

# Υδραυλικές Κατασκευές – Φράγματα

9ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

---

## Διάλεξη 12<sup>η</sup> (μέρος Β): Διαχείριση οικολογικής παροχής και φερτών

---

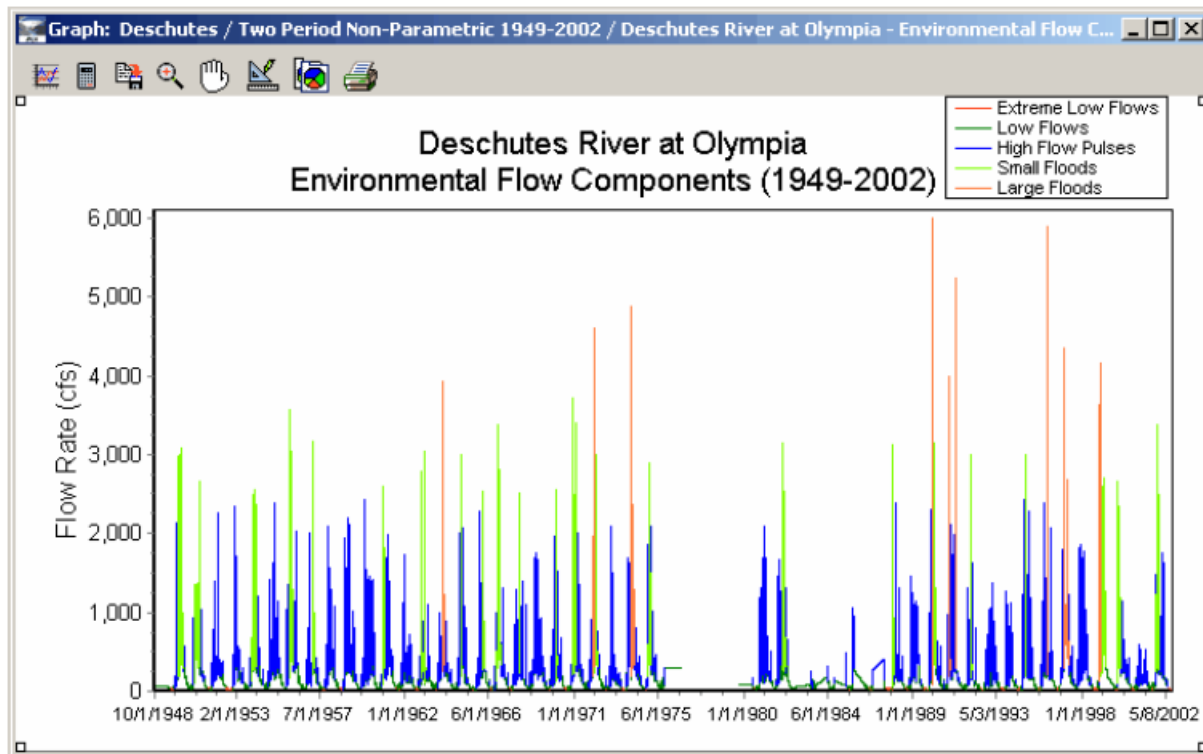
Ανδρέας Ευστρατιάδης, Σπύρος Μίχας & Δημήτρης Δερματάς,  
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2015-16

# 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 μαίανδροι, νησίδες και βαλτότοποι.

# Παράδειγμα διάκρισης τύπων ροής



Παραδοσιακή θεώρηση



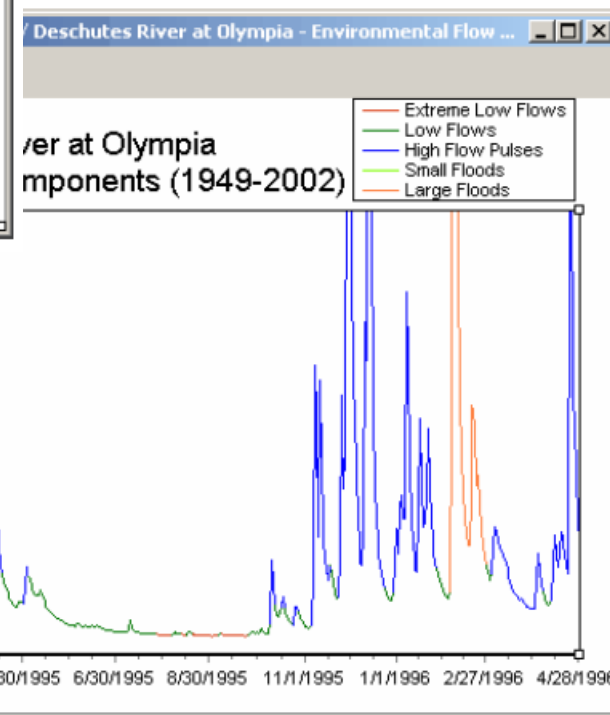
Παροχή ξηρής περιόδου

Πηγή: The Nature Conservancy (2009)

