

Συνθήκες αστοχίας του φράγματος Τριαδίου, Δήμου Θέρμης, Νομού Θεσσαλονίκης, τον Ιούνιο του 2007.

Ν. Καζίλης,
Τεχνικός Γεωλόγος, Πτ.Γεωλ., M.Sc., DIC, MBA..
Διευθυντής Ελληνικού Υποκαταστήματος GEODATA S.p.A.

Λέξεις κλειδιά: Αστοχία φράγματος, διασωλήνωση, φράγμα ομοιογενούς διατομής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Την τελευταία εβδομάδα του Ιουνίου του 2007, συνέβει αστοχία του φράγματος Τριαδίου τύπου διασωλήνωσης. Διερευνήθηκαν οι συνθήκες του φαινομένου της αστοχίας του φράγματος και έχουν σκιαγραφηθεί τέσσερα σενάρια πιθανής προέλευσης της διασωλήνωσης. Το πιθανότερο βασίζεται σε διαρροή πέριξ του εγκιβωτισμένου χαλύβδινου αγωγού προσαγωγής, είτε λόγω πλημμελούς συμπίκνωσης των εδαφικών υλικών, είτε, λόγω διαρροής του ίδιου του αγωγού από τεχνικό του μειονέκτημα και λόγω πλημμελούς συμπίκνωσης των εδαφικών υλικών, και στην συνέχεια διαρροή μέσω ρωγμών του σώματος του φράγματος παρακατακόρυφου και παραοριζόντιου χαρακτήρα που προήλθαν από πλημμελή συμπίκνωση των εδαφικών υλικών του σώματος του φράγματος και πέριξ του εγκιβωτισμένου αγωγού προσαγωγής.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το φράγμα και ο ταμιευτήρας Τριαδίου και τα συναφή υδροτεχνικά τους έργα (υπερχειλιστής και αγωγός προσαγωγής) έχουν κατασκευασθεί πριν περίπου δέκα (10) χρόνια από τον Δήμο Θέρμης και βρίσκονταν σε λειτουργία μέχρι και τον Ιούνιο του 2007. Ο σκοπός της λειτουργίας τους είναι πολλαπλός, ήτοι κάλυψη υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών του Δήμου, ρύθμιση και διατήρηση βασικής ροής στην κοίτη του χειμάρρου ολόκληρο το χρόνο και περιβαλλοντική της συντήρηση, ο εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφορέων που βρίσκονται κατάντη του φράγματος και η αναψυχή. Την τελευταία εβδομάδα του Ιουνίου του 2007, συνέβει αστοχία του φράγματος Τριαδίου. Αμέσως μετά την αστοχία, ο Δήμος Θέρμης ανέθεσε σε γραφείο μελετών την άμεση διερεύνηση των συνθηκών αστοχίας για την λήψη των άμεσων ενδεδειγμένων μέτρων αντιμετώπισης του προβλήματος και δρομολόγησε την αποκατάστασή του.

2 ΒΑΣΙΚΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΤΡΙΑΔΙΟΥ

Το φράγμα Τριαδίου κατασκευάστηκε το 1997 από τον Δήμο Θέρμης στην θέση Παλιά Λατομεία (Ισενλή) του χειμάρρου Τριαδίου, χωρίς συγκεκριμένη Οριστική τεχνική μελέτη και χωρίς τήρηση αυστηρών τεχνικών προδιαγραφών κατασκευής σε ότι αφορά στην συμπίκνωση του σώματος του φράγματος. Βέβαια, της κατασκευής του φράγματος προηγήθηκε η εκπόνηση και η έγκριση μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων και διασφαλίσθηκε η αντίστοιχη αδειοδότηση του έργου. Τα γεωμετρικά στοιχεία του φράγματος είναι: Μήκος στέψης φράγματος της τάξης των 160μ, ύψος φράγματος περίπου 36,5μ. και μέγιστο πλάτος σώματος φράγματος στην θεμελίωση της τάξης των 150μ. Το υψόμετρο, στην στέψη του φράγματος είναι 244,50μ., ενώ στον κατάντη πόδα του φράγματος είναι 208,0μ. Ο ωφέλιμος όγκος του ταμιευτήρα είναι 250.000 κ.μ., ενώ η επιφάνειά του στην ανώτατη στάθμη της λίμνης είναι 18.000 τ.μ. Για την αντιμετώπιση της παροχής πλημμύρας έχει κατασκευασθεί υπερχειλιστής, τύπου ανοικτής διώρυγας, ορθογωνικής διατομής και είναι

ανεπένδυτος. Στο ανάντη πρανές του φράγματος έχει κατασκευαστεί λιθορριπή προστασίας έναντι του κυματισμού της λίμνης με ογκολίθους χωρίς τήρηση τεχνικών προδιαγραφών κατασκευής της. Το 2003, η στάθμη του ταμιευτήρα έφθασε μέχρι το υψόμετρο 240,55μ. (19-06-2003), το 2004 μέχρι το υψόμετρο 241,04μ. (10-04-2004), ενώ το 2007 πλησίασε αρκετά την Ανώτατη στάθμη της λίμνης μέσα στον Ιούνιο.



Εικόνα 1. Γενική άποψη του κατάντη πρανούς του φράγματος μετά την αστοχία τύπου διασωλήνωσης. Φαίνεται καθαρά ο σιραγγοειδής χαρακτήρας της διόδου διαφυγής.

Η διατομή του φράγματος (σύμφωνα με τις πληροφορίες που εμπεριέχονται στην Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων και οι οποίες βέβαια ελέγχονται ως προς την ακρίβειά τους σε ότι αφορά στην κατασκευή) είναι ομοιογενής, με κλίσεις πρανών σώματος του φράγματος, ανάντη 1:1,6 (ή πιθανόν και λίγο ηπιότερη) και κατάντη 1:2,15 αντίστοιχα. Το φράγμα έχει κατασκευασθεί από εδαφικό υλικό κυρίως αργιλικού χαρακτήρα, που προέρχεται από χωματουργικές εργασίες της περιοχής, τις εκσκαφές θεμελιώσεων των οικοδομών των οικισμών της Θέρμης και του Τριαδίου και σε ένα μέρος από τις εκσκαφές διαμόρφωσης της λεκάνης του ταμιευτήρα. Ειδικότερα, τα υλικά κατασκευής του φράγματος, γεωλογικά, προέρχονται κυρίως από αποσαθρωμένους και υγιείς σχηματισμούς των καστανών, υπερστερεοποιημένων αργίλων και αργιολίθων της περιοχής της Θέρμης και της ευρύτερης περιοχής, που σε αναμοχλευμένη κατάσταση περιέχουν πολύ πλαστικά αργιλικά ορυκτά. Επιπρόσθετα των παραπάνω αναφερθέντων σημειώνεται, ότι έχουν χρησιμοποιηθεί και τυχαία υλικά παντός είδους (διάφορα μπάζα και τεχνογενή αδρανή υλικά απόρριψης), αλλά σε σημαντικά μικρότερη ποσότητα και κυρίως σε θέσεις πέραν και έξω των τελικών γραμμών του επιχώματος του φράγματος στην κατάντη παρειά του.

