



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΠΑΡΑΓΩΓΗ & ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»



«Διερεύνηση ρυθμιστικής λειτουργίας Μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου με δεξαμενή αποθήκευσης»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κορίνα Κωνσταντίνα Δρακάκη

Διπλωματούχα Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ (2021)

A.M: 003300959

Επιβλέπων : Γεώργιος Ι. Τσεκούρας
Επίκουρος Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής,
Σχολή Μηχανικών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών
Μηχανικών

Αθήνα,
Οκτώβριος 2023

Στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης & ΑΠΕ

• Οδηγία 2009/28/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), *σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές*

1. **20%** μείωση των ρύπων του θερμοκηπίου της ΕΕ
2. **20%** αύξηση της ενεργειακής απόδοσης της ΕΕ
3. **20%** παραγόμενης ενέργειας της ΕΕ να προέρχεται από ΑΠΕ

• ΕΕ~22,1%

• Ελλάδα~ 21.7%

1.

- **Φλεβάρη του 2022:** εισβολή της Ρωσίας στην Ουκρανία
- **18 Μαΐου 2022,** REPowerEU → με σκοπό την επιτάχυνση της αδειοδότησης των ΑΠΕ, Μείωση της εξάρτησης της ΕΕ από τα ρωσικά ορυκτά καύσιμα
- **Διπλασιασμός** της επιπλέον ανάπτυξης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

3.

• Ιούλιο του 2021 «Fit for 55», που αποσκοπεί σε *μια ουδέτερη κλιματική Ευρώπη έως το 2050* :

1. Μηδενικές εκπομπές του φαινομένου του θερμοκηπίου έως το 2050
2. Οικονομική ανάπτυξη, με τη λιγότερη δυνατή χρήση πόρων
3. Ενδιάμεσο στόχο την μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου (CO2) κατά 55% μέχρι το 2030

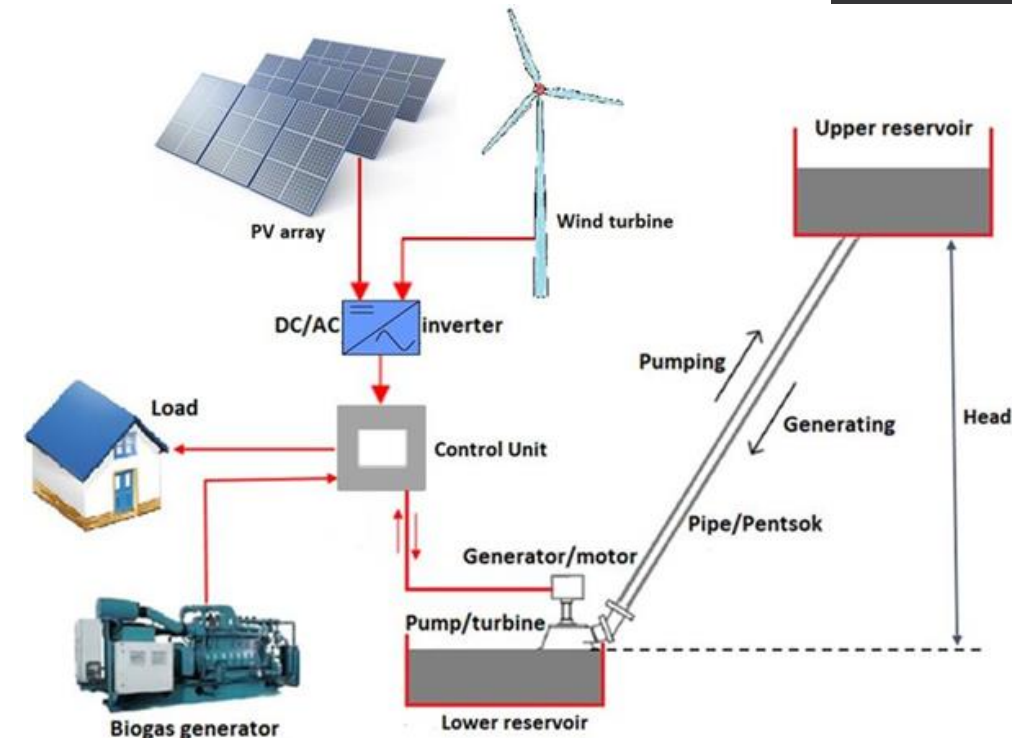
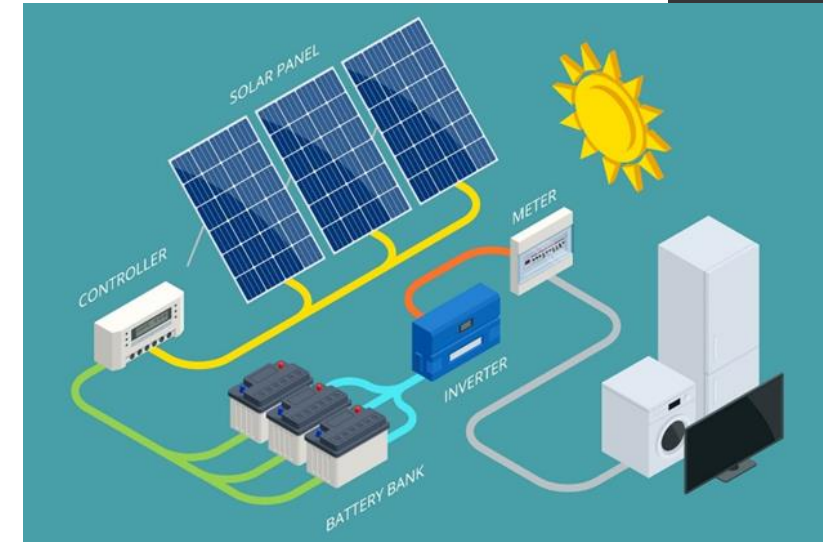
2.

