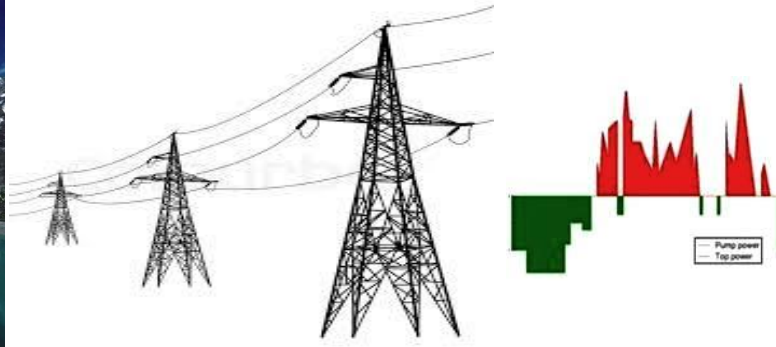


Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ)

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Μάθημα του 9^{ου} Εξαμήνου του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών
Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας & Υδροηλεκτρικά Έργα



Ενέργεια και η οικονομική της αντλησιοταμίευσης

Αθήνα, 22 Μαΐου 2018

Γεώργιος Καρακατσάνης



Υποψήφιος Διδάκτωρ ΕΜΠ, ΜΔΕ «Περιβάλλον και Ανάπτυξη» ΕΜΠ

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος (georgios@itia.ntua.gr)

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ



Διάρθρωση της παρουσίασης

1. Στοιχεία οικονομικής της ηλεκτρικής ενέργειας

- Η ηλεκτρική ενέργεια ως οικονομικό αγαθό
- Το Κόστος και τα είδη του (σταθερό, μεταβλητό, συνολικό, οριακό, μέσο)
- Το Κόστος και η σύνθεση του ενεργειακού μίγματος
- Το Κόστος και οι οικονομίες κλίμακας

2. Στοιχεία οικονομικής και χρηματοοικονομικής θεωρίας

- Ζήτηση, Προσφορά και Τιμή Ισορροπίας
- Εξάντληση φυσικών πόρων (Κανόνας του Hotelling, λόγος R/P)
- Χρηματοοικονομικά μέτρα αξιολόγησης επενδύσεων (ΚΠΑ, ΕΒΑ)

3. Ηλεκτρική ενέργεια και αντλησιοταμίευση

- Το (προτεινόμενο) νομικό πλαίσιο της αντλησιοταμίευσης (2012)
- Κριτήρια επενδύσεων αντλησιοταμίευσης
- Τεχνικές παράμετροι επενδύσεων αντλησιοταμίευσης
- Απομονωμένα (remote) ενεργειακά συστήματα και αντλησιοταμίευση
- Διεθνές εμπόριο ηλεκτρισμού και αντλησιοταμίευση

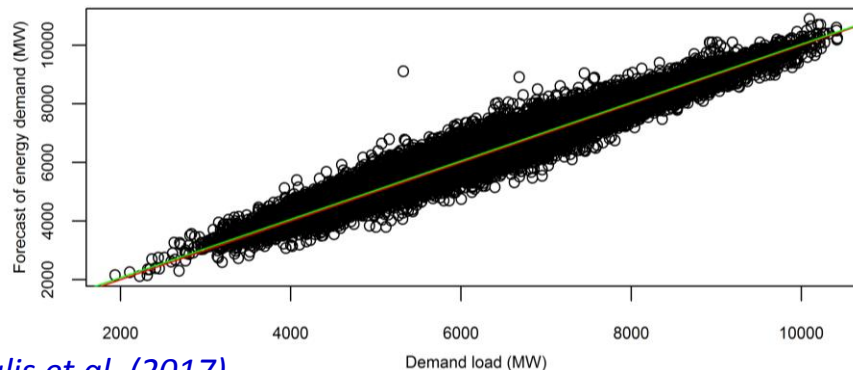
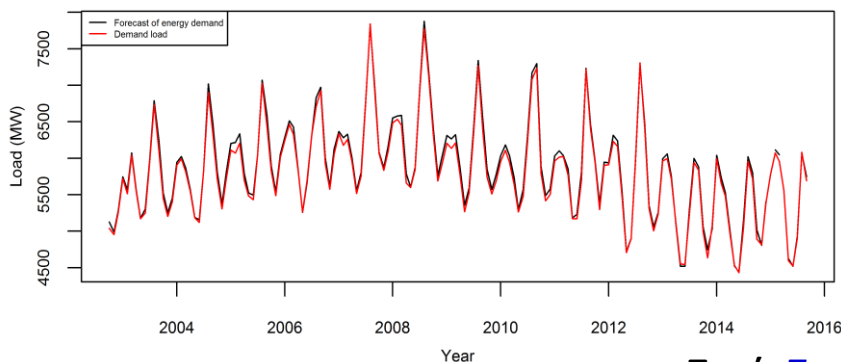
Η ηλεκτρική ενέργεια ως οικονομικό αγαθό

Ποιο είναι το θεμελιώδες οικονομικό χαρακτηριστικό της ηλεκτρικής ενέργειας;

- ✓ Πρέπει να παραδίδεται **ακριβώς την στιγμή της ζήτησής του**, καθώς δεν μπορεί να αποθηκευθεί στην φυσική του μορφή σε μεγάλες ποσότητες.

Πόσο συχνά το ενεργειακό σύστημα μπορεί να προβλέψει τέλεια την ζήτηση ηλεκτρισμού, ώστε να παράγει ακριβώς το απαιτούμενο ποσό;

- ✓ Σχεδόν **ποτέ**, σε οποιαδήποτε χώρα στον πλανήτη → Αποκλίσεις μεταξύ της ζήτησης και της προσφοράς → Αναποτελεσματικότητα του ενεργειακού συστήματος → Ανάγκη διαχείρισης πλεονασμάτων/ελλειμμάτων.



Πηγή: *Tyrallis et al. (2017)*

Πώς επιλέγεται το ενεργειακό μίγμα για την παραγωγή ηλεκτρισμού;

- ✓ Από το καύσιμο με το **ελάχιστο κόστος** ανά επίπεδο εγκατεστημένης ισχύος.

