



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

# Ανάπτυξη πλαισίου βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής στο λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ

## Διερεύνηση στο υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας

Διπλωματική Εργασία

Δημήτρης Μπουζιώτας

Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτρης Κουτσογιάννης

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

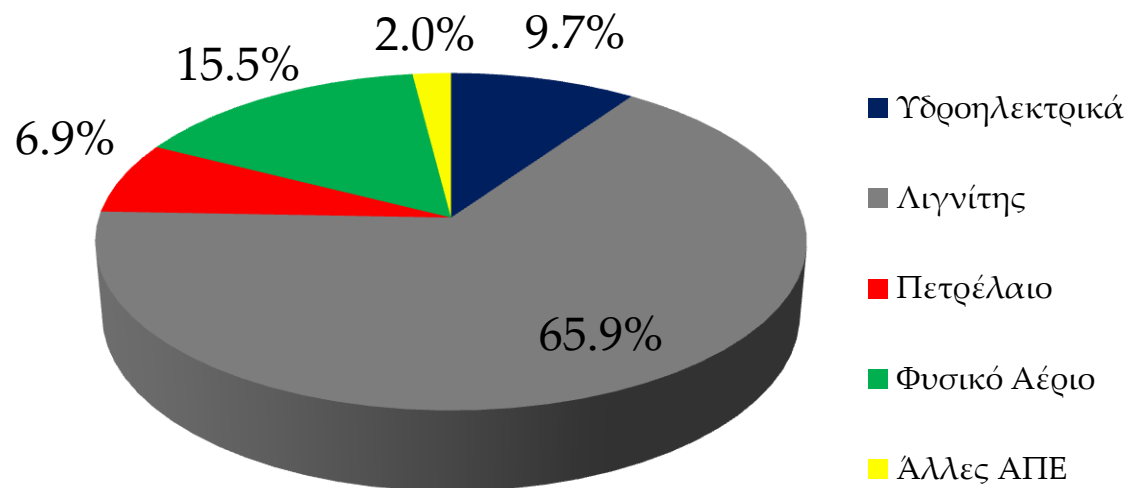
# Διάρθρωση της Παρουσίασης

- Εισαγωγή
  - Προβληματισμοί
  - Στόχος της εργασίας
- Το μεθοδολογικό πλαίσιο του λογισμικού ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ
- Το υδροσύστημα Αχελώου - Θεσσαλίας
- Ανάπτυξη των δυνατοτήτων βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ
  - Ενεργειακές συναρτήσεις
  - Συναρτήσεις κόστους/οφέλους
  - Ανάλυση ευαισθησίας
- Εφαρμογές στο σύστημα μελέτης
- Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

# Εισαγωγή

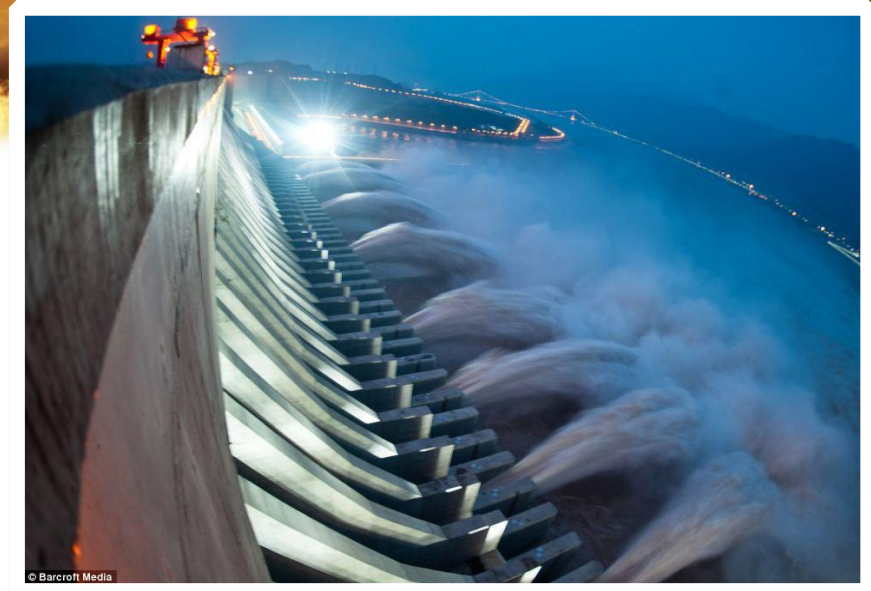
- Ο ρόλος της υδροηλεκτρικής ενέργειας στο ενεργειακό τοπίο
  - ανάγκη αύξησης της παραγωγής ανανεώσιμης, καθαρής ενέργειας
  - εκμετάλλευση της ιδιότητας των μεγάλων ταμιευτήρων να λειτουργούν ως φυσικές μπαταρίες αποθήκευσης ενέργειας, μέσω των συστημάτων άντλησης – ταμίευσης (Koutsoyiannis 2011)

Παραγωγή ενέργειας στην Ελλάδα  
(μέσοι όροι ετών 2001-2006)



## Προβληματισμοί

- Ανάδειξη της ανάγκης λειτουργίας περισσότερων μεγάλων ΥΗΕ στον Ελληνικό χώρο
- Αναγκαιότητα της ανάπτυξης των κατάλληλων εργαλείων διαχείρισής τους



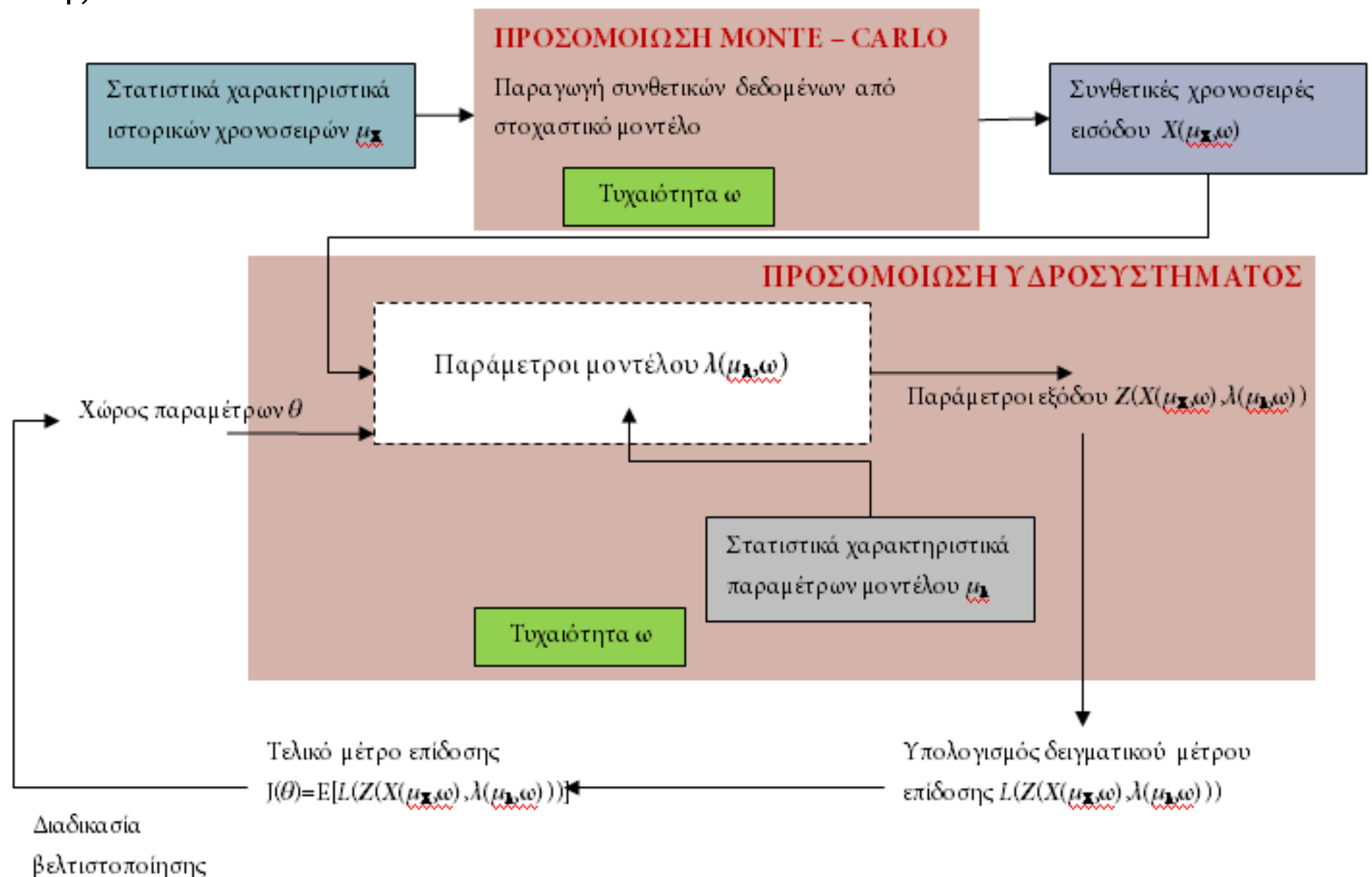
Three Gorges Dam, China

# Στόχος της εργασίας

- Η ανάπτυξη ενός μεθοδολογικού πλαισίου διαχείρισης της υδροηλεκτρικής παραγωγής με το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ.
- Αξιοποίηση του υπάρχοντος δυναμικού του προγράμματος, με ένταξη περισσότερων εργαλείων βελτιστοποίησης.
- Διερεύνηση στο ιδιαίτερα σημαντικό υδροσύστημα Αχελώου – Θεσσαλίας.

# Η σύζευξη προσομοίωσης - βελτιστοποίησης

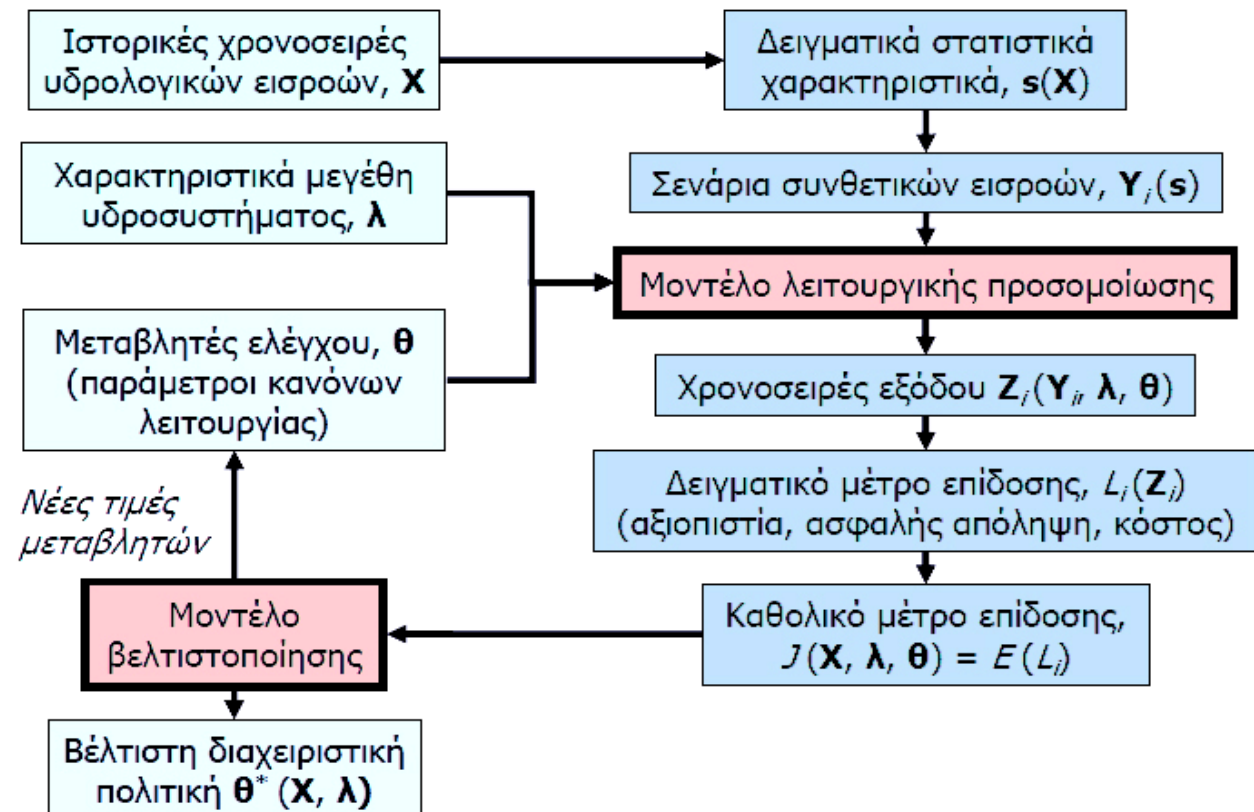
- ❑ Χώρος παραμέτρων λειτουργίας  $\theta$ : αποτελεί τις μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος βελτιστοποίησης και παράλληλα στοιχεία εισόδου για το μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος.
- ❑ Στοχαστική συνάρτηση  $J(\theta)$ : η τιμή της προκύπτει από την εκτέλεση προσομοίωσης του υδrosυστήματος.
- ❑ Στοχαστική (Monte Carlo) προσομοίωση για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών εισόδου του μοντέλου προσομοίωσης.





# Το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ

- Αποτελεί ένα ολοκληρωμένο Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων (Σ.Υ.Α) για τη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων.
- Προϊόν πολυετούς εμπειρίας του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- Υλοποιεί το μεθοδολογικό πλαίσιο Παραμετροποίηση – Προσομοίωση – Βελτιστοποίηση (Koutsoyiannis and Economou 2003).
- Έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία στην επιχειρησιακή διαχείριση του υδροσυστήματος των Αθηνών (Efstratiadis et al. 2004)



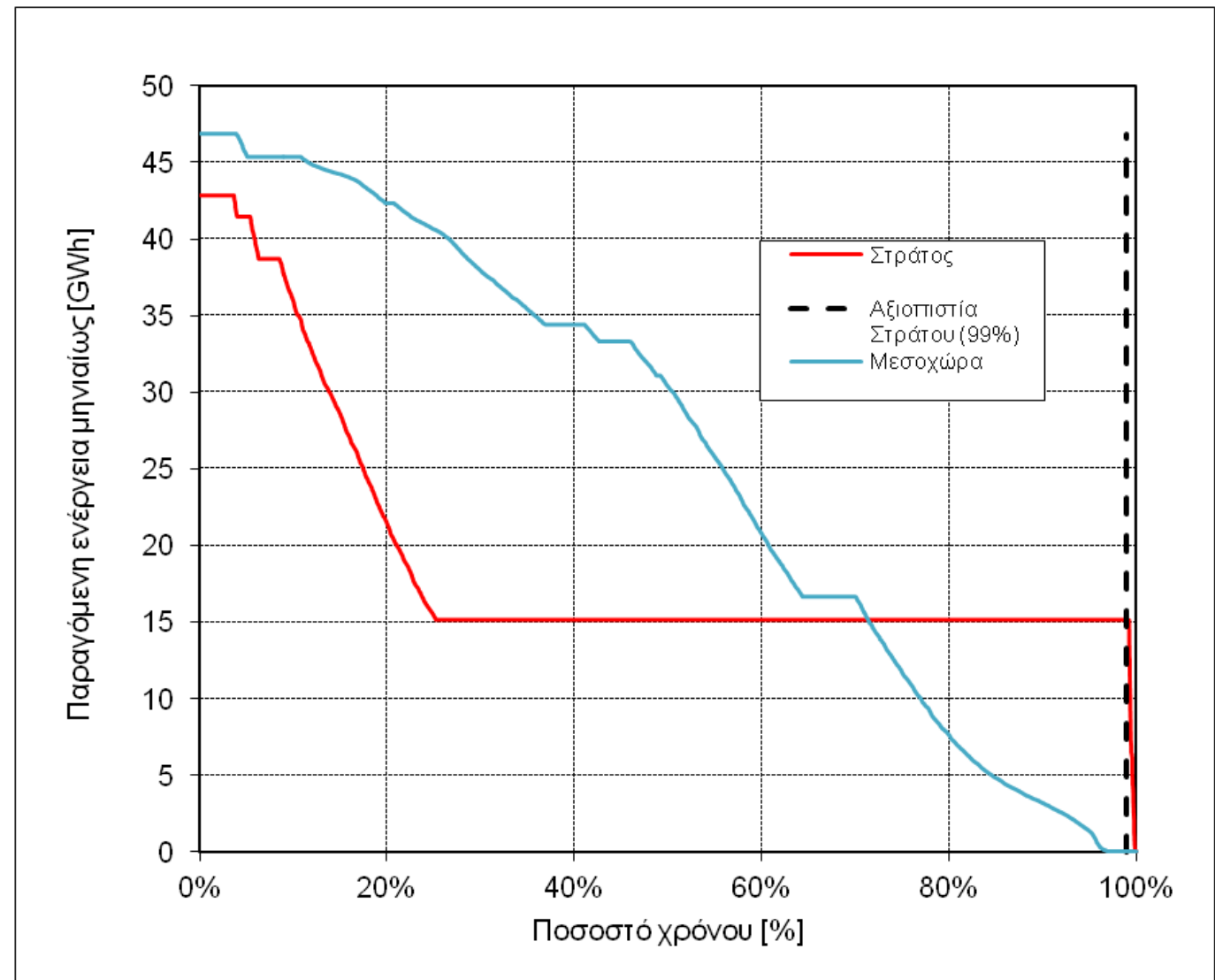
# Αξιοπιστία και ενεργειακή παραγωγή

Πρωτεύουσα ενέργεια (firm energy): η εγγυημένη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από το σύστημα με πολύ μικρή διακοπή για το σύνολο της περιόδου λειτουργίας του

□ Σύνδεση πρωτεύουσας ενέργειας με επίπεδο αξιοπιστίας

□ Στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ:

- Χρονοσειρά μηνιαίας ενεργειακής παραγωγής ανά έργο και για το σύστημα – προκύπτει από προσομοίωση 1000 ετών (συνθετικές χρονοσειρές εισόδου).
- Οπτικοποίηση της ενεργειακής παραγωγής: καμπύλες διάρκειας
- Ομαλή εικόνα ενεργειακής παραγωγής: «plateau» παραγωγής ενέργειας



# Το υδροσύστημα Αχελώου – Θεσσαλίας

## Βασικά χαρακτηριστικά:

- ❑ Επτά έργα ταμίευσης μεγάλης κλίμακας (5 στον Αχελώο, 2 θεσσαλικά)
- ❑ Σύνθετη τοπολογία (έργα σε σειρά και παράλληλα)
- ❑ Πολλαπλοί, αντικρουόμενοι στόχοι (υδροηλεκτρική παραγωγή, κάλυψη αρδευτικών αναγκών Θεσσαλίας & Αιτωλοακαρνανίας, αντιπλημμυρική προστασία, διατήρηση περιβαλλοντικής ροής)
- ❑ Συνολική εγκατεστημένη ισχύς που ξεπερνά τα 1700 MW

