

# Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

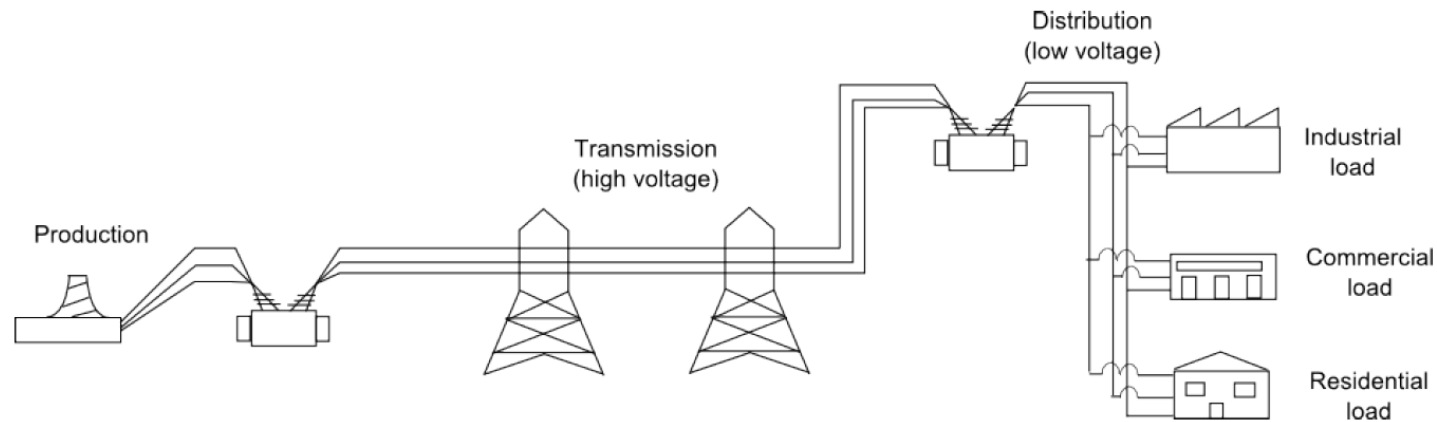
Αντώνης Παπαβασιλείου, ΕΜΠ

# Περιγραφή

- Παραγωγή
- Μεταφορά και διανομή
- Κατανάλωση

# Παραγωγή

# Εφοδιαστική αλυσίδα συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας



- Επί μέρους στοιχεία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας:
  - Παραγωγή
  - Μεταφορά και διανομή
  - Κατανάλωση

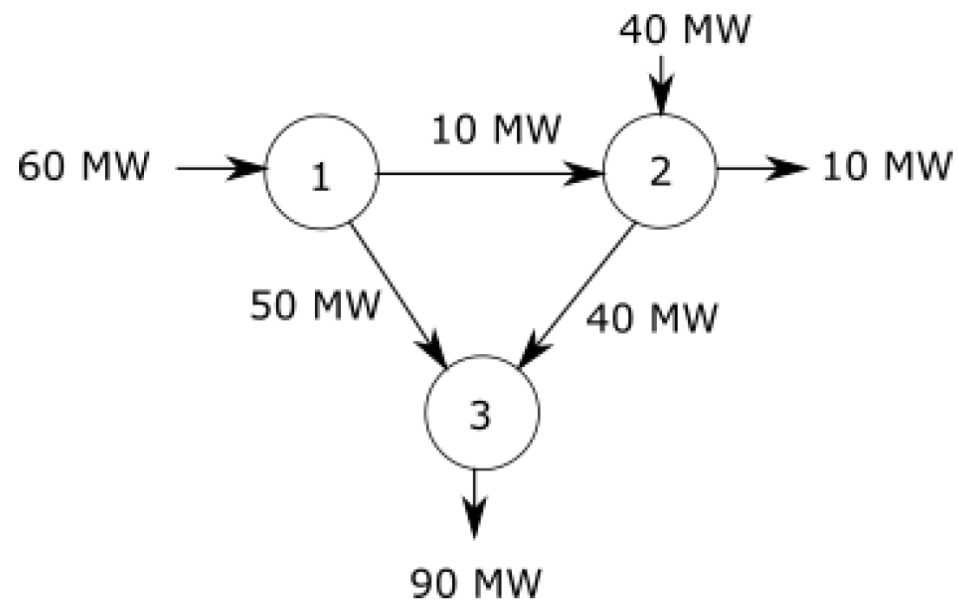
# Παραγωγή

- Μη-ανανεώσιμες πηγές ενέργειας:
  - Ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο)
  - Πυρηνικά
- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας:
  - Υδροηλεκτρική (ροή ποταμού, φράγματα, αντλιοστάσια)
  - Γεωθερμική
  - Αιολική
  - Ηλιακή
  - Βιομάζα
  - Άλλες πηγές (κυματική, παλιρροιακή)

# Μονάδες Μέτρησης

- Η ηλεκτρική ενέργεια μετράται σε megawatt ώρες (σε συντομογραφία MWh)
- Η ισχύς είναι ενέργεια ανά μονάδα μέτρησης χρόνου:
  - Ρυθμός παραγωγής ενέργειας
  - Ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας
  - Ροή ισχύος
- Η ισχύς μετράται σε MW

# Η Αναλογία της “Πισίνας”



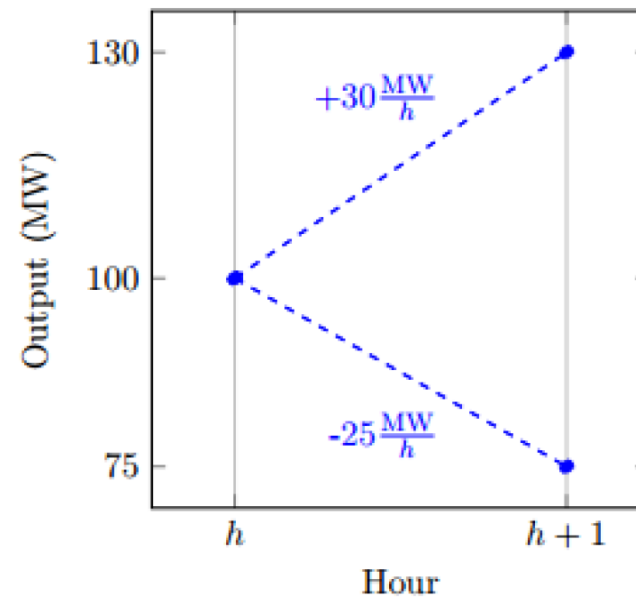
Ποιος προμηθεύει το φορτίο στο ζυγό 3;