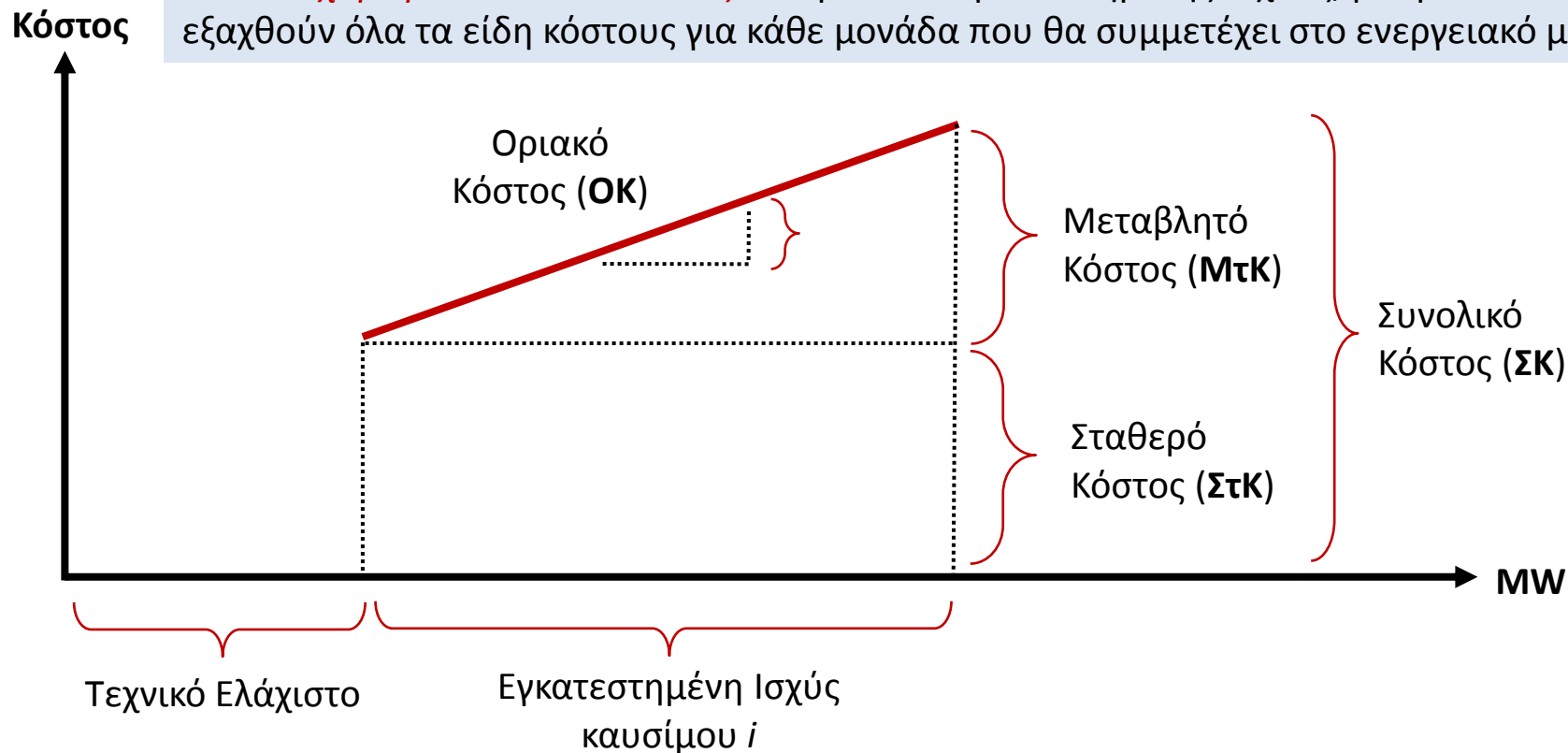
Το Κόστος και τα είδη του

Το **Κόστος** είναι η **απαιτούμενη δαπάνη** για την **συντήρηση** ή/και **λειτουργία** μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας. Διακρίνεται στις παρακάτω κύριες κατηγορίες:

- ✓ **Σταθερό Κόστος (ΣτΚ):** Είναι ένα **πάγιο και σταθερό έξοδο** ακόμη κι αν η μονάδα δεν λειτουργεί καθόλου. Κατά βάση, αφορά στο κόστος συντήρησης.
- ✓ **Μεταβλητό Κόστος (ΜτΚ):** Είναι ένα **μεταβλητό έξοδο**, ανάλογο με το μέγεθος της παραγωγής. Κατά βάση αφορά στο κόστος καυσίμου και ρύπων (=φόρος).
- ✓ **Συνολικό Κόστος (ΣΚ):** Είναι το **άθροισμα του ΣτΚ και του ΜτΚ** σε κάθε επίπεδο παραγωγής της μονάδας. Για μηδενική παραγωγή, ισούται με το ΣτΚ.
- ✓ **Μέσο Σταθερό Κόστος (ΜΣτΚ):** Είναι το **ΣτΚ διαιρεμένο με το επίπεδο εγκατεστημένης ισχύος** (MW). Όσο η παραγωγή αυξάνεται το ΜΣτΚ μειώνεται.
- ✓ **Μέσο Μεταβλητό Κόστος (ΜΜτΚ):** Είναι το **ΜτΚ (κόστος καυσίμου) διαιρεμένο με το επίπεδο εγκατεστημένης ισχύος** (MW). Το ΜΜτΚ μπορεί να αυξάνεται, να μειώνεται ή να παραμένει σταθερό όσο αυξάνεται η παραγωγή.
- ✓ **Οριακό Κόστος (ΟΚ):** Είναι το **διαφορικό Συνολικό Κόστος** (ΣΚ) ανά μονάδα αύξησης της παραγωγής (δηλ. πόσο αυξάνεται το Συνολικό Κόστος αν αυξηθεί η εγκατεστημένη ισχύς κατά μία μονάδα).

Το Κόστος και η σύνθεση του μίγματος ηλεκτρισμού (1)

Από τον **χάρτη συνολικού κόστους** ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος, μπορούν να εξαχθούν όλα τα είδη κόστους για κάθε μονάδα που θα συμμετέχει στο ενεργειακό μίγμα.



Γραμμικό Μοντέλο Κόστους

$$C_i = \bar{a}_i + b_i \cdot X$$

i = Τύπος καυσίμου (Λιγνίτης, Πετρέλαιο, ΦΑ)

C_i = Συνολικό Κόστος (ΣΚ) ανά τύπο καυσίμου

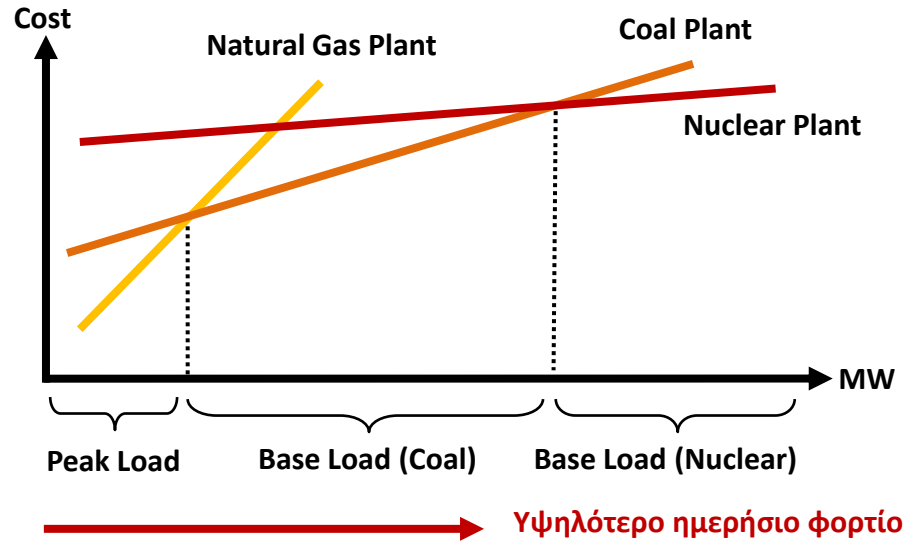
X_i = Εγκατεστημένη ή Παραγόμενη ισχύς ($X_{\min} \geq 0$)

a_i = Σταθερό Κόστος (ΣτΚ) ανά τύπο καυσίμου

b_i = Μεταβλητό Κόστος (ΜτΚ) ανά τύπο καυσίμου

Το Κόστος και η σύνθεση του μίγματος ηλεκτρισμού (2)

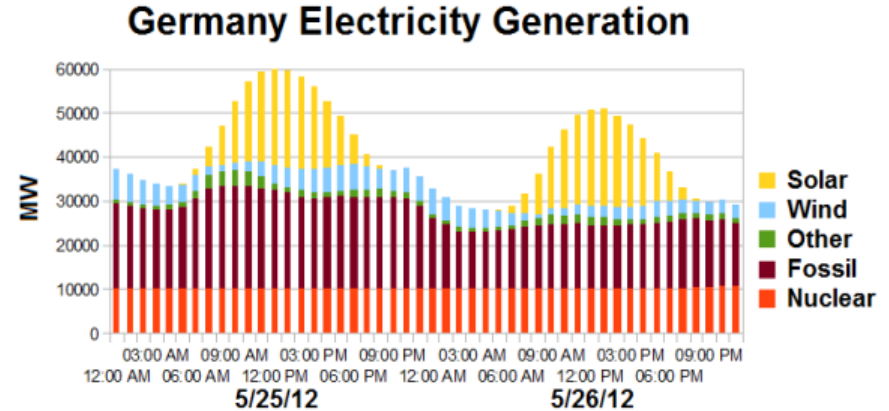
Η **Καμπύλη Κοινωνικού Κόστους Ηλεκτροπαραγωγής** διαμορφώνεται ως το μερίδιο του κάθε καυσίμου από το *ελάχιστο συνολικό κόστος ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος*.



