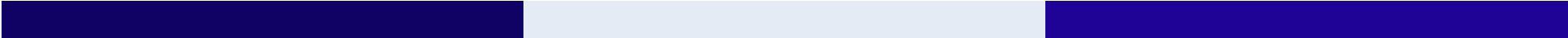


*2<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Φραγμάτων & Ταμιευτήρων  
7-8 Νοεμβρίου 2013, Αθήνα, Αίγλη Ζαπτείου*



**Σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για τη  
διαχείριση υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων –  
Εφαρμογή στο υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας**

---

**Ανδρέας Ευστρατιάδης, Δημήτρης Μπουζιώτας & Δημήτρης Κουτσογιάννης**

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

**Η παρουσίαση είναι διαθέσιμη στη διεύθυνση:**

**<http://itia.ntua.gr/el/docinfo/1407/>**

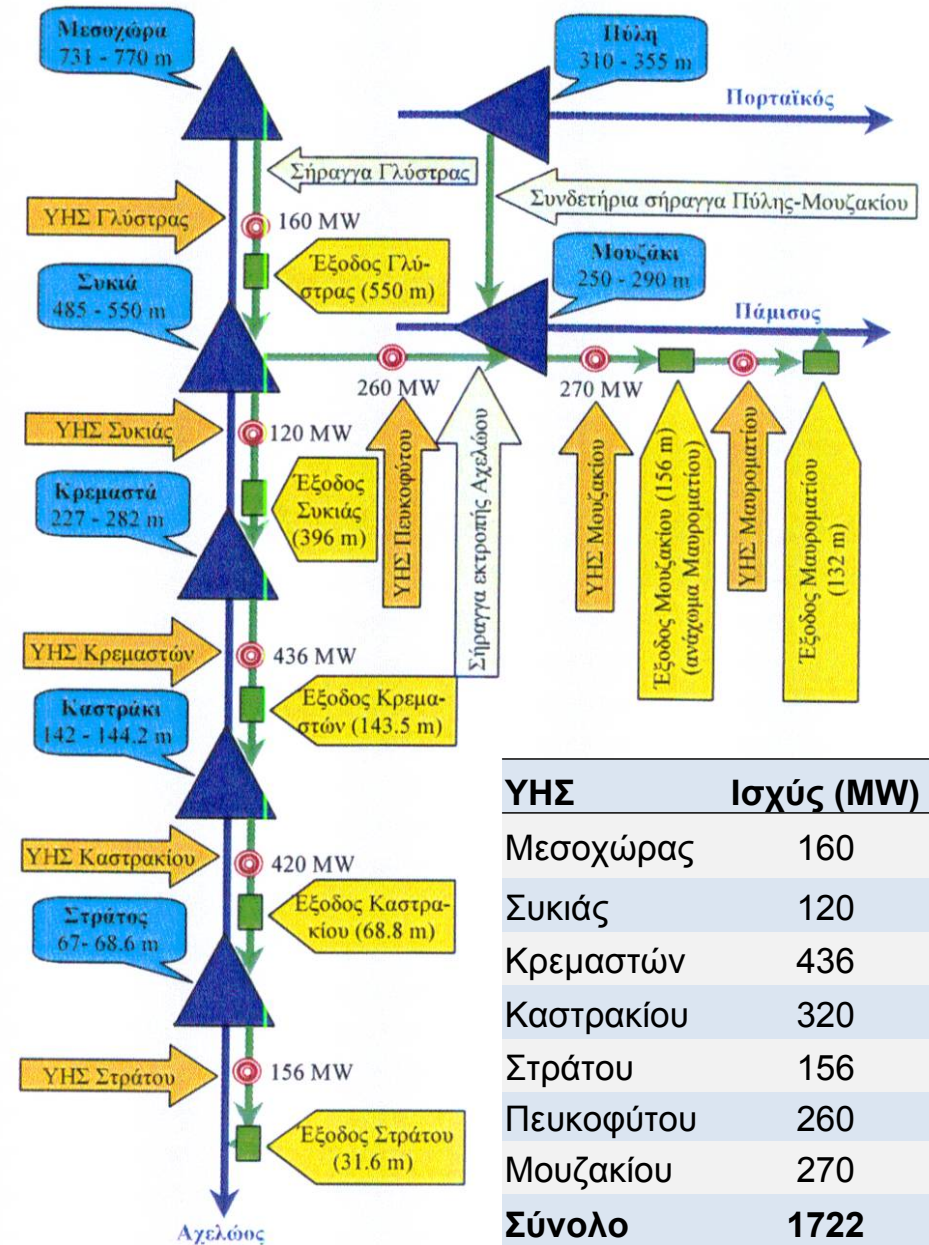
# Αντί προλόγου: Ποια η νέα θέση της Διεθνούς Τράπεζας για τα μεγάλα Υ/Η έργα;