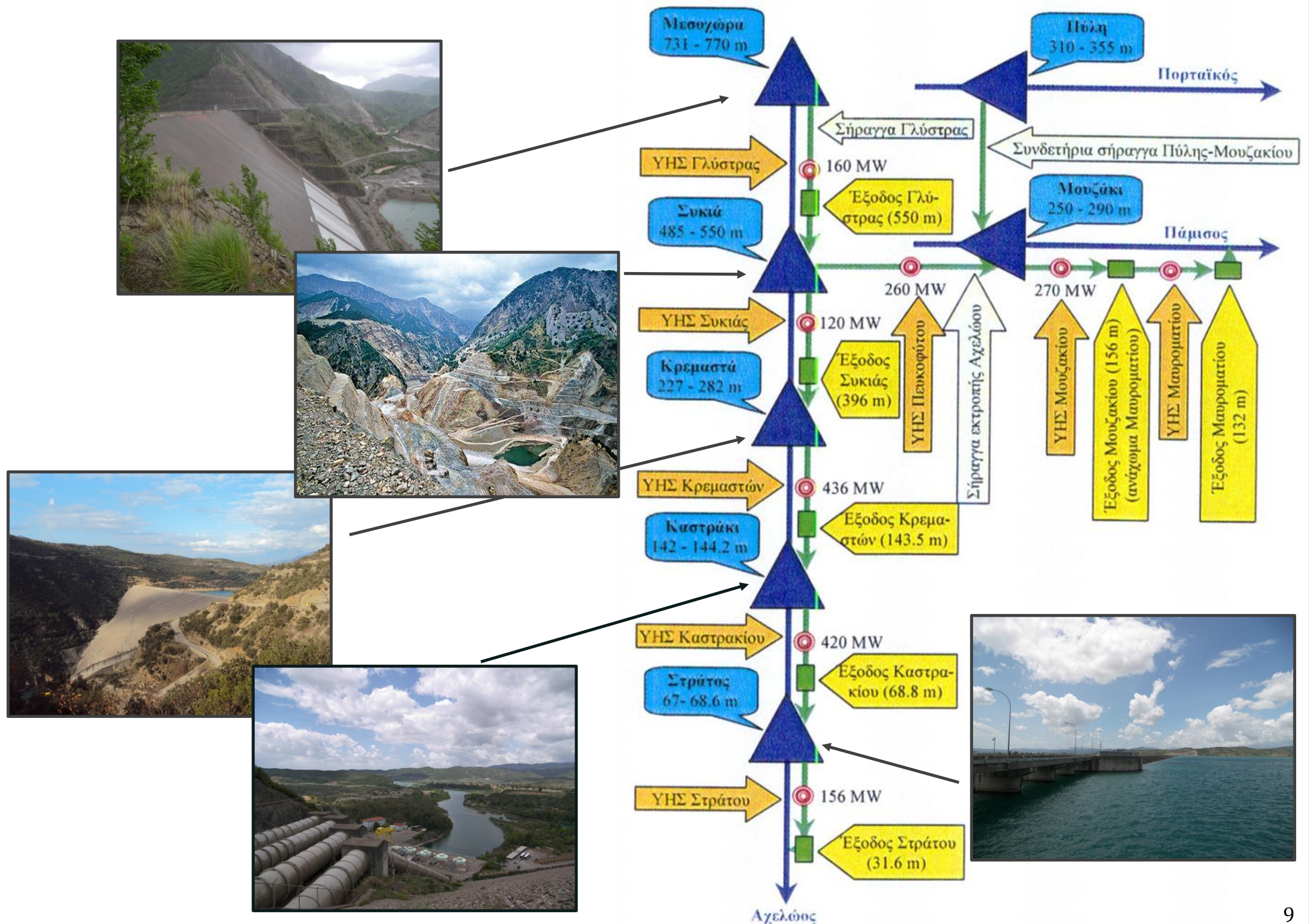
## Ζητήσεις και περιορισμοί:

- ❑ Αρδευτικές ανάγκες Αιτωλοακαρνανίας ( $544 \text{ hm}^3/\text{year}$ ) και Θεσσαλίας ( $600 \text{ hm}^3/\text{year}$ )
- ❑ Διατήρηση περιβαλλοντικής ροής κατάντη Στράτου με μηνιαία διακύμανση (Varveris et al. 2010)
- ❑ Περιορισμοί σταθερής ροής  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$  μεταξύ Μεσοχώρας και Συκιάς και  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  κατάντη Συκιάς. Περιβαλλοντική παροχή  $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$  στον Πάμισο.

Έργο	Εγκατεστημένη Ισχύς [MW]
ΥΗΣ Γλύστρας (Μεσοχώρα)	160
ΥΗΣ Συκιάς	120
ΥΗΣ Κρεμαστών	436
ΥΗΣ Καστρακίου	320
ΥΗΣ Στράτου	156
ΥΗΣ Πευκοφύτου	260
ΥΗΣ Μουζακίου	270
Σύνολο	1722



# Το υδροσύστημα Αχελώου – Θεσσαλίας



# Τα σενάρια μελέτης

Για τις ανάγκες της εργασίας δημιουργήθηκαν έξι σχήματα έργων στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, τα οποία καλύπτουν διαφορετικές εκδοχές έργων πριν και μετά την εκτροπή.

- Ανταποκρίνονται σε εναλλακτικές πιθανές διατάξεις
- Δημιουργήθηκαν σπονδυλωτά, από την πιο απλή στην πιο σύνθετη τοπολογία δικτύου.

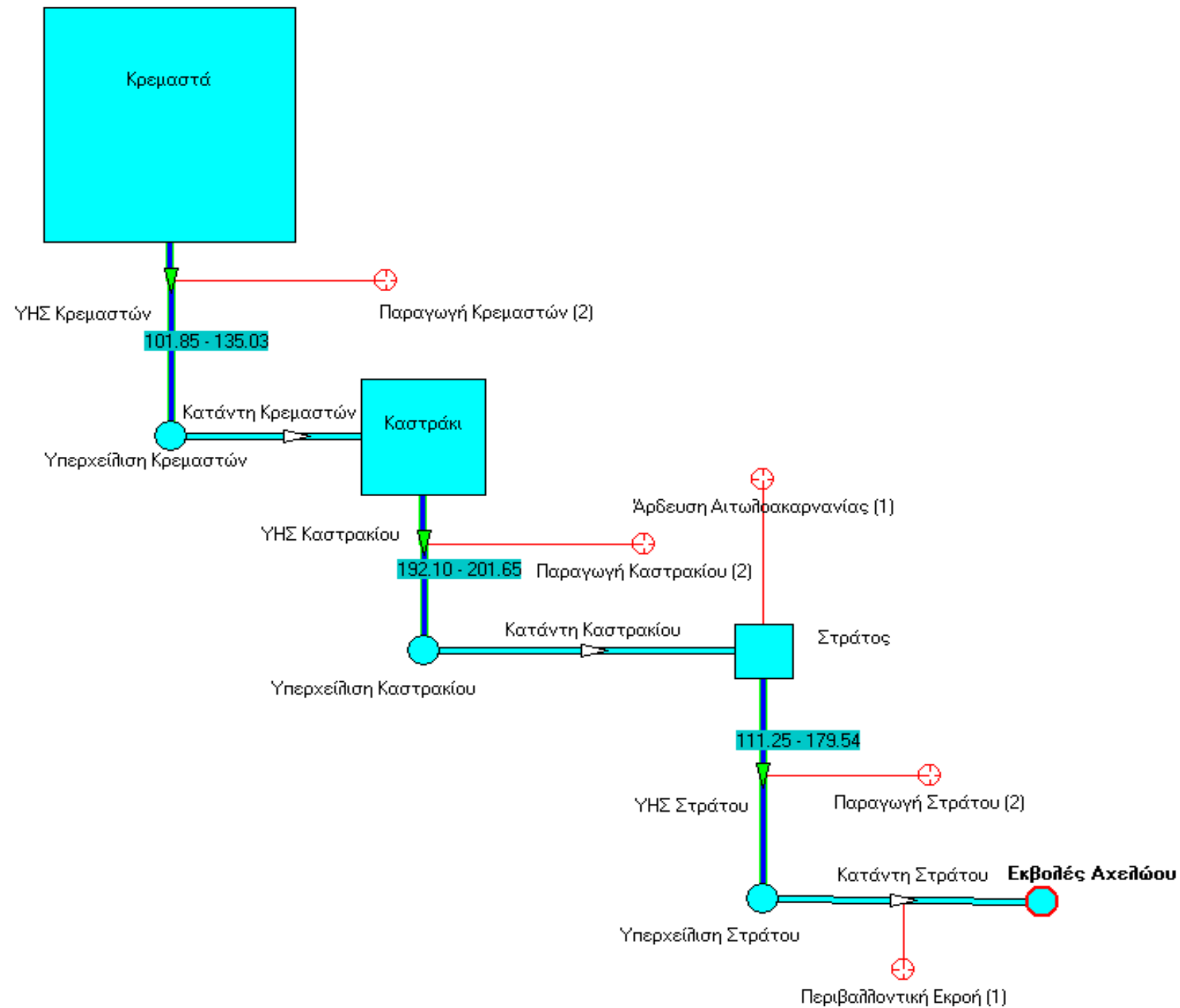
Σενάρια υδροσυστήματος Αχέλωου:

- Σενάριο A1 (υφιστάμενη διάταξη έργων κάτω Αχελώου)
- Σενάριο A2 (ένταξη της Μεσοχώρας στο υφιστάμενο σύστημα)
- Σενάριο A3 (προσθήκη Μεσοχώρας και Συκιάς στα υφιστάμενα έργα κάτω Αχελώου, με στόχο εκτροπής για άρδευση στη Συκιά)

Σενάρια υδροσυστήματος Αχελώου – Θεσσαλίας (μετά την εκτροπή):

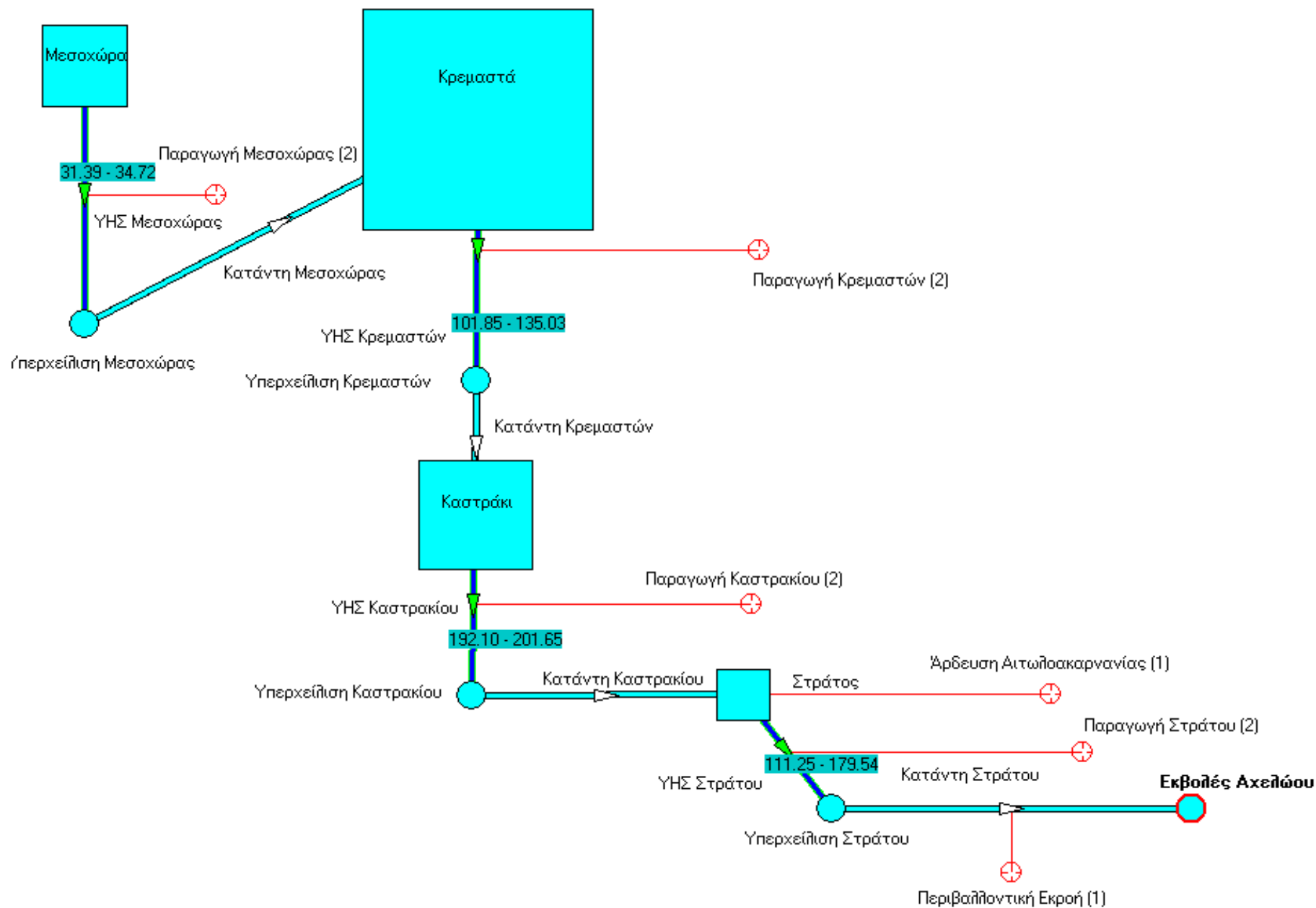
- Σενάριο E1 (εκτροπή με συμβατική διάταξη)
- Σενάριο E2 (εκτροπή και αντλιοστρόβιλος στον ΥΗΣ Πευκοφύτου μόνο)
- Σενάριο E3 (εκτροπή – πλήρες σχήμα άντλησης – ταμίευσης)

# Σενάριο Α1 (Σενάριο κάτω Αχελώου)

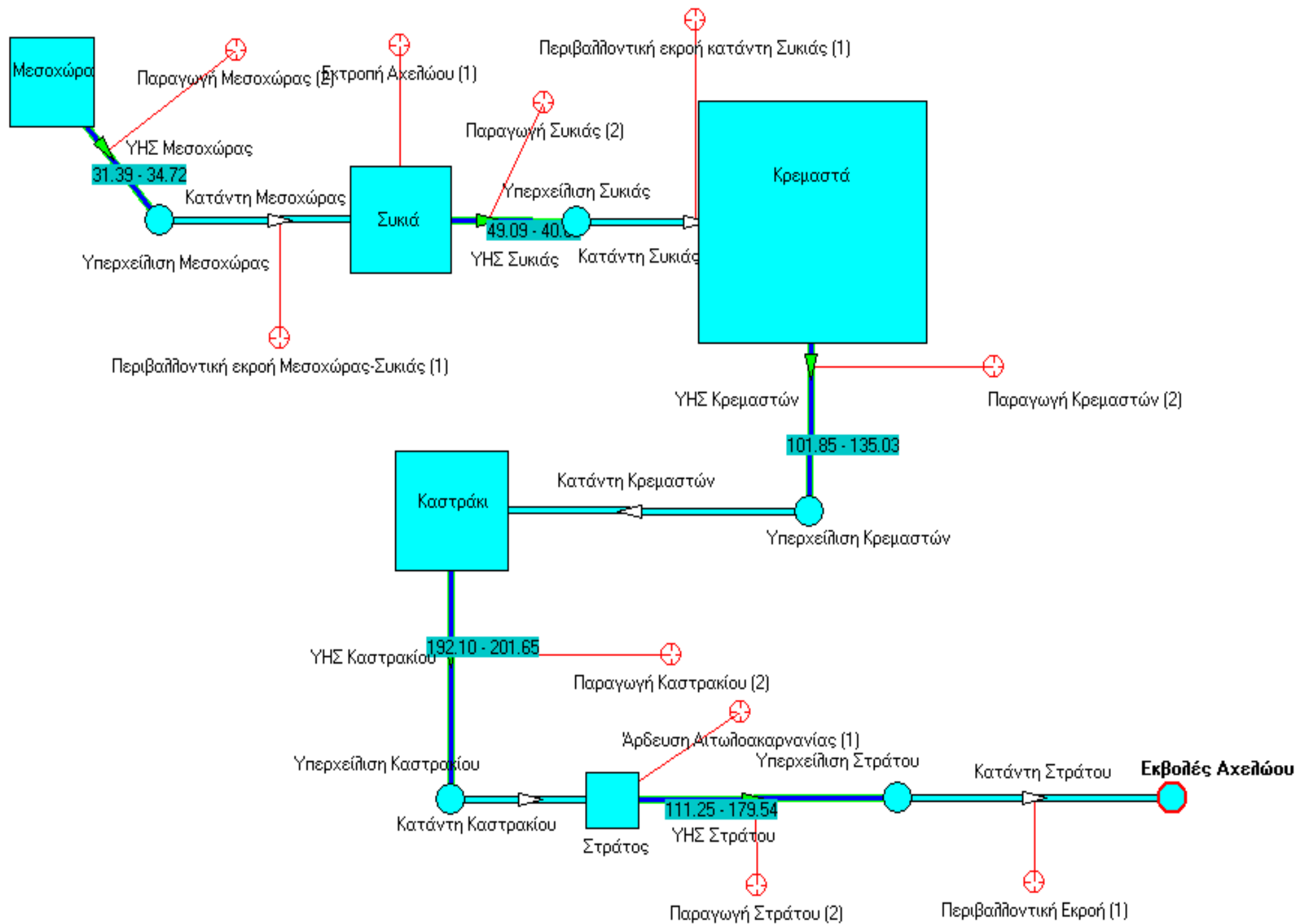




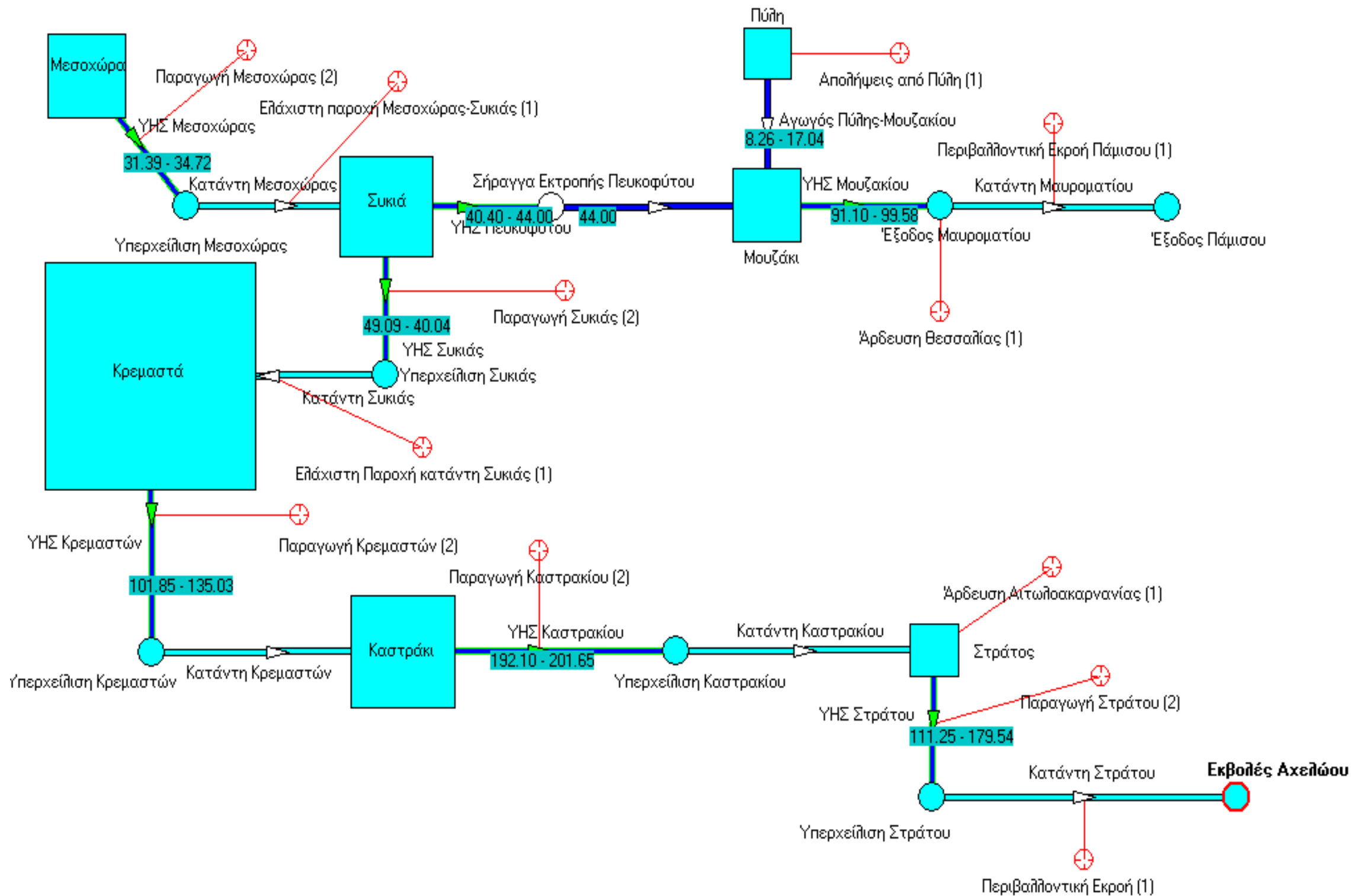
# Σενάριο Α2 (Σενάριο Μεσοχώρας)



