m, σχήματος διατομής ημικυκλικού και κάτω ορθογωνικού, ωφέλιμου εμβαδού χρήσης 4,8 m², η οποία και ολοκληρώθηκε με τη μόνιμη επένδυση από σκυρόδεμα επίσης το 1953.

Οι υδραυλικές σήραγγες προσαγωγής συνολικού μήκους 1.705 m, κυκλικής διατομής και ωφέλιμου εμβαδού περίπου 13 m², υποστηρίχθηκαν προσωρινά με χαλύβδινα πλαίσια. Οι ιστορικές αναφορές περιγράφουν τη μόνιμη επένδυσή τους από σκυρόδεμα και μεταλλικά πλαίσια με το έτος κατασκευής τους να συμπίπτει με αυτό των προηγούμενων σηράγγων του έργου.



Εικόνα 116: Σημείο υδροληψίας από την Τεχνητή Λίμνη Άγρα, σήραγγα προσαγωγής, αγωγός πτώσης μεταφοράς των υδάτων από τη σήραγγα προσαγωγής στον ΥΗΕ Σταθμό Άγρα (https://el.wikipedia.org/wiki/Οικισμός_Υδροηλεκτρικού_Σταθμού_Άγρα_Πέλλας)

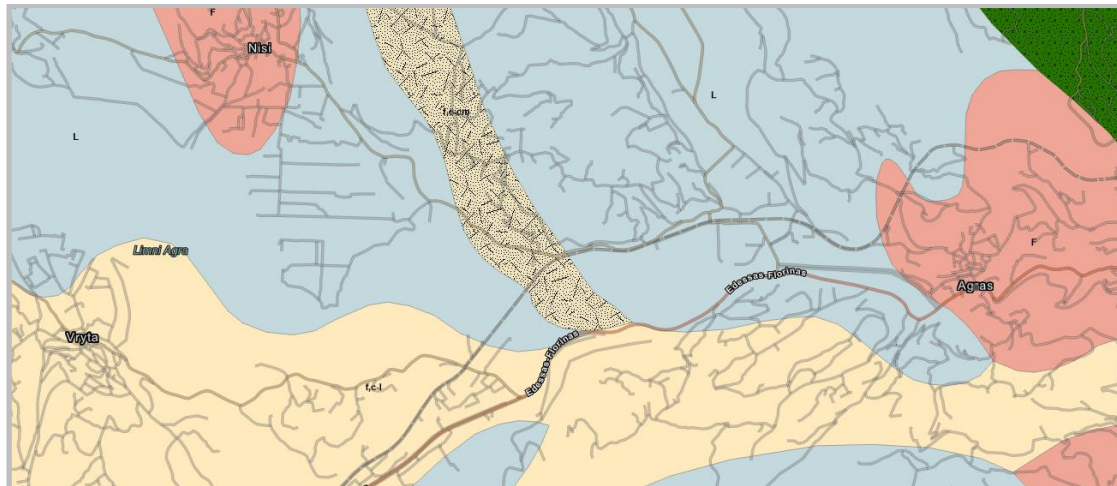
Μικρές σε μήκος σήραγγες (217-247 m) που έχουν το ρόλο των στοών προσπέλασης εκσκάφθηκαν με ωφέλιμο εμβαδόν 13 m² και σχήμα διατομής ημικυκλικό και ορθογωνικό στο κάτω τμήμα της διατομής κατά το ίδιο έτος κατασκευής με τις υπόλοιπες σήραγγες του έργου. Παραμένουν μέχρι σήμερα ανεπένδυτες.

Τα επί μέρους αυτά έργα διανοίχτηκαν με τις συμβατικές μεθόδους διάτρησης και ανατινάξεις, συναντώντας γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής που είναι συμπαγείς ασβεστόλιθοι παχυστρωματώδεις ή άστρωτοι και φλύσχης.

Στα επιφανειακά στρώματά τους οι ασβεστόλιθοι συναντώνται καρστικοποιημένοι ή έντονα διατμημένοι. Παρουσιάζουν υψηλές μηχανικές αντοχές και μέτρια περατότητα που γίνεται πιο έντονη στις καρστικοποιημένες ή διατμημένες ζώνες. Οι πιο αδύναμες περιοχές οδηγούν κατά περίπτωση σε καταρρεύσεις οροφής εγκοίλων και σε καταπτώσεις τεμαχών βράχου σε πρηνή, σημεία απότομων και δυσμενών κλίσεων και προσανατολισμών.

Ο φλύσχης της περιοχής είναι αδιαίρετος με εναλλαγές ψαμμίτη και ιλυολίθου, ενώ σπάνια εμπεριέχονται και κροκαλοπαγή. Είναι λεπτοστρωματώδης σχηματισμός με ψαμμικά συμπαγή τμήματα έως και 1 m. Τα στρώματα στην περιοχή είναι έντονα τεκτονισμένα (πτυχωμένα, κερματισμένα, κτλ). Είναι στεγανοί σχηματισμοί, αλλά επιτρέπουν το σχηματισμό πηγών μεταξύ αποσαθρωμένων περιοχών και συμπαγούς πετρώματος. Τα πιο επιφανειακά στρώματα παρουσιάζουν και το πυκνότερο δίκτυο ασυνεχειών.

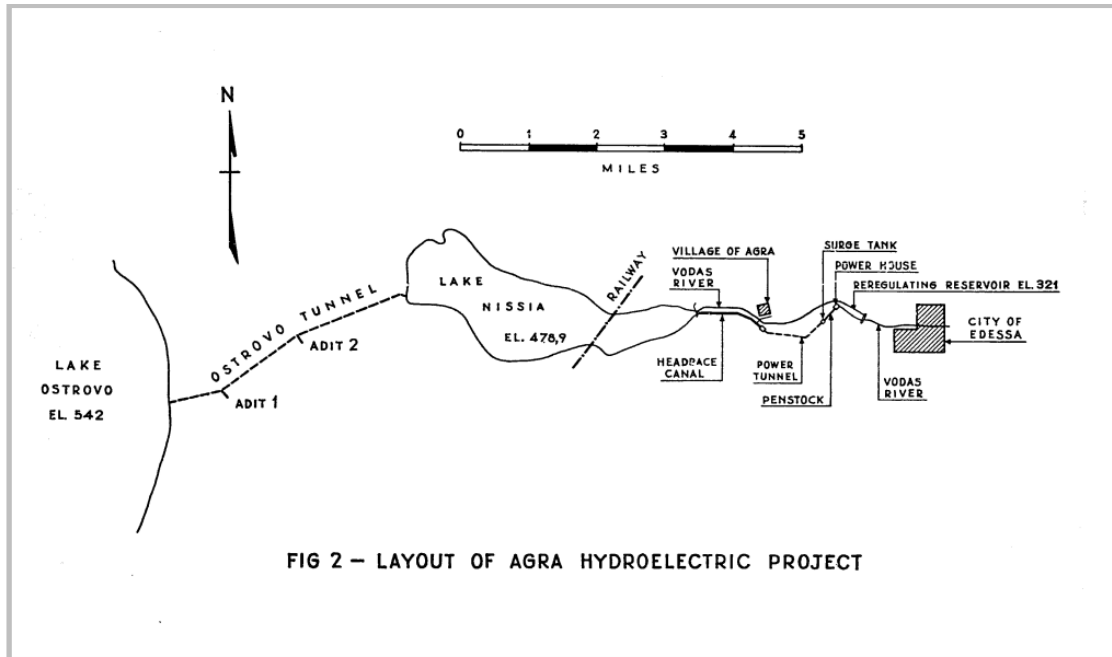
Στην εκσκαφή ο φλύσχης παρουσίασε ανομοιογένεια, ξαφνικές μεταβολές λόγω χαλάρωσης στρωμάτων και αστάθεια σε ετερογενείς επαφές με μεγάλη κλίση, κυρίως σε σημεία εντονότερης εισροής ύδατος στην περιοχή.



Εικόνα 117: Γεωλογικός Χάρτης περιοχής ΥΗΕ Άγρια
https://el.wikipedia.org/wiki/Οικισμός_Υδροηλεκτρικού_Σταθμού_Άγρια_Πέλλας

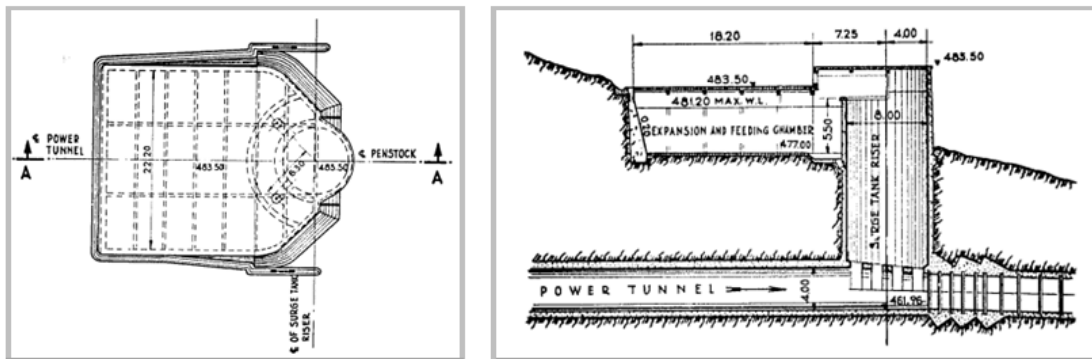
ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m ²)	ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ
Λίμνης Βεγορίτιδος - Λίμνης Νησίου	Υδραυλική	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	6106	Πεταλοειδές	7,7	3,1	1953	ΥΗΕ ΑΓΡΙΑ	SOCIETA EDISON - MILANO
Κεκλιμένη προσπέλαση	Κατασκευαστική	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	95	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	6,9	4,8	1953	ΥΗΕ ΑΓΡΙΑ	SOCIETA EDISON - MILANO
Προσαγωγής	Υδραυλική	Διατρήσεις - Ανατινάξεις	1705	Κυκλικό	17,6	12,6	1953	ΥΗΕ ΑΓΡΙΑ	SOCIETA EDISON - MILANO
ADIT-1	Στοά	-	247	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	17,6	12,6	1953	ΥΗΕ ΑΓΡΙΑ	SOCIETA EDISON - MILANO
ADIT-2	Στοά	-	217	Ημικυκλικό - Ορθογωνικό	17,6	12,6	1953	ΥΗΕ ΑΓΡΙΑ	SOCIETA EDISON - MILANO

