

Αντιμετώπιση κατολισθητικών φαινομένων κατά την κατασκευή του Φράγματος Ιλαρίωνα

Κ. Αναστασόπουλος
Πολιτικός Μηχανικός, MSc, ΔΕΗ / ΔΥΗΠ

Κ. Αντωνακόπουλος
Πολιτικός Μηχανικός MSc, ΔΕΗ / ΔΥΗΠ

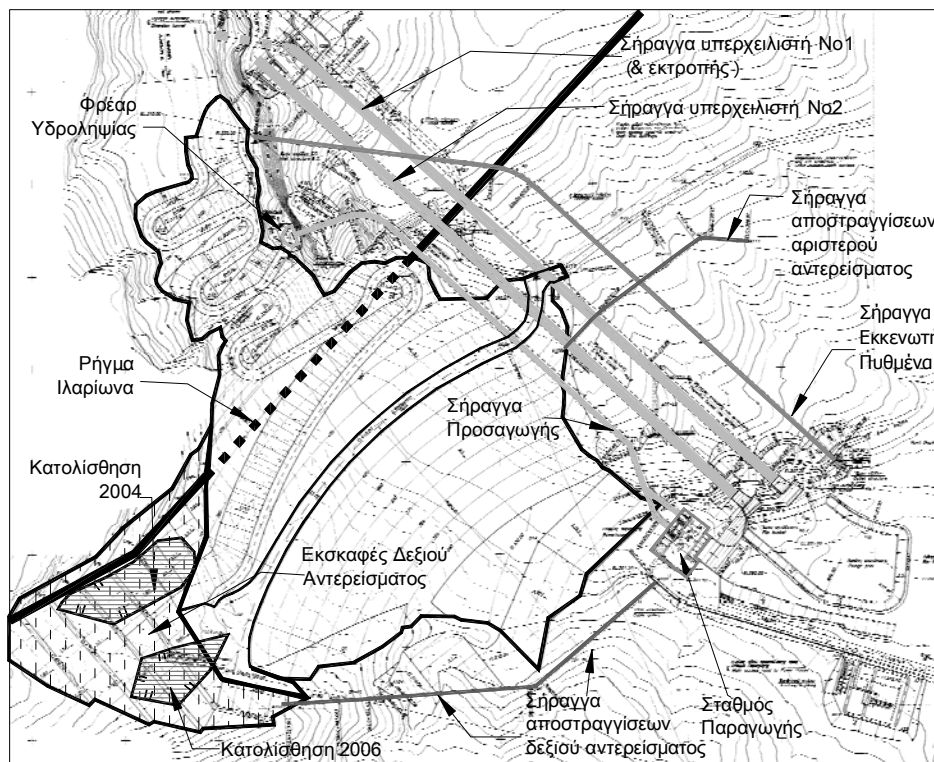
Χ. Παπαχατζάκη,
Πολιτικός Μηχανικός Msc.

Λέξεις κλειδιά: Ιλαρίων, κατολίσθηση, υψηλά πρηνή

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Λόγω των δυσμενών γεωλογικών συνθηκών στο δεξιό αντέρεισμα θεμελίωσης του Φράγματος Ιλαρίωνα, προβλεπόταν από τη μελέτη η υλοποίηση υψηλών και ήπιων κλίσεων πρηνών εκσκαφής. Το άρθρο παρουσιάζει τις εμπειρίες που αποκτήθηκαν από την εκτέλεση των εκσκαφών και τις ενέργειες που απαιτήθηκαν για τη διασφάλιση της ευστάθειας των εν λόγω πρηνών.

1. ΓΕΝΙΚΑ



Σχ.1 : Υδροηλεκτρικό Έργο Ιλαρίωνα - Γενική Διάταξη

Το Υδροηλεκτρικό Έργο (ΥΗΕ) Ιλαρίωνα της ΔΕΗ Α.Ε. κατασκευάζεται στον ποταμό Αλιάκμονα, αμέσως ανάντη του ΥΗΕ Πολυφύτου. Οι κύριες κατασκευές του Έργου παρουσιάζονται στο Σχ. 1.

2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ– ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΕΞΙΟΥ ΑΝΤΕΡΕΙΣΜΑΤΟΣ

Η γεωλογία του δεξιού αντερείσματος είχε διερευνηθεί διεξοδικά κατά τη φάση της μελέτης με την εκτέλεση λεπτομερούς γεωλογικής χαρτογράφησης, την διάτρηση 25 ερευνητικών γεωτρήσεων, σε πολλές από τις οποίες είχαν εγκατασταθεί πιεζόμετρα, τη διάνοιξη 6 ερευνητικών στοών συνολικού μήκους περίπου 350 m, και την εκτέλεση γεωφυσικών διασκοπίσεων.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί του δεξιού αντερείσματος στη θέση θεμελίωσης του Φράγματος διαχωρίζονται από το σημαντικό κανονικό ρήγμα Ιλαρίωνα, το οποίο διατέμνει κάθετα περίπου την κοιλάδα του ποταμού (βλ. Σχ. 1). Το ρήγμα Ιλαρίωνα φέρνει σε τεκτονική επαφή τους κατάντη φυλλίτες με τους ανάντη παχυστρωματώδεις ασβεστολίθους, Ιουρασικής ηλικίας. Το ανάγλυφο στην ανάντη του ρήγματος περιοχή, στην οποία θεμελιώνεται το κύριο τμήμα του ανάντη σώματος του Φράγματος, είναι ιδιαίτερα έντονο (υψηλά και απόκρημνα πρηνή κλπ). Αντίστοιχα, η μορφολογία κατάντη του ρήγματος, όπου θεμελιώνεται το κύριο μέρος του φράγματος (πυρήνας - κατάντη σώμα), είναι σχετικά ήπια στα ανώτερα υψόμετρα του αντερείσματος (κλίσεις της τάξης των $20^\circ - 30^\circ$), και γίνεται ελαφρά πιο απότομο (έως 35° περίπου) στα χαμηλότερα 50 m, αμέσως πάνω από την κοίτη του ποταμού. Η βραχομάζα στην περιοχή αυτή δομείται από εναλλαγές φυλλιτών διαφόρων ορυκτολογικών τύπων (“τυπικοί”, σερικιτικοί, γραφιτικοί, ασβεστιτικοί κλπ). Στην περιοχή εκσκαφών επικρατούν σαφώς οι “τυπικοί” φυλλίτες, και ακολουθούν οι ασβεστιτικοί, ενώ οι σερικιτικοί και γραφιτικοί φυλλίτες εμφανίζονται σε μικρού πάχους στρώσεις. Η διάταξη των φυλλιτικών εναλλαγών γίνεται παράλληλα με τη σχιστότητα, η οποία παρουσιάζεται κάθετη περίπου προς τις ισοϋψείς του φυσικού πρηνούς, με κλίση προς τα ανάντη της τάξης των 35° έως 45° (μέση τιμή 37°). Όλοι οι τύποι φυλλίτη, πλην των ασβεστιτικών και μερικώς και των “τυπικών”, είναι συνήθως έντονα εξαλλοιωμένοι και σχιστοποιημένοι, ενώ επιφανειακά καλύπτονται από χαλαρούς εδαφικούς σχηματισμούς (κορήματα – παλαιές κατολισθήσεις κλπ) μεταβλητού πάχους (από 5 έως 20 m περίπου).

3. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΚΣΚΑΦΩΝ ΔΕΞΙΟΥ ΑΝΤΕΡΕΙΣΜΑΤΟΣ

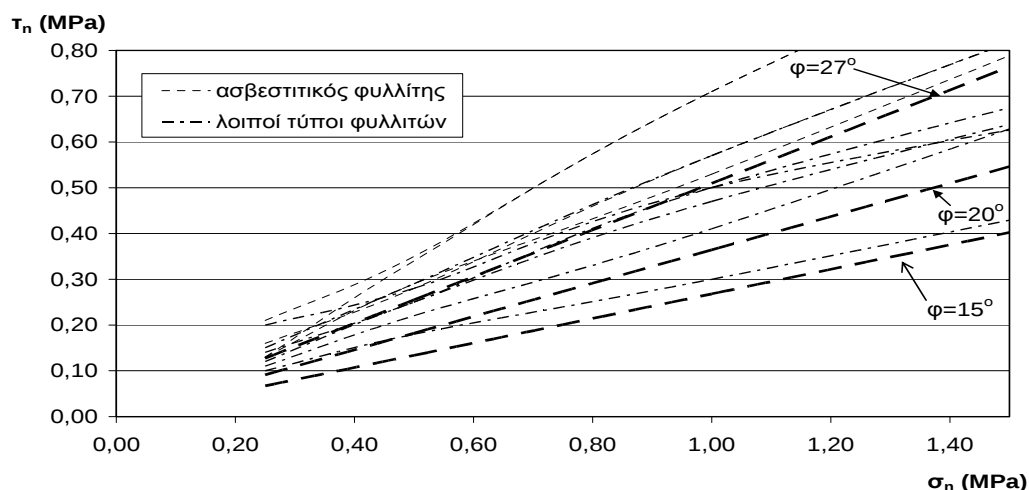
Για το σχεδιασμό των εκσκαφών του δεξιού αντερείσματος ελήφθη καταρχήν υπόψη η ανάγκη πλήρους απομάκρυνσης των επιφανειακών χαλαρών, ώστε να καταστεί εφικτή η θεμελίωση του φράγματος σε βραχομάζα αποδεκτής ποιότητας. Επιπλέον αναγκαία προϋπόθεση ήταν η διαμόρφωση μόνιμων πρηνών με ευσταθείς κλίσεις στο τμήμα της εκσκαφής πάνω από την στέψη του φράγματος (υψόμετρο +410).

Λόγω αφενός της μεγάλης έκτασης και του ύψους των δημιουργούμενων πρηνών και αφετέρου της σχετικά υποβαθμισμένης ποιότητας της φυλλιτικής βραχομάζας, κρίθηκε σκόπιμο η διασφάλιση της ευστάθειας να επιτευχθεί με την επιλογή κατάλληλης γεωμετρίας εκσκαφών, αφαιρώντας πλήρως τα επιφανειακά χαλαρά υλικά. Επελέγη η διαμόρφωση των πρηνών εκσκαφής να γίνει με διεύθυνση παράλληλη περίπου με αυτή των ισοϋψών του φυσικού εδάφους και με σχετικά ήπιες κλίσεις, ώστε να αποφευχθεί η εφαρμογή μέτρων προστασίας. Τέλος, προκρίθηκε να εφαρμοστεί φυτοκάλυψη των μόνιμων πρηνών με τη μέθοδο της υδροσποράς, για να μειωθεί η επιφανειακή διάβρωση και να επιταχυνθεί η περιβαλλοντική αποκατάσταση του χώρου.

Η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα είχε καταγραφεί από τα εγκατεστημένα κατά τη φάση της Μελέτης, φρέατα παρακολούθησης πολύ χαμηλή, και κατά συνέπεια κρίθηκε ότι δεν απαιτείται συστηματική αποστράγγιση των πρηνών, αλλά μόνο σε θέσεις παρουσίας υγρασίας κλπ.

Βάσει του επιλεγέντος σχεδιασμού των πρανών, ο όγκος εκσκαφών προέκυψε σημαντικός ($1,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ περίπου). Τα μόνιμα πρανή (πάνω από τη στέψη του φράγματος), ύψους 110 m περίπου, διαμορφώθηκαν με μέση κλίση 30° περίπου, ενώ τα υποκείμενα προσωρινά πρανή (έως την θεμελίωση του φράγματος στην κοίτη), ύψους ίσου με 130 m, με μέση κλίση 25° έως 35° . Στα μόνιμα πρανή προβλέφθηκε η υλοποίηση αναβαθμών, πλάτους 5 m ανά 20 m καθ' ύψος, ώστε να είναι εφικτή η επίσκεψη και η τοποθέτηση οργάνων για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς τους. Η ευστάθεια των πρανών ελέγχθηκε με δύο μεθόδους :

- Με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας, ελέγχοντας την αντοχή της φυλλιτικής βραχομάζας έναντι θραύσης. Οι διατμητικές παράμετροι αντοχής εκτιμήθηκαν με χρήση του κριτηρίου Hoek-Brown για βραχομάζα με ασυνέχειες. Είχε προηγηθεί βαθμονόμηση βάσει του συστήματος GSI της βραχομάζας των διαφόρων τύπων φυλλίτη και το σχετικό φάσμα τιμών προέκυψε στην περιοχή $20 \leq \text{GSI} \leq 35$ και $5 \leq m_i \leq 8$ (οι χαμηλότερες τιμές για τους σερικιτικούς – γραφιτικούς φυλλίτες και οι υψηλότερες για τους ασβεστιτικούς και δευτερευόντως για τους “τυπικούς” φυλλίτες). Η αντοχή σε θλίψη (σ_{ci}) προέκυψε στο φάσμα $2 \leq \sigma_{ci} \leq 50 \text{ MPa}$, με μέση τιμή ίση με 25 MPa περίπου, μετά από σειρά δοκιμών σημειακής φόρτισης και περιορισμένο αριθμό δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης σε φυλλιτικούς πυρήνες όλων των τύπων από γεωτρήσεις. Οι χαρακτηριστικές τιμές παραμέτρων που τελικά χρησιμοποιήθηκαν για την αποτίμηση των διατμητικών παραμέτρων της βραχομάζας ήταν : $\text{GSI} = 25$, $m_i = 5$ και $\sigma_{ci} = 10 \text{ MPa}$. Οι τιμές αυτές επελέγησαν λαμβάνοντας υπόψη τα σχετικά ποσοστά παρουσίας των διαφόρων λιθολογικών τύπων στο αντέρεισμα και ήταν συντηρητικές, καθώς ελήφθη υπόψη το κάτω όριο τιμών κάθε τύπου φυλλίτη.
- Με αναλύσεις σφηνών, σχηματιζόμενων από συνδυασμούς του κύριου συστήματος ασυνεχειών (σχιστότητα) με όλα τα λοιπά κύρια συστήματα διακλάσεων, μεταβάλλοντας τους προσανατολισμούς και τις κλίσεις των πρανών εκσκαφής. Είχαν προηγηθεί σειρές δοκιμών άμεσης διάτμησης επί της σχιστότητας σε τυπικούς ορυκτολογικούς τύπους φυλλιτών, χαρακτηριστικά αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στο Σχ. 2. Από τις δοκιμές είχε προκύψει ότι σε όλες τις περιπτώσεις η αντοχή αιχμής ελάχιστα διαφοροποιούνταν από την παραμένονσα.