# Περιορισμοί Παραγωγής

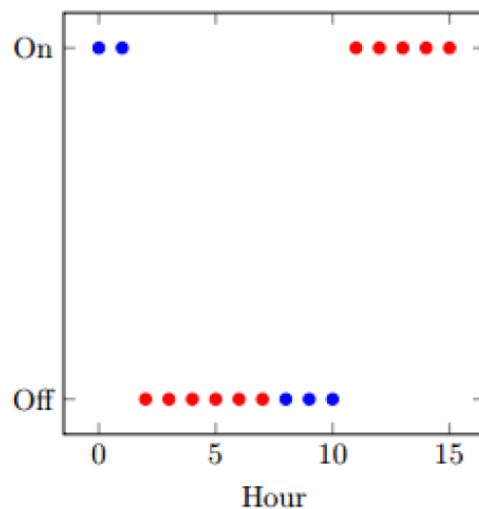
- Περιορισμοί μονάδων με ορυκτά καύσιμα:
  - Μέγιστη/ελάχιστη παραγωγή
  - Ρυθμοί ανόδου/καθόδου παραγωγής (περιορισμοί ράμπας)
  - Μέγιστη/ελάχιστη κράτηση μονάδων παραγωγής
- Περιορισμοί υδροηλεκτρικών μονάδων:
  - Μέγιστη παραγωγή
  - Μέγιστη αποθήκευση



# Ρυθμοί Ανόδου και Καθόδου



# Μέγιστη και Ελάχιστη Κράτηση Μονάδων



- Μέγιστος χρόνος κράτησης μονάδας: 5 ώρες
- Ελάχιστος χρόνος κράτησης μονάδας: 6 ώρες
- Κόκκινοι κύκλοι: αποφάσεις υπό περιορισμούς
- Μπλε κύκλοι: ελεύθερες αποφάσεις

# Μεταβλητό και Οριακό Κόστος

**Μεταβλητό κόστος/λειτουργικό κόστος/κόστος καυσίμου:** είναι το κόστος που εξαρτάται από την ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας:

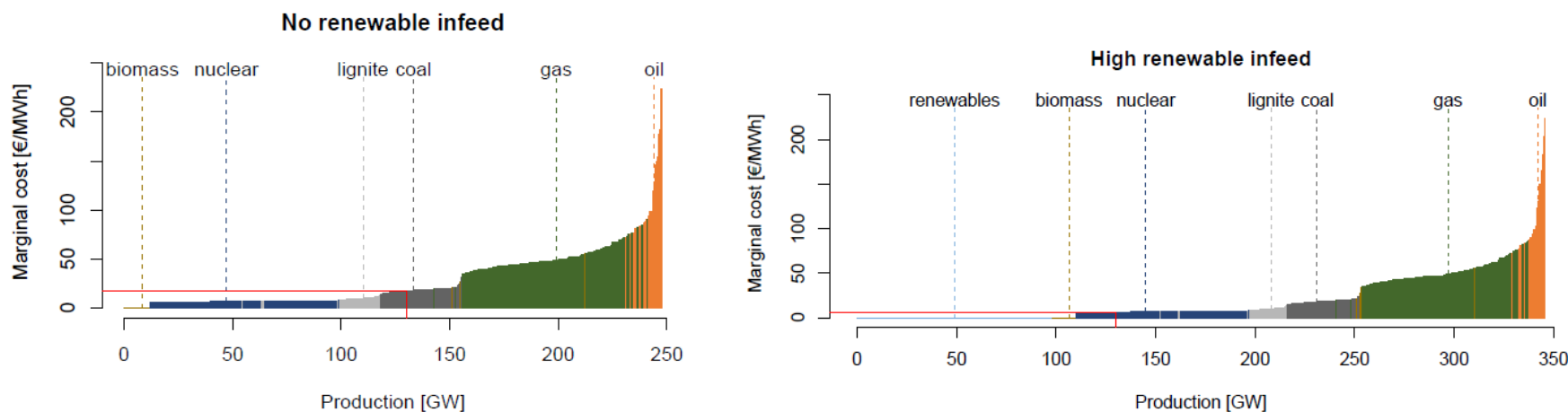
- Μετράται σε €/h
- Ωριαίο κόστος παραγωγής συγκεκριμένης ποσότητας ενέργειας

**Οριακό κόστος:** παράγωγος του κόστους καυσίμου σε σχέση με την παραγόμενη ενέργεια

- Μετράται σε €/MWh
- Αύξηση του κόστους καυσίμου εάν παράγονταν ένα επιπλέον MW ισχύος

# Καμπύλη Σειράς Κατά Αξία

**Καμπύλη σειράς κατά αξία (merit order curve) = (αύξουσα) καμπύλη οριακού κόστους συστήματος**



Ποια είναι η επίδραση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο σύστημα?