Γεωλογικά, η θεμελίωση του φράγματος έγινε σε υγιείς οφιολιθικούς σχηματισμούς (περιδοτίτες,

διαβάσεις και γάββρους), χωρίς την εφαρμογή ειδικών απαιτήσεων από κατασκευαστική άποψη. Για την συμπίκνωση του σώματος του φράγματος χρησιμοποιήθηκε κυρίως δονητικός κυλινδρικός συμπίεστής και κατά προφορικές πληροφορίες, η κατασκευή του σώματος του φράγματος, έγινε σε στρώσεις των λίγων δεκάδων εκατοστών. Δεν αποκλείεται να παρέμειναν προδιαμορφωμένες λείες επιφάνειες ασυνέχειας παραοριζόντιας ανάπτυξης (μάλλον όμως περιορισμένης έκτασης) από την συμπίκνωση των διαδοχικών στρώσεων των εδαφικών υλικών στο εσωτερικό του σώματος του φράγματος. Το σώμα του φράγματος εγκάρσια και σχεδόν στο κεντρικό του χαμηλό σημείο, διατρέχει ο χαλύβδινος αγωγός προσαγωγής του έργου διαμέτρου Φ600, που κατά πληροφορίες είναι εγκιβωτισμένος σε σκυρόδεμα. Οι συνθήκες συμπίκνωσης της περιοχής γύρω από τον εγκιβωτισμένο αγωγό προσαγωγής του φράγματος δεν είναι απολύτως γνωστές, αλλά είναι σίγουρο ότι δεν λήφθηκαν υπόψη ειδικές απαιτήσεις και τεχνικές συμπίκνωσης του εδαφικού υλικού στην ζώνη γύρω από τον εγκιβωτισμένο χαλύβδινο αγωγό.



Εικόνα 2. Στόμιο εξόδου του σωλήνα σηραγγοειδούς μορφής της διόδου διαφυγής. Διακρίνεται το θολό του νερού της διαφυγής δηλωτικό των διεργασιών εσωτερικής διάβρωσης στο σώμα του φράγματος.

3 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Σημειακές ενδείξεις συγκεντρωμένων διαρροών - υγρασίες και αυτού καθ'αυτού διαρροές μικρής παροχής, παρατηρήθηκαν στην κατάντη παρεία του φράγματος, 2-3 χρόνια μετά την έναρξη της λειτουργίας του ταμιευτήρα. Ειδικότερα, στο κατάντη πρανές του φράγματος, εμφανίστηκαν σημεία διαρροών, με μορφές, άλλοτε εκτεταμένης υγρασίας, άλλοτε ανάπτυξης ειδικής υδροχαρούς χλωρίδας και άλλοτε συγκεντρωμένης ροής νερού πολύ μικρής παροχής, σε

διαφορετικά υψόμετρα, αρχικά στα χαμηλά του (υψ. 210μ. περίπου) στην περιοχή του αγωγού προσαγωγής, στην συνέχεια σε ψηλότερα σημεία του σώματος του φράγματος σε υψ. 219,35μ και τον καλοκαίρι του 2006 στο μεγαλύτερο υψόμετρο 228,30 μ. (και ακόμη ψηλότερα) που είναι στο 58% (έως και του 70%) του συνολικού ύψους του σώματος του φράγματος.

Η αστοχία του φράγματος, με την τυπική μορφή διασωλήνωσης, με συγκεντρωμένη παροχή καθαρού νερού (κατ' αρχήν ένδειξη πέρατος πλέον των διαδικασιών εσωτερικής διάβρωσης του φράγματος) της τάξης των 250-300 κ.μ./ώρα (από οπτική εκτίμηση στις 4 Ιουλίου 2007 – βλ. σχετική φωτογραφία) και με έξοδο του νερού σε υψ. 219μ. περίπου, στο κατάντη πρανές του φράγματος, συνέβει την τελευταία εβδομάδα του Ιουνίου 2007, μετά από σημαντική αύξηση της στάθμης της λίμνης από παρατεταμένες βροχοπτώσεις που συνέβησαν τον Μάιο του 2007. Αρχικά η παροχή της διαφυγής ήταν σημαντική, αλλά με το χρόνο μειωνόταν και εξακολουθούσε να υπάρχει στις 2 Αυγούστου 2007 (με παροχή της τάξης των 70-80 κυβ. μ./ωρ - από οπτική εκτίμηση). Χαρακτηριστικό είναι, ότι το νερό της διαφυγής από την 15 Ιουλίου περιείχε εκ νέου πολύ μεγάλο ποσοστό λεπτοκόκκων στερεών αιωρουμένων αργιλικής φύσης, χαρακτηριστικό της επανέναρξης των διαδικασιών εσωτερικής διάβρωσης. Κρίνεται ότι οι διαδικασίες της εσωτερικής



Εικόνα 3. Κατολίσθηση του ανάντη πρανούς του φράγματος, που ξεκίνησε μετά τις 10 Ιουλίου, λόγω απότομου καταβιβασμού της στάθμης του ταμιευτήρα. Η φωτογραφία ελήφθη στις 24 Ιουλίου.