Σύγχρονη θεώρηση



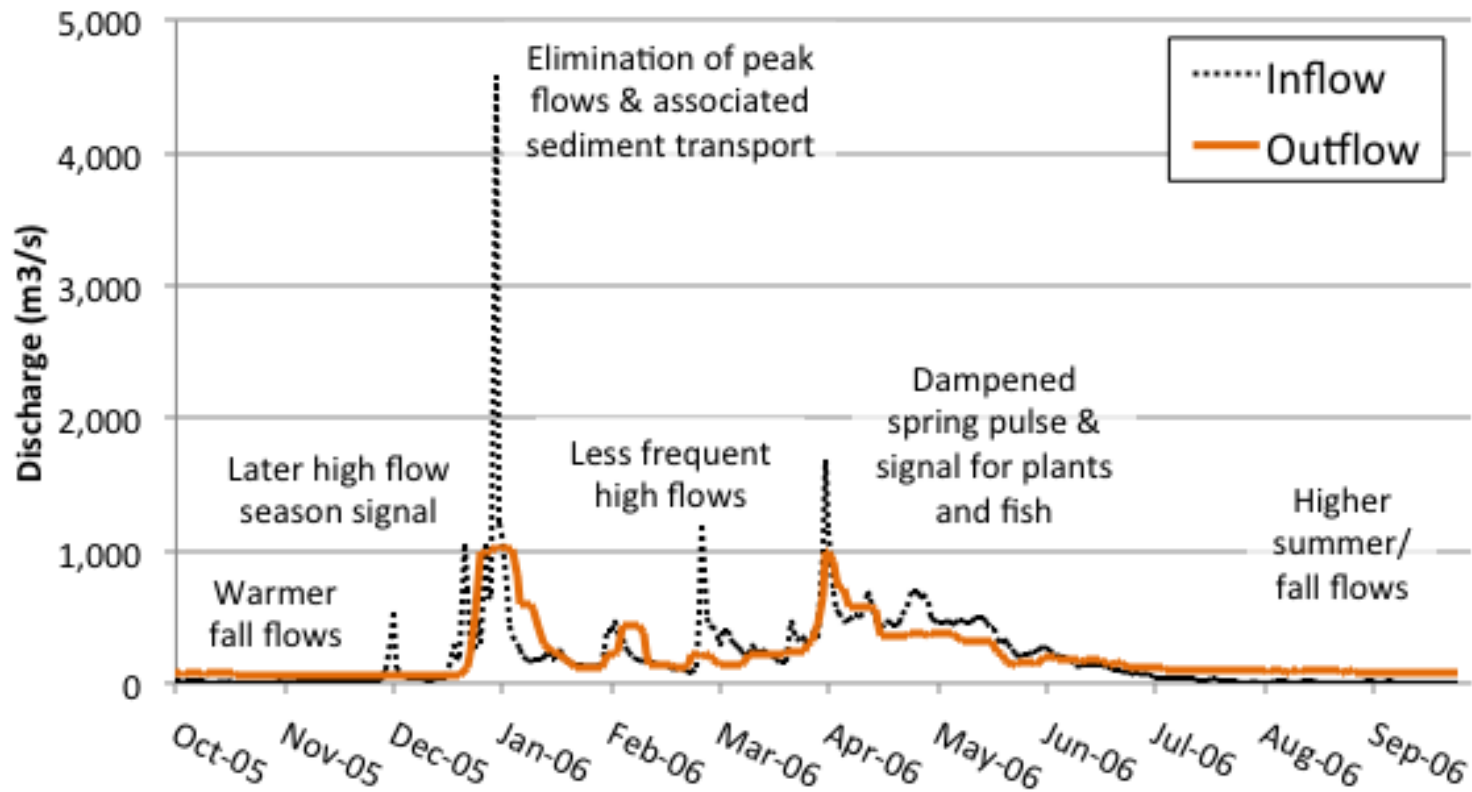
Πλήρες καθεστώς ροής



# Επιπτώσεις φραγμάτων στο φυσικό καθεστώς ροής

- ❑ Η αλλαγή των χαρακτηριστικών της ροής των ποταμών (υδρολογική δίαιτα) αποτελεί μείζονα περιβαλλοντική επίπτωση της κατασκευής και λειτουργίας φραγμάτων.
- ❑ Οι επιπτώσεις αφορούν:
  - στον διαφορετικό χρονισμό των εκροών σε σχέση με τις εισροές
  - στην μείωση της διαθέσιμης ποσότητας νερού κατάντη
  - στην υποβαθμισμό των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού
  - στη συγκράτηση των φερτών
- ❑ Η 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 μεγάλης χωρητικότητας που διαφοροποιούν ουσιωδώς την υδρολογική δίαιτα του ποταμού, αποκλειστικά λόγω χρονικής αναρρύθμισης της ροής (π.χ. αντιπλημμυρικά, μεγάλα υδροηλεκτρικά)
  - Έργα μερικής εκτροπής, που διαφοροποιούν ουσιωδώς την υδρολογική δίαιτα του ποταμού, καθώς μέρος της απορροής απάγεται για άλλες χρήσεις
  - 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)

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



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

# 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 ευδοκούν και να περιέχουν 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