Ο ρόλος της αποθήκευσης στις ΑΠΕ

- **(-) Μείωση** της αβεβαιότητας των ΑΠΕ
- **(+) Αύξηση** της αξιοπιστίας και ποιότητας παρεχόμενης ενέργειας από ΑΠΕ
- **(++) Ενίσχυση** του βαθμού ενσωμάτωσης των ΑΠΕ στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής

Πως;

- Μέσω της διείσδυσης, ανάπτυξης και εφαρμογής έργων αποθήκευσης
- Εκμετάλλευση πλεονασμάτων ενέργειας, όταν η παραγωγή υπερβαίνει τη ζήτηση
- Αποθήκευση ποσοτήτων παραγόμενης ενέργειας, ώστε να αξιοποιηθούν τις ώρες αιχμής

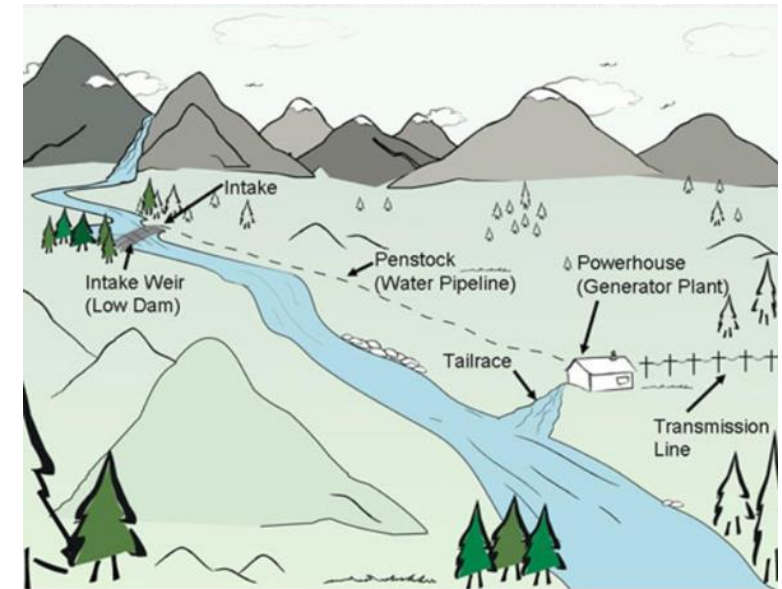


Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα και ΑΠΕ

- Στην Ελλάδα υδροηλεκτρικά έργα ισχύος 1-15 MWe , χαρακτηρίζονται ως **Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα (ΜΥΗΕ)**

- Κύρια χαρακτηριστικά τους είναι:

1. Εκμετάλλευση του διερχόμενου υδάτινου όγκου κατά μήκος της ροής του ποταμού ή στον πόδα μεγάλων φραγμάτων,
2. Δεν συνοδεύονται από δεξαμενές αποθήκευσης όπως συμβαίνει με τα μεγάλα υδροηλεκτρικά,
3. Μικρό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης
4. Η παραγωγή ισχύος είναι μεταβλητή και εξαρτάται από: (α) την εποχικότητα, (β) την παροχή του ποταμού, (γ) το εύρος λειτουργίας των στροβίλων και την καμπύλη β.α. και



Μπορεί να βελτιωθεί η απόδοση των ΜΥΗΕ και ως επακόλουθο η παραγόμενη ισχύς τους ;