- ❑ Τον Ιούλιο του 2013, η Παγκόσμια Τράπεζα αποφάσισε να επενδύσει και πάλι στα μεγάλα Η/Υ έργα, μετά από 20 χρόνια συστηματικής απόρριψής τους.
- ❑ Στη σχετική έκθεση επισημάνεται ότι στον αναπτυσσόμενο κόσμο μπορεί να αξιοποιηθεί το 75% του διαθέσιμου υδροδυναμικού – ειδικότερα, το 90% στην Υποσαχάρια Αφρική και το 70% στη Νότια Ασία (World Bank, 2013).
- ❑ Στην έκθεση αναγνωρίζεται ότι σε πολλές χώρες η Υ/Η ενέργεια αποτελεί την μεγαλύτερη και πλέον προσιτή ΑΠΕ, και μπορεί να αποτελέσει το μέσο για την διείσδυση άλλων πηγών ανανεώσιμης ενέργειας.
- ❑ Επιπλέον, αναγνωρίζεται η μοναδική ικανότητα της Υ/Η ενέργειας να ανταποκρίνεται άμεσα στη μεταβλητότητα των λοιπών συνιστωσών του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, και η δυνατότητα των μονάδων άντλησης-ταμίευσης για αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας που παράγεται από τις άλλες ΑΠΕ, π.χ. ανεμογεννήτριες.
- ❑ Η ριζική αλλαγή στρατηγικής της Παγκόσμιας Τράπεζας συνάντησε τόσο θετικές (Appleyard, 2013) όσο και έντονα αρνητικές κριτικές (Bosshard, 2013).

Τα πλεονεκτήματα των μεγάλων Υ/Η έργων και ο κομβικός τους ρόλος στο μελλοντικό ενεργειακό τοπίο όπου θα κυριαρχούν οι ΑΠΕ έχουν τονιστεί σε σειρά δημοσιεύσεων της ερευνητικής ομάδας του ΕΜΠ (Koutsoyiannis *et al.*, 2008, 2009; Koutsoyiannis, 2011).

# Υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας

- Το υφιστάμενο σχήμα έργων (Κρεμαστά, Καστράκι, Στράτος) παράγει το 42% της Υ/Η ενέργειας της χώρας (Αργυράκης, 2009).
- Το πλήρες σχήμα θα αποτελέσει το μεγαλύτερο σε ωφέλιμο όγκο (4700 hm<sup>3</sup>) και εγκατεστημένη ισχύ (1.7 GW) υδροενεργειακό σύστημα στην Ελλάδα.
- Ο ετήσιος όγκος εκτροπής έχει μειωθεί από τα 1100 και 600 hm<sup>3</sup> (αρχικός & ενδιάμεσος σχεδιασμός) στα μόλις 250 hm<sup>3</sup>.
- Προβλέπονται περιβαλλοντικοί περιορισμοί στη λειτουργία των ταμιευτήρων, με τη μορφή ελάχιστης διατηρητέας παροχής.
- Για τον ταμιευτήρα Στράτου έχει πρόσφατα ολοκληρωθεί η ειδική τεχνική μελέτη της οικολογικής παροχής, στην οποία έχουν προταθεί η εφαρμογή εποχιακά μεταβαλλόμενης παροχής και τεχνητών πλημμυρών (Κουτσογιάννης κ.ά., 2009; Efstratiadis *et al.*, 2014).



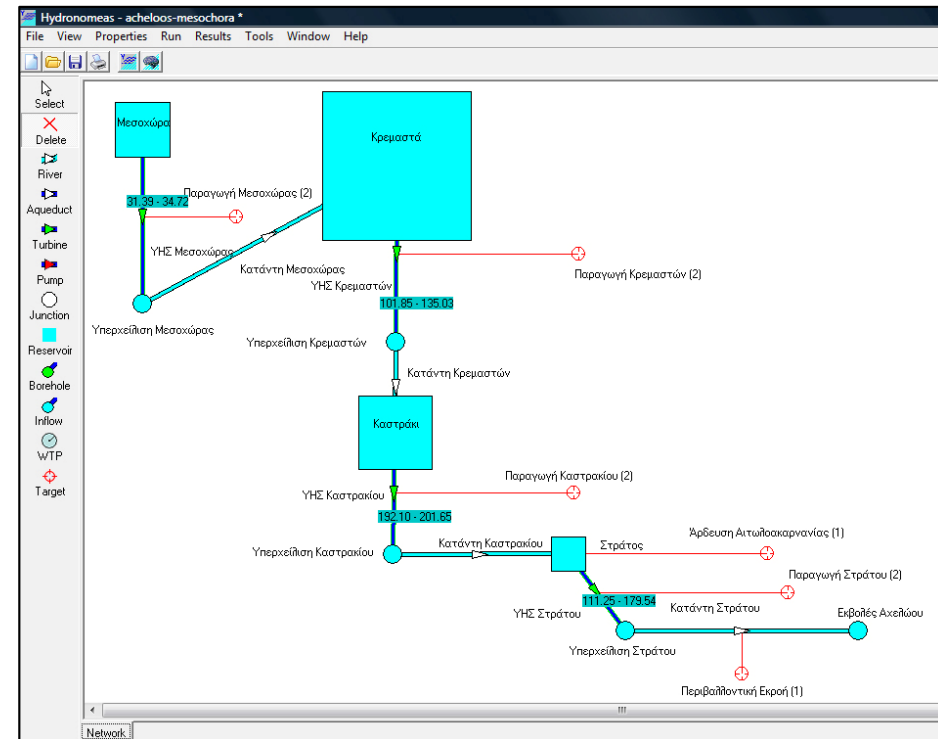
# Τοποθέτηση του προβλήματος

- Υδρολογική αβεβαιότητα, υδροκλιματική μεταβλητότητα
- Μη γραμμική δυναμική, σύνθετη τοπολογία
- Πληθώρα μεταβλητών ελέγχου (ροές νερού και ενέργειας ανά χρονικό βήμα)
- Πληθώρα περιορισμών (φυσικοί και λειτουργικοί)
- Πολλαπλοί και (κατά περίπτωση) αντικρουόμενοι στόχοι (σε προτεραιότητα)
- Συνδυασμός οικονομικών και πιθανοτικών κριτηρίων επίδοσης (αρδευτικό όφελος, αξιοπιστία, πρωτεύουσα ενέργεια)