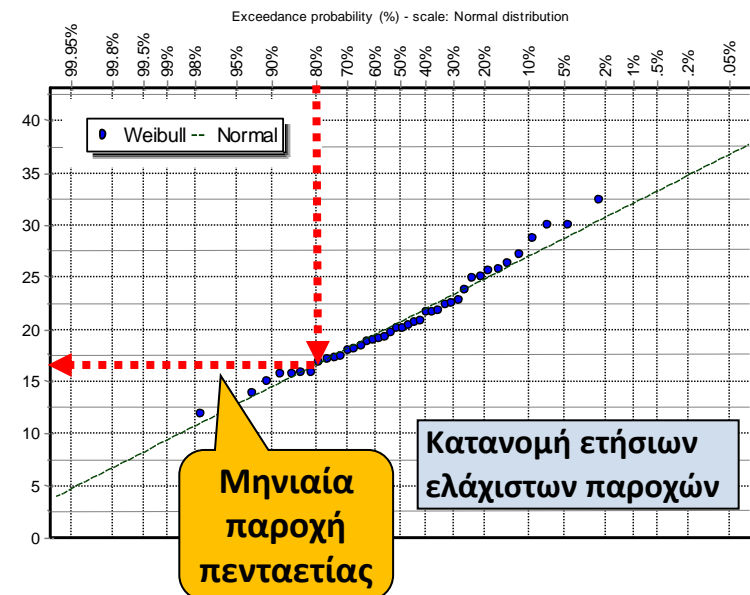
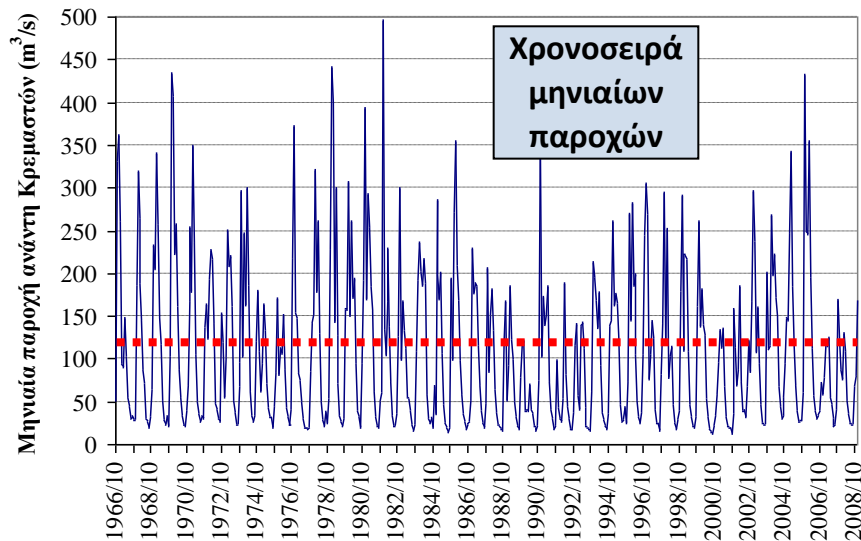
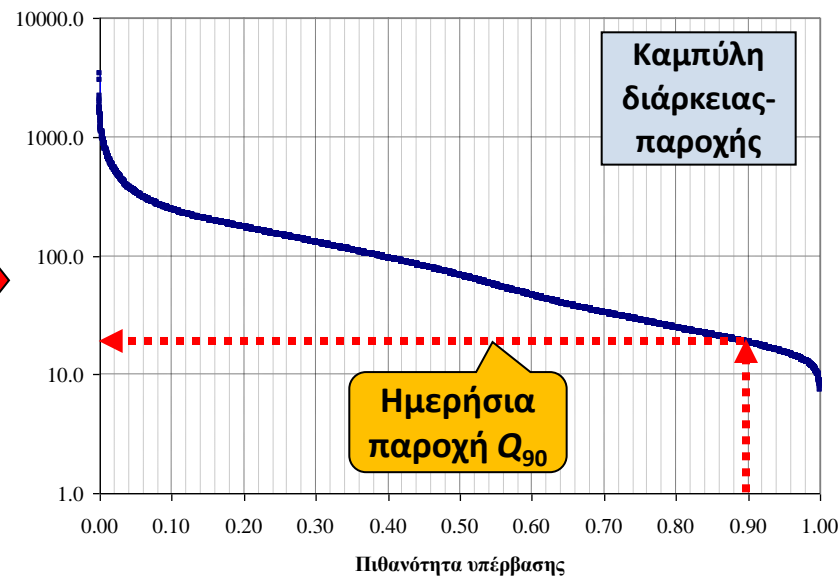
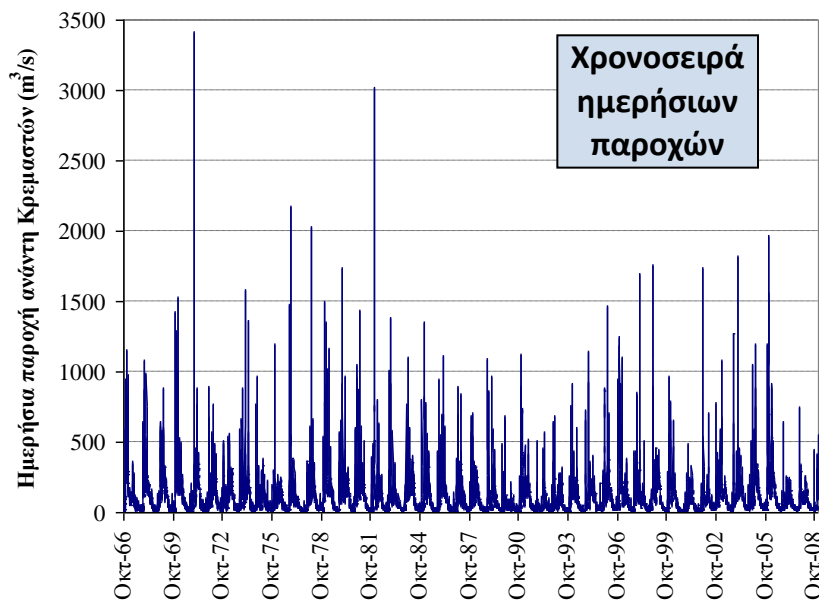
- Η **οικολογική παροχή** (αναφέρεται και ως **παροχή περιβαλλοντικής διατήρησης** ή **ελάχιστη διατηρητέα παροχή**) είναι βασική συνιστώσα των περιβαλλοντικών μέτρων λειτουργίας ταμιευτήρων, και ορίζεται ως η διατήρηση μιας ελάχιστης συνεχούς ροής κατάντη του φράγματος (σταθερής ή εποχιακά μεταβαλλόμενης).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