Πίνακας 38: Σήραγγες ΥΗΕ Άγρια

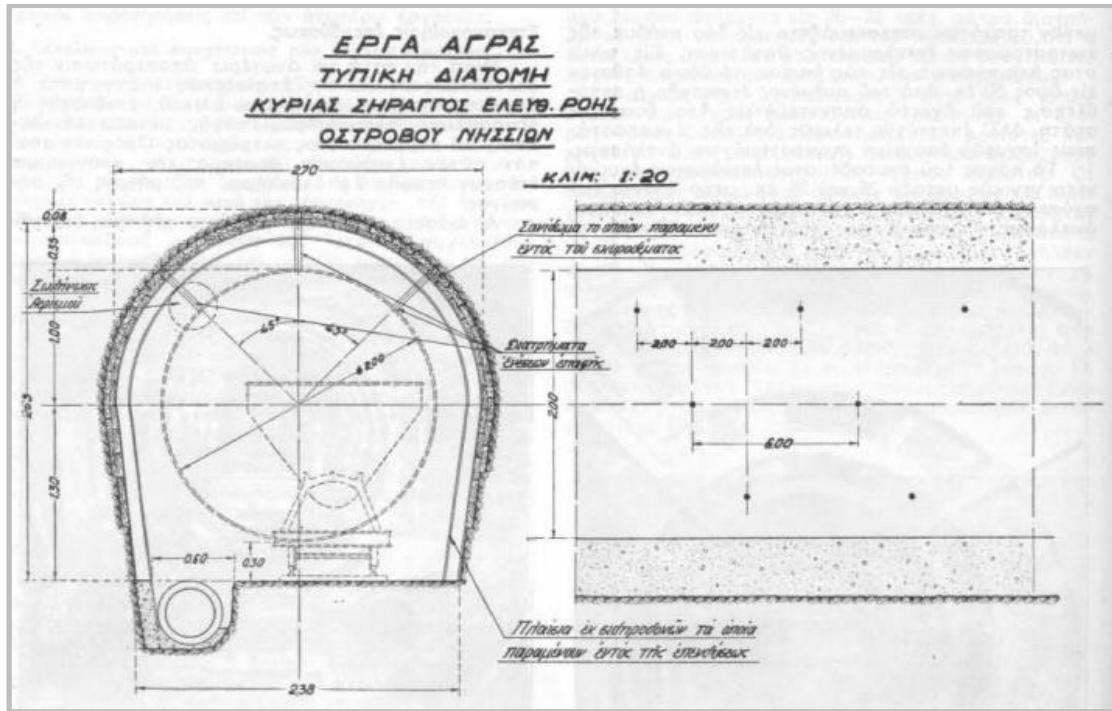


Εικόνα 118: Σκαρίφημα ΥΗΕ Άγρα
(Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)

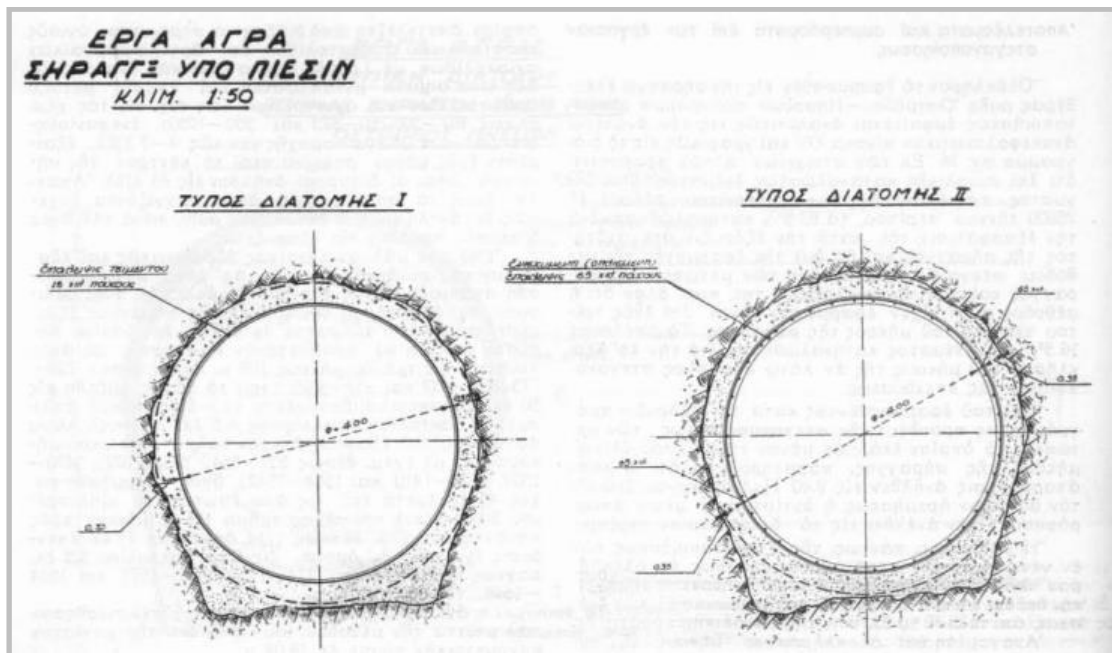
Ανατολικά διακρίνεται η σήραγγα που καταλήγει στον ΥΗΕ Σταθμό. («power tunnel»). Η σήραγγα αυτή έχει διάμετρο 4 m, διανοίχθηκε μέσω ασβεστόλιθου και είναι επενδυμένη με σκυρόδεμα, ελάχιστου πάχους 25 cm. Η επένδυση εφαρμόστηκε εξ ολοκλήρου χειροκίνητα και διαμορφώθηκε ως τραχεία επιφάνεια. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε επικάλυψη περίπου 2 cm με τσιμεντοκονία. Στο άνω άκρο της σήραγγας υπάρχει εγκατάσταση κάλυψης της εισόδου με λεπτές σίτες.



Εικόνα 119: Σκαρίφημα κάτοψης και τομής υπερχειλιστή ΥΗΕ Άγρα
(Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)



Εικόνα 120: Τυπική διατομή σήραγγας ελεύθερης ροής Οστρόβου-Νησιών ΥΠΕ Άγρα (Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)



Εικόνα 121: Τυπική διατομή σήραγγας υπό πίεση ΥΠΕ Άγρα (Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)

ΠΙΝΑΞ VIII.
Έργα Άγρας
Τύποι εφαρμοσθέντων ενεμάτων

Τύπος	Στοιχεία	Βάρος (ΧΥΡ.)	% εις βάρος	Σχέσεις εις βάρος Αβ		Όγκος εις λίτρα	% κατ' δγκον	Σχέσεις κατ' δγκον Α ₀	
				*Άμμος Τσιμ.	*Υδωρ Τσιμ.+άμμ.			*Άμμος Τσιμεντ.	*Υδωρ Τσιμ.+άμμ.
I	Τσιμέντον	50	37,60	—	—	31	29,60	—	—
	*Άμμος	33	24,80	—	—	24	22,80	—	—
	*Υδωρ	50	37,60	—	—	50	47,60	—	—
		133	100,00	0,60	0,60	105	100,00	0,77	0,99
II	Τσιμέντον	50	28,55	—	—	31	22,32	—	—
	*Άμμος	50	28,55	—	—	36	25,90	—	—
	Μπεντονίτης	5	2,85	—	—	1,76	1,26	—	—
	Σόδα	0,25	0,15	—	—	0,19	0,13	—	—
	*Υδωρ	70	39,90	—	—	70,00	50,38	—	—
		175,25	100,00	1,10	0,66	138,95	100	1,22	1,01
III	Τσιμέντον	50	22,82	—	—	31	17,72	—	—
	*Άμμος	75	34,23	—	—	54	30,86	—	—
	Μπεντονίτης	6,25	2,85	—	—	2,20	1,25	—	—
	Σόδα	0,31	0,15	—	—	0,23	0,13	—	—
	*Υδωρ	87,50	39,95	—	—	87,50	50,04	—	—
		219,05	100	1,63	0,66	174,93	100	1,82	1,00
IV	Τσιμέντον	50	26,10	—	—	31	21,02	—	—
	*Άμμος	75	39,15	—	—	54	36,62	—	—
	Μπεντονίτης	6,25	3,26	—	—	2,20	1,49	—	—
	Σόδα	0,31	0,16	—	—	0,23	0,15	—	—
	*Υδωρ	60	31,33	—	—	60	40,72	—	—
		191,56	100	1,63	0,45	147,43	100	1,82	0,68

Εικόνα 122: Σύσταση κονιαμάτων ΥΗΕ Άγρα
(Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)



Εικόνα 123: Παρασκευή ενέματος στην στοά 2 ΥΗΕ Άγρα
(Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)