Case Study: Διερεύνηση αύξησης ενεργειακού οφέλους υφιστάμενου ΜΥΗΕ

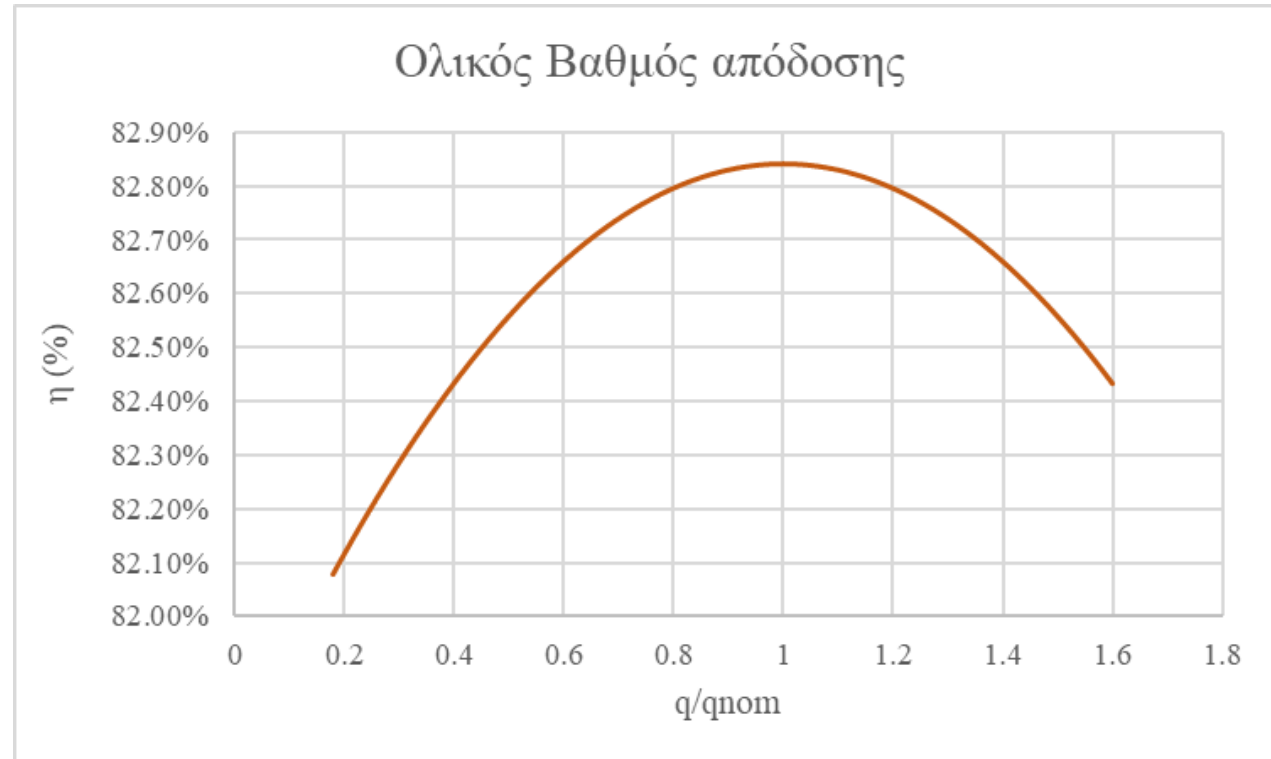
Τεχνικά χαρακτηριστικά:

1. Στρόβιλος Pelton, (6 ακροφύσια)

- $P_{nom} = 6.904 \text{ MW}$,
- $H_{net} = 300 \text{ m}$
- $q_{min} = 0.27 \text{ m}^3/\text{s}$,
- $q_{max} = 2.40 \text{ m}^3/\text{s}$,
- $q_{nom} = 1.50 \text{ m}^3/\text{s}$,
- $\eta_{nom} = 0.87$

2. Σύγχρονη γεννήτρια

- $P_{nom} = 6,709 \text{ KW}$
- $\cos\varphi = 0.85$
- Ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας 0.9618
- Ο βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή ίσος με 0.99



Ρυθμιστικός κανόνας λειτουργίας και οριακές συνθήκες

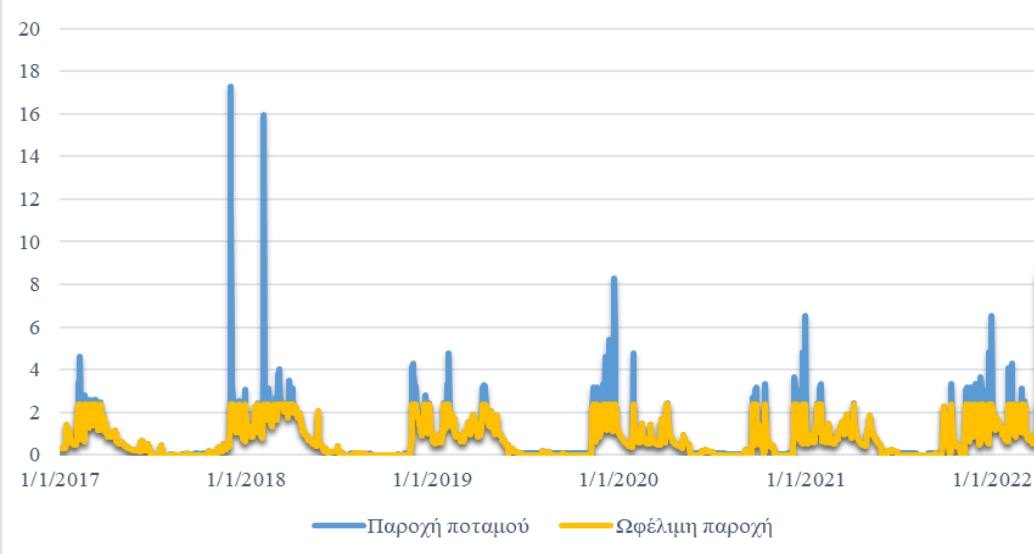
! Στόχοι του προτεινόμενου ρυθμιστικού κανόνα είναι:

1. Εκμετάλλευση παροχών που χάνονται αναξιοποίητες

(q_{min}, q_{max})

2. $q_{turb} \geq q_{nom}$

Χρονοσειρά ημερήσιων παροχών 2017-2022



Χρονικές συνθήκες :

Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας του στροβίλου ($t_{min,oper}$) = 30 min,

$$\circ t_{min,oper} \leq \Delta t_{turb,operation}$$

Ελάχιστος χρόνος μη λειτουργίας του στροβίλου (t_{min,no_oper}) =

10 min,

$$\circ \Delta t - \Delta t_{turb,operation} > t_{min,no_oper}$$

$\Delta t \geq t_{min,oper} + t_{min,no_oper}$, όπου Δt ισούται με το ωριαίο βήμα

I. Για την περίπτωση όπου $q_t < q_{min}$:

- $proxV_{q,t} = V_{t-1} + q_t * \Delta t$

Έλεγχος αν,

- $\rightarrow \Delta t_{opt} = proxV_{q,t}/q_{nom}$ ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες ;
 - **1.** Εάν, $\Delta t_{opt} \geq t_{min,oper}$ και $\Delta t - \Delta t_{opt} \geq t_{min,no_oper}$, τότε $q_{turb} = q_{nom}$, για το χρονικό διάστημα Δt_{opt}
 - Εάν, $\Delta t_{opt} < t_{min,oper}$, $q_{turb} \neq q_{nom}$, τότε $q_{turb,potential} = proxV_{q,t}/\Delta t_{min,oper}$ και:
 - Εάν $q_{turb,potential} > q_{min}$, τότε $q_{turb} = q_{turb,potential}$, $V_{q,t} = \min(proxV_{q,t} - q_{turb} * \Delta t_{min,oper} ; V_{tank,max.})$ και $spill_t = \max\{0; (V_{q,t} - V_{tank,max.})\}$
 - Εάν $q_{turb,potential} < q_{min}$, τότε $q_{turb} = 0$, $V_{q,t} = \min(proxV_{q,t} ; V_{tank,max.})$ και $spill_t = \max\{0; (q_t * dt - V_{q,t} - q_{turb} * dt)\}$

I. Για την περίπτωση όπου $q_t < q_{min}$:

- **2.** Εάν, $\Delta t - \Delta t_{opt} < t_{min,no_oper}$ τότε έλεγχος για μικρότερο Δt_{opt} και μεγαλύτερη παροχή, για $\Delta t_{opt}' = \Delta t - t_{min,no_oper}$
- $q_{turb,potential} = proxV_{q,t} / \Delta t_{opt}'$,
 - Εάν $q_{turb,potential} > q_{max}$, τότε $q_{turb} = q_{max}$, $V_{q,t} = \min(proxV_{q,t} - q_{turb} * \Delta t_{opt}' ; V_{tank,max.})$ και $spill_t = \max\{0; (q_t * dt - V_{q,t} - q_{turb} * dt)\}$
 - Εάν $q_{min} < q_{turb,potential} < q_{max}$, τότε $q_{turb} = q_{turb,potential}$, $V_{q,t} = \min(proxV_{q,t} - q_{turb} * \Delta t_{opt}' ; V_{tank,max.})$ και $spill_t = \max\{0; (q_t * dt - V_{q,t} - q_{turb} * dt)\}$

Ανάπτυξη Αλγορίθμου

II. Για την περίπτωση όπου $q_t > q_{min}$:

Συγκεκριμένα παρουσιάζονται δύο υποπεριπτώσεις:

1. $q_t < q_{max}$, όπου η παροχή προς τον στρόβιλο, ισούται με το q_t , χωρίς να αποθηκεύεται ή να υπερχειλίζει κάποια ποσότητα,
2. $q_t > q_{max}$, όπου η παροχή προς τον στρόβιλο, ισούται με το q_{max} , και η διαφορά $q_t - q_{max}$ αποθηκεύεται στη δεξαμενή, και αν ξεπεραστεί ο μέγιστος όγκος της δεξαμενής, υπερχειλίζει

Σενάρια προς εξέταση: Εναλλακτικοί ωφέλιμοι όγκοι δεξαμενής αποθήκευσης

Σενάριο	Ποσοστό μέσου ημερήσιου όγκου υδατορεύματος	Μέγιστος ωφέλιμος όγκος δεξαμενής αποθήκευσης ($c * V_{daily,average}$)
---------	---	--

Sc₁	$c \% = 2.5$	$V_{tank,max,i} = 1542 m^3$
Sc₂	$c \% = 5$	$V_{tank,max,i} = 3084 m^3$
Sc₃	$c \% = 10$	$V_{tank,max,i} = 6169 m^3$
Sc₄	$c \% = 15$	$V_{tank,max,i} = 9253 m^3$
Sc₅	$c \% = 20$	$V_{tank,max,i} = 12337 m^3$
Sc₆	$c \% = 25$	$V_{tank,max,i} = 15422 m^3$
Sc₇	$c \% = 50$	$V_{tank,max,i} = 30844 m^3$

! 11 Σενάρια προς εξέταση !