# Οικολογική ερμηνεία δεικτών ΙΗΑ (συνέχεια)

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

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

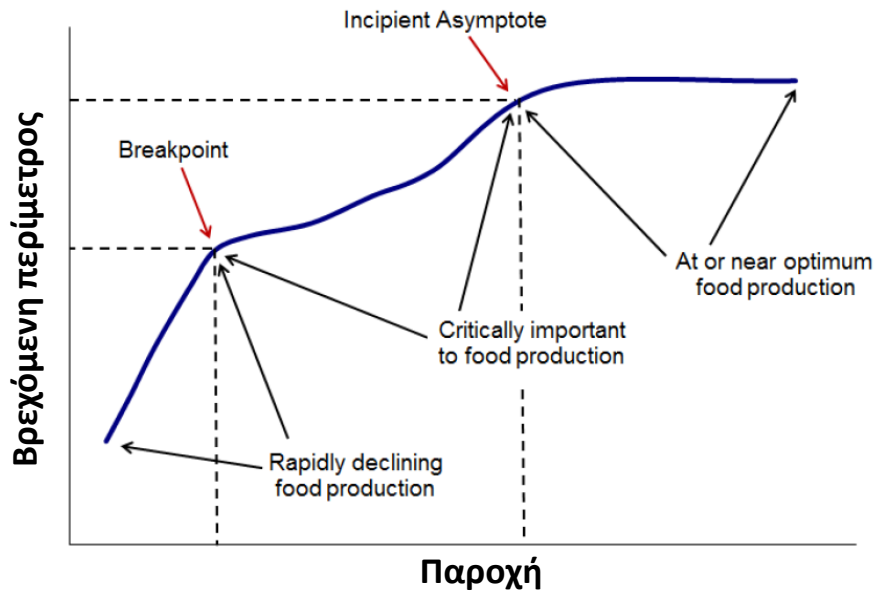
# Υδραυλικές προσεγγίσεις – Μέθοδος σημείου καμπής βρεχόμενης περιμέτρου-παροχής

---

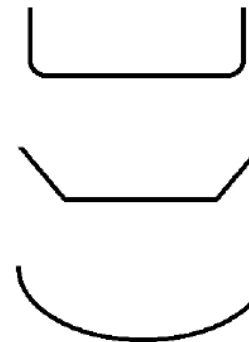
- ❑ Οι υδραυλικές αναλύσεις πραγματοποιούνται σε κρίσιμες διατομές, ιδιαίτερα σε περιοχές μικρού βάθους όπου επιταχύνεται η ροή (riffles) και περιοχές με σημαντικά οικολογικά χαρακτηριστικά, που θεωρούνται περιοριστικοί βιότοποι.
- ❑ Επειδή για δεδομένες συνθήκες ροής τα διαθέσιμα ενδαιτήματα καθορίζονται 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.



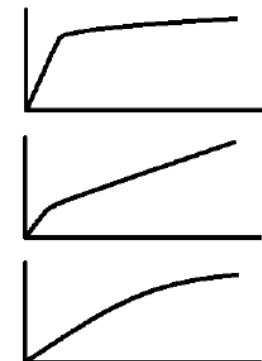
# Οικολογική ερμηνεία σημείων καμπής καμπυλών βρεχόμενης περιμέτρου-παροχής