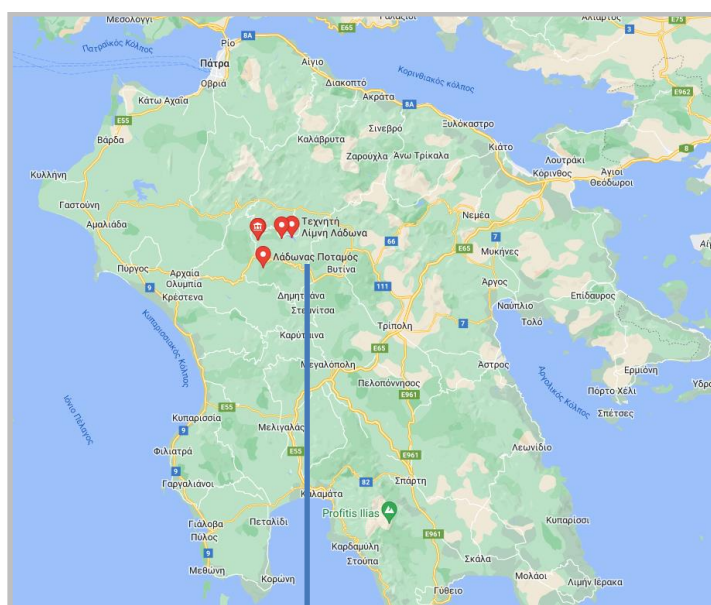


Εικόνα 124: Ερευνητικές γεωτρήσεις επί του πλησιέστερου της λίμνης υπερκείμενου εδάφους της σήραγγας στο εργοτάξιο Αρνίσσης του ΥΠΕ Άγρα (Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)

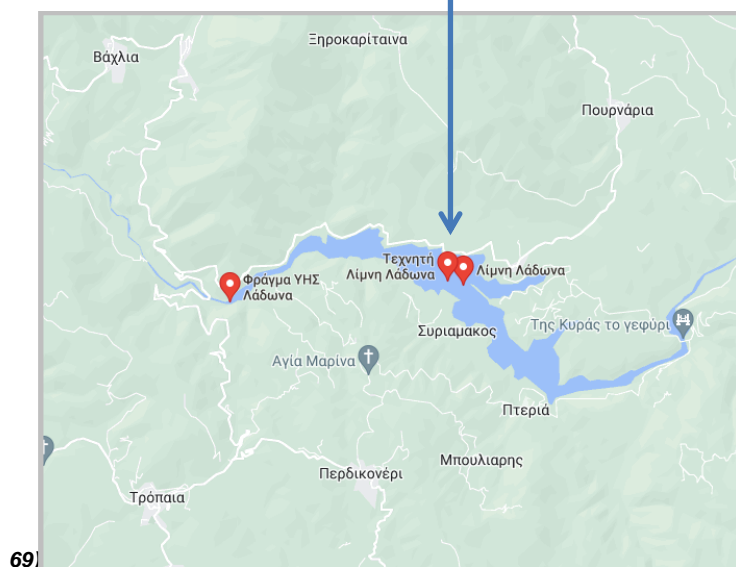
Υδροηλεκτρικό έργο Λάδωνα

Το ΥΗΕ Λάδωνα μελετήθηκε από την Ιταλική Εταιρεία Societa Edison και κατασκευάστηκε από την κοινοπραξία Lodigiani - E.Ricchi - Οδών & Οδοστρωμάτων με την έναρξη του έργου να χρονολογείται το έτος 1951 και την ολοκλήρωσή του το έτος 1955.

Το έργο βρίσκεται στην Πελοπόννησο και συγκεκριμένα ο κύριος ΥΗΣ του έργου τοποθετείται στην περιοχή Κάτω Σπάθαρη Γορτυνίας, σε απόσταση 6 km από την εθνική οδό Τρίπολης-Πύργου και μόλις 9 km από τα Τρόπαια του Νομού Αρκαδίας.



Εικόνα 125: Χάρτης Πελοποννήσου
(Χάρτες και φωτογραφικό υλικό: <https://www.google.com/maps>)



Εικόνα 126: Χάρτης Λίμνης Λάδωνα
(Χάρτες και φωτογραφικό υλικό: <https://www.google.com/maps>)

Κατάντη των πολυάριθμων πηγών που τροφοδοτούν τον ποταμό Λάδωνα (Παναγίτσα, Λυκούρια, Πλανήτερο, κ.α.) κατασκευάστηκε το ομώνυμο φράγμα βαρύτητας, ύψους 50 m και μήκους 100 m στη στέψη του.



Εικόνα 127: Πηγές ποταμού Λάδωνα, κατασκευές και αναψυχή κατά μήκος του ποταμού Λάδωνα (Φωτογραφίες ΥΠΕ Λάδωνα - [Πηγές Λάδωνα](#) - [Χάρτες Google](#))

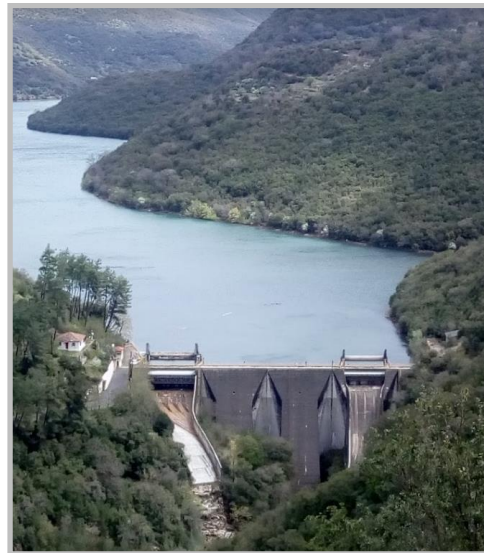
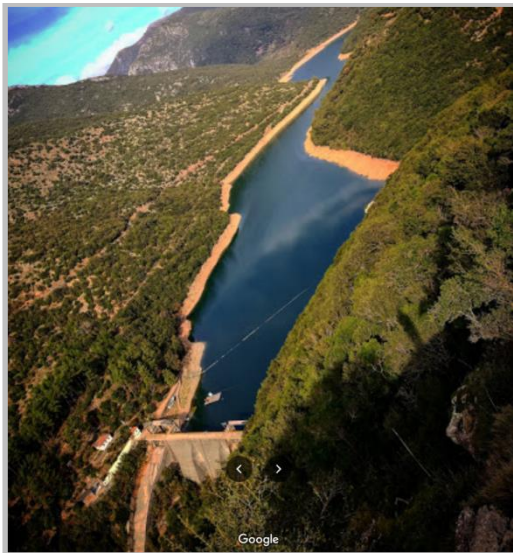


Εικόνα 128: Πηγές ποταμού Λάδωνα, κατασκευές και αναψυχή κατά μήκος του ποταμού Λάδωνα (Φωτογραφίες ΥΠΕ Λάδωνα - [Πηγές Λάδωνα](#) - [Χάρτες Google](#))

Η παρουσία του φράγματος οδήγησε στη διαμόρφωση της ομώνυμης τεχνητής λίμνης έκτασης 4 km².



Εικόνα 129: Τεχνητή Λίμνη Λάδωνα
(Φωτογραφίες ΥΗΕ Λάδωνα - [Φράγμα ΥΗΣ Λάδωνα - Χάρτες Google](#))



Εικόνα 130: Φράγμα βαρύτητας ΥΗΕ Λάδωνα
(Φωτογραφίες ΥΗΕ Λάδωνα - [Φράγμα ΥΗΣ Λάδωνα - Χάρτες Google](#))

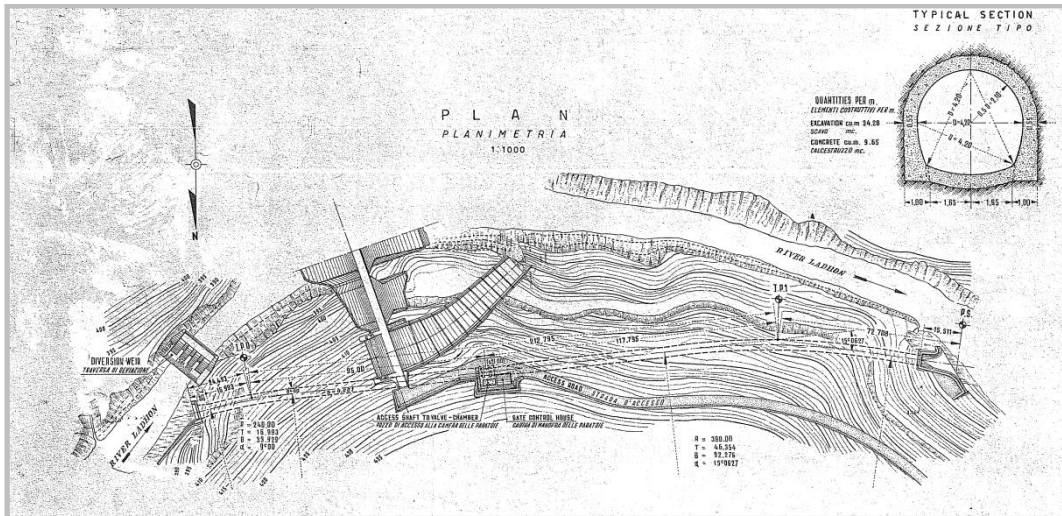
Η ασφάλεια του έργου σε περιόδους παροχής αιχμής εξασφαλίζεται με τμήματα του έργου όπως ο υπερχειλιστής, ο υδατοφράχτης πυθμένα και η σήραγγα εκτροπής από σπλισμένο σκυρόδεμα, τα οποία μπορούν να εκτρέψουν μέχρι και 1000 m³ αν χρειαστεί. Από τον πυθμένα του φράγματος ξεκινά μία κύρια σήραγγα υπό πίεση που καταλήγει σε πιεζομετρικό φρέαρ και θάλαμο εξισοροπήσεως πίεσης. Στη συνέχεια, ο όγκος των υδάτων καταλήγει μέσω χαλύβδινου σωλήνα στο εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής του ΥΗΕ. Μετά την περιστροφή του στροβίλου στο σταθμό παραγωγής, τα νερά επιστρέφουν μέσω του αγωγού φυγής στην κοίτη του ποταμού Λάδωνα και στη συνέχεια καταλήγουν στη θάλασσα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το φράγμα και το εργοστάσιο κατασκευάστηκαν με έξοδα της Ιταλικής κυβέρνησης ως πολεμική αποζημίωση στην Ελλάδα για τις καταστροφές που υπέστη στον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο.