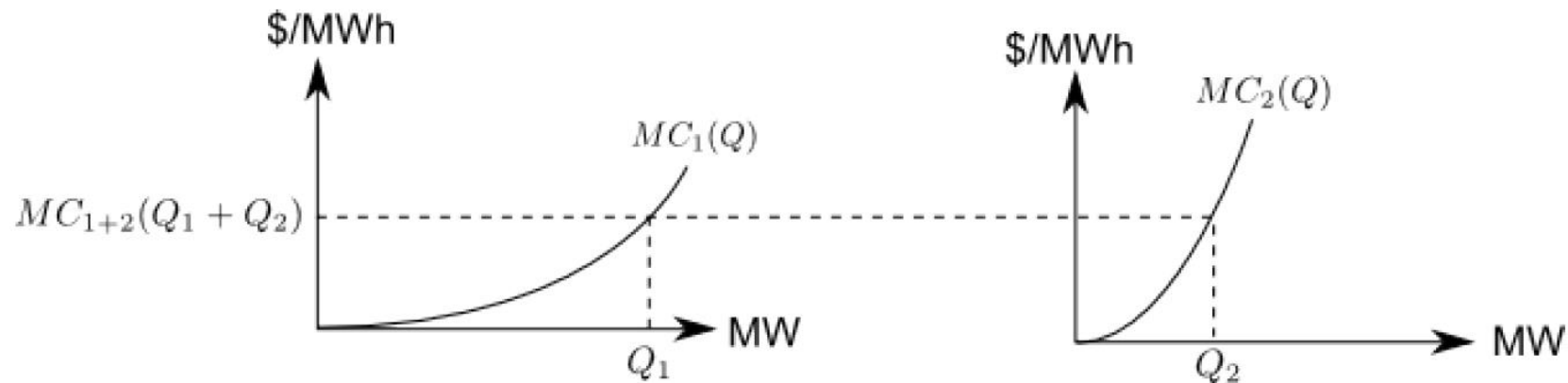
# Εύρος Οριακού Κόστους

Εάν το μεταβλητό κόστος είναι μη-διαφορίσιμο, ορίζουμε:

- **Εξ'αριστερών οριακό κόστος:** εξ' αριστερών παράγωγος του μεταβλητού κόστους
- **Εκ δεξιών οριακό κόστος:** εκ δεξιών παράγωγος του μεταβλητού κόστους (πότε είναι άπειρη;)
- **Εύρος οριακού κόστους:** σύνολο τιμών μεταξύ και συμπεριλαμβανομένων των εξ'αριστερών και εκ δεξιών οριακού κόστους

# Οριζόντιο Άθροισμα του Οριακού Κόστους

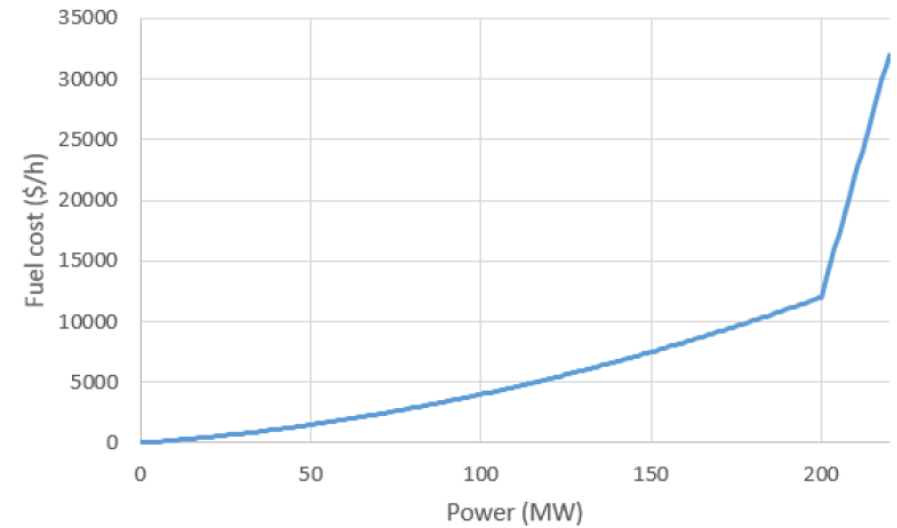
Το σωρευτικό (αθροιστικό) οριακό κόστος αποκτάται από οριζόντια άθροιση



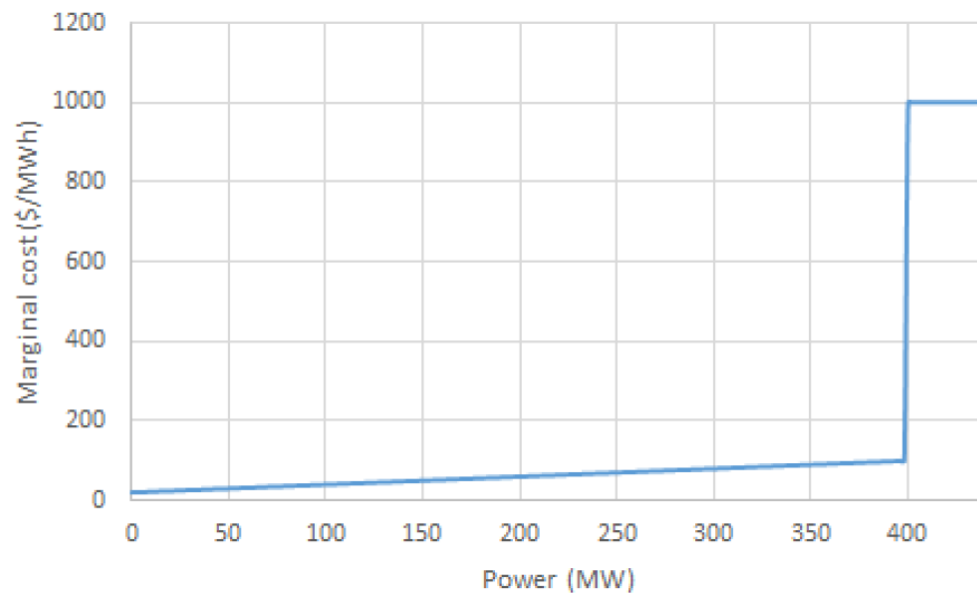
# Παράδειγμα

Θεωρούμε το τετραγωνικό κόστος καυσίμου:

- $MC(0 \text{ MW}) = 20 \text{ €/MWh}$
- $MC(200 \text{ MW}) = 100 \text{ €/MWh}$
- $MC(Q) = 1000 \text{ €/MWh}, 200 \text{ MW} \leq Q \leq 220 \text{ MW}$
- $VC(0 \text{ MW}) = 0 \text{ €/h}$



# Άθροισμα των Οριακών Καμπυλών Κόστους



Αυτό είναι το οριακό κόστος  $n$  γεννητριών της προηγούμενης διαφάνειας,  $n =$  ;



# Κόστος Επένδυσης

- Σταθερό κόστος/κόστος επένδυσης: το κόστος που δεν εξαρτάται από την ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας
  - **Εφ'άπαξ κόστος** (*overnight cost*) (€/kW): κόστος που πρέπει να πληρωθεί εκ των προτέρων για κάθε kW επένδυσης
  - **Ετήσιο πάγιο κόστος** (*annualized fixed cost*) (€/kWyr): ετήσιο κόστος για κάθε kW επένδυσης
  - **Ωριαίο πάγιο κόστος** (*hourly fixed cost*) (€/MWh): ωριαίο κόστος που πρέπει να πληρώνεται για κάθε MW επένδυσης