διάβρωσης επανενεργοποιήθηκαν, λόγω της δημιουργίας τυπικής κυκλικής, κυλινδρικούς κατολίσθησης που συνέβει στο ανάντη πρανές του φράγματος (βλ. εικόνα 3), μάλλον εξ' αιτίας της ταχείας πτώσης στάθμης στο ήδη κορεσμένο ανάντη πρανές του φράγματος και, δευτερευόντως, λόγω πιθανής υποσκαφής της διαβρωθείσας περιοχής της ευρύτερης περιοχής του αγωγού προσαγωγής στα ανάντη του φράγματος, από την επισυμβείσα διαφυγή. Στο σημείο της κύριας

εξόδου της διαρροής της αστοχίας, είχε δημιουργηθεί από το καλοκαίρι του 2006, μικρή αστοχία κατολισθητικού χαρακτήρα στο κατάντη πρανές του φράγματος (τυπική κυλινδροειδής αστοχία πρανούς, πολύ κλειστής κυκλικής μορφής άνω τμήματος με 2-3 πολύ περιορισμένα επάλληλα φρύδια αποκολλήσεως – τυπική έναρξη sloughing φράγματος). Η αστοχία από διασωλήνωση του σώματος του φράγματος δημιούργησε ευμεγέθη σωλήνα στο σώμα του φράγματος, σπαραγγοειδούς ανάπτυξης (βλ. εικόνα 2), με άνοιγμα (διάμετρο) της τάξης μεγαλύτερης του ενός (1) μέτρου στην έξοδο και με σταδιακά μειούμενο μέγεθος προς το εσωτερικό του φράγματος. Η ανώτατη στάθμη της λίμνης κατά την αστοχία ήταν αρκετά πάνω από το υψόμετρο του σημείου διαρροής στο κατάντη πρανές του φράγματος. Στις 4 Ιουλίου του 2007, έγινε ενδελεχής αναγνώριση ολόκληρης της περιοχής του σώματος του φράγματος και του ταμιευτήρα για την διαπίστωση τυχόν σημείων άλλων συγκεντρωμένων διαφυγών στα κατάντη τμήματα του πρανούς του σώματος του φράγματος και, κυρίως, συγκεντρωμένων σημείων εισροών στα ανάντη τμήματα του φράγματος και στις επαφές του με τον ταμιευτήρα. Στα κατάντη υπήρχε το κύριο σημείο της διαρροής της αστοχίας από διασωλήνωση σε υψόμετρο περίπου 219μ. και δευτερεύοντα σημεία διαρροής στα χαμηλά στην περιοχή εξόδου του εγκιβωτισμένου αγωγού προσαγωγής, ενώ παρατηρήθηκε ότι παλαιότερα σημεία ανάπτυξης διαρροών σε μεγαλύτερα υψόμετρα του σώματος του φράγματος, ήταν πλέον εντελώς στεγνά. Στο πόδι του κατάντη πρανούς του φράγματος και, ειδικότερα, στην περιοχή που τέμνεται από τον αγωγό διαφυγής, είχε δημιουργηθεί λαγκούνα (λιμνούλα) και φαινόταν ότι υπήρχε επίσης διαρροή, αλλά ήταν δύσκολο να εκτιμηθεί η παροχή της, τουλάχιστον οπτικά. Στα ανάντη του σώματος του φράγματος δεν διαπιστώθηκε κανένα σημείο ενδεικτικό της δημιουργίας χοάνης συγκεντρωμένης εισροής-διαφυγής σε ολόκληρο το μέτωπο της ανάντη παρειάς του σώματος του φράγματος και των αντερεισμάτων του. Στην περιοχή του υπερχειλιστή και ειδικά στο ανάντη τμήμα του, υπήρχε κάποια ένδειξη ανοίγματος ασυνέχειας του περιδοιτικού υποβάθρου, αλλά μετά από ενδελεχή εξέταση των λεπτομερών τεχνικογεωλογικών χαρακτηριστικών του βράχου, διαπιστώθηκε ότι το άνοιγμα ήταν μόνο λίγων δεκάδων εκατοστών επιφανειακά και στην συνέχεια υπήρχε πλήρες κλείσιμο της ανοικτής ρωγμής, χωρίς να υπάρχει ένδειξη ανοικτής συνέχειας και υδραυλικής επικοινωνίας προς τα κατάντη του φράγματος. Από την 10η Ιουλίου φάνηκε ρωγμή εφελκυσμού στο ανάντη πρανές του φράγματος και σε υψόμετρο περίπου 228μ. και, μέχρι την 20ή Ιουλίου του 2007, διαμορφώθηκε μια πλήρης τυπική μορφή κυκλικής, κυλινδροειδούς κατολίσθησης, με έντονο φρύδι αποκόλλησης, ανοίγματος περί το 0,5μ. και με συνεχώς αυξανόμενη μετάπτωση, η οποία έφτασε περίπου τα 6,0μ., στις 6 Αυγούστου 2007 (βλ. εικόνα 3). Η δημιουργία της υπόψη κατολίσθησης (που σημειωτέον είναι υπαίτια για την εκ νέου μεταφορά λεπτοκόκκων αργίλου του νερού της διαφυγής), οφείλεται, κατά την άποψή μας, στην ταχεία πτώση της στάθμης του ταμιευτήρα από την διαφυγή υπό συνθήκες αστράγγιστης φόρτισης της ανάντη παρειάς του φράγματος.

4 ΑΣΤΟΧΙΑ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΔΙΑΣΩΛΗΝΩΣΗ – ΚΟΙΝΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΟΜΟΙΟΓΕΝΟΥΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ, ΑΝΕΠΑΡΚΟΥΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ, ΧΩΡΙΣ ΦΙΛΤΡΑ.

