

ΤΕΧΝΙΚΕΣ, ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΜΠΕΙΡΙΕΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗΣ ΣΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ ΝΕΣΤΟ

Ι.Π. Στεφανάκος¹, Π.Ι. Τσικνάκου²

¹Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, e-mail:jstef@tee.gr, ²Πολιτικός Μηχανικός, e-mail:ytsik@tee.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Ξεκινώντας στις 18 Οκτωβρίου του 1995, ολοκληρώθηκε στις 10 Μαρτίου του 1997 η κατασκευή του σώματος του Φράγματος Πλατανόβρυσης από Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα (RCC), στον ποταμό Νέστο, με τη χρήση επεξεργασμένης ιπτάμενης τέφρας από το θερμοηλεκτρικό σταθμό Πτολεμαΐδας, ως κύριου συνεκτικού συστατικού του μίγματος. Το εγχείρημα ήταν πρωτοποριακό όχι μόνο για τα ελληνικά αλλά και για τα παγκόσμια τεχνικά δεδομένα. Για τη σύνθεση του κυλινδρούμενου σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν 225 kg/m³ επεξεργασμένη ιπτάμενη τέφρα και 50 kg/m³ τσιμέντο πόρτλαντ (I-45). Η τέφρα μεταφέρθηκε στη θέση του έργου από την Πτολεμαΐδα (απόσταση 365 km). Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται οι τεχνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές συνιστώσες του εγχειρήματος και οι αντίστοιχες εμπειρίες και συμπεράσματα από την κατασκευή του έργου.

Λέξεις κλειδιά: κυλινδρούμενο σκυρόδεμα, τέφρα, φράγμα Πλατανόβρυσης

TECHNICAL, ECONOMICAL AND ENVIRONMENTAL ASPECTS AND CONCLUSIONS, RESULTING FROM THE USE OF FLY-ASH IN THE CONCRETE MIX FOR THE CONSTRUCTION OF PLATANOVRYSSI RCC DAM.

J. Stefanakos¹, P. Tsiknakou²

¹*Civil Engineer PhD e-mail:jstef@tee.gr*, ²*Civil Engineer, e-mail:ytsik@tee.gr*

ABSTRACT: The construction of Platanovryssi RCC Dam, on the Nestos River (Eastern Macedonia), started on the 18th of October 1995 and finished on the 10th of March 1997. In the concrete mix, large quantities of treated fly-ash were used, transported from Ptolemais Lignite Plants, at a distance of 365 km. The project represents a pioneer technical experience, not only in Greece but worldwide. In this paper are presented the technical, economical and environmental aspects and conclusions from Platanovryssi dam construction.

Key words: roller compacted concrete, fly ash, Platanovryssi Dam

ΙΣΤΟΡΙΚΟ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη και κατασκευή του φράγματος Πλατανόβρυσης ήταν οπωσδήποτε πρωτοποριακό εγχείρημα.

Τι θα μπορούσαμε όμως να πούμε σήμερα, οκτώ χρόνια μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του φράγματος ;

Γιατί δεν επαναλήφθηκαν στον ελλαδικό χώρο ανάλογες εφαρμογές;

Το φράγμα της Πλατανόβρυσης κατασκευάστηκε στον ρου του ποταμού Νέστου και αποτελεί τη δεύτερη βαθμίδα ενεργειακής αξιοποίησης, ευρισκόμενο κατάντη του ήδη λειτουργούντος υδροηλεκτρικού έργου Θησαυρού και ανάντη του υδροηλεκτρικού έργου Τεμένους, η κατασκευή του οποίου έχει ανασταλεί από τη ΔΕΗ.

Το έναυσμα που οδήγησε στην αναζήτηση λύσεως φράγματος εκ σκυροδέματος στη θέση της Πλατανόβρυσης προήλθε κατ' αρχήν από την δραματική αναθεώρηση της πλημμύρας σχεδιασμού του ανάντη φράγματος του Θησαυρού.

Το φράγμα Θησαυρού, λιθόρριπτο ύψους 180m, με αργιλικό πυρήνα, είχε μελετηθεί σε φάση Προμελέτης με μέγιστη πλημμύρα σχεδιασμού 3.500 m³/sec. Κατά τη φάση δημοπράτησης, περίοδος 1979-1982, η πλημμύρα αυτή αναθεωρήθηκε σε 10.000 m³/sec, με αποτέλεσμα τόσο το ίδιο το έργο του Θησαυρού όσο και τα κατάντη του έργα να απαιτούν γενικότερη επανεξέταση στη φιλοσοφία σχεδιασμού τους.

Το φράγμα Πλατανόβρυσης έχει χαμηλότερο ύψος της τάξεως των 100 m και η δυνατότητα κατασκευής του ως λιθόρριπτου με αργιλικό πυρήνα, είχε αποκλεισθεί εξ αρχής, λόγω έλλειψης των καταλλήλων υλικών στην ευρύτερη περιοχή του έργου.

Μετά δε και την αναθεώρηση των μεγεθών της μέγιστης πλημμύρας του Θησαυρού η επιλογή φράγματος από σκυρόδεμα για την Πλατανόβρυση ήταν ουσιαστικά μονόδρομος, δεδομένου ότι έτσι όλο το μήκος του φράγματος θα λειτουργούσε ως υπερχειλιστής και θα απεφεύγετο ένα υπέρογκο κόστος δημιουργίας διώρυγας υπερχειλιστού στο πρανάς, το οποίο καθιστούσε το όλο έργο οικονομικά μη βιώσιμο.