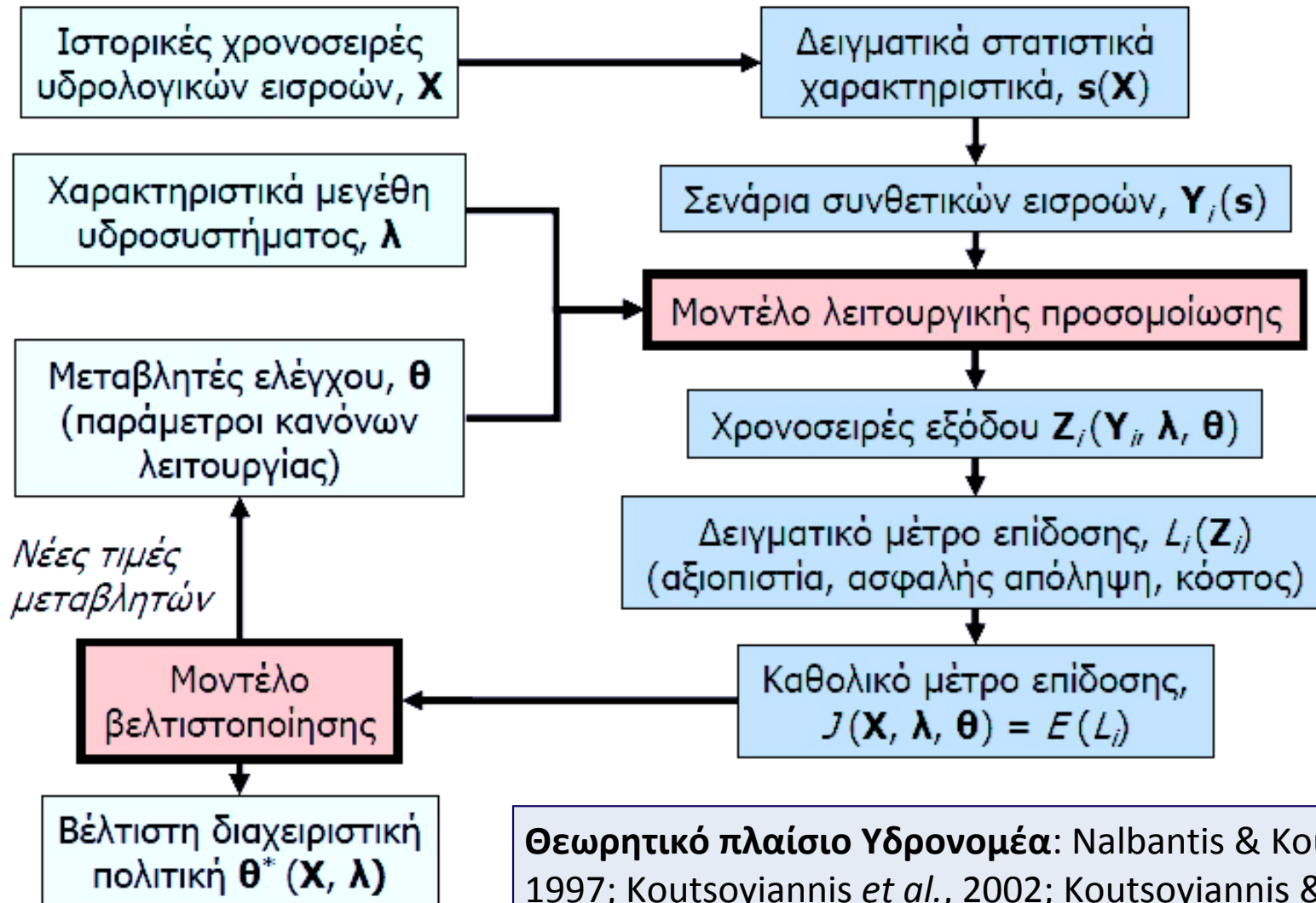
- Υδρολογικές εισροές και απώλειες: στοχαστική προσομοίωση (λογισμικό **Κασταλία**)
- Μοντέλο υδροσυστήματος: πλαίσιο παραμετροποίησης-προσομοίωσης-βελτιστοποίησης (σύστημα υποστήριξης αποφάσεων **Υδρονομέας**)

Ιστοσελίδα: <http://itia.ntua.gr/el/softinfo/4/>



Σχηματοποίηση υδροσυστήματος στον Υδρονομέα

# Εφαρμογή μεθοδολογικού πλαισίου παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση σε υδροσυστήματα



**Θεωρητικό πλαίσιο Υδρονομεία:** Nalbantis & Koutsoyiannis, 1997; Koutsoyiannis *et al.*, 2002; Koutsoyiannis & Economou, 2003; Koutsoyiannis *et al.*, 2003; Efstratiadis *et al.*, 2004