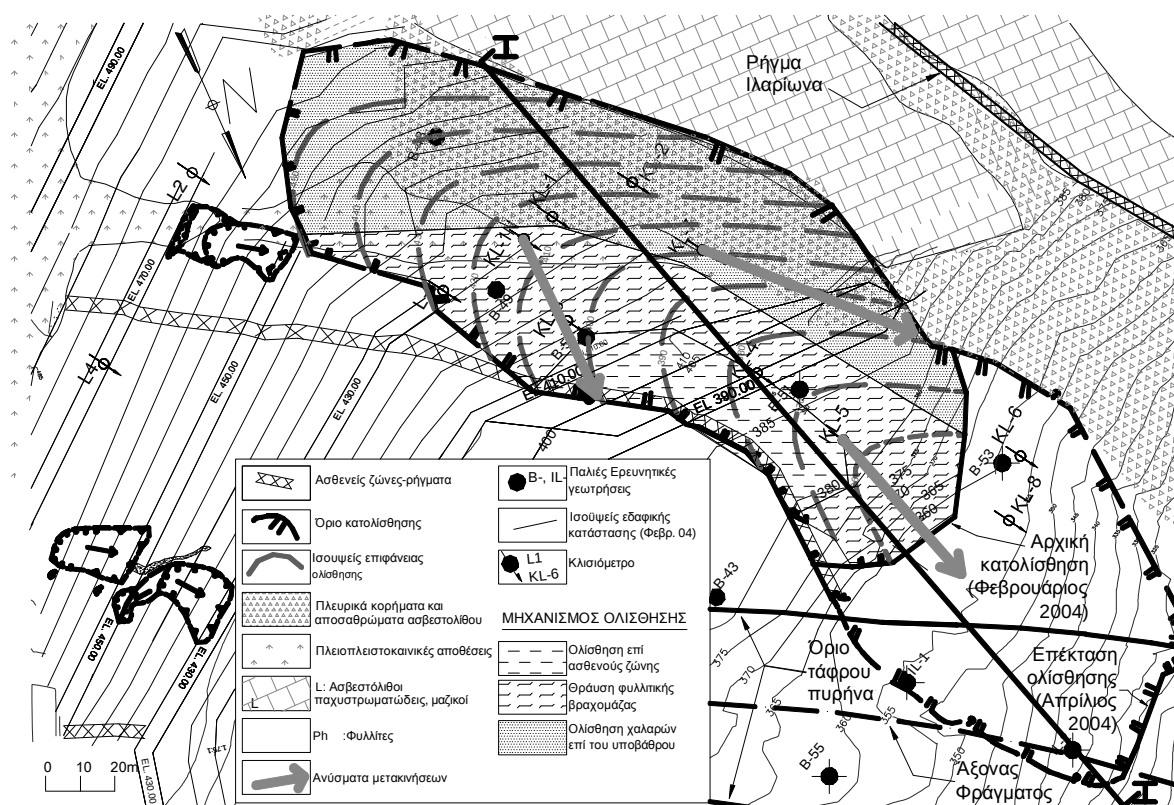
Σχ. 2: Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης επί της σχιστότητας σε πυρήνες φυλλίτη από γεωτρήσεις

Όπως φαίνεται από το Σχ. 2, η γωνία διατμητικής αντοχής επί των ασθενών επιφανειών της σχιστότητας για τα μέσα αναμενόμενα επίπεδα ορθών τάσεων έως 0,60 MPa (τιμή η οποία αντιστοιχεί σε φορτίο βράχου 25m περίπου), υπερβαίνει τις 20° . Οι έλεγχοι ευστάθειας σφηνών

έγιναν τελικά με την παραδοχή γωνίας διατμητικής αντοχής επί όλων των συστημάτων ίσης με 22° (δηλ. ελαφρά επαυξημένη, λόγω συνεισφοράς του κυματισμού των ασυνεχειών κλπ), ενώ η συνοχή ελήφθη γενικά μηδενική. Οι τιμές συντελεστών ασφαλείας που προέκυψαν από τους δύο προαναφερθέντες τύπους ελέγχων για τη γεωμετρία πρανών που τελικά επελέγη, ήταν σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερες των ελάχιστων αποδεκτών (1,40 χωρίς σεισμό και 1,00 με σεισμό).

4. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΥ 2004

Με την έναρξη των εργασιών διαπιστώθηκαν κάποιες διαφορές στην τοπογραφία σε σχέση με τα σχέδια της μελέτης στην περιοχή όπου διαμορφωνόταν το ανάντη τμήμα της εκσκαφής, στην επαφή με τα υψηλά και απότομα (σχεδόν κατακόρυφα και κατά θέσεις με αρνητικές κλίσεις) ασβεστολιθικά πρανή αμέσως ανάντη του ρήγματος Ιλαρίωνα. Υλοποίηση των γραμμών εκσκαφής της μελέτης στο τμήμα αυτό θα προϋπέθετε σοβαρές επεμβάσεις στα ασβεστολιθικά πρανή, με συνέπεια μεγάλες κατασκευαστικές δυσχέρειες και καθυστερήσεις στο πρόγραμμα εργασιών. Για το λόγο αυτό οι γραμμές εκσκαφής τροποποιήθηκαν στην περιοχή αυτή και μεταξύ υψομέτρων +450 και +350 περίπου, με εφαρμογή πλέον απότομων κλίσεων (έως 45°) προσωρινών πρανών στα στο ανάντη τμήμα της εκσκαφής. Οι κλίσεις αυτές θεωρήθηκαν αποδεκτές καθώς, σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία, η φυλλική βραχομάζα στην περιοχή διέθετε σχετικά ικανοποιητικά διατμητικά χαρακτηριστικά. Οι αλλαγές αυτές είχαν ως συνέπεια την δραστική (κατά 15% και πλέον) μείωση του συνολικού όγκου των εκσκαφών του αντερείσματος.



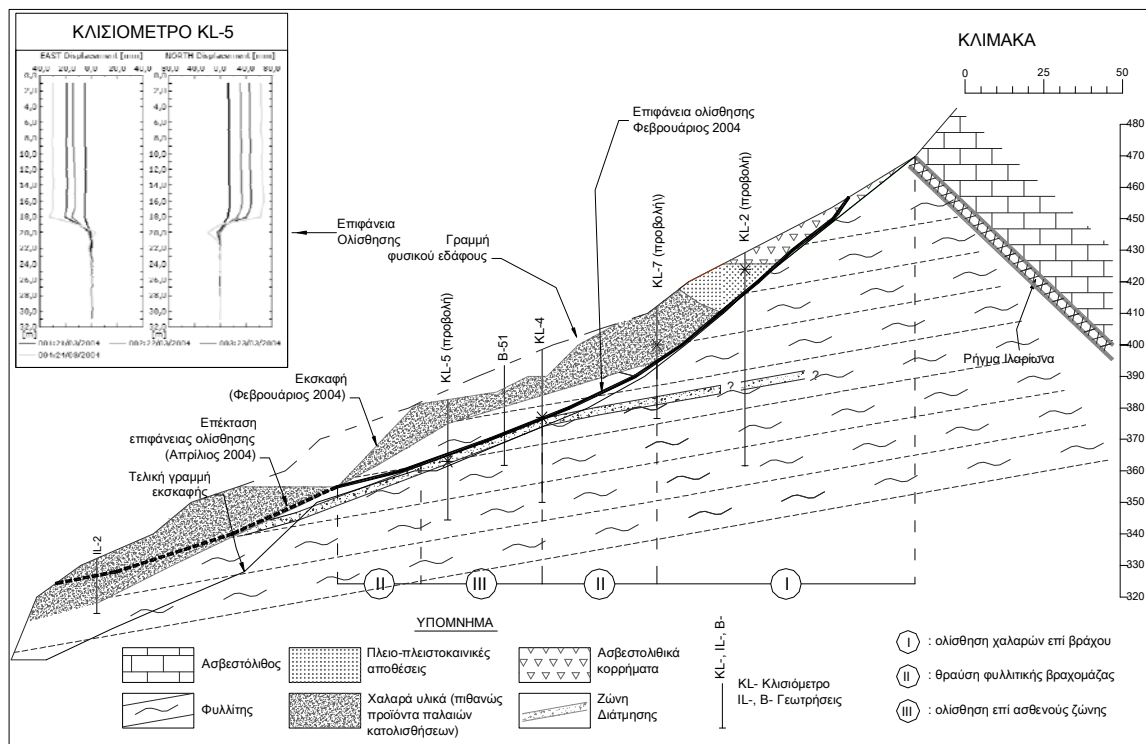
Σχ. 3: Κατολίσθηση Φεβρουαρίου 2004 – Οριζοντιογραφία

Μόλις η εκσκαφή έφτασε στο υψόμετρο +355 περίπου εμφανίστηκαν ρωγματώσεις στο ανάντη τμήμα των πρανών, στην επαφή με την ασβεστολιθική βραχομάζα, οι οποίες επεκτείνονταν έως το υψόμετρο +470 περίπου. Ταυτόχρονα, καταγράφηκε αργή εξελισσόμενη μετακίνηση της

βραχομάζας επί διακριτής επιφάνειας ολίσθησης στο κατάντη τμήμα, μεταξύ υψομέτρων +390 και +355 (βλ. Σχ. 3). Η επιφάνεια ολίσθησης ήταν λεία και ελαφρά κυματοειδής, και ακολουθούσε στο μεγαλύτερο μήκος της προδιαγεγραμμένη ζώνη διάτμησης. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της υπόψη ζώνης προσέγγιζαν αυτά της σχιστότητας στην περιοχή, αλλά με την, ιδιαίτερα δυσμενή για την ευστάθεια, διαφοροποίηση της τάξης των 15° έως 20° περίπου ως προς τη διεύθυνση κλίσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι ανάλογες διαφοροποιήσεις των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της σχιστότητας είχαν καταγραφεί και σε άλλες θέσεις των πρανών εκσκαφής, και σε αυτές είχε αποδοθεί η εμφάνιση μικρής κλίμακας ασταθειών (της τάξης των μερικών δεκάδων m^3) σε τρεις θέσεις των πρανών εκσκαφής.