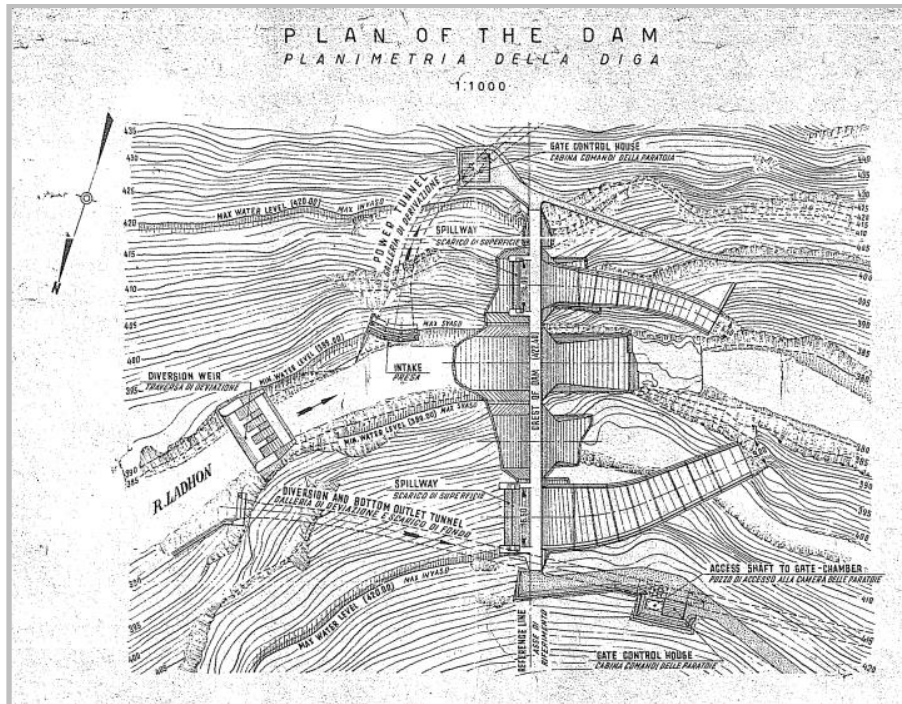
Εικόνα 131: ΥΗΕ Λάδωνα
(Φωτογραφίες ΥΗΕ Λάδωνα - [Φράγμα ΥΗΣ Λάδωνα - Χάρτες Google](#))

Στο έργο αυτό έχει δοθεί έμφαση στη θεμελίωση και στη στεγανοποίηση των επί μέρους κατασκευών και για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν 23.000 τόνοι σκυροδέματος.

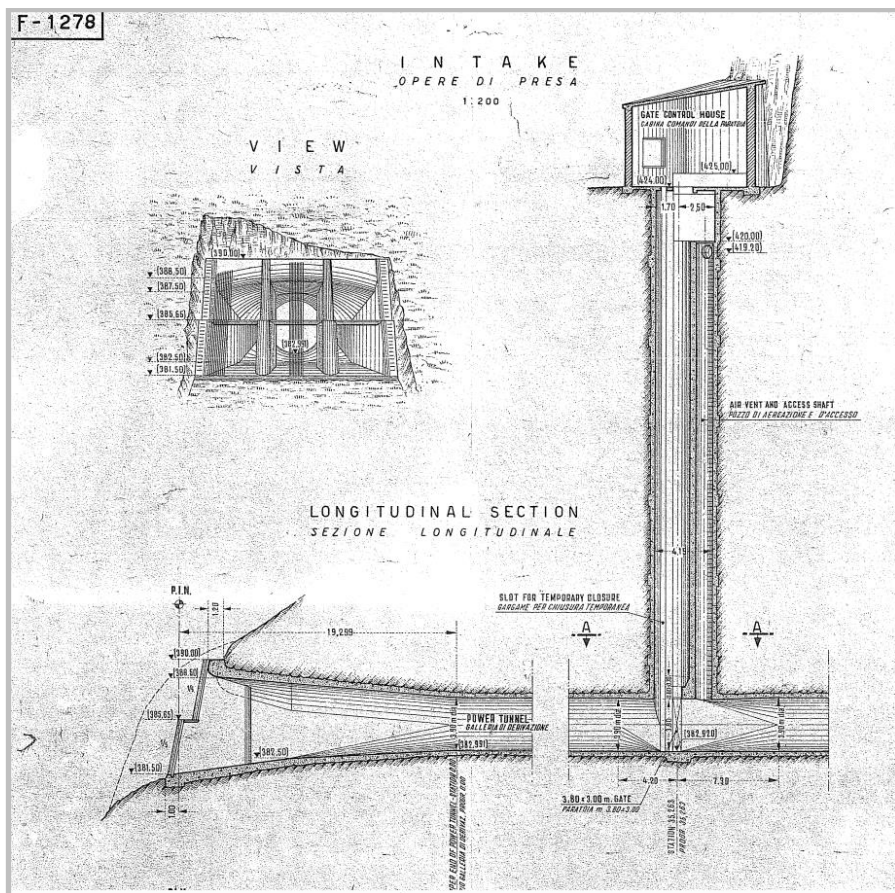
Υπόγειες στοές προσπέλασης και υπόγειοι θάλαμοι συμπληρώνουν βοηθητικά τη λειτουργία του έργου.



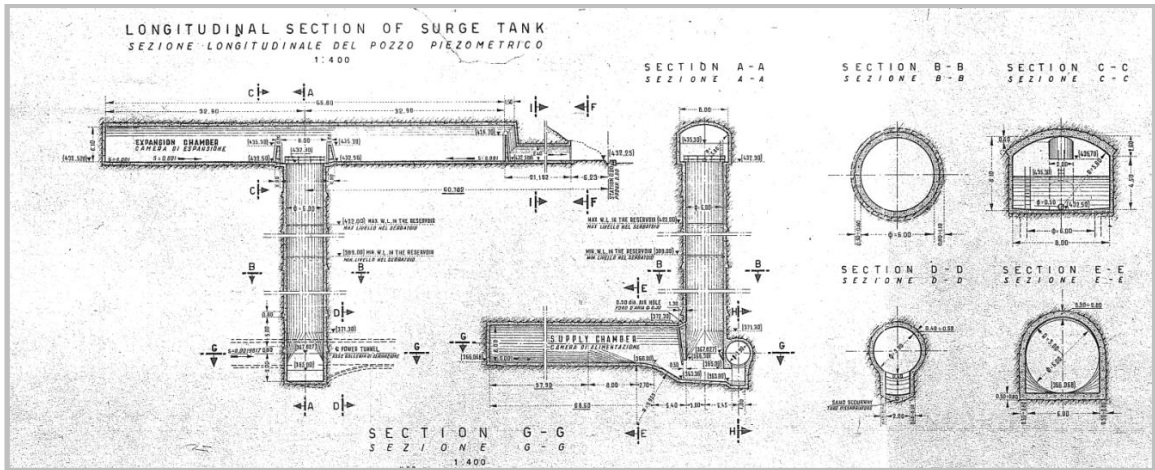
Εικόνα 132: Γενικό πλάνο του ΥΗΕ Λάδωνα
(Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)



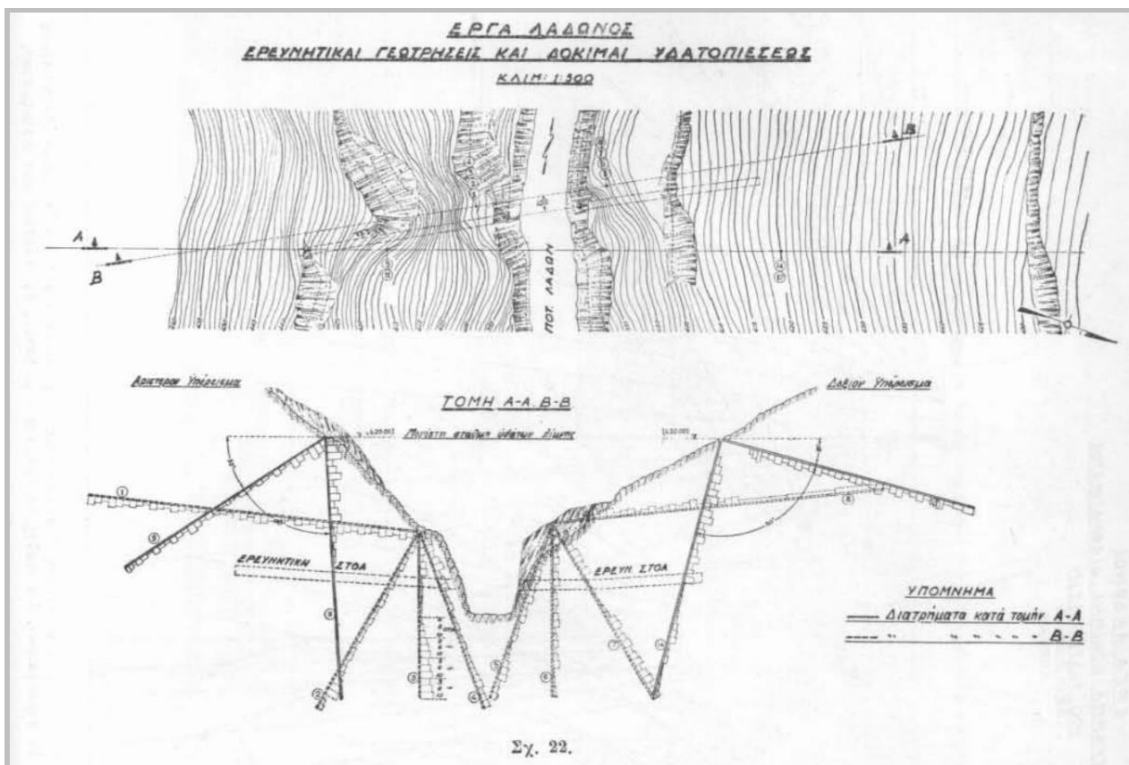
Εικόνα 133: Γενικό πλάνο φράγματος Λάδωνα
(Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)