**Πλήρης θεωρητική τεκμηρίωση:** Ευστρατιάδης κ.ά., 2007

# Βελτιστοποίηση Υ/Η παραγωγής

- Ορίζονται ως μεταβλητές ελέγχου προς βελτιστοποίηση οι (σταθεροί ανά χρονικό βήμα) στόχοι παραγωγής ενέργειας  $e^*$  ανά Υ/Η μονάδα (παραμετροποίηση).
- Στο μοντέλο προσομοίωσης, σε κάθε χρονικό βήμα  $t$ , ο στόχος παραγωγής ενέργειας μετασχηματίζεται σε περιορισμό ελάχιστης παροχής, ήτοι:

$$e^* = \psi V_t \Delta h_t \rightarrow V_t \geq e^* / \psi \Delta h_t$$

- Αν  $E_t$  η χρονοσειρά παραγωγής ενέργειας (από προσομοίωση  $n$  χρονικών βημάτων), τότε η αξιοπιστία της ενεργειακής παραγωγής εκτιμάται ως:

$$r_E = P(E \geq e^*) \approx n' / n$$

όπου  $n'$  το πλήθος των βημάτων που παρήχθη ενέργεια τουλάχιστον ίση με  $e^*$ .

- Για δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας  $r_E$  ( $= 0.95 - 0.99$ ), η ενέργεια που παράγεται διακρίνεται σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα.
- Μέτρο επίδοσης – στοχική συνάρτηση (Μπουζιώτας, 2012):
  - Μεγιστοποίηση συνολικής πρωτεύουσας ενέργειας
  - Μεγιστοποίηση μέσου οφέλους παραγωγής ενέργειας  $E[P]$ , όπου:

$$P_t = c_B e_t + c_E \underbrace{\max(0, e_t - e^*)}_{\text{Περίσσεια}} - c_D \underbrace{\max(0, e^* - e_t)}_{\text{Έλλειμμα}}$$

Περίσσεια

Έλλειμμα

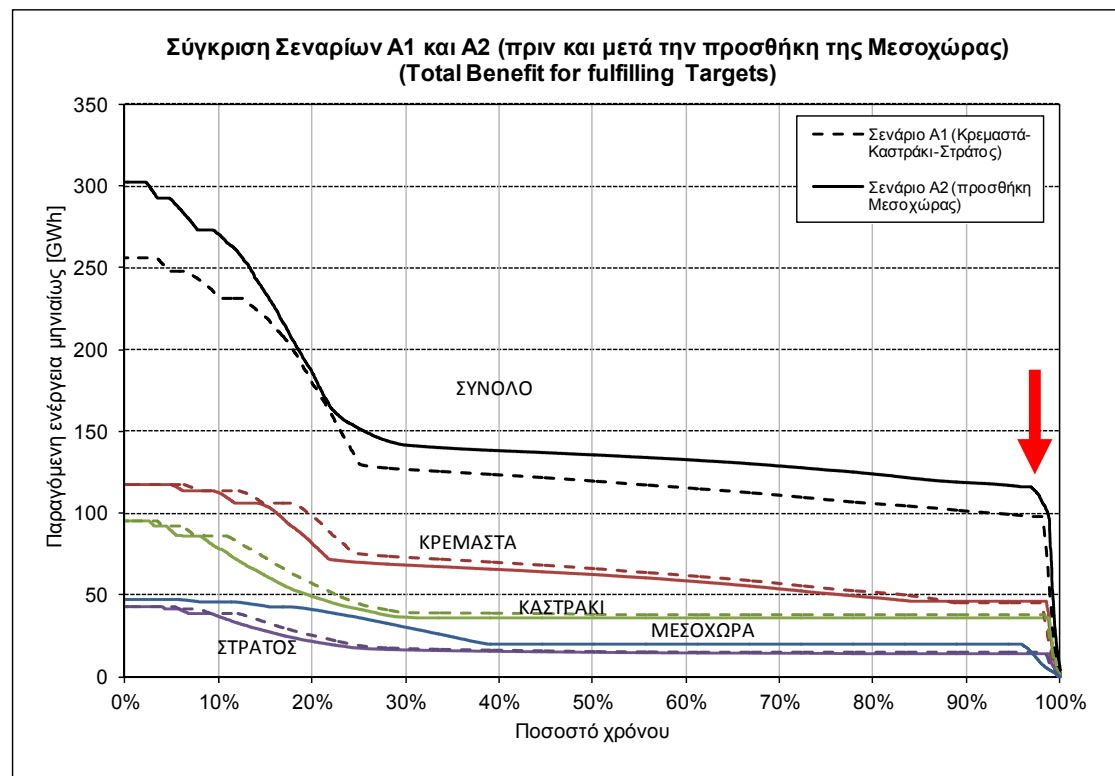
όπου  $c_x$  μοναδιαίο κόστος/όφελος, με  $c_D > c_B > c_E$  (προτείνεται:  $c_B/c_E = 2$ ,  $c_D/c_B = 4$ ).