# Σενάριο Α3 (Σενάριο Συκιάς)

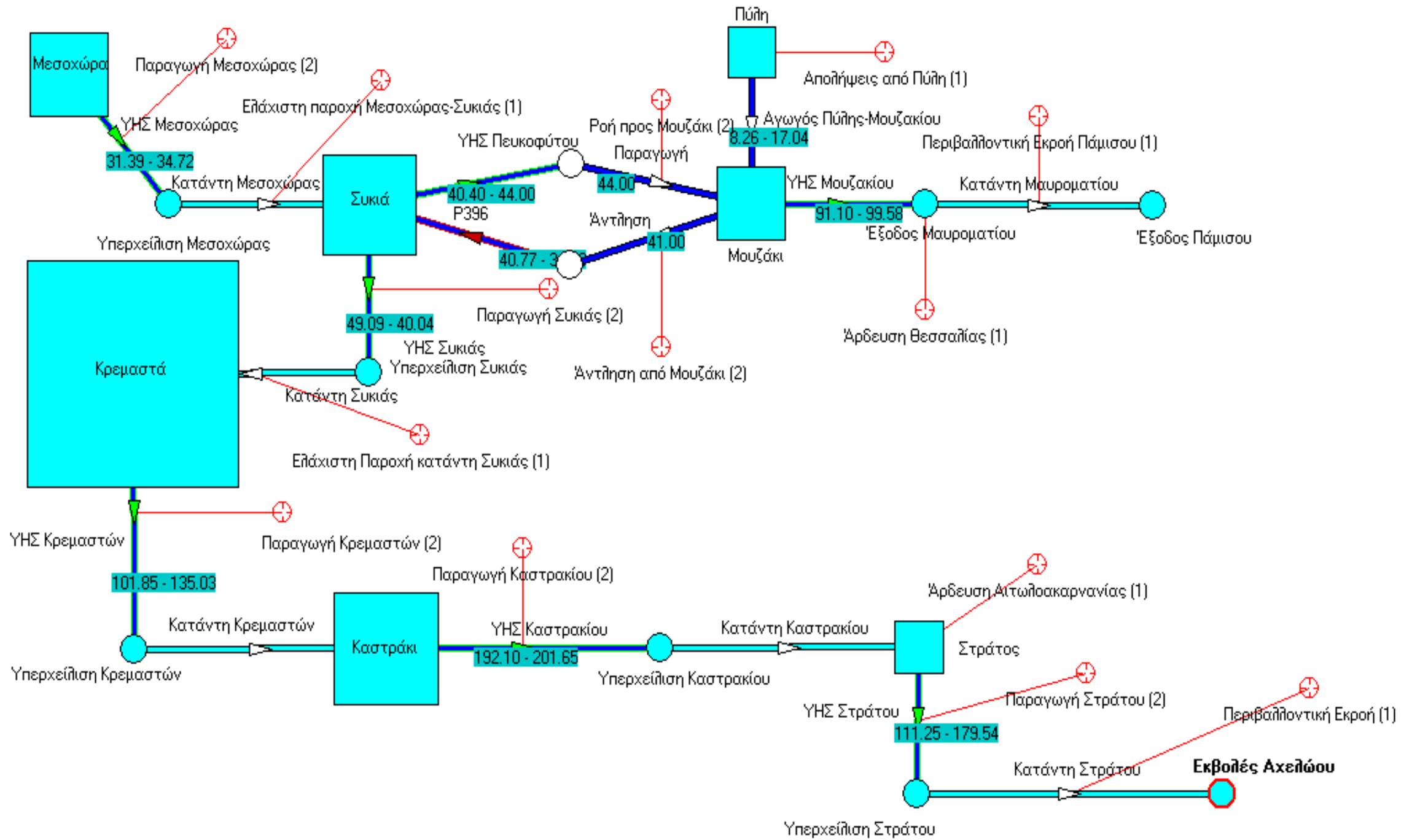


# Σενάριο Ε1 (Σενάριο εκτροπής – συμβατική διάταξη)

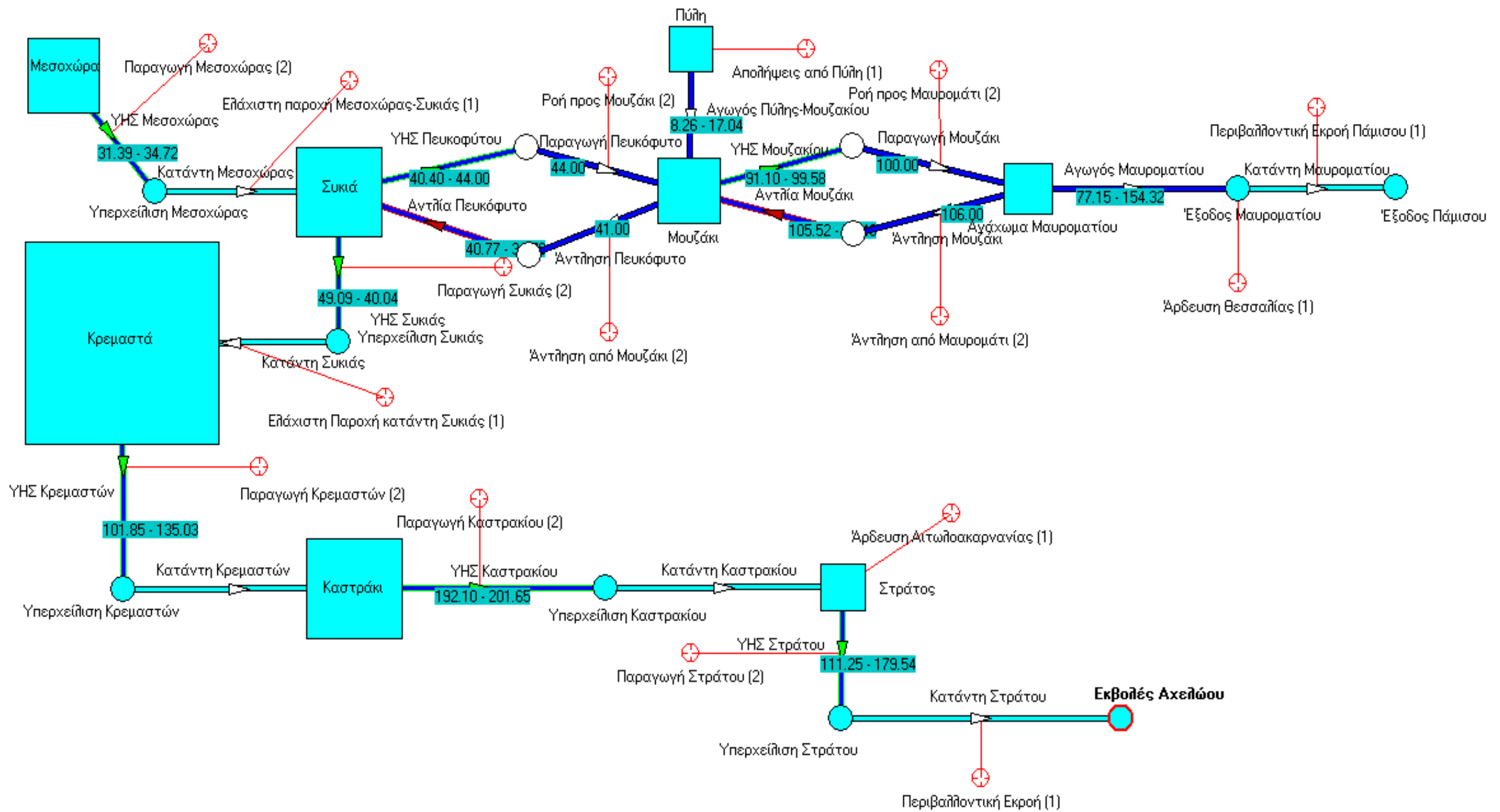




# Σενάριο E2

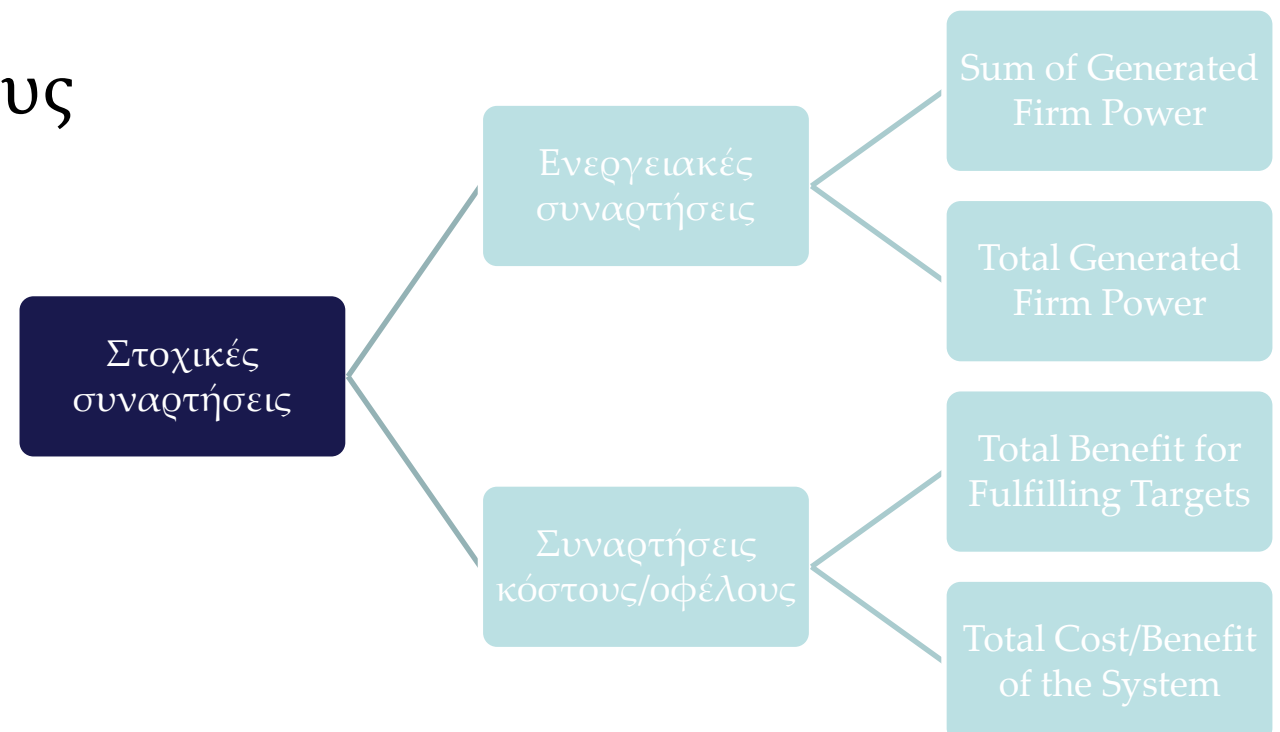


# Σενάριο Ε3 (Σενάριο εκτροπής με άντληση – ταμίευση)



# Ανάπτυξη κριτηρίων βελτιστοποίησης

- Βασικός στόχος η ανάπτυξη στοχικών συναρτήσεων  $J(\theta)$  οι οποίες να χαρακτηρίζονται από:
  - Εύληπτη μορφή σε επίπεδο εφαρμογής
  - Πρακτική υπόσταση
  - Γενικότητα χρήσης
- Δύο αναπτυχθείσες οικογένειες συναρτήσεων
  - Ενεργειακές συναρτήσεις
  - Συναρτήσεις κόστους/οφέλους



# Ανάπτυξη κριτηρίων βελτιστοποίησης

## Ενεργειακές συναρτήσεις

Έστω  $\hat{\alpha}$  η σχέση υπολογισμού της πρωτεύουσας ενέργειας (με ορισμένη αξιοπιστία) από δεδομένες χρονοσειρές ενεργειακής παραγωγής. Τότε η στοχική συνάρτηση θα είναι της μορφής:

$$J(\theta) = \hat{\alpha}(E_1(t), E_2(t), \dots, E_n(t))$$

όπου  $E_i(t)$  η χρονοσειρά μηνιαίας ενεργειακής παραγωγής για κάθε στρόβιλο  $i$  του συστήματος.

## Δύο ενεργειακές συναρτήσεις

### □ Total Generated Firm Power

$$J(\theta) = \hat{\alpha}\left(\sum_{i=1}^n E_i(t)\right)$$

- η συνολική πρωτεύουσα ενέργεια που μπορεί να αποδώσει το σύστημα
- εφαρμογή επί της συνολικής μηνιαίας χρονοσειράς

### □ Sum of Generated Firm Power

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^n \hat{\alpha}(E_i(t))$$

- το άθροισμα της πρωτεύουσας ενέργειας κάθε έργου
- εφαρμογή επί των επιμέρους μηνιαίων χρονοσειρών και μετά άθροιση



# Ανάπτυξη κριτηρίων βελτιστοποίησης

## Συναρτήσεις κόστους/οφέλους

- Λογική αντιστοίχισης κάθε κατηγορίας στόχου (άρδευση, ύδρευση, ενεργειακή παραγωγή) με ισοδύναμο όφελος από την εκπλήρωσή του. Για κάθε στόχο (target)  $i$  έχουμε όφελος  $P_i$ :

$$P_i = c_i^B \cdot S_i + c_i^E \cdot \max\{(D_i - S_i), 0\} - c_i^D \cdot \max\{(S_i - D_i), 0\}$$

όπου:  $S_i$  ο σταθερός χρονικά στόχος που τίθεται

$D_i = D_i(t)$  η ποσότητα που τον καλύπτει (προκύπτει βάσει προσομοίωσης)

$c_i^B$  το μοναδιαίο βασικό όφελος κάλυψης στόχου (Basic Profit)

$c_i^E$  το πρόσθετο όφελος πλεονάσματος ( $D_i > S_i$ ) (Excess Profit)

$c_i^D$  η ποινή κάλυψης σε περίπτωση ελλείμματος ( $D_i < S_i$ ) (Penalty for Deficits)

Εφαρμογή για κάθε στόχο  $i$ , σε κάθε χρονικό βήμα  $t$

- Συνολικό μηνιαίο όφελος για  $m$  στόχους:

$$P_{tot}^t = \sum_{i=1}^m P_i^t$$

- Συνολικό ετήσιο όφελος:

$$P_{tot}^{year} = \sum_{t=1}^{12} P_{tot}^t = \sum_{t=1}^{12} \sum_{i=1}^m P_i^t$$



# Ανάπτυξη κριτηρίων βελτιστοποίησης

## Συναρτήσεις κόστους/οφέλους

### □ Total Benefit for Fulfilling Targets

$$J(\theta) = E\{P_{tot}^{year}(t)\}$$

- ποσοτικοποιεί το μέσο ετήσιο όφελος από την κάλυψη κάθε στόχου
- δυνατή η αναγωγή διαφορετικών ζητήσεων νερού σε ένα (οικονομικό) παράγοντα

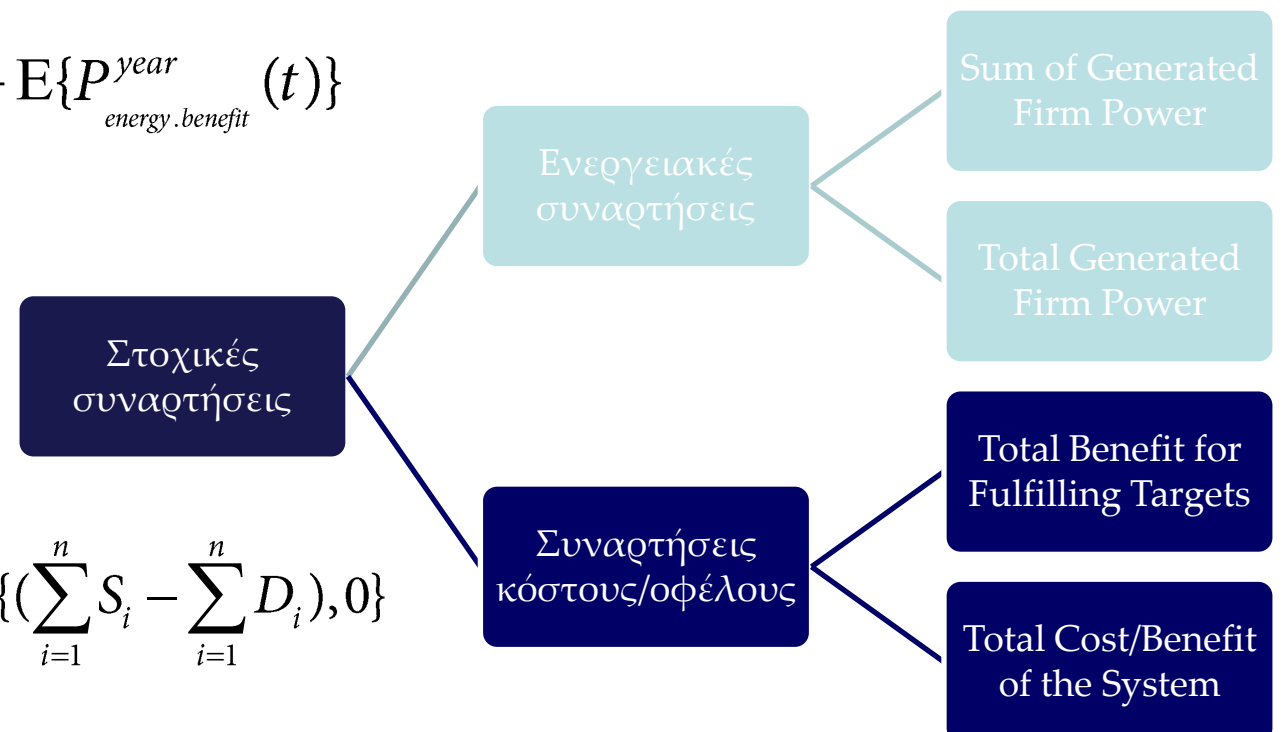
### □ Total Cost/Benefit of the System

- γενίκευση της πρώτης συνάρτησης
- ομαδοποίηση ανά κοινές ομάδες στόχων (λ.χ. κόστος άντλησης, όφελος ενεργειακής παραγωγής)

$$J(\theta) = E\{P_{target.benefit}^{year}(t)\} + E\{P_{pump.cost}^{year}(t)\} + E\{P_{energy.benefit}^{year}(t)\}$$