Η κατασκευή όμως φράγματος εκ σκυροδέματος συμβατικού τύπου (δηλαδή με οπλισμένο σκυρόδεμα) δεν ήταν απλή λύση. Το υψηλό κόστος και το μεγάλο χρονικό διάστημα για την ολοκλήρωση της κατασκευής, καθώς και οι ειδικές απαιτήσεις ψύξεως, δόνησης και διάστρωσης του σκυροδέματος έκαναν τα φράγματα αυτού του τύπου μη οικονομικά. Ήδη από τη δεκαετία του 1960 οι μηχανικοί αναζητούσαν απλούστερες εναλλακτικές λύσεις.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το φράγμα Alpe Gera της Ιταλίας, ύψους 172μ, στο οποίο αποτολμήθηκε αφενός η μείωση της περιεκτικότητας τσιμέντου στο εσωτερικό τμήμα της διατομής του φράγματος, στο οποίο δεν υφίσταται κίνδυνος μείωσης της ανθεκτικότητας (durability) και αφετέρου η διάστρωση σε οριζόντιες στρώσεις, αντί των κατακορύφων προβόλων, που ήσαν η εφαρμοζόμενη πρακτική. Η κατασκευή του φράγματος ολοκληρώθηκε το 1964.

Ακολούθησαν παρόμοιες εφαρμογές στον Καναδά και στις ΗΠΑ, κυρίως σε χαμηλά αντιπλημμυρικά αναχώματα.

Η επανάσταση όμως στη μέθοδο κατασκευής φραγμάτων εκ σκυροδέματος, η οποία οδήγησε στη μετεξέλιξη του κυλινδρούμενου σκυροδέματος ήταν οι απαιτήσεις για εκτεταμένες εργασίες επισκευής στο φράγμα Tarbela του Πακιστάν. Από το 1974 έως το 1986 τοποθετήθηκαν 2,66 εκατ. m^3 για αντιστήριξη του δεξιού αντερείσματος στην είσοδο της σήραγγας προσαγωγής και για προστασία της λεκάνης αποτόνωσης στην έξοδο των εκχειλιστών.

Έκτοτε αρχίζει ευρύτατη εφαρμογή των φραγμάτων από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα.

Διακρίνονται παγκοσμίως τρεις διαφορετικές φιλοσοφίες κατασκευής:

α) Φράγματα από ισχνό σκυρόδεμα (lean concrete). Στα φράγματα αυτά η περιεκτικότητα σε υδραυλικές κονίες (τσιμέντο – ποζολάνη) είναι περιορισμένη ($50\text{--}60 \text{ kg/m}^3$) και δεν υπερβαίνει τα 100 kg/m^3 . Επίσης τα αδρανή περιέχουν μεγάλες ποσότητες λεπτοκόκκων.

Τα φράγματα αυτά, λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο, εμφανίζουν το πλεονέκτημα της πλήρως ελεγχόμενης εξώθερμης αντίδρασης, αλλά μειονεκτούν λόγω χαμηλής συνάφειας μεταξύ των στρώσεων (ύψους συνήθως 30 cm) και υψηλής διαπερατότητας.

Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίστηκαν αφενός μεν με την χρήση ειδικών μειγμάτων υψηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο μεταξύ των στρώσεων (bedding mixes) και αφετέρου με την κατασκευή αδιαπέρατης ανάντη όψεως, έτσι ώστε το ισχνό σκυρόδεμα στο εσωτερικό του φράγματος να χρησιμεύει απλά για την συγκράτηση του ανάντη σώματος.

β) Φράγματα με την Ιαπωνική μέθοδο κατασκευής (RCD Dams)

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται αποκλειστικά στην Ιαπωνία. Το σκυρόδεμα περιέχει υδραυλικές κονίες $120\text{--}130 \text{ kg/m}^3$, τοποθετείται σε οριζόντιες στρώσεις 50 – 100 cm και συμπτυκνύονται με δονητικούς κυλινδροσυμπιεστές ανά τρεις έως τέσσερις στρώσεις. Ανά 15m δημιουργούνται κατακόρυφοι αρμοί για αποφυγή θερμοκρασιακών ρηγματώσεων.

Η ανάντη και η κατάντη όψη καλύπτεται με σκυρόδεμα υψηλής ποιότητας για εξασφάλιση στεγανότητας και προστασίας έναντι καιρικών συνθηκών (freeze and thaw attack). Σε μερικές περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν ανάντη και φύλλα χαλκού ως στεγανωτικά.

γ) Φράγματα με υψηλή περιεκτικότητα υδραυλικών κονιών (High paste RCC Dams)

Η μέθοδος αυτή κατασκευής φραγμάτων ξεκίνησε κυρίως από εκτεταμένες εργαστηριακές έρευνες στο Ηνωμένο Βασίλειο, αφού προηγήθηκε έρευνα από την Tennessee Valley Authority στις αρχές του 1970.

Τα αρχικώς κατασκευασθέντα φράγματα στην Αμερική από ισχνό σκυρόδεμα και τα προβλήματα συνοχής και διαπερατότητας τα οποία εμφάνισαν, οδήγησαν καταρχήν σε αύξηση του ποσοστού τσιμέντου και τέφρας στο μίγμα. Έτσι, ενώ το πρώτο φράγμα που μελετήθηκε από το US Corps of Engineers το Willow Creek είχε 67 kg/m^3 (τσιμέντο+τέφρα), το δεύτερο το Elk Creek είχε 103 kg/m^3 (τσιμέντο + τέφρα). Η ίδια εξέλιξη στην αύξηση του ποσοστού των υδραυλικών κονιών εμφανίσθηκε και σε τρία φράγματα της Αυστραλίας, που κατασκευάσθηκαν κατά την ίδια περίοδο (1980-1990):

Η πορεία αυτή των διερευνήσεων οδήγησε στην μελέτη και κατασκευή του φράγματος Upper Stillwater στην Αμερική ύψους 90 m, όγκου $1.070.000 \text{ m}^3$, το οποίο περιείχε στο μίγμα σκυροδέματος 79 kg/m^3 τσιμέντο και 173 kg/m^3 τέφρα (τύπου F), δηλ. σύνολο υδραυλικών κονιών 252 kg/m^3 .

