

Υδραυλικές Κατασκευές – Φράγματα
8ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών



**Εκτίμηση και διαχείριση περιβαλλοντικών
επιπτώσεων φραγμάτων**

Ανδρέας Ευστρατιάδης, Παναγιώτης Παπανικολάου & Σπύρος Μίχας

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2021-22

Φράγματα & ταμιευτήρες: αναπτυξιακά έργα πολλαπλού σκοπού και πολλαπλών επιπτώσεων

- Εξυπηρέτηση πολλαπλών χρήσεων νερού:
 - Καταναλωτικές χρήσεις (ύδρευση, άρδευση)
 - Παραγωγή Υ/Η ενέργειας (συνήθως ενέργεια αιχμής)
 - Αποθήκευση ενέργειας (υβριδικά συστήματα)
 - Αντιπλημμυρική προστασία (πλήρης συγκράτηση συνήθων πλημμυρών, ανάσχεση μεγάλων πλημμυρών)
 - Έμμεσα οφέλη από τουριστική αξιοποίηση
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις στον **κύκλο ζωής των φραγμάτων**:
 - Κατά τη φάση κατασκευής του φράγματος και των συνοδών έργων (ως επί το πλείστον αναστρέψιμες)
 - Κατά τη φάση λειτουργίας (εν μέρει αναστρέψιμες)
 - Μετά τη λήξη της ζωής του έργου; (άγνωστο – απουσία διεθνούς εμπειρίας)
 - Σε περίπτωση αστοχίας του έργου (εξαιρετικά σπάνιο γεγονός, αλλά με μείζονες δυνητικές επιπτώσεις)



Ταμιευτήρας Πλαστήρα: ύδρευση, άρδευση, Υ/Η ενέργεια, τουρισμός



Ταμιευτήρας Μόρνου: ύδρευση



Ταμιευτήρας Πολυφύτου: ύδρευση, άρδευση, Υ/Η ενέργεια, ψύξη ΑΗΣ

Μελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ)

- Στόχος είναι η εξασφάλιση της **περιβαλλοντικής αδειοδότησης** ενός έργου σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία και ο προσδιορισμός ενός **ολοκληρωμένου συστήματος προστασίας του περιβάλλοντος** της περιοχής και η συμβατή ένταξη του έργου στην χωροταξική και περιβαλλοντική δομή και αειφόρο ανάπτυξη της ευρύτερης περιοχής.
- Συντάσσονται για όλα τα δημόσια και ιδιωτικά έργα των οποίων η κατασκευή και η λειτουργία αναμένεται να έχει επιπτώσεις στο περιβάλλον.
- Εφαρμόζονται σε δύο στάδια:
 - Προκαταρκτική Περιβαλλοντική Εκτίμηση & Αξιολόγηση (ΠΠΕΑ) (προαιρετική)
 - ΜΠΕ (υποχρεωτική)
- Νόμος 4014/2011 «Περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων, ρύθμιση αυθαιρέτων σε συνάρτηση με δημιουργία περιβαλλοντικού ισοζυγίου και άλλες διατάξεις αρμοδιότητας Υπουργείου Περιβάλλοντος»
- ΚΥΑ 173829/2014 «Κατάταξη δημόσιων και ιδιωτικών έργων και δραστηριοτήτων σε κατηγορίες και υποκατηγορίες σύμφωνα με το Άρθρο 1 παρ. 4 του Ν. 4014/2011»:
 - Κατάταξη έργων και δραστηριοτήτων σε 12 ομάδες
 - Κατάταξη κάθε έργου σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τις επιπτώσεις:
 - Α: Σημαντικές ή πολύ σημαντικές επιπτώσεις (υποκατηγορίες Α1 και Α2)
 - Β: Τοπικές ή μη σημαντικές επιπτώσεις

Ολοκλήρωση περιβαλλοντικής αδειοδότησης

- ❑ Η ΜΠΕ δημοσιοποιείται και ολοκληρώνεται η διαδικασία διαβούλευσης επί αυτής και η αρμόδια περιβαλλοντική αρχή συντάσσει την **Απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ)** ή την απόφαση απόρριψης.
- ❑ Αν το προτεινόμενο έργο ή δράση βρίσκεται εντός περιοχής Natura 2000, συντάσσεται επιπλέον **Ειδική Οικολογική Αξιολόγηση (ΕΟΑ)**, που αποτελεί παράρτημα της ΜΠΕ.
- ❑ Ο αρμόδιος για την έκδοση της Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ) φορέας διαφέρει ανάλογα με την Κατηγορία/Υποκατηγορία στην οποία ανήκει το έργο:
 - Κατηγορία Α1: Διεύθυνση Περιβαλλοντικής Αδειοδότησης, Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας
 - Κατηγορία Α2: Αποκεντρωμένη Διοίκηση
- ❑ Προβλέπει συγκεκριμένη διάρκεια ισχύος και διαδικασία ανανέωσης.
- ❑ Περιλαμβάνει αυστηρές και συγκεκριμένες προβλέψεις για την **κατασκευή** και τη **λειτουργία** του έργου, όπως έχουν προκύψει κατά τη διαδικασία εκπόνησης της ΜΠΕ (Κεφάλαιο 7: *Όροι, μέτρα και περιορισμοί που πρέπει να λαμβάνονται για την ελαχιστοποίηση και την αντιμετώπιση των δυνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων*)
- ❑ Αποτελεί **δεσμευτικό έγγραφο για όλη τη διάρκεια ζωής του έργου**.
- ❑ Αντικαθίσταται από άλλη αντίστοιχη απόφαση μετά από σχετικό αίτημα (ανανέωσης, τροποποίησης, κλπ).

Γενικό θεσμικό πλαίσιο υδάτων: Οδηγία 2000/60/ΕΚ

- ❑ Η Οδηγία-Πλαίσιο 60/2000/ΕΚ για τη Διαχείριση των Υδατικών Πόρων (αναφέρεται και ως Water Framework Directive, WFD) αποτελεί μια προσπάθεια των κρατών μελών της ΕΕ για την κοινή αναφορά ως προς την κατάσταση των υδάτων της.
- ❑ Διαχειριστική μονάδα: Λεκάνη Απορροής Ποταμού (ΛΑΠ)
- ❑ Κατηγοριοποίηση υδατικών συστημάτων:
 - Υδάτινο σώμα (ΥΣ): ποτάμιο, μεταβατικό, παράκτιο και υπόγειο
 - Τεχνητό ΥΣ και Ιδιαίτερος Τροποποιημένο ΥΣ
- ❑ Εισάγει σειρά περιβαλλοντικών κριτηρίων που θέτουν στόχους για τα ΥΣ, που είναι:
 - Καλή οικολογική και χημική κατάσταση για τα επιφανειακά ΥΣ
 - Καλή χημική και ποσοτική κατάσταση για τα υπόγεια ΥΣ
- ❑ Η διατήρηση ή επίτευξη της καλής κατάστασης για κάθε ΥΣ ακολουθεί συγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα, με βάση τα ακόλουθα κριτήρια αξιολόγησης:
 - **Οικολογική κατάσταση:** Βιολογικές, φυσικοχημικές και υδρομορφολογικές παράμετροι, συγκεκριμένοι – εθνικοί ρύποι
 - **Χημική κατάσταση:** Πρότυπα Περιβαλλοντικής Ποιότητας (άρθρο 16, παρ. 7).
- ❑ Για τα ΙΤΥΣ, αναγνωρίζεται ότι η επίτευξη των στόχων καλής κατάστασης ενδέχεται να επηρεάσει τις ανθρώπινες δραστηριότητες, με ισχυρό αντίκτυπο στην οικονομική και κοινωνική ζωή, επιτρέποντας τις υπό όρους «εξαιρέσεις» (άρθρο 4, παρ. 7).

Φράγματα και Οδηγία 2000/60/ΕΚ

- Τα φράγματα, κατά τον ορισμό της Οδηγίας δημιουργούν **ιδιαιτέρως τροποποιημένα υδατικά συστήματα** (ΙΤΥΣ), αφού αλλοιώνουν ένα ήδη υπάρχον.
- Σε ότι αφορά τα ΙΤΥΣ, αναγνωρίζεται ότι η επίτευξη των στόχων καλής κατάστασης ενδέχεται να επηρεάσουν μια σειρά ανθρώπινες δραστηριότητες με ισχυρό αντίκτυπο στην οικονομική και κοινωνική ζωή, επιτρέποντας τις υπό όρους **εξαιρέσεις**:
 - Λαμβάνονται όλα τα πρακτικώς εφικτά μέτρα μετριασμού των επιπτώσεων;
 - Εκτίθεται η αιτιολογία στο ΣΔ;
 - Οι τροποποιήσεις υπαγορεύονται επιτακτικά από το δημόσιο συμφέρον;
 - Οι ευεργετικοί στόχοι που εξυπηρετούν δεν μπορούν να επιτευχθούν με άλλα μέσα που αποτελούν καλύτερη περιβαλλοντική επιλογή;
- Εισάγεται επίσης η έννοια του **καλού οικολογικού δυναμικού** (αντί της κατάστασης) για τα ΤΥΣ/ΙΤΥΣ.
- Για τα υφιστάμενα φράγματα:
 - Εφαρμόζεται η διαδικασία καθορισμού των ΤΥΣ/ΙΤΥΣ και των εξαιρέσεων
 - Εξετάζονται οι προϋποθέσεις της παρ. 7 του άρθρου 4 της Οδηγίας
- Για τα νέα φράγματα:
 - Εξετάζονται οι επιπτώσεις από τη δημιουργία ενός ΙΤΥΣ
 - Εξετάζονται οι προϋποθέσεις της παρ. 7 του άρθρου 4 της Οδηγίας.

ΠΕ φραγμάτων: Αλλοιώσεις κατά την κατασκευή

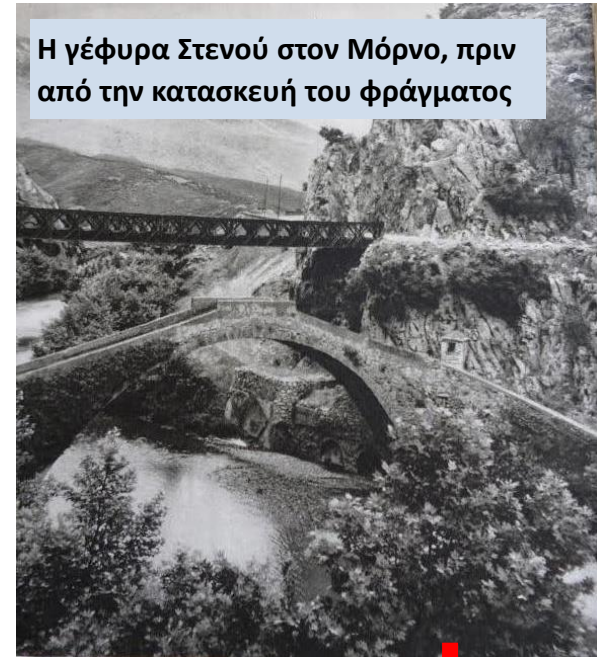
- Έργο πολύ μεγάλης κλίμακας, μεγάλες αλλοιώσεις στο ανάγλυφο:
 - Προσωρινή εκτροπή ποταμού
 - Εκσκαφές
 - Υλικά κατασκευής (ανάλογα με τον τύπο του φράγματος)
 - Εργοτάξια
 - Μονάδες παραγωγής σκυροδέματος
 - Προσπελάσεις – διάνοιξη δρόμων για μεταφορά υλικών και διέλευση πολύ μεγάλων οχημάτων
 - Έντονες οχλήσεις (θόρυβος, σκόνη)
- Μετριασμός - αποκατάσταση
 - Χρήση υλικών κατά προτεραιότητα από την περιοχή κατάκλυσης
 - Αποκατάσταση λατομείων
 - Ανάπτυξη οδικού δικτύου (σε κατά κανόνα ορεινές δύσβατες περιοχές)



ΠΕ φραγμάτων: Μετατροπή ποτάμιου υδατικού συστήματος σε λιμναίο

- Ανάντη του φράγματος δημιουργείται ταμιευτήρας με **μεγάλο βάθος** και κατά κανόνα **μεγάλες διακυμάνσεις της στάθμης** (αντίθετα με τις φυσικές λίμνες).
- Αλλαγές στην ταχύτητα (στάσιμο νερό vs. τρεχούμενο)
- Αλλαγές στη **θερμοκρασία** του νερού:
 - Μικρότερες εποχιακές διακυμάνσεις
 - Διαμόρφωση ζωνών πολύ υψηλής (επιφάνεια) και πολύ χαμηλής (πυθμένας) θερμοκρασίας
 - Εκροή νερού χαμηλής θερμοκρασίας
- Υποβάθμιση χημικής κατάστασης:
 - **Μειωμένη συγκέντρωση DO**, λόγω της παρουσίας υψηλού οργανικού φορτίου
 - **Ευτροφισμός**, λόγω της σήψης των δένδρων που παρέμειναν εντός της λεκάνης κατάκλυσης (π.χ., ταμιευτήρας Πλαστήρα)
 - **Αντιμετώπιση: πλήρης αποξήλωση χλωρίδας** στην περιοχή που πρόκειται να κατακλυστεί

Η γέφυρα Στενού στον Μόρνο, πριν από την κατασκευή του φράγματος



ΠΕ φραγμάτων: (μικρο)κλίμα, χλωρίδα, πανίδα

- **Αλλαγή στο μικροκλίμα** της γύρω περιοχής, λόγω αυξημένης υγρασίας:
 - Προφανής (αλλά μικρή) αύξηση εξάτμισης, ενδεχόμενη αύξηση καταιγίδων
 - Συχνά δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή στατιστικά συμπεράσματα
- **Αύξηση εκπομπών CO₂**, λόγω της αυξημένης παρουσίας οργανικού φορτίου (σήψη παραμένουσας βλάστησης και επιπλέοντος οργανικού υλικού, π.χ. κορμοί, φύλλα, κ.ά.).
- Επίδραση στην **πανίδα**:
 - Κατάκλυση ενδιαιτημάτων και εγκάρσιων διαδρομών (κυρίως για τα μεγάλα ζώα)
 - Παρεμπόδιση (ολική!) μετανάστευσης ψαριών
 - **Αντιμετώπιση**: κατασκευή **ιχθυοδρόμων** (fish ladders) και άλλων μέσων διέλευσης των ψαριών, αμφίβολης αποτελεσματικότητας, συνήθως σε έργα χαμηλού ύψους (στα ΜΥΗΕ επιβάλλονται από τη νομοθεσία)
- Επίδραση στη **χλωρίδα**:
 - Απώλεια βλάστησης, συχνά δασικής
 - Διαμόρφωση νεκρής ζώνης, λόγω των έντονων διακυμάνσεων της στάθμης
- Η διεθνής εμπειρία περιλαμβάνει και πληθώρα περιπτώσεων **αύξησης της βιοποικιλότητας**, ως αποτέλεσμα της διαμόρφωσης λιμναίου τοπίου.