- Όφελος  $P_i$  ανά ομάδα κοινών στόχων:

$$P_i = c_i^B \cdot \sum_{i=1}^n S_i + c_i^E \cdot \max\left\{\left(\sum_{i=1}^n D_i - \sum_{i=1}^n S_i\right), 0\right\} - c_i^D \cdot \max\left\{\left(\sum_{i=1}^n S_i - \sum_{i=1}^n D_i\right), 0\right\}$$





# Ανάπτυξη κριτηρίων βελτιστοποίησης

## Συναρτήσεις κόστους/οφέλους

- Μοναδιαίες τιμές βασικού κόστους  $c_i^B$  και κόστους πλεονάσματος  $c_i^E$ :  
 0.045 €/kWh , 0.023 €/kWh για την ενεργειακή παραγωγή  
 0.060 €/m<sup>3</sup> για το όφελος άρδευσης  
 0.022 €/kWh για το κόστος άντλησης
- Τιμές ποινής  $c_i^D$  (πολλαπλάσιες του βασικού οφέλους):  
 x4 (0.18 €/kWh ) για την ενέργεια, x10 (0.60 €/m<sup>3</sup>) για την άρδευση

Οικονομικά Στοιχεία για την Ενέργεια - Τελικές Τιμές για τις Βελτιστοποιήσεις				
Πρωτεύουσα [€/kWh]	Δευτερεύουσα [€/kWh]	Αρδευτικό Όφελος [€/m <sup>3</sup> ]	Κόστος Άντλησης [€/kWh]	
0.045	0.023	0.060	0.022	

Οικονομικά Στοιχεία - Βιβλιογραφικές Πηγές				
Πρωτεύουσα [δρχ/kWh]	Δευτερεύουσα [δρχ/kWh]	Αρδευτικό Όφελος [δρχ/m <sup>3</sup> ]	Κόστος Άντλησης [δρχ/kWh]	
Κουτσογιάννης, 1996	11.5	6.5	20	6.5
	[€/kWh]	[€/kWh]	[€/m <sup>3</sup> ]	[€/kWh]
	0.034	0.019	0.059	0.019
Λαζαρίδης, 2012	0.045			0.022
	[€/kWh]			[€/kWh]
Τιμολόγιο ΔΕΗ	0.048	0.028		
	[€/kWh]	[€/kWh]		
Irrigation Pricing - Spain (Albiac and Murua 2009)		Πώληση Νερού		
		Dams - Fields of low profitability		
		[€/m <sup>3</sup> ]		
		0.060		
Water pricing - Italy (Lamaddalena et al. 2001)		Πώληση Νερού		
		Lowest irrigation price for mild uses [up to 2,000 m <sup>3</sup> /ha]		
		[€/m <sup>3</sup> ]		
		0.088		

**Στοχικές συναρτήσεις**

Ενεργειακές συναρτήσεις

Συναρτήσεις κόστους/οφέλους

Sum of Generated Firm Power

Total Generated Firm Power

Total Benefit for Fulfilling Targets

Total Cost/Benefit of the System

# Ο χαρακτήρας των στοχικών συναρτήσεων

## □ Ενεργειακές συναρτήσεις

- Στόχος: η βελτιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής για δεδομένη αξιοπιστία
- Δεδομένα εισόδου από το χρήστη: επίπεδο αξιοπιστίας  $\alpha$

## □ Συναρτήσεις κόστους/οφέλους

- Στόχος: η εύρεση της διαχειριστικής πολιτικής που θα μεγιστοποιήσει το κέρδος από την κάλυψη των στόχων
- Δεδομένα εισόδου από το χρήστη: οικονομικές παράμετροι
- Μη-πιθανοτική θεώρηση



# Διερεύνηση της κατάλληλης παραμετροποίησης

- Βάση σύγκρισης: Σενάριο A2 (Σενάριο Μεσοχώρας)

Είδη παραμετροποίησης  $\theta$  που διερευνώνται:

- Στόχοι μεταφοράς νερού στους κλάδους του δικτύου TE + TD
  - ενεργειακοί στόχοι TE στους στροβίλους,
  - στόχοι ελάχιστης ή/και μέγιστης ροής TD σε αγωγούς μεταφοράς χωρίς ΥΗΣ
- Στόχοι μεταφοράς νερού TE + TD και στόχοι διατήρησης ελάχιστου όγκου στους ταμιευτήρες MV
- Στόχοι μεταφοράς νερού TE + TD και παράμετροι  $b_i$  στους ταμιευτήρες

Είδος παραμετροποίησης		Τιμές Παραμέτρων μετά τη βελτιστοποίηση				Τιμή Συνάρτησης	Μεταβολή τιμής συνάρτησης
		Μεσοχώρα	Κρεμαστά	Καστράκι	Στράτος	Firm Power [GWh/μήνα]	
1	Ενεργειακοί Στόχοι	16.62	29.06	10.79	15.13	100.846	
	Στάθμες						
	Παράμετροι β						
2	Ενεργειακοί Στόχοι	17.41	42.15	36.12	13.80	100.268	-0.81%
	Ελάχιστοι Όγκοι	215	1613				
	Παράμετροι β						
3	Ενεργειακοί Στόχοι	21.20	18.45	33.89	15.09	100.89	0.06%
	Στάθμες						
	Παράμετροι β	0.55	0.10	0.15	0.48		

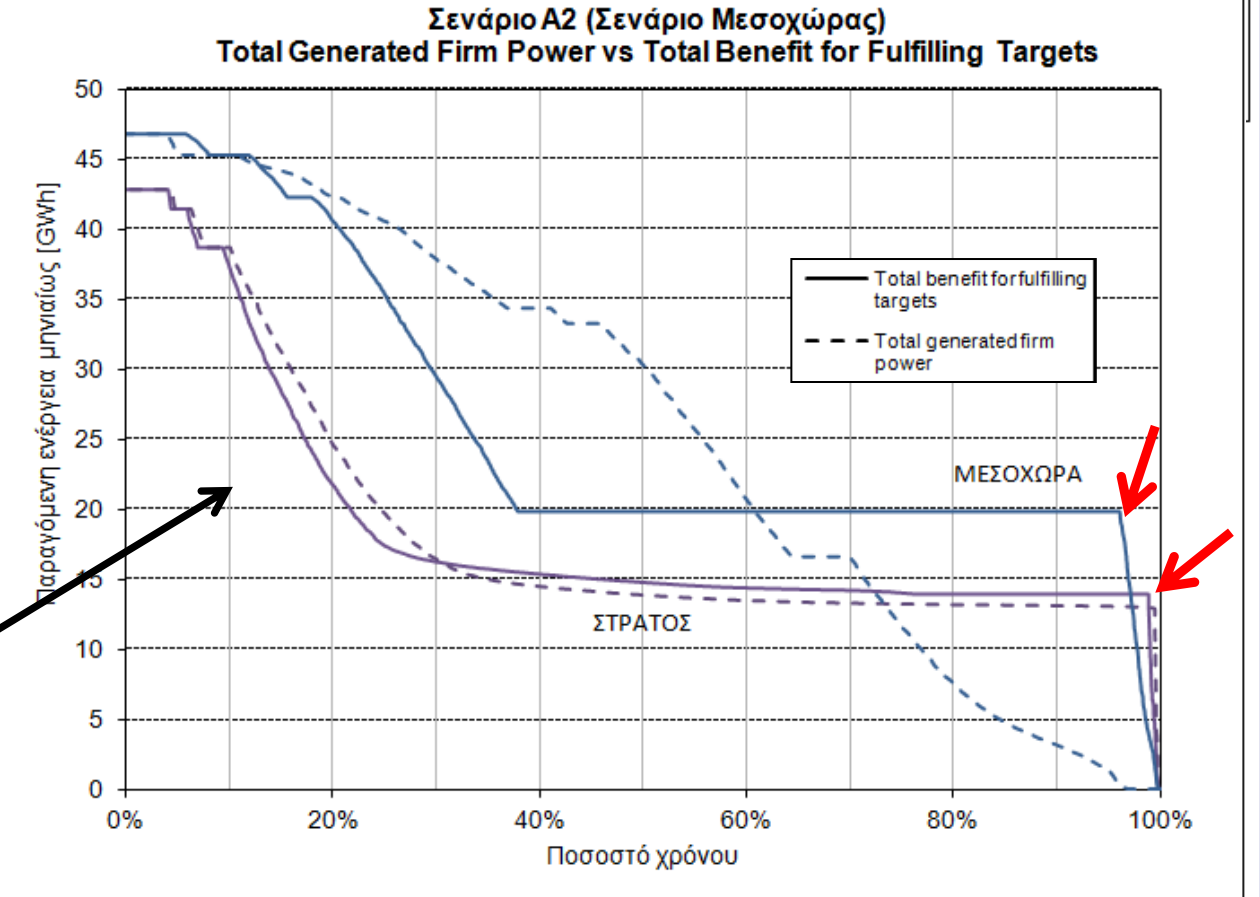
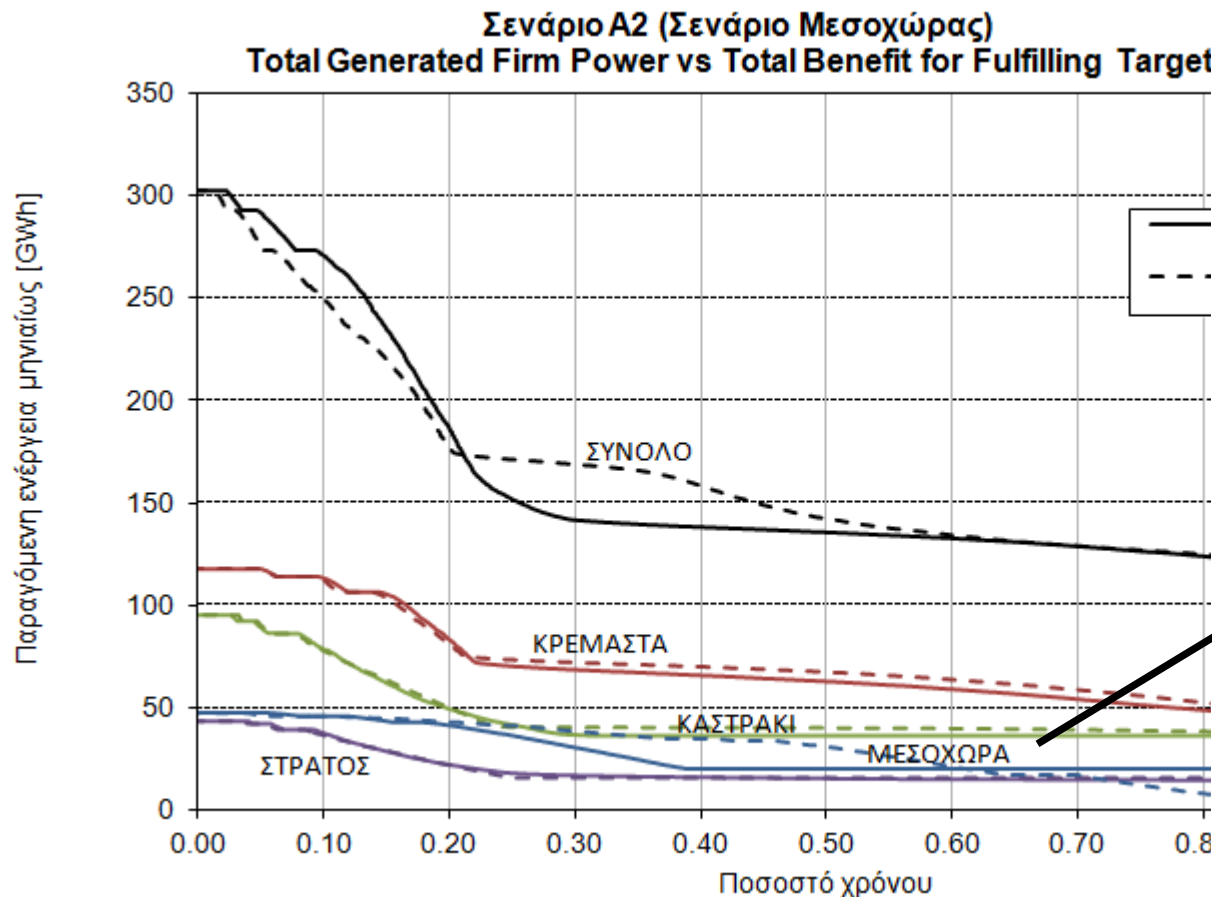
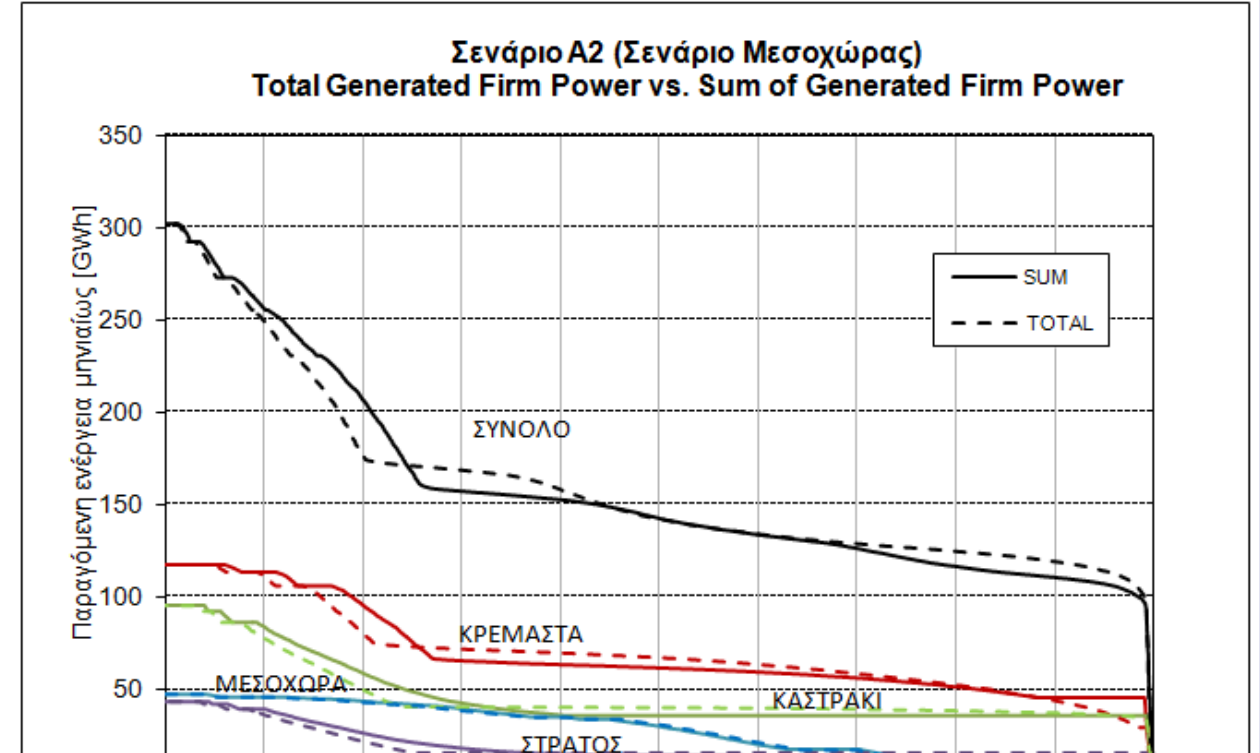
Είδος παραμετροποίησης		Τιμές Παραμέτρων μετά τη βελτιστοποίηση				Τιμή Συνάρτησης	Μεταβολή τιμής συνάρτησης
		Μεσοχώρα	Κρεμαστά	Καστράκι	Στράτος	Target Benefit [ $10^6$ νομ. μονάδες]	
1	Ενεργειακοί Στόχοι	19.68	46.10	36.32	13.98	71.011	
	Στάθμες						
	Παράμετροι β						
2	Ενεργειακοί Στόχοι	19.84	45.71	36.17	13.93	71.056	0.06%
	Ελάχιστοι Όγκοι	187	1535				
	Παράμετροι β						
3	Ενεργειακοί Στόχοι	36.34	34.50	36.61	15.34	73.948	4.14%
	Στάθμες						
	Παράμετροι β	0.23	0.21	0.02	0.49		

Συμπέρασμα: Η φειδωλή παραμετροποίηση (principle of parsimony) είναι δυνατή με στόχους μεταφοράς μόνο.

# Διερεύνηση στοχικών συναρτήσεων

- Βάση σύγκρισης: Σενάριο A2 (Μεσοχώρα)
- Βελτιστοποίηση 1000 επαναλήψεων,  
παράμετροι: ενεργ. στόχοι στους στροβίλους,  
αξιοπιστία 99% για τις ενεργειακές συναρτήσεις

Καμπύλες διάρκειας ενεργειακής παραγωγής για τα επιμέρους έργα και το σύστημα.