Το έργο αυτό ολοκληρώθηκε το 1987 και αποτέλεσε πρότυπο για την προώθηση των κυλινδρούμενων φραγμάτων αυτού του τύπου.

ΦΡΑΓΜΑ ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗΣ

Επιλογή τύπου φράγματος – Οικονομικοτεχνικά κριτήρια

Οι αρχικές μελέτες του έργου ξεκίνησαν το 1987 και ήδη το 1989 ξεκίνησε η κατασκευή του έργου με τη διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής.

Ο προσανατολισμός των Μελετητών της Διεύθυνσης Υδροηλεκτρικών της ΔΕΗ στην επιλογή φράγματος από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα προσέκρουε σε άλλες απόψεις, που έβλεπαν τη συγκεκριμένη τεχνολογία με επιφύλαξη και την έκριναν μη δόκιμη και μάλιστα για ένα φράγμα 95 μ ύψους.

Τα οικονομικοτεχνικά όμως κριτήρια, όπως αναφέρεται στη συνέχεια, λειτουργούσαν συντριπτικά υπέρ της συγκεκριμένης επιλογής.

Συνοπτικά καταγράφονται τα εξής:

- Ο όγκος της διατομής του φράγματος (φράγμα βαρύτητας από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα) είναι σημαντικά μικρότερος, συγκρινόμενος με χωμάτινο ή λιθόρριπτο φράγμα, σύμφωνα με την διεθνή εμπειρία που απεικονίζεται στο Σχήμα 1. Έτσι για ύψος φράγματος 95 m και μήκος στέψεως 300 m, που είναι τα χαρακτηριστικά της Πλατανόβρυσης προκύπτουν τα εξής συγκριτικά στοιχεία όγκου, για κάθε υποθετικό τύπο φράγματος:

Χωμάτινο: $2,50 \times 10^6 \text{ m}^3$

Λιθόρριπτο: $1,50 \times 10^6 \text{ m}^3$

Κυλινδρούμενο βαρύτητας: $0,45 \times 10^6 \text{ m}^3$

(Οι εκτιμήσεις αυτές δεν έλαβαν βέβαια υπόψη ότι η απουσία καταλλήλων υλικών στην περιοχή, καθιστούσε τη λύση του λιθόρριπτου ανέφικτη).

Οι διαφορές αυτές στον απαιτούμενο όγκο φράγματος, πέραν των οικονομικών επιβαρύνσεων, επηρεάζουν εξαιρετικά και τον χρόνο ολοκλήρωσης του έργου και συνεπώς και την ημερομηνία έναρξης της εμπορικής λειτουργίας. Ένας χρόνος καθυστέρησης (στην πραγματικότητα οι χρόνοι είναι τουλάχιστον διπλάσιοι), για ενεργειακή παραγωγή 200 GWh το έτος, που είναι η παραγωγή του έργου της Πλατανόβρυσης και με τιμή kwh αιχμής 50€/ MWh* , δίδει ετήσια απώλεια 10.000.000 €.

*(θεωρητική εκτίμηση, δεδομένου ότι οι ισχύοντες Κώδικες Συναλλαγών και Διαχείρισης Ηλεκτρικής Ενέργειας δεν προβλέπουν κοστολόγηση της παραγόμενης ενέργειας από μεγάλο υδροηλεκτρικό. Η επιλεγείσα τιμή αντιπροσωπεύει τη μέση οριακή τιμή συστήματος για τις ώρες αιχμής στην παρούσα περίοδο, ενώ στη φάση λήψεως των αποφάσεων για το έργο της Πλατανόβρυσης, γινόταν σύγκριση με εναλλακτικό του υδροηλεκτρικού έργο, που ήσαν οι πετρελαϊκές ή οι αεριοστροβιλικές Μονάδες, για τις οποίες η τιμή της MWh ήταν αντίστοιχα 16.000 και 25.000 δρχ., δηλαδή 47€ και 73€ αντίστοιχα).

- Η επιλογή φράγματος από σκυρόδεμα δίδει τη δυνατότητα κατάργησης ή σημαντικού περιορισμού των μεγάλων και δαπανηρών κατασκευών, που είναι οι εκχειλιστές – διώρυγες επί των αντρευσμάτων του φράγματος. Στο έργο της Πλατανόβρυσης το κόστος του εκχειλιστή, μέσω του οποίου θα διοχετεύετο η εισερχόμενη πλημμύρα σχεδιασμού (7330 m³/sec) εφόσον δεν

κατασκευαζόταν υπερπηδητό φράγμα, είχε εκτιμηθεί σε 4 δις δρχ, δηλαδή αντιπροσώπευε το 30% των έργων πολιτικού μηχανικού.

Με την επιλογή φράγματος από σκυρόδεμα ήταν δυνατή η διοχέτευση 5300 m³/sec πάνω από το σώμα του φράγματος. Το υπόλοιπο σχεδιάστηκε να διοχετευθεί μέσω εκχειλιστή σήραγγα.

Φράγμα όμως από σκυρόδεμα εννοείτο πλέον διεθνώς αυτό με κυλινδρούμενο, διότι η λύση με συμβατικό ήταν εξαιρετικά δαπανηρή και χρονοβόρα (Σχήμα 2)

Για τον όγκο του φράγματος Πλατανόβρυσης 450.000 m³ ή 592.000 yd³, προέκυπτε, με τα συγκριτικά στοιχεία της περιόδου εκείνης, κόστος κυλινδρούμενου 24 \$/ yd³ και κόστος συμβατικού 51 \$/ yd³.