# Σενάρια που εξετάζονται και λοιπές παραδοχές

- Εξετάζονται τα ακόλουθα σχήματα έργων (Μπουζιώτας, 2012):
  - A1: Υφιστάμενη διάταξη έργων Κάτω Αχελώου (σενάριο αναφοράς).
  - A2: Πλήρης λειτουργική ένταξη του ταμιευτήρα Μεσοχώρας, ως έργου κεφαλής.
  - E1: Ολοκλήρωση και λειτουργία έργων εκτροπής (ταμιευτήρας Συκιάς στον Αχελώο, ταμιευτήρες Μουζακίου και Πύλης Θεσσαλία), με συμβατικούς ΥΗΣ.
  - E2: Πλήρες σχήμα έργων εκτροπής, με διατάξεις άντλησης-ταμίευσης στη σήραγγα Πευκόφυτου και κατάντη του Μουζακίου.
- Παράγονται συνθετικές χρονοσειρές απορροής, βροχόπτωσης και εξάτμισης (σε κάθε ταμιευτήρα) μήκους 1000 ετών, με βάση ιστορικά δείγματα 30 ως 50 ετών.
- Εξετάζεται ένα εύρος ετήσιου όγκου εκτροπής από 0 έως 1200 hm<sup>3</sup> για άρδευση της Θεσσαλίας, ενώ στην Αιτωλοακαρνανία λαμβάνεται αρδευτική ζήτηση 545 hm<sup>3</sup>.
- Ενεργειακά και οικονομικά μεγέθη:
  - Για τη διάκριση της πρωτεύουσας ενέργειας λαμβάνεται επίπεδο αξιοπιστίας 99%.
  - Θεωρείται μοναδιαίο όφελος 0.045 και 0.023 €/kWh για παραγωγή πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ενέργειας, αντίστοιχα.
  - Θεωρείται δωρη λειτουργία των αντλιών, με μοναδιαίο κόστος 0.022 €/kWh.
  - Θεωρείται ισοδύναμο όφελος από την χρήση αρδευτικού νερού ίσο με 0.060 €/m<sup>3</sup>.

# Διερεύνηση προσθήκης έργων Μεσοχώρας

- Εντοπίστηκε η διαχειριστική πολιτική που μεγιστοποιεί το συνολικό μέσο ετήσιο όφελος από την παραγόμενη ενέργεια, πριν (A1) και μετά (A2) την προσθήκη των έργων της Μεσοχώρας.
- Προκύπτει ότι η λειτουργία της Μεσοχώρας θα έχει πολύ θετική επίδραση, συνεισφέροντας στην μέση ετήσια ενεργειακή παραγωγή με επιπλέον 225 GWh, που αντιστοιχεί σε **9.5 Μ€ καθαρού ενεργειακού οφέλους**.
- Η ένταξη της Μεσοχώρας δεν επηρεάζει τη δυνατότητα παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας των λοιπών Υ/Η έργων.



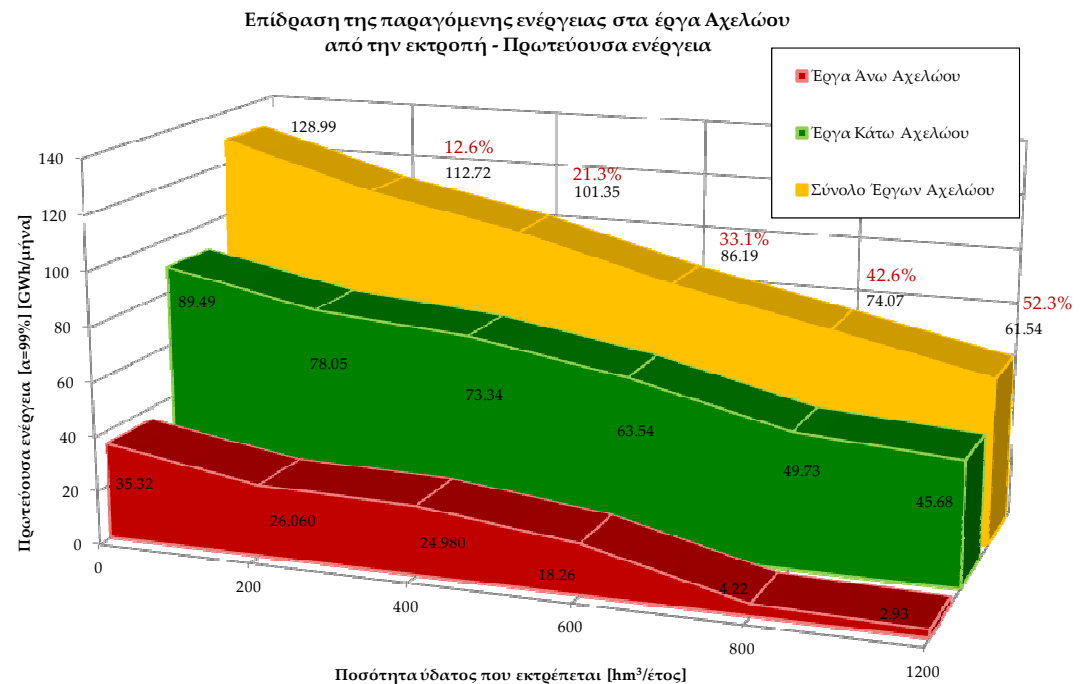
	Μέση ετήσια ενέργεια (GWh)	Πρωτεύουσα ενέργεια (GWh)	Μέσο ετήσιο όφελος (Μ€)
A1	1661	1175	61.5
A2	1886	1287	71.0