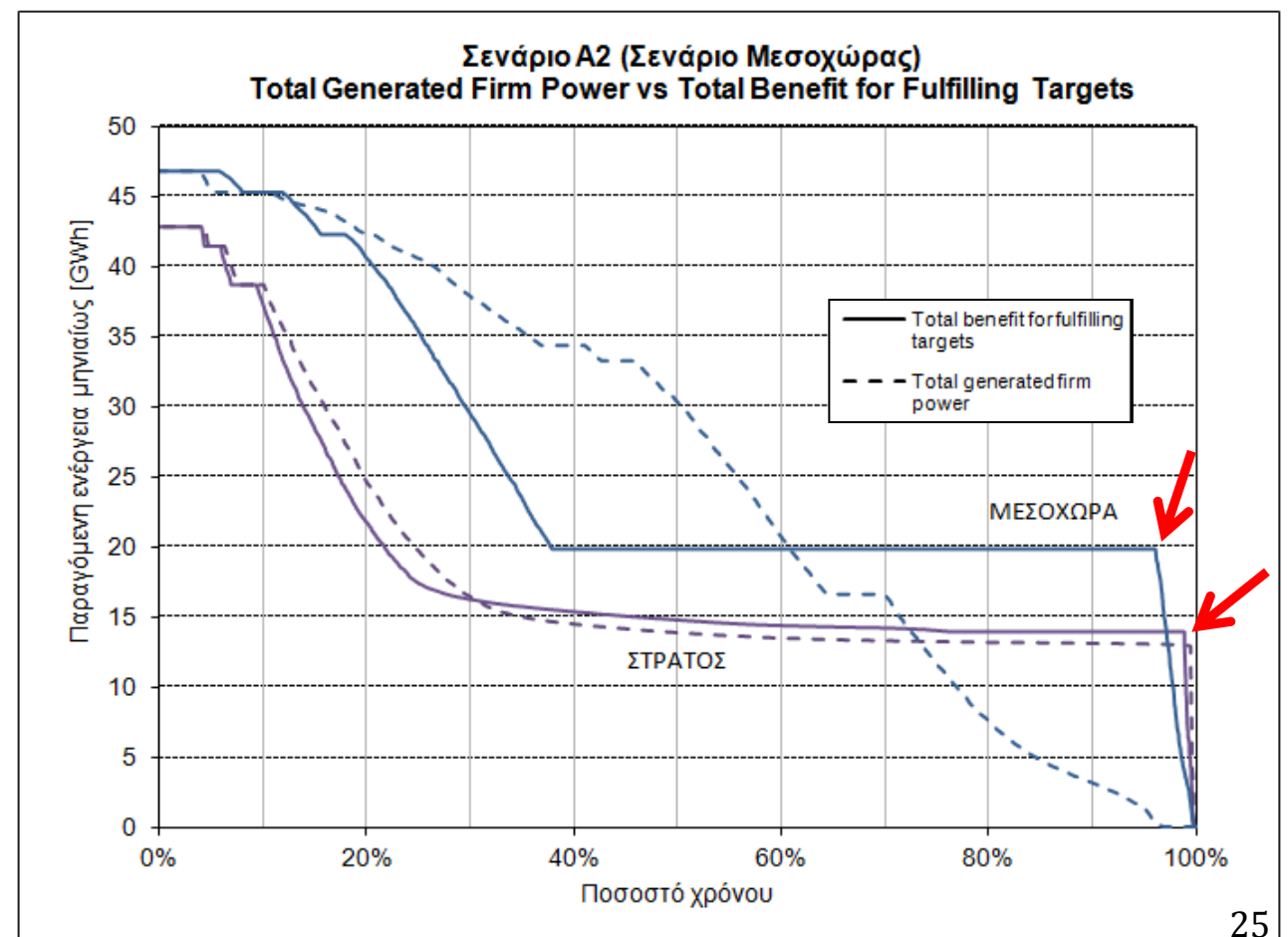
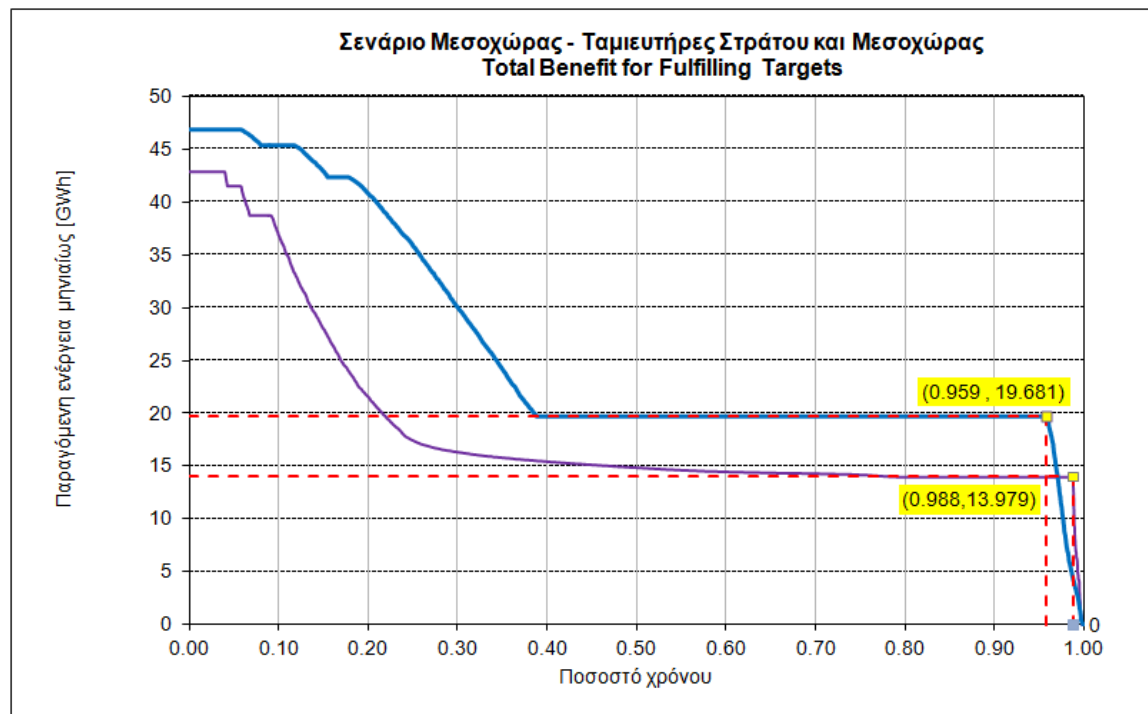
# Διερεύνηση στοχικών συναρτήσεων

- Η συνάρτηση κόστους-οφέλους δημιουργεί μία εικόνα σταθερής ενεργειακής παραγωγής, αλλά με διαφορετική, μη προκαθορισμένη αξιοπιστία για κάθε έργο.
- Η βελτιστοποίηση οδηγεί στην εύρεση μίας «χαρακτηριστικής αξιοπιστίας»  $a^*$ , διαφορετικής για κάθε έργο και για το σύστημα. Η αξιοπιστία αυτή εξαρτάται από τα ορίσματα της συνάρτησης, δηλαδή:

$$a^*_i = f\left(\frac{c_i^B}{c_i^E}, \frac{c_i^B}{c_i^D}\right)$$

- Η αξιοπιστία αυτή μπορεί να βρεθεί για κάθε έργο από τις τιμές των μεταβλητών ελέγχου (ενεργειακών στόχων).

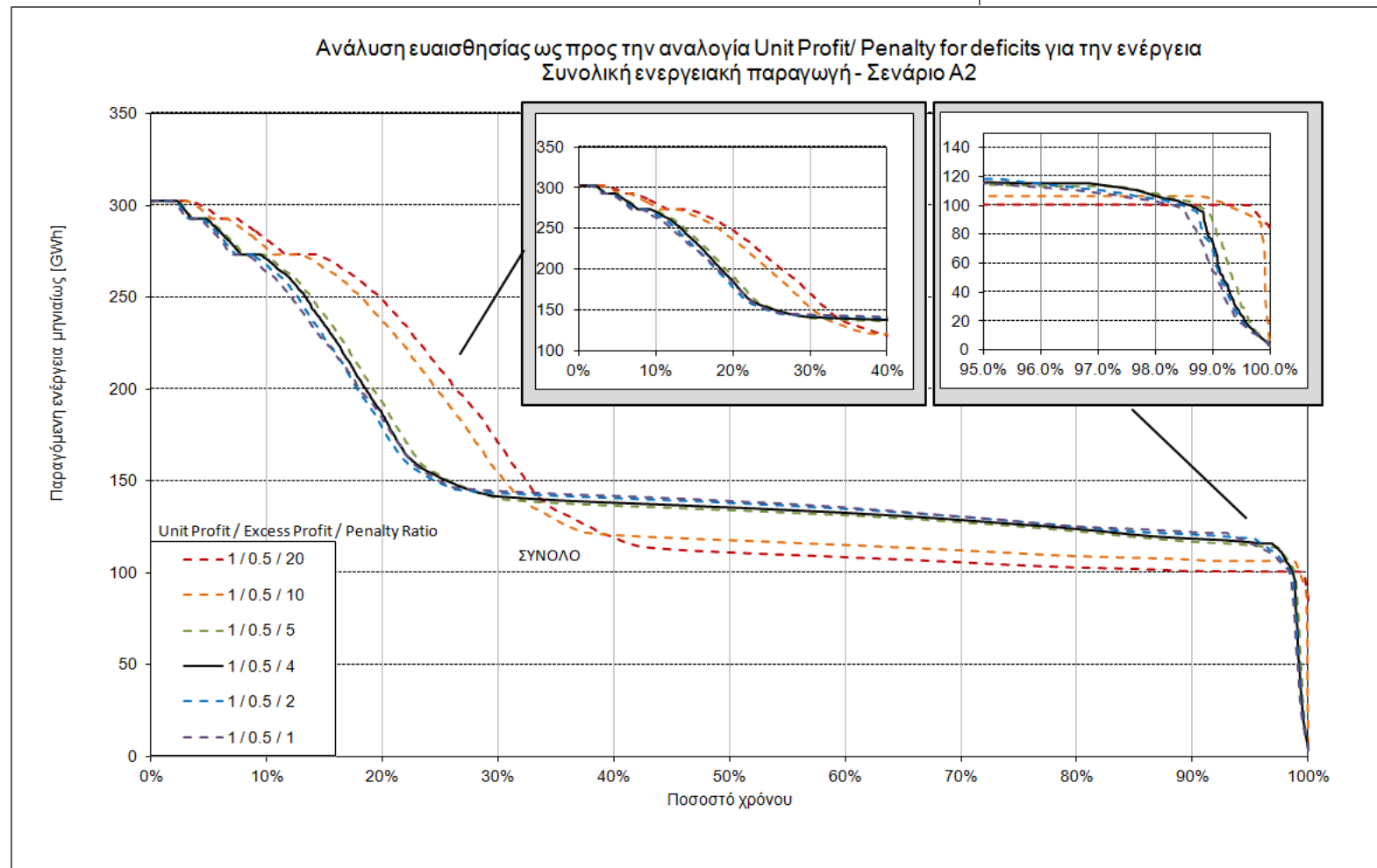
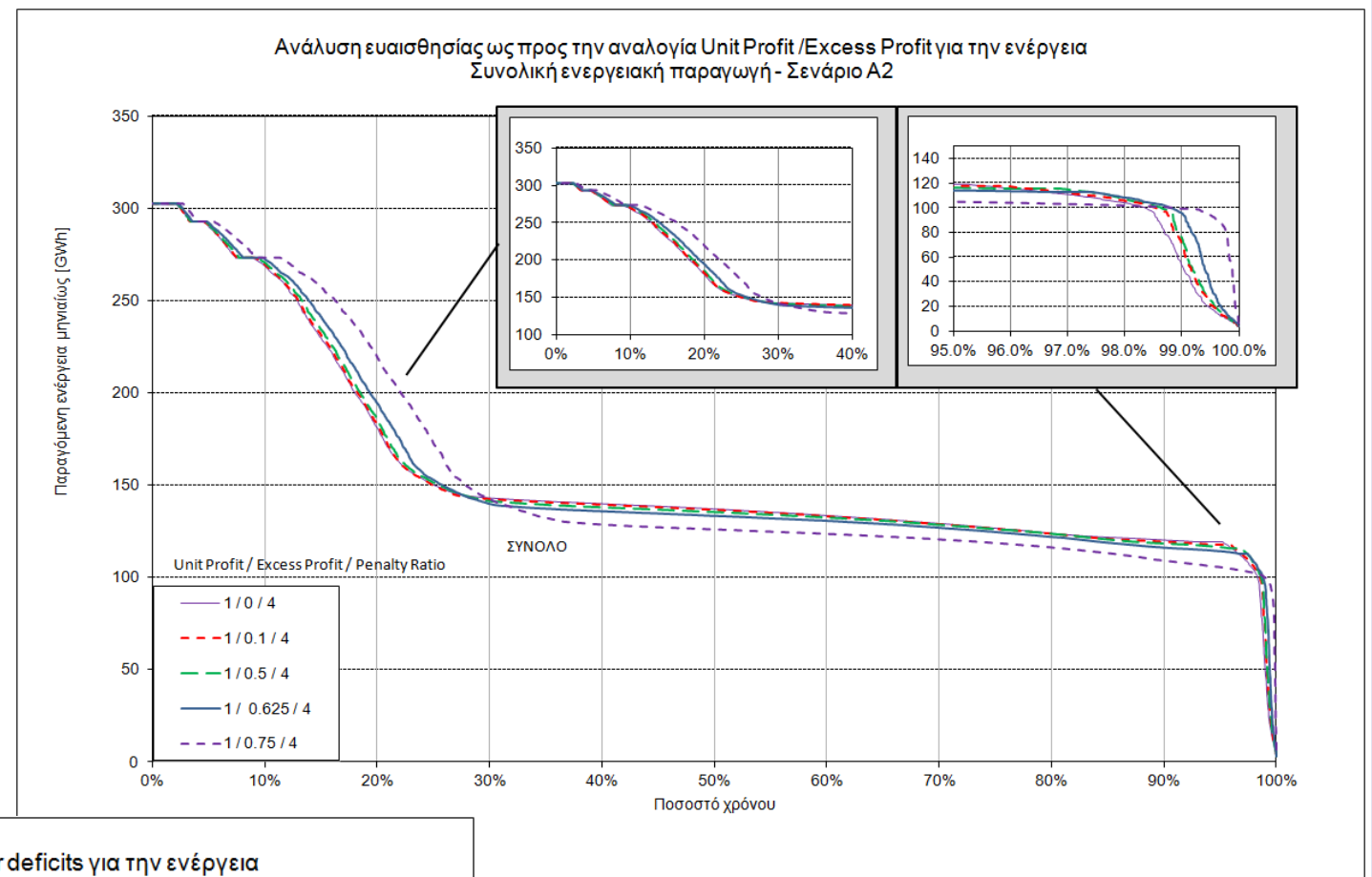
Τιμές ενεργειακών στόχων [GWh/μήνα]				Τιμή στοχικής συνάρτησης [10 <sup>6</sup> νομ. μονάδες]
Μεσοχώρα	Κρεμαστά	Καστράκι	Στράτος	
19.68	46.10	36.32	13.98	71.011



# Ανάλυση ευαισθησίας

- Βάση σύγκρισης:  
Σενάριο A2 (Σενάριο Μεσοχώρας)
- Total Benefit for Fulfilling Targets

Διερευνώνται οι μεταβολές των λύσεων για μεταβολή των  $c^B/c^E$ ,  $c^B/c^D$  για την ενεργειακή παραγωγή



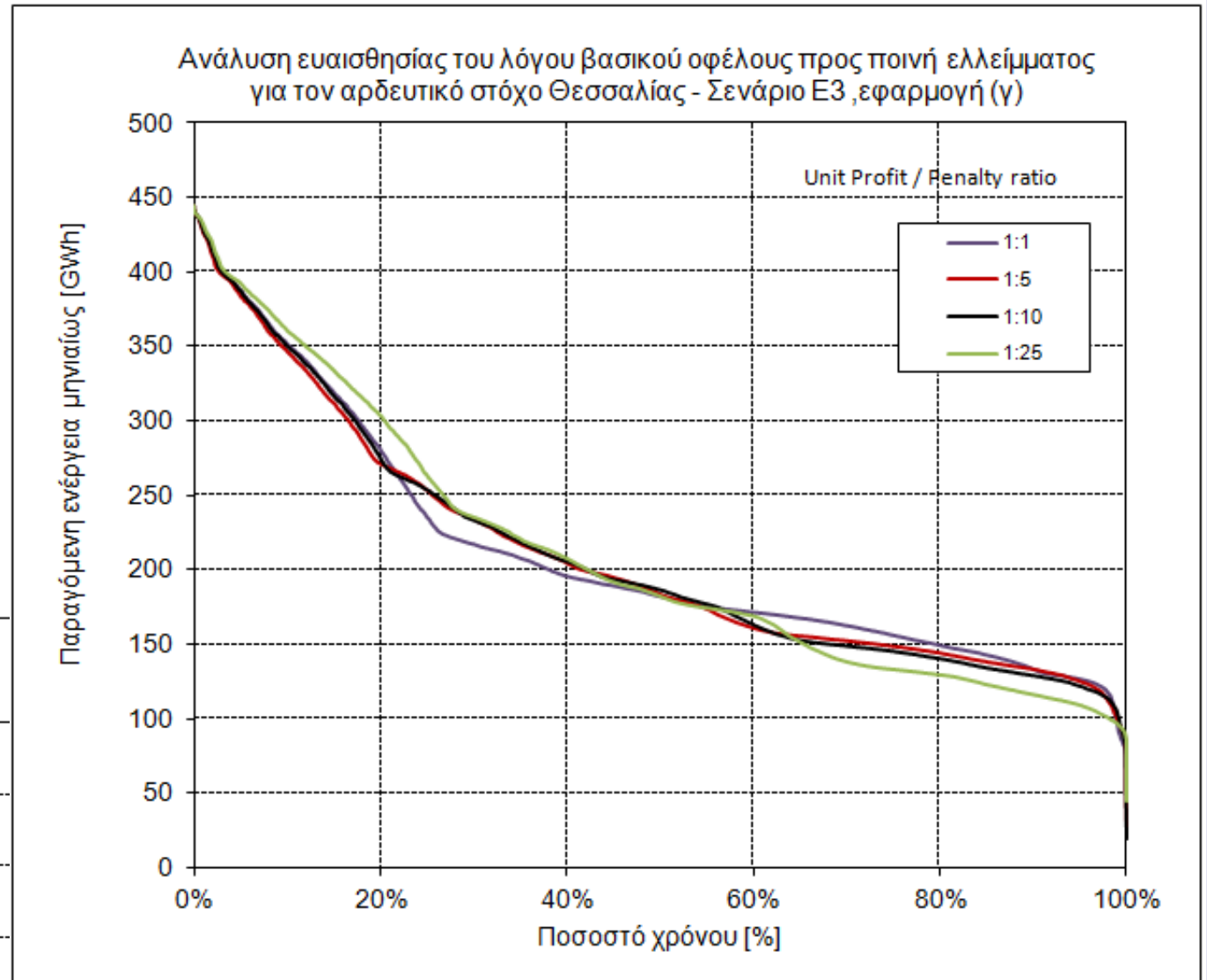
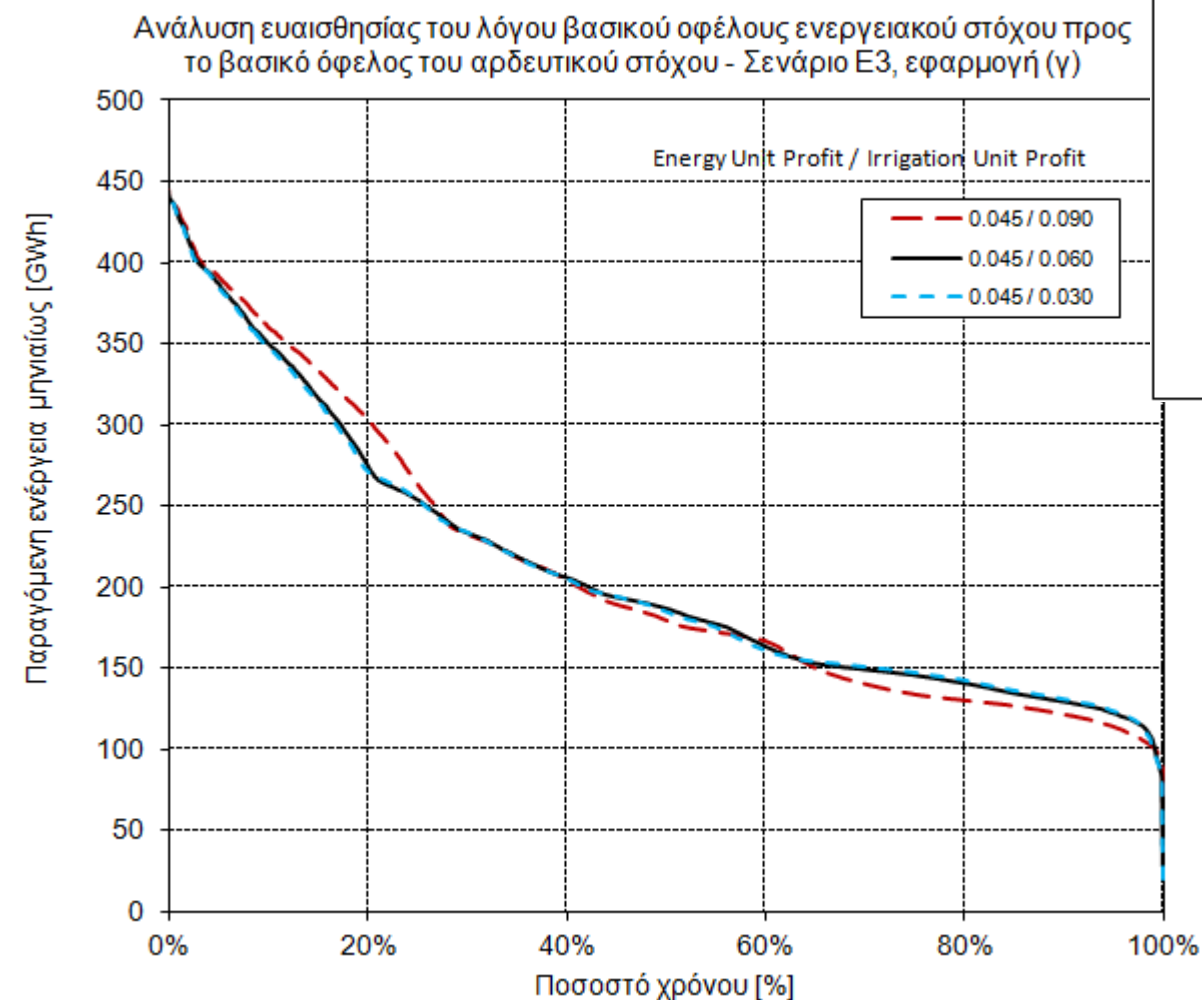
Συμπέρασμα: Στο σύνηθες εύρος τιμών δεν παρουσιάζεται αξιόλογη ευαισθησία των αποτελεσμάτων.