# Μετατροπή του Κόστους Επένδυσης

Θεωρούμε:

- $T$  (χρόνια): διάρκεια ζωής της επένδυσης
- $r$ : επιτόκιο

**Ετήσιο πάγιο κόστος  $FC$  (€/kWγ) δεδομένης ετήσιας έκπτωσης**

$$FC = \frac{r \cdot OC}{1 - 1/(1+r)^T}$$

**Ετήσιο πάγιο κόστος  $FC$  (€/kWγ) δεδομένης συνεχούς έκπτωσης**

$$FC = \frac{r \cdot OC}{1 - e^{-rT}}$$

**Ωριαίο πάγιο κόστος (€/MWh):** διαιρούμε το ετήσιο πάγιο κόστος με 8.76 (γιατί με 8.76?)

# Παράδειγμα

- Διάρκεια ζωής γεννήτριας φυσικού αερίου: 25 χρόνια
- Διάρκεια ζωής γεννήτριας με άνθρακα: 45 χρόνια
- Συνεχόμενη έκπτωση με επιτόκιο  $r = 12\%$

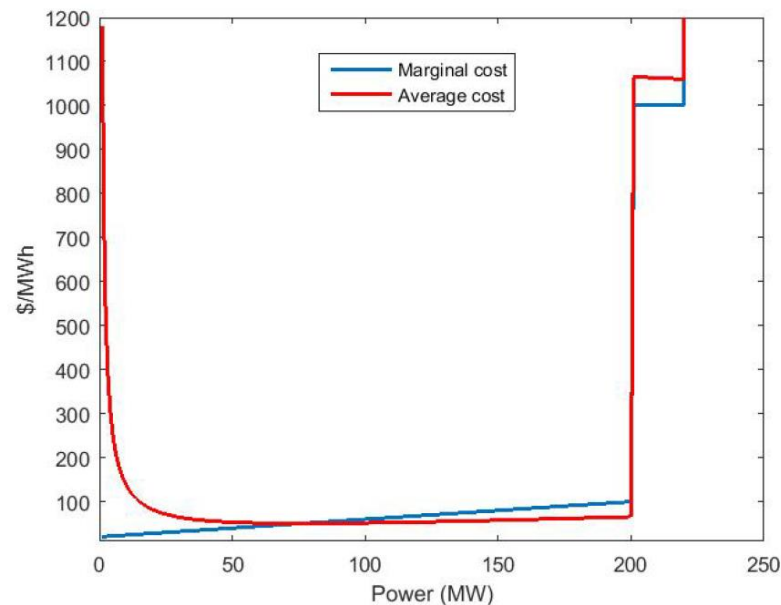
	$OC$ (€/kW)	$FC$ (€/kWγ)	$FC$ (€/MWh)
Φυσικό αέριο	400	50.5	5.8
Άνθρακας	1200	144.7	16.5

# Μέσο Κόστος

**Μέσο κόστος:** συνολικό κόστος για κάθε παραγόμενη μονάδα προϊόντος

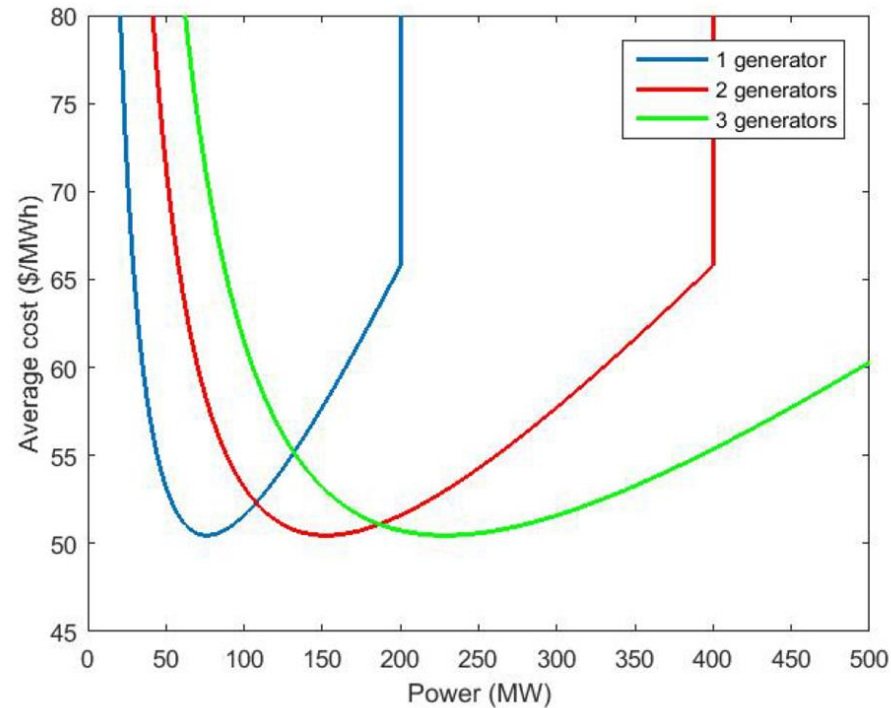
- Ο ορισμός του μέσου κόστους γενικεύεται στην περίπτωση μίας βιομηχανίας που παράγει  $Q$  στο ελάχιστο κόστος
- Οικονομίες κλίμακας παρατηρούνται όταν το μέσο κόστος μειώνεται
- Το μέσο κόστος επηρεάζει εάν μία βιομηχανία αποτελεί **φυσικό μονοπώλιο** ή όχι

# Καμπύλη Μέσου Κόστους: Μία Γεννήτρια



Γιατί παρατηρείται απότομη αλλαγή του μέσου κόστους στο  $Q=0$  MW;