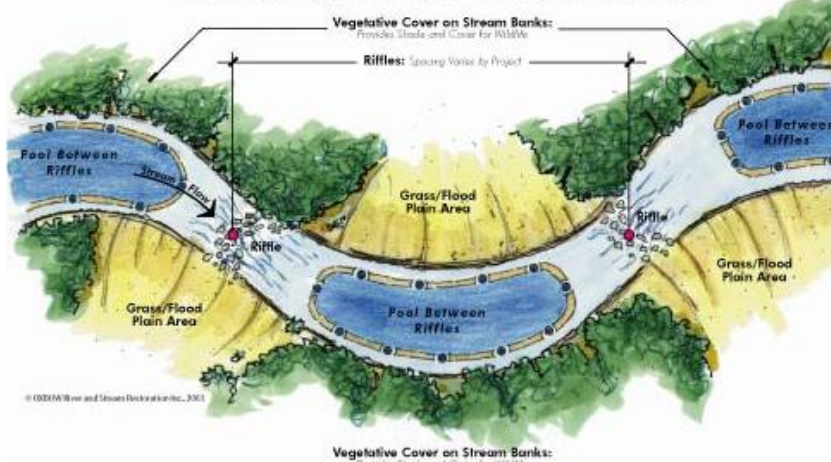
Streambed Cross Section Profile



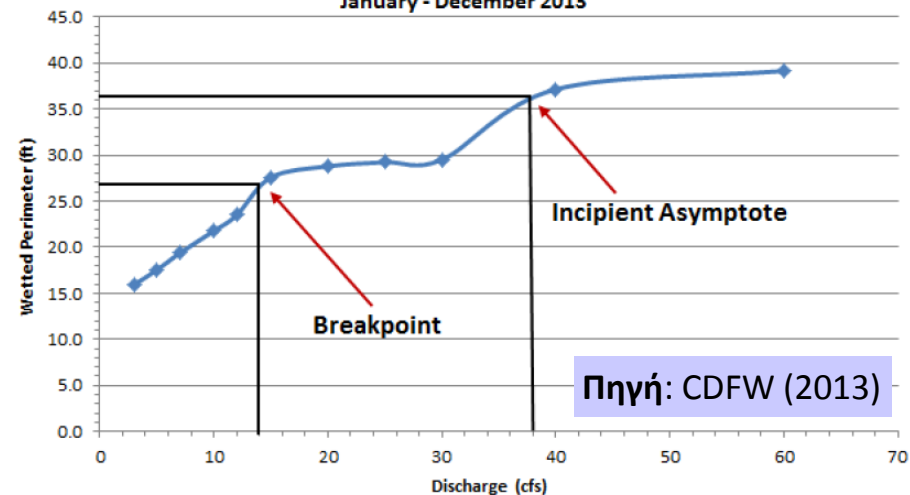
Wetted Perimeter vs Discharge Relationship



TYPICAL RIFFLE AND POOL DESIGN



Wetted Perimeter  
Wet River, Reach A, Riffle Site 1  
January - December 2013





# Παράδειγμα εκτίμησης οικολογικής παροχής στις εκβολές του Αχελώου με διαφορετικές μεθόδους

Μέθοδος	Παροχή (m <sup>3</sup> /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 <sub>95</sub>	18.9	Εκτίμηση με βάση την καμπύλη διάρκειας-ημερήσιων παροχών των ετών 1965-2008
Ποσοστημόριο Q <sub>90</sub>	22.9	
Ποσοστημόριο Q <sub>364</sub>	11.9	
BFM, βασική ροή (Q <sub>b</sub> )	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

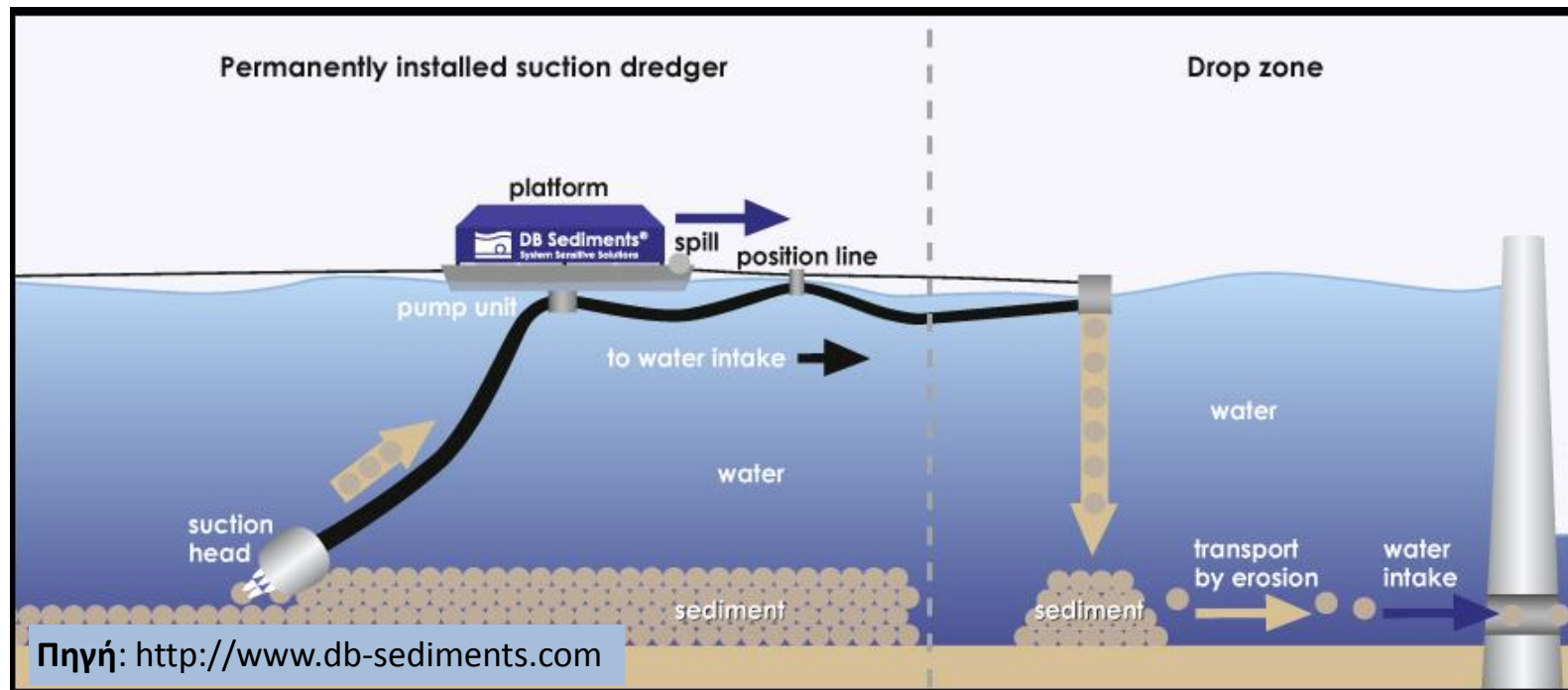
# Υλοποίηση περιορισμών οικολογικής παροχής