**Οικονομική ζημία λόγω μη λειτουργίας της Μεσοχώρας επί  $T$  έτη =  $9.5 T$  εκατ. ευρώ**



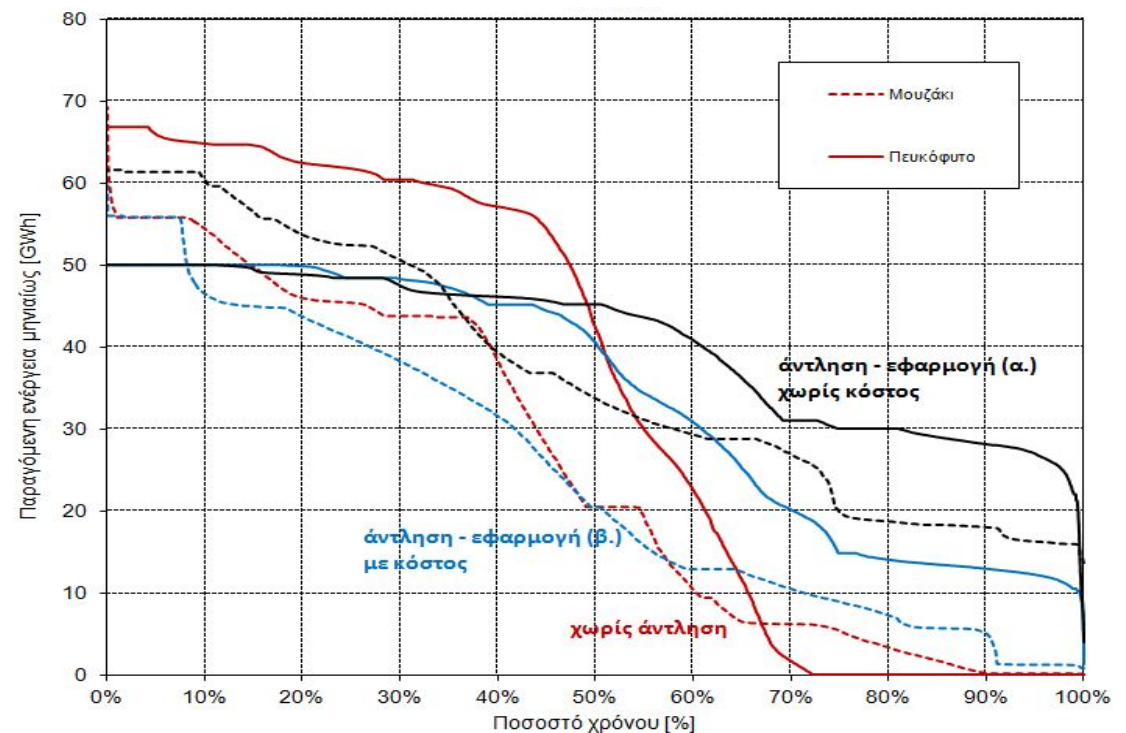
# Διερεύνηση επιπτώσεων εκτροπής στην παραγόμενη ενέργεια του υφιστάμενου σχήματος έργων

- Εξετάζονται διάφορες τιμές της ποσότητας εκτροπής (0, 200, 400, 600, 800, 1200 hm<sup>3</sup>) με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της συνολικά παραγόμενης πρωτεύουσας ενέργειας.
- Σε όλα τα σενάρια θεωρείται τμήμα της διάταξης E1 (χωρίς έργα στη Θεσσαλική πλευρά), στην οποία η ποσότητα νερού που εκτρέπεται από τον ταμιευτήρα Συκιάς αντιμετωπίζεται ως στόχος αρδευτικής απόληψης.
- Για εκτροπής 600 hm<sup>3</sup> ετησίως, η πρωτεύουσα ενέργεια θα μειωθεί κατά 312 GWh, ήτοι ποσοστό 29%, σε σχέση με αυτή που μπορεί να παραχθεί από τα υπάρχοντα έργα.
- Για εκτροπή μεγαλύτερη των 600 hm<sup>3</sup>, οι ΥΗΣ Μεσοχώρας και Συκιάς χάνουν κάθε ικανότητα παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας.
- Οι περιορισμοί οικολογικής παροχής κατόντη των φραγμάτων Μεσοχώρας, Συκιάς και Στράτου καλύπτονται με πολύ μικρή πιθανότητα αστοχίας (<2%) για όλες τις τιμές εκτροπής, εκτός των 1200 hm<sup>3</sup>.