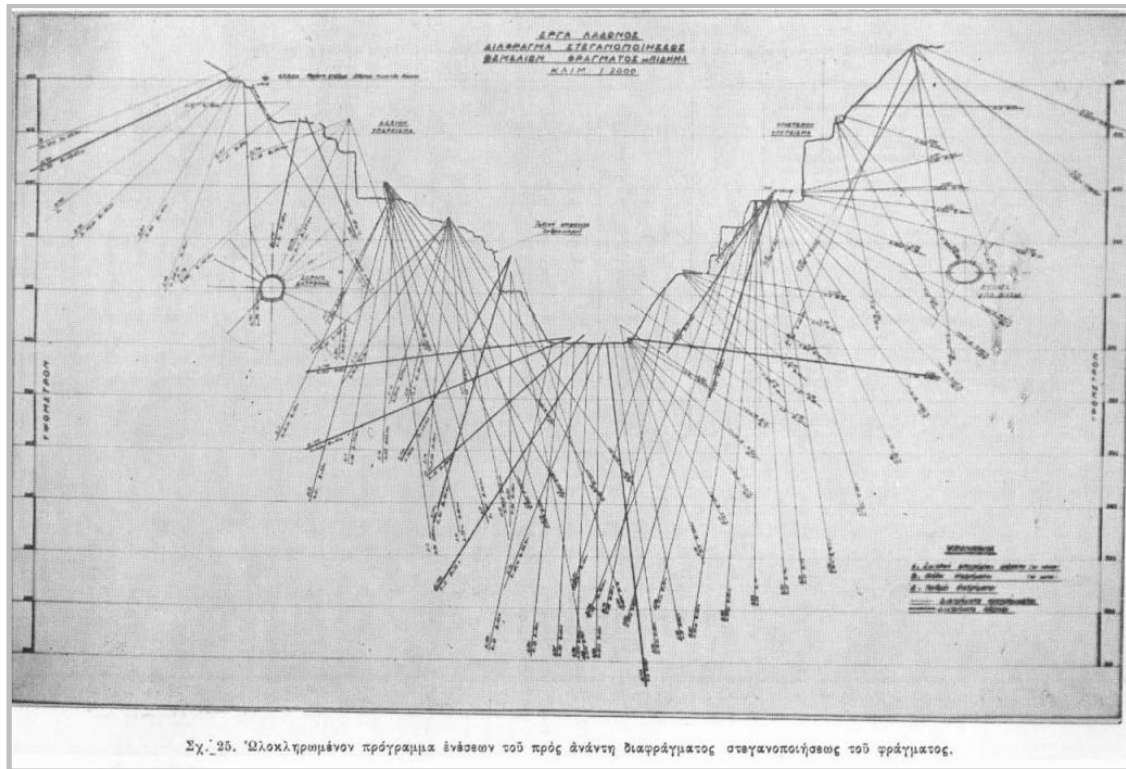
Εικόνα 134: Είσοδος στοάς προσπέλασης - σκαρίφημα υποστηρίξεως λόγω γεωλογικών σχηματισμών μειωμένων αντοχών, τμήμα κύριας σήραγγας προσαγωγής με φρέαρ πρόσβασης και εξαερισμού
(Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)



Εικόνα 135: Υπόγειοι θάλαμοι ΥΠΕ Λάδωνα
(Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΠΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)

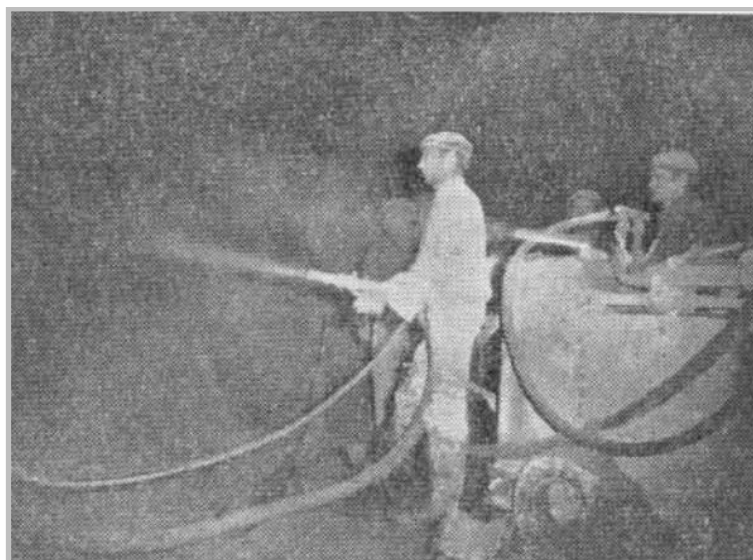


Εικόνα 136: Ερευνητικές υπόγειες στοές ΥΠΕ Λάδωνα
(Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΠΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)



Εικόνα 137: Ερευνητικές υπόγειες στοές, διάφραγμα στεγανοποίησης φράγματος και διάφραγμα στεγανοποίησης περιμετρικά των στήραγων ΥΗΕ Λάδωνα
(Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)

Από το ΥΗΕ Λάδωνα η υδραυλική κύρια στήραγμα προσαγωγής είναι και το μοναδικό τμήμα του έργου που εφαρμόστηκε κατά θέσεις εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Τα υπόλοιπα τμήματα του έργου (θάλαμοι, στήραγγες, σταθμός παραγωγής) έχουν κατασκευαστεί από οπλισμένο σκυρόδεμα και τσιμεντενέσεις επαφής, στερεοποίησης ή στεγανοποίησης.



Εικόνα 138: Εφαρμογή επένδυσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά θέσεις στο χρονικό διάστημα 1951-1955 κατά την κατασκευή του ΥΗΕ Λάδωνα
(Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)



Εικόνα 139: Εφαρμογή επένδυσης τσιμεντενέσεων επαφής στο διάστημα 1951-1955 κατά την κατασκευή του ΥΗΕ Λάδωνα
(Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)

Η κύρια σήραγγα προσαγωγής έχει κατασκευαστεί με σχήμα διατομής κυκλικό και εκτείνεται σε συνολικό μήκος 8.734 m. Το διαθέσιμο για χρήση εμβαδόν διατομής της σήραγγας μετά και την εφαρμογή της τελικής επένδυσης διαμορφώθηκε σε επιφάνεια περίπου 4 m². Για την κατασκευή της διαμορφώθηκαν 4 στοές προσπέλασης κατά μήκος του άξονά της, από τις οποίες σήμερα είναι επισκέψιμη μόνο η μία κατά τις περιόδους συντήρησης και καθαρισμού του εσωτερικού της.



Εικόνα 140: Επισκέψιμη στοά προσπέλασης σήραγγας προσαγωγής ΥΗΕ Λάδωνα
(Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)

Η σήραγγα προσαγωγής διαπέρασε ασβεστολιθικούς γεωλογικούς σχηματισμούς με αργιλικές και μαργαϊκές στρώσεις οι οποίες είναι γενικά διαπερατοί σχηματισμοί σε περιοχές που απαντώνται λεπτοστρωματώδεις και κατακερματισμένοι. Οι μαργαϊκές στρώσεις εκτός των στρωσιγενών και έντονα διατμημένων περιοχών αποτελούν αδιαπέρατους γεωλογικούς σχηματισμούς.

Κατά μήκος της σήραγγας, η διόγκωση μαργαϊκών σχηματισμών προκάλεσε παραμορφώσεις στα χρησιμοποιούμενα κατά περίπτωση μεταλλικά πλαίσια και καταπτώσεις κατόπιν της 1ης στοάς κατά μήκος του άξονα της σήραγγας. Αυτές οι αστοχίες οδήγησαν σε αναθεώρηση της μελέτης χάραξης σήραγγας έως ότου να συναντήσει υγιή ασβεστόλιθο κατά την εκσκαφή.

Η ασφαλής, ποιοτική και οικονομικά συμφέρουσα κατασκευή του έργου συνεχίστηκε με εφαρμογή τσιμεντενέσεων προσφέροντας και την απαιτούμενη υδατοστεγανότητα που απαιτούνταν. Σε χαμηλότερης ποιότητας πέτρωμα, τα ξύλινα πλαίσια αντικαταστάθηκαν από μεταλλικά υπέρ της ασφαλείας και τοποθετήθηκαν σε αποστάσεις από 0,50 έως 2,00 m μεταξύ τους, ανάλογα των αντοχών των παρακείμενων γεωλογικών σχηματισμών. Σε τμήματα της σήραγγας προσαγωγής που δεν επαρκούσαν οι πιο πάνω μέθοδοι υποστήριξης εφαρμόστηκε πρόσθετη επένδυση από εσωτερικό δακτύλιο πάχους 7 cm από τσιμεντοκονίαμα. Ο εν λόγω δακτύλιος τοποθετήθηκε υπό πίεση 3,5 atm, σε 3 ίσες στρώσεις, πάχους 1,5 cm η καθμία με ή χωρίς οπλισμό, ανάλογα με τη χιλιομετρική θέση εφαρμογής του κατά μήκος του άξονα της σήραγγας (“gunitisation”).