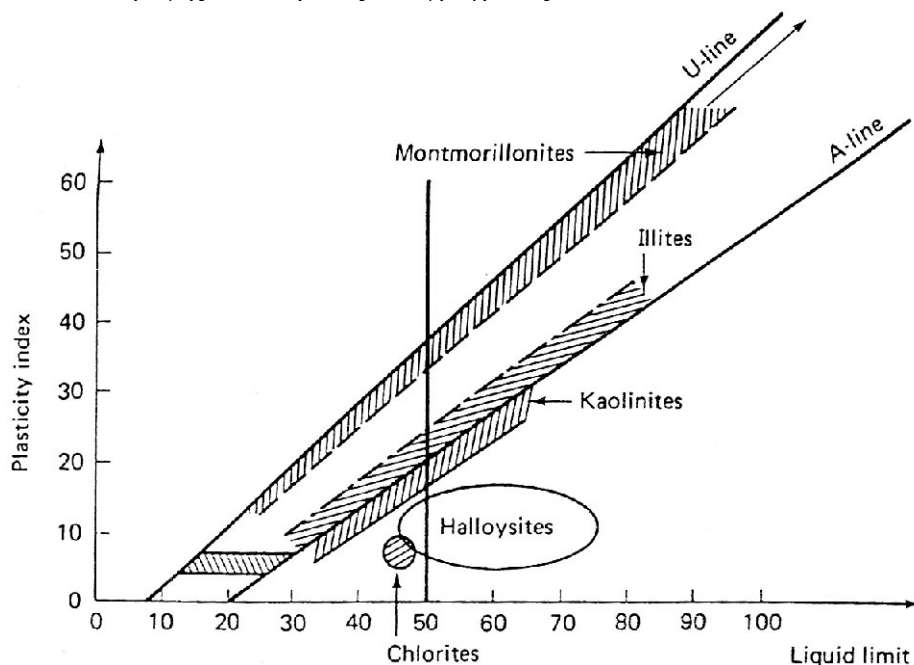
Για την καλύτερη αντίληψη των θεμάτων που σχετίζονται με τις περιπτώσεις αστοχίας διασωλήνωσης των φραγμάτων, κρίνεται σκόπιμη η παράθεση εδώ κάποιων βιβλιογραφικών στοιχείων με συνοπτική αναφορά.

Μέχρι σήμερα διεθνώς έχουν καταγραφεί πάρα πολλές περιπτώσεις καταστροφικών αστοχιών φραγμάτων από διασωλήνωση (ή άλλως από προοδευτική διάβρωση συγκεντρωμένης ροής), ειδικότερα σε περιπτώσεις παλαιών φραγμάτων, μικρού γενικά ύψους και κυρίως ομοιογενούς διατομής.

Καθώς το νερό διηθείται μέσω του καλά (ή μη) συμπυκνωμένου σώματος του φράγματος, το υδραυλικό του φορτίο καταναλώνεται προσπαθώντας να ξεπεράσει τις δυνάμεις που αντιδρούν

στην ροή μέσω των πόρων και των κενών του σώματος του φράγματος. Στη διάρκεια της διαδικασίας αυτής, το διηθούμενο νερό αναπτύσσει δυνάμεις διάβρωσης, που τείνουν να παρασύρουν τα σωματίδια των εδαφικών στρώσεων μαζί με το νερό, μέσω του σώματος του φράγματος. Εάν οι δυνάμεις που αντιδρούν στην διάβρωση είναι μικρότερες από αυτές που τις προκαλούν, τα εδαφικά σωματίδια, συμπαρασύρονται με το διηθούμενο νερό, ξεπλένονται και έτσι η διασωλήνωση ξεκινά. Οι δυνάμεις που αντιδρούν στην διάβρωση εξαρτώνται από την συνοχή του εδάφους, το φαινόμενο αλληλοκλειδώματος των κόκκων του εδάφους, το βάρος των εδαφικών σωματιδίων και της λειτουργίας της ζώνης του λεπτόκοκκου φίλτρου του φράγματος (αν υπάρχει τέτοιο). Εάν το σώμα του φράγματος είναι πλήρως ομογενές, τότε οι δυνάμεις της διάβρωσης είναι κανονικά κατανεμημένες στον χώρο. Σε περιοχές όπου οι συγκεντρώσεις παροχής εμφανίζονται στην κατάντη παρειά (πρανές) του φράγματος, οι δυνάμεις διάβρωσης των εδαφικών σωματιδίων είναι πλέον τεράστιες. Η μετακίνηση αρχικά μικρών εδαφικών μαζών σε σημείο του φράγματος από τις δυνάμεις διάβρωσης, αυξάνει σημαντικά τις συγκεντρωμένες ροές διήθησης και αντίστοιχα συμβαίνει αύξηση των δυνάμεων διαβρώσεως και η κατάσταση επιδεινώνεται πλέον άμεσα σε φαύλο κύκλο αύξησης των δυνάμεων διάβρωσης και αύξησης της παροχής διαρροής μέχρι, είτε την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ διάβρωσης και παροχής διαρροής (στην καλύτερη περίπτωση από άποψη διακινδύνευσης της ακεραιότητας του σώματος του φράγματος και αντίστοιχα της περιοχής κατάντη, αλλά με απώλεια πολύτιμου νερού του ταμιευτήρα, είτε την πλήρη καταστροφή του σώματος του φράγματος και καθολική διαφυγή με κυματισμό του νερού του ταμιευτήρα προς τα κατάντη (στην χειρότερη περίπτωση, με σημαντικές καταστροφές στην περιοχή κατάντη του φράγματος).

Οι περισσότερες σοβαρές περιπτώσεις καταστροφικής διασωλήνωσης φραγμάτων έχουν αναπτυχθεί από ανάστροφες διαβρώσεις συγκεντρωμένων ροών προς τον ταμιευτήρα μέσω του σώματος του φράγματος. Η διάβρωση ξεκινά από το κατάντη σημείο και προοδευτικά προχωρεί ανάδρομα προς τον ταμιευτήρα, με συνεχή προοδευτική διεύρυνση του σωλήνα, μέχρι τελικής απόλυτης υδραυλικής επικοινωνίας του κατάντη τμήματος του φράγματος με τον ταμιευτήρα (αστοχία) και καταστροφής του σώματος του φράγματος.



Γράφημα 1. Διάγραμμα πλαστικότητας και διαβρωσιμότητας των αργιλικών ορυκτών.

Οι περισσότερες περιπτώσεις αστοχιών φραγμάτων από διασωλήνωση συνδέονται με διαφυγές που παρατηρήθηκαν στα φράγματα κάποιο χρονικό διάστημα (άλλοτε μικρότερο και άλλοτε μεγαλύτερο) πριν την οριστική αστοχία.

Η προέλευση των διαφυγών που οδήγησαν σε αστοχία φράγματος με διασωλήνωση είναι πολλαπλή : η συνηθέστερη οφείλεται σε πολύ πτωχό ποιοτικά έλεγχο της κατασκευής του φράγματος και ειδικότερα της συμπίκνωσης του σώματος του φράγματος, η πλημμελής συμπίκνωση του υλικού του φράγματος γύρω από εγκάρσιους σωλήνες ή αγωγούς, που ενσωματώνονται στο φράγμα, ή πλημμελής συμπίκνωση στην επαφή σώματος φράγματος και θεμελίωσής του, η διαφυγή μέσω ρωγμών που έχουν προκληθεί από διαφορικές καθιζήσεις του σώματος του φράγματος κλπ. Μια άλλη μορφή διαφυγών οφείλεται σε θραύση αγωγών και σωλήνων που διαπερνούν το φράγμα (από καθιζήσεις της θεμελίωσης ή προϋπάρχουσες ατέλειες των χαλύβδινων σωλήνων), όπου νερό υπό πίεση διοχετεύεται από τον σωλήνα προς το σώμα του φράγματος.