Η λύση που αναζητήθηκε έπρεπε αφενός να αντιμετωπίζει αποτελεσματικά το θέμα της ευστάθειας της μετακινούμενης μάζας και των υπερκειμένων πρανών, και αφετέρου να μπορεί να υλοποιηθεί με τρόπο ώστε να μην δημιουργούνται συμβατικές εμπλοκές ή προβλήματα στις υποκείμενες εκσκαφές της τάφρου πυρήνα, οι οποίες ευρίσκονταν σε πλήρη εξέλιξη και ήταν χρονικά κρίσιμες. Για να διαπιστωθεί το μέγεθος του προβλήματος, εγκαταστάθηκαν άμεσα εντός 8 γεωτρήσεων, συνολικού βάθους 356 m, γεωτεχνικά όργανα (κλισιόμετρα - φρέατα παρακολούθησης υπόγειου ορίζοντα), εντός και πέριξ της μετακινούμενης μάζας. Η εγκατάσταση των οργάνων στην μετακινούμενη μάζα ήταν εφικτή, καθώς η εξέλιξη της μετακίνησης ήταν αργή. Συγκεκριμένα, η μέση ταχύτητα της κατολισθητικής κίνησης ήταν της τάξης των 10 mm/ημέρα περίπου, όπως διαπιστώθηκε από τις μετρήσεις των κλισιομέτρων (βλ. Σχ. 4), αλλά και από σημειακές μετρήσεις της μετακίνησης επί της επιφάνειας ολίσθησης (εξώθηση υπερκειμένης μάζας). Τόσο η εγκατάσταση όσο και η αξιολόγηση των μετρήσεων ολοκληρώθηκε ταχύτατα (εντός 20 ημερών). Συνεκτιμώντας όλα τα διαθέσιμα στοιχεία (επιφανειακών μετακινήσεων, ρωγματώσεων, βάθους διατμήσεων στα εγκατεστημένα κλισιόμετρα κλπ), προσδιορίστηκε η γεωμετρία της μετακινούμενης μάζας. Το μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης από την εκσκαφή εκτιμήθηκε ίσο με 20 m περίπου (βλ. Σχ. 3 & 4), ενώ ο συνολικός μετακινούμενος όγκος $150.000 m^3$ περίπου.

Συνδυάζοντας όλα τα διαθέσιμα στοιχεία που προέκυψαν από τις έρευνες, εκτιμήθηκε ότι ο μηχανισμός της αστάθειας περιλάμβανε αφενός ολίσθηση της μάζας επί διακεκριμένων ασθενών επιφανειών στο ανώτερο και στο κατάντη τμήμα της (διεπιφάνεια χαλαρών – φυλλιτικού υποβάθρου και προϋπάρχουσα ζώνη διάτμησης αντίστοιχα) και αφετέρου θραύση της ασθενούς φυλλιτικής βραχομάζας στο κατώτερο ανάντη τμήμα της (βλ. Σχ. 3). Για την εκτίμηση των μέσων τιμών των διατμητικών παραμέτρων στην επιφάνεια ολίσθησης πραγματοποιήθηκε ανάστροφη ανάλυση (back-analysis) στην κεντρική Διατομή I-I (βλ. Σχ. 3 & 4), η διεύθυνση της οποίας προσέγγιζε την μέση διεύθυνση της κατολισθητικής κίνησης. Η εκτέλεση ανάστροφης ανάλυσης σε μία μόνο διατομή θεωρήθηκε αποδεκτή λόγω της σχετικά επιμήκους μορφής της κατολίσθησης, η οποία περιόριζε την επιρροή της τρίτης διάστασης. Λόγω της μικρής ταχύτητας της κατολισθητικής κίνησης έγινε παραδοχή τιμής συντελεστή ασφαλείας λίγο μικρότερης της μονάδας, ενώ απλουστευτικά θεωρήθηκε ότι η τιμή της γωνίας διατμητικής αντοχής ήταν σταθερή σε όλο το μήκος της επιφάνειας ολίσθησης και η συνοχή μηδενική. Από την ανάλυση προέκυψε μέση τιμή γωνίας διατμητικής αντοχής στην επιφάνεια ολίσθησης ίση με 26° περίπου, τιμή με την οποία εκτελέστηκαν στη συνέχεια ευθείες αναλύσεις στη Διατομή I-I, και υπολογίστηκαν οι συντελεστές ασφαλείας για διάφορες στάθμες αποφόρτισης, για πλήρη απομάκρυνση της μετακινούμενης μάζας πάνω από τις στάθμες αυτές. Σε όλες τις περιπτώσεις αγνοήθηκε η επιρροή του υπόγειου νερού, καθώς από τις μετρήσεις στα εγκατεστημένα πιεζόμετρα διαπιστώθηκε ότι το επίπεδο του υπόγειου ορίζοντα ήταν πολύ χαμηλότερα από την επιφάνεια ολίσθησης, ενώ δεν είχε προηγηθεί της εκδήλωσης της κατολίσθησης περίοδος έντονων βροχοπτώσεων.



Σχ. 4: Κατολίσθηση Φεβρουαρίου 2004 – Τομή Ι-Ι

Βάσει των αποτελεσμάτων των αναλύσεων κρίθηκε σε πρώτη φάση επιβεβλημένη η πλήρης εκσκαφή του ανώτερου (ωθούντος) τμήματος της κατολίσθησης, και συγκεκριμένα από το υψόμετρο +470 έως το υψόμετρο +410 (βλ. Σχ. 3 & 4). Για την εν λόγω στάθμη αποφόρτισης ο συντελεστής ασφαλείας προέκυψε ίσος με 1,21, ο οποίος αν και σχετικά μικρός θεωρήθηκε αποδεκτός προκειμένου για προσωρινό πρανές, δεδομένου ότι κάτω από το υψόμετρο +410 η κατολίσθηση αντιστηρίζεται μελλοντικά μόνιμα από το σώμα του φράγματος. Οι νέες γραμμές επαφής προσαρμόστηκαν προς τα ανάντη στην απότομη μορφολογία των ασβεστολιθικών πρανών, χωρίς την ανάγκη εκτέλεσης εκτεταμένων επεμβάσεων εκεί. Ο συνολικός όγκος της εκσκαφής ανερχόταν σε 100.000 m³ περίπου, σημαντικό ποσοστό πάντως του οποίου αφορούσε εκσκαφές εκτός κατολίσθησης, για διαμόρφωση ευσταθών κλίσεων στα υπερκείμενα πρανή.