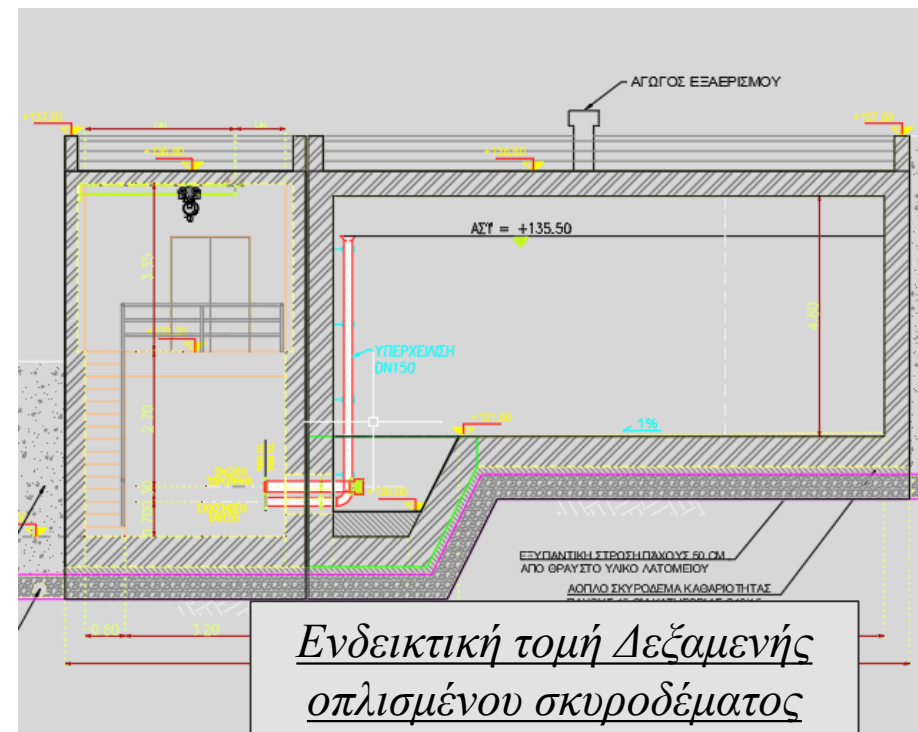
Περιοχή βέλτιστης διαστασιολόγησης σύμφωνα με την ΚΠΑ και τον ΕΒΑ

Σενάρια γύρω από την περιοχή βέλτιστου	Ποσοστό μέσου ημερήσιου όγκου υδατορεύματος	Μέγιστος ωφέλιμος όγκος δεξαμενής αποθήκευσης ($c * V_{daily,average}$)
--	---	--

Sc_A	$c \% = 0.5$	$V_{tank,max,i} = 308m^3$
Sc_B	$c \% = 1$	$V_{tank,max,i} = 617m^3$
Sc_C	$c \% = 1.5$	$V_{tank,max,i} = 925m^3$
Sc_D	$c \% = 3$	$V_{tank,max,i} = 1.851m^3$

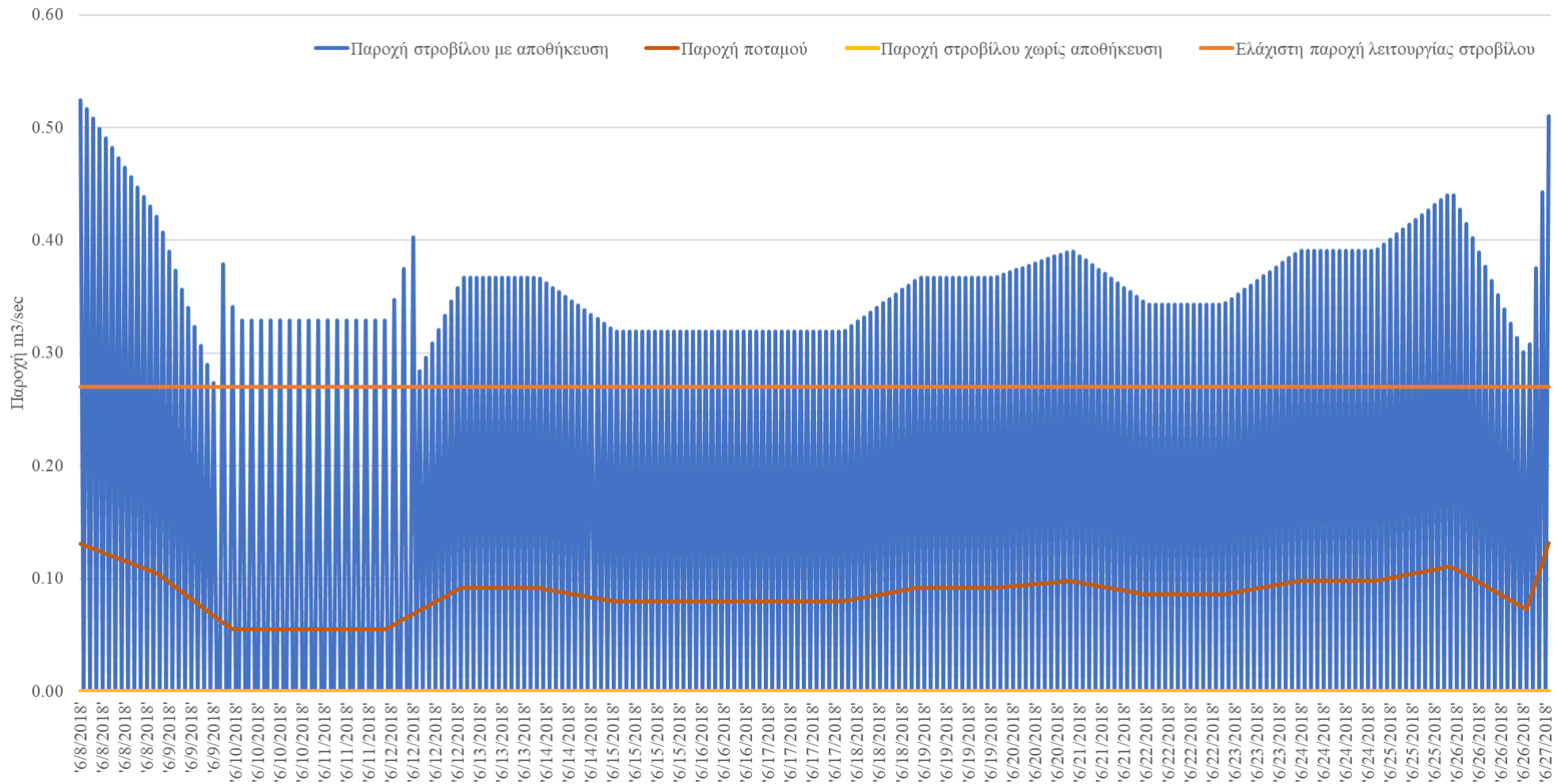
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δεξαμενής