- Η δυνατότητα προσθήκης ιπτάμενης τέφρας στο μίγμα του κυλινδρούμενου, η συσσώρευση της οποίας στους χώρους λειτουργίας των θερμοηλεκτρικών σταθμών, προξενούσε ανέκαθεν σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα στη ΔΕΗ, η οποία κατά καιρούς αναζητούσε μετ' επιτάσεως τρόπους διάθεσης του παραπροϊόντος αυτού.

Όλες αυτές οι παράμετροι κατέστησαν την επιλογή του συγκεκριμένου τύπου φράγματος ουσιαστικά μονόδρομο.

Κριτήρια μελέτης και σχεδιασμού φράγματος

Η διερεύνηση της διεθνούς αγοράς και η αναζήτηση εμπείρου Συμβούλου οδήγησε τότε τη ΔΕΗ (Νοέμβριος 1988), στην συνεργασία με τον Βρετανό Σύμβουλο Malcolm Dunstan, ο οποίος είχε μακρόχρονη εμπειρία αντίστοιχων ερευνητικών προγραμμάτων στη Μεγάλη Βρετανία και στις ΗΠΑ και μάλιστα στην κατεύθυνση προσθήκης υψηλών ποσοτήτων υδραυλικών κονιών στο μίγμα σκυροδέματος.

Η ευτυχής συγκυρία ήταν ότι ο Malcolm Dunstan συνέστησε στη ΔΕΗ την Ιωάννα Παπαγιάννη, ως εξειδικευμένη στη χρήση ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα, σύμφωνα με τις σχετικές δημοσιεύσεις και παρουσιάσεις της ίδιας σε διεθνή συνέδρια. Η Ιωάννα Παπαγιάννη είχε ήδη συγκεντρώσει μια πολύχρονη εμπειρία λόγω εμπειριστατωμένης ενασχόλησης με τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας που παράγεται από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς στην περιοχή Κοζάνης – Πτολεμαΐδας.

Το σημαντικό της έρευνας αυτής αφορούσε τη χρήση τέφρας στο σκυρόδεμα ως «τέταρτου» υλικού στο μίγμα, (πλέον του τσιμέντου, των αδρανών και του νερού), για μερική υποκατάσταση του τσιμέντου.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η τέφρα Πτολεμαΐδας είναι υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο (high calcium fly ash), που συχνά ήταν της τάξεως του 40% και κατατάσσεται σε ιδιαίτερη κατηγορία (Class C) στα πρότυπα ASTM. Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο η προσθήκη των τεφρών αυτών στο σκυρόδεμα, του προσδίδει υψηλές αντοχές σε πρώιμες ηλικίες, λόγω του περιεχομένου ελεύθερου ασβεστίου, με παράλληλη όμως ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών ενυδάτωσης.

Με επίγνωση λοιπόν των δυσκολιών του όλου εγχειρήματος, ακολούθησε ευρύ πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, τόσο με ακατέργαστη τέφρα Πτολεμαΐδας όσο και με αλεσμένη σε υπάρχοντα αυτοσχέδιο εργαστηριακό μύλο στους χώρους του θερμοηλεκτρικού σταθμού. Παράλληλα απεστάλη υλικό σε βρετανικά εργαστήρια για την

εκτέλεση ειδικών δοκιμών που αφορούσαν κυρίως τη θερμική συμπεριφορά του μείγματος και μάλιστα με αλεσμένη τέφρα, η οποία υπέστη και υδρόλυση με έγχυση νερού υψηλής θερμοκρασίας.

Εξετάστηκε επίσης η συμπεριφορά του φράγματος σε δυναμική καταπόνηση για σεισμική επιτάχυνση 0,384g, αφού ολοκληρώθηκε το σύνολο του σχεδιασμού του έργου από τους μελετητές της ΔΕΗ και οριστικοποιήθηκε η διατομή του φράγματος (Σχήμα 3).

Κρίσιμο στοιχείο στην όλη θεώρηση ήταν η απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή μεταξύ των οριζοντίων στρώσεων του κυλινδρούμενου σκυροδέματος, ώστε να ανθίσταται το φράγμα στη σεισμική καταπόνηση. Η απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή προέκυψε 2.2 MPa και ως εκ τούτου η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή κύβου 91 ημερών 39 MPa.

Τελικά το καλοκαίρι του 1989 και μετά την ολοκλήρωση των επί μέρους εξειδικευμένων ερευνών ελήφθη η κομβική απόφαση:

Το φράγμα Πλατανόβρυσης θα κατασκευαστεί με μίγμα σκυροδέματος περιέχον υψηλά ποσοστά κατεργασμένης ιπτάμενης τέφρας (άλεση και υδρόλυση), παρόλο που αυτού του είδους η εφαρμογή ήταν πρωτότυπη παγκοσμίως.

Οι απαιτούμενες ποσότητες κατεργασμένης τέφρας υπολογίστηκαν περίπου σε 150.000 t.

Οι συνθέσεις που οριστικοποιήθηκαν για τις τρεις διαφορετικές κατηγορίες σκυροδεμάτων (κυλινδρούμενο, επιφάνειας θεμελίωσης και στοιχείων όψευς) ήσαν:

Πίνακας 1. Συνθέσεις σκυροδεμάτων						
	Free water (kg/m ³)	Portland Cement I-45 (kg/m ³)	Fly ash (kg/m ³)	Fine aggregates (kg/m ³)	Coarse aggregates (kg/m ³)	Max. aggr. size (mm)
RCC	128	50	225	607	1350	50
Leveling	187	100	225	676	1057	50
Facing	173	140	175	753	957	20

Η συνεκτικότητα των μιγμάτων ελέγχθηκε με τροποποιημένη συσκευή Ve Be. Ο απαιτούμενος χρόνος καθορίστηκε σε 15 sec.