Γραμμικό μοντέλο Καμπύλης Κοινωνικού Κόστους Ηλεκτροπαραγωγής

$$C_i = \bar{a}_i + b_i \cdot X$$

$$C_X = \text{Min}[C_i(X)]$$

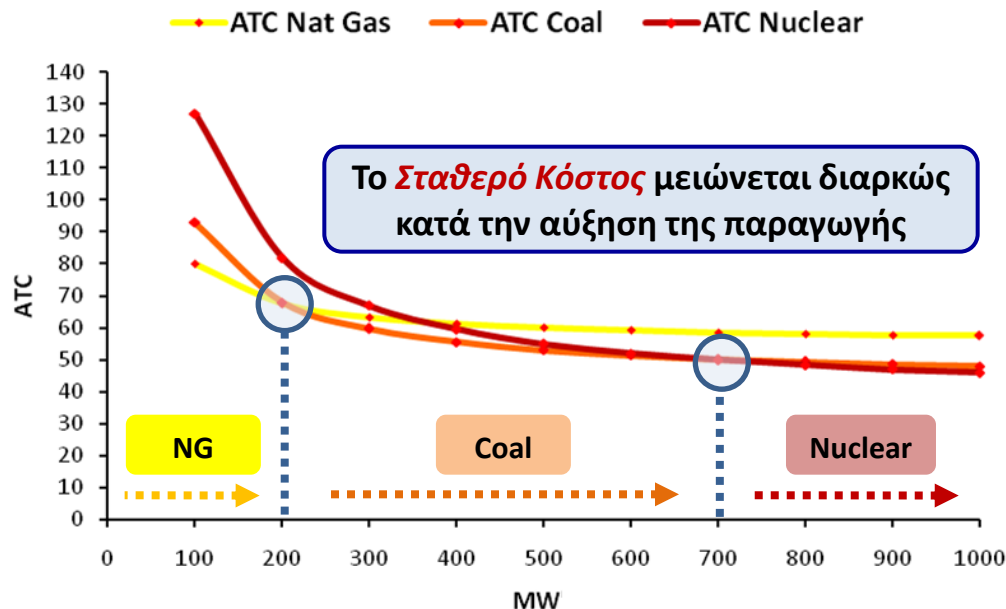


Αν η γερμανική ηλεκτροπαραγωγή μεταξύ 25-26/5/2012 είναι αντιπροσωπευτική του έτους, παρατηρούμε ότι επιλέγονται δύο καύσιμα βάσης: (1) **Ορυκτά** (Λιγνίτης) και (2) **Πυρηνικά**. Η *ελάχιστη ζητούμενη ισχύς* είναι πάνω από το *τεχνικό ελάχιστο* των πυρηνικών μονάδων, οπότε και εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία τους μέσα στο ηλεκτροδοτικό έτος.

Το Κόστος και οι οικονομίες κλίμακας



Η **Καμπύλη του Κοινωνικού Κόστους Ηλεκτροπαραγωγής** δείχνει **αυξανόμενο κόστος** κατά την αύξηση του παραγόμενου φορτίου, ωστόσο με **φθίνοντα ρυθμό**. Αυτό οφείλεται στις **οικονομίες κλίμακας** που λειτουργούν στα μεγάλα φορτία.

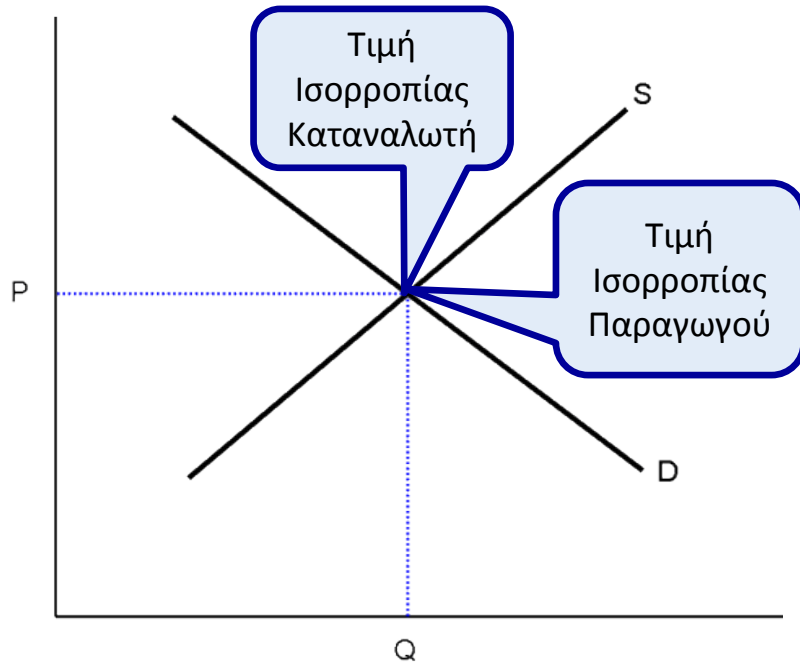


Μέσο Συνολικό Κόστος, Σταθερό Κόστος και Οικονομίες Κλίμακας

Το **Μέσο Συνολικό Κόστος** ισούται με $(a_i + b_i \cdot X)/X$. Στις μονάδες βάσης το **Σταθερό Κόστος (ΣτΚ)** ($=a$) αποτελεί το **μεγαλύτερο μέρος του Συνολικού Κόστους (ΣΚ)**. Κατά συνέπεια, όσο αυξάνεται η παραγωγή, το **ΜΣτΚ** μειώνεται ραγδαία, συμπαρασύροντας και το **ΜΣΚ**.

Ζήτηση, Προσφορά και Τιμή Ισορροπίας

Αγορά: Οποιοδήποτε *μέσο διεκπεραίωσης συναλλαγών* μεταξύ *αγοραστών* (καταναλωτών) και *πωλητών* (παραγωγών ή εμπόρων)



Η **Καμπύλη (Γραμμή) Ζήτησης** εκφράζει την *αρνητική σχέση* μεταξύ *τιμής* και *ζητούμενης ποσότητας* (όσο αυξάνεται η τιμή τόσο λιγότερο αγοράζει ο καταναλωτής με δεδομένο εισόδημα).

Η **Καμπύλη (Γραμμή) Προσφοράς** εκφράζει την *θετική σχέση* μεταξύ *τιμής* και *προσφερόμενης ποσότητας* (όσο αυξάνεται η τιμή, τόσο πιο πολύ κερδίζει ο παραγωγός με δεδομένο κόστος).

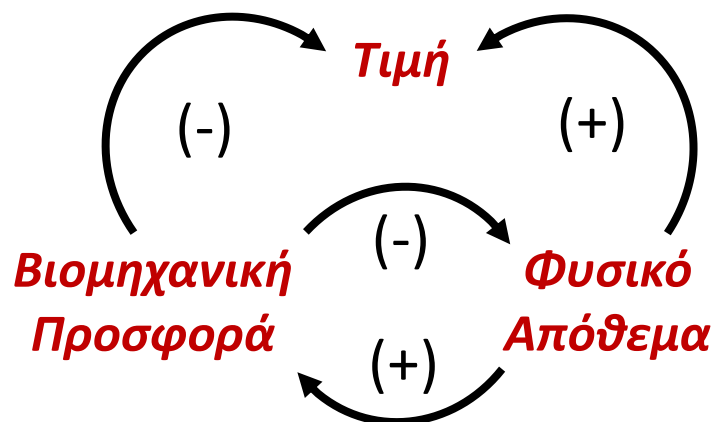
$$Q_D = a_D - b_D \cdot P$$

$$Q_S = a_S + b_S \cdot P$$

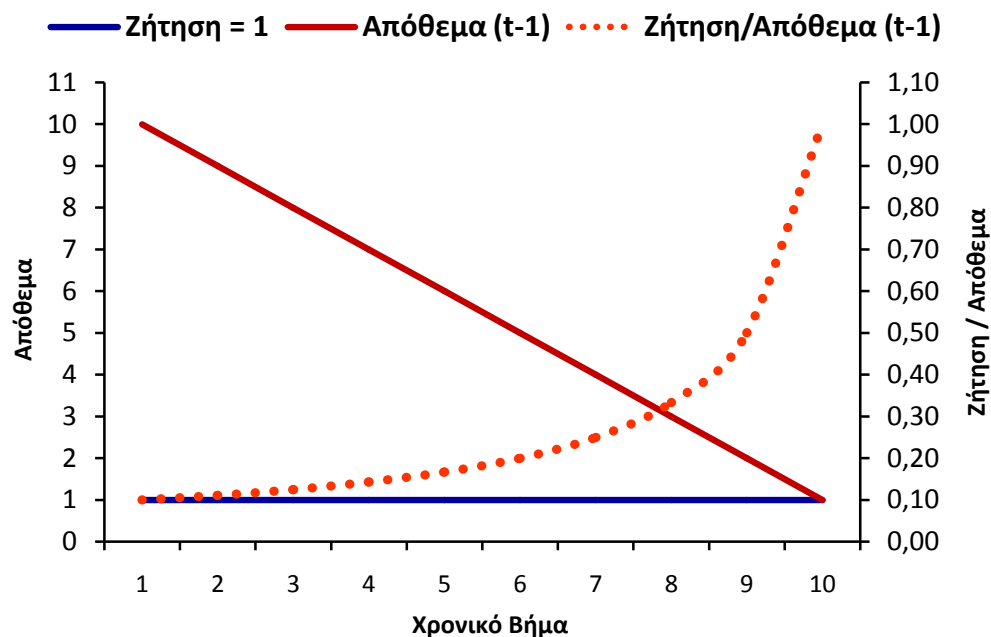
$$Q_{D,S}, a_{D,S}, b_{D,S} \geq 0$$

Η επίλυση του *συστήματος* $Q_D = Q_S$ (έχοντας γνώση των παραμέτρων *a* και *b*) δίνει την *Τιμή Ισορροπίας της Αγοράς* P^* (Market Equilibrium)