- Πάχος τοιχωμάτων 0.5 m
- Πάχος πυθμένα 0.6 m
- Καθαρό εμβαδόν πυθμένα 20 * 20 m²
- Πάχος εξυγιαντικής στρώσης (θραυστό υλικό λατομείου) 0.5 m
- Πάχος άοπλου σκυροδέματος καθαριότητας, 0.15 m



	ScA	ScB	ScC	Sc1	ScD	Sc2	Sc3	Sc4	Sc5	Sc6	Sc7
No Δεξαμενών	1	1	1	1	2	2	4	6	7	9	18
H (m)	1	2	3	4	2.5	4	4	4	4.5	4.5	4.5

Χρονοσειρές παροχών Ιουνίου 2018



Προσέγγιση κόστους επένδυσης

- Κόστος σκυροδέματος C25/30: 95.5€/m³
- Κόστος σκυροδέματος C12/15: 75.5€/m³
- Κόστος οπλισμού: 0.94€/m³
- Κόστος θραυστού υλικού λατομείου: 14.85€/m³



Λαμβάνοντας υπόψη,

1. 18 %, ως γενικά έξοδα και όφελος του Εργολάβου
2. 9% σε περίπτωση απρόβλεπτων εργασιών
3. 24% η προσθήκη του ΦΠΑ

Προκύπτει: Τελικό κόστος της επένδυσης = Μερικό κόστος επένδυσης * 1.18 * 1.09 * 1.24

Δείκτες χρηματοοικονομικής ανάλυσης

- Χρονικό ορίζοντα 20ετία
- Το προεξοφλητικό επιτόκιο (r) λήφθηκε ίσο με 6%
- Ως ετήσια έξοδα της οικονομοτεχνικής ανάλυσης της επένδυσης λήφθηκαν υπόψη, η ετήσια συντήρηση των δεξαμενών και λοιπές τεχνικές επισκέψεις κόστους 2400 €.
- Ανάλυση ευαισθησίας για δύο διαφορετικές τιμές πώλησης της ενέργειας:
 - Περίπτωση (I) η τιμή πώλησης λήφθηκε ίση με την τρέχουσα τιμή 0.097 €/kWh
 - Περίπτωση (II) η τιμή πώλησης λήφθηκε κατά 20% προσαυξημένη, ήτοι 0.116 €/kWh.

**! Βιώσιμη επένδυση : ΚΠΑ>0
EBA> 6%**

Αποτελέσματα-Περίπτωση (I)

Σενάριο	Πλεόνασμα Παραγόμενης ενέργειας (kWh)	Μεταβολή εσόδων λόγω πλεονάσματος ενέργειας (€)	ΚΠΑ(€)	EBA (%)	B/C
<i>Sc_A</i>	451,498	43,795	368,830	39.01%	3.76
<i>Sc_B</i>	523,452	50,775	436,493	40.83%	3.99
<i>Sc_C</i>	524,228	50,850	424,964	36.99%	3.68
<i>Sc₁</i>	525,778	51,000	414,298	33.85%	3.43
<i>Sc_D</i>	526,271	51,048	308,874	18.92%	2.12
<i>Sc₂</i>	526,271	51,048	271,700	16.14%	1.87
<i>Sc₃</i>	530,172	51,427	-10,252	5.78%	0.98
<i>Sc₄</i>	534,714	51,867	-291,491	1.39%	0.67
<i>Sc₅</i>	538,472	52,232	-473,826	-0.5%	0.56
<i>Sc₆</i>	543,250	52,695	-767,194	-2.6%	0.44
<i>Sc₇</i>	563,596	54,669	-2,088,633	-7.7%	0.23