Έρευνα σχετικά με την αντίσταση σε ανάπτυξη διασωλήνωσης έδειξε ότι η επιρροή των ιδιοτήτων των εδαφών είναι καθοριστική στην αντίστασή του σε διασωλήνωση. Αποδείχθηκε ότι, αν εξαιρεθεί η ορυκτολογική σύσταση των εδαφικών υλικών, τα μέσης πλαστικότητας εδαφικά υλικά κατασκευής του φράγματος ομοιογενούς διατομής είναι τα πιο ανθεκτικά σε μηχανισμούς διασωλήνωσης. Αντίθετα, τα μη πλαστικά, ή τα πολύ πλαστικά εδαφικά υλικά είναι περισσότερο επιρρεπή σε μηχανισμούς διασωλήνωσης. Η ορυκτολογική σύσταση των εδαφικών σχηματισμών είναι αυτή που επηρεάζει επίσης σημαντικά την ανάπτυξη των μηχανισμών διασωλήνωσης ή όχι. Αναλυτικότερα, τα διαβρώσιμα (dispersive) αργιλικά υλικά με μεγάλη ορυκτολογική περιεκτικότητα σε μοντοριλλονίτη είναι εξαιρετικά επιρρεπή σε φαινόμενα διασωλήνωσης, τα εδαφικά υλικά με ορυκτολογική περιεκτικότητα κυρίως ιλλίτη είναι ενδιάμεσως επιρρεπή σε ανάπτυξη φαινομένων διασωλήνωσης, ενώ τα εδαφικά υλικά με μεγάλη ορυκτολογική περιεκτικότητα σε καολίνη και συναφή ορυκτά είναι εξαιρετικά ανθεκτικά σε φαινόμενα διασωλήνωσης. Αυτό όμως που από την εμπειρία αποδείχθηκε εξαιρετικά αποτελεσματικό σε αντίσταση κατά της ανάπτυξης μηχανισμών διασωλήνωσης, πέραν της πλαστικότητας και των ορυκτολογικών χαρακτηριστικών των εδαφικών σχηματισμών, είναι εφαρμογή ζωνών καλώς διαβατισμένων φίλτρων μέσα στο σώμα του φράγματος, έτσι ώστε, τα λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά να μην μπορούν να ξεπλυθούν σε καμιά περίπτωση στην ζώνη των φίλτρων και έτσι να μην μπορούν να αναπτυχθούν κενά, ρωγμές και σωλήνες από διαρροές διαμπερώς στο σώμα του φράγματος.

5 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΤΡΙΑΔΙΟΥ

5.1 Γενικά

Από την διερεύνηση των ενδείξεων των επί τόπου συνθηκών και την κριτική εξέταση διαφόρων στοιχείων και πληροφοριών από την κατασκευή του φράγματος, κρίθηκαν σημαντικά και σημειώνονται παρακάτω τα εξής σημεία:

- α. Για την κατασκευή του φράγματος δεν υπήρξε (Προκαταρκτική και Οριστική) τεχνική μελέτη, αλλά χρησιμοποιήθηκαν απλά ενδεικτικά, γενική διάταξη, διατομές κλπ στοιχεία, από άλλο παρόμοιο έργο μικρότερου ύψους.
- β. Το σώμα του φράγματος που είναι ομοιογενούς διατομής είναι κατασκευασμένο κυρίως με αργιλικά εδαφικά υλικά, που προέρχονται από τις πολύ πλαστικές, ερυθροκάστανες, αναμοχλευμένες, υπερστερεοποιημένες, αργίλους της περιοχής για τις οποίες υπάρχει υπόνοια σημαντικής περιεκτικότητας ορυκτών μοντοριλλονίτη και κατά συνέπεια διαβρώσιμων (dispersive) αργιλικών ορυκτών.
- γ. Στο σώμα του φράγματος δεν είχε προβλεφθεί και αντίστοιχα δεν είχε κατασκευασθεί ζώνη

λεπτοκόκκου φίλτρου στο κατάντη τμήμα του, που συνήθως επιτελεί εκτός των άλλων λειτουργιών της και υπηρεσίες διακοπής δημιουργίας ανοικτών ρωγμών και διάβρωσης αργλικών τμημάτων του φράγματος, ενώ επιτρέπει την εκτόνωση των υδραυλικών πιέσεων και των διαρροών δια μέσου του σώματος του φράγματος.