Παραδείγματα ιχθυοδρόμων



ΠΕ φραγμάτων: Αλλαγή στο καθεστώς της ροής

- Η δημιουργία ταμιευτήρα αποσκοπεί στην **αναρρύθμιση της φυσικής ροής του ποταμού**, ώστε να εξυπηρετούνται οι προβλεπόμενες **χρήσεις νερού**, καταναλωτικές και μη, με υψηλή **αξιοπιστία** (σχέση χωρητικότητας-ζήτησης-αξιοπιστίας).
- Οι αλλαγές στην υδρολογική δίαιτα αφορούν:
 - στον διαφορετικό χρονισμό των εκροών σε σχέση με τις εισροές (υψηλές ζητήσεις την ξηρή περίοδο, περιοδικές εκροές νερού στα μεγάλα Υ/Η έργα - **hydropeaking**)
 - στην μείωση της διαθέσιμης ποσότητας νερού κατάντη (απολήψεις)
- Η μορφή και βαρύτητα των επιπτώσεων εξαρτάται από τον **τύπο του έργου**:
 - Έργα **μηδενικής ή πολύ μικρής χωρητικότητας**, που δεν διαταράσσουν το φυσικό καθεστώς ροής (π.χ. φράγματα ημερήσιας ρύθμισης, ΜΥΗΕ)
 - Έργα **χρονικής αναρρύθμισης** της απορροής (π.χ. αντιπλημμυρικά, μεγάλα ΥΗΕ)
 - Έργα **μερικής εκτροπής**, στα οποία απάγεται μέρος της απορροής, ενώ το υπόλοιπο επιστρέφει κατάντη (συνήθως ΥΗΕ που εξυπηρετούν και άλλες χρήσεις)
 - Έργα **προσωρινής εκτροπής**, π.χ. ΥΗΣ σε μεγάλη απόσταση από το φράγμα, ΜΥΗΕ
 - Έργα **πλήρους εκτροπής**, που απάγουν το σύνολο της απορροής για χρήσεις εκτός της κατάντη κοίτης (δεν υπάρχει δυνατότητα ελεγχόμενης εκροής, παρά μόνο μη ελεγχόμενη διοχέτευση πλεονάζοντος νερού μέσω του υπερχειλιστή)
- **Αντιμετώπιση**: οικολογική παροχή, τεχνητές πλημμύρες (αλλά με **επιπτώσεις στην αξιοποίηση του υδατικού δυναμικού**)

ΠΕ φραγμάτων: Διακοπή συνέχειας ποταμού (river connectivity) από φράγματα και εκτροπές σε σειρά

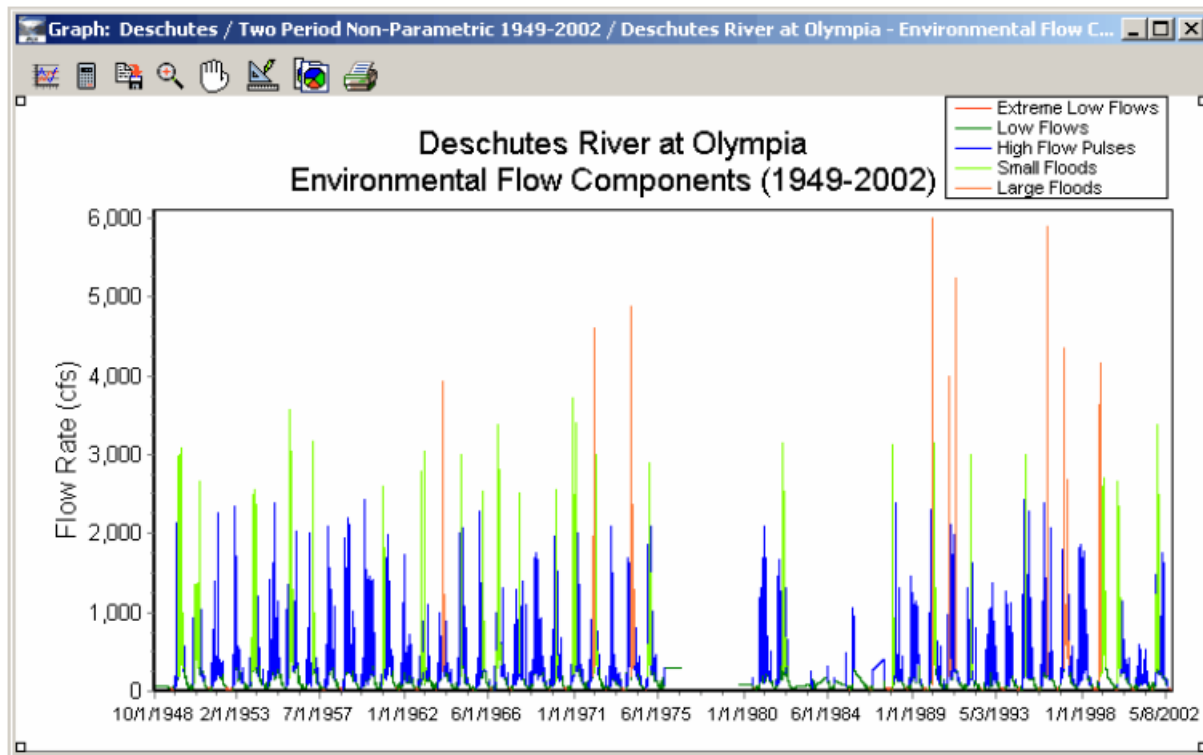


- Η κατασκευή φραγμάτων σε σειρά έχει πολλαπλά τεχνικά πλεονεκτήματα, όπως:
 - αποθήκευση πλεοναζόντων υδάτων και υπερχειλίσεων σε κατάντη ταμιευτήρες (ή και ανάντη, μέσω άντλησης)
 - αξιοποίηση διαδοχικών υδατοπτώσεων
 - δραστική ανάσχεση πλημμυρών
 - δραστική ανάσχεση στερεοαπορροής (συγκράτηση στον ανάντη ταμιευτήρα)
- Προφανής η όξυνση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε όλες τις πτυχές τους, ιδιαίτερα όταν τα έργα αναπτύσσονται σε μικρή απόσταση.
- Αμφισβητείται πλέον η σκοπιμότητα κατασκευής πολλών «μικρών» και «φιλοπεριβαλλοντικών» έργων σε σειρά έναντι ενός «μεγάλου».

Διάκριση τύπων ροής και οικολογική τους σημασία

- ❑ **Χαμηλές ροές:** Τα εποχιακά επίπεδα της βασικής ροής καθορίζουν το διαθέσιμο υδατικό ενδιαίτημα για το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου, που επιδρά δραστικά στη βιοποικιλότητα και το πλήθος των οργανισμών που μπορούν να ζήσουν στο ποτάμι.
- ❑ **Ακραία χαμηλές ροές** (εμφανίζονται σε περιόδους ξηρασίας): Αν και δημιουργούν ισχυρή πίεση στους περισσότερους οργανισμούς, παρέχουν τις αναγκαίες συνθήκες διαβίωσης σε ορισμένα είδη, χάρη στην αποστράγγιση των χαμηλών πεδινών περιοχών που επιτρέπει την αναγέννηση συγκεκριμένων τύπων χλωρίδας.
- ❑ **Παλμοί υψηλών ροών** (άνοδος στάθμης όχι πέραν της συνήθους κοίτης): Παρέχουν σε ψάρια και άλλα ευκίνητα πλάσματα αυξημένη πρόσβαση σε ανάντη περιοχές, και διανέμουν πολύτιμες θρεπτικές ουσίες από οργανικά υλικά ή άλλες τροφές που ενισχύουν τη διαθέσιμη τροφή για τα υδατικά οικοσυστήματα.
- ❑ **Μικρές πλημμύρες:** Τα ψάρια και άλλοι οργανισμοί μπορούν να μετακινηθούν ανάντη και κατάντη της ροής, καθώς και πλευρικά (σε πλημμυροπεδιάδες και πλημμυρισμένα έλη), και μπορούν ακόμη να προσεγγίσουν επιπρόσθετα ενδιαιτήματα, όπως δευτερεύοντα ρέματα, στάσιμα νερά, βάλτους και ρηχές πλημμυρισμένες εκτάσεις.
- ❑ **Μεγάλες πλημμύρες:** Αναδιαμορφώνουν, μέσω της μεταφοράς σημαντικών ποσοτήτων φερτών υλών, την φυσική και βιολογική δομή του ποταμού και των πλημμυροπεδιάδων, και είναι επίσης αναγκαίες για τη διαμόρφωση καθοριστικών ενδιαιτημάτων, όπως μαϊάνδροι, νησίδες και βαλτότοποι.

Παράδειγμα διάκρισης τύπων ροής



Παραδοσιακή θεώρηση



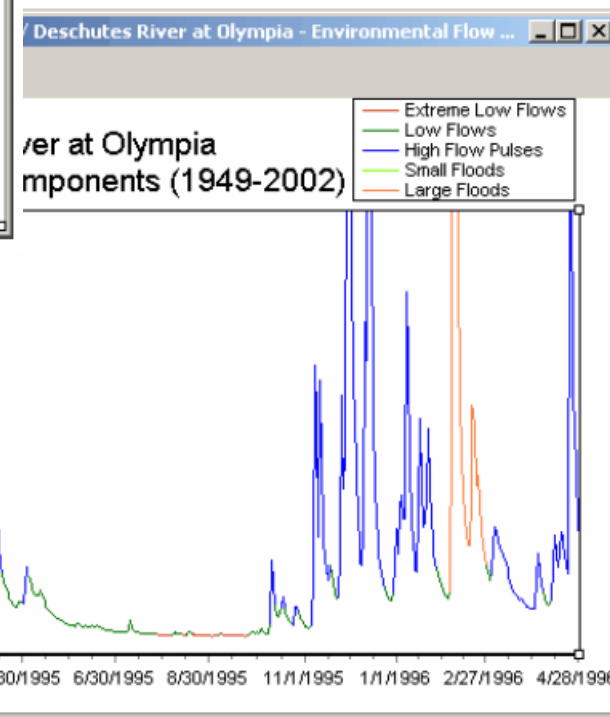
Παροχή ξηρής περιόδου

Πηγή: The Nature Conservancy (2009)

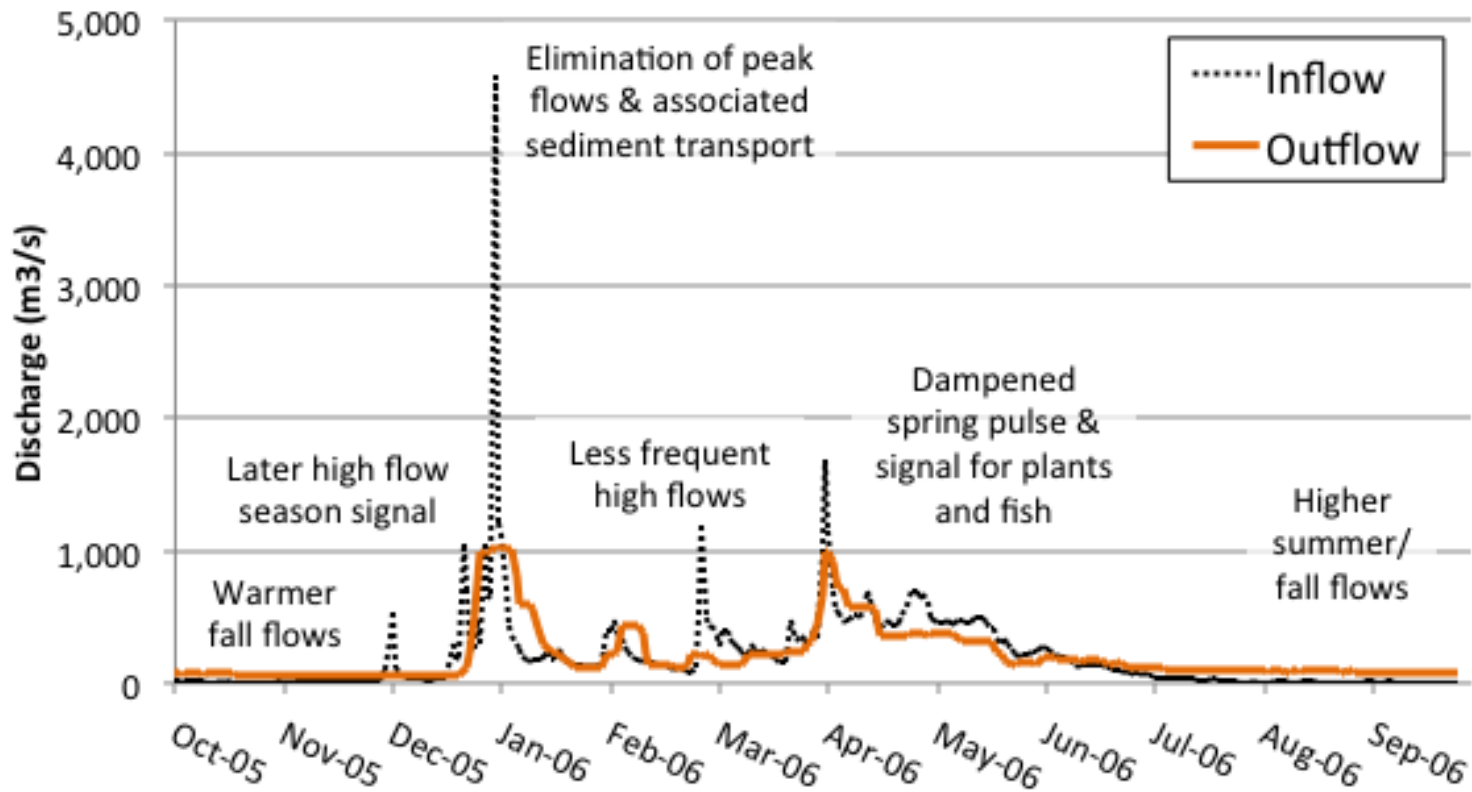
Σύγχρονη θεώρηση



Πλήρες καθεστώς ροής



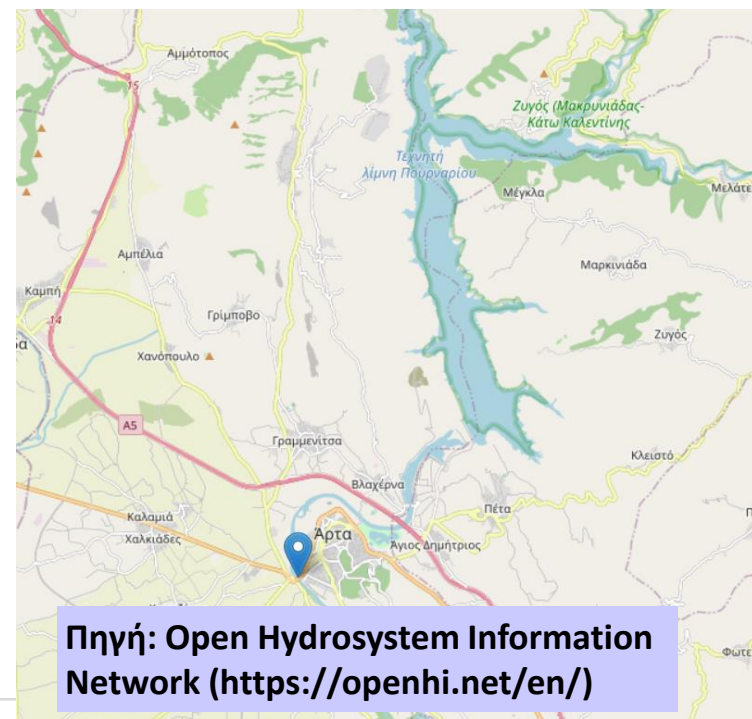
Παράδειγμα τροποποίησης υδρολογικής διαίτας και συναφών περιβαλλοντικών επιπτώσεων: υδροηλεκτρικό φράγμα Folsom, Καλιφόρνια