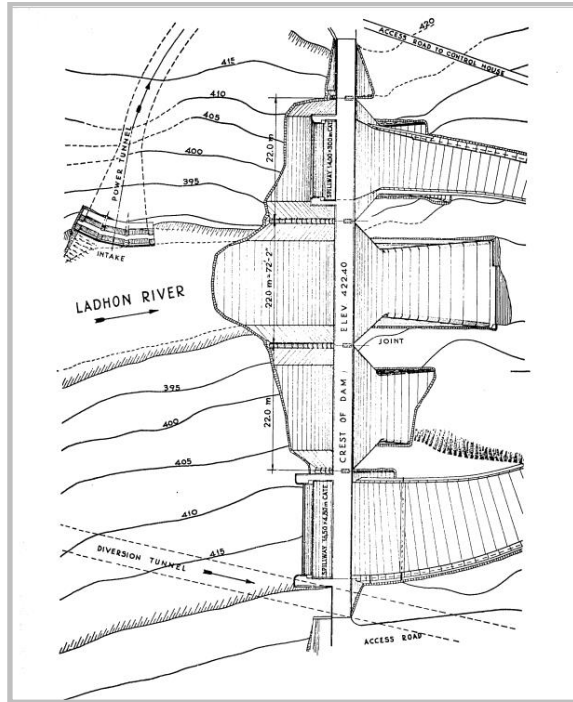
Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής του Έργου ελέγχονταν περιοδικά στο Εργαστήριο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και στο Υπουργείο Δημοσίων Έργων, ενώ χρησιμοποιήθηκαν και υλικά της περιοχής, π.χ. άμμος από τον ποταμό Λάδωνα.



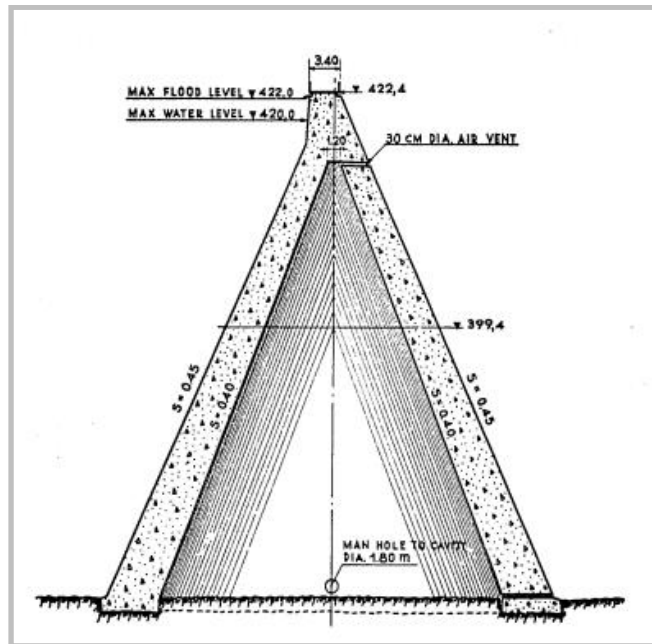
Εικόνα 141: Εσωτερικό σήραγγας προσαγωγής ΥΗΕ Λάδωνα πριν και μετά τις εργασίες καθαρισμού στο εσωτερικό της, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν το έτος 2010 (Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)

ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΜΒΑΔΟΝ (m ²)	ΕΤΟΣ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ	ΕΡΓΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ
Προσαγωγής	Υδραυλική	Ασβεστόλιθοι με παρεμβολές αργιλικών σχιστολιθών	8734	Κυκλικό	3,9	1955	ΥΗΕ Λάδωνα	SOCIETA EDISON - MILANO	Κ/Ξ LODIGIANI - E. RICCHI - ΟΔΩΝ & ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

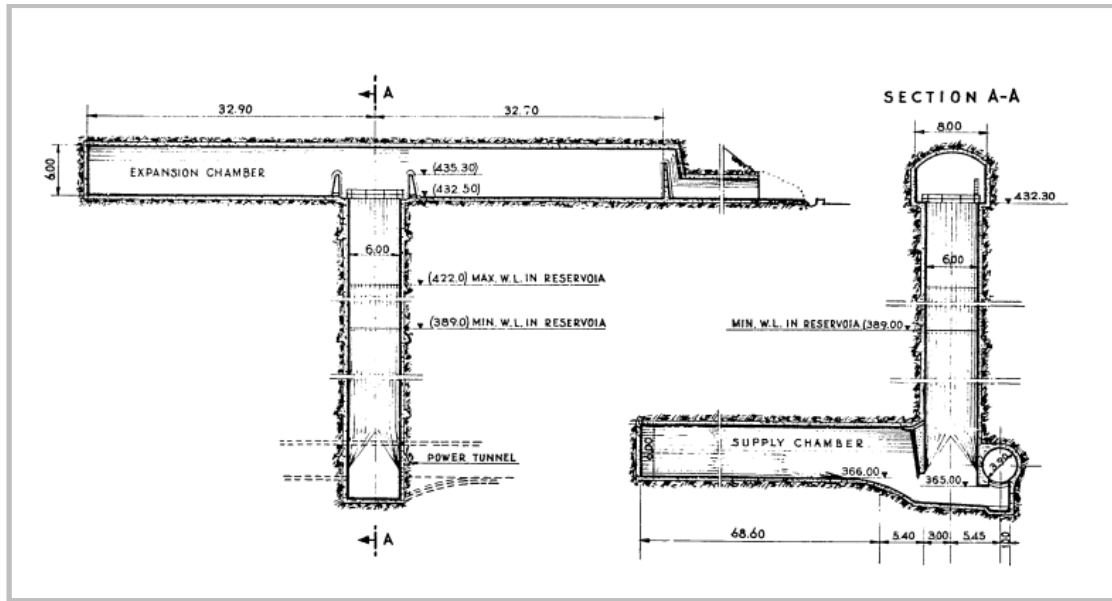
Πίνακας 39: Σήραγγα προσαγωγής ΥΗΕ Λάδωνα



Εικόνα 142: Σκαρίφημα κάτοψης φράγματος ΥΗΕ Λάδωνα
(Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)



Εικόνα 143: Σκαρίφημα κατακόρυφης τομής φράγματος ΥΗΕ Λάδωνα
(Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)



Εικόνα 144: Σκαριφήματα δεξαμενής υπερχειλίσης ΥΠΕ Λάδωνα
(Αρχείο εγκαταστάσεων ΥΠΣ Λάδωνα ΔΕΗ ΑΕ)

Πηγές-Αναφορές:

- 1) Δελτίο ΣΠΜΕ- Νο 320, Στέφανος Η. Δρίτσος, «Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε έργα επεμβάσεων»
- 2) http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_KONIAMATA/ko6.3.htm
- 3) «Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών», Στέφανος Η. Δρίτσος
- 4) http://portal.tee.gr/portal/page/portal/INTER_RELATIONS/INT_REL_P/SYNERGIA_EKDHLWSEIS/2008/syn-domikwn-ylikwn/theme/6201.pdf
- 5) [Ο κλάδος στην Ελλάδα | ΕΝΩΣΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ \(hcia.gr\)](http://www.hcia.gr)
- 6) <https://el.wikipedia.org>
- 7) «Use of Steel Fiber Reinforced Sprayed Concrete in the Final Lining of Conventionally Excavated Tunnels», William “Bill” Geers, P.E. Bekaert Corporation, Marietta, GA, USA Benoit De Rivaz Bekaert Corporation
- 8) “Permanent Sprayed Concrete Linings”, ITA Working Group 12 and ITAtech. - Longrine-Avignon, France: International Tunneling and Underground Space Association, 2020.
- 9) «Υποστήριξη Υπόγειων Έργων», Α. Σοφινός, 2015
- 10) “The strengthening theory of steel fiber reinforced concrete and its application in tunnel engineering: A review”, Junchao Yang, Yuanhang Zhang and Jian Huang, Journal of Engineered Fibers and Fabrics, Volume 19: 1–17, 2024
- 11) “Shotcrete for tunnel final linings – design and construction considerations”, V. Gall & K. Zeidler, N. Munfah, D. Cerulli, North American Tunneling 2004, Ozdemir (ed) © 2004 Taylor & Francis Group, London, ISBN 90 5809 669 6
- 12) [Test set-up of the three-point bending test according EN 14651. | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net/publication/354111111)
- 13) “On the Design of Permanent Rock Support Using Fibre-Reinforced Shotcrete”, Andreas Sjölander , Anders Ansell and Erik Nordström, Division of Concrete Structures, KTH Royal Institute of Technology, 114 28 Stockholm, Sweden, επιστημονικό άρθρο στην εφημερίδα Fibers, MDPI
- 14) “Laboratory testing of shotcrete with fibres of steel, basalt or synthetic materials”, Muralidharan Rengarajan, KTH royal institute of technology
- 15) “Design of tunnel support”, N.Barton, E. Grimstad and A.Palmstrøm, Norwegian Geotechnical Institute, Norway
- 16) “Durability of shotcrete for underground support– Review and update”, Isabel Galan , Andre Baldermann, Wolfgang Kusterle, Martin Dietzel, Florian Mittermayr, Construction and Building Materials, Volume 202, 2019
- 17) “Changes in long-term performance of fibre reinforced shotcrete due to corrosion and embrittlement”, Erik Stefan Bernard, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 98, 2020
- 18) “Research Article Degradation of Shotcrete Materials Subjected to Sulfate and Chloride Attack in Varying Exposure Regimes”, Ruiqiang Zhao, Lihao Xu, Jun Yang, Yang Zou , Zhongya Zhang, Hindawi, Advances in Civil Engineering, Volume 2021
- 19) <https://rockmass.net/>
- 20) Η συμβολή των έργων στον ενεργειακό σχεδιασμό της χώρας, «Εκμετάλλευση των Υδροηλεκτρικών Σταθμών ως Έργων Πολλαπλού Σκοπού», Ι. Αργυράκης, Γενική Διεύθυνση Παραγωγής / Διεύθυνση Υδροηλεκτρικής Παραγωγής, ΔΕΗ ΑΕ, ΤΕΕ & Περιφερειακό Τμήμα ΤΕΕ Ηπείρου
<https://www.ypethe.gr/archive/ydroilektrika-erga-aheloooy>
- 21) «Αχελώος, το υδροηλεκτρικό συγκρότημα», ΔΕΗ ΑΕ, 2015
- 22) 1997 - 2012 Φωτογραφίες Φράγματος Συκιάς,
<https://www.ypethe.gr/archive/perissoteres-plirofories-fragma-sykias>
- 23) «1997-2012_foto_ergoy_sykias», ΥΠΕ Συκιάς | Υ.ΠΕ.ΘΕ. ([ypethe.gr](https://www.ypethe.gr))