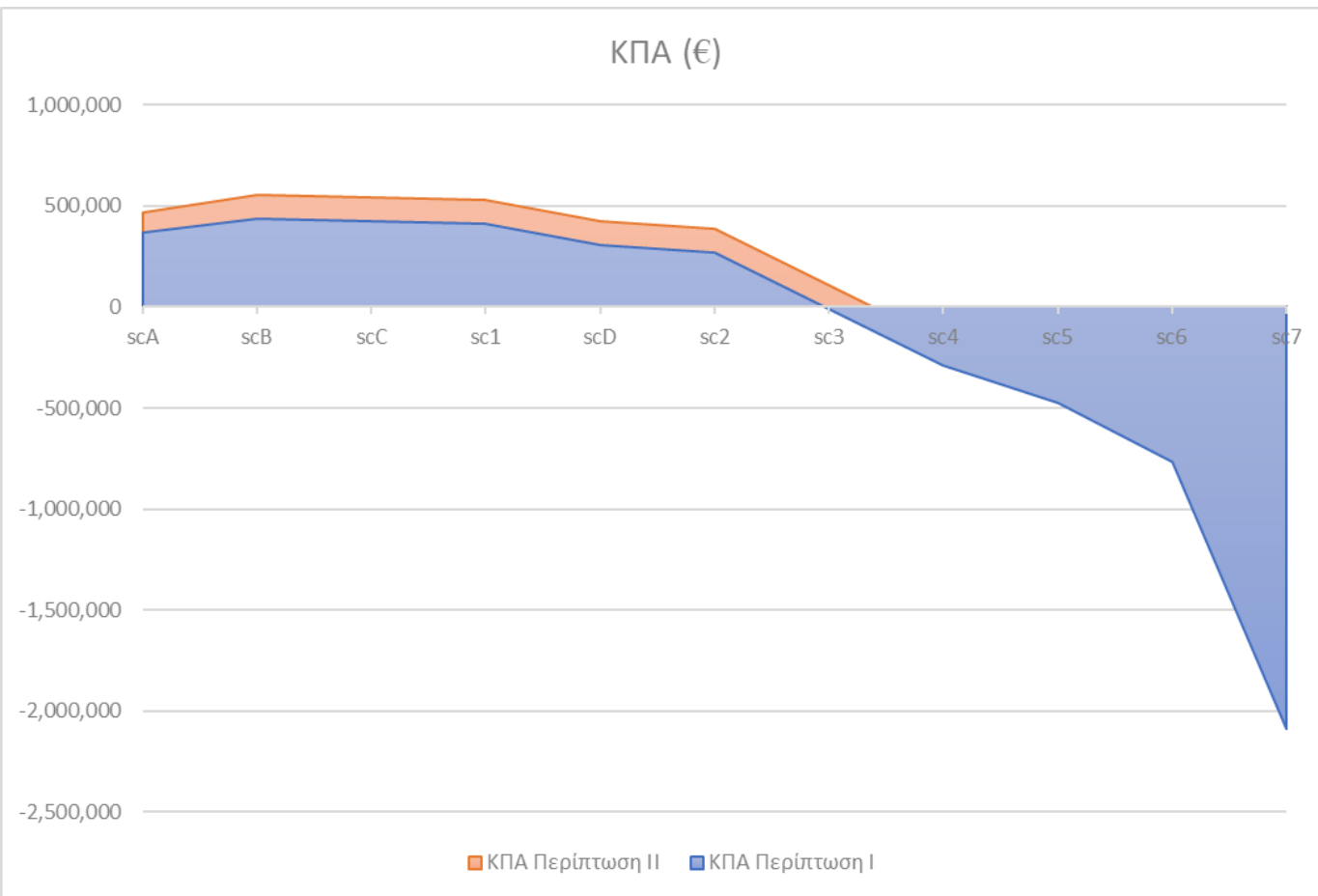
Αποτελέσματα-Περίπτωση (II)

Σενάριο	Μεταβολή εσόδων λόγω πλεονάσματος ενέργειας (€)	ΚΠΑ (€)	ΕΒΑ(%)	B/C
<i>Sc_A</i>	52,554	469,295	47.31%	4.52
<i>Sc_B</i>	60,930	552,969	49.43%	4.79
<i>Sc_C</i>	61,020	541,614	44.80%	4.42
<i>Sc₁</i>	61,201	531,292	41.03%	4.11
<i>Sc_D</i>	61,258	425,978	23.27%	2.54
<i>Sc₂</i>	61,258	388,803	20.02%	2.24
<i>Sc₃</i>	61,712	107,720	8.23%	1.18
<i>Sc₄</i>	62,241	-172,508	3.39%	0.81
<i>Sc₅</i>	62,678	-354,007	1.40%	0.67
<i>Sc₆</i>	63,234	-646,312	-0.93%	0.53
<i>Sc₇</i>	65,603	-1,963,224	-6.31%	0.28