Πηγή: <http://rivers.bee.oregonstate.edu/book/export/html/33>

Παράδειγμα αλλοίωσης της υδρολογικής δίαιτας για παραγωγή ενέργειας αιχμής: φράγμα Πουρναρίου, Άρτα

- Η λειτουργία των μεγάλων ΥΗΕ ως έργων αιχμής επιβάλλει την διαλείπουσα λειτουργία των στροβίλων, με απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων νερού ορισμένες ώρες της ημέρας.



Η έννοια των περιβαλλοντικών ροών

- Η υγεία και βιωσιμότητα των **ποτάμιων οικοσυστημάτων** εξαρτάται από πολλαπλούς παράγοντες, όπως το καθεστώς ροής, τα υδραυλικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κύριας κοίτης και της παρόχθιας ζώνης, την ύπαρξη φυσικών ή τεχνητών φραγμών στη συνέχεια του ποταμού, την πραγματοποίηση απολήψεων, κτλ.
- Η θεωρητική ζήτηση νερού των ποτάμιων οικοσυστημάτων είναι συναφής με την έννοια των **περιβαλλοντικών ροών** (environmental flows), για την οποία δίνονται διάφοροι ορισμοί, όπως:
 - «η εκτίμηση της ποσότητας νερού που πρέπει να συνεχίσει να ρέει στο ποτάμι και στις πλημμυροπεδιάδες του ώστε να διατηρούνται προσδιορισμένα ποσοτικά χαρακτηριστικά του οικοσυστήματος» (Tharme, 2003)
 - «η ποσότητα, ποιότητα και χρονισμός των ροών που απαιτούνται για τη διατήρηση των ποτάμιων και παρόχθιων οικοσυστημάτων και των ζωτικών ανθρώπινων αναγκών και ευημερίας που εξαρτώνται από αυτές» (Brisbane Declaration, 2007)
 - «η ποσότητα νερού που απαιτούν τα υδατικά οικοσυστήματα ώστε να συνεχίσουν να ευδοκιμούν και να περέχουν τις προβλεπόμενες υπηρεσίες τους» (CIS Guidance Document No 31, 2015).
- Οι περιβαλλοντικές ροές αναφέρονται σε **τροποποιημένα ποτάμια**, και επιδιώκουν να μιμηθούν το πρότυπο και να εξασφαλίσουν τα οικολογικά οφέλη του φυσικού καθεστώτος ροής, χωρίς βεβαίως να αναπαράγουν την πλήρη μεταβλητότητα της.

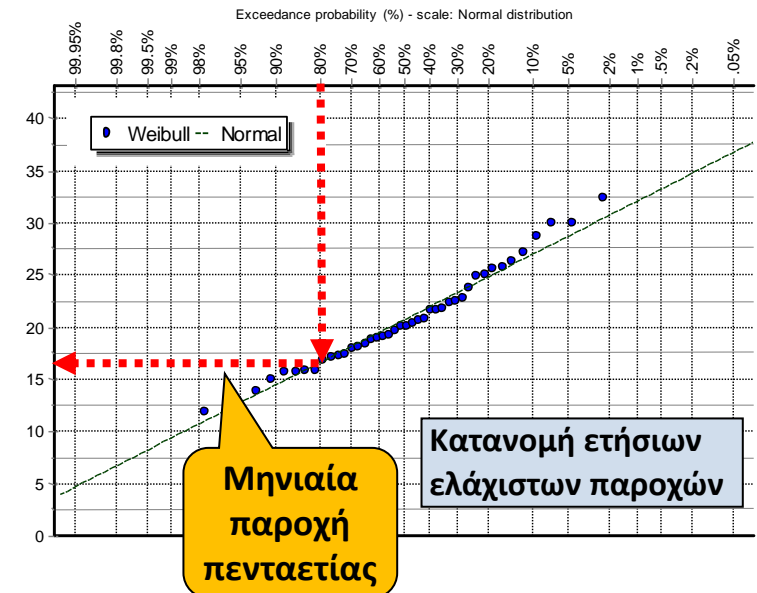
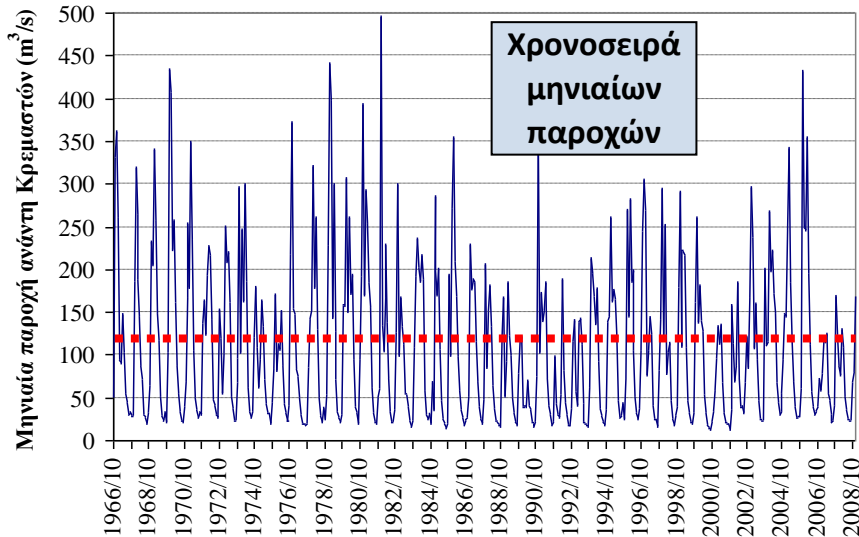
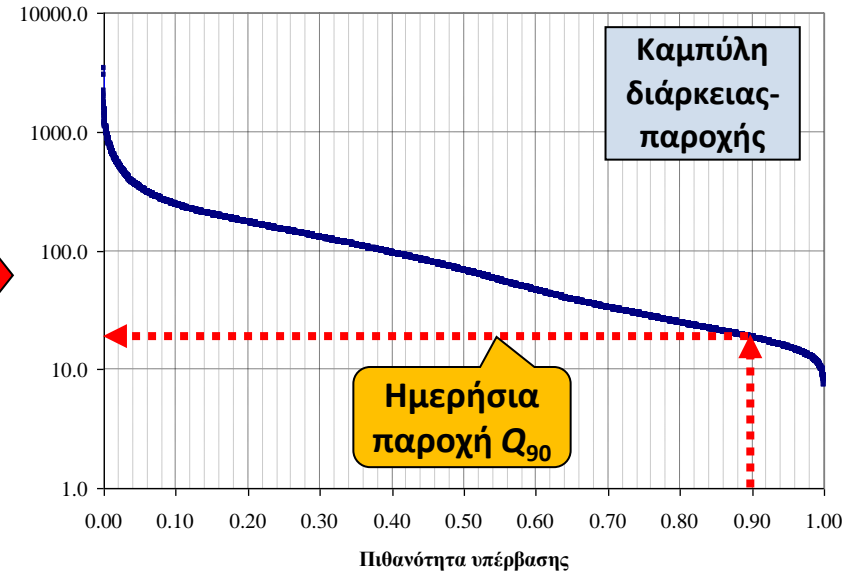
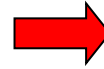
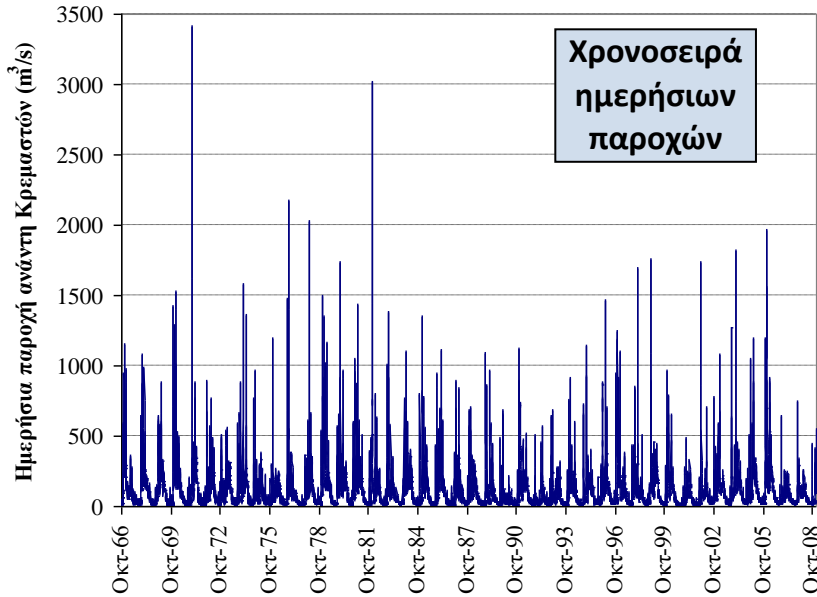
Εκτίμηση οικολογικής παροχής κατάντη φραγμάτων

- Η **οικολογική παροχή** (αναφέρεται και ως **παροχή περιβαλλοντικής διατήρησης** ή **ελάχιστη διατηρητέα παροχή**) είναι βασική συνιστώσα των περιβαλλοντικών μέτρων λειτουργίας ταμιευτήρων, και ορίζεται ως η διατήρηση μιας ελάχιστης συνεχούς ροής κατάντη του φράγματος (σταθερής ή εποχιακά μεταβαλλόμενης).
- Οι μέθοδοι εκτίμησης εντάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες:
 - **Υδρολογικές:** Χρησιμοποιούν υδρολογικά δεδομένα (χρονοσειρές παροχής, σε διάφορες χρονικές κλίμακες), με το σκεπτικό ότι η παροχή αποτελεί την ουσιώδη πληροφορία που επηρεάζει όλες τις ποτάμιες διεργασίες.
 - **Υδραυλικές:** Χρησιμοποιούν υδραυλικά, μορφολογικά και γεωμετρικά μεγέθη σε κρίσιμες διατομές κατά μήκος του ποτάμιου συστήματος, που θεωρείται ότι σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα ενδιαιτημάτων τυπικών ειδών.
 - **Προσομοίωσης ενδιαιτημάτων:** Χρησιμοποιούν υδρολογικά, υδραυλικά και βιολογικά δεδομένα καθώς και μαθηματικά μοντέλα που αναπαριστούν τη συμπεριφορά επιλεγμένων ποτάμιων οργανισμών (συνήθως κάποιων ειδών ψαριών), για διάφορες συνθήκες ροής.
 - **Ολιστικές:** Συνδυάζουν πολλαπλές πηγές δεδομένων και διεπιστημονικές προσεγγίσεις για την κατάρτιση βιώσιμων διαχειριστικών πολιτικών.
- Σε αναλύσεις υφιστάμενων φραγμάτων θεωρούνται τα φυσικοποιημένα μεγέθη παροχών, που αναφέρονται στις συνθήκες ροής πριν την κατασκευή των έργων.

Απλές υδρολογικές (στατιστικές) μέθοδοι

- ❑ Βασίζονται σε τυπικούς στατιστικούς δείκτες, όπως **ποσοστά της μέσης ετήσιας παροχής (MAF)** ή χαρακτηριστικά **ποσοστημόρια ημερήσιας παροχής**, τα οποία αντιστοιχούν σε υψηλές πιθανότητες υπέρβασης.
- ❑ Οι παραπάνω στατιστικοί δείκτες χρησιμοποιούνται για την θέσπιση μιας **συνεχούς οικολογικής παροχής** κατάντη φραγμάτων.
- ❑ Σύμφωνα με τη Γαλλική Αλιευτική Νομοθεσία (French Freshwater Fishing Law, 1984), η οικολογική παροχή ορίζεται ως το 2.5 και 10% της MAF, για υφιστάμενα και νέα σχήματα έργων, αντίστοιχα. Στην Ισπανία γενικά εφαρμόζεται το ποσοστό 10%, ενώ στην Πορτογαλία το εν λόγω ποσοστό κυμαίνεται από 2.5 έως 5%.
- ❑ Ακριβέστερες εκτιμήσεις προκύπτουν από τη μελέτη της δίαιτας των παροχών στην ημερήσια κλίμακα, με χρήση **καμπυλών διάρκειας-παροχών**, για την κατάρτιση των οποίων απαιτούνται συνεχή δεδομένα ημερήσιων παροχών για τουλάχιστον δέκα έτη.
- ❑ Στη Μ. Βρετανία (και την Αυστραλία), ως οικολογική παροχή έχει θεσπιστεί η Q_{95} , που αντιστοιχεί στη ροή που είναι διαθέσιμη το 95% του χρόνου. Άλλες χώρες εφαρμόζουν πιο συντηρητικά όρια, π.χ. Q_{90} (Καναδάς, Βραζιλία), ενώ σε ορισμένες περιοχές τα όρια είναι πολύ πιο χαμηλά, όπως η παροχή της ξηρότερης μέρας του έτους (Q_{364}).
- ❑ Σε μελέτες φραγμάτων στην Ελλάδα συχνά λαμβάνεται η **μέση παροχή του ξηρότερου μήνα** ή η ελάχιστη παροχή μιας χαμηλής περιόδου επαναφοράς (π.χ. 5 ετών), που εκτιμώνται μέσω στατιστικής ανάλυσης των μηνιαίων χρονοσειρών παροχών.