- 24) «Και πάλι το σήριαλ κατά της Εκτροπής του Αχελώου και πάλι το μένος κατά των Υδροηλεκτρικών Έργων και των Φραγμάτων», Ι.Π. Στεφανάκος, Δρ. πολιτικός μηχανικός, Λέκτορας ΕΜΠ, 2014
- 25) Αρχείο ΔΕΗ ΑΕ
- 26) <https://www.eesy.gr/>
- 27) 2018 09 17 Η Σήραγγα εκτροπής Αχελώου - YouTube
- 28) <https://www.ypethe.gr/archive/perissoteres-plirofories-siragga-peykofytoy>
- 29) ΥΗΣ ΚΡΕΜΑΣΤΩΝ - Χάρτες Google
- 30) Μεσοχώρα - Χάρτες Google
- 31) <http://wikimapia.org/#lang=el&lat=37.966700&lon=23.716700&z=12&m=w>
- 32) Σήραγγες – Michaniki
- 33) Χάρτης ΥΗΕ ποταμού Αώου - ΥΗΕ Αώου - Χάρτες Google
- 34) Φωτογραφίες ΥΗΕ Αώου, <https://www.youtube.com/watch?v=wNva4nDnmuQ>
- 35) https://el.wikipedia.org/wiki/Λίμνη_Αώου
- 36) <https://www.ypethe.gr/archive/perissoteres-plirofories-yie-tayropoy>
- 37) Φωτογραφίες ΥΗΕ Ταυρωπού
<https://www.youtube.com/watch?v=fQQV87Qg7gY>
- 38) Φωτογραφίες ΥΗΕ Πλαστήρα
<https://www.youtube.com/watch?v=1Nj7zcmW3a8>
- 39) 1ο Πανελλήνιο συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων, ΤΕΕ, ΤΕΕ–Τμ.ΚΔΘ, 13-15 Νοεμβρίου, 2008: Λάρισα “ΥΗΕ – Ιλαρίωνα: Τα σημαντικότερα γεωλογικά και γεωτεχνικά προβλήματα που αντιμετώπισε η μελέτη και η κατασκευή μέχρι τώρα”, Library.tee.gr, www.tee.gr, Κ. Καραπαντελάκης, Γ. Εμμανουηλίδης,, Β. Καραγιαννάκη, Χ. Μινόπετρος
- 40) Σήραγγες – Michaniki
- 41) Ταμειυτήρας Αγ. Βαρβάρας (wikimapia.org)
- 42) Τεχνητή λίμνη Ασωμάτων και τεχνητή λίμνη Σφηκιάς ποταμού Αλιάκμονα - Wikimapia - Ας περιγράψουμε ολόκληρο τον κόσμο!
- 43) Φράγμα Ασωμάτων-Βέροια - YouTube
- 44) Φωτογραφίες ΥΗΕ Πολύφυτου
<https://www.youtube.com/watch?v=v3Tk1lvqJ0Q>
- 45) Φωτογραφίες φράγματος Πολύφυτου, <https://www.google.gr/maps/>
- 46) Υδροηλεκτρικός σταθμός Πολύφυτου (wikimapia.org)
- 47) Φωτογραφίες ΥΗΕ Πολύφυτου
<https://lengen.gr/el/2017/06/12/ελληνικά-επίσκεψη-υδροηλεκτρικός-στ/>
- 48) Υπόγειος θάλαμος δικλείδων διαχείρισης ύδατος ΥΗΣ Πολύφυτου,
<https://www.youtube.com/watch?v=1kzbVEVVpMU>
- 49) Μέθοδος RBR
<https://www.waterpowermagazine.com/features/featureadvances-in-raise-boring/featureadvances-in-raise-boring-425484.html>
- 50) Φωτογραφίες ΥΗΕ Θησαυρού - Δημοσίευση ΔΕΗ ΑΕ «ΥΗΕ Χώρας»,
Χρήση Υδροηλεκτρική Ενέργεια | Υ.Π.Ε.Θ.Ε. (ypethe.gr)
- 51) Ποτάμια / Αρκουδόρεμα-Βάλια-Κάλντα, NaturaGraeca
- 52) Φωτογραφίες ΥΗΕ Θησαυρού - <https://www.google.com/maps>
- 53) Φωτογραφίες ΥΗΕ Θησαυρού - <https://www.microhydropower.gr>
- 54) Φράγμα ΥΗΕ Θησαυρού - <https://www.google.com/maps>
- 55) Michaniki – Construction Company
- 56) <https://el.wikipedia.org/wiki/Νέστος>
- 57) ΦΡΑΓΜΑ ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗΣ - Χάρτες Google
- 58) Φράγμα ΥΗΕ Πλατανόβρυσης - <https://el.wikipedia.org/wiki/Νέστος>
- 59) Σήραγγα εκτροπής Αχελώου
<http://wikimapia.org/#lang=el&lat=39.314578&lon=21.447539&z=18&m=b>
- 60) Μάθημα Τεχνικής Γεωλογίας Υπόγειων Έργων, Τομέας Γεωτεχνικής Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Β. Μαρίνος, 2022

- 61) Έγγραφο Υπουργείου Υποδομών και Μεταφορών υπ.αρ.πρωτ.Β-501/18-09-2020 με θέμα: «Ανακοίνωση προσωπικοτήτων της Θεσσαλίας με τίτλο «Μετέωρες οι κυβερνητικές υποσχέσεις για τα υδατικά της Θεσσαλίας»
- 62) Το Υδροηλεκτρικό Έργο Κρεμαστών | Υ.ΠΕ.ΘΕ. (ypethe.gr)
- 63) Πρακτικά 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου μεγάλων φραγμάτων, ΤΕΕ «Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί της ΔΕΗ ΑΕ και η συμβολή τους στην κάλυψη των Ενεργειακών Αναγκών της Χώρας», Ι.Γ. Αργυράκης, Λάρισα 2008
- 64) Παρουσίαση «Εκμετάλλευση των υδροηλεκτρικών Σταθμών ως έργων πολλαπλού σκοπού», Ι. Αργυράκης, ΤΕΕ & Περιφερειακό Τμήμα ΤΕΕ Ηπείρου
- 65) Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών (ΔΠΜΣ) «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο [Sphragges της Ελλάδας – ΔΠΜΣ Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων \(ntua.gr\)](http://Sphragges της Ελλάδας – ΔΠΜΣ Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων (ntua.gr)
- 66) Περισσότερες Πληροφορίες : Φράγματα | Υ.ΠΕ.ΘΕ. (ypethe.gr)
- 67) <https://www.itia.ntua.gr/>
- 68) Ηλεκτρονική περιοδική έκδοση ΤΕΕ Κεντρικής και Δυτικής Θεσσαλίας, «Πρωτοβουλία του ΤΕΕ για το Έργο Μεσοχώρας», Τεύχος #88, Νοέμβριος 2014
- 69) Χάρτες και φωτογραφικό υλικό: <https://www.google.com/maps>
- 70) «Αποτελέσματα λεκάνης Βεγορίτιδας – Υδρογεωλογικά στοιχεία», Έργο «Έλεγχος χημικής ποιότητας αρδευτικών υδάτων (επιφανειακών και υπόγειων) σε κλίμακα λεκανών απορροής ποταμών Μακεδονίας - Θράκης και Θεσσαλίας», Τεύχος Α΄, Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων
- 71) Κέντρο Διεπιστημονικής Έρευνας Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, «Η ολιστική προσέγγιση της διαχείρισης της Λίμνης Πηγών Αώου», Β. Κουρούτος, Φορέας Διαχείρισης Λίμνης Παμβώτιδας, <https://mirc.ntua.gr>
- 72) Ταυρωπός - Βικιπαίδεια (wikipedia.org)
- 73) Γεωτεχνικοί Χάρτες & αρχαιακό υλικό, Ιστοσελίδα ΙΑΓΜΕ, <https://gaia.igme.gr>
- 74) https://el.wikipedia.org/wiki/Φράγμα_Θησαυρού
- 75) Στοιχεία για το ΥΗ Ταυρωπού, https://www.ypethe.gr/sites/default/files/basicpagefiles/3_1_4_perigrafi_yie_tayr_ory.pdf
- 76) Λίμνη Πολυφύτου - Βικιπαίδεια (wikipedia.org)
- 77) Υδροηλεκτρικός σταθμός Πολύφυτου (wikimapia.org)
- 78) ΔΠΜΣ Δίκαιο & Μηχανική της Ενέργειας, <https://lengen.gr/el/category/activities/visits/>
- 79) "Hydroelectric Projects of PPC SA at the Aliakmonas River", Α.Ρ.Καραγιαννίδης – Ε.Α.Ραπαϊοάνου, www.tee.gr
- 80) RBM, <https://www.waterpowermagazine.com>
- 81) <http://www.opengov.gr/minenv/?c=20300>, Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Δικτυακός Τόπος Διαβουλεύσεων
- 82) https://el.wikipedia.org/wiki/Πλατανόβρυση_Δράμας
- 83) Ελληνική Δημοκρατία, Υπουργείο Περιβάλλοντος και Δημοσίων Έργων, Ειδική Υπηρεσία Δημοσίων Έργων Αχελώου, Έργα Εκτροπής Αχελώου, Φράγμα Συκιάς, Τόμος ΙΙ από V, Τεχνικές προδιαγραφές Έργου
- 84) Ελληνική Δημοκρατία, Υπουργείο Περιβάλλοντος και Δημοσίων Έργων, Ειδική Υπηρεσία Δημοσίων Έργων Αχελώου, Έργα Εκτροπής Αχελώου, Κατασκευή Σηράγγων εκτροπής και Συναφών έργων, Τόμος ΙΙ από V, Τεχνικές προδιαγραφές Έργου
- 85) Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού ΑΕ, Διεύθυνση Ανάπτυξης ΥΗ Έργων, ΥΗ Μεσοχώρας, Σύμβαση ΜΕΗ-ΟΔ 2, Κατασκευή Οδικής σήραγγας Μεσοχώρας-φράγματος, γέφυρας Ν. Πεύκης μετά των οδικών τμημάτων τους, σήραγγας Παχτουρίου και αποστραγγιστικής σήραγγας Μεσοχώρας, Τόμος ΙΙ, Τεχνικές Προδιαγραφές, Αθήνα 2003
- 86) Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού ΑΕ, Διεύθυνση Ανάπτυξης ΥΗ Έργων, ΥΗ Μεσοχώρας, Σύμβαση ΜΕΗ-ΟΔ 2, Κατασκευή Οδικής σήραγγας Μεσοχώρας-