Οι εργασίες αποφόρτισης άρχισαν στα μέσα Απριλίου 2004. Ατυχώς, λόγω αδυναμίας διαμόρφωσης προσπελάσεων για την αποκομιδή των προϊόντων εκσκαφής στα αρχικά στάδια των εκσκαφών, σημαντικό ποσοστό των εκσκαπόμενων υλικών των υπερκείμενων πρανών προωθούνταν προσωρινά επί της υποκείμενης κατολισθαίνουσας μάζας, φορτίζοντας έτσι το ανώτερο (ωθούν) τμήμα της. Αυτή η ενέργεια οδήγησε σε σημαντική επιτάχυνση της κατολισθητικής κίνησης (φτάνοντας και τα 20 cm/ημέρα περίπου), καθώς και σε εμφάνιση ρωγματώσεων και μετακινήσεων χαμηλότερα και έως το υψόμετρο +320 (βλ. Σχ. 3), κάτω από οποίο η φυλλιτική βραχομάζα εμφανιζόταν επιφανειακά υγιής, χωρίς ίχνη ρωγματώσεων κλπ. Μετά την εκδήλωση των φαινομένων αυτών αποφασίστηκε η απομάκρυνση και του υπόλοιπου (κατώτερου) τμήματος της κατολισθαίνουσας μάζας, έως το υψόμετρο +320.

Κατά την πρόοδο των εργασιών εκσκαφής διαπιστώθηκε ότι η γεωμετρία της επιφάνειας κατολίσθησης είχε προσεγγιστεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια, και ιδιαίτερα στο κρίσιμο ανάντη τμήμα (επαφή φυλλιτών – ασβεστολίθων) όπου η πληροφορία από την προηγηθείσα έρευνα ήταν μειωμένη. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην υψηλή ποιότητα των δεδομένων που αποκτήθηκαν από τα κλισιόμετρα καθώς σε συνδυασμό με την ορθή αξιοποίηση των στοιχείων της επιφανειακής

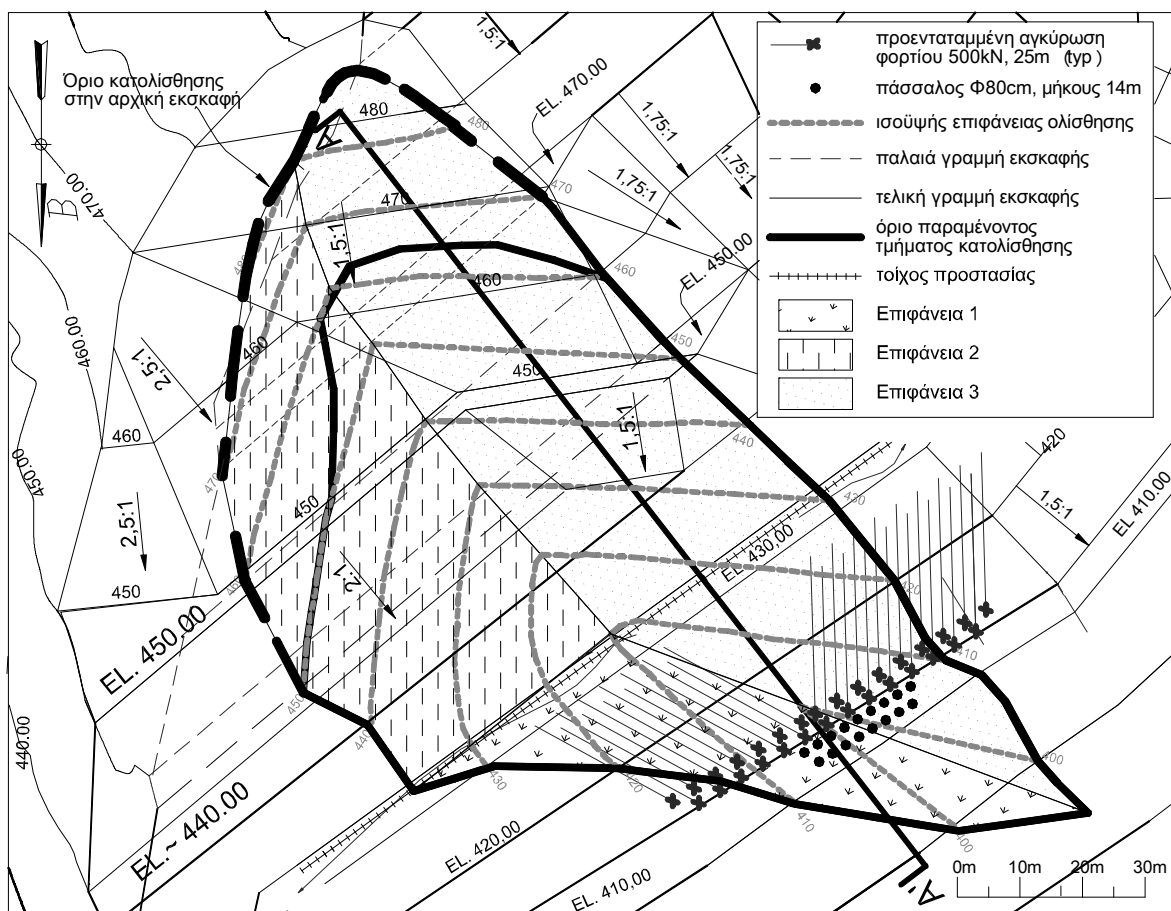
εκδήλωσης της κατολισθητικής κίνησης (ρωγμές κλπ). Η ποιότητα της φυλλιτικής βραχομάζας που αποκαλύφθηκε από την εκσκαφή στο ανάντη τμήμα των πρανών, στην αμέσως υποκείμενη των ασβεστολίθων και του ρήγματος Ιλαρίωνα περιοχή, ήταν καλή, με αποτέλεσμα τα σχετικά απότομα (κλίσης 45° έως 50°) και υψηλά (έως 30m) μόνιμα πρανή που διαμορφώθηκαν στην περιοχή αυτή να μην εμφανίσουν προβλήματα ευστάθειας. Ο συνολικός όγκος εκσκαφής για την αντιμετώπιση της κατολίσθησης της περιόδου 2004 ανήλθε σε 260.000 m³ περίπου, αλλά καθώς οι αρχικές (συμβατικές) γραμμές εκσκαφής προέβλεπαν την αφαίρεση σημαντικού τμήματος των υλικών τα οποία μετακινήθηκαν, η τελική υπέρβαση των συμβατικών ποσοτήτων εκσκαφών λόγω των κατολισθητικών φαινομένων της περιόδου 2004 προέκυψε σχετικά περιορισμένη (της τάξης των 50.000 m³, ή ποσοστό 3,50% περίπου του συμβατικού όγκου εκσκαφών του δεξιού αντερείσματος).

5. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2006

Τον Ιανουάριο του 2006, μετά από μια περίοδο έντονων βροχοπτώσεων εκδηλώθηκε κατολισθητική κίνηση στα υλοποιημένα τελικά πρανή εκσκαφής, 100 m περίπου κατάντη των διαμορφωθέντων για την αντιμετώπιση της κατολίσθησης της περιόδου 2004. Οι πρώτες ενδείξεις για την κατολίσθηση ήταν οπτικές (διόγκωση πρανούς εκσκαφής κάτω από τον αναβαθμό στο υψόμετρο +410 και έως το υψόμετρο +395 περίπου, με παρουσία επιφάνειας ολίσθησης) και τεκμηριώθηκαν από τις ενδείξεις ήδη εγκατεστημένων οργάνων. Η εδαφική κίνηση προκάλεσε επίσης εμφανείς ρωγματώσεις και παραμορφώσεις σε υφιστάμενες κατασκευές, όπως στον τοίχο προστασίας στον αναβαθμό +430, όπου αποκολλήθηκαν οι εγκάρσιες δοκοί και οι μεταλλικές πλάκες από τις κατακόρυφες δοκούς στις οποίες ήταν συγκολλημένες, αλλά και σημαντική διεύρυνση της μικρής προϋπάρχουσας ρωγμής στην πλάκα επένδυσης του αναβαθμού στη στάθμη +430 καθώς και εμφάνιση νέων ρωγμών στους αναβαθμούς +410 και +450. Η ταχύτητα της κατολίσθησης μετά την πρώτη εβδομάδα έντονης μετακίνησης (της τάξης των μερικών εκατοστών ανά ημέρα, όπως προέκυψε από μετρήσεις διεύρυνσης των ρωγμών στους αναβαθμούς), περιορίστηκε στη συνέχεια κατά μία τάξη μεγέθους και πλέον.