Παράδειγμα εφαρμογής υδρολογικών μεθόδων



Η μέθοδος Tennant

- Η μέθοδος Tennant ή Montana (Tennant, 1976) είναι η πρώτη που εισήγαγε, έστω και έμμεσα, την έννοια της **εποχιακά μεταβαλλόμενης παροχής**, ορίζοντας κρίσιμα ποσοστά της μέσης ετήσιας παροχής για την υγρή και ξηρή περίοδο του έτους, που συνδέονται με την **οικολογικές συνθήκες** του ποταμού (βλ. πίνακα).
- Σε αντίθεση με τις εμπειρικές υδρολογικές προσεγγίσεις, τα ποσοστά αυτά προέκυψαν με βάση μακροχρόνιες παρατηρήσεις της δίαιτας των πληθυσμών επιλεγμένων ψαριών σε ποτάμια των ΗΠΑ, και της συσχέτισής τους με τις υδρολογικές συνθήκες.
- Η επίτευξη «καλών» οικολογικών συνθηκών επιτυγχάνεται με τη διατήρηση του 20% της μέσης ετήσιας παροχής κατά την ξηρή περίοδο και του 40% κατά την υγρή.
- Το 10% της μέσης ετήσιας παροχής σε όλη τη διάρκεια του έτους αντιστοιχεί σε «φτωχές» ή «ελάχιστα αποδεκτές» συνθήκες, ενώ κάτω από αυτό το όριο το ποτάμιο σύστημα θεωρείται ότι εισέρχεται σε συνθήκες σοβαρής υποβάθμισης.

Πίνακας: Κρίσιμες τιμές παροχής ξηρής και υγρής περιόδου (ως ποσοστά της μέσης ετήσιας παροχής) και συσχέτισή τους με την κατάσταση των ενδιαιτημάτων κατά Tennant (1976)

Περιγραφή συνθηκών	Ξηρή περίοδος	Υγρή περίοδος
Εξαιρετικές (outstanding)	40%	60%
Πολύ καλές (excellent)	30%	50%
Καλές (good)	20%	40%
Μέτριες, προς υποβάθμιση (fair or degrading)	10%	30%
Φτωχές ή οριακά αποδεκτές (poor or minimum)	10%	10%
Σοβαρή υποβάθμιση (severe degradation)	<10%	<10%

Μέθοδος Βασικής Ροής (Basic Flow Method, BFM)

- Αναπτύχθηκε στην Ισπανία, αρχικά για τη λεκάνη του ποταμού Ebro, αλλά έχει εφαρμοστεί και σε άλλες περιοχές (Palau and Alcázar, 1996, 2012).
- Η μέθοδος ορίζει μια **βασική ροή αναφοράς**, Q_b , που αποτελεί το απολύτως ελάχιστο αποδεκτό όριο για τη διατήρηση του οικοσυστήματος, και στην απλούστερη περίπτωση εκτιμάται ως μέσος όρος των ελάχιστων ημερήσιων τιμών κάθε έτους.
- Γενικότερα, η εκτίμηση της Q_b βασίζεται σε ανάλυση των κινούμενων μέσων όρων της χρονοσειράς ημερήσιων παροχών κάθε **υδροβιολογικού έτους**, για χρονικές κλίμακες από μία έως 100 ημέρες (το υδροβιολογικό έτος θεωρείται ότι ξεκινά την 1η Απριλίου).
- Για κάθε μήνα ορίζεται ο αντίστοιχος στόχος ελάχιστης περιβαλλοντικής παροχής, που εκτιμάται προσαυξάνοντας την Q_b με βάση ένα μέτρο μεταβλητότητας, ως εξής:

$$BMF = Q_b (Q_m / Q_{min})^{1/2}$$

όπου Q_m και Q_{min} η μέση και ελάχιστη παροχή του μήνα, αντίστοιχα.

- Εκτός της οικολογικής παροχής, προσδιορίζονται δύο ακόμη κρίσιμες τιμές-στόχοι, για την υλοποίηση **τεχνητών πλημμυρών**:
 - η **ροή πλήρωσης** (bankfull flow), που αντιπροσωπεύει την κυρίαρχη παροχή του ποταμού σε συνθήκες δυναμικής ισορροπίας, και εκτιμάται ως η πλημμυρική παροχή περιόδου επαναφοράς 1.5 έως 2.5 ετών
 - η **μέγιστη ροή** (maximum flow), που εκτιμάται ως η πλημμυρική παροχή 25 ετών.

Μέθοδος ανάλυσης εύρους μεταβλητότητας (Range of Variability Analysis, RVA)

- Η μέθοδος RVA χρησιμοποιεί τους λεγόμενους **δείκτες υδρολογικής τροποποίησης** (Indicators of Hydrologic Alteration) για την αποτίμηση του βαθμού τροποποίησης των υδάτινων σωμάτων (ποταμοί και λίμνες) εξαιτίας των ανθρωπογενών επεμβάσεων σε αυτά (Richter *et al.*, 1996, 1997, 1998· βλ. και Poff *et al.*, 1997).
- Οι δείκτες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:
 - 33 στατιστικές παράμετροι του καθεστώτος ροής, που αναφέρονται στις μέσες μηνιαίες τιμές παροχής, τα ποσοτικά και χρονικά μεγέθη των ακραίων ροών, τη συχνότητα και διάρκεια των υψηλών και χαμηλών παλμών, και στον ρυθμό και συχνότητα αλλαγής του καθεστώτος ροής.
 - 34 παράμετροι για το χαρακτηρισμό των τύπων ροής, που καλούνται **συνιστώσες περιβαλλοντικών ροών** (Environmental Flow Components, EFC).
- Για τον υπολογισμό των $33 + 34 = 67$ παραμέτρων χρησιμοποιείται εξειδικευμένο λογισμικό, που έχει αναπτυχθεί από τη Nature Conservancy των ΗΠΑ (ελεύθερα διαθέσιμο στην ιστοσελίδα <http://www.conservationgateway.org>).
- Ο αριθμός των δεικτών που τελικά αξιοποιούνται στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών ροών μπορεί να περιοριστεί, προσδιορίζοντας ένα σύνολο κατάλληλων και απολύτως αναγκαίων δεικτών (Olden and Poff, 2003), όπως για παράδειγμα στη Μεγάλη Βρετανία (UK TAG, 2008· Acreman *et al.*, 2009).

Οικολογική ερμηνεία δεικτών ΙΗΑ

Ομάδα δεικτών - στατιστική ερμηνεία	Επιδράσεις στο οικοσύστημα
<p>Μηνιαία ποσοτικά μεγέθη απορροής (12 δείκτες) Μέση μηνιαία παροχή (ή διάμεσος)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Διαθεσιμότητα ενδαιτημάτων για υδρόβιους οργανισμούς • Διαθεσιμότητα υγρασίας για παρόχθια βλάστηση • Διαθεσιμότητα και αξιοπιστία πόσιμου νερού για την πανίδα • Διαθεσιμότητα τροφής για γουνοφόρα θηλαστικά • Πρόσβαση αρπαχτικών σε φωλιές • Επίδραση στη θερμοκρασία του νερού, τα επίπεδα οξυγόνου και τη φωτοσύνθεση
<p>Ποσοτικά μεγέθη και διάρκεια ακραίων ροών (12 δείκτες)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ελάχιστη παροχή (κινούμενοι μέσοι όροι) σε χρονικές κλίμακες 1, 3, 7, 30 και 90 ημερών • Μέγιστη παροχή (κινούμενοι μέσοι όροι) σε χρονικές κλίμακες 1, 3, 7, 30 και 90 ημερών • Πλήθος ημερών με μηδενική ροή • Δείκτης βασικής ροής (ελάχιστη παροχή 7 ημερών προς μέση ετήσια παροχή) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ισοζύγιο ανταγωνιστικών, χερσαίων και ανθεκτικών σε συνθήκες πίεσης οργανισμών • Δημιουργία θέσεων αποικίας φυτών • Διαμόρφωση υδατικών οικοσυστημάτων μέσω βιοτικών και αβιοτικών παραγόντων • Διαμόρφωση μορφολογίας ποταμών και φυσικών συνθηκών για ενδαιτήματα • Καταστάσεις πίεσης στα φυτά λόγω ανεπρκούς διαθεσιμότητας υγρασίας • Αφυδάτωση ζώων • Καταστάσεις πίεσης στα φυτά λόγω αναερόβιων συνθηκών • Ανταλλαγές θρεπτικών μεταξύ ποταμού και πλημμυροπεδιάδας • Διάρκεια εντατικών καταστάσεων σχετικών με χαμηλή περιεκτικότητα οξυγόνου και συγκεντρώσεις χημικών στο υδατικό περιβάλλον • Κατανομή κοινοτήτων χλωρίδας σε λίμνες, τέλματα και πλημμυροπεδιάδες • Διάρκεια υψηλών ροών για απόθεση αποβλήτων και αερισμό των περιοχών ωοτοκίας στον πυθμένα
<p>Χρόνος πραγματοποίησης ακραίων τιμών (2 δείκτες)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ημέρες εμφάνισης μέγιστης και ελάχιστης ημερήσιας παροχής 	<ul style="list-style-type: none"> • Συμβατότητα με τους κύκλους ζωής των οργανισμών • Προβλεψιμότητα/αποφυγή συνθηκών πίεσης για τους οργανισμούς • Πρόσβαση σε ειδικά ενδαιτήματα κατά τη διάρκεια της αναπαραγωγής ή την αποφυγή θήρεσης • Ορόσημα για την αναπαραγωγή των αποδημητικών ψαριών

Οικολογική ερμηνεία δεικτών ΙΗΑ (συνέχεια)

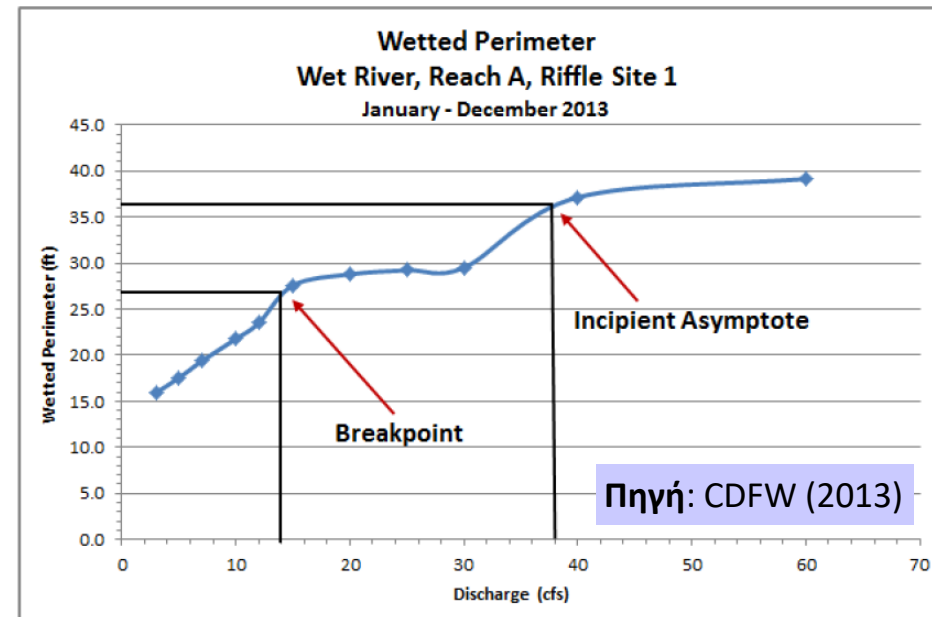
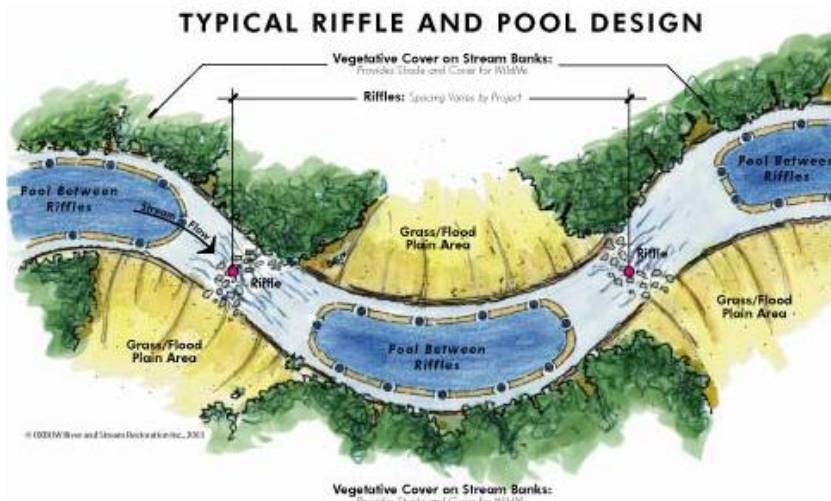
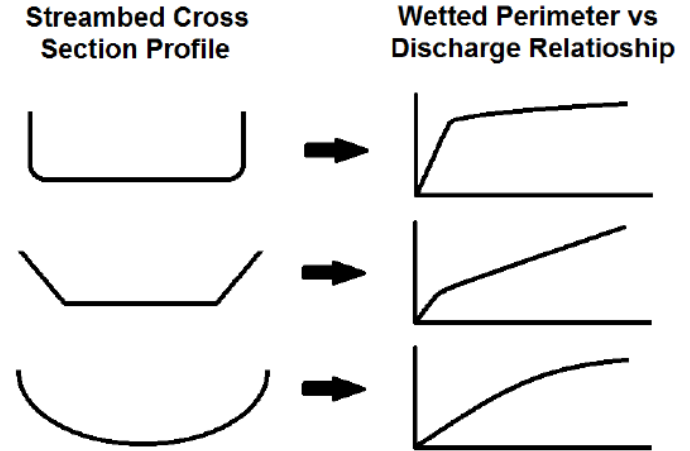
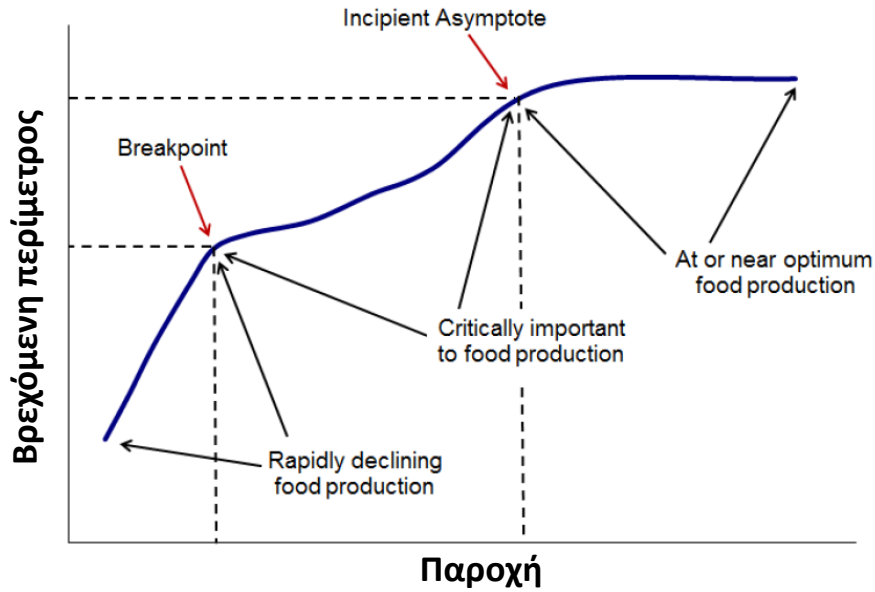
Ομάδα δεικτών - στατιστική ερμηνεία	Επιδράσεις στο οικοσύστημα
<p>Συχνότητα και διάρκεια χαμηλών και υψηλών παλμών (4 δείκτες)</p> <ul style="list-style-type: none">• Πλήθος χαμηλών παλμών στη διάρκεια του υδρολογικού έτους• Μέση ή διάμεσος διάρκεια χαμηλών παλμών (ημέρες)• Πλήθος υψηλών παλμών στη διάρκεια του υδρολογικού έτους• Μέση ή διάμεσος διάρκεια υψηλών παλμών (ημέρες)	<ul style="list-style-type: none">• Συχνότητα και μέγεθος εντατικών καταστάσεων λόγω της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας για τα φυτά• Συχνότητα και μέγεθος εντατικών καταστάσεων λόγω αναερόβιων συνθηκών για τα φυτά• Διαθεσιμότητα ενδαιτημάτων σε πλημμυροπεδιάδες για τους υδρόβιους οργανισμούς• Ανταλλαγές θρεπτικών και οργανικού υλικού μεταξύ ποταμού και πλημμυροπεδιάδας• Διαθεσιμότητα μεταλλικών ουσιών εδάφους• Πρόσβαση πουλιών σε τροφή, ανάπαυση και θέσεις αναπαραγωγής• Επίδραση στη στερεομεταφορά στην κοίτη και το ποτάμι, και διάρκεια διαταραχών στο υπόστρωμα (υψηλοί παλμοί)
<p>Ρυθμός και συχνότητα αλλαγών στις συνθήκες ροής (3 δείκτες)</p> <ul style="list-style-type: none">• Ρυθμός ανόδου (μέση ή διάμεσος τιμή θετικών διαφορών μεταξύ διαδοχικών τιμών ημερήσιων παροχών, $m^3/s/d$)• Ρυθμός πτώσης (μέση ή διάμεσος τιμή αρνητικών διαφορών μεταξύ διαδοχικών τιμών ημερήσιων παροχών, $m^3/s/d$)• Πλήθος υδρολογικών αντιστροφών	<ul style="list-style-type: none">• Πιέσεις στα φυτά λόγω ξηρασίας (επίπεδα πτώσης)• Παγίδευση οργανισμών σε νησίδες και πλημμυροπεδιάδες (επίπεδα ανόδου)• Ένταση οργανισμών χαμηλής κινητικότητας λόγω αποξήρανσης