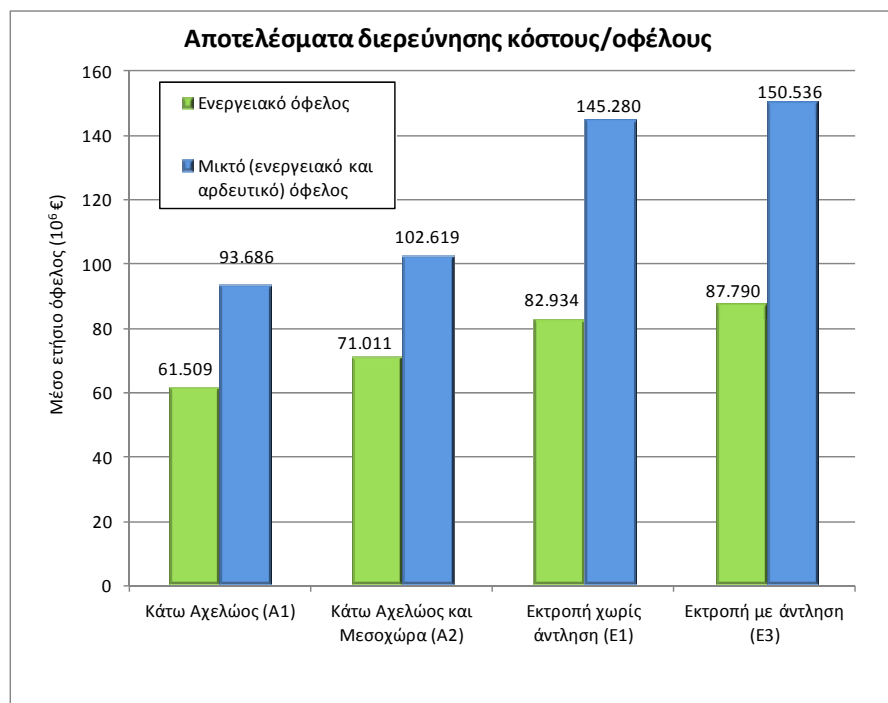


# Διερεύνηση διατάξεων εκτροπής και δυνατοτήτων άντλησης-ταμίευσης (σενάρια E1 και E2)

- Θεωρείται στόχος ετήσιας εκτροπής **600 hm<sup>3</sup>**, που ικανοποιείται με ποσοστό αστοχίας μικρότερο του 1%.
- Αν και η συμβατική (χωρίς άντληση) εκτροπή νερού θα έχει αρνητικές επιπτώσεις στην παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια (καθώς αφαιρείται ένα ποσοστό των διαθέσιμων εισροών στους ταμιευτήρες του Κάτω Αχελώου), η διάταξη E2 όχι μόνο ισοσκελίζει αυτή την απώλεια αλλά και αυξάνει σημαντικά την πρωτεύουσα ενέργεια.
- Οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί στον Αχελώο (Μεσοχώρα, Συκιά, Στράτος) και τον Πάμισο (Πύλη) ικανοποιούνται με ποσοστά αστοχίας μικρότερα του 2%.
- Συνυπολογίζοντας το ενεργειακό και ισοδύναμο γεωργικό όφελος, εκτιμάται ότι το συνολικό μέσο ετήσιο όφελος του πλήρους σχήματος έργων θα φτάσει στα **150 Μ€**.



# Συγκριτικά αποτελέσματα



	Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (GWh)	Ετήσια πρωτεύουσα ενέργεια (GWh)	Μέσο ετήσιο ενεργειακό όφελος (Μ€)	Μέσο ετήσιο συνολικό όφελος (Μ€)
<b>Υφιστάμενο σχήμα (A1)</b>	1661	1175	61.5	93.7
<b>Πλήρες σχήμα (E2)</b>	2760	1759	87.8	150.5
<b>Διαφορά</b>	66%	50%	43%	61%

Τα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με παλαιότερες αναλύσεις, στις οποίες εφαρμόστηκαν προηγούμενες εκδοχές της μεθοδολογίας (Κουτσογιάννης, 1996; Ευστρατιάδης & Ζερβός, 1999).

# Αντί επιλόγου: Το υδrosύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας ως συνδυασμένο τεχνικό και πολιτικό πρόβλημα

---

- Μερική εκτροπή Αχελώου:
  - Έργο αρδευτικό; (όπως αρχικά εξαγγέλθηκε και σχεδιάστηκε)
  - Έργο περιβαλλοντικό; (όπως σήμερα προβάλλεται)
  - Έργο πολλαπλού σκοπού, με **βασικό άξονα την ενέργεια;**
- Έργα Μεσοχώρας (ολοκληρωμένα εδώ και μία δεκαετία):
  - Έχουν σχέση με την εκτροπή του Αχελώου;
  - Έχουν αρνητική επίδραση στο κατάντη σύστημα;
  - Τι έχουμε κερδίσει από τη μη λειτουργία των έργων;
- Σήραγγα εκτροπής (σχεδόν ολοκληρωμένη):
  - Πόσο συμφέρουσα είναι η χρήση της για λίγους μήνες του χρόνο, με περιορισμένη μόνο αξιοποίηση της παροχετευτικότητάς της;
  - Πώς αλλάζει δραστικά η λειτουργία της με την προσθήκη των έργων στη Θεσσαλία;
  - Πώς αλλάζει δραστικά η λειτουργία της με την προσθήκη αντλιοστροβίλων;
- Περιβάλλον και οικοσυστήματα στον Αχελώο:
  - Είναι η υφιστάμενη κατάσταση στον κάτω ρου ικανοποιητική;
  - Πώς θα είναι το μελλοντικό σκηνικό αν τηρούνται οι περιβαλλοντικοί όροι;