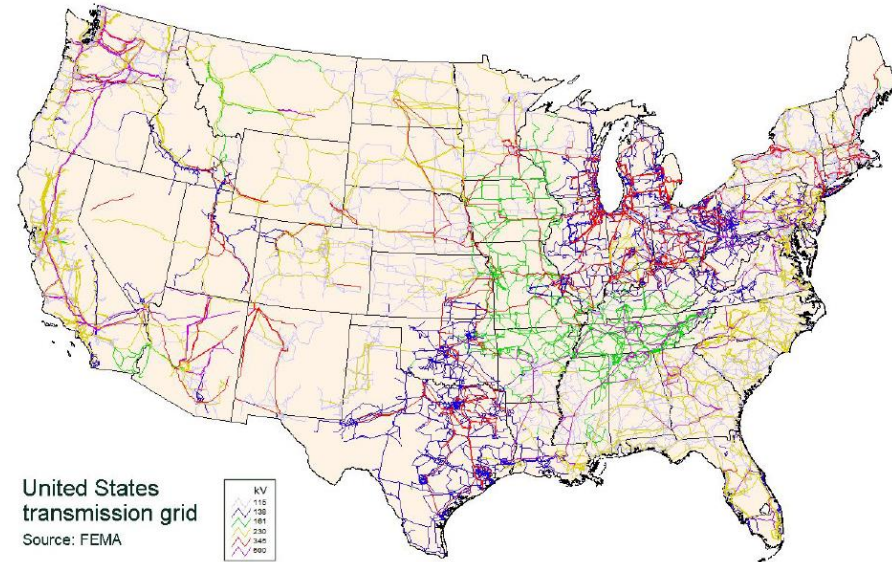
# Καμπύλη Μέσου Κόστους: Πολλαπλές Γεννήτριες



Το μέσο κόστος για χωρητικότητα μονάδας (200 – 220 MW) είναι μικρότερο για  $n = 3$  γεννήτριες

# Μεταφορά και Διανομή

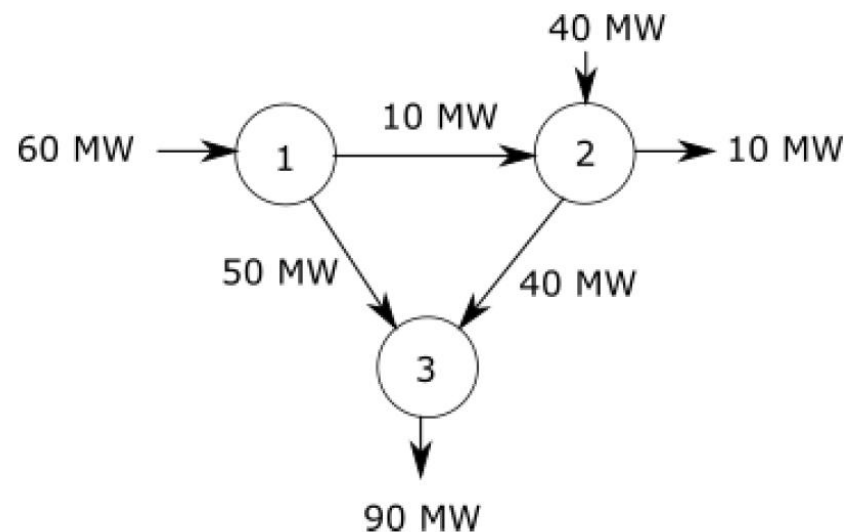
# Μεταφορά και Διανομή



- Δίκτυο Μεταφοράς: υψηλότερη τάση, λιγότερες απώλειες
- Δίκτυο Διανομής: χαμηλότερη τάση, υψηλότερες απώλειες
- Οι Μετασχηματιστές ελαττώνουν την τάση στη διεπαφή



# Ισοζύγιο Ισχύος

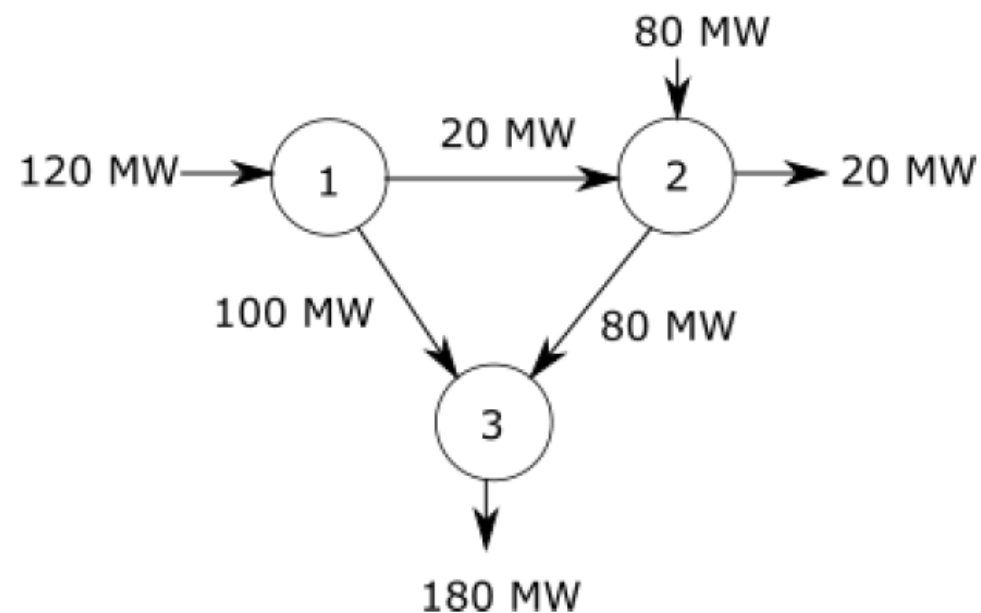
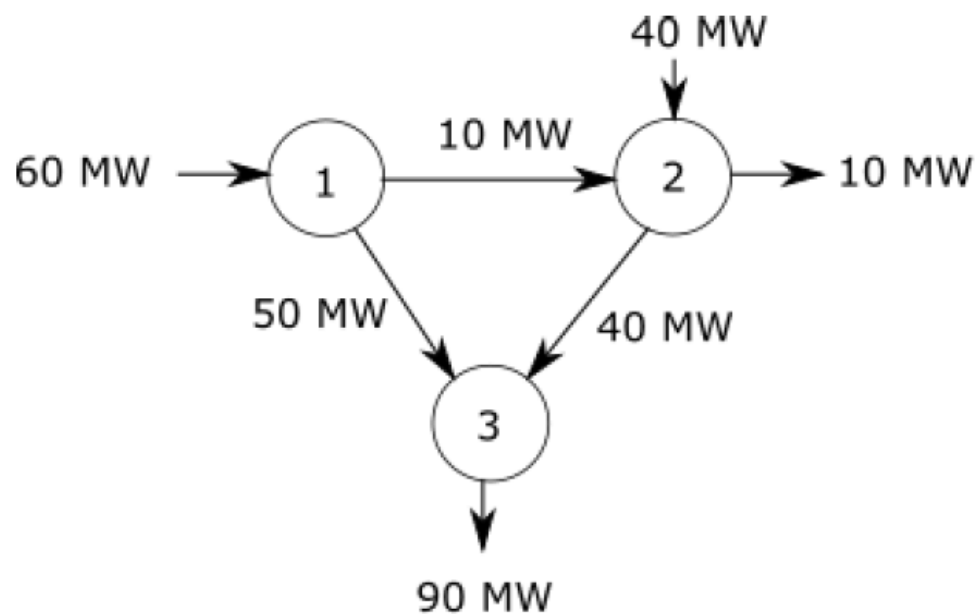