Πηγή: The Nature Conservancy (2009), μετά από προσαρμογή

Υδραυλικές προσεγγίσεις – Μέθοδος σημείου καμπής βρεχόμενης περιμέτρου-παροχής

- ❑ Οι υδραυλικές αναλύσεις πραγματοποιούνται σε κρίσιμες διατομές, ιδιαίτερα σε περιοχές μικρού βάθους όπου επιταχύνεται η ροή (riffles) και περιοχές με σημαντικά οικολογικά χαρακτηριστικά, που θεωρούνται περιοριστικοί βιότοποι.
- ❑ Επειδή για δεδομένες συνθήκες ροής τα διαθέσιμα ενδαιτήματα καθορίζονται εξ ορισμού από τη **βρεχόμενη περίμετρο**, οι υδραυλικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούν την τελευταία ως χαρακτηριστικό γεωμετρικό μέγεθος της οικολογικής αξιολόγησης.
- ❑ Η βασική ιδέα είναι ότι η βρεχόμενη περίμετρος ρηχών και μεγάλου πλάτους ποταμών είναι πιο ευαίσθητη έναντι αλλαγών στη ροή, σε σχέση με στενές και βαθιές διατομές.
- ❑ Η πλέον διαδεδομένη προσέγγιση είναι η μέθοδος του **σημείου καμπής της καμπύλης βρεχόμενης περιμέτρου-παροχής** (wetted perimeter–discharge breakpoint).
- ❑ Το σημείο καμπής (αναφέρεται και ως inflection point) είναι αυτό στο οποίο αλλάζει η κλίση της καμπύλης, που σημαίνει ότι μια μεγάλη αύξηση της παροχής οδηγεί σε μικρή μόνο αύξηση της βρεχόμενης περιμέτρου.
- ❑ Το χαμηλότερο σημείο καμπής ορίζει την **κρίσιμη παροχή** κάτω από την οποία οι συνθήκες των ενδαιτημάτων των υδρόβιων οργανισμών υποβαθμίζονται ταχέως (Gippel and Stewardson 1998 · Acreman and Dunbar 2004).
- ❑ Ελλείψει υδρομετρικών δεδομένων, η καμπύλη προσεγγίζεται από τη σχέση Manning, στην οποία ο προσδιορισμός του σημείου καμπής γίνεται είτε γραφικά είτε αναλυτικά.

Οικολογική ερμηνεία σημείων καμπής καμπυλών βρεχόμενης περιμέτρου-παροχής



Παράδειγμα εκτίμησης οικολογικής παροχής στις εκβολές του Αχελώου με διαφορετικές μεθόδους

Μέθοδος	Παροχή (m ³ /s)	Παρατηρήσεις
Ελάχιστη παροχή 5ετίας	21.3	Θεσμική απαίτηση της ΜΠΕ (1995)
Ελάχιστη παροχή 5ετίας (επικαιροποιημένη)	22.2	Στατιστική ανάλυση ελάχιστων μηνιαίων παροχών περιόδου 1965-2008
Μέθοδος Tennant (10-30% MAF)	13.7 – 41.1	Θεωρούνται μέτριες συνθήκες για την ξηρή και υγρή περίοδο, καθώς το ποτάμιο σύστημα είναι έντονα τροποποιημένο
Γαλλική Αλιευτική Νομοθεσία (2.5% MAF)	3.5	Λαμβάνεται το ποσοστό για υφιστάμενα έργα (1/40)
Ποσοστημόριο Q ₉₅	18.9	Εκτίμηση με βάση την καμπύλη διάρκειας-ημερήσιων παροχών των ετών 1965-2008
Ποσοστημόριο Q ₉₀	22.9	
Ποσοστημόριο Q ₃₆₄	11.9	
BFM, βασική ροή (Q _b)	14.0	Εκτίμηση με στατιστική ανάλυση των χρονοσειρών παροχών κινούμενων μέσων όρων μίας έως 100 ημερών
BFM, ροή διατήρησης (μηνιαίο εύρος)	17.6 – 34.1	
RVA, 25% ποσοστό μηνιαίας παροχής (μηνιαίο εύρος)	15.3 – 142.1	Βασικοί δείκτες υδρολογικής τροποποίησης, που εκτιμήθηκαν με το λογισμικό IHA/RVA 7.0
RVA, 75% ποσοστό μηνιαίας παροχής (μηνιαίο εύρος)	37.1 – 409.6	
Μέθοδος βρεχόμενης περιμέτρου-παροχής	13.1 - 20.4	Ανάλυση σημείων καμπής σε πέντε χαρακτηριστικές διατομές του Αχελώου (χωρίς χρήση υδρολογικών δεδομένων)

Πηγή: Efstratiadis *et al.* (2014), μετά από προσαρμογή

Υλοποίηση περιορισμών οικολογικής παροχής

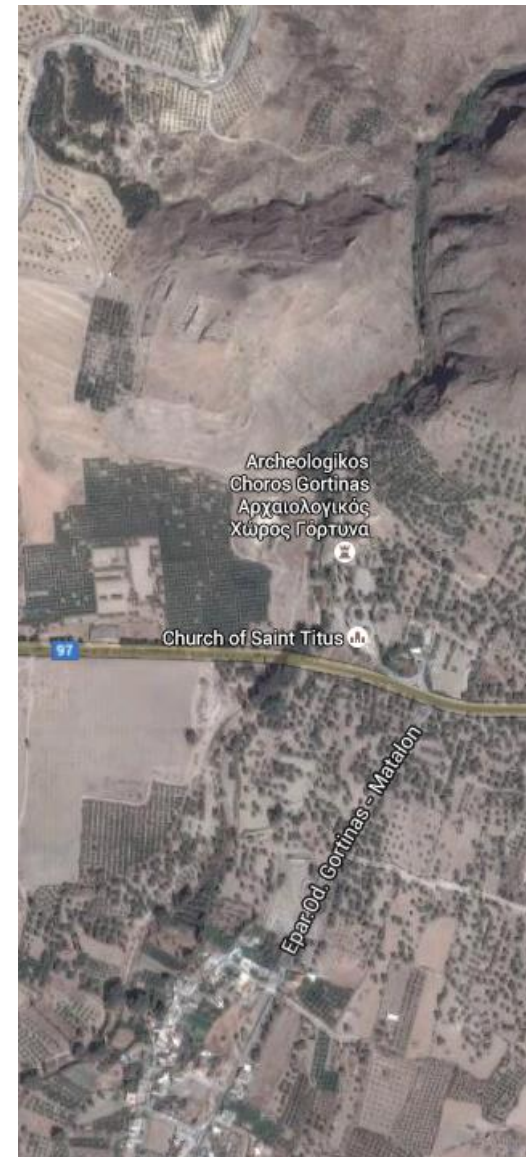
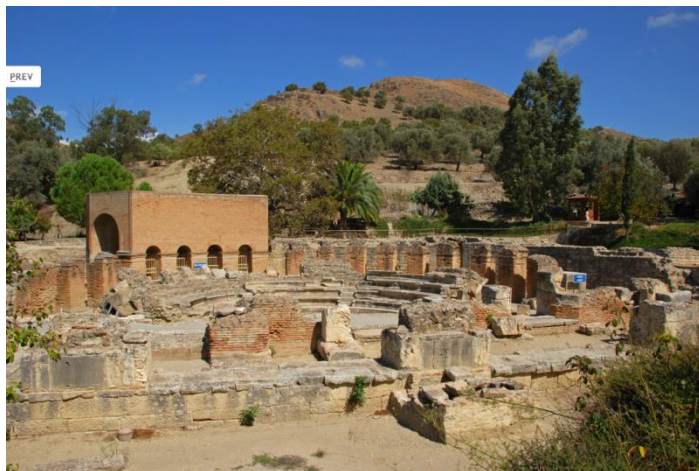
- Η οικολογική παροχή εισάγει περιορισμούς στη λειτουργία των ταμιευτήρων:
 - μειώνει το **απολήψιμο δυναμικό** τους, καθώς μέρος του αποθηκευμένου όγκου δεσμεύεται για περιβαλλοντική χρήση
 - επιβάλλει διαφορετικό **χρονοδιάγραμμα εκροών** σε σχέση με τον αυτό που επιβάλλουν οι συμβατικές χρήσεις νερού (π.χ. υδροηλεκτρική παραγωγή)
- Η υλοποίηση της οικολογικής παροχής περιλαμβάνει δύο στάδια:
 - την εκτίμηση των «θεωρητικών» αναγκών των οικοσυστημάτων (περιβαλλοντικές ροές), σε όρους ποσότητας, ποιότητας και χρονικής διαθεσιμότητας της ροής·
 - την προσαρμογή της λειτουργίας των ταμιευτήρων, ώστε να ικανοποιούνται οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις, υπό τους υφιστάμενους τεχνικούς, διαχειριστικούς (χρήσεις νερού) και άλλους περιορισμούς.
- Συχνά, για την υλοποίηση της οικολογικής παροχής απαιτείται η κατασκευή ενός **μικρού αναρρυθμιστικού έργου** κατάντη του μεγάλου ταμιευτήρα.
- Άλλοι περιβαλλοντικοί περιορισμοί στη λειτουργία ταμιευτήρων:
 - Κατώτατα όρια στάθμης για πραγματοποίηση απολήψεων (για προστασία των οικοσυστημάτων, διατήρηση καλής ποιότητας νερού, κτλ.)
 - Ανώτατα όρια στάθμης για περιορισμό του κινδύνου υπερχείλισης
 - Τεχνητές πλημμύρες για διευκόλυνση της κίνησης των φερτών κατάντη

Πόσο παλιά είναι η έννοια της οικολογικής παροχής και των σχετικών θεσμικών μέτρων;

Απόσπασμα επιγραφής του 5ου αιώνα π.Χ. στη Γόρτυνα της Κρήτης, την οποία διέσχιζε ο ποταμός Ληθαίος («κώδικας Γόρτυνας» – η αρχαιότερη νομοθεσία του Ευρωπαϊκού Χώρου):

«Θιοί· τὸ ποταμὸ αἴ κα κατὰ τὸ μέττον τὰν ροὰν θιυθῆι ρῆν κατὰ το Ἔον αὐτὸ, θιυθεμένωδι ἄπατον ἤμην. Τὰν δὲ ροὰν λείπεν ὄπτον κατέκει ἀ ἐπ' ἀγοραῖ δέπυρα ἢ πλίον, μεῖον δὲ μῆ.»

[Θεοί. Αν κάποιος κατευθύνει τη ροή του ποταμού στην ιδιοκτησία του δεν τιμωρείται. Πρέπει όμως, να αφήσει τόση ροή ώστε να καλύπτει σε πλάτος τη γέφυρα της αγοράς ή περισσότερη, όχι όμως λιγότερη.]