- φράγματος, γέφυρας Ν. Πεύκης μετά των οδικών τμημάτων τους, σήραγγας Παχτουρίου και αποστραγγιστικής σήραγγας Μεσοχώρας, Μέρος 6, Τεύχος Α, Τεχνικές Προδιαγραφές, Αθήνα 2003
- 87) Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού ΑΕ, Διεύθυνση Ανάπτυξης ΥΗ Έργων, ΥΗΕ Μεσοχώρας, Σύμβαση ΜΕΗ-ΟΔ 2, Κατασκευή Οδικής σήραγγας Μεσοχώρας-φράγματος, γέφυρας Ν. Πεύκης μετά των οδικών τμημάτων τους, σήραγγας Παχτουρίου και αποστραγγιστικής σήραγγας Μεσοχώρας, Μέρος 6, Τεύχος Β, Τεχνικές Προδιαγραφές, Αθήνα 2003
- 88) Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού ΑΕ, Διεύθυνση Ανάπτυξης ΥΗ Έργων, ΥΗΕ Μεσοχώρας στον ποταμό Αχελώο, Σύμβαση ΜΕΗ-2Τ, Κατασκευή σήραγγας προσαγωγής και συναφών έργων, Τόμος ΙΙ από V, 4.Τεχνικές Προδιαγραφές, Διεύθυνση Ανάπτυξης Υδροηλεκτρικών Έργων, 1992
- 89) Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού ΑΕ, Διεύθυνση Ανάπτυξης ΥΗ Έργων, ΥΗΕ Μεσοχώρας στον ποταμό Αχελώο, Σύμβαση ΜΕΗ-2D, Κατασκευή φράγματος, εκχειλιστή και συναφών έργων, Τόμος ΙΙ από V, 4.Τεχνικές Προδιαγραφές, Διεύθυνση Ανάπτυξης Υδροηλεκτρικών Έργων, 1989
- 90) Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Αθήνα-Ελλάδα, ΥΗΕ Πολύφυτου, Τεύχη Δημοπράτησης Έργων Πολιτικού Μηχανικού, Συμβατικά Σχέδια, Χρονοδιάγραμμα Κατασκευής, Τόμος 1, Ζυρίχη 1970
- 91) Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Διεύθυνση Υδροηλεκτρικής παραγωγής, Υδροηλεκτρικό έργο Μετσοβίτικου, Σύμβαση ΔΥΗΠ/ΜΤΗ-2Α, Αποπεράτωση κατασκευής αναχώματος-Συγκροτήματος παραγωγής και συναφών έργων- Προμήθεια και εγκατάσταση βοηθητικού Η/Μ εξοπλισμού και Μεταλλικών κατασκευών, Μέρος 6:Τεχνικές προδιαγραφές έργων ΠΜ (κεφάλαια 1 έως 7), Τόμος ΙΙ/Α από V, Αθήνα 2014
- 92) Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού ΑΕ, Διεύθυνση Ανάπτυξης ΥΗ Έργων, Διακήρυξη ΔΑΥΕ/ΙΛΗ-4, ΥΗΕ Ιλαρίωνα: Στεγανοποίηση λεκάνης Ελάτης-Οδοί αποκατάστασης κατακλυζόμενων τμημάτων οδοποιίας-Κατασκευή γεφυρών Παλουριάς-Παναγιάς, Δήμητρας – Παλιουριάς και Καρπερού – Νησιού, Τόμος ΙΙΑ, Μέρος 5:Τεχνικές προδιαγραφές, κεφάλαια 1-7, Αθήνα 2007
- 93) Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού ΑΕ, Διεύθυνση Ανάπτυξης ΥΗ Έργων, Σύμβαση ΔΑΥΕ/ΙΛΗ-4, ΥΗΕ Ιλαρίωνα: Έργο στεγανοποίησης λεκάνης Ελάτης-Οδοί αποκατάστασης κατακλυζόμενων τμημάτων οδοποιίας-Κατασκευή γεφυρών Παλουριάς-Παναγιάς, Δήμητρας – Παλιουριάς και Καρπερού – Νησιού, Τόμος ΙΙΒ, Μέρος 5:Τεχνικές προδιαγραφές, κεφάλαια 8-14, Αθήνα 2007
- 94) Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού ΑΕ, Διεύθυνση Ανάπτυξης ΥΗ Έργων, Σύμβαση ΙΛΗ-2, ΥΗΕ Ιλαρίωνα: Κατασκευή φράγματος- εκχειλιστή σταθμού παραγωγής και συναφών έργων, Τόμος ΙΙΙΒ, Μέρος 6:Τεχνικές προδιαγραφές, Εγγυημένα χαρακτηριστικά και στοιχεία εξοπλισμού, Αθήνα 2003
- 95) Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού ΑΕ, Διεύθυνση Ανάπτυξης ΥΗ Έργων, Σύμβαση ΔΑΥΕ/ΙΛΗ-4, ΥΗΕ Ιλαρίωνα: Έργο στεγανοποίησης λεκάνης Ελάτης-Οδοί αποκατάστασης κατακλυζόμενων τμημάτων οδοποιίας-Κατασκευή γεφυρών Παλουριάς-Παναγιάς, Δήμητρας – Παλιουριάς και Καρπερού – Νησιού, Τόμος ΙΙΓ, Μέρος 5:Τεχνικές προδιαγραφές, Αθήνα 2007
- 96) Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού ΑΕ, Διεύθυνση Ανάπτυξης ΥΗ Έργων, Σύμβαση ΔΑΥΕ/ΙΛΗ-2, ΥΗΕ Ιλαρίωνα: Κατασκευή φράγματος- εκχειλιστών-προσαγωγής- εκκενωτή πυθμένα-σταθμού παραγωγής και συναφών έργων, Μέρος 6α:Τεχνικές προδιαγραφές έργων Πολιτικού Μηχανικού, Αθήνα Ιούλιος 2003
- 97) «HYDROELECTRIC PROJECTS: FOR NEW GREEK POWER SYSTEM», Paper presented at Power Division Meeting, American Society of Civil Engineers OCTOBER 19, 1954, W S Merrill, Member AS C E Civil Engineer, Ebasco Services Incorporated Chief Civil Engineer, Public Power Corp. Athens, Greece

- 98) Χάρτης τεχνητής λίμνης των χωριών Άγρα, Βρύττων και Νησίου και χάρτης ΥΗΕ Άγρα - [Way: ΥΗΣ Άγρα \(923010952\) | OpenStreetMap](#)
- 99) Τεχνητή λίμνη Άγρα - https://el.wikipedia.org/wiki/Λίμνη_Άγρα
- 100) Τεχνητή λίμνη Άγρα-[Τεχνητή Λίμνη Άγρα - Χάρτες Google](#)
- 101) Φωτογραφίες ΥΗΕ Άγρα-<https://energypress.gr/news/ananeothike-gia-10-hronia-i-aero-gia-toys-yis-agra-kai-edessaioy>
- 102) [ΥΗΣ Άγρα - Χάρτες Google](#)
- 103) https://el.wikipedia.org/wiki/Οικισμός_Υδροηλεκτρικού_Σταθμού_Άγρα_Πέλλας
- 104) Υλικό αρχείου ΔΕΗ ΑΕ από τις εγκαταστάσεις του ΥΗΣ Λάδωνα, ευγενική παραχώρηση εκ μέρους του κ. Σταθά Ιωάννη, Διευθυντή του ΥΗΣ Λάδωνα, για τον ερευνητικό και εκπαιδευτικό σκοπό της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας.
- 105) Φωτογραφίες ΥΗΕ Λάδωνα-[Πηγές Λάδωνα - Χάρτες Google](#)
- 106) Φωτογραφίες ΥΗΕ Λάδωνα - [Φράγμα ΥΗΣ Λάδωνα - Χάρτες Google](#)
- 107) Υλικό αρχείου εγκαταστάσεων ΥΗΣ Λάδωνα, «Έργα Λάδωνος και Άγρας, προβλήματα θεμελιώσεως και στεγανοποίησης», Ροδόλφος Γ.Ράλλης, Τεχνικά Χρονικά, Ιούλιος-Αύγουστος 1955
- 108) Υλικό αρχείου ΥΗΣ Λάδωνα, «Στοιχεία και αποτελέσματα εκτελέσεως των Έργων Λάδωνος και Άγρα», Ροδόλφος Γ. Ράλλης, Τεχνικά Χρονικά, Φεβρουάριος-Μάρτιος 1956
- 109) Υλικό αρχείου ΥΗΣ Λάδωνα, «Γενικό Σχέδιο Έργου Υδροηλεκτρικού Εργοστασίου ποταμού Λάδωνα»
- 110) <https://energypress.gr/news/ananeothike-gia-10-hronia-i-aero-gia-toys-yis-agra-kai-edessaioy>