- **Ζυγοί:** κόμβοι του δικτύου μεταφοράς
- **Γραμμές μεταφοράς:** ακμές του δικτύου μεταφοράς
- Ισοζύγιο ισχύος σε κάθε ζυγό (το ίδιο με τα κλασσικά μοντέλα μεταφοράς)
- Φυσική διαίσθηση: ο ηλεκτρισμός είναι «τεμπέλης»

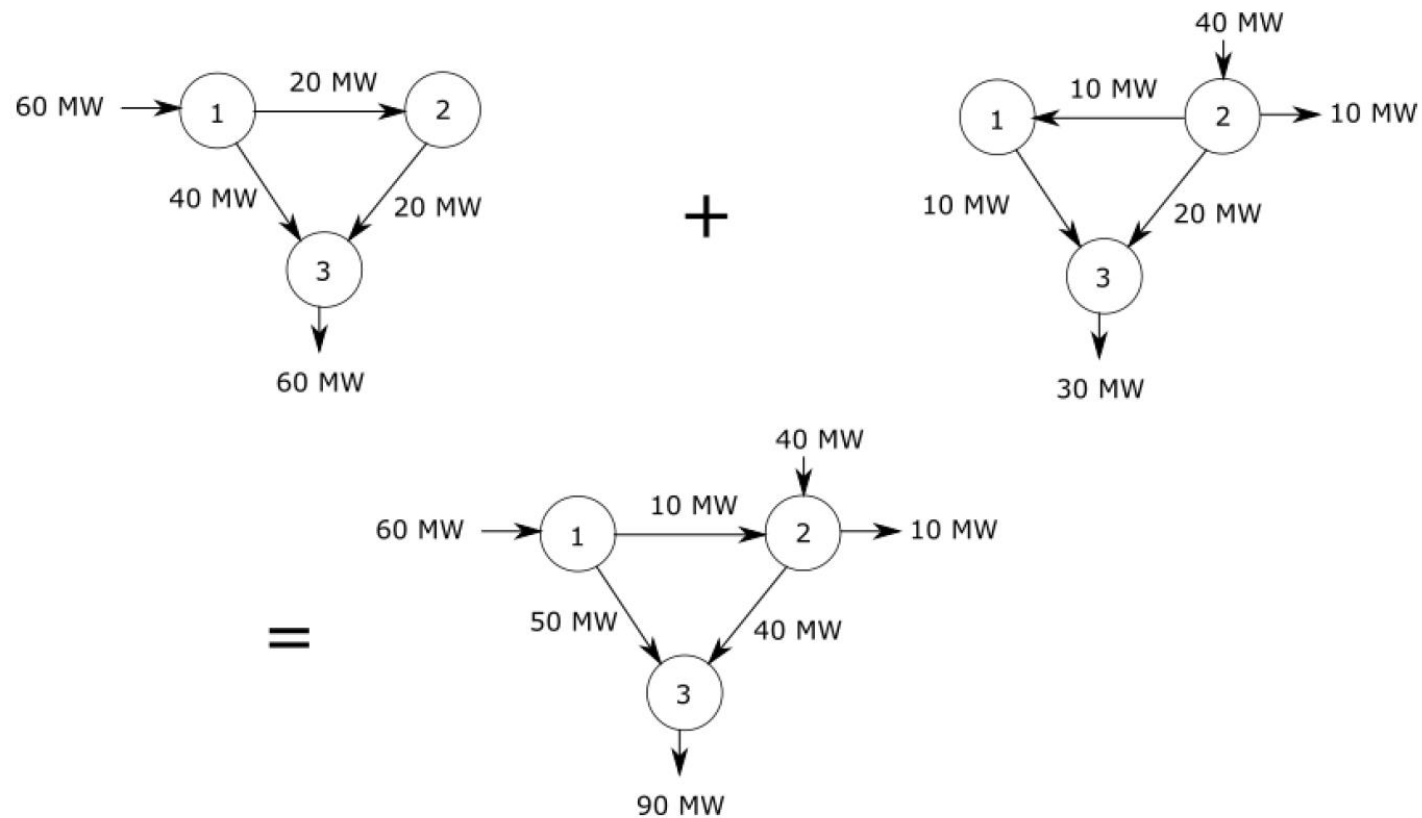
# Εξισώσεις Ροής Ισχύος

- Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιο πολύπλοκα από τα κλασικά μεταφορικά δίκτυα
- **Νόμοι του Kirchhoff**: νόμοι της φύσης που κυβερνούν τη ροή ηλεκτρικής ενέργειας στα κυκλώματα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή των εξισώσεων ροής ισχύος
- Οι **εξισώσεις ροής ισχύος** καθορίζουν τη συσχέτιση  $f = P(r)$  μεταξύ της έγχυσης ισχύος  $r$  στους ζυγούς και των ροών ισχύος  $f$  στις γραμμές
- **Εξισώσεις ροής ισχύος συνεχούς ρεύματος** (*direct current power flow equations*): απλοποιημένες μέσω γραμμικής συσχέτισης εξισώσεις ροής ισχύος  $f = P(r)$