Συγκρότημα άλεσης ιπτάμενης τέφρας

Οι μελετητές της ΔΕΗ συνέταξαν στη συνέχεια τις Προδιαγραφές για την κατασκευή του συγκροτήματος άλεσης ιπτάμενης τέφρας, με τη συμβολή ξένων Συμβούλων και πρόσθετων ερευνών.

Μετακαλείται προς τούτο ομάδα Αμερικανών καθηγητών από τους κκ. Ο. Manz και J. Lagouros, οι οποίοι είχαν εξειδικευθεί στη χρήση παρομοίου τύπου τεφρών στο σκυρόδεμα, καθώς και έμπειρα στελέχη τσιμεντοβιομηχανιών του εξωτερικού (Δανοί και Ιταλοί) και παρουσιάζεται σε αυτούς το ευρύ πρόγραμμα καταγραφής των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων της παραγόμενης τέφρας από τον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας, που εκτελέστηκε την περίοδο 1990-1991, με ευθύνη της καθηγήτριας Ι. Παπαγιάννη.

Με το πρόγραμμα αυτό, το οποίο αποτελούσε εξειδικευμένο συμπλήρωμα παλαιότερων ερευνών, διερευνήθηκε η ποιότητα του λιγνίτη και οι λοιπές παράμετροι που επιδρούν στα χαρακτηριστικά

της ιπτάμενης τέφρας, όπως οι συνθήκες στο θάλαμο καύσεως, το φορτίο των Μονάδων, η ποιότητα των φίλτρων, η λεπτότητα άλεσης κλπ.

Στη φάση αυτή διαπιστώθηκαν και αποφασίστηκαν τα παρακάτω:

- Θα πρέπει να απορρίπτεται και να μην υποβάλλεται σε περαιτέρω επεξεργασία, τέφρα με περιεκτικότητα σε $\text{SO}_3 > 7\%$.
- Η καταλληλότερη Μονάδα για τη λήψη της ιπτάμενης τέφρας είναι η Νο 4 της Πτολεμαΐδας, ισχύος 300 MW και χρόνου εγκατάστασης το 1973. Οι άλλες τρεις Μονάδες (Νο1, Νο2 και Νο3) είχαν χρόνους εγκατάστασης το 1959, το 1962 και το 1965 και εγκατεστημένη ισχύ 70 MW, 125 MW και 125 MW αντίστοιχα και παρουσίαζαν συνήθως δυσμενή αποτελέσματα ως προς την ποιότητα της αποδιδόμενης τέφρας, παρόλο που και οι τέσσερις Μονάδες τροφοδοτούντο με την ίδια ποιότητα λιγνίτη. Η διαφοροποίηση αυτή ήταν αποτέλεσμα των συνθηκών καύσεως, του φορτίου της Μονάδας και άλλων ειδικών παραμέτρων που αφορούσαν στο σχεδιασμό εκάστης.
- Η λήψη της τέφρας, κυρίως για τον έλεγχο της περιεκτικότητας σε θείο, θα πρέπει να γίνεται τουλάχιστον 6 ώρες μετά την τυχόν διακοπή και επανεκκίνηση της Μονάδας.
- Απαιτείται έλεγχος και στοιχειώδης ομογενοποίηση της αυλής λιγνίτη, διότι η τροφοδοσία των Μονάδων από διαφορετικά πεδία συχνά επηρέαζε την ποιότητα της τέφρας και δη το περιεχόμενο CaO .

Όλοι οι ξένοι Σύμβουλοι επιβεβαίωσαν την ποιότητα και την αρτιότητα των ερευνών και εγγυήθηκαν την επιτυχία του εγχειρήματος.

Στη φάση αυτή ετέθησαν επίσης τα βασικά κριτήρια ποιοτικού ελέγχου, όπως αναλύονται στη συνέχεια (παράγραφος 4.1), καθώς και η όλη φιλοσοφία σχεδιασμού του συγκροτήματος άλεσης, για την επεξεργασία της ακατέργαστης τέφρας.

Η επεξεργασία στοχεύει στη μείωση του ελεύθερου ασβεστίου (CaO_f) σε ποσοστά μικρότερα του 3%, αφού προηγηθεί επιλογή ακατέργαστης τέφρας με διαθέσιμο ασβέστιο στα όρια από 5% έως 13%.

Το συγκρότημα περιλαμβάνει ένα μύλο κλειστού κυκλώματος, με τρία διαδοχικά διαμερίσματα, εξωτερικών διαστάσεων 2,6X12,0 m, δυναμικότητας 16,7 έως 23 t/h.

Ο μύλος πληρούται κατά το 30% του όγκου του με μεταλλικά σφαιρίδια, με επικρατούσα διάσταση τα 40 mm.

Η εισερχόμενη ακατέργαστη τέφρα εμφανίζει συγκράτηση σε κόσκινο των 45μm της τάξεως του 40% έως 45%.

Η τέφρα διαβρέχεται σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών, ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία της υδρόλυσης ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$) και να εξατμισθεί η περίσσεια νερού.

Οι απαιτήσεις για την επεξεργασμένη τέφρα συνοψίζονται στα εξής:

- Λεπτότητα άλεσης: συγκράτηση σε κόσκινο των 45μm ποσοστού της τάξεως του 20% έως 30%.
- Ποσοστό περιεχόμενου ελεύθερου νερού $\leq 1\%$.
- Ποσοστό περιεχόμενου ελεύθερου ασβεστίου (CaO_f) $\leq 3\%$.

ΔΙΑΓΩΝΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΚΥΡΩΣΗ ΣΥΜΒΑΣΗΣ

Το καλοκαίρι του 1992 η ΔΕΗ διενήργησε διεθνή Διαγωνισμό για την κατασκευή του φράγματος, του Σταθμού Παραγωγής, του συγκροτήματος άλεσης τέφρας στην περιοχή του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας και των λοιπών συναφών εργασιών.

Συμμετείχαν οκτώ έμπειροι Οίκοι του εξωτερικού σε Κ/ξία με μεγάλες Ελληνικές Εταιρείες. Προϋπόθεση συμμετοχής στο Διαγωνισμό ήταν οι έχοντες την εμπειρία, σε αντίστοιχου όγκου φράγμα σκυροδέματος, να κατέχουν το 51% στην Κ/ξία.

Στον υπόψη Διαγωνισμό μειοδότησε η Κοινοπραξία «ΑΕΓΕΚ / HIDROGRADNJA / ASI – RCC», η οποία ήταν σύμπραξη εταιρειών (ελληνική, βοσνιακή και αμερικανική).

Η σύμβαση υπεγράφη τον Οκτώβριο του 1992.

ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΣΥΜΒΑΣΗΣ

Ποιοτικός έλεγχος τέφρας

Η κατασκευαστική Κοινοπραξία εγκατέστησε στο χώρο του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας και σε γειτνίαση με τη θέση εγκατάστασης του συγκροτήματος άλεσης τέφρας, πλήρως εξοπλισμένο Χημείο, στο οποίο εκτελέστηκαν όλοι οι ποιοτικοί έλεγχοι της ακατέργαστης και κατεργασμένης τέφρας. Την ευθύνη λειτουργίας του Χημείου είχαν οι καθηγητές Σταμάτης Τσίμας και Αγγελική Μουτσάτσου.

Ο ποιοτικός έλεγχος του υλικού και η ομογενοποίησή του, προ της εισαγωγής του στο μίγμα σκυροδέματος, περιελάμβανε τέσσερα επί μέρους στάδια:

- Στάδιο 1: Έλεγχος ποιότητας ακατέργαστης τέφρας

Ελέγχονται ανά δίωρο και κατόπιν συνεχούς δειγματοληψίας, τα ποσοστά CaO και SO_3 , προκειμένου να γίνει η αποδοχή της συγκεκριμένης παρτίδας τέφρας.

Η μέτρηση του διατιθέμενου ασβεστίου ($\text{CaO}_{\text{avail}}$) ακολουθεί το πρότυπο EN 451.1, ενώ η μέτρηση του SO_3 επιτυγχάνεται με συσκευή Leco και κυψέλη υπερύθρων (infrared cell - IR).

- Στάδιο 2: Έλεγχος της ικανότητας του μύλου

Ανά δυο ώρες ελέγχεται με συνεχή δειγματοληψία η έξοδος του μύλου και μετράται το διατιθέμενο ασβέστιο ($\text{CaO}_{\text{avail}}$), καθώς και το ελεύθερο (CaO_f), προκειμένου να διαπιστωθεί η δυνατότητα του μύλου να ανταποκριθεί στις προδιαγραφόμενες απαιτήσεις ή στην αντίθετη περίπτωση να γίνει επαύξηση της ποσότητας του εγχυόμενου νερού. Το ελεύθερο ασβέστιο υπολογίζεται έμμεσα, δι' αφαιρέσεως από το συνολικό ασβέστιο της ποσότητας του $\text{Ca}(\text{OH})_2$, το οποίο προσδιορίζεται με τη θερμοσταθμική μέθοδο (Thermal Gravimetric Analysis – TGA).

- Στάδιο 3: Έλεγχος ποιότητας τελικού προϊόντος

Περιλαμβάνει τρία επί μέρους στάδια:

Στάδιο 3.1 Διενεργείται τελικός δειγματοληπτικός έλεγχος του CaO_i , του SO_3 και της υγρασίας κατά τη φάση φόρτωσης των 25τοννων σιλοφόρων. Εάν κάποιο φορτίο σιλοφόρου δεν ανταποκριθεί στα προδιαγραφέντα όρια, απορρίπτεται συνολικά.

Στάδιο 3.2 Γίνονται φυσικοχημικές δοκιμές της κατεργασμένης τέφρας, αντίστοιχες με του τσιμέντου (πρότυπο EN 196.3). Το εξεταζόμενο δείγμα προκύπτει από ανάμειξη δέκα (10) δειγμάτων από αντίστοιχα σιλοφόρα και αντιπροσωπεύει έλεγχο φορτίου 250 t.

Στάδιο 3.3 Γίνεται χημική ανάλυση, σύμφωνα με το πρότυπο EN 196.2, σε δείγμα που προκύπτει από ανάμειξη δέκα (10) δειγμάτων του σταδίου 3.2 (ή σε δείγμα 100 σιλοφόρων). Αυτή η ανάλυση αντιπροσωπεύει φορτίο 2500 t.

- Στάδιο 4: Ομογενοποίηση τέφρας στα σιλό Πλατανόβρυσης

Η επεξεργασμένη ιπτάμενη τέφρα μεταφέρεται με σιλοφόρα από το συγκρότημα άλεσης της τέφρας στην Πτολεμαΐδα και τοποθετείται σε έξι μεταλλικά σιλό των 500 t έκαστο, τοποθετημένα πλησίον της θέσεως διάστρωσης του φράγματος. Δεδομένου ότι η μέση ημερήσια κατανάλωση δεν υπερβαίνει τους 500 t, τα σιλό αυτά εξασφαλίζουν εβδομαδιαία αποθήκευση 3000 t.