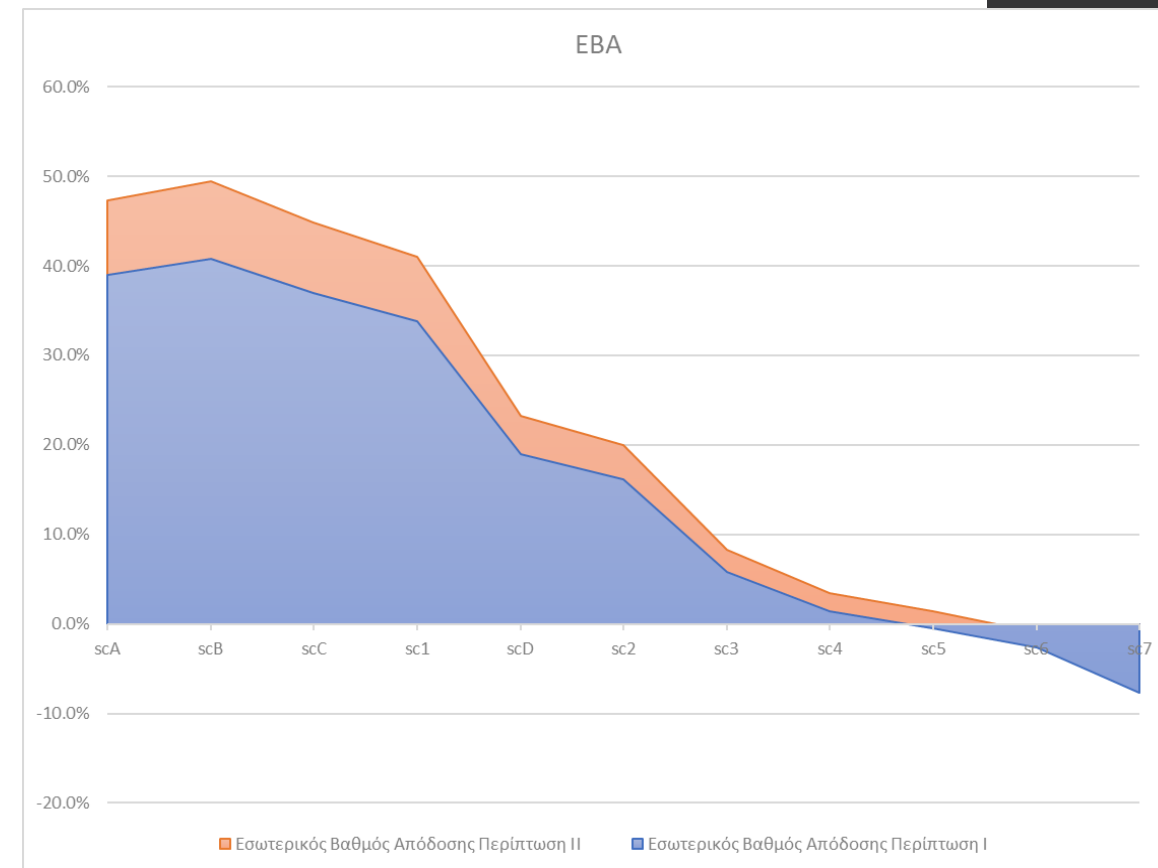
Βέλτιστο σενάριο δεξαμενής αποθήκευσης

- Το σενάριο Sc_B
- Προσθήκη 1 δεξαμενής ύψους 2 m
- Ωφέλιμου όγκου $V_{tank,max,i} = 617m^3$
- Αρχικό κεφάλαιο 118,363 €
- Πλεονάζουσας ετήσιας παραγόμενης ενέργειας ίσης με 523,452 kWh
- Επιπλέον όφελος 50,775 € (περίπτωση I) και 60,930 € (περίπτωση II)
- Η ΚΠΑ ισούται με 436,493 € (περίπτωση I) και 552,969 € (περίπτωση II)
- Ο ΕΒΑ σε 40.83% (περίπτωση I) και 49.43% (περίπτωση II)
- Ο λόγος Β/С σε 3.99 (περίπτωση I) και 4.79 (περίπτωση II)





Διαγράμματα ΚΠΑ και ΕΒΑ για τις περιπτώσεις (I) & (II)



Βασικά συμπεράσματα & στόχοι

- Υφιστάμενη εγκατάσταση του ΜΥΗΕ Αργύρι, επενδύοντας ένα αρχικό κεφάλαιο **118,363 €** για μια δεξαμενή ωφέλιμου όγκου **617 m³**, οδηγεί σε βελτίωση:

(α) του ποσοστού αξιοποίησης του υδατικού δυναμικού και της λειτουργίας του στροβίλου,

(β) των κερδών της με την εγκατάσταση δεξαμενής αποθήκευσης,

~Αποτελώντας μια βιώσιμη επένδυση~

Εφαρμογή ρυθμιστικού κανόνα λειτουργίας σε:

- μείγμα στροβίλων -όμοιων και μη- με ταυτόχρονη εφαρμογή βέλτιστου κανόνα λειτουργίας του μείγματος → ευαισθησία του μείγματος στην προσθήκη δεξαμενής συγκριτικά με ένα στρόβιλο
- στροβίλου αντιδράσεως, π.χ. Francis, (μορφή της καμπύλης του βαθμού απόδοσης, καθώς εμφανίζει χαμηλό βαθμό απόδοσης σε μικρές τιμές παροχής, σε αντίθεση με τον Pelton).
- Ανάπτυξη ρυθμιστικού κανόνα λειτουργίας εφαρμόζοντας δυναμικό προγραμματισμό εμπρόσθιας τροφοδότησης
- Εφαρμογή κυμαινόμενου τιμολογίου ενέργειας μεταξύ των περιόδων υψηλής και χαμηλής ζήτησης

Επόμενα βήματα
εξέλιξης του
ερευνητικού
αντικειμένου

Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας!