# Αναλογικότητα των Ροών Ισχύος



# Προσθετικότητα των Ροών Ισχύος



# Κατανάλωση

# Αποτίμηση και Όφελος

**Όφελος Καταναλωτή:** όφελος το οποίο εξαρτάται από την καταναλισκόμενη ποσότητα

- Μετράται σε €/h
- Ωριαίο όφελος για την κατανάλωση συγκεκριμένης ποσότητας ενέργειας
- **Οριακό όφελος/αποτίμηση:** παράγωγος του οφέλους σε σχέση με την καταναλισκόμενη ενέργεια
  - Μετράται σε €/MWh
  - Προθυμία πληρωμής (γιατί;)

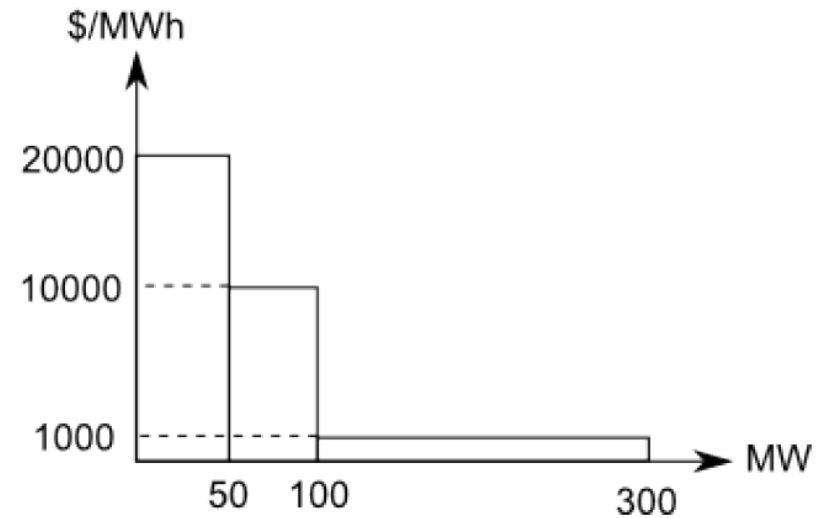
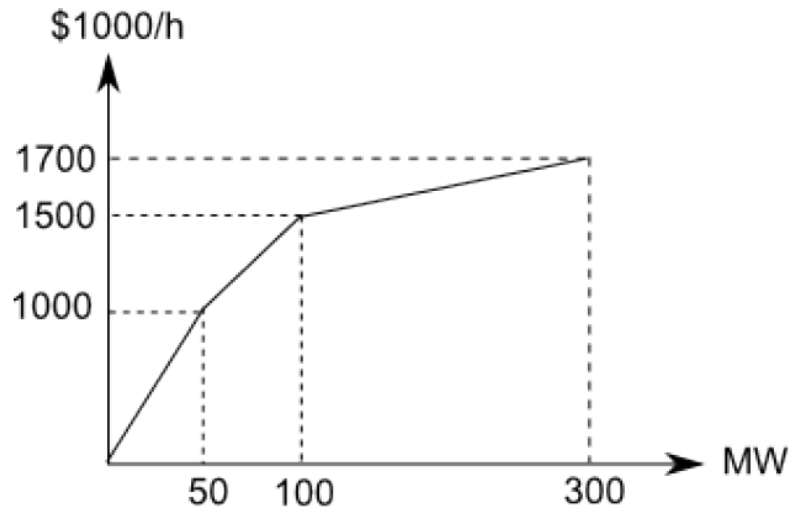
Ποιο είναι το ανάλογο του οφέλους καταναλωτή από τη μεριά της προμήθειας; της αποτίμησης;

# Αντίστροφη Ζήτηση / Συνάρτηση Οριακού Οφέλους

**Αντίστροφη ζήτηση/συνάρτηση οριακού οφέλους:** συσχέτιση της κατανάλωσης ισχύος  $Q$  με το οριακό όφελος  $MB(Q)$

Περιμένουμε η αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης να είναι αύξουσα/φθίνουσα;

# Απεικόνιση της Συνάρτησης Οριακού Οφέλους



Ποια γραφική παράσταση αντιστοιχεί στο όφελος καταναλωτή; Στην αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης;

