Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

5ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

Βασικές έννοιες ενεργειακής τεχνολογίας

Ανδρέας Ευστρατιάδης, Νίκος Μαμάσης, Αθανάσιος Ζήσος

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2025-26

Θεμελιώδεις έννοιες: Ενέργεια & ισχύς

Ενέργεια: η ικανότητα ενός σώματος ή συστήματος να παράγει έργο

Έργο: δύναμη × μετατόπιση, ορίζεται και ως:

- η ποσότητα της ενέργειας που παράγεται ή καταναλώνεται από ένα σώμα κατά τη μεταβολή της κινητικής του κατάστασης
- η ενέργεια που μεταφέρεται από ένα σώμα σε ένα άλλο ή που μετατρέπεται από μια μορφή σε μια άλλη

Ισχύς: Ρυθμός μεταβολής της ενέργειας

$$P(t) = \frac{dE}{dt} \approx \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

Μορφές ενέργειας

- Μηχανική (δυναμική, κινητική)
- Ηλεκτρομαγνητική
- Πυρηνική
- Χημική
- Θερμική-βιολογική
- Θερμότητα-ακτινοβολία

Σημείωση 1: Η λέξη *ενέργεια* αναφέρεται πρώτη φορά από τον Αριστοτέλη (Ηθικά Νικομάχεια), με την έννοια της *«δραστηριότητας που απαιτείται για να γίνει πράξη η δυνατότητα (δύναμις)»*

Σημείωση 2: Η παραγόμενη ενέργεια για την κάλυψη του συνόλου των ενεργειακών αναγκών καλείται *πρωτογενής* (primary).

Σημείωση 3: Μόνο ο άνθρωπος καταναλώνει ενέργεια για άλλους λόγους εκτός από τον βιοπορισμό

Μονάδες μέτρησης

Δύναμη (Newton, N)

1 N = 1 kg × 1 m/s^2 = 10^5 dyn

1 dyn = 1 gr × 1 cm/s^2 = 10^{-5} N

1 kg* (ή 1 kp) = 1 kg × 9.81 m/s^2 = 9.81 N

(kg: χιλιόγραμμο μάζας, kg* ή kp: χιλιόγραμμο βάρους)

Έργο (Joule, J)

1 J = 1 N × 1 m

1 erg = 1 dyn × 1 cm = 10^{-7} J

1 kg*m = 9.81 J

Ισχύς (Watt, W)

1 W = 1 J/s

1 kW = 10^3 J/s = 10^2 kg*m/s = 1.36 PS

1 PS ή 1 hP = 746 W = 75 kg*m/s (η ισχύς ενός αλόγου, όπως εκτιμήθηκε από τον James Watt τον 18ο αιώνα, συγκρίνοντάς την με τις ατμομηχανές)