ΠΕ φραγμάτων: Γεωμορφολογικές αλλαγές

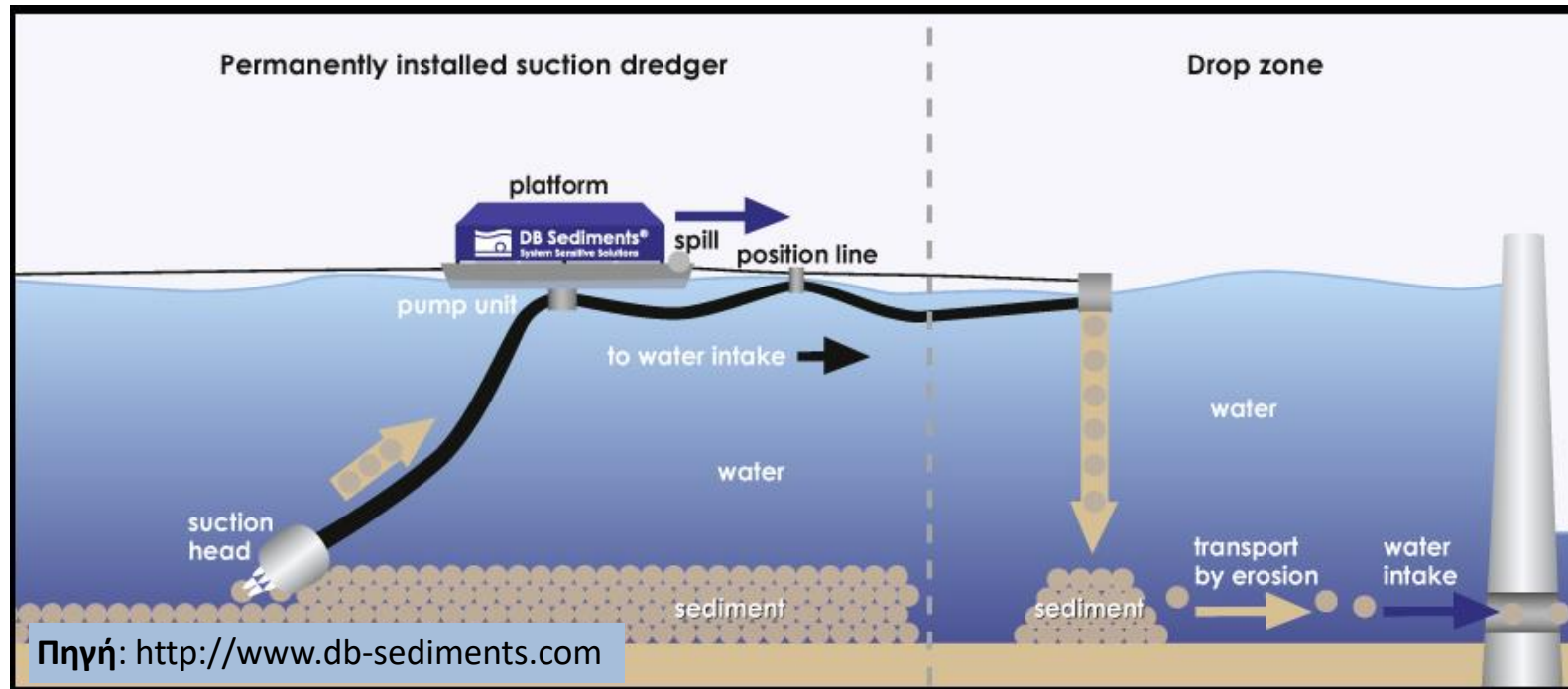
- Άμεσες αλλαγές στην τοπική γεωμορφολογία (φράγμα, ταμιευτήρας)
- Αύξηση **σεισμικότητας** και **κατολισθήσεων** (ανύψωση υδροφόρου ορίζοντα → αύξηση τάσης πόρων → αστάθεια στα πρανή)
- Μακροπρόθεσμες αλλαγές στη γεωμορφολογία του κατάντη ποτάμιου συστήματος:
 - Λόγω **συγκράτησης των φερτών** στον ταμιευτήρα (μείωση στερεοαπορροής)
 - Λόγω διαφοροποίησης της υδρολογικής δίαιτας (παροχές, ταχύτητες) που κινούν τις διεργασίες **μεταφοράς και απόθεσης ιζημάτων**
 - Επιπτώσεις στη χλωρίδα και πανίδα (ενδιαιτήματα), πιο δυσμενείς στις ευαίσθητες ζώνες (παρόχθια οικοσυστήματα, νησίδες, εκβολές)
- **(Μερική) αντιμετώπιση**: περιοδική (ορισμένες φορές στη ζωή του έργου) και προσεκτικά προγραμματισμένη εκροή πολύ μεγάλων παροχών (**τεχνητές πλημμύρες**).
- Basic Flow Method, δύο τύποι τεχνητών πλημμυρών:
 - ροή πλήρωσης (bankfull flow), που υποδηλώνει την κυρίαρχη ροή σε συνθήκες δυναμικής ισορροπίας και εκτιμάται ως η πλημμυρική παροχή 1.5 ως 2.5 ετών
 - μέγιστη ροή (maximum flow), που εκτιμάται ως η πλημμυρική παροχή περιόδου επαναφοράς 25 ετών



Διαχείριση φερτών σε ταμιευτήρες

- Η διαχείριση των φερτών επιτυγχάνεται με τους εξής τρόπους:
 - Μείωση της εισροής φερτών στους ταμιευτήρες (διαχείριση εισροών)
 - Επιλεκτική καθοδήγηση φερτών, ώστε να μην εισέρχονται στους ταμιευτήρες (διαχείριση αποθέσεων)
 - Απομάκρυνση φερτών από τους ταμιευτήρες (διαχείριση εκροών)
 - Παράκαμψη ταμιευτήρα και εκτροπή φερτών (διαχείριση εισροών)
- Οι δύο πρώτες προσεγγίσεις είναι ευνοϊκές αποκλειστικά για τη λειτουργία του ταμιευτήρα, καθώς επιβραδύνεται ο ρυθμός πλήρωσης του νεκρού όγκου και συνεπώς αυξάνει ο χρόνος ωφέλιμης ζωής του έργου, ενώ η άλλες δύο βοηθούν και στην (μερική) περιβαλλοντική αποκατάσταση του κατάντη ποτάμιου συστήματος.
- Τρόποι απομάκρυνσης φερτών:
 - Μηχανική απομάκρυνση
 - Εκσκαφή – βυθοκόρηση εν ξηρώ (dry dredging)
 - Βυθοκόρηση με πλωτά μέσα (wet dredging)
 - Βυθοκόρηση με αναρρόφηση (suction dredging)
 - Υδραυλική απομάκρυνση μέσω έκπλυσης (flushing)
 - Εκκένωση μέσω εξόδων σε χαμηλές στάθμες
 - Τεχνητές πλημμύρες μέσω της υδροληψίας

Μηχανική απομάκρυνση φερτών



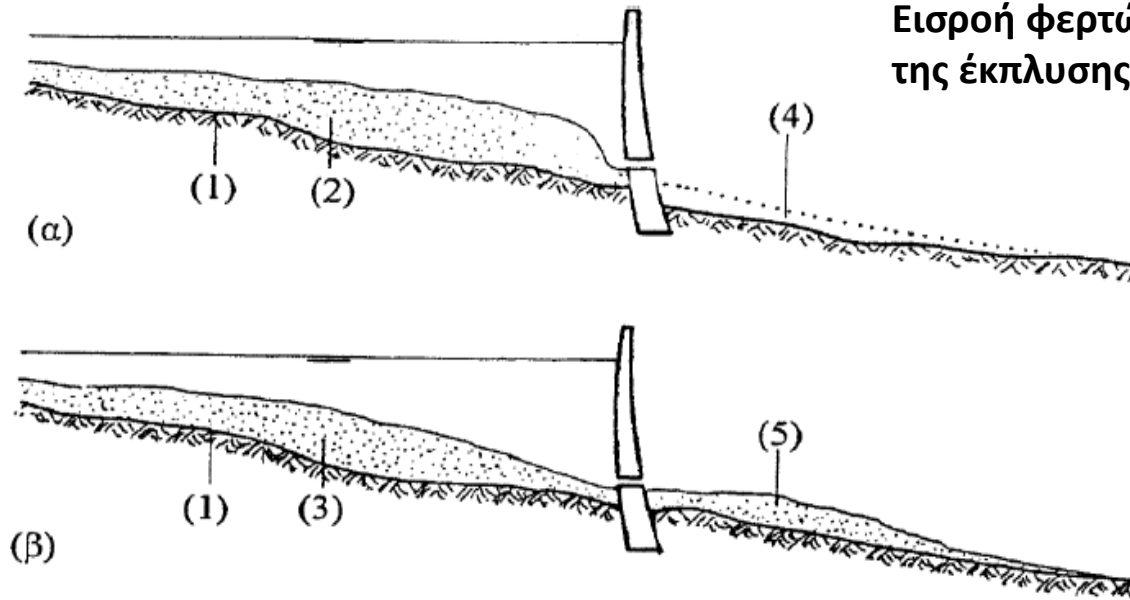
Πηγή: <http://www.geluk-bv.com/en/areas-of-operation/dredging-activities-in-reservoirs/>



Πηγή: <http://www.seehydropower.eu/meetings/details.php?id=9>

Υδραυλική απομάκρυνση φερτών

Εισροή φερτών σε ταμιευτήρα και αποτελέσματα της έκπλυσης μετά την επαναπλήρωσή του



- (1) Αρχική κοίτη ποταμού
- (2) Ζώνη απόθεσης φερτών
- (3) Μειωμένη απόθεση εντός του ταμιευτήρα μετά την έκπλυση
- (4) Υποβάθμιση ποταμού κατάντη του φράγματος λόγω της έλλειψης φερτών υλών
- (5) Δημιουργία νέων αποθέσεων κατάντη του φράγματος

Φράγμα Gebidem, Ελβετία



Παράδειγμα τεχνητής πλημμύρας: φράγμα Glen Canyon

- Στις 6/1/2016 αφέθηκε εκροή $1190 \text{ m}^3/\text{s}$ για διάστημα 24 ωρών, στο πλαίσιο «οικολογικού πειράματος» μεγάλης κλίμακας.
- Η διόδευση της πλημμύρας διήρκησε πέντε ημέρες και εκτιμάται ότι μετακίνησε 500 000 000 τόνους άμμου και ιλύος που είχαν παγιδευτεί στην κοίτη του ποταμού Κολοράντο, με σκοπό τη δημιουργία νέων παραλιών, τη βελτίωση των ενδιαιτημάτων των φυτών και ζώων, και την προστασία αρχαιολογικών περιοχών.
- Μικρότερης κλίμακας τεχνητές πλημμύρες του παρελθόντος (1996, 2004, 2008) απέδωσαν αξιόλογα, αν και μικρότερα του αναμενόμενου, περιβαλλοντικά οφέλη (Melis *et al.*, 2012).



March 4, 2008 (before the HFE)



March 11, 2008 (immediately after the HFE)

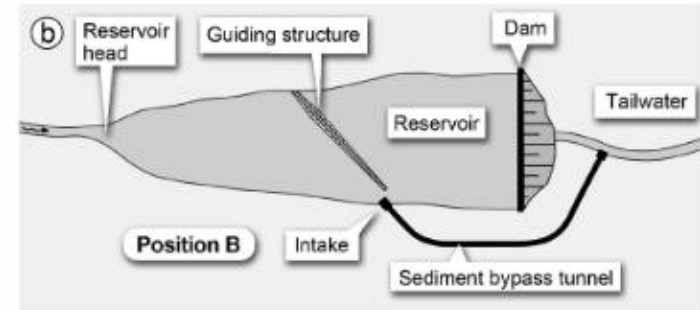
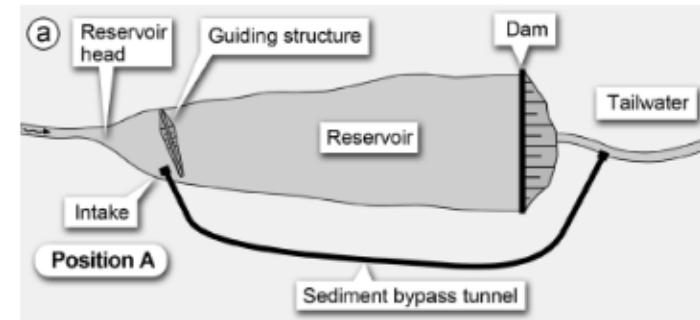
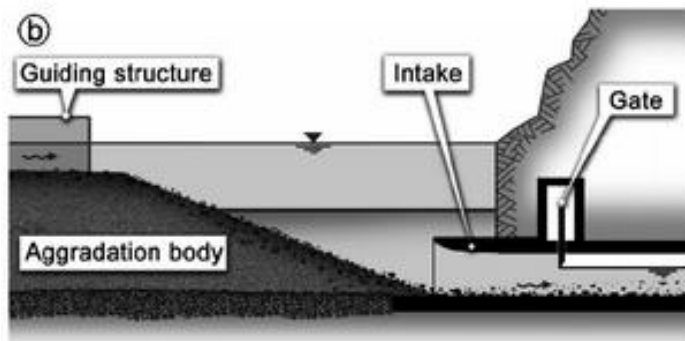
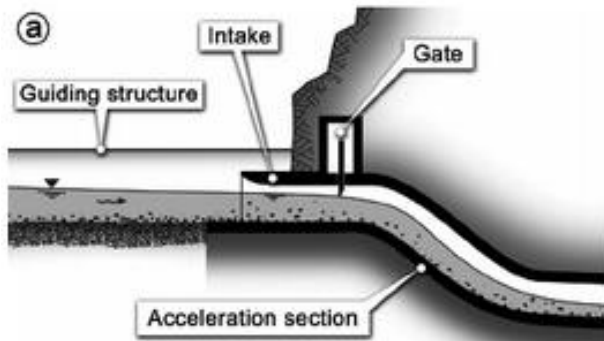


September 30, 2008 (about 6 months after the HFE)

Πηγή: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2236568/>

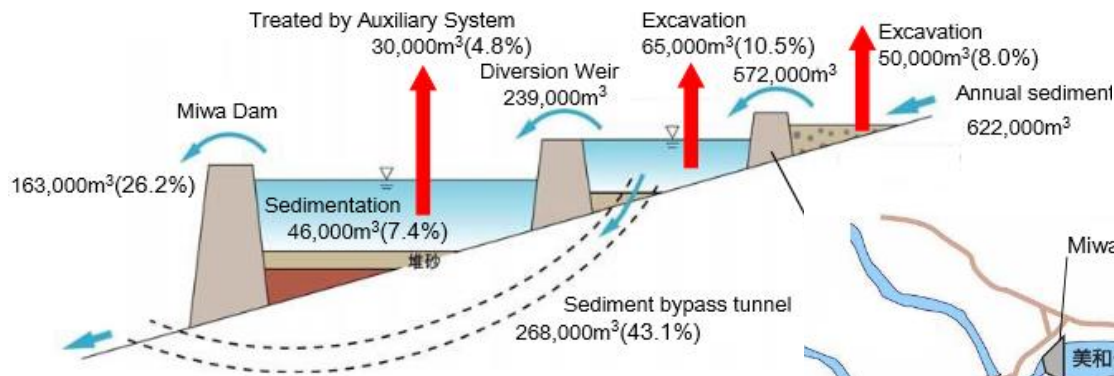
Εκτροπή φερτών με παράκαμψη του ταμιευτήρα (sediment bypass)

- Σύστημα έργων που επιδιώκει την παράκαμψη του ταμιευτήρα, με απαγωγή μέρους της απορροής και των φερτών (Auel and Boes, 2011).
- Το έργο καθοδήγησης της ροής (φράγμα, αναβαθμός) τοποθετείται είτε στην κεφαλή του ταμιευτήρα (ροή με ελεύθερη επιφάνεια) είτε σε ενδιάμεση θέση (ροή υπό πίεση).