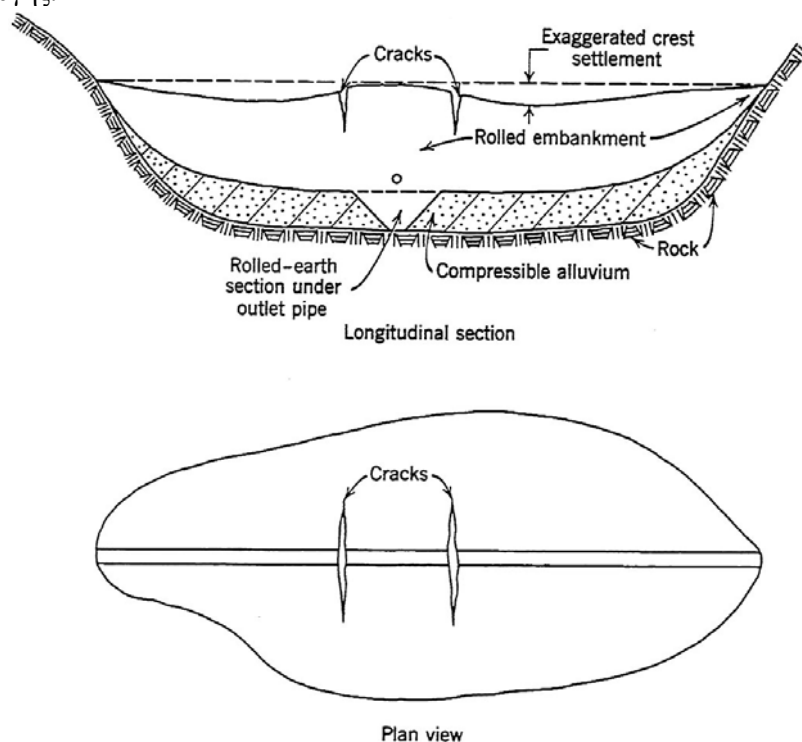
- δ. Το σώμα του φράγματος δεν κατασκευάστηκε με πιστή εφαρμογή απαιτήσεων και τεχνικών προδιαγραφών συμπίκνωσης εδαφικών υλικών, στην μέγιστη πυκνότητα και στην βέλτιστη υγρασία. Επιπρόσθετα, σημειώνεται ότι ο εξοπλισμός συμπίκνωσης που χρησιμοποιήθηκε κατά πληροφορίες (δονητικός κιλυνδρικός συμπίεστής), δεν ήταν ο καταλληλότερος και υπάρχει υπόνοια ότι στο σώμα του φράγματος αφέθηκαν, παραοριζόντιες, λείες επιφάνειες διαχωρισμού μεταξύ των διαδοχικών συμπτυνωθεισών στρώσεων εδαφικών υλικών.
- ε. Το σώμα του φράγματος και προς το χαμηλό κεντρικό του σημείο διατρέχει εγκάρσια ο χαλύβδινος αγωγός προσαγωγής του έργου, που είναι εγκιβωτισμένος σε σκυρόδεμα και θεμελιωμένος σε συμπτυνωμένη θεμελίωση, για τον οποίο δεν λήφθηκαν υπόψη, ούτε οι ειδικές μελετητικές προβλέψεις διάταξης αποκοπής της τυχόν υπόγειας ροής στην ζώνη πέριξ αυτού, ούτε και ειδικές κατασκευαστικές προβλέψεις και προδιαγραφές διαλογής και αποτελεσματικής συμπίκνωσης του εδαφικού υλικού πέριξ του εγκιβωτισμένου αγωγού.
- στ. Ενδείξεις και σημεία συγκεντρωμένης ροής διαφυγών και αστοχίες τυπικών κυκλικών μορφών κατολισθήσεων (sloughing) στο κατάντη πρηνές του φράγματος, είχαν σημειωθεί αρκετές πριν 2-3 χρόνια, τόσο σε χαμηλά σημεία, όσο και σε αρκετά ψηλά σημεία του κατάντη πρηνούς του φράγματος.
- ζ. Απόθεση (ανεξέλεκτη) επιπρόσθετων εδαφικών και στερεών αδρανών προϊόντων απόρριψης (μιάζων) στο κατάντη πρηνές του φράγματος, δημιούργησε τοπικά συνθήκες φόρτισης και παραμορφώσεων κατολισθητικού χαρακτήρα με πιθανή ανάπτυξη παρακατακόρυφων ρωγμών εφεκλυσμού παράλληλων με τον άξονα του φράγματος σε διάφορα ύψη του σώματος του φράγματος, κυρίως στο κατάντη πρηνές του.

Με βάση τα παραπάνω αναφερθέντα, εξαιρετικά σημαντικά και κρίσιμα στοιχεία, κατά την άποψή μας, σκιαγραφούνται οι παρακάτω πιθανολογούμενες περιπτώσεις αστοχίας φράγματος από διασωλήνωση : α) Διασωλήνωση πέριξ του εγκιβωτισμένου αγωγού προσαγωγής σε ολόκληρο το μήκος του, λόγω πλημμελούς συμπίκνωσης του εδαφικού υλικού πέριξ του εγκιβωτισμένου αγωγού και έξοδο διαφυγής χαμηλά στην κατάντη παρειά του φράγματος επίσης στην περιοχή και εκατέρωθεν του εγκιβωτισμένου αγωγού προσαγωγής (η υπόψη περίπτωση συνέβει αλλά είναι μικρής έκτασης), β) Διασωλήνωση πέριξ του εγκιβωτισμένου αγωγού προσαγωγής σε κάποιο μήκος του, λόγω πλημμελούς συμπίκνωσης του εδαφικού υλικού στην επαφή του εγκιβωτισμού, στη συνέχεια αναστόμωση του σωλήνα διαφυγής και έξοδος του ψηλότερα στην κατάντη παρειά του φράγματος, με υδραυλική επικοινωνία αρχικά σε παρακατακόρυφη ρωγμή του τύπου των εφελκυστικών ρωγμών των κατολισθήσεων και στην συνέχεια μέσω προϋπάρχουσας λείας και διαμπερούς επιφάνειας του σώματος του φράγματος προς στην κατάντη παρειά του φράγματος, γ) Διασωλήνωση σε αυτοτελή, διαμπερή και λεία, προϋπάρχουσα επιφάνεια του σώματος του φράγματος, λόγω πλημμελούς συμπίκνωσης του εδαφικού υλικού και έξοδος διαφυγής προς το κατάντη του σώματος πρηνές, δ) Ένας συνδυασμός όλων των παραπάνω περιπτώσεων, με διασωλήνωση σε εξαιρετικά περίπλοκη γεωμετρία αγωγό. Τα υπόψη πιθανολογούμενα σενάρια αναπτύσσονται διεξοδικότερα παρακάτω.

5.2 Σενάριο Α.

Διασωλήνωση πέριξ του εγκιβωτισμένου αγωγού προσαγωγής σε ολόκληρο το μήκος του, λόγω πλημμελούς συμπίκνωσης του εδαφικού υλικού πέριξ του εγκιβωτισμένου αγωγού και διαφυγή, είτε κατ' ευθείαν από τον ταμειευτήρα, είτε από διαρροή του ίδιου του αγωγού σε κάποιο σημείο λόγω διάτρησής του. Τελικά, έξοδος διαφυγής χαμηλά στην κατάντη παρειά του φράγματος επίσης στην περιοχή του εγκιβωτισμένου αγωγού προσαγωγής. Κατά την ενδελεχή αναγνώρισή μας

εντοπίστηκαν σημεία περιορισμένης διαφυγής στα κατάντη που αντιστοιχούν σε διαρροές τύπου διασωλήνωσης, ένθεν και εκείθεν του εγκιβωτισμένου αγωγού προσαγωγής στα κατάντη. Αυτή η περίπτωση είχε παρατηρηθεί και το καλοκαίρι του 2006, αλλά η πολύ μικρή συγκεντρωμένη ροή διαφυγής, παρόλη την ανάπτυξη τυπικής μορφής κατολισθητικής αστοχίας του χαμηλού τμήματος του κατάντη πρηνούς του φράγματος (sloughing), δεν είχε οδηγήσει σε γενικευμένη τυπική αστοχία διασωλήνωσης του φράγματος. Τον Ιούνιο του 2007, η παροχή διαφυγής ήταν σίγουρα μεγαλύτερη (από αυτήν του 2006), αναπτύχθηκε διασωλήνωση δύο σημείων, μάλλον ένθεν και εκείθεν του εγκιβωτισμένου αγωγού, με αποτέλεσμα την δημιουργία λαγκούνας (λιμνούλας), χωρίς όμως ανάπτυξη πολύ ισχυρών διαβρωτικών δυνάμεων και σχηματισμό μεγάλων σπαραγγοειδών σωλήνων διαφυγής.