Η εκδήλωση των μετακινήσεων δύο και πλέον έτη μετά την ολοκλήρωση των εκσκαφών, στο διάστημα των οποίων παρά τους συχνούς ελέγχους δεν προέκυψαν σαφείς ενδείξεις αστάθειας, αποδίδεται στην επιρροή της έντονα βροχερής περιόδου που προηγήθηκε της κατολίσθησης (αύξηση βάρους της βραχομάζας, ανάπτυξη υδροστατικών πιέσεων σε κάποιες προϋπάρχουσες εφελκυστικές ρωγμές μικρού ανοίγματος κλπ). Εκτιμάται πάντως ότι η συμβολή των παραπάνω παραγόντων ότι ήταν σχετικά περιορισμένη, καθώς η παρουσία της προϋπάρχουσας της εκδήλωσης της κατολισθητικής κίνησης ρωγμή στον αναβαθμό +430, υποδήλωνε ότι οι συνθήκες ευστάθειας ήταν ήδη οριακές.

Η πολύ αργή εξέλιξη της κατολισθητικής κίνησης μετά την πρώτη εβδομάδα σημαντικών μετακινήσεων επέτρεψε την τοποθέτηση μέσα στη μετακινούμενη μάζα και περίξ αυτής 6 κλισιομέτρων, πέραν των ήδη εγκατεστημένων. Από την αξιολόγηση των μετρήσεων των οργάνων (βάθρων παρακολούθησης επιφανειακών μετακινήσεων και κλισιομέτρων) καθώς και των μετρήσεων διεύρυνσης των ρωγμών, προσδιορίστηκε με καλή ακρίβεια η γεωμετρία της επιφάνειας ολίσθησης. Επίσης καθορίστηκε με ακρίβεια η διεύθυνση της κατολισθητικής κίνησης, η οποία προέκυψε κάθετη περίπου προς το πρανές εκσκαφής. Η ολισθαίνουσα μάζα είχε μορφή σφήνας, οριοθετούμενης από τρεις κατά προσέγγιση επίπεδες επιφάνειες (Επιφάνειες 1, 2 και 3 – βλ. Σχ. 5). Το μέγιστο βάθος της κατολίσθησης εκτιμήθηκε σε 20 m περίπου, ενώ ο όγκος της μετακινούμενης μάζας σε 75.000 m³ περίπου. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δύο κατάντη οριοθετούσων τη σφήνα επιφανειών προσεγγίζουν αυτά της σχιστότητας, αλλά ενώ στην κατάντη χαμηλή (Επιφάνεια 1) δεν αποκλίνουν από τη μέση τιμή της, στην κατάντη υψηλότερη (Επιφάνεια 2) διαφοροποιούνται αρκετά, με δυσμενή για την ευστάθεια του πρανούς προσανατολισμό.



Σχ. 5: Κατολίσθηση Ιανουαρίου 2006 – Οριζοντιογραφία

Η Επιφάνεια 3, η οποία οριοθετεί την κατολίσθηση προς τα ανάντη, συμπίπτει στο μεγαλύτερο τμήμα της με ζώνη διάτμησης, με γεωμετρικά στοιχεία παραπλήσια αυτών κυρίου συστήματος διακλάσεων του δεξιού αντερείσματος. Εγινε εμφανές ότι η εγκατεστημένη πριν την κατολίσθηση (για προστασία έναντι καταπτώσεων) πασσαλοστοιχία από μεταλλικούς δοκούς, πακτωμένες σε βάθος έως 10 m στο υπόβαθρο επί του αναβαθμού +430, συνεισέφερε ουσιαστικά στην υποστήριξη της μετακινούμενης μάζας. Επίσης, η πολύ ήπια κλίση της επιφάνειας ολίσθησης στο κατώτερο τμήμα της (βλ. Σχ. 5 & 6) υποβοήθησε σημαντικά την αυτοϋποστήριξη της μετακινούμενης μάζας, μετά την αρχική εκδήλωση της κατολίσθησης.

Για την διερεύνηση των συνθηκών ευσταθείας και τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών αντοχής κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης της κατολίσθησης εκτελέστηκαν καταρχήν ανάστροφες αναλύσεις, με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας. Λόγω της έντονα τρισιδιάστατης μορφής της κατολίσθησης, κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος ψευδο-τρισιδιάστατης ανάλυσης του Hutchinson {2}, σύμφωνα με την οποία ο συντελεστής ασφαλείας FS μιας ολισθαίνουσας εδαφικής μάζας, προκύπτει υπολογίζοντας μέσω αναλύσεων ευστάθειας σε παράλληλες προς τη διεύθυνση κίνησης και ισαπέχουσες διατομές τις δρώσες και ανθιστάμενες δυνάμεις, ως ακολούθως :

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n R_{s,i} A_{s,i} + R_E + R_W}{\sum_{i=1}^n D_{s,i} A_{s,i}}$$

όπου : A_i = μήκος επιρροής της διατομής I , R_i = ανθιστώμενη δύναμη στη βάση διατομής i , D_s = κινούσα δύναμη στη βάση διατομής i , R_E = ανθιστώμενες πλευρικές δυνάμεις στα άκρα της μάζας, υπολογιζόμενες ως :

$$R_{E,W} = (1 - \sin \phi') \cdot \gamma \cdot d^2 \cdot L \cdot \tan \phi'$$

όπου : ϕ' = γωνία τριβής υλικού, γ = φαινόμενο βάρος υλικού, d = μέσο βάθος ακραίου ολισθαίνοντος τεμάχους, L = μέσο μήκος ακραίου ολισθαίνοντος τεμάχους, .

Για την εκτέλεση των αναλύσεων ευστάθειας έγινε χρήση 5 παράλληλων διατομών, ισαπεχουσών (ανά 15 m) και προσανατολισμένων κατά τη διεύθυνση της κατολισθητικής κίνησης. Προκειμένου να μην αμφισβητηθεί η αξιοπιστία της παραπάνω ανάλυσης, επιβεβαιώθηκε ότι ο όγκος της μετακινούμενης μάζας, όπως αυτός προέκυπε από τις ισοϋψείς της επιφάνειας ολίσθησης, συμφωνεί με τον υπολογιζόμενο ως άθροισμα των γινομένων των εμβαδών των διατομών επί το μήκος επιρροής εκάστης. Προηγήθηκε και πάλι η εκτέλεση ανάστροφων αναλύσεων σε όλες τις διατομές, με την παραδοχή και στην περίπτωση αυτή ότι ο συντελεστής ασφαλείας κατά την διάρκεια της κατολισθητικής κίνησης ήταν λίγο μικρότερος της μονάδας, λόγω της μικρής ταχύτητας της κατολίσθησης. Αγνοήθηκε και εδώ η επιρροή του υπόγειου νερού, καθώς από μετρήσεις στα εγκατεστημένα πιεζόμετρα είχε διαπιστωθεί ότι το επίπεδο του υπόγειου ορίζοντα ήταν πολύ χαμηλότερα από την επιφάνεια ολίσθησης. Η ευστάθεια ελέγχθηκε με δύο διαφορετικές θεωρήσεις. Στην πρώτη θεωρήθηκε ότι η γωνία διατμητικής αντοχής είναι σταθερή σε όλη την επιφάνεια ολίσθησης και αναζητήθηκε η τιμή της. Στη δεύτερη θεωρήθηκε τιμή γωνίας διατμητικής αντοχής $\phi=20^\circ$ επί του επιπέδου σχιστότητας, ίση δηλ. με το κάτω όριο από δοκιμές σε πυρήνες γεωτρήσεων, και αναζητήθηκε η τιμή της γωνίας διατμητικής αντοχής στην Επιφάνεια 3. Και στις δύο περιπτώσεις η συνοχή επί των επιφανειών ολίσθησης θεωρήθηκε μηδενική. Από τις αναλύσεις, η γωνία διατμητικής αντοχής στην επιφάνεια ολίσθησης προέκυψε ίση με 26° και με $32,5^\circ$ αντίστοιχα για τις δύο εξετασθείσες θεωρήσεις, τιμές οι οποίες και οι δύο ευρίσκονται εντός των αναμενόμενων ορίων. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν ευθείες αναλύσεις, ελέγχοντας την επιρροή της υλοποίησης διαφόρων μέτρων θεραπείας για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των προβλήματος ευστάθειας της μάζας. Σημειώνεται ότι σε όλες τις αναλύσεις δεν ελήφθη υπόψη η επιρροή της πλήρωσης με νερό ελκυστικών ρωγμών κλπ, καθώς δεν υπήρχαν σχετικά στοιχεία. Αν και θεωρείται, όπως προαναφέρθηκε, ότι ο παράγοντας αυτός συνετέλεσε ουσιαστικά στην εκδήλωση της κατολισθητικής κίνησης, εκτιμάται εντούτοις ότι η υπόψη απλούστευση δεν επηρεάζει την αξιοπιστία των συμπερασμάτων, καθώς οι αναλύσεις (ανάστροφες – ευθείες) έχουν συγκριτικό χαρακτήρα.