- 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

# 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/>

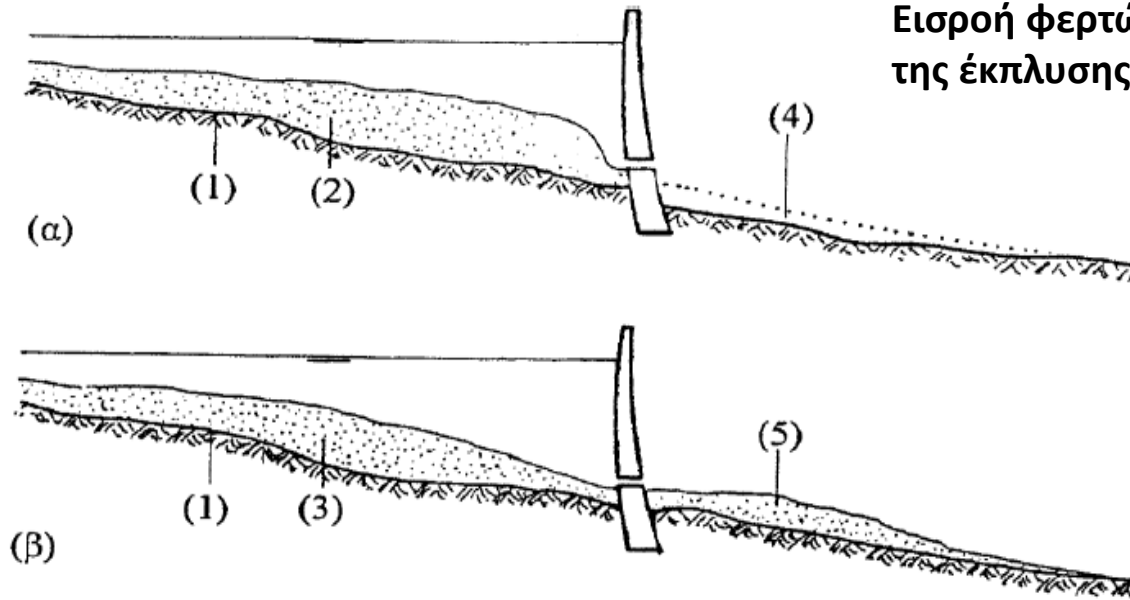


Πηγή: <http://www.seehydropower.eu/meetings/details.php?id=9>



# 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)

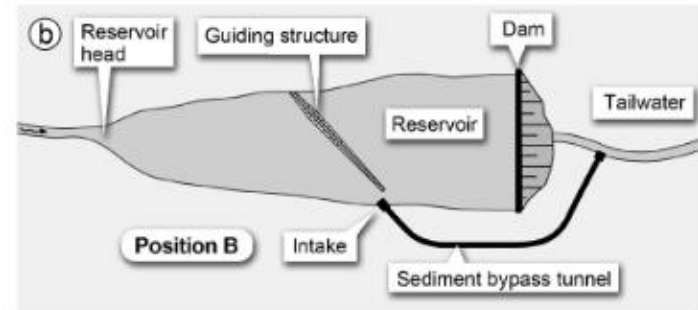
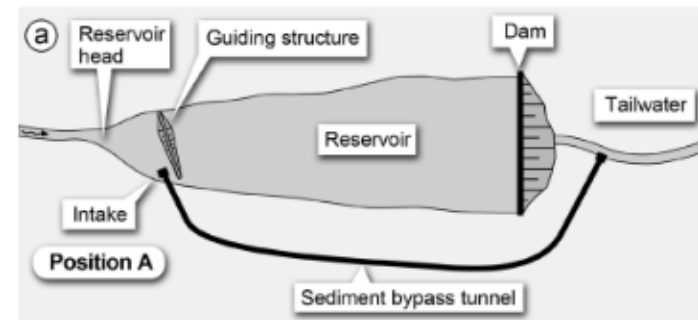
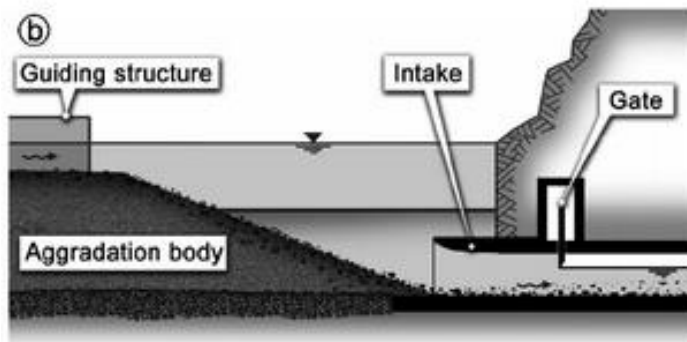
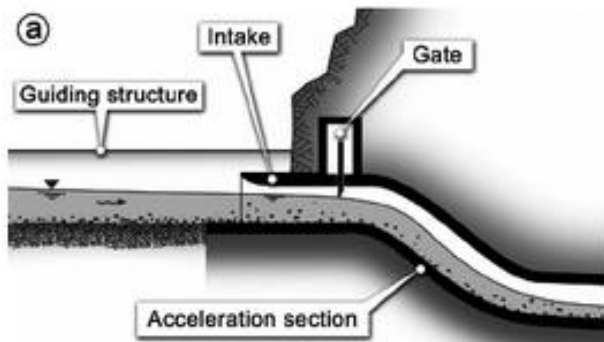


September 30, 2008 (about 6 months after the HFE)