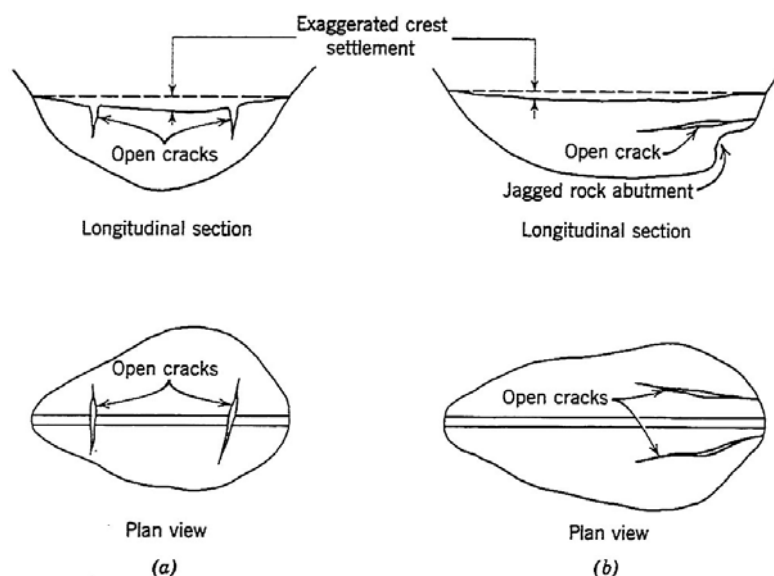


Εικόνα 4. Εξήγηση ανάπτυξης εγκαρσίων ρωγμών στο σώμα του φράγματος, εξ' αιτίας διαφορετικής καθίζησης ένθεν και εκείθεν του εγκιβωτισμένου αγωγού προσαγωγής (περίπτωση σεναρίου Α).

5.3 Σενάριο Β.

Διασωλήνωση περίξ του εγκιβωτισμένου αγωγού προσαγωγής σε κάποιο ή σε ολόκληρο το μήκος του, λόγω πλημμελούς συμπίκνωσης του εδαφικού υλικού από διαφυγή, είτε κατ' ευθείαν από τον ταμιευτήρα, είτε από διαρροή του ίδιου του αγωγού σε κάποιο σημείο λόγω διάτρησής του, στην συνέχεια αναστόμωση και έξοδος της διαφυγής ψηλότερα στην κατάντη παρειά του φράγματος με υδραυλική επικοινωνία αρχικά σε παρακατακόρυφη ρωγμή του τύπου των εφελκυστικών ρωγμών των κατολισθήσεων και στη συνέχεια προς προϋπάρχουσα λεία και διαμπερή επιφάνεια του σώματος του φράγματος. Η υπόψη περίπτωση φαίνεται σχετικά ρεαλιστική, καθότι λίγο ψηλότερα του σημείου εξόδου του αγωγού διασωλήνωσης της κύριας αστοχίας του φράγματος στο κατάντη πρηνές, υπάρχει σαφής μορφολογική ένδειξη θραύσης αποκόλλησης κατολισθητικού τοξοειδούς τύπου, που πιθανόν τροφοδότησε την απαιτούμενη παρακατακόρυφη ρωγμή για την ανάπτυξη της συγκεντρωμένης διαφυγής περίξ του εγκιβωτισμένου αγωγού προσαγωγής, για να αναστομωθεί και να βρεί ευκολότερο υδραυλικό δρόμο προς την έξοδο. Στην συνέχεια είναι επίσης πιθανό η υπόψη παρακατακόρυφη ρωγμή να βρισκόταν σε επαφή με μία από τις προϋπάρχουσες

παραοριζόντιες επιφάνειες αποχωρισμού, που προήλθαν από την διαδικασία συμπίκνωσης των εδαφικών υλικών του σώματος του φράγματος και έτσι να τροφοδοτήθηκε η τελική υδραυλική οδός επικοινωνίας με την κατάντη παρειά και να εξελιχθεί μεγαλοπρεπώς η αστοχία του φράγματος με διασωλήνωση, κατά μήκος διαβρωθείσας ζώνης και δημιουργίας σηραγγοειδούς αγωγού με σχετικά περίπλοκη γεωμετρία, αρχικά παραοριζόντιας ανάπτυξης κατά μήκος του αγωγού, στην συνέχεια παρακατακόρυφης ανάπτυξης κατά μήκος της ρωγμής εφελκυσμού της μικρής κατολίσθησης στο κατάντη πρηνές του φράγματος και τέλος επίσης παραοριζόντιας ανάπτυξης κατά μήκος προϋπάρχουσας ασυνέχειας που δημιουργήθηκε από τις διαδικασίες πλημμελούς συμπίκνωσης του σώματος του φράγματος. Στο σενάριο αυτό συνηγορεί και η πλήρης αποστράγγιση παλαιότερων σημείων ανάπτυξης διαρροών μικρής παροχής στο κατάντη πρηνές του φράγματος σε ψηλότερα σημεία του.



Εικόνα 5. Σχηματική ανάπτυξη παραλλήλων και εγκάρσιων ρωγμών στο σώμα του φράγματος από διάφορες αιτίες. Στην περίπτωση του σεναρίου Β, οι παράλληλες με τον άξονα του φράγματος ρωγμές οφείλονται σε μηχανισμούς ανάπτυξης ρωγμών εφελκυσμού – αποκόλλησης των άνω τμημάτων κατολισθητικών μορφών από την ανεξέλεγκτη κατά καιρούς απόρριψη στερεών αποβλήτων στην κατάντη παρειά του φράγματος (πιθανή περίπτωση σεναρίου Β).