# Ανάλυση ευαισθησίας II

- Βάση σύγκρισης:  
Σενάριο E3 (Εκτροπή με άντληση-ταμίευση)
- Total Cost/Benefit of the System
- Βελτιστοποίηση μικτού οφέλους (ενέργεια & άρδευση)

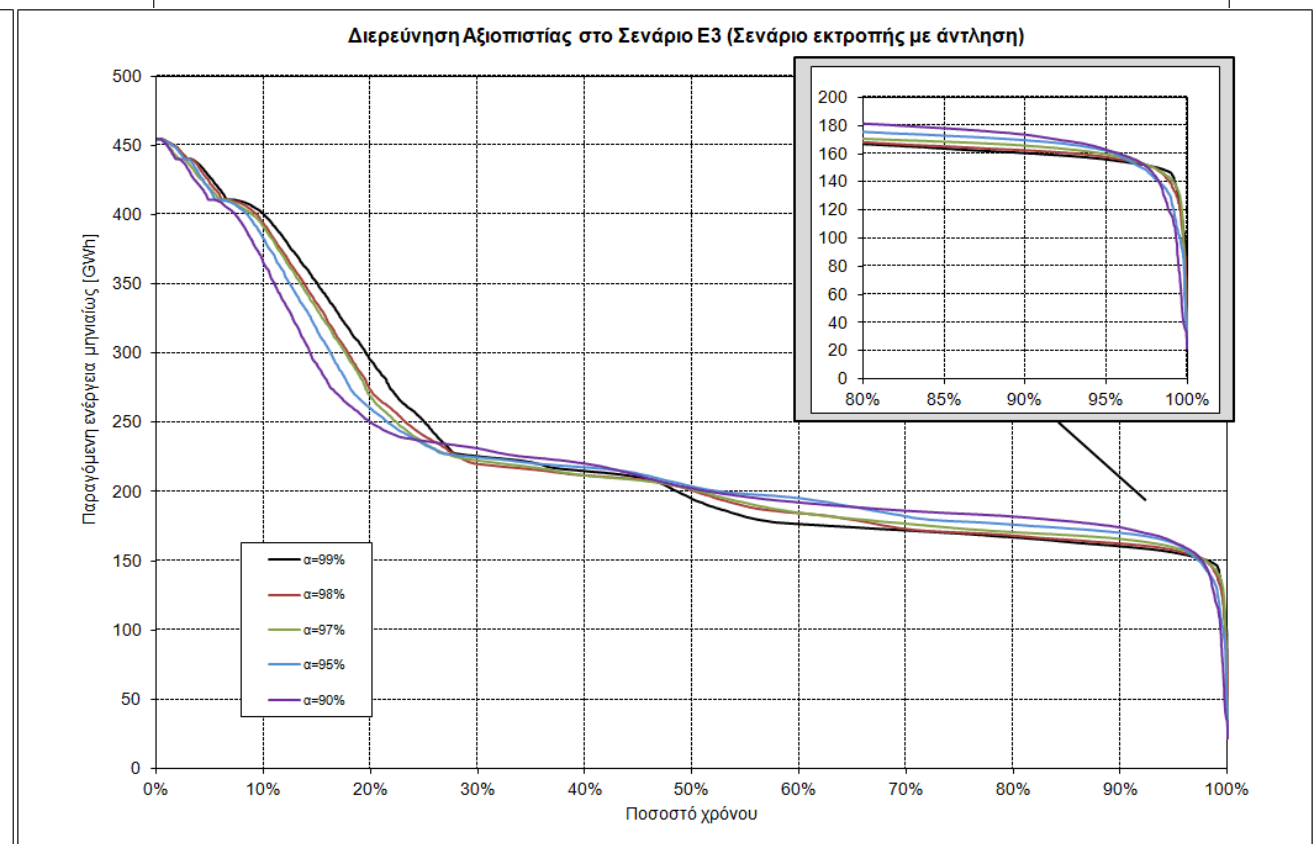
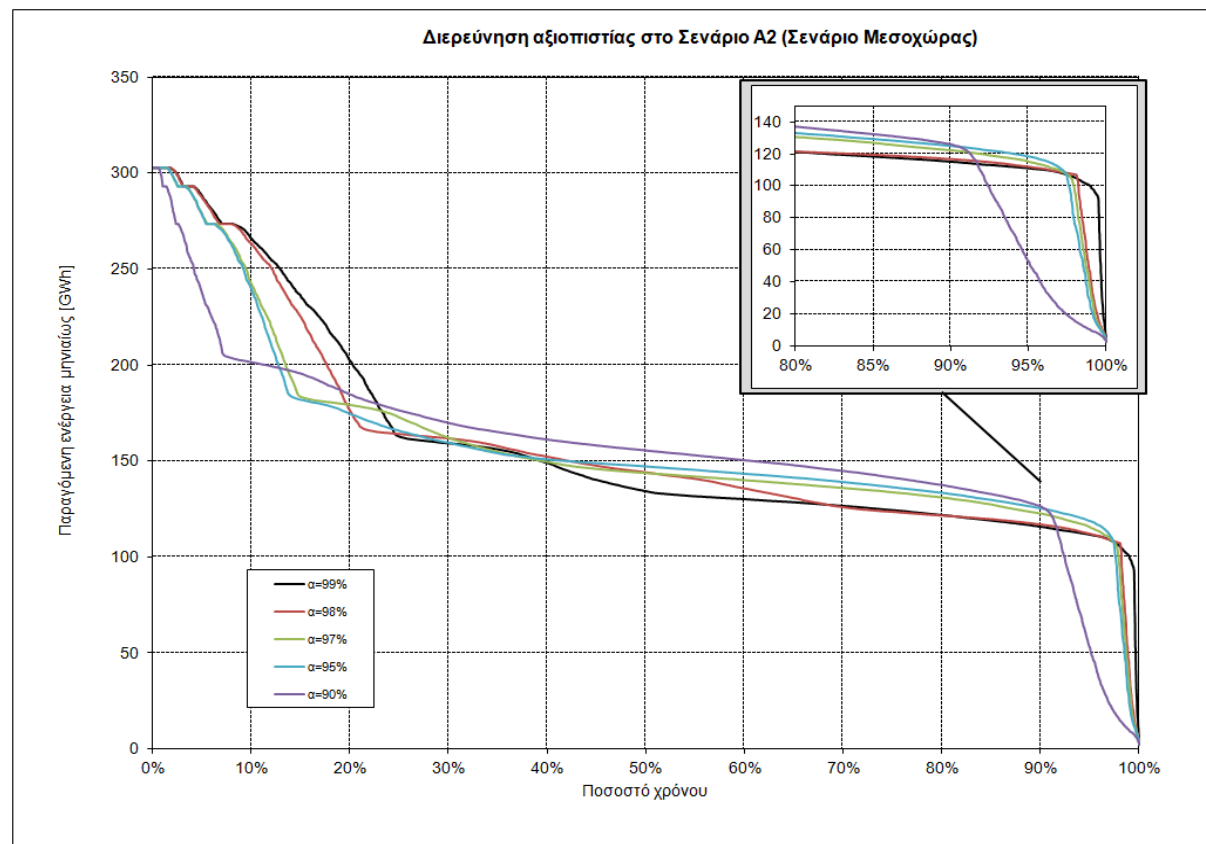
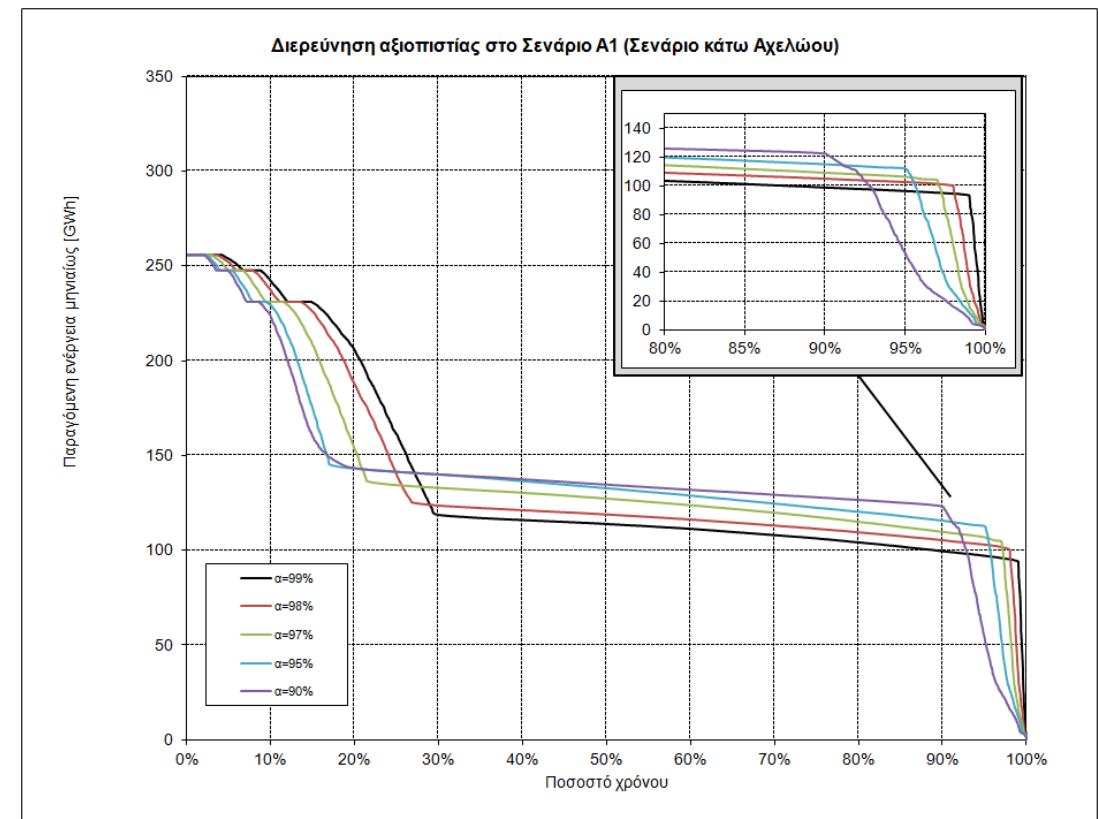
Διερεύνηση της επιρροής που έχουν οι οικονομικές παράμετροι μίας σημαντικής, αντικρουόμενης (conflicting) χρήσης νερού όπως η άρδευση στην ενεργειακή παραγωγή.



Διερευνάται η επιρροή του λόγου  $c^B / c^D$  για τον αρδευτικό στόχο και του λόγου  $c_{energy}^B / c_{irrigation}^B$  για τις δύο χρήσεις.

# Εύρος αξιοπιστίας για την ενεργειακή συνάρτηση

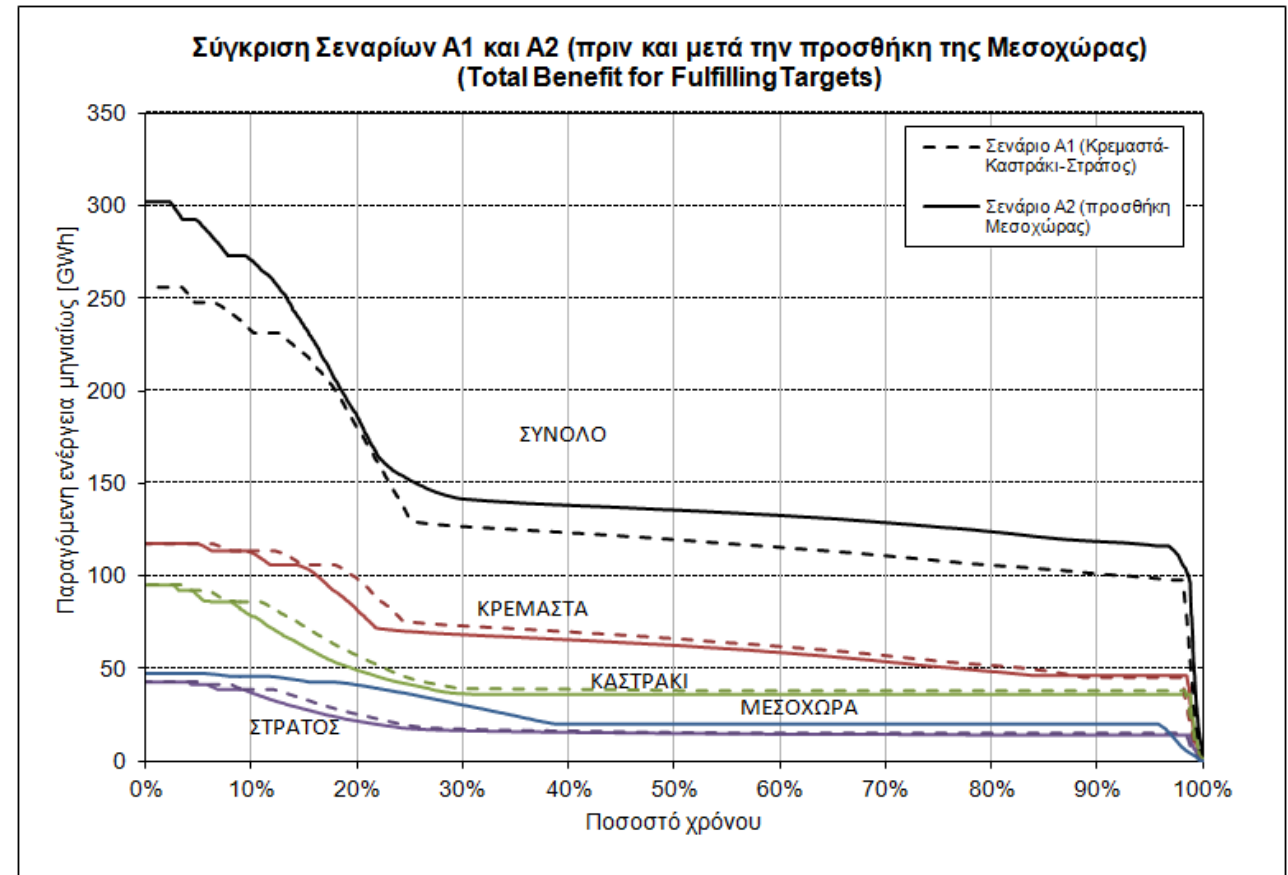
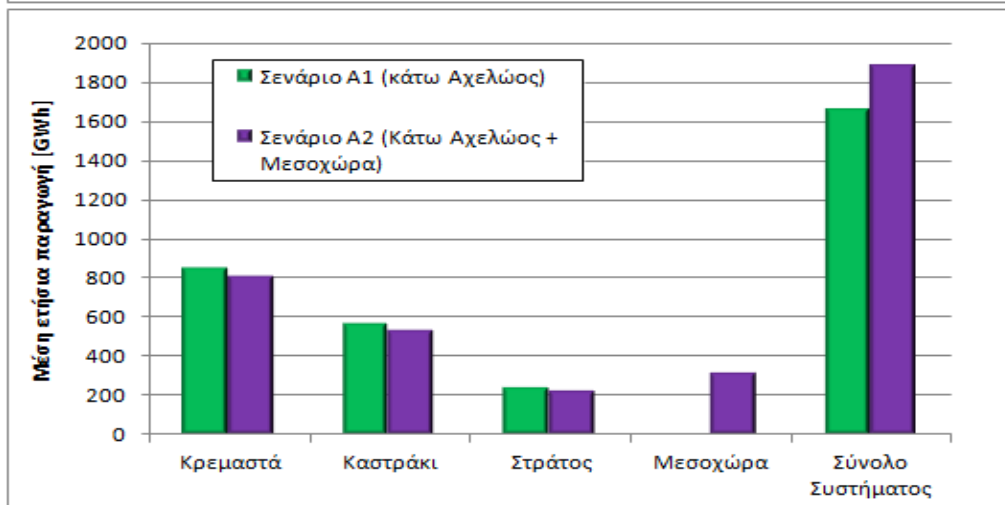
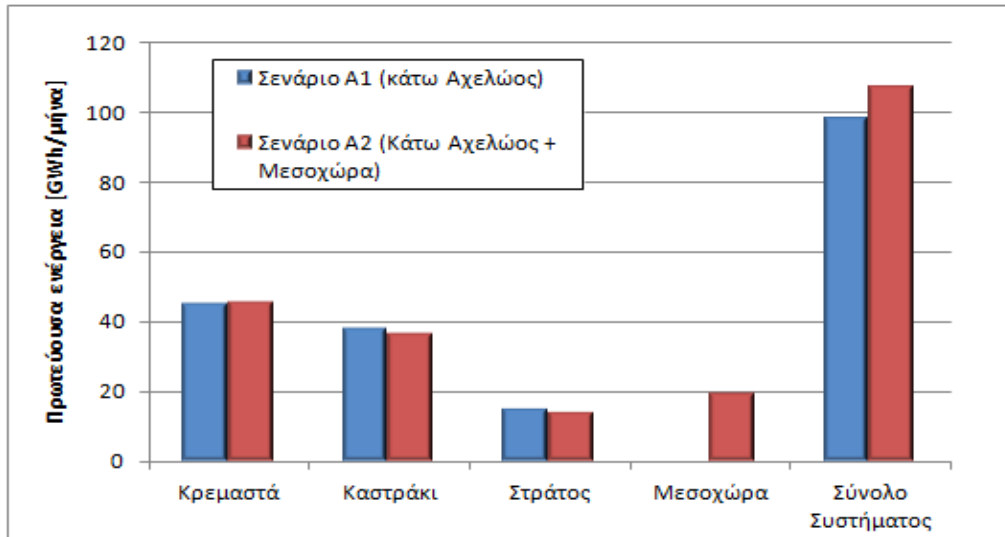
- Οι ενεργειακές συναρτήσεις επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής ενός υδrosυστήματος για διαφορετικές τιμές αξιοπιστίας  $\alpha$ .
- Εφαρμογή στα κυριότερα σενάρια μελέτης A1, A2 και E3 για την Total Generated Firm Power
- Εφαρμογή σειράς βελτιστοποιήσεων για τιμές αξιοπιστίας 90%, 95%, 97%, 98%, 99%



# Εφαρμογές

## 1. Η προσθήκη της Μεσοχώρας στα υφιστάμενα έργα

- Εφαρμογή βελτιστοποίησης 1000 επαναλήψεων με την Total Benefit for Fulfilling Targets