Τα έξι αυτά σιλό πέραν του ότι διαθέτουν αυτόματο μηχανισμό ομογενοποίησης της τέφρας κατά την έξοδό της προς το συγκρότημα παραγωγής του κυλινδρούμενου σκυροδέματος, επιπλέον πληρούνται εναλλάξ, μέσω των σιλοφόρων, ώστε να εξασφαλίζεται περαιτέρω βελτίωση της ομογενοποίησης του υλικού.

Ποιοτικός έλεγχος σκυροδεμάτων φράγματος

Η σύνθεση των σκυροδεμάτων του φράγματος, η παραγωγή τους, η διάστρωσή τους και ο εν γένει απαιτούμενος εξοπλισμός για την κατασκευή του φράγματος απέτέλεσε αντικείμενο λεπτομερών προδιαγραφών, οι οποίες έλαβαν υπόψη και τις μετεωρολογικές συνθήκες στη θέση του έργου και κυρίως τις θερμοκρασιακές μεταβολές.

Σημαντική συμβολή στην επιτυχή ολοκλήρωση του έργου είχε και το ΚΕΝΤΡΟ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΤΗΣ ΔΕΗ (ΚΔΕΠ), στο οποίο εκτελέστηκαν πλήθος συμπληρωματικών δοκιμών σκυροδέματος, κυρίως κατά τη φάση κατασκευής του φράγματος, καθώς και οι έμπειροι χημικοί των εργαστηρίων της ΔΕΗ στους θερμικούς σταθμούς της περιοχής Πτολεμαΐδας, οι οποίοι γνώριζαν τη χημική σύσταση και τη συμπεριφορά των διαφόρων λιγνιτικών κοιτασμάτων.

Η διάστρωση του φράγματος ξεκίνησε στις 18.10.1995 και ολοκληρώθηκε στις 10.03.1997, συμπεριλαμβανομένης και 5μηνιαίας διακοπής, λόγω υψηλών θερινών θερμοκρασιών.

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΕΙΣ

Δεν είναι εύκολο να αποτιμηθεί με απλές οικονομικές εκτιμήσεις η επιλογή της ΔΕΗ για την κατασκευή του έργου. Στην παράγραφο 2.1 εδόθησαν σε αδρές γραμμές τα οικονομικοτεχνικά κριτήρια τα οποία επεκράτησαν στη φάση λήψεως των αποφάσεων για την υιοθέτηση των συγκεκριμένων τεχνολογιών.

Εδώ πρέπει να επισημανθεί ότι εάν δεν είχε επιλεγεί από τη ΔΕΗ η λύση του κυλινδρούμενου σκυροδέματος, σε καμία περίπτωση δεν θα αντιμετωπιζέτο ως εναλλακτική λύση κατασκευή φράγματος από συμβατικό σκυρόδεμα.

Όπως προαναφέρθηκε τα φράγματα με συμβατικό σκυρόδεμα είχαν ήδη εγκαταλειφθεί από τη δεκαετία του 1960, ως εξαιρετικά δαπανηρά, χρονοβόρα και με ειδικές απαιτήσεις εξοπλισμού. Αντίθετα το βασικό πλεονέκτημα του κυλινδρούμενου είναι ότι διαστρώνεται απλά και γρήγορα με την τεχνική των χωμάτων φραγμάτων.

Επομένως η εναλλακτική λύση για τη ΔΕΗ θα ήταν οπωσδήποτε η κατασκευή χωμάτινου φράγματος. Στην ίδια περίοδο άλλωστε μελετήθηκε και δημοπρατήθηκε το φράγμα Μεσοχώρας, με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.

Η επισήμανση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, προκειμένου να τονιστεί ότι το φράγμα Πλατανόβρυσης, παρά την αυξημένη χρήση τέφρας, αύξησε παράλληλα και τη χρήση του τσιμέντου και δεν έδρασε ανταγωνιστικά προς τις τσιμεντοβιομηχανίες.

Αναφέρονται στη συνέχεια κάποιες χαρακτηριστικές συμβολαιοποιημένες ποσότητες και τιμές, (Δ' τρίμηνο 1992), σκυροδεμάτων, τέφρας, τσιμέντου, για την κατασκευή του φράγματος, απλώς για συγκριτικούς λόγους.

Πίνακας 2. Οικονομικά στοιχεία

ΥΛΙΚΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ	TIMH ΜΟΝΑΔΑΣ (δρχ)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ TIMH (δρχ)
Τσιμέντο Πόρτλαντ Ι - 45 (t)	29.000	23.000	667.000.000
Άλεση και διακίνηση ιπτάμενης τέφρας (t)	120.000	6.600	792.000.000
Σκυρόδεμα ισοπεδώσεως (m ³)	7.000	3.800	26.600.000
Σκυρόδεμα κυλινδρούμενο (m ³)	465.000	3.650	1.697.250.000
Σκυρόδεμα στοιχείων όψεως (m)	47.800	4.000	191.200.000

Τα λοιπά σκυροδέματα που απαιτήθηκαν για τις άλλες κατασκευές (υδροληψίες, σταθμός παραγωγής, εκχειλιστής σήραγγα, εκκενωτής πυθμένα κλπ.) ανέρχονται σε 205.000 m³, με μέση τιμή 10.000δρχ/ m³. Για την ποσότητα αυτή χρησιμοποιήθηκαν 68.000 (t) Τσιμέντου Πόρτλαντ ΙΙ, με τιμή 14.500δρχ/ t και συνολική τιμή 986.000.000 δρχ.