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

# Εκτροπή φερτών με παράκαμψη του ταμιευτήρα (sediment bypass)

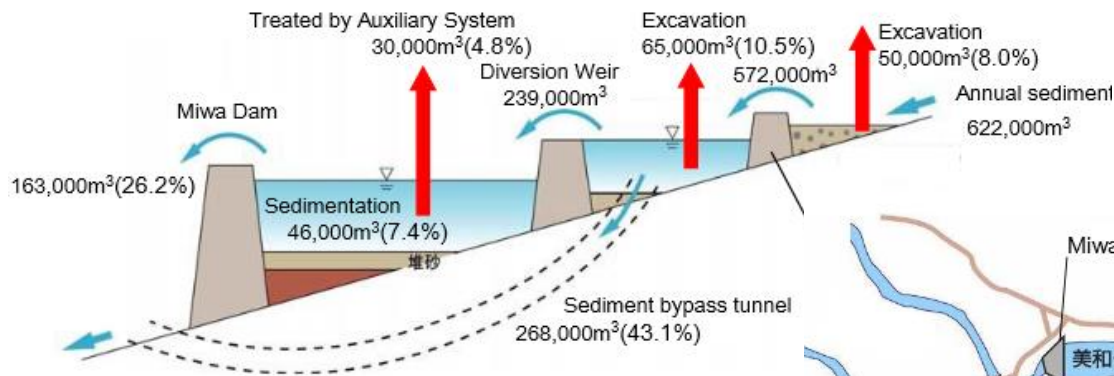
- Σύστημα έργων που επιδιώκει την παράκαμψη του ταμιευτήρα, με απαγωγή μέρους της απορροής και των φερτών (Auel and Boes, 2011).
- Το έργο καθοδήγησης της ροής (φράγμα, αναβαθμός) τοποθετείται είτε στην κεφαλή του ταμιευτήρα (ροή με ελεύθερη επιφάνεια) είτε σε ενδιάμεση θέση (ροή υπό πίεση).



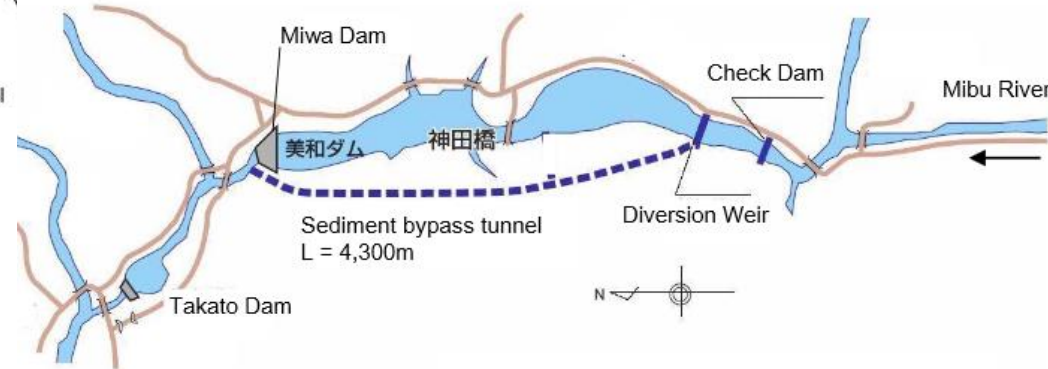
- Η σήραγγα εκτροπής περιλαμβάνει δύο τμήματα:
  - Ανάντη τμήμα, στο οποίο δίνεται ισχυρή κλίση (τυπικό εύρος 15-35%) ώστε να εξασφαλιστεί επαρκής μεταφορική ικανότητα των φερτών (έντονα υπερκρίσιμη ροή, έλεγχος διάβρωσης)
  - Κατάντη τμήμα σήραγγας εκτροπής, ηπιότερης κλίσης (τυπικό εύρος 1-4%)
- Στην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



# Παράδειγμα διαχείρισης φερτών: φράγμα Miwa



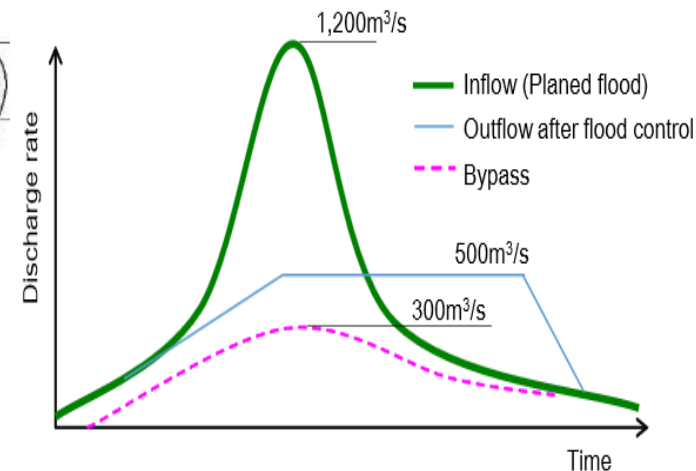
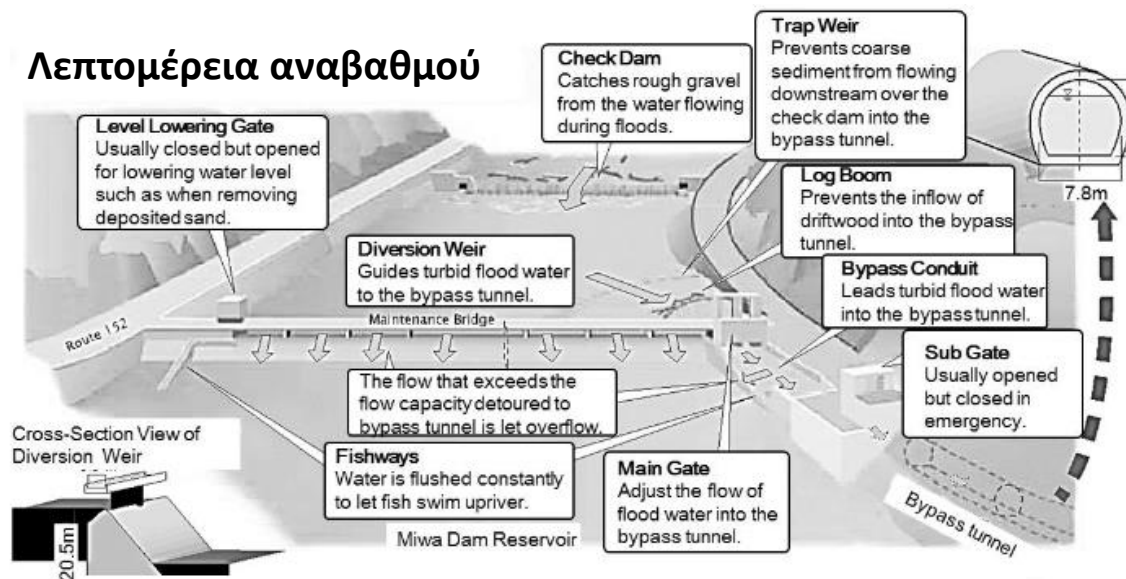
Γενική διάταξη ταμιευτήρα και έργων εκτροπής φερτών