5.4 Σενάριο Γ.

Διασωλήνωση κατά μήκος διαμπερούς και λείας προϋπάρχουσας επιφάνειας ασυνέχειας του σώματος του φράγματος, λόγω πλημμελούς συμπίκνωσης του εδαφικού υλικού και έξοδος διαφυγής μέχρι το κατάντη πρηνές του φράγματος. Και αυτή η περίπτωση φαίνεται επίσης πιθανή, αλλά είναι σχετικά μικρότερης πιθανότητας, καθότι θα περίμενε κανείς να αναγνωρίσει ένδειξη χοανοειδούς ανάπτυξης αγωγού εισροής στο ανάντη πρηνές του φράγματος, στοιχείο που μέχρι σήμερα δεν έγινε (πιθανόν και λόγω της θολότητας του νερού του ταμιευτήρα στο βάθος να μην ήταν δυνατή η παρατήρησή του) αντιληπτή. Βέβαια επ' αυτού συνηγορεί η πιθανότητα υποσκαφής ποδός στην ανάπτυξη της κατολίσθησης στην ανάντη παρειά του σώματος του φράγματος.

6.5 Σενάριο Δ.

Τις συνδυασμός όλων των παραπάνω περιπτώσεων, με την διασωλήνωση να έχει αναπτυχθεί σε εξαιρετικά περίπλοκης γεωμετρίας σηραγγοειδή αγωγό που να περιλαμβάνει την παραοριζόντια

ζώνη πλημμελούς συμπίκνωσης περίξ του εγκιβωτισμένου αγωγού προσαγωγής και τις προϋπάρχουσες παραοριζόντιες ασυνέχειες του σώματος του φράγματος που είχαν προέλθει από τις διαδικασίες συμπίκνωσης του σώματός του. Σε κάθε περίπτωση, τις, φαίνεται ότι το φαινόμενο της αστοχίας με διασωλήνωση έχει την έναρξή του (τουλάχιστον στο αρχικό μήκος του αγωγού διασωλήνωσης) στην ζώνη πλημμελούς συμπίκνωσης περίξ του εγκιβωτισμένου αγωγού προσαγωγής και στην συνέχεια να εμπλέκονται τις παρακατακόρυφες και παραοριζόντιες ασυνέχειες τις μάζας του σώματος του φράγματος, που παρέμειναν σε αυτό σαν συνέπεια του τρόπου συμπίκνωσης του εδαφικού υλικού του σώματος του φράγματος και που δημιουργήθηκαν αργότερα με την ανεξέλεγκτη απόθεση στερεών αδρανών αποβλήτων στην κατάντη παρειά του φράγματος και τις επελθούσες παραμορφώσεις τύπου κατολισθήσεων.

6. ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Την τελευταία εβδομάδα του Ιουνίου του 2007, συνέβει αστοχία του φράγματος Τριαδίου με διασωλήνωση, που ισοδυναμεί με μερική καταστροφή του έργου.

Έχουν διερευνηθεί οι συνθήκες του φαινομένου της αστοχίας της διασωλήνωσης του φράγματος και έχουν σκιαγραφηθεί τέσσερα σενάρια πιθανής προέλευσης της διασωλήνωσης. Το πιθανότερο βασίζεται σε διαρροή περίξ του εγκιβωτισμένου χαλύβδινου αγωγού προσαγωγής, είτε λόγω πλημμελούς συμπίκνωσης των εδαφικών υλικών, είτε, λόγω διαρροής του ίδιου του αγωγού από τεχνικό του μειονέκτημα και λόγω πλημμελούς συμπίκνωσης των εδαφικών υλικών, και στην συνέχεια διαρροή μέσω ρωγμών του σώματος του φράγματος παρακατακόρυφου και παραοριζόντιου χαρακτήρα που προήλθαν από πλημμελή συμπίκνωση των εδαφικών υλικών του σώματος του φράγματος και περίξ του εγκιβωτισμένου αγωγού προσαγωγής και ανεξέλεγκτη απόθεση στερεών αδρανών αποβλήτων στην κατάντη παρειά του φράγματος.

Πρέπει να αποφεύγεται η κατασκευή φραγμάτων έστω και μικρού ύψους χωρίς τεχνικές μελέτες και χωρίς επίβλεψη της κατασκευής που πρέπει να γίνεται σύμφωνα με εθνικές τεχνικές προδιαγραφές.

Πρέπει να αποφεύγεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή φραγμάτων ομοιογενούς διατομής, ασχέτως ύψους φράγματος, όταν υπάρχει ακόμη και η υπόνοια ότι τα υλικά κατασκευής του σώματος του φράγματος είναι αργιλικού διαβρώσιμου (dispersive) χαρακτήρα.

7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Sherard J.L., Woodward R.J., Gizienski S.F., Clevenger W.A. 1963. Earth and Earth-Rock Dams. New York-London-Sydney. John Wiley and Sons, Inc
2. Fell R., Macgregor P, Stapledon D. 1992. Geotechnical Engineering of embankment dams. Rotterdam-Brookfield. A.A.Balkema.
3. Καζίλης Ν. 2007. Τεχνική Έκθεση «Διερεύνησης των συνθηκών αστοχίας του φράγματος Τριαδίου τον Ιούνιο του 2007 και προτάσεις αμέσων ενεργειών αποκατάστασης» του ελληνικού υποκαταστήματος του μελετητικού γραφείου «GEODATA S.p.A.» προς τον Δήμο Θέρμης.

The failure conditions of Triadi dam of Thermi Municipality, Thessaloniki Prefecture, Greece, June 2007.

N. Kazilis,
Engineering Geologist, B.Sc., M.Sc., DIC, MBA..
Greek Branch manager of GEODATA S.p.A.

SUMMARY: On the last week of June 2007, a piping type failure happened in the Triadi dam. The conditions of the failure have been investigated and four potential piping failure scenarios have been depicted. The most probable scenario is based on the leaking around the embedded steel water supply pipe, either due to inadequate soil compaction around the pipe, or leaking of the individual steel pipe due to steel defect and inadequate soil compaction around it, and then leak through the sub-vertical and sub-horizontal cracks of the body of the dam which happened by inadequate soil compaction of the dam and around the embedded water supply pipe.