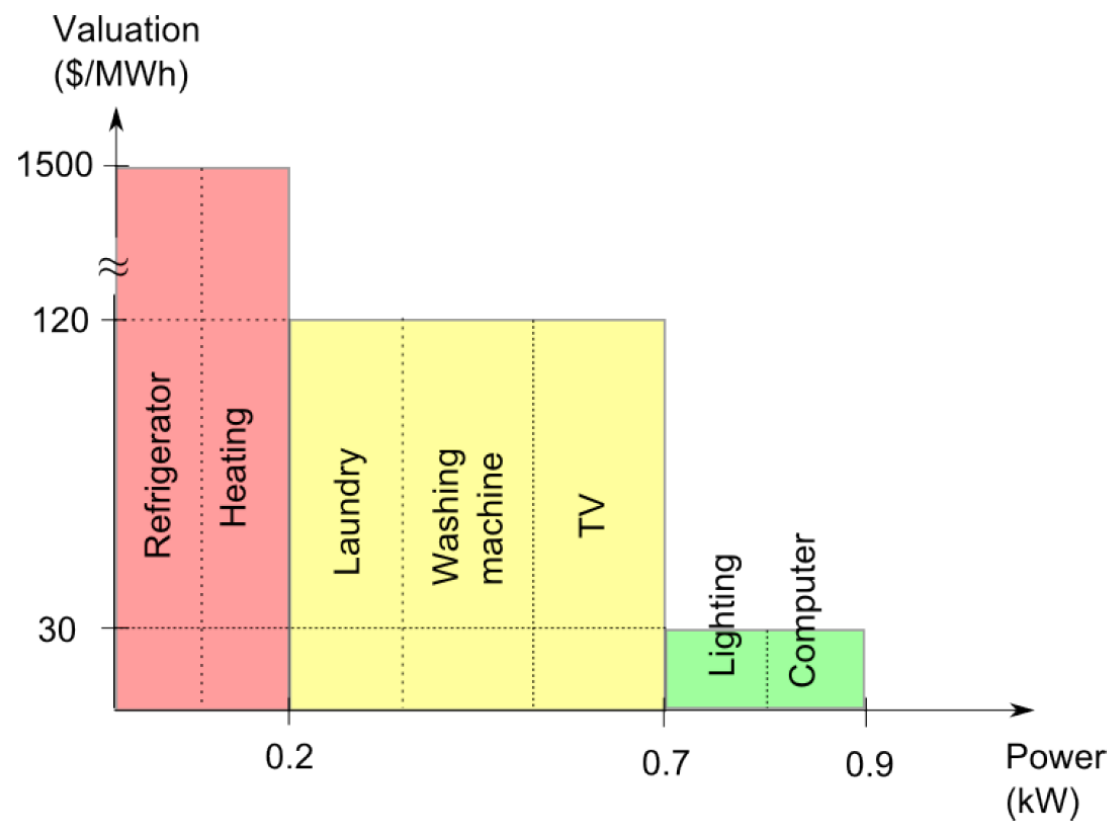


# Παράδειγμα: Νοικοκυριό

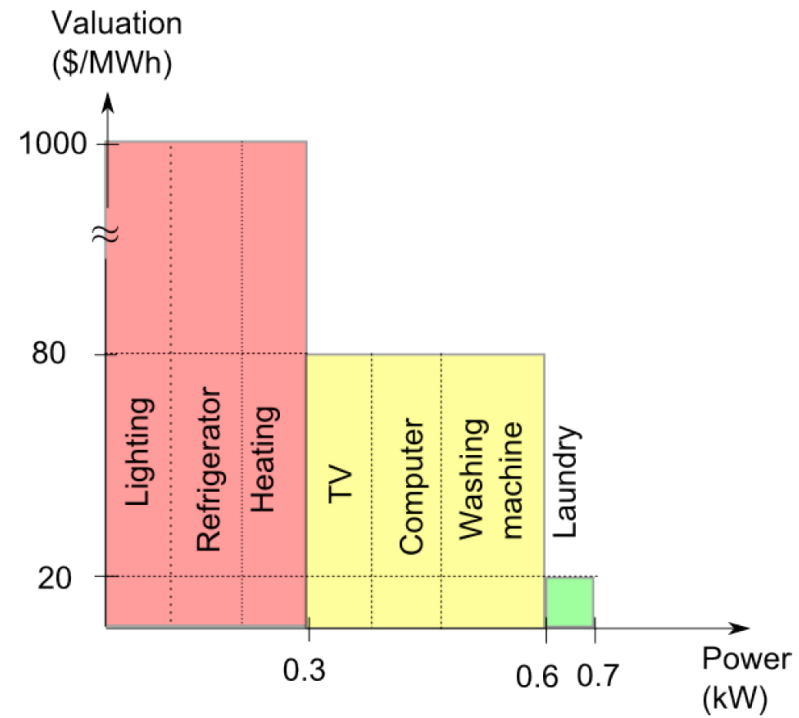
Κατανάλωση	Ζήτηση πρωϊ (kW)	Αποτίμηση πρωϊ (€/MWh)	Ζήτηση βράδυ (kW)	Αποτίμηση βράδυ (€/MWh)
Μη ευέλικτη	0.2	1500	0.3	1000
Μετρίως ευέλικτη	0.5	120	0.3	80
Ευέλικτη	0.2	30	0.1	20

Οι συσκευές μπορούν να μετακινηθούν μεταξύ των κατηγοριών. Ποιες συσκευές μπορεί να ανήκουν στην άκαμπτη κατηγορία;

# Πρώι



# Βράδυ



# Συνάρτηση Ζήτησης

**Συνάρτηση ζήτησης  $Q(v)$ :** αντίστροφη συσχέτιση της αντίστροφης συνάρτησης ζήτησης

Συσχετίζει την τιμή της ισχύος  $v$  με την ποσότητα  $Q$  που θα μπορούσε να παραχθεί

# Τιμές Προμήθειας και Ελαστικότητα της Ζήτησης

- **Ελαστικότητα:** ευαισθησία της ζήτησης  $Q(v)$  στις αλλαγές της τιμής  $v$ :

$$\varepsilon = \frac{dQ/dv}{Q/v}$$

Απότομη αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης  $\leftrightarrow$  επίπεδη συνάρτηση ζήτησης  $\leftrightarrow$  μικρή τιμή  $\varepsilon \leftrightarrow$  ανελαστική (μη ευαίσθητη) ζήτηση

Υποθέτουμε ότι τα νοικοκυριά αντιμετωπίζουν τιμές προμήθειας ίσες με 25 €/MWh. Ποια είναι η ζήτηση ως συνάρτηση των τιμών της χονδρεμπορικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας Είναι ανελαστική;

# Μέση Αξία Χαμένου Φορτίου και Αξία Χαμένου Φορτίου

- **Μέση αξία χαμένου φορτίου:** μακροχρόνιο μέσο φορτίου χάνεται λόγω τυχαίων διαταραχών (βλάβες των γεννητριών και των γραμμών μεταφοράς, σφάλματα πρόβλεψης έγχυσης ενέργειας από ανανεώσιμων πηγές και κατανάλωσης φορτίου, κλπ)
- **Αξία Χαμένου Φορτίου (ΑΧΦ):** οριακή αλλαγή στην μέση αξία χαμένου φορτίου λόγω της οριακής αύξησης της χωρητικότητας του συστήματος, διαιρούμενη με την οριακή μείωση της ποσότητας χαμένου φορτίου
- Η ΑΧΦ είναι χρήσιμη στις μελέτες επέκτασης της χωρητικότητας του συστήματος για την ποσοτικοποίηση του οριακού οφέλους επένδυσης σε χωρητικότητα γεννητριών

# Παράδειγμα: ΑΧΦ

Θεωρούμε την ακόλουθη συνάρτηση ζήτησης:

$$Q(v) = 30,000 - 2v$$

Η χαμένη αξία για 1% μείωση στην εξυπηρέτηση με τυχαία μείωση φορτίου

$$\begin{aligned} & \int_{v=0}^{15,000} Q(v)dv - \int_{v=0}^{15,000} 0.99Q(v)dv = \\ & = 0.01 \cdot \frac{15,000 \cdot 30,000}{2} = 2.25 \cdot 10^6 \text{ €} \end{aligned}$$

Χαμένη ενέργεια για 1% μείωση φορτίου: 300 MWh

$$\text{ΑΧΦ} = \frac{2250000}{300} = 7500 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

Πιο περίπλοκος υπολογισμός του ΑΧΦ μέσω προσομοίωσης