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)

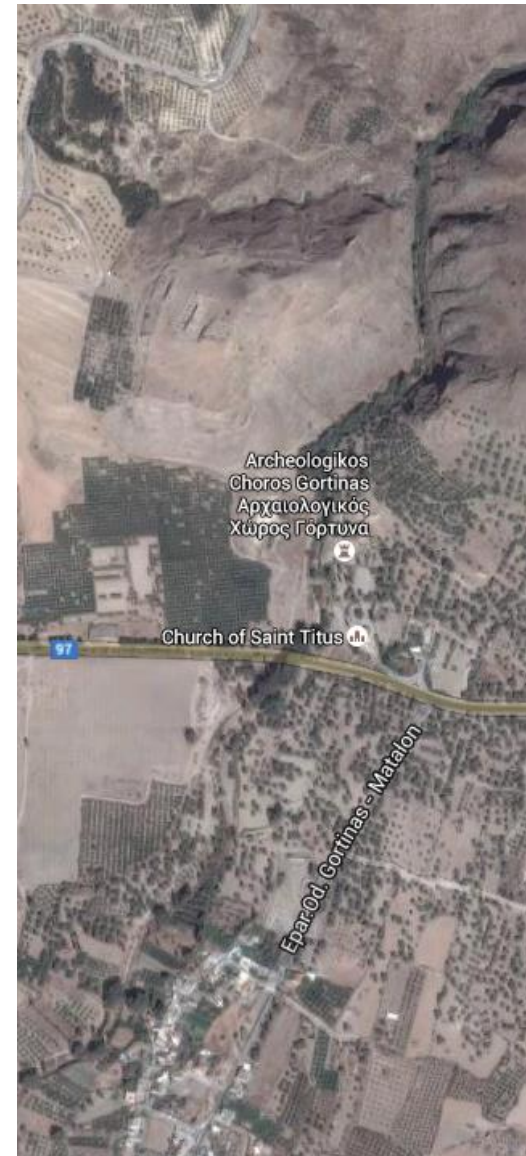
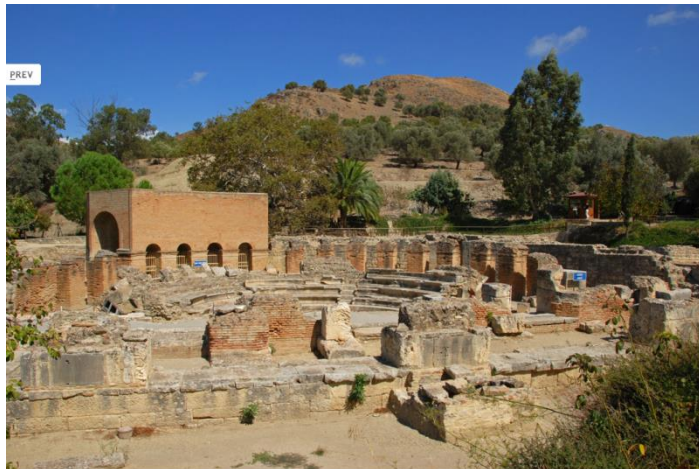


# Αντί επιλόγου: Πόσο παλιά είναι η έννοια της οικολογικής παροχής;

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 ῥοὰν θιυθῆι ῥῆν κατὰ το ῤὸν αὐτὸ, θιυθεμένῳ ἄπατον ἤμην. Τὰν δὲ ῥοὰν λείπεν ὄπτον κατέκει ἀ ἐπ' ἀγορᾶι 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.]



# 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, *Proceedings of 2nd International Symposium on Habitats Hydraulics*. Ecohydraulics 2000, Quebec, Vol. A, 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.

## Βιβλιογραφία (2)

- ❑ Petts, G.E., Instream flow science for sustainable river management, *Journal of the American Water Resources Association*, 45(5), 1071–1086, 2009.
- ❑ 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.
- ❑ 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.