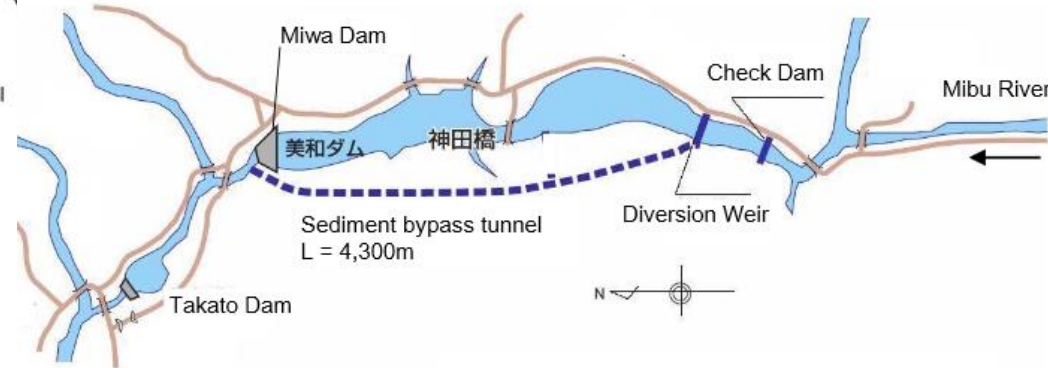


- Η σήραγγα εκτροπής περιλαμβάνει δύο τμήματα:
 - Ανάντη τμήμα, στο οποίο δίνεται ισχυρή κλίση (τυπικό εύρος 15-35%) ώστε να εξασφαλιστεί επαρκής μεταφορική ικανότητα των φερτών (έντονα υπερκρίσιμη ροή, έλεγχος διάβρωσης)
 - Κατάντη τμήμα σήραγγας εκτροπής, ηπιότερης κλίσης (τυπικό εύρος 1-4%)
- Στην έξοδο της σήραγγας προβλέπεται ειδική διαμόρφωση, ώστε να αποφευχθεί η συσσώρευση φερτών υλικών στην αμέσως κατάντη περιοχή

Παράδειγμα διαχείρισης φερτών: φράγμα Miwa



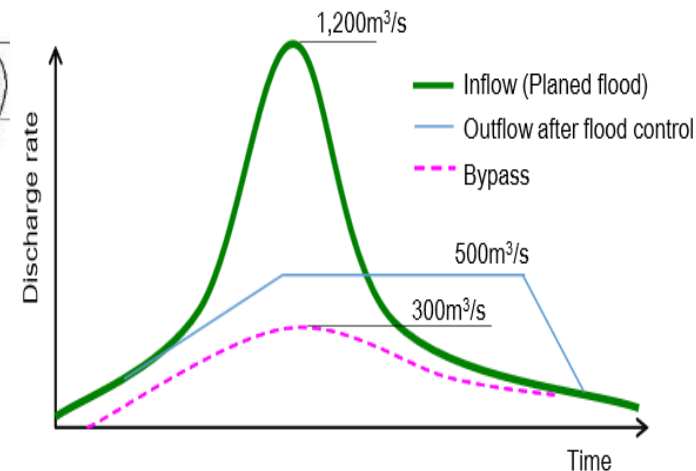
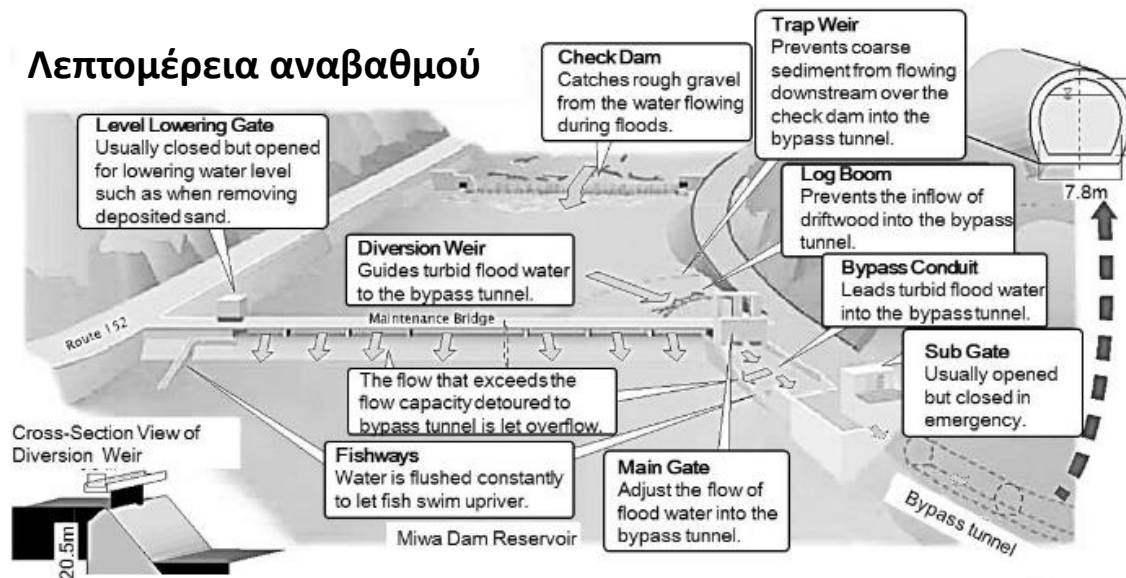
Γενική διάταξη ταμιευτήρα και έργων εκτροπής φερτών



Μέσο ετήσιο ισοζύγιο και γενική διάταξη συστήματος διαχείρισης φερτών, με το οποίο επιτυγχάνεται απόθεση ίση με μόλις 7.4% της στερεοαπορροής της ανάντη λεκάνης

Παροχές λειτουργίας έργων (πλημμύρα σχεδιασμού)

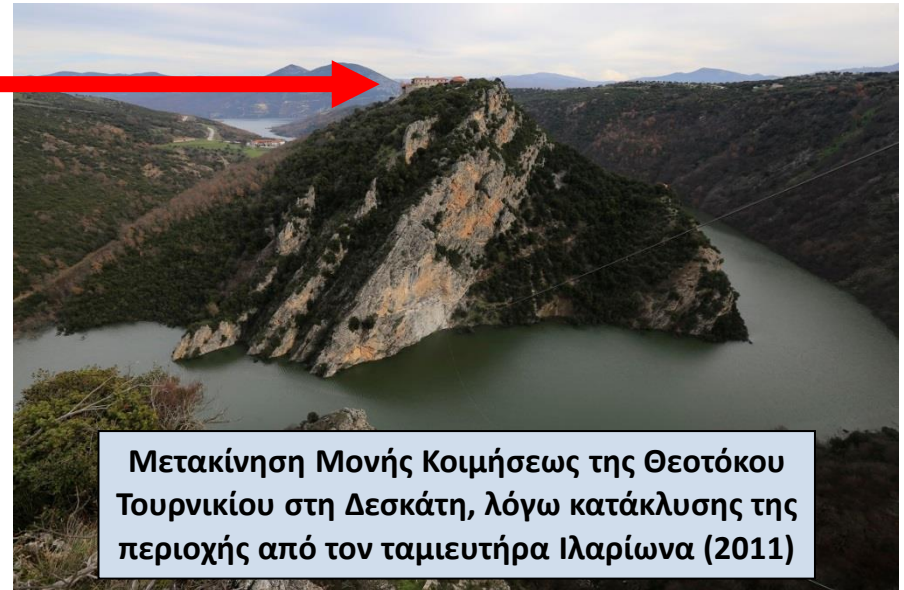
Λεπτομέρεια αναβαθμού



Πηγή: Sakurai and Kobayashi (2015)

Επιπτώσεις φραγμάτων στο ανθρωπογενές περιβάλλον

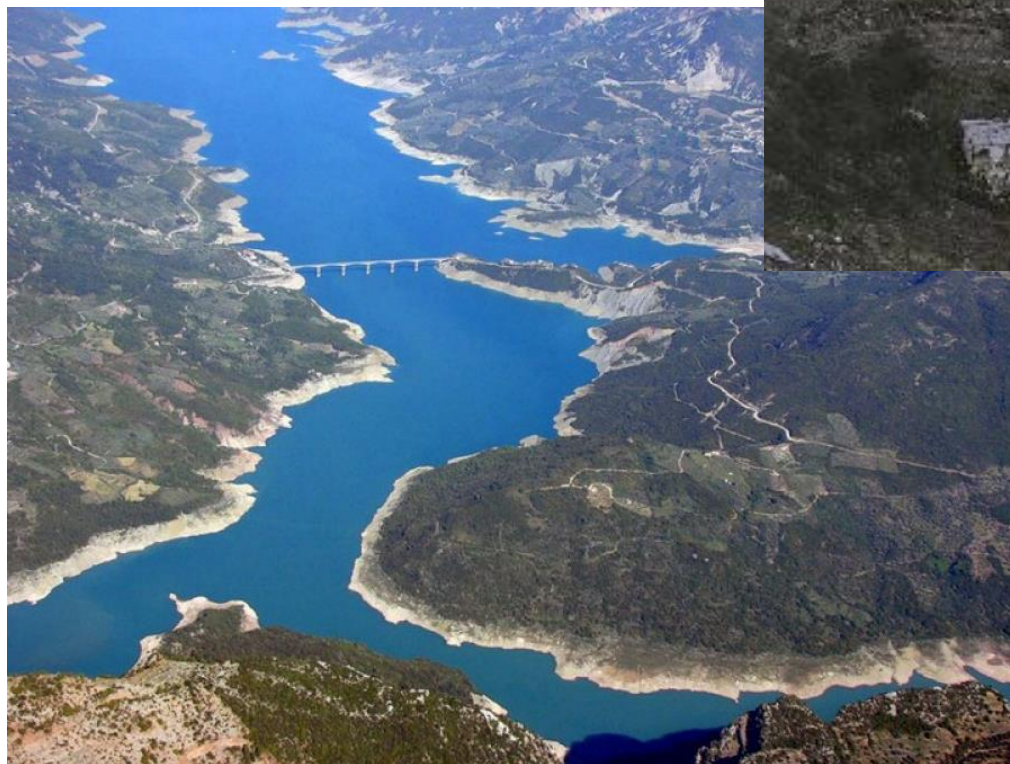
- ❑ Μετακινήσεις πληθυσμών
 - Αποζημιώσεις, μεταφορά σε νέους οικισμούς, και άλλα αντισταθμιστικά οφέλη
- ❑ Κοινωνικές και οικονομικές αλλαγές:
 - Εγκατάλειψη πρότερων δραστηριοτήτων, π.χ., αγροτικών
 - Νέες θέσεις εργασίας (συνήθης πρακτική της ΔΕΗ)
 - Αύξηση τουρισμού, λόγω του ελκυστικού νέου τοπίου (λίμνη Πλαστήρα)
- ❑ Κατάκλυση μνημείων και περιοχών υψηλού πολιτιστικού ενδιαφέροντος
 - Καταγραφή υλικού, διάσωση κινητών ευρημάτων
 - Μεταφορά στοιχείων υψηλού ενδιαφέροντος σε άλλη θέση



Μετακίνηση Μονής Κοιμήσεως της Θεοτόκου Τουρνικίου στη Δεσκάτη, λόγω κατάκλυσης της περιοχής από τον ταμιευτήρα Ιλαρίωνα (2011)

Φράγμα Κρεμαστών: κοινωνικές επιπτώσεις

- ❑ Απομακρύνθηκαν περίπου 1000 άτομα, καθώς κατακλύστηκαν τα χωριά Επισκοπή, Άγιος Βασίλειος και Σίδερα
- ❑ Κατακλύστηκε το βυζαντινό μοναστήρι της Επισκοπής (όπου σήμερα η ομώνυμη γέφυρα)



- ❑ Συνέβαλε ουσιαστικά στην ανάπτυξη της μεταπολεμικής Ελλάδας και εξακολουθεί να έχει κομβικό ρόλο στο ενεργειακό μίγμα της χώρας
- ❑ Δημιουργήθηκαν εκατοντάδες νέες θέσεις εργασίες τη δεκαετία του '70 και έως τα μέσα του '80

Κάτω από τη λίμνη του Μόρνου: Κάλλιο-Καλλίπολις (1)

Στο βυθό της λίμνης του Μόρνου βρίσκεται θαμμένο το χωριό Κάλλιο, το οποίο κατακλύστηκε από τα νερά του ταμιευτήρα το 1980. Στην ίδια θέση βρισκόταν η αρχαία Καλλίπολις ή Κάλλιον, η ανατολικότερη Αιτωλική πόλη, πιθανό κέντρο ολόκληρου του αιτωλικού έθνους των Οφιονέων.