Επειδή όμως δεν είναι δυνατόν να αποτιμηθούν τα πάντα λογιστικά, κατά την άποψή μας το τολμηρό αυτό εγχείρημα έπρεπε να εξυπηρετήσει δύο βασικούς στόχους της Πολιτείας:

- Την ταχεία κατασκευή φραγμάτων από σκυρόδεμα, με στόχο, πέραν της ενεργειακής αξιοποίησης, τη λειτουργία των έργων αυτών ως έργων πολλαπλής σκοπιμότητας, με ποικίλες δυνατότητες αναβάθμισης της ελληνικής υπαίθρου και αξιοποίησης ανθρώπινου δυναμικού.

Πέραν της κατασκευής φραγμάτων η τεχνολογία του κυλινδρούμενου σκυροδέματος δίδει λύσεις ταχείας και οικονομικής και σε άλλης φύσεως κατασκευές (οδοποιία και ανθεκτικά

οδοστρώματα, αντιστηρίξεις, δάπεδα ειδικών απαιτήσεων, λιμενικά έργα κλπ.), πρακτικές που έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία διεθνώς.

- Την εισαγωγή της τέφρας ως παραπροϊόντος σε διάφορες χρήσεις και κατασκευές και μάλιστα πολύ πιο απλούστερες από την κατασκευή ενός υψηλού φράγματος.

Με την εισαγωγή της συγκεκριμένης τεχνολογίας επιβεβαιώθηκε ότι η τέφρα Πτολεμαΐδας είναι εξαιρετική υδραυλική κονία, με δυνατότητες εύκολης προσαρμογής στις απαιτήσεις και στις ιδιότητες του σκυροδέματος και των κατασκευών για τις οποίες προορίζεται.

Γιατί λοιπόν κανείς από τους στόχους αυτούς δεν έχει μέχρι σήμερα επιτευχθεί;

Οι απαντήσεις δεν είναι μονοσήμαντες, αλλά θα καταβληθεί προσπάθεια να είναι αντικειμενικές.

- Το φράγμα της Πλατανόβρυσης ήρθε να επισφραγίσει την επάρκεια και την ικανότητα μιας κραταιής και πρωτοποριακής διεύθυνσης της ΔΕΗ, της Δ/σης Ανάπτυξης ΥΗΕ, η οποία από το 1975 έως και το 1995 εγκατέστησε 1600 MW μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων, έχοντας την αποκλειστική ευθύνη των μελετών και της επίβλεψης. Η προηγούμενη εικοσαετία (1955-1975) έδωσε 1400 MW μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων, την ευθύνη των οποίων από τη φάση της μελέτης έως και την υλοποίηση είχαν αναλάβει μεγάλοι Οίκοι του εξωτερικού.

Στη συνέχεια ακολούθησαν δύσκολες περίοδοι. Είναι χαρακτηριστικό ότι το έργο του Τεμένους δημοπρατήθηκε το 1997 και δεν κατακυρώθηκε ποτέ, ενώ ο επόμενος Διαγωνισμός που έγινε για κατασκευή φράγματος από τη ΔΕΗ είναι πρόσφατος, το 2003 και αφορά το φράγμα του Ιλαρίωνα στην Κοζάνη.

Μία πρώτη ερμηνεία είναι η ανάγκη εισόδου του φυσικού αερίου στη χώρα και οι διακρατικές δεσμεύσεις οι οποίες αναλήφθηκαν. Με την υποχρέωση της ΔΕΗ να περιλάβει το φυσικό αέριο στην ηλεκτροπαραγωγή, ανεστάλη αντίστοιχα το Πρόγραμμα Ανάπτυξης ΥΗΕ.

- Οι άλλοι δημόσιοι φορείς (ΥΠΕΧΩΔΕ, ΥΠ. ΓΕΩΡΓΙΑΣ), καθώς οι λοιποί φορείς που ανέλαβαν μεγάλες κατασκευές στη χώρα, δεν περιέλαβαν αντίστοιχη τεχνολογία σε έργα της δικής τους ευθύνης, δεδομένης της έλλειψης προδιαγραφών για τη χρήση τέφρας τόσο στο σκυρόδεμα όσο και σε άλλες εφαρμογές και δη οδοποιία και δομικά υλικά.
- Η ίδια η ΔΕΗ δεν έδειξε το αντίστοιχο ενδιαφέρον για την περαιτέρω αξιοποίηση του συγκροτήματος άλεσης τέφρας και της τέφρας εν γένει. Το 1998 δημοσιεύθηκε Πρόσκληση για ανάληψη από ιδιώτες της λειτουργίας του συγκροτήματος, με παράλληλη σύνταξη προδιαγραφών και μελέτης αξιοποίησης, η οποία όμως δεν είχε συνέχεια, παρά το αρχικό ενδιαφέρον που εξεδηλώθη τόσο από τις τσιμεντοβιομηχανίες όσο και από κατασκευαστικές εταιρείες.

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Η κατασκευή του φράγματος Πλατανόβρυσης αποτελεί από παράδειγμα αξιοποίησης παραπροϊόντος και μάλιστα σε εξειδικευμένη χρήση.

Δυστυχώς, μέχρι σήμερα, δεν ελήφθησαν υπόψη από τη ΔΕΗ και την Πολιτεία εν γένει τα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη και οι πόροι οι οποίοι μπορεί να εξοικονομηθούν από την τυποποίηση και την εισαγωγή των τεφρών σε διάφορες παραγωγικές χρήσεις. Οι ευρωπαϊκές χώρες (Γαλλία, Ιταλία, Γερμανία), καθώς και οι ΗΠΑ και ο Καναδάς έχουν ολοκληρώσει ευρύτατα προγράμματα εμπορικής αξιοποίησης των τεφρών και έχουν δημιουργήσει ανθούσες βιομηχανίες.