Τα μέτρα θεραπείας τα οποία υιοθετήθηκαν μετά από διεξοδικούς ελέγχους και σχετικές γνωματεύσεις {1}, ήταν τα ακόλουθα :

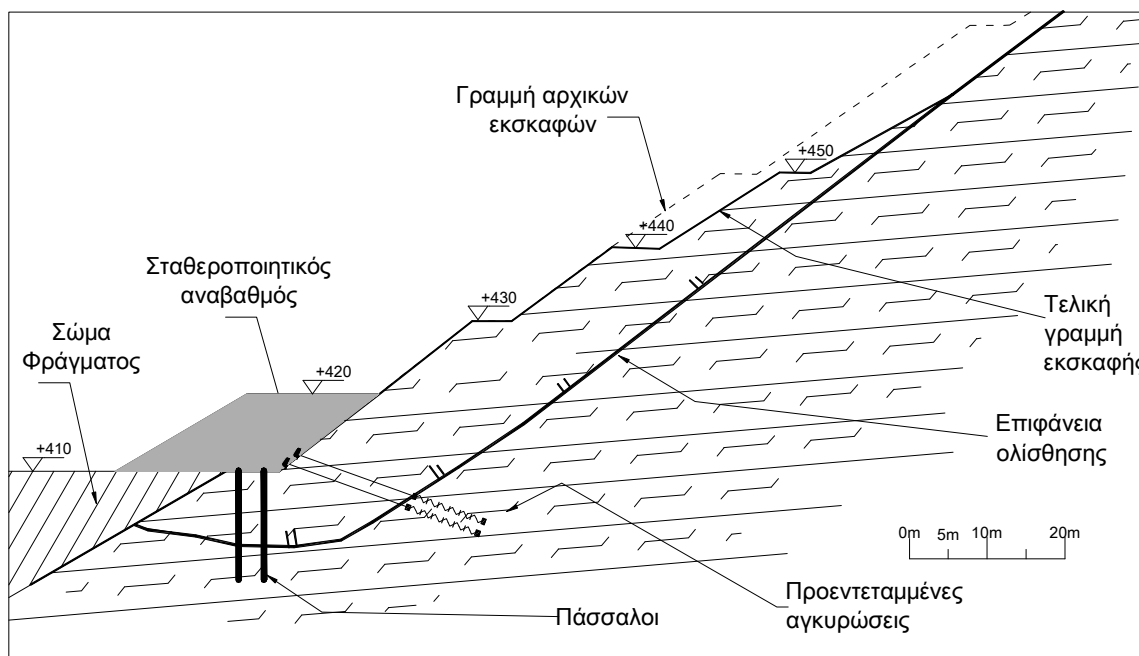
- Εκσκαφή του ανώτερου τμήματος της κατολίσθησης, έως το υψόμετρο +440, με σκοπό την αποφόρτιση της κατολισθαίνουσας μάζας. Ο εκσκαπτόμενος όγκος προέκυψε ίσος με 55.000 m^3 , από τον οποίο 50% αφορούσε τμήμα εκτός της μετακινούμενης μάζας, για την διασφάλιση της ευστάθειας των υπερκείμενων πρανών.
- Τοποθέτηση μέτρων προστασίας, και συγκεκριμένα κατασκευή 17 διατμητικών πασσάλων $\Phi 800 \text{ mm}$, μήκους 14 m και εγκατάσταση 30 προεντεταμένων αγκυρώσεων, μήκους 25 m και φορτίου λειτουργίας 500 KN σε 2 σειρές,.
- Κατασκευή σταθεροποιητικού αναβαθμού ύψους 10 m στον πόδα της κατολίσθησης επί της στέγης του φράγματος, ώστε να επανζηθεί η αντιστήριξη που προσφέρει το σώμα του φράγματος στα κατώτερα 15 m περίπου της κατολίσθησης μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η αθροιστική συνεισφορά στη βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας των μέτρων προστασίας που ελέγχθηκαν (για ενιαία τιμή γωνίας διατμητικής αντοχής $\phi=26^\circ$).

Πίνακας 1: Συνεισφορά μέτρων αντιστήριξης στη βελτίωση συντελεστών ασφαλείας

Μέτρα προστασίας	Συντελεστές Ασφαλείας	Βελτίωση συντελεστή ασφαλείας
Κανένα	0,97	0%
Εκσκαφή	1,20	24%
Εκσκαφή & Πάσσαλοι + αγκυρώσεις	1,24	28%
Εκσκαφή & Πάσσαλοι + αγκυρώσεις & κατασκευή φράγματος	1,47	52%
Εκσκαφή & Πάσσαλοι + αγκυρώσεις & κατασκευή φράγματος & σταθεροποιητικός αναβαθμός	1,68	73%

Τα μέτρα προστασίας που τελικά υιοθετήθηκαν παρουσιάζονται στο Σχ. 6.



Σχ. 6 : Κατολίσθηση Ιανουαρίου 2006 – Κεντρική τομή I – I – Μέτρα προστασίας

Μετά την κατασκευή των πασσάλων, την εγκατάσταση των προεντεταμένων αγκυρώσεων και την ολοκλήρωση της κατασκευής του φράγματος και του σταθεροποιητικού αναβαθμού, βάσει της επισκόπησης των πρανών και της αξιολόγησης των ενόργανων μετρήσεων διαφαίνεται σαφώς ότι η κατολίσθηση έχει πλέον σταθεροποιηθεί.

6. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΔΩΝ 2004 – 2006

Μετά την υλοποίηση των νέων γραμμών εκσκαφής και την εγκατάσταση των μέτρων προστασίας δεν έχουν παρουσιαστεί έως σήμερα προβλήματα ευστάθειας στις περιοχές εκδήλωσης των κατολίσθητικών φαινομένων των περιόδων 2004 και 2006.