Πρόσθετη μέση ετήσια παραγωγή 225 GWh

Πρόσθετο ενεργειακό όφελος 9.5 εκατ. € / έτος

Οικονομικό Όφελος (10<sup>6</sup> € ετησίως)

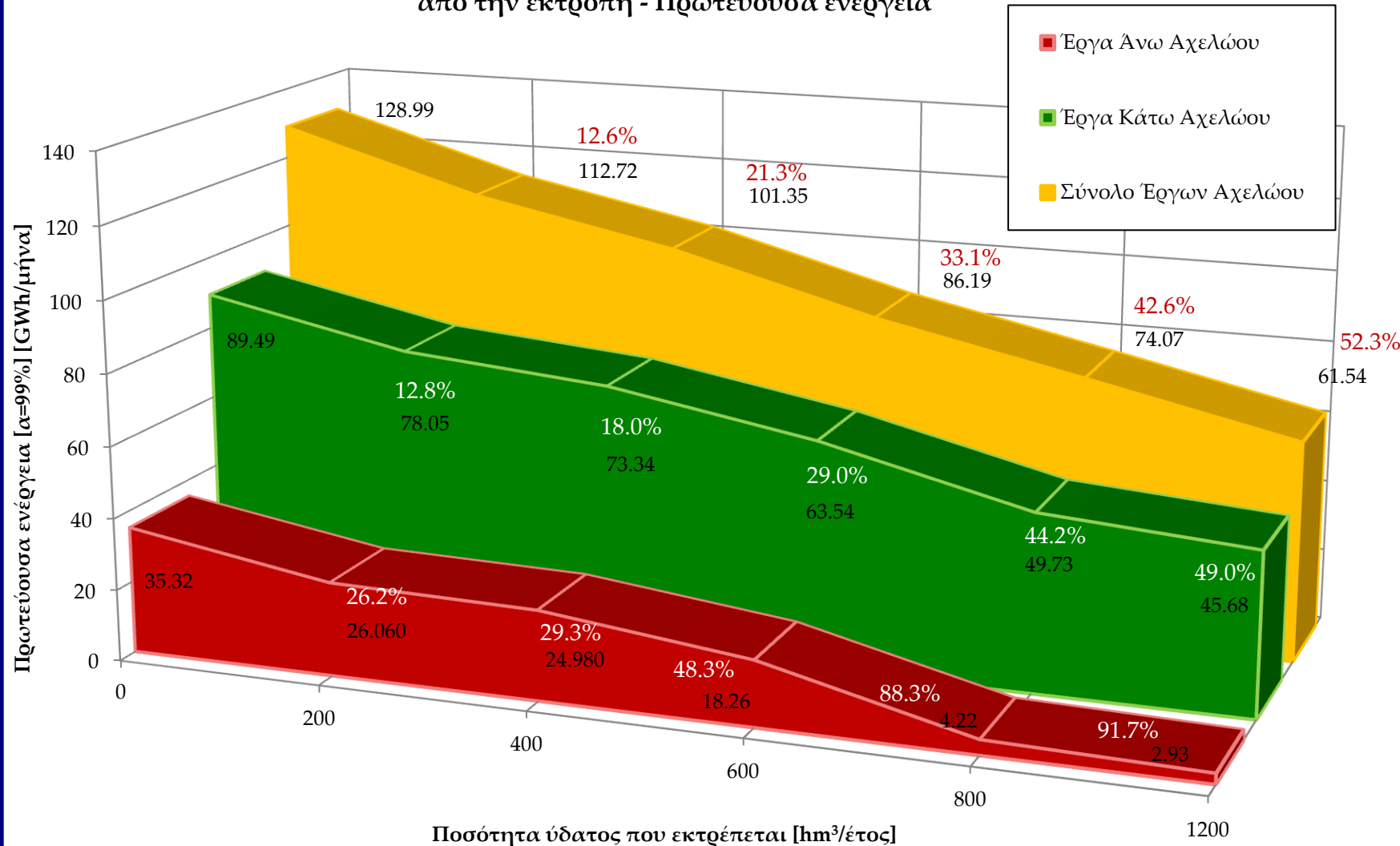
		Κρεμαστά	Καστράκι	Στράτος	Μεσοχώρα	Σύνολο Συστήματος	
Σενάριο A1 (κάτω Αχελώος)	Πρωτεύουσα ενέργεια [GWh/μήνα]	45.11	37.83	15.00		97.94	61.509
	Αξιοπιστία πρωτεύουσας	98.06%	98.35%	98.34%		98.13%	
	Μέση ετήσια ενέργεια [GWh/έτος]	852	568	241		1661	
Σενάριο A2 (Κάτω Αχελώος + Μεσοχώρα)	Πρωτεύουσα ενέργεια [GWh/μήνα]	46.10	36.32	13.98	19.68	107.23	71.011
	Αξιοπιστία πρωτεύουσας	98.50%	98.83%	98.85%	95.85%	98.15%	
	Μέση ετήσια ενέργεια [GWh/έτος]	809	535	226	316	1886	

# Εφαρμογές

## 2. Επίπτωση της εκτροπής στην ενεργειακή παραγωγή των έργων του κάτω Αχελώου

- Βελτιστοποίηση 1000 επαναλήψεων με την Total Generated Firm Power ( $\alpha = 99\%$ )
- Εφαρμογή στο Σενάριο A3 (Σενάριο Συκιάς)
- Επανάληψη βελτιστοποίησης για διάφορες ποσότητες στόχου εκτροπής (0, 200, 400, 600, 800, 1200 hm<sup>3</sup>)

Επίδραση της παραγόμενης ενέργειας στα έργα Αχελώου από την εκτροπή - Πρωτεύουσα ενέργεια



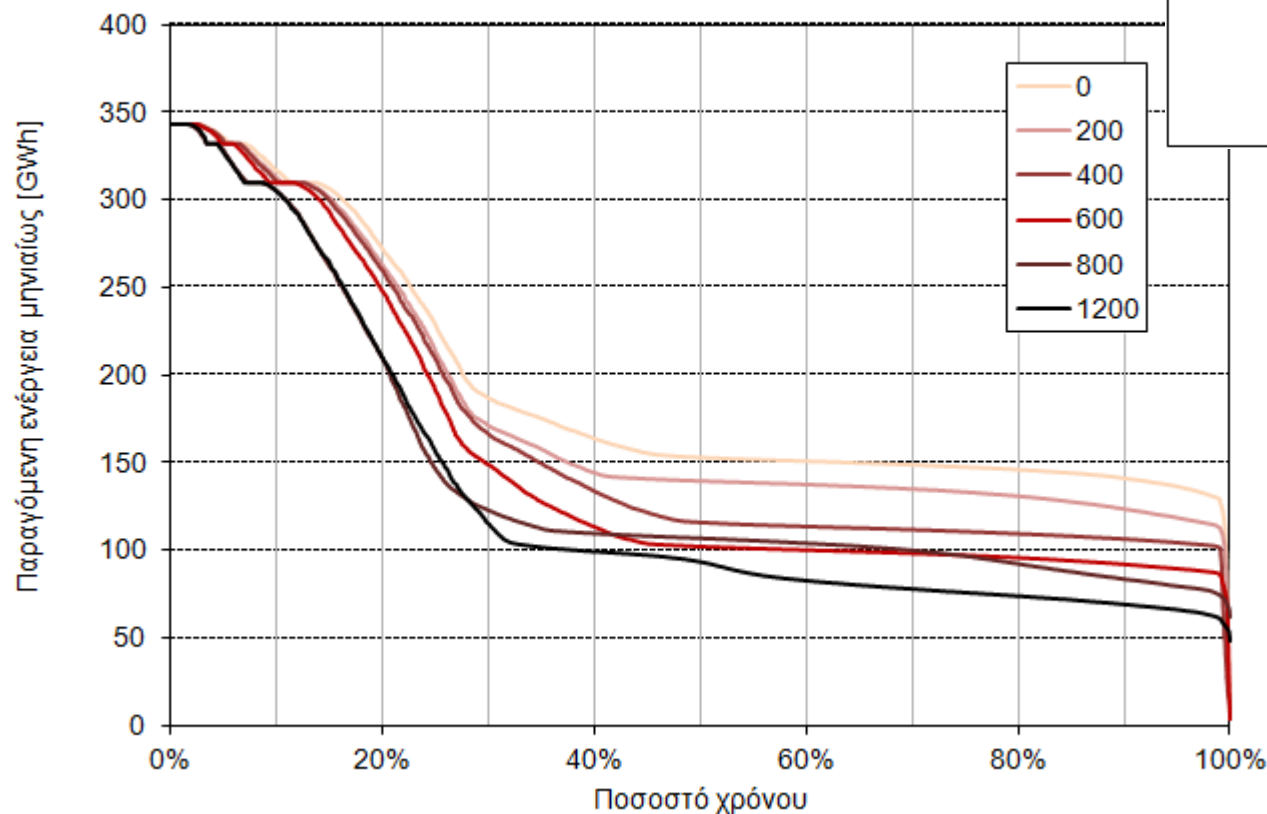
Η εκτροπή 600 hm<sup>3</sup> θα επιφέρει τη μείωση της πρωτεύουσας ενεργειακής παραγωγής κατά 29% για τα έργα του κάτω Αχελώου.

Για εκτρεπόμενες ποσότητες μεγαλύτερες των 600 hm<sup>3</sup> τα έργα άνω Αχελώου χάνουν την ικανότητα παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας.

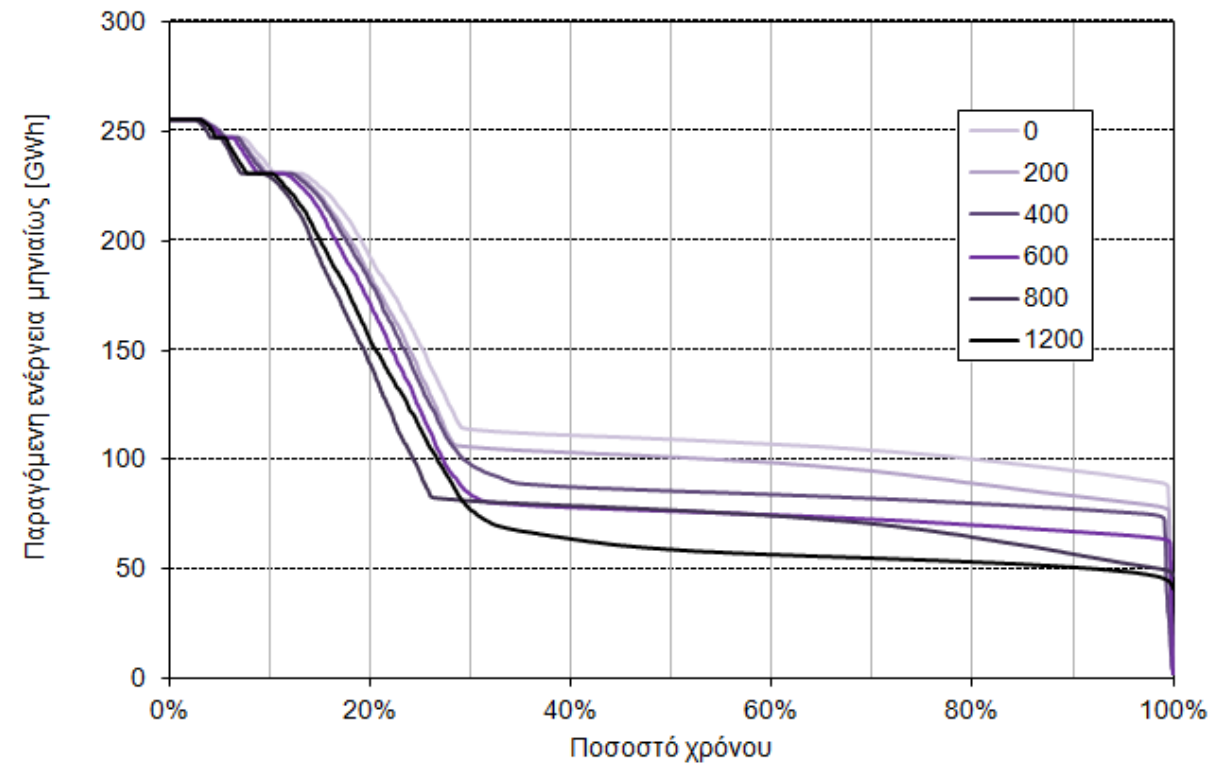
# Εφαρμογές

## 2. Επίπτωση της εκτροπής στην ενεργειακή παραγωγή των έργων του κάτω Αχελώου

Επίπτωση εκτροπής στα έργα του Αχελώου - Σύνολο συστήματος



Επίπτωση εκτροπής στα έργα του Αχελώου - Έργα Κάτω Αχελώου



Φάσμα καμπυλών διάρκειας για τις διάφορες ποσότητες εκτροπής



# Εφαρμογές

## 3. Διερεύνηση διατάξεων εκτροπής

- Σύνολο εφαρμογών με διαφορετικά ζητούμενα (Εφαρμογές α, β και γ)
- Βελτιστοποίηση 2000 επαναλήψεων, τόσο με την ενεργειακή συνάρτηση (Total Generated Firm Power) όσο και με τη συνάρτηση κόστους/οφέλους (Total Cost/Benefit of the System)

Εφαρμογές:

(α.) Διερεύνηση των δυνατοτήτων άντλησης και της επιρροής τους στην πρωτεύουσα παραγωγή

(β.) Υπολογισμός του βέλτιστου ενεργειακού οφέλους από τη λειτουργία του συστήματος, δεδομένου του στόχου εκτροπής 600 hm<sup>3</sup> ετησίως.

(γ.) Υπολογισμός του βέλτιστου μικτού οφέλους από την παράλληλη ικανοποίηση άρδευσης και ενεργειακής παραγωγής, δεδομένου του στόχου εκτροπής 600 hm<sup>3</sup> ετησίως.

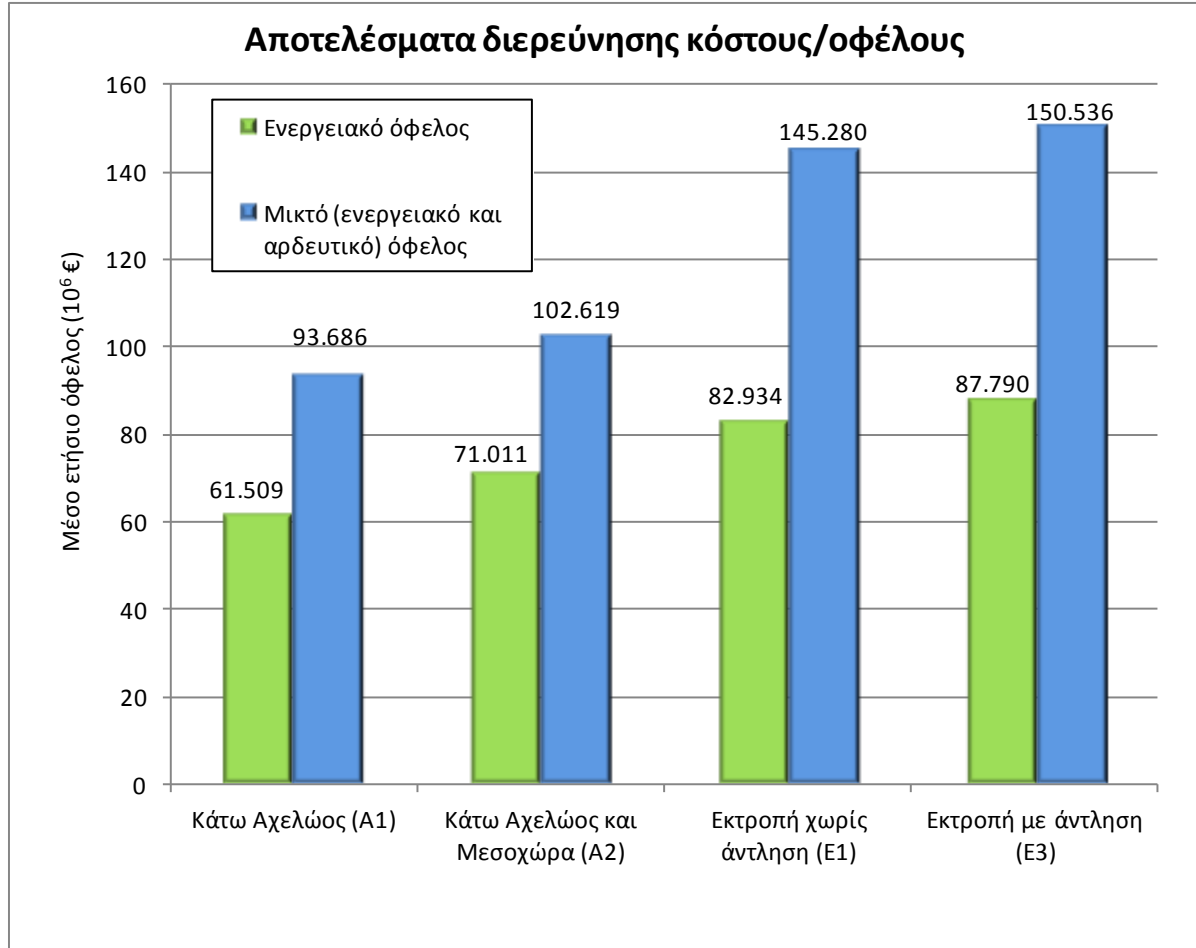
		α	β	γ
Ζητούμενο		Εκτίμηση δυνατοτήτων άντλησης	Υπολογισμός ενεργειακού οφέλους	Υπολογισμός μικτού οφέλους (ενέργεια + άρδευση)
Σενάρια		E1,E2,E3	E1,E3	E1,E3
Κριτήρια βελτιστοποίησης	Βασική Συνάρτηση	Total Generated Firm Power x1	Total Cost/Benefit of the System	Total Cost/Benefit of the System
	Συμπληρωματικό Κριτήριο (ελαχ. αστοχίας άρδευσης Θεσσαλίας)	Average Annual Deficit x1	Average Annual Deficit x1	-



# Εφαρμογές

## 3. Διερεύνηση διατάξεων εκτροπής

- Εφαρμογές κόστους/οφέλους (β) και (γ)



**Εφαρμογή (γ) - Βελτιστοποίηση με την Total Cost/Benefit of the System Θεώρηση μικτού οφέλους**

	Κάτω Αχελώος (A1)	Κάτω Αχελώος και Μεσοχώρα (A2)	Εκτροπή χωρίς άντληση (E1)	Εκτροπή με άντληση (E3)
Τιμή στοχ. συνάρτησης [10 <sup>6</sup> €/έτος]	93.686	102.619	145.280	150.536
Αστοχία άρδευσης Αιτωλοακαρνανίας	0.34%	0.16%	0.24%	0.00%
Αστοχία άρδευσης Θεσσαλίας	-	-	0.18%	0.32%

Η Total Cost/Benefit μπορεί να ενοποιήσει διαφορετικές κατηγορίες αντικρουόμενων στόχων σε ένα καθολικό κριτήριο και οδηγεί σε ασφαλή κάλυψη των αναγκών αναλόγως της οικονομικής βαρύτητας του κάθε στόχου.