Το Κάλλιον κατοικήθηκε από τα γεωμετρικά χρόνια, αλλά μόλις τον 4^ο αιώνα π.Χ. ιδρύθηκε ως αστικό κέντρο, όπως συνέβη και με τις άλλες αιτωλικές πόλεις, που άρχισαν να οργανώνονται στην πολιτική ομοσπονδία της Αιτωλικής Συμπολιτείας. Η νέα πόλη προστατεύθηκε με τείχος και σε αυτή συγκεντρώθηκαν οι θρησκευτικές, οικονομικές και πολιτικές δραστηριότητες των αγροτικών οικισμών. Οι κάτοικοί της αναφέρονται από τον Θουκυδίδη (3.96.3) ως το ανατολικότερο μέρος της νφυλής των Οφιονέων, ενώ ο Πausanias (10.22.6) και ο Στέφανος Βυζάντιος (που ονομάζει την πόλη Σόλλιον και Φάκιον) αναφέρουν το Κάλλιον ως την πρωτεύουσά τους. Στην ελληνιστική περίοδο, σύμφωνα με επιγραφικές μαρτυρίες, η πόλη ονομαζόταν Καλλίπολις.



Κάτω από τη λίμνη του Μόρνου: Κάλλιο-Καλλίπολις (2)

Το Κάλλιον βρισκόταν σε στρατηγική θέση, κοντά στη δίοδο της κοιλάδας του Άνω Δάφνου και στο πέρασμα του «Στενού», που αποτελούσαν τον μοναδικό δρόμο από τη Θεσσαλία και την κοιλάδα του Σπερχειού προς το εσωτερικό της Αιτωλίας και τη Ναύπακτο. Το δρόμο αυτό ακολούθησαν και οι Γαλάτες το 279 π.Χ. κατά την εισβολή τους στην Αιτωλία, που κατέληξε στην άλωση και καταστροφή του Καλλίου και στις θηριωδίες σε βάρος των κατοίκων του, αλλά και στη φοβερή εκδίκηση των Αιτωλών (Παυσ. 10.22.3-7). Μετά τη γαλατική επιδρομή, οι Καλλιεείς ανοικοδόμησαν την πόλη τους και κατάφεραν να έχουν ενεργή συμμετοχή στα ιστορικά γεγονότα. Μετά τα μέσα του 2ου αιώνα π.Χ. το Κάλλιο εξαφανίζεται από τις πηγές και μόνο τον 9ο αιώνα μ.Χ. αναφέρεται ως έδρα του επισκόπου το Λιδορίκι, που διαδέχθηκε το Κάλλιο ως διοικητικό κέντρο της ορεινής Δωρίδας.

Σήμερα, μετά τις ανασκαφές που πραγματοποιήθηκαν τα έτη 1977-1979 από τον καθηγητή Π. Θέμελη, τα δημόσια κτίσματα της πόλης και τα νεκροταφεία έχουν κατακλυσθεί από τα νερά της τεχνητής λίμνης του Μόρνου. Από το αρχαίο Κάλλιον διατηρήθηκε η τειχισμένη ακρόπολη, όπου κατέφευγαν οι κάτοικοι για την προστασία τους από εξωτερικές επιθέσεις και επιδρομές. Ο οχυρωματικός περίβολος, πολλά μέρη του οποίου διατηρούνται σε ύψος μεγαλύτερο από αυτό των θεμελίων, χρονολογείται στον 4ο και 3ο αιώνα π.Χ. Το συνολικό του μήκος, μαζί με το τείχος της ακρόπολης, ξεπερνούσε τα δύο χλμ., περισσότερο κατοικημένα όμως ήταν τα χαμηλότερα μέρη του λόφου. Από την αρχαία πόλη αποκαλύφθηκαν τμήματα του τείχους, τα δημόσια κτήρια (ναοί, βουλευτήριο, θέατρο, αγορά), ιδιωτικές οικίες και τα νεκροταφεία, αλλά σήμερα κανένα μνημείο δεν είναι ορατό, καθώς ο χώρος έχει κατακλυσθεί από τα νερά του Μόρνου. Τα κινητά ευρήματα των ανασκαφών (αγγεία, νομίσματα, ψηφιδωτά, κοσμήματα, επιγραφές) εκτίθενται στην Αρχαιολογική Συλλογή Λιδορικού.

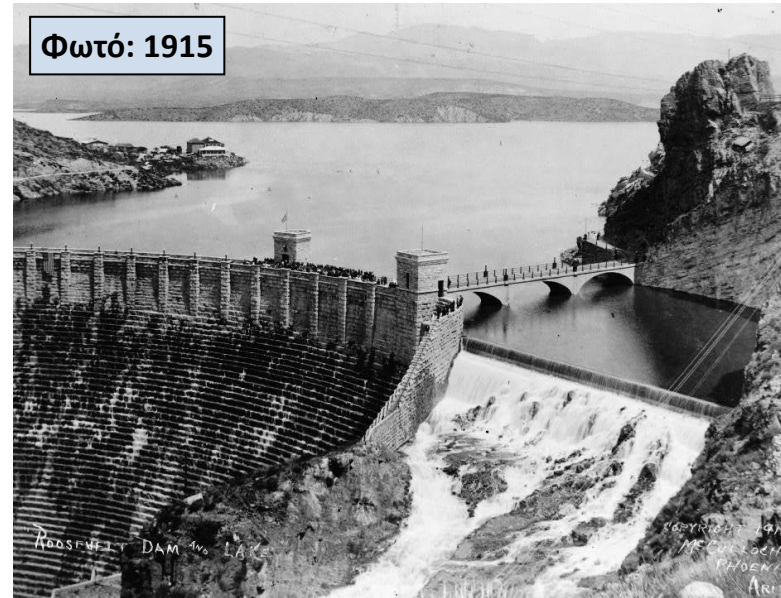


Κύκλος ζωής φραγμάτων

- ❑ Όλα τα μεγάλα έργα σχεδιάζονται με επιλεγμένο ορίζοντα ζωής, βάσει του οποίου αξιολογούνται τα αναμενόμενα **οφέλη**, σε αντιπαράβολή με τις αντίστοιχες **δαπάνες**.
- ❑ Ο τυπικός **κύκλος ζωής** ενός φράγματος περιλαμβάνει:
 - Σύλληψη – αξιολόγηση – σχεδιασμός (5%)
 - Κατασκευή (25%)
 - Λειτουργία και συντήρηση (75% του κόστους, 100% των εσόδων)
- ❑ **Μετά το τέλος της ζωής του φράγματος**, διατίθενται οι ακόλουθες επιλογές, που αξιολογούνται με βάση τεχνικοοικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια:
 - Ανακαίνιση, για παράταση της περιόδου λειτουργίας του
 - Εγκατάλειψη (επικίνδυνη πρακτική)
 - Καθαίρεση (πολύ μεγάλο κόστος)
- ❑ Είναι προφανής προαπαίτηση να υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις στις χρήσεις που εξυπηρετεί το εν λόγω φράγμα, πριν εξεταστεί η καθαίρεσή του.
- ❑ Ως τώρα, οι περιπτώσεις **καθαίρεσης** μεγάλων φραγμάτων είναι ελάχιστες.
- ❑ Τα (μεγάλα) φράγματα είναι κατασκευές σχετικά πρόσφατες. Είναι σημαντικό να διερευνηθεί το μέλλον των φραγμάτων πέρα από τα συνήθη χρονικά διαστήματα ζωής τους (50 έως 100 έτη), διότι η **μέχρι τώρα εμπειρία δείχνει ότι τα έργα αυτά τείνουν να ξεπερνούν την αρχική διάρκεια ζωής τους**.

Μετά το πέρας ζωής των φραγμάτων: Ανακαίνιση

- ❑ Φράγμα Roosevelt, Salt River, Αριζόνα, ΗΠΑ
- ❑ Κατασκευάστηκε την περίοδο 1905-1911, και ήταν το υψηλότερο φράγμα της εποχής του.
- ❑ Το 1989, αποφασίστηκε η ανακαίνισή του:
 - Επένδυση λίθινου σώματος με σκυρόδεμα
 - Αύξηση ύψους από 85 σε 109 m, αύξηση χωρητικότητας κατά 20%
 - Νέοι υπερχειλιστές
 - Επέκταση μονάδων παραγωγής ΥΗΕ
 - Προσθήκη αντιπλημμυρικής λειτουργίας στις χρήσεις
 - Γέφυρα εξυπηρέτησης κυκλοφορίας
- ❑ Οι εργασίες ολοκληρώθηκαν το 1999, με δαπάνη 430 Μ\$
- ❑ Μετά την ολική ανακαίνιση, από το 1999 έπαψε να θεωρείται ως εθνικό ιστορικό ορόσημο (National Historic Landmark)



Μετά το πέρας ζωής των φραγμάτων: Καθαίρεση

- ❑ Φράγματα Elwha (1911, ύψος 33 m) και Glines Canyon (1925, ύψος 64 m), ΗΠΑ.
- ❑ Το 2008, αποφασίστηκε η καθαίρεσή τους, με βασικό λόγο την αποκατάσταση της κυκλοφορίας των πληθυσμών σολομού.
- ❑ Ολοκληρώθηκε το 2015, είναι τα μεγαλύτερα που έχουν ποτέ καθαιρεθεί.
- ❑ Σήμερα παρακολουθείται στενά αφ' ενός η αποκατάσταση των πληθυσμών του σολομού, οι επιπτώσεις στη γεωμορφολογία (διάβρωση, μεταφορά φερτών, εκβολές, κλπ.), καθώς και οι λοιπές επιπτώσεις στη χλωρίδα και πανίδα.
- ❑ Κόστος αποκατάστασης 350 Μ\$ (60 Μ\$ για την καθαίρεση των φραγμάτων)
- ❑ Αναφέρεται ότι το 1/3 του νεκρού όγκου έχει ήδη μεταφερθεί στις εκβολές, με ρυθμό 20 πλάσιο του μέσου ετήσιου



Βιβλιογραφία (1)

- Acreman, M.C., and M.J. Dunbar, Defining environmental river flow requirements – a review, *Hydrology and Earth System Sciences*, 8, 861–876, 2004.
- Acreman, M.C., M.J. Dunbar, J. Hannaford, O. Mountford, P. Wood, N. Holmes, I. Cowx, R. Noble, C. Extence, J. Aldrick, J. King, A. Black, and D. Crookall, Developing environmental standards for abstractions from UK rivers to implement the EU Water Framework Directive, *Hydrological Sciences Journal*, 53(6), 1105–1120, 2008.
- Auel, C. and R.M. Boes, Sediment bypass tunnel design – Review and outlook, In: Schleiss J.I. and Boes R.M. (editors), *Dams and Reservoirs under Changing Challenges*, 403-412, Taylor & Francis Group, London, 2011.
- CDFW, *Standard Operating Procedure for the Wetted Perimeter Method in California*, California Department of Fish and Wildlife Instream Flow Program Standard Operating Procedure, DFG-IFP-004, 19 p, 2013.
- CIS Guidance Document No 31, *Ecological Flows in the Implementation of the Water Framework Directive*, Technical Report – 2015 – 086, 2015.
- Efstratiadis, A., A. Tegos, A. Varveris, and D. Koutsoyiannis, Assessment of environmental flows under limited data availability – Case study of Acheloos River, Greece, *Hydrological Sciences Journal*, 59 (3-4), 731–750, 2014.
- Gippel, C.J., and M.J. Stewardson, Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows, *Regulated Rivers: Research and Management*, 14, 53-67, 1998.
- Melis, T.S., P.E. Grams, T.A. Kennedy, B.E. Ralston, C.T. Robinson, J.C. Schmidt, L.M. Schmit, R.A. Valdez, and S.A. Wright, *Three experimental high-flow releases from Glen Canyon Dam, Arizona: effects on the downstream Colorado River ecosystem*, U.S. Geological Survey Fact Sheet, 2011-3012, 4 p, 2011.
- Olden, J.D., and N.L. Poff, Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing stream- flow regimes, *River Research and Applications*, 19, 101–121, 2003.
- Palau, A. and Alcázar, J., The Basic Flow: An alternative approach to calculate minimum environmental instream flows, *Proc. of 2nd International Symposium on Habitats Hydraulics*. Ecohydraulics 2000, Quebec, 547-558, 1996.
- Palau, A. and Alcázar, J., The Basic Flow method for incorporating flow variability in environmental flows, *River Research and Applications*, 28, 93–102, 2012.
- Petts, G.E., Instream flow science for sustainable river management, *Journal of the American Water Resources Association*, 45(5), 1071–1086, 2009.

Βιβλιογραφία (2)

- Poff, N.L., J.D. Allan, M.B. Bain, J.R. Karr, B. Richter, R. Sparks, and J. Stromberg, The natural flow regime: a new paradigm for riverine conservation and restoration, *BioScience*, 47, 769–784, 1997.
- Richter, B.D., J.V. Baumgartner, J. Powell, and D.P. Braun, A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems, *Conservation Biology*, 10, 1163–1174, 1996.
- Richter, B.D., J.V. Baumgartner, R. Wigington, and D.P. Braun, How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 37, 231–249, 1997.
- Richter, B.D., J.V. Baumgartner, D.P. Braun, and J. Powell, A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network, *Regulated Rivers: Research and Management*, 14, 329-340, 1998.
- Rinaldi, M., B. Belletti, W. Van de Bund, W. Bertoldi, A. Gurnell, T. Buijse, and E. Mosselman, Review on eco-hydro-morphological methods, in: N. Friberg, M. O'Hare and A. Poulsen, *Deliverable of the EU FP7 REFORM project*, 2013.
- Sakurai, T., and K. Kobayashi, Operations of the sediment bypass tunnel and examination of the auxiliary sedimentation measure facility at Miwa Dam, *First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, ETH, 2015.
- Shen, H.W., Flushing sediment through reservoirs, *Journal of Hydraulic Research*, 37(6), 743-757, 1999.
- Smakhtin, V.U., Low flow hydrology: a review, *Journal of Hydrology*, 240, 147–186, 2001.
- Suen J.P., and J.W. Eheart, Reservoir management to balance ecosystem and human needs: incorporating the paradigm of the ecological flow regime, *Water Resources Research*, 42(3), W03417, 2006.
- Tegos, A., W. Schlüter, N. Gibbons, Y. Katselis, and A. Efstratiadis, Assessment of environmental flows from complexity to parsimony - Lessons from Lesotho, *Water*, 10(10), 1293, doi:10.3390/w10101293, 2018.
- Tennant, D.L., Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources, *Fisheries*, 1(4), 6-10, 1976.
- Tharme, R.E., A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers, *River Research and Applications*, 19, 397–441, 2003.
- The Nature Conservancy, *Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 User's Manual*, 2009.
- UK TAG, UK Environmental Standards and Conditions Report (Phase 1), 2008.