Η συνολική υπέρβαση των συμβατικών ποσοτήτων εκσκαφών του δεξιού αντερεισματος για την αντιμετώπιση των δύο κατολισθητικών φαινομένων προέκυψε ίσος με 105.000 m³ περίπου (ποσοστό υπέρβασης 7,50%). Με δεδομένο ότι ο γρήγορος επανασχεδιασμός των εκσκαφών και η ταχεία υλοποίησή των βελτιωτικών μέτρων ευστάθειας δεν επιβάρυναν τους χρόνους κατασκευής του Έργου, η όλη αντιμετώπιση κρίνεται σαφώς επιτυχής.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η κατασκευή μεγάλων φραγμάτων απαιτεί συχνά τη δημιουργία υψηλών πρανών, προσωρινών ή μόνιμων. Αστάθειες οι οποίες μπορεί να εμφανιστούν έχουν σε πολλές περιπτώσεις μεγάλες συνέπειες στο Έργο, τόσο οικονομικές όσο και χρονικές. Με βάση τις εμπειρίες που αποκτήθηκαν από την εκδήλωση και αντιμετώπιση των περιστατικών αστάθειας που περιγράφονται στην παρούσα εργασία, θεωρείται σκόπιμο να επισημανθούν τα ακόλουθα, τα οποία ενώ αποτελούν απλούς πρακτικούς κανόνες και πολλές φορές έχουν επισημανθεί στην σχετική τεχνική βιβλιογραφία, εντούτοις συχνά η σημασία τους παραβλέπεται :

- Είναι απολύτως σαφές ότι ο σχεδιασμός των πρανών θα πρέπει να γίνεται πάντοτε μετά από πολύ καλή γνώση της γεωλογίας της περιοχής. Σε ασθενείς ιδίως σχηματισμούς (όπως είναι οι φυλλίτες του δεξιού αντερεισματος του φράγματος Ιλαρίωνα κλπ) κρίνεται αναγκαία η γεωτεχνική διερεύνηση να περιλαμβάνει στη φάση της μελέτης, πέραν της εκτέλεσης ερευνητικών γεωτρήσεων, και τη διάνοιξη ερευνητικών στοών (έρευνα η οποία έχει ατονήσει κατά τα τελευταία χρόνια), σε επαρκή αριθμό και μήκη ώστε να καλύπτεται αντιπροσωπευτικά η περιοχή στην οποία προβλέπεται η εκτέλεση εκτεταμένων εκσκαφών.
- Στην περίπτωση υψηλών πρανών η συνεισφορά των μέτρων προστασίας (αγκυρώσεων κλπ) είναι σχετικά μικρή, και περιορίζεται στην αντιμετώπιση σχετικά ρηχών επιφανειακών ασταθειών. Για το λόγο αυτό επιβάλλεται η διασφάλιση της ευρύτερης ευστάθειας των πρανών να γίνεται με την κατάλληλη επιλογή κλίσης και προσανατολισμού των εκσκαφών.
- Καθοριστική σημασία έχει εν προκειμένω η αποφυγή της δημιουργίας επισφαλών σφηνών στα τελικά πρανή εκσκαφής από συνδυασμούς των κυρίων συστημάτων ασυνεχειών. Μάλιστα, τα συστήματα ασυνεχειών συνήθως υποδηλώνουν και την παρουσία υποπαράλληλων με αυτά τεκτονικών ζωνών, οι οποίες συχνά έχουν μεγάλο μήκος ανάπτυξης και χαμηλά διατμητικά χαρακτηριστικά {3}. Η ανίχνευση τέτοιων ζωνών δεν είναι συνήθως εφικτή πριν την εκτέλεση των εκσκαφών (λόγω επικάλυψης από χαλαρά υλικά, φυτοκάλυψης κλπ), αλλά ο εντοπισμός τους κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης των εκσκαφών πρέπει να οδηγεί άμεσα σε επενέλεγχο των συνθηκών ευστάθειας των πρανών. Για το λόγο αυτό είναι προφανής η σημασία της έγκαιρης και σε συνεχή βάση χαρτογράφησης των πρανών εκσκαφής από έμπειρο προσωπικό.
- Επιβάλλεται να εκτελούνται συστηματικά στη φάση του σχεδιασμού υψηλών πρανών έλεγχοι σφηνοειδών ολισθήσεων {4}, σημειώνοντας ότι είναι δυστυχώς σχετικά σύνθητες σε σχετικά ασθενείς βραχομάζες οι έλεγχοι αυτοί να παραλείπονται, και να εκτελούνται μόνον έλεγχοι θραύσης με θεώρηση της βραχομάζας ως ομοιογενούς εδαφικού σχηματισμού. Από τους ελέγχους αυτούς θα πρέπει να προκύπτει ότι η ευστάθεια των πρανών διασφαλίζεται όχι μόνον με χρήση των μέσων τιμών των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών, αλλά και για εύλογη διακύμανση των τιμών αυτών περί τον μέσο όρο. Σε πολλές περιπτώσεις αναμένεται ότι τα αποτελέσματα των αναλύσεων σφηνών θα είναι δυσμενέστερα από αυτά της θραύσης, και επομένως θα καθορίζουν τελικά την γεωμετρία των εκσκαφών και την επιλογή των μέτρων προστασίας.
- Κατά την εκτέλεση εκσκαφών αποφόρτισης θα πρέπει να καταβάλλεται κάθε προσπάθεια προώθησης των υλικών εκσκαφής των υπερκειμένων πρανών εκτός της κατολισθημένης μάζας, ώστε να μην επιβαρύνεται η ευστάθειά της.

- Η εγκατάσταση συστήματος παρακολούθησης (γεωδαιτικά βάθρα – κλισιόμετρα – πιεζόμετρα) στα πρανή, αμέσως μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής σε κάθε επιμέρους τμήμα, καθώς και η τακτική παρακολούθηση και αξιολόγηση των μετρήσεων των οργάνων είναι αναγκαία, και κατά μείζονα λόγο σε ασθενείς ή έντονα τεκτονισμένους σχηματισμούς. Είναι αναγκαίο για το λόγο αυτό να προβλέπεται κατά το σχεδιασμό των πρανών η υλοποίηση αναβαθμών επαρκούς πλάτους, επί των οποίων να εγκαθίστανται τα όργανα παρακολούθησης. Οι αναβαθμοί αυτοί πρέπει να είναι μόνιμα επισκέψιμοι, τόσο κατά την περίοδο της κατασκευής όσο και μετέπειτα.
- Ειδικότερα, σε περιπτώσεις εκδήλωσης κατολισθητικών κινήσεων μικρής ταχύτητας, όποτε οι συνθήκες επιτρέπουν την εγκατάσταση γεωτεχνικών οργάνων (βάθρων μέτρησης επιφανειακών μετακινήσεων, κλισιόμετρων κλπ) εντός της μετακινούμενης μάζας, τόσο η γρήγορη τοποθέτηση όσο και (κυρίως) η ταχεία λήψη και αξιολόγηση των μετρήσεων των οργάνων συμβάλλει αποφασιστικά στον ορθό και έγκαιρο σχεδιασμό των απαιτούμενων μέτρων θεραπείας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Hoek, E. & Marinos, P. 2006. Consulting Board Report on Ilarion HEP (12/03/2006).
2. Παντελίδης, Π. & Καβουνίδης, Σ. 1997. Αναλύσεις ευστάθειας κατολίσθησης Μαλακάσας, 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, Πάτρα, 20 – 22 Μαρτίου 1997
3. Hoek, E. & Marinos, P. & Marinos V. 2005. Characterization and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rockmasses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 42 (2005) 277 – 285.
4. Αναστασόπουλος, Κ. & Πανταζής Κ & Σακελλαριάδης, Κ. & Χατζησάββας, Κλ. & Οικονομίδης, Χ. 1992. Εκσκαφή και συμπεριφορά υψηλών πρανών στη Λεκάνη Αποτόνωσης του ΥΗΕ Θησαυρού. 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, Θεσσαλονίκη, 21 – 23 Οκτωβρίου 1992

Confronting sliding phenomena during Ilarion dam construction

K. Anastassopoulos

Civil Engineer MSc, Public Power Corporation of Greece / DYHP

K. Antonakopoulos

Civil Engineer MSc, Public Power Corporation of Greece / DYHP

Z. Papachatzaki

Civil Engineer MSc.

ABSTRACT

Due to adverse geological conditions in the right abutment of the foundation of Ilarion Dam, the design provided for extensive excavations in this area, resulting in high and relatively mild slopes. This article presents the stability problems that were encountered during excavation and after construction, as well as the actions that were adopted in order to ensure the integrity of the slopes.