Εξάντληση φυσικών πόρων: Κανόνας του Hotelling



Έχει παρατηρηθεί ότι τις περιόδους αυξήσεων της **βιομηχανικής προσφοράς** (άρα και μείωσης των τιμών) των καυσίμων (κυρίως του πετρελαίου) ακολουθούσαν περίοδοι **αυξήσεων των τιμών**. Αυτό οφείλεται εν μέρει στην επίδραση που έχει η **αυξημένη εξάντληση αποθεμάτων**. Ο Hotelling (1931) δημιούργησε ένα σύστημα τιμολόγησης, το οποίο ενσωμάτωνε την επίδραση της μείωσης των αποθεμάτων *a priori*.



$$\lambda_t = Q_D / A_{t-1} \quad A_t = A_{t-1} - Q_D$$

Με **σταθερή ζητούμενη ποσότητα Q_D** σε κάθε χρονικό βήμα t για έναν **εξαντλήσιμο φυσικό πόρο**, δημιουργείται μια **σκιώδης** αύξηση της ζητούμενης ποσότητας οφειλόμενη **αποκλειστικά** στην **αυξανόμενη εξάντληση** του αποθέματος A_t .

Αξιολόγηση επενδύσεων (1): Συμβατικά μέτρα

Μέτρα απόδοσης των έργων αντλησιοταμίευσης

Συμβατικοί χρηματοοικονομικοί δείκτες:

1. **Καθαρά Παρούσα Αξία (ΚΠΑ)** = Το *προεξοφλημένο* (κατά το επιτόκιο της τράπεζας) *καθαρό κέρδος* που παράγει το σύστημα κατά την διάρκεια ζωής του (π.χ. σε 30 έτη θα με συνέφερε να επενδύσω σε ένα υδροηλεκτρικό ή να βάλω καλύτερα τα χρήματά μου στην τράπεζα;).

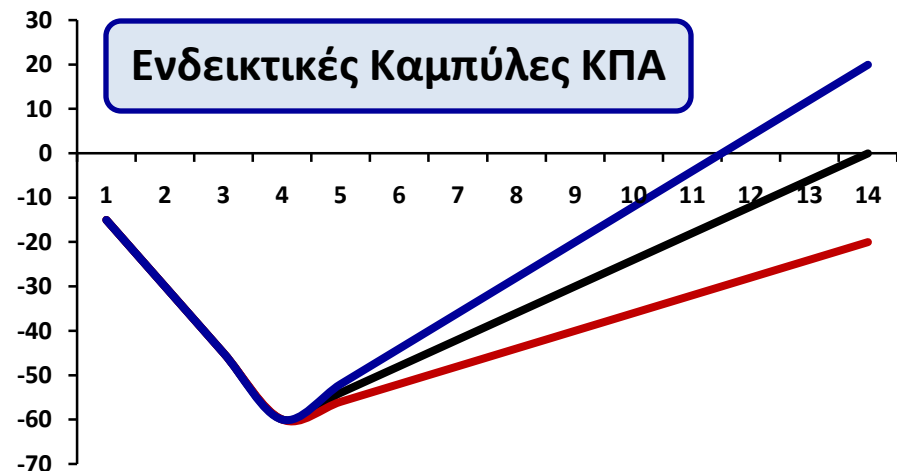
$$NPV = -\sum_{t=0}^{T_I} K_t + \sum_{t=T_I+1}^{T_K} \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t}$$

K = Αρχικά Κόστη Επένδυσης

B_t = Έσοδα σε κάθε χρόνο t

C_t = Έξοδα σε κάθε χρόνο t

r = Προεξοφλητικό επιτόκιο ελάχιστου κινδύνου



2. **Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (ΕΒΑ)** = Τι επιτόκιο θα χρειαζόμουν από την τράπεζα για τον ίδιο χρόνο, *αν θεωρήσω ότι δεν θα έχω κέρδη ή ζημίες από την επένδυση στο υδροηλεκτρικό* (π.χ. Η επένδυση στο υδροηλεκτρικό είναι πιο αποδοτική όταν η τράπεζα με δαλεάζει με επιτόκιο 5% ή 10%;);

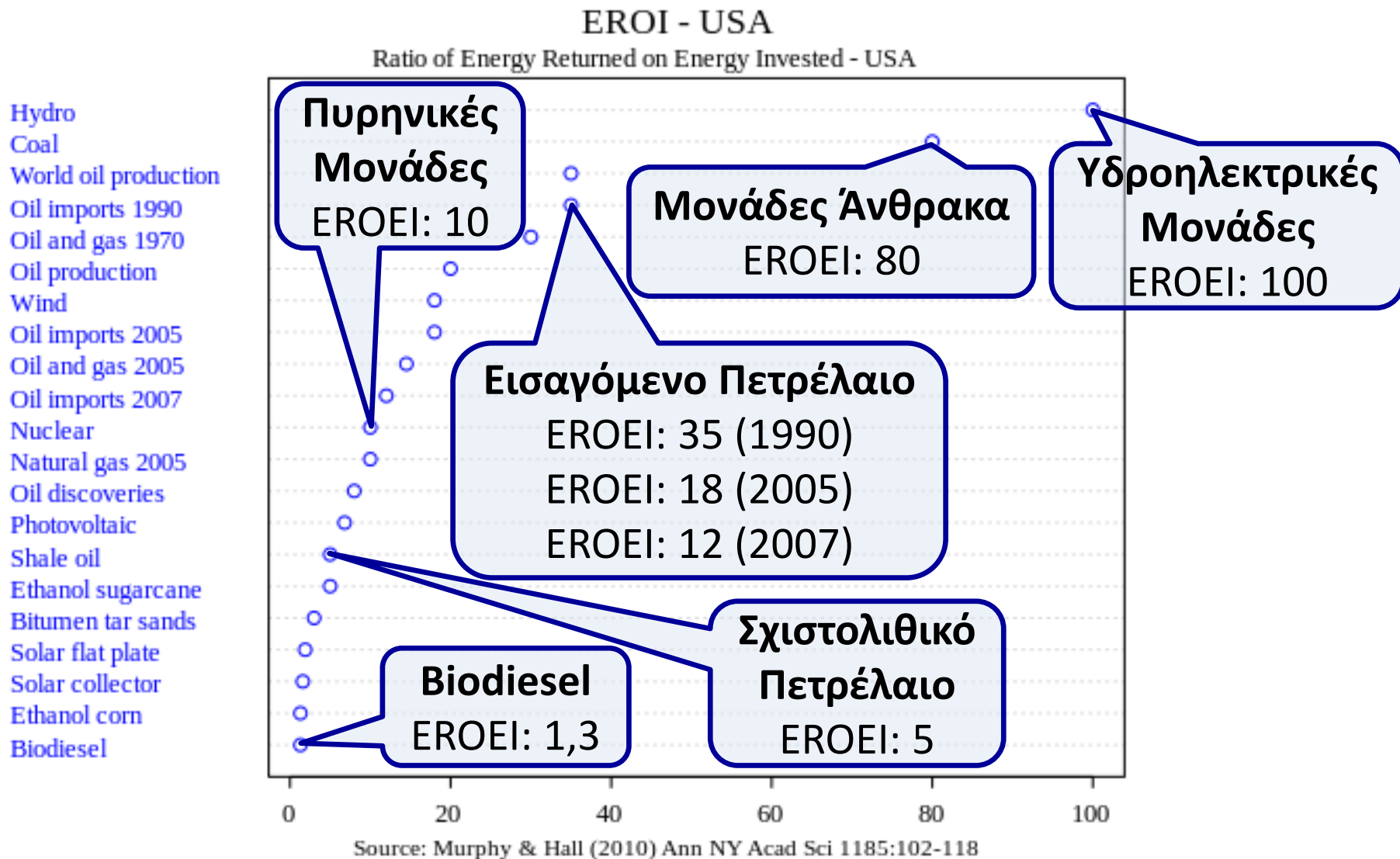
Αξιολόγηση επενδύσεων (2): Ειδικά μέτρα

Μέτρα απόδοσης των έργων αντλησιοταμίευσης

Εξειδικευμένοι χρηματο-ενεργειακοί δείκτες:

1. **Πρόσδοος Σπανιότητας** = *Τί αξία παράγει η «σπάνις»* του διαθέσιμου νερού;
2. **Δείκτης οικονομικής παραμονής του νερού** = Πόσο συχνοί είναι οι κύκλοι άντλησης/ταμίευσης → *Για πόσον καιρό το υδατικό κεφάλαιο μένει στο σύστημα*, παράγοντας ενεργειακή και χρηματοοικονομική αξία;
3. **Δείκτης απόκλισης ενεργειακής και χρηματοοικονομικής αξίας** = *Ποια είναι η ενεργειακή και χρηματοοικονομική παραγωγικότητα του συστήματος χάρη στην αντλησιοταμίευση*; Πόσο συχνά η ενέργεια που αποθηκεύεται έχει χαμηλή τιμή, ώστε να απελευθερωθεί αργότερα σε υψηλή τιμή (π.χ. η συχνή αποθήκευση σε χαμηλές τιμές και απελευθέρωση σε υψηλές, δείχνει υψηλή χρηματοοικονομική απόδοση, έστω κι αν η αποθηκευμένη ενέργεια είναι λίγη (χαμηλή ενεργειακή απόδοση)).
4. **Ανάκτηση ενέργειας ανά μονάδα δαπάνης ενέργειας (Energy Return on Energy Invested, EROEI)** = *Πόση είναι η ενέργεια που μπορεί να παράγει το έργο μέχρι την λήξη του λειτουργικού χρόνου ζωής του σε σχέση με την ενέργεια που δαπανήθηκε* αρχικά για την κατασκευή του;

EROEI διαφόρων τεχνολογιών στις ΗΠΑ



Το (προτεινόμενο) νομικό πλαίσιο της αντλησιοταμίευσης

Ποια είναι η κύρια οικονομική υπηρεσία της αντλησιοταμίευσης;

Βελτιώνει την απόδοσή του ενεργειακού συστήματος μέσω της **μείωσης της ενσωματωμένης αβεβαιότητας**, με την μορφή αντιστάθμισης των αποκλίσεων (ανεξαρτήτως αιτίας) των προβλέψεων ζήτησης ισχύος.

«...Πρόκειται εν γένει για ευέλικτες μονάδες, με κατάλληλα τεχνικά χαρακτηριστικά που μπορούν να συμβάλλουν πολύ αποτελεσματικά στη στήριξη της λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων παρέχοντας τις αναγκαίες επικουρικές υπηρεσίες για την υποστήριξη της μεγάλης διείσδυσης των τεχνολογιών ΑΠΕ που δεν έχουν χαρακτηριστικά πλήρως ελέγξιμης παραγωγής (π.χ. αιολικά, Φ/Β)...».

«...Οι αποθηκευτικοί σταθμοί, εντασσόμενοι στο ηλεκτρικό σύστημα της ηπειρωτικής χώρας, θα πρέπει να ακολουθούν τις βασικές ρυθμίσεις της ενεργειακής αγοράς (ΗΕΠ, κλπ.). **Για την διασφάλιση, όμως, της οικονομικής τους βιωσιμότητας είναι αναγκαία η πρόσθετη στήριξή τους, η οποία θα προέλθει κυρίως από το όφελος που έχει ο παραγωγός ΑΠΕ, λόγω της αξιοποίησης της παραγόμενης από αυτόν ενέργειας ΑΠΕ που οι σταθμοί αυτοί αποθηκεύουν, και η οποία ενέργεια θα απορρίπτονταν χωρίς τους σταθμούς αυτούς...**».

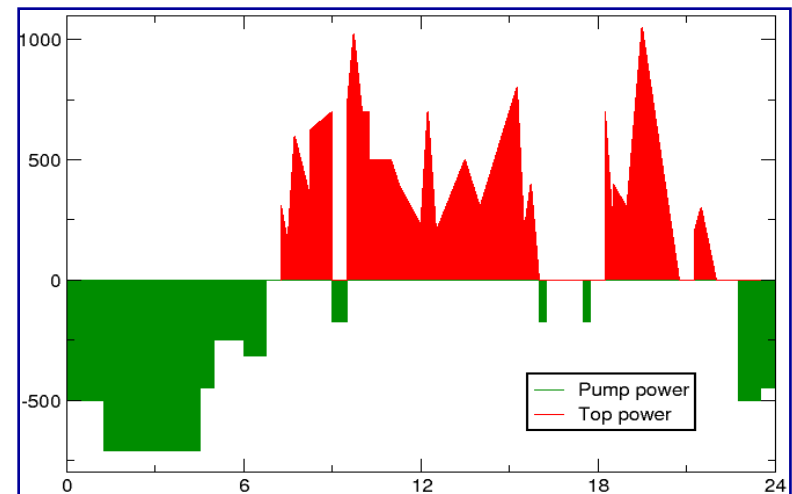
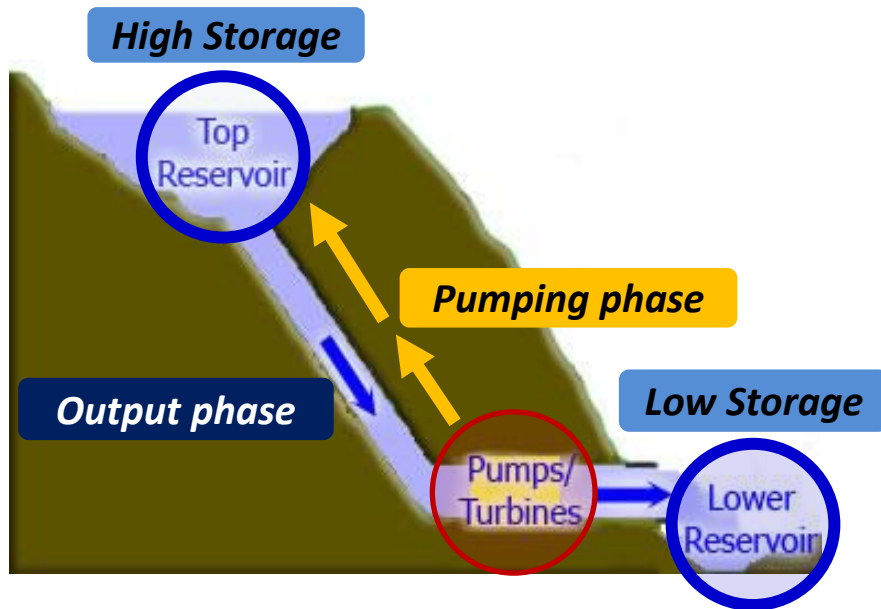
«...Το νέο πλαίσιο θα πρέπει να περιλαμβάνει ρυθμίσεις για την παροχή κατάλληλων κινήτρων που: α) θα επιτρέπουν την ανάπτυξη τέτοιων σταθμών, β) θα διασφαλίζουν την αναγκαία σταθερότητα των σχετικών επιχειρηματικών σχεδιασμών, γ) θα καλύπτουν κατά το δυνατόν ακριβέστερα τις ανάγκες του Συστήματος και δ) θα συντελούν στην αποφυγή μη αναγκαίων επενδύσεων...».

- **Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ)**, Δημόσια διαβούλευση για τις βασικές αρχές ενός θεσμικού πλαισίου λειτουργίας και τιμολόγησης αποθηκευτικών σταθμών στο σύστημα (07/02/2012) -

Ολοκλήρωση συστημάτων αντλησιοταμίευσης (1)

Ο τεχνικοοικονομικός σχεδιασμός ενσωμάτωσης της αντλησιοταμίευσης στο ενεργειακό σύστημα, οφείλει να αναλύει από μηδενική βάση:

1. Έχει **αστοχίες** το ενεργειακό σύστημα; Πώς διαμορφώνεται η Κοινωνική Καμπύλη του Κόστους Ηλεκτροπαραγωγής; Θα αξιοποιηθεί το πλεόνασμα; Ποιοι είναι οι εναλλακτικοί τρόποι αξιοποίησής της άντλησης (π.χ. εμπόριο, «νορβηγικό ενοίκιο»);

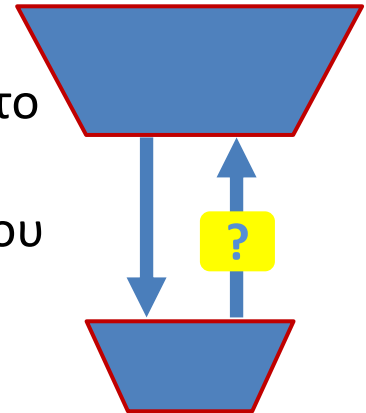


Πηγή: <http://en.wikipedia.org>

2. Την επίδραση των **υδροκλιματικών χαρακτηριστικών** της περιοχής, ειδικά στην περίπτωση ενσωμάτωσης μεταβλητών ΑΠΕ (π.χ. Φυσάει αρκετά; Ποια είναι η διακύμανση του ανέμου; Έχει αρκετή ηλιοφάνεια; Πότε φυσάει σε σχέση με την αιχμή; Ποια η σχέση ανέμου/ηλίου και Οριακής Τιμής Συστήματος/Αποκλίσεων;).