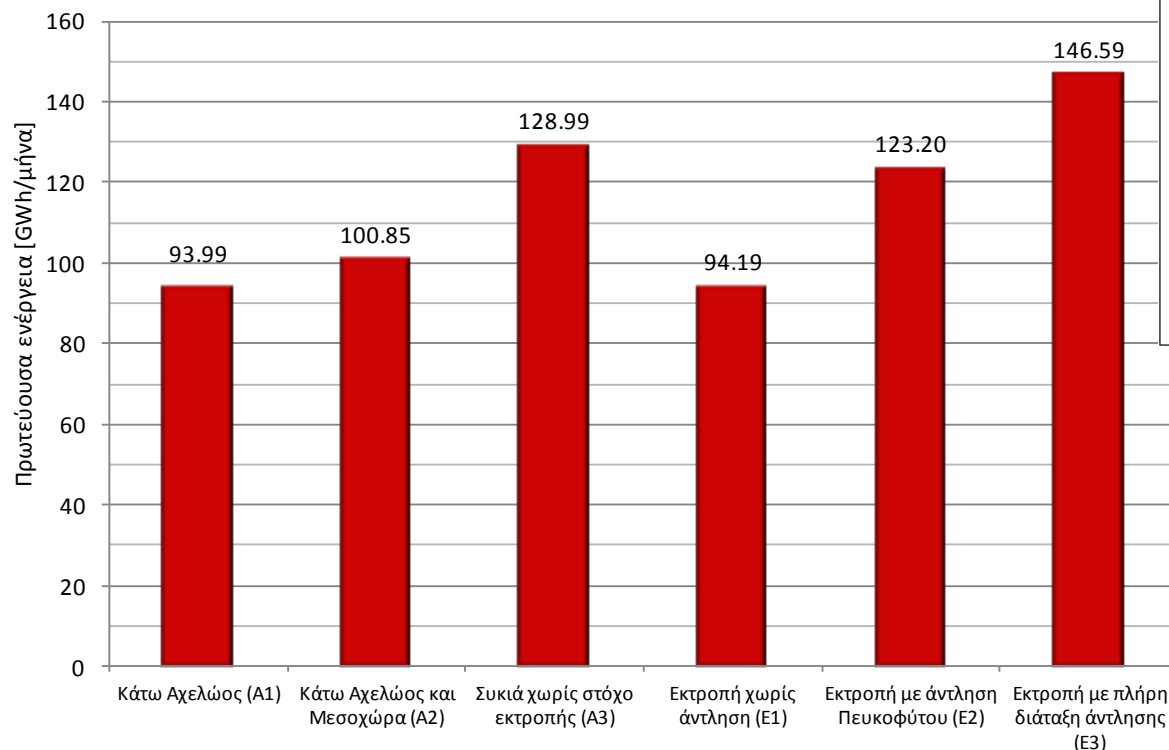
		α	β	γ
Ζητούμενο		Εκτίμηση δυνατοτήτων άντλησης	Υπολογισμός ενεργειακού οφέλους	Υπολογισμός μικτού οφέλους (ενέργεια + άρδευση)
Σενάρια		E1,E2,E3	E1,E3	E1,E3
Κριτήρια βελτιστοποίησης	Βασική Συνάρτηση	Total Generated Firm Power x1	Total Cost/Benefit of the System	Total Cost/Benefit of the System
	Συμπληρωματικό Κριτήριο (ελαχ. αστοχίας άρδευσης Θεσσαλίας)	Average Annual Deficit x1	Average Annual Deficit x1	-

# Εφαρμογές

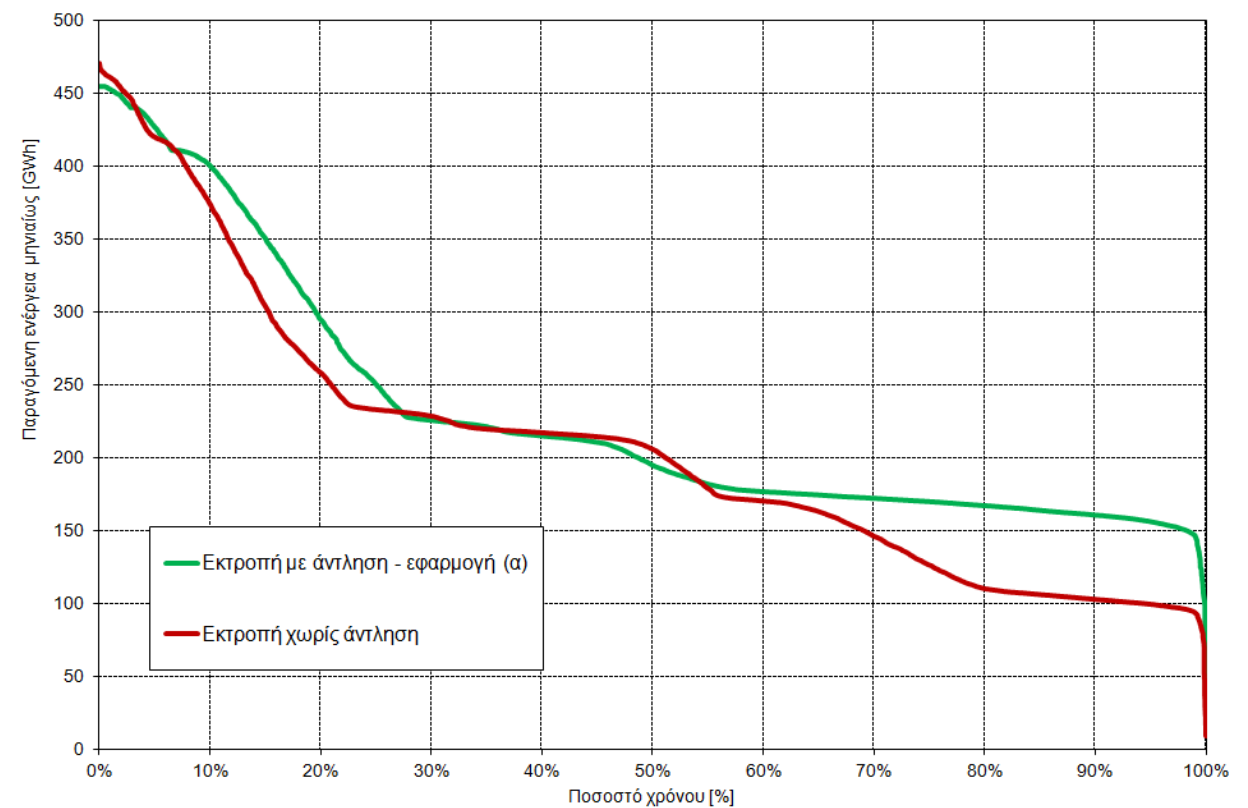
## 3. Διερεύνηση διατάξεων εκτροπής

- Εφαρμογή ενεργειακής συνάρτησης ( $\alpha$ ): επιτρέπει την καταγραφή της εξέλιξης της πρωτεύουσας ενεργειακής παραγωγής για όλα τα σενάρια μελέτης.
- Βελτιστοποίηση με την Total Generated Firm Power για  $\alpha = 99\%$ , μόνο με στόχους μεταφοράς νερού

Αποτελέσματα διερεύνησης ενεργειακής παραγωγής



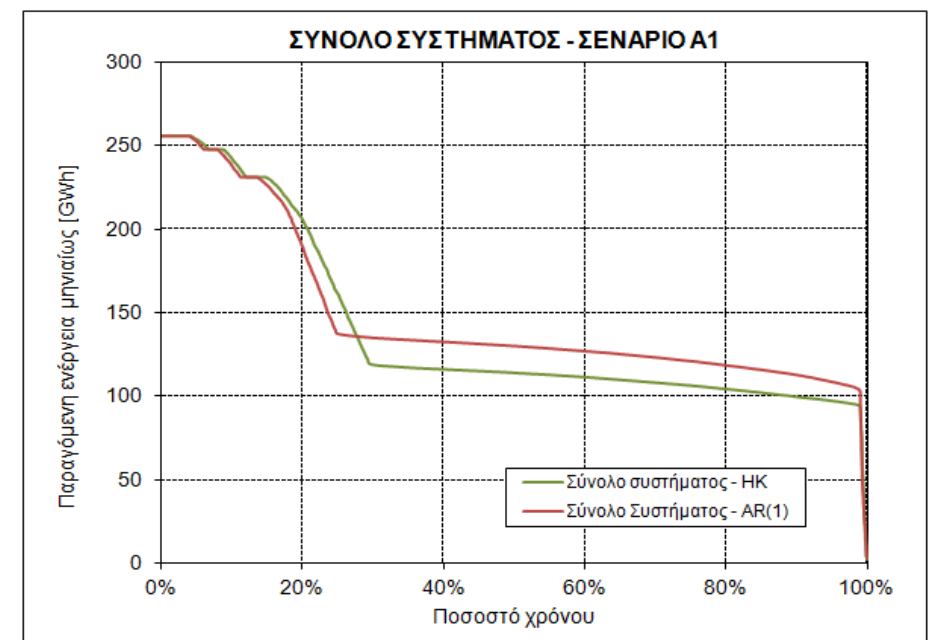
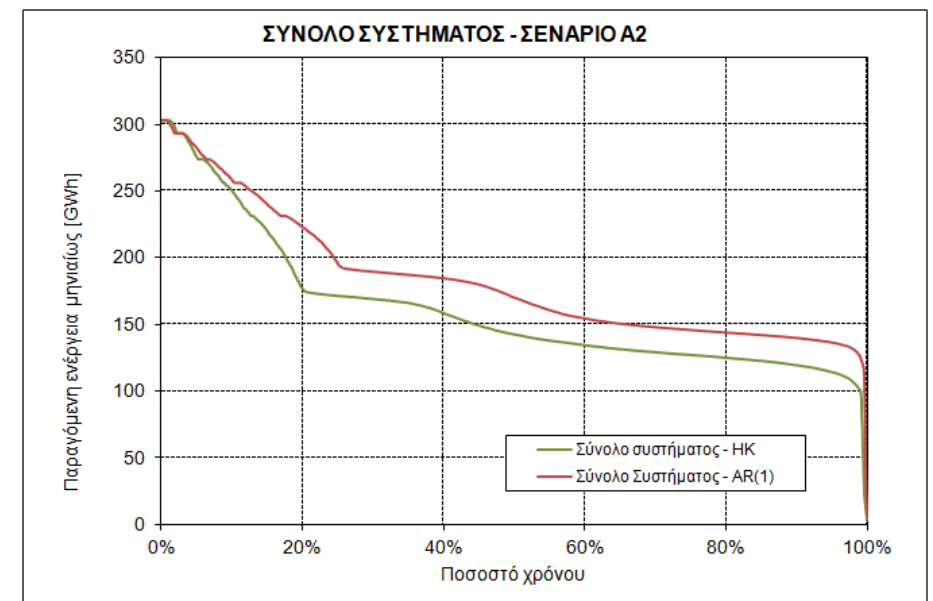
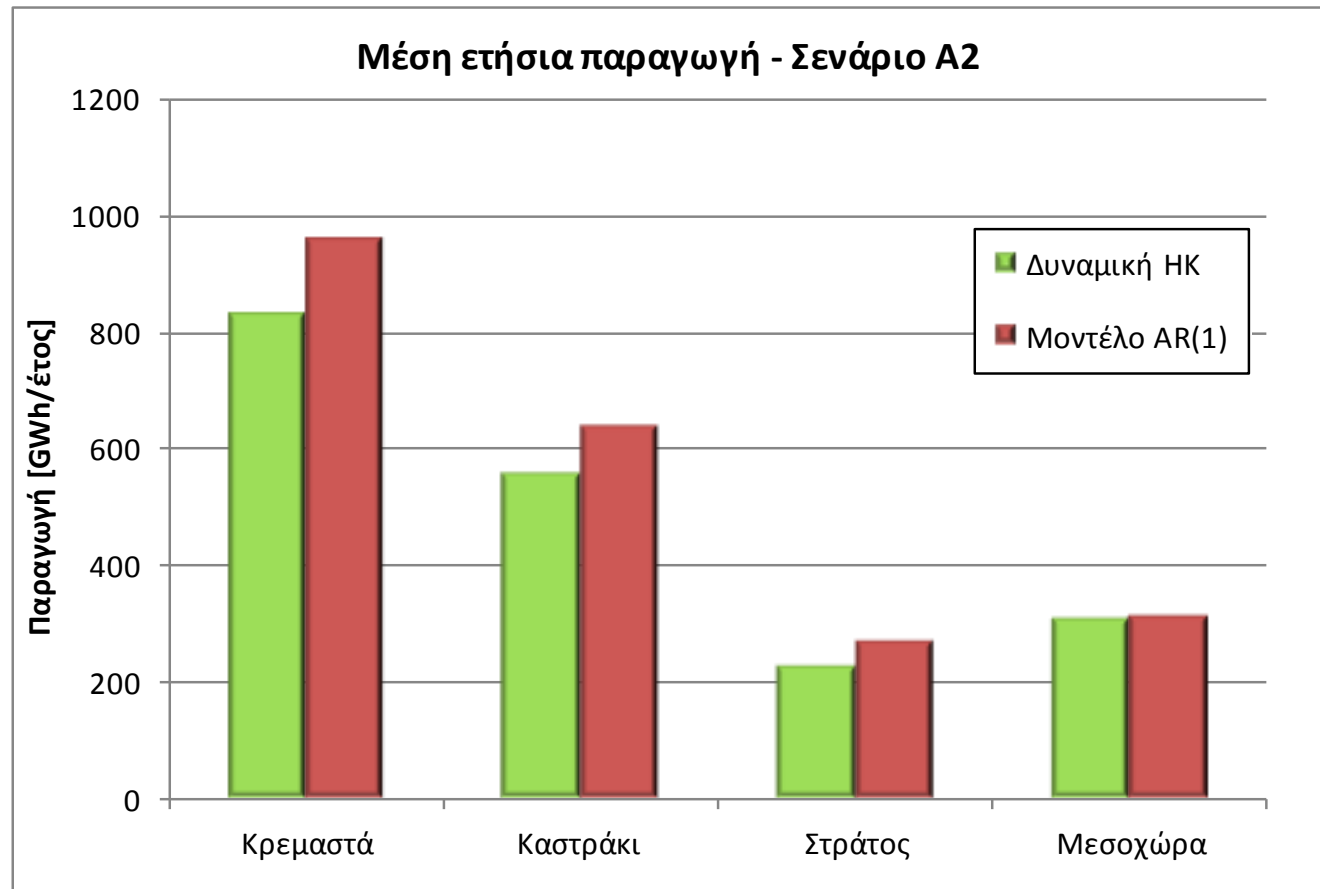
Οι εικόνες της ενεργειακής παραγωγής για τα σενάρια εκτροπής



# Εφαρμογές

## 4. Χρήση στοχαστικού μοντέλου εισροών AR(1) έναντι διατήρησης της δυναμικής ΗΚ

- Η χρήση στοχαστικών μοντέλων εισροών που δεν διατηρούν την εμμόνη (όπως τα μοντέλα βραχυπρόθεσμης μνήμης AR(1) ) αμελεί κρίσιμα χαρακτηριστικά των υδρολογικών μεταβλητών. Ωστόσο συνεχίζει να βρίσκει εφαρμογή σε προβλήματα διαχείρισης ταμιευτήρων.
- Ο αντίκτυπος υιοθέτησης ενός μοντέλου βραχυπρόθεσμης μνήμης σε ένα πρόβλημα υδροηλεκτρικής παραγωγής.
- Εφαρμογή στα σενάρια A1 και A2



# Συμπεράσματα

- Οι δύο οικογένειες συναρτήσεων που αναπτύχθηκαν αποτελούν γενικά μεθοδολογικά εργαλεία
- Οι ενεργειακές συναρτήσεις βελτιστοποιούν την ενεργειακή παραγωγή βάσει δεδομένης αξιοπιστίας.
- Οι συναρτήσεις κόστους/οφέλους οδηγούνται στην εύρεση διαφορετικής αξιοπιστίας για κάθε έργο, βάσει των μοναδιαίων οικονομικών μεγεθών.
- Η συνάρτηση κόστους/οφέλους Total Cost/Benefit of the System μπορεί να ομαδοποιήσει διαφορετικές ομάδες στόχων κάτω από ένα καθολικό, οικονομικό κριτήριο.

## Προτάσεις περαιτέρω μελέτης

- Η υιοθέτηση εποχικά μεταβαλλόμενων ενεργειακών στόχων – εποχική αναπροσαρμογή της ενεργειακής παραγωγής.
- Η δημιουργία ενός ξεχωριστού στοιχείου (component) αντλιοστροβίλου στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ που θα επιτρέψει περαιτέρω διερεύνηση των διατάξεων άντλησης – ταμίευσης (λ.χ. άντληση κατά προτεραιότητα τη χειμερινή περίοδο).
- Σε μεταγενέστερο επίπεδο, η μετατροπή του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ σε πολυσύνθετο εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για την ολοκληρωμένη ενεργειακή διαχείριση (λ.χ. υβριδικά συστήματα).

# Συμπεράσματα από την εφαρμογή στο υδροσύστημα Αχελώου - Θεσσαλίας

- Ικανοποίηση του συνόλου αρδευτικών στόχων και περιβαλλοντικών περιορισμών με πρακτικά μηδενικές ποσότητες αστοχίας και μετά την εκτροπή.
- Η προσθήκη της Μεσοχώρας θα αποφέρει ενεργειακό όφελος της τάξης των 10 εκατ. € ετησίως, προσθέτοντας 225 GWh στη μέση ετήσια παραγωγή του συστήματος.
- Η διάταξη άντλησης - ταμίευσης που προτάθηκε καθιστά το σύστημα πιο ευέλικτο. Η δυνατότητα πρωτεύουσας ενεργειακής παραγωγής (μηνιαίως) αυξάνεται θεαματικά από τις 94 GWh στις 147 GWh αν εγκατασταθούν αντλιοστρόβιλοι, πάντα καλύπτοντας με ασφάλεια το στόχο εκτροπής 600 hm<sup>3</sup>/έτος.
- Η συνδυασμένη ενεργειακή-αρδευτική προσέγγιση στη διαχείριση αποφέρει περί τα 150 εκατ. € μικτού οφέλους ετησίως.
- Συμπεραίνεται η ανάγκη εκπόνησης μελέτης ολοκληρωμένης διαχείρισης για το υδροσύστημα Αχελώου - Θεσσαλίας, η οποία να συνδυάζει την ενεργειακή παραγωγή με την κατάλληλη αξιοποίηση των καλλιεργήσιμων θεσσαλικών εκτάσεων που μπορεί να αποφέρει το μέγιστο όφελος (λ.χ. βιοκαύσιμα) ή να συμβάλλει στην αειφορία και την πρωτογενή αυτονομία της χώρας.

# Βιβλιογραφικές αναφορές

- Efstratiadis, A., D. Koutsoyiannis, and D. Xenos, *Minimising water cost in the water resource management of Athens*, *Urban Water Journal*, 1 (1), 3–15, 2004.
- Koutsoyiannis, D., and A. Economou, *Evaluation of the parameterization-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems*, *Water Resources Research*, 39 (6), 1170, doi:10.1029/2003WR002148, 2003
- Koutsoyiannis, D., *Scale of water resources development and sustainability: Small is beautiful, large is great*, *Hydrological Sciences Journal*, 56 (4), 553–575, 2011
- Varveris, A., P. Panagopoulos, K. Triantafillou, A. Tegos, A. Efstratiadis, N. Mamassis, and D. Koutsoyiannis, *Assessment of environmental flows of Acheloos Delta*, *European Geosciences Union General Assembly 2010, Geophysical Research Abstracts, Vol. 12*, Vienna, 12046, European Geosciences Union, 2010.



Ευχαριστώ πολύ για την προσοχή σας