# Βιβλιογραφία και αναφορές (1)

---

- Appleyard, D., World Bank announces renewed support for large hydropower, *Renewable Energy World International*, 29 May 2013 (<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2013/05/world-bank-back-in-large-hydro>).
- Bosshard P., World Bank returns to big dams, *International Rivers*, 5 Sep. 2013 (<http://www.internationalrivers.org/resources/world-bank-returns-to-big-dams-8077>).
- Efstratiadis, A., A. Tegos, A. Varveris, & D. Koutsoyiannis, Assessment of environmental flows under limited data availability – Case study of Acheloos River, Greece, *Hydrol. Sci. J.*, doi:10.1080/02626667.2013.804625, 2014.
- Efstratiadis, A., D. Koutsoyiannis, & D. Xenos, Minimising water cost in the water resource management of Athens, *Urb. Wat. J.*, 1(1), 3–15, 2004.
- Koutsoyiannis D. & A. Economou, Evaluation of the parameterisation-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems. *Wat. Resour. Res.*, 39(6), 1170, 2003.
- Koutsoyiannis, D., A. Efstratiadis, & G. Karavokiros, A decision support tool for the management of multi-reservoir systems, *J. Amer. Wat. Resour. Assoc.*, 38(4), 945–958, 2002.
- Koutsoyiannis, D., A. Montanari, H. F. Lins, & T.A. Cohn, Climate, hydrology and freshwater: towards an interactive incorporation of hydrological experience into climate research—DISCUSSION of “The implications of projected climate change for freshwater resources and their management”, *Hydrol. Sci. J.*, 54 (2), 394–405, 2009.
- Koutsoyiannis, D., C. Makropoulos, A. Langousis, S. Baki, A. Efstratiadis, A. Christofides, G. Karavokiros, & N. Mamassis, Climate, hydrology, energy, water: recognizing uncertainty and seeking sustainability, *Hydrol. Ear. Sys. Sci.*, 13, 247–257, 2009.
- Koutsoyiannis, D., G. Karavokiros, A. Efstratiadis, N. Mamassis, A. Koukouvinos, & A. Christofides, A decision support system for the management of the water resource system of Athens. *Phys. Chem. Earth*, 28(14-15), 599-609, 2003.
- Koutsoyiannis, D., Scale of water resources development and sustainability: Small is beautiful, large is great, *Hydrol. Sci. J.*, 56 (4), 553–575, 2011.
- Nalbantis I., & D. Koutsoyiannis, A parametric rule for planning and management of multiple-reservoir systems. *Wat. Resour. Res.*, 33(9), 2165–2177, 1997.
- World Bank, *Toward a sustainable energy future for all: directions for the World Bank Group’s energy sector*, World Bank, Washington DC, 2013 (<http://documents.worldbank.org/curated/en/2013/07/18016002/toward-sustainable-energy-future-all-directions-world-bank-group%C2%92s-energy-sector>).

## Βιβλιογραφία και αναφορές (2)

---

- Αντωνρόπουλος Π. & Συνεργάτες, *Μελέτη διαχείρισης των υδάτων λεκάνης απορροής Αχελώου π., Μέρος Α΄: Υδατικό δυναμικό*, Αθήνα, ΥΠΑΝ, 2006.
- Αργυράκης, Ι., *Εκμετάλλευση των υδροηλεκτρικών σταθμών ως έργων πολλαπλού σκοπού, Η συμβολή των υδροηλεκτρικών έργων στον ενεργειακό σχεδιασμό της χώρας*, ΤΕΕ & ΤΕΕ – Τμ. Ηπείρου, Ιωάννινα, 2009 ([library.tee.gr/digital/m2380/m2380\\_argirakis.pdf](http://library.tee.gr/digital/m2380/m2380_argirakis.pdf)).
- ΕΥΔΕ Αχελώου & ENVECO, *Συνολική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων της Εκτροπής Αχελώου*, Αθήνα, ΥΠΕΧΩΔΕ, 1995.
- Ευστρατιάδης Α. & Δ. Κουτσογιάννης, *Κασταλία (Έκδοση 2.0) – Σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών*, ΕΜΠ-ΤΥΠΥΘΕ, 2004.
- Ευστρατιάδης, Α., Γ. Καραβοκυρός, και Δ. Κουτσογιάννης, *Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδατικών συστημάτων «ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ», Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: ΝΑΜΑ Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε., Τεύχος 9, ΕΜΠ-ΤΥΠΕΡ, Αθήνα, 2007.
- Ευστρατιάδης, Α., και Ν. Ζερβός, *Βέλτιστη διαχείριση συστημάτων ταμιευτήρων - Εφαρμογή στο σύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας*, Διπλωματική εργασία, 181 σελίδες, ΤΥΠΕΡ-ΕΜΠ, Αθήνα, Μάρτιος 1999.
- Μπουζιώτας, Δ., *Ανάπτυξη πλαισίου βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής στο λογισμικό Υδρονομέας – Διερεύνηση στο υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας*, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ-ΤΥΠΕΡ, 2012.
- Κουτσογιάννης Δ., *Μελέτη λειτουργίας των ταμιευτήρων στα πλαίσια της Γενικής Διάταξης Έργων Εκτροπής Αχελώου προς τη Θεσσαλία*, ΥΠΕΧΩΔΕ/ΕΥΔΕ Αχελώου, 1996.
- Κουτσογιάννης, Δ., Ν. Μαμάσης, & Α. Ευστρατιάδης, *Διερεύνηση οικολογικής παροχής, Ειδική Τεχνική Μελέτη για την Οικολογική Παροχή από το Φράγμα Στράτου*, Εργοδότης: ΔΕΗ, Ανάδοχος: ECOS Μελετητική, 2009.
- Λαζαρίδης Λ. & Σ. Μίχας, *Αξιοποίηση των κατασκευαζόμενων έργων του φράγματος Συκιάς στον Αχελώο και της σήραγγας μεταφοράς προς Θεσσαλία για παραγωγή ενέργειας*, 2011.
-