Ολοκλήρωση συστημάτων αντλησιοταμίευσης (2)

3. Την επίδραση των **κανόνων λειτουργίας του συστήματος** (π.χ. Το αιολικό και το Φ/Β ρεύμα μπορούν να περνούν απευθείας στο δίκτυο ή πρέπει υποχρεωτικά να αντλούνται και να διοχετεύονται υδροηλεκτρικά; Υπάρχει μονός ή διπλός αγωγός προσαγωγής για ταυτόχρονη παραγωγή/ταμίευση;).
4. Την επίδραση των **μεθόδων τιμολόγησης** στην απόδοση του συστήματος (π.χ. Το σύστημα ανήκει σε πολλούς ιδιώτες ή στο δημόσιο; Πληρώνει ο ιδιώτης παραγωγός ΑΠΕ ενοίκιο νερού στον ιδιοκτήτη του ταμιευτήρα; Υπάρχει δυνατότητα εμπορίου της ποιότητας ισχύος;).



$$I_H = \rho \cdot g \cdot h \cdot n_H$$

(Ισχύς που αποδίδεται κατά την παραγωγή)

$$I_P = \rho \cdot g \cdot h / n_P$$

(Ισχύς που απαιτείται κατά την άντληση)

$$\rho = I_W \cdot n_P / (h \cdot g / 10^3)$$

(Μετατροπή δικαιώματος παρόχου αιολικής ισχύος (MW) σε υδροηλεκτρική παροχή (m³/s))

Απόδοση παράλληλης άντλησης/ταμίευσης:

$$n_H \cdot n_P = 0,9 \cdot 0,7 = 0,63$$

5. Την **συνδυαστική επίδραση των παραπάνω** (π.χ. υπάρχουν συνθήκες που το ένα εξισορροπεί το άλλο; Κατασκευή Καμπυλών Ισοαπόδοσης).

Τεχνικές παράμετροι επενδύσεων αντλησιοταμίευσης

Σημαντικότερες τεχνικο-οικονομικές παράμετροι:

1. **Μανομετρικό ύψος** (επιδρά στην παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα ποσότητας ύδατος).
2. **Ισχύς της αντλίας** (επιδρά στην ταχύτητα άντλησης και την άμεση διαθεσιμότητα ύδατος).
3. **Υδατικός πόρος** (γλυκό ή αλμυρό νερό, επιδρά στην φθορά των μηχανών και στην διαθεσιμότητα ύδατος).
4. **Μέγεθος του μικρότερου ταμιευτήρα** (επιδρά στην μέγιστη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας).
5. **Θέσεις των ταμιευτήρων σε σχέση με την ροή** (επιδρά στο λειτουργικό και διαχειριστικό κόστος).
6. **Συνδέσεις δικτύου** (επιδρά στις οικονομίες κλίμακας).
7. **Κανόνες λειτουργίας** (επιδρά στην (ημερήσια) μέγιστη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας).
8. **Ιδιοκτησία του συστήματος** (επιδρά στην κατανομή των οφελών μεταξύ παραγωγών και καταναλωτών).



Αντλησιοταμίευση και διαχείριση φορτίου στην Ελλάδα



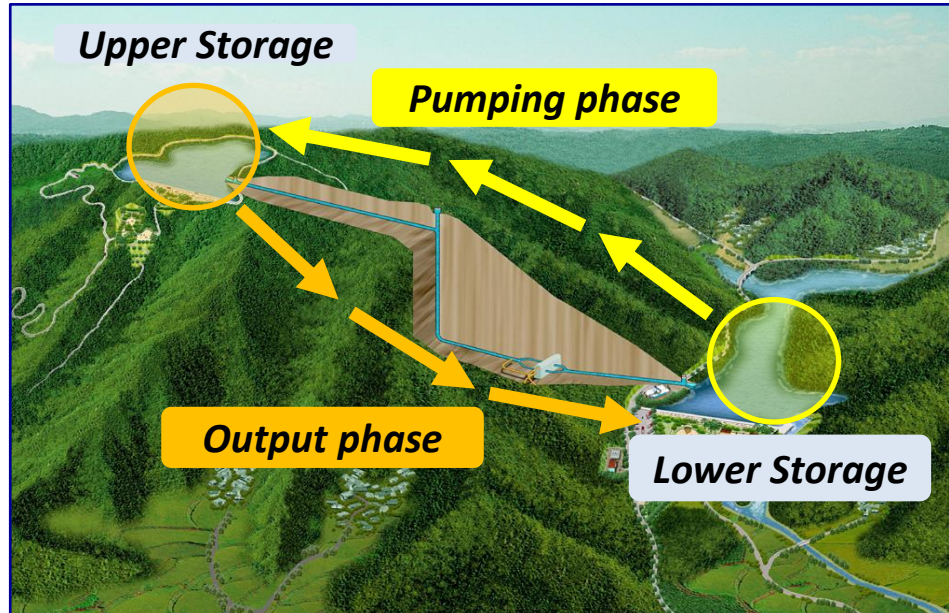
Η αντλησιοταμίευση ως κρίσιμο ενεργειακό υποσύστημα

Μέσω ταχείας **διαχείρισης πλεονασμάτων-ελλειμμάτων**, εξουδετερώνει τις αστοχίες του ηλεκτρικού συστήματος, μέσω **κατανομής της αβεβαιότητας**



Λιγνιτικά:

Αποθήκευση
πλεονασμάτων
λόγω χαμηλότερης
ζήτησης από το
τεχνικό ελάχιστο



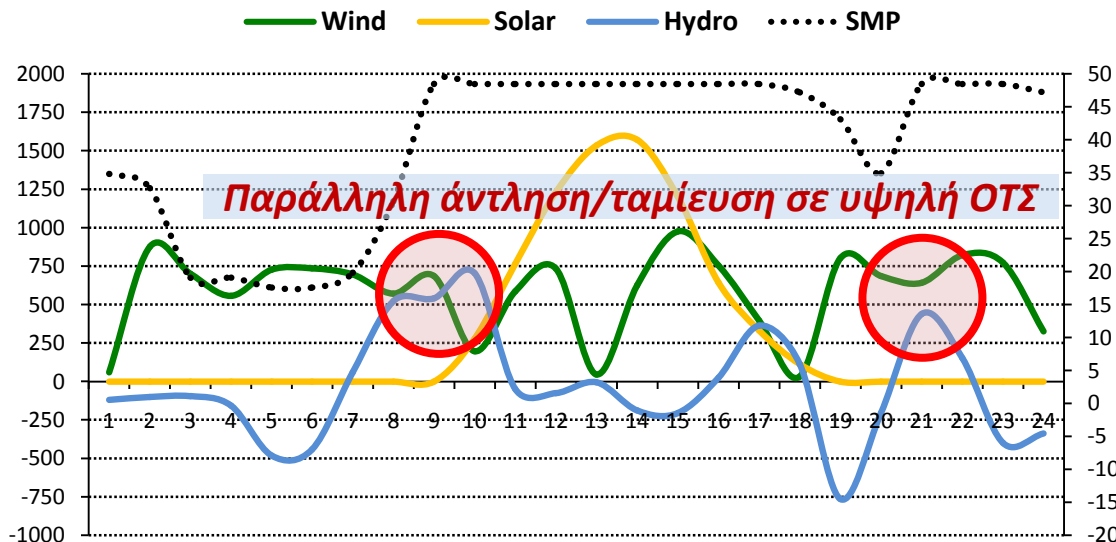
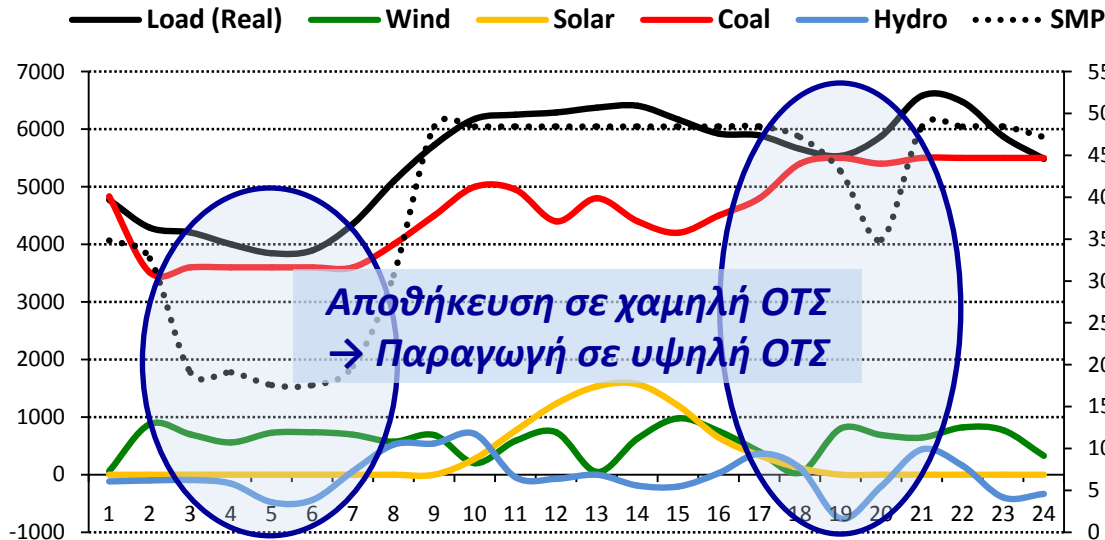
Αιολικά:

Απορρόφηση
στοχαστικής ισχύος
και βελτίωση της
ποιότητας του
ρεύματος

Η αντλησιοταμίευση στην Ελλάδα εν συντομία

- ✓ Αναλογεί στο ~6% (880 MW) της συνολικής ισχύος του ηπειρωτικού συστήματος
- ✓ Αναλογούσε στο 39,2% της συνολικής υδροηλεκτρικής παραγωγής το 2008
- ✓ Ενσωμάτωσε λιγνιτικές κι αιολικές μονάδες με πρόβλεψη να ενσωματώσει και Φ/Β

Σχεδιασμός και παραγωγικότητα αντλησιοταμίευσης



Επιβολή διοχέτευσης αιολικού και Φ/Β ρεύματος μέσω Υ/Η και ύπαρξη διπλού αγωγού προσαγωγής:

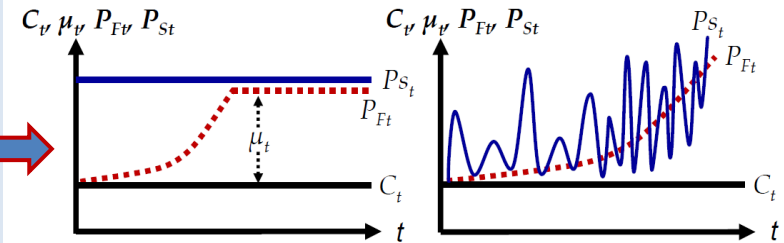
- Στην περίπτωση σύμπτωσης αιολικής και Φ/Β παραγωγής με φορτίο αιχμής και υψηλή Οριακή Τιμή Συστήματος (ΟΤΣ), ο συνδυασμός επιτρέπει την *παράλληλη άντληση και παραγωγή, καθώς και το εμπόριο ισχύος*.
- Εξάρτηση από τα υδροκλιματικά δεδομένα → *πόσο συχνά παρατηρείται σύμπτωση των παραπάνω*, ώστε να ληφθεί η απόφαση για κατασκευή διπλού αγωγού προσαγωγής;

Τιμολόγηση συστημάτων αντλησιοταμίευσης

Πρόσδος Σπανιότητας (Scarcity Rent)

- ✓ Τιμολογιακό κριτήριο που μελετά την **εναλλαγή της χρήσης καυσίμου** (νερού ή diesel) σε σχέση με το πόσο «σπάνιος» είναι ο πόρος ανά χρονική στιγμή.
- ✓ Τιμολογιακό κριτήριο **ανεξάρτητο από το κόστος λειτουργίας** της μονάδας → αφορά μονάχα στην εξάντληση του πόρου σε σχέση με ένα αρχικό απόθεμα.

Η εξάντληση του πόρου ενσωματώνεται στην **Κοινωνική Καμπύλη Κόστους Παραγωγής Ηλεκτρισμού** (**Min[Cost(MW)]**), όπου ο πόρος αντικαθίσταται όταν υπάρξει φθηνότερος πόρος ισοδύναμης ηλεκτροπαραγωγής



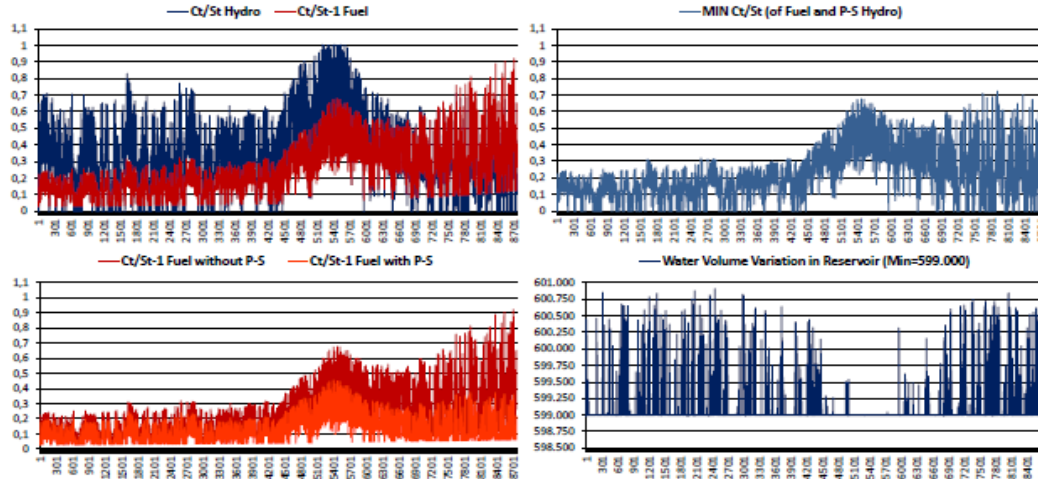
Ζήτημα Βελτιστοποίησης

[Μεγιστοποίηση Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ)]

$$L = \sum_{t=0}^T \int_0^{q_t} \frac{(P_t(q) - C_t) dq}{(1+r)^t} + \mu \cdot \left(S_I - \sum_{t=0}^T q_t \right)$$

Βέλτιστη Τιμολόγηση σε κάθε Χρονικό Βήμα

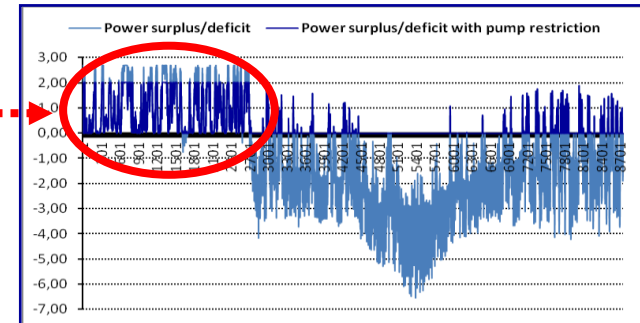
$$P_t = \text{Min}(P_F, P_S)_t \quad \mu_{it} = P_{it} - C_{it}$$



Η αντλησιοταμίευση σε απομονωμένα δίκτυα: Ικαρία



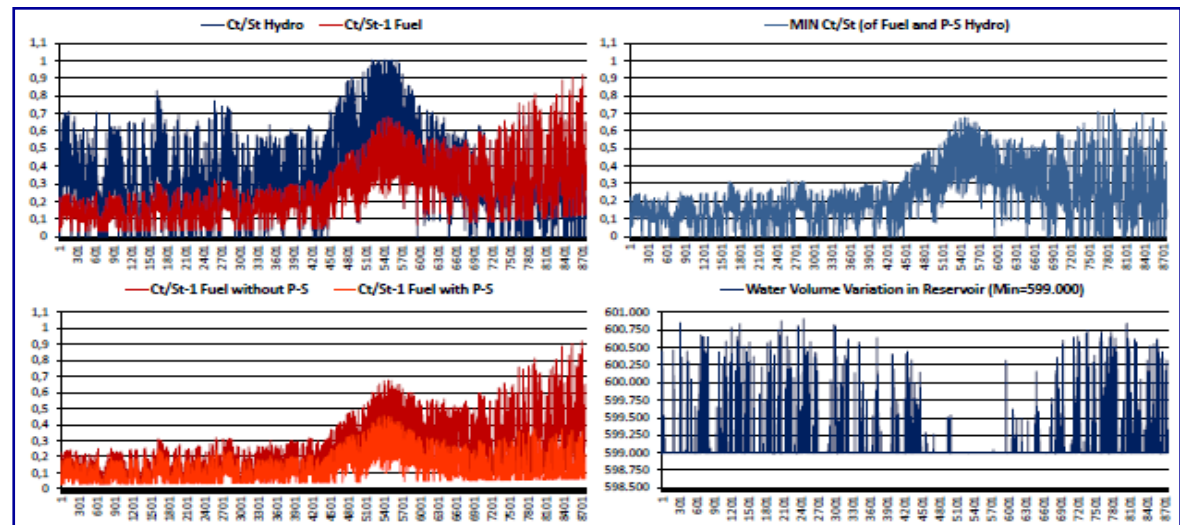
90% των πλεονασμάτων αποθηκεύθηκαν. Το 10% απορρίφθηκε λόγω τεχνικών περιορισμών της αντλίας (2MW max)



Πηγή: Rippi 2013

Στοιχεία αντλησιοταμιευτήρα

- Λειτουργικός από το 2012
- Ενέργεια Βάσης από γεννήτρια καυσίμου Diesel
- Ανταγωνιστικές χρήσεις νερού μεταξύ ύδρευσης, άρδευσης και ηλεκτρισμού
- Εποχιακή ρύθμιση του ελάχιστου όγκου
- Κάλυψη εγχώριας ζήτησης, δίχως εξωτερικές συνδέσεις



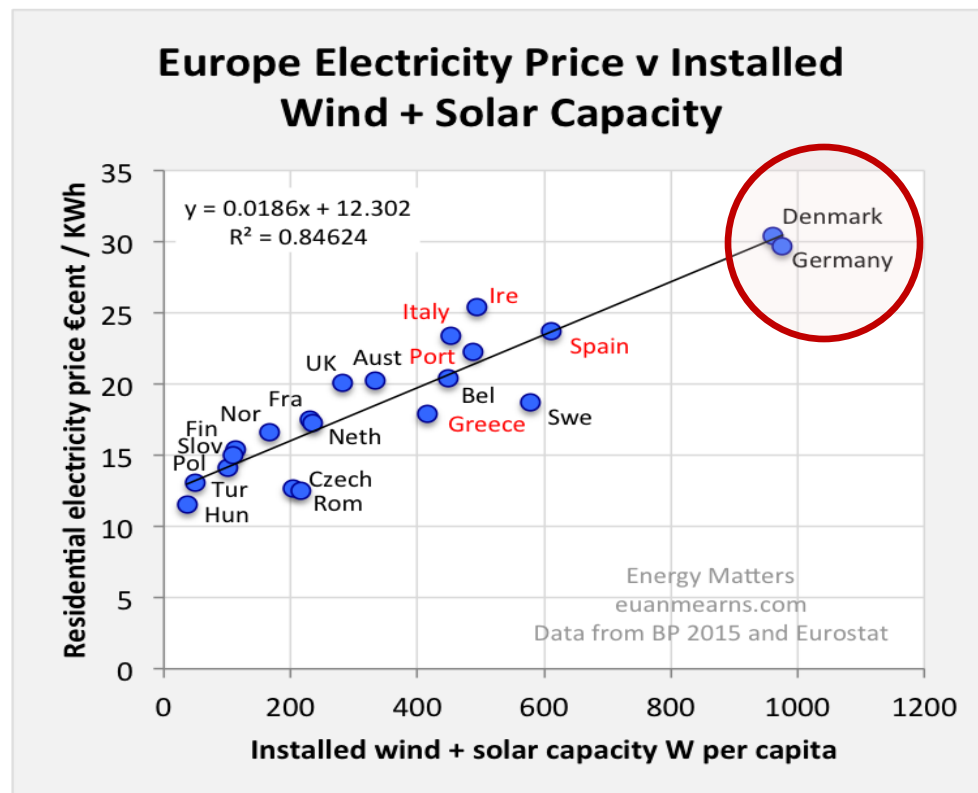
Πηγή: Karakatsanis et al. 2014a

Με εκ νέου αυξανόμενες τιμές καυσίμων (~72\$/βαρέλι, 20/05/2018), η αντλησιοταμίευση εξοικονομεί έως και 48,9% χρήση καυσίμου σε απομονωμένα συστήματα

Διεθνές εμπόριο (στοχαστικής) ισχύος: Δανία



- Η **ονομαστική αιολική διείσδυση** φθάνει το 28% της συνολικής ισχύος (~4GW).
- Πλήθος **διεθνών συνδέσεων** που μπορούν να εισάγουν ~5,8 GW και να εξάγουν ~5 GW.



Ο συνδυασμός μικρού μεγέθους και πολλαπλών συνδέσεων, επιτρέπει την **κατανομημένη διάχυση** των ασταθειών του αιολικού φορτίου της Δανίας.

Πηγή: <http://euanmearns.com/green-mythology-and-the-high-price-of-european-electricity/>

Βιβλιογραφία και Αναφορές

1. Bathhurst, G.N. and G. Strbac (2003), **Value of combining energy storage and wind in short-term energy and balancing markets**, Electric Power Systems Research 67, 1-8
2. Benitez, Liliana E. et al. (2008), **The economics of wind power with energy storage**, Energy Economics 30, 1973-1989
3. Caralis, G.; D. Papantonis and A. Zervos (2012), **The role of pumped-storage systems towards the large-scale wind integration in the Greek power supply system**, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 2558-2565
4. Crampes, Claude and Michel Moreaux (2010), **Pumped storage and cost saving**, Energy Economics 32, 325-333
5. Forsund, Finn R. (2012), **Pumped-Storage Hydroelectricity**, Oslo Centre for Research on Environmentally Friendly Energy (CREE)
6. Forsund, Finn R. (2007), **Hydropower Economics**, Springer
7. Hotelling, Harold (1931), **The Economics of Exhaustible Resources**, The Journal of Political Economy, Vol. 39, Issue 2, p. 137-175
8. Ingebretsen and Johansen (2014), **The Profitability of Pumped Hydro Storage**, MSc Thesis, Norwegian School of Economics
9. Kapsali, M. and J.K. Kaldelis (2010), **Combining hydro and variable wind power generation by means of pumped-storage under economically viable terms**, Applied Energy 87, 3475-3485
10. Karakatsanis, Georgios et al. (2016), **Entropy, pricing and productivity of pumped-storage**, Vienna, Austria, April 17 – 22, 2016, “Active Planet”, European Geophysical Union General Assembly
11. Karakatsanis, Georgios (2015), **Entropy, pumped-storage and energy system finance**, Vienna, Austria, April 12 - 17 2015, “A Voyage Through Scales”, European Geophysical Union General Assembly
12. Karakatsanis, Georgios et al. (2014a), **Entropy, pricing and macroeconomics of pumped-storage systems**, Vienna, Austria, April 27 - May 2 2014, “The Face of the Earth – Process and Form”, European Geophysical Union General Assembly
13. Karakatsanis, Georgios et al. (2014b), **Entropy, recycling and macroeconomics of water resources**, Vienna, Austria, April 27 - May 2 2014, “The Face of the Earth – Process and Form”, European Geophysical Union General Assembly
14. Karakatsanis, Georgios et al. (2013), **Entropy and reliability of water use via a statistical approach of scarcity**, 5th EGU Leonardo Conference – Hydrofractals 2013 – STAHY '13, Kos Island, Greece, European Geosciences Union, International Association of Hydrological Sciences, International Union of Geodesy and Geophysics
15. Krajacic, Goran et al. (2013), **Analysis of financial mechanisms in support to new pumped hydropower storage projects in Croatia**, Applied Energy, Vol. 101, 161-171
16. Leveque, Francois (2006), **Competitive Electricity Markets and Sustainability**, Edward Elgar Publishing
17. Paine, Nathan et al. (2014), **Why market rules matter: Optimizing pumped hydroelectric storage when compensation rules differ**, Energy Economics 46, 10-19
18. Rippi, Aikaterini (2013), **Mathematical simulation of hybrid systems: The system of Ikaria**, Diploma Thesis (135p.), Department of Water Resources and Environmental Engineering, National Technical University of Athens (NTUA)

Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας!!!



Ακολουθούν παρατηρήσεις και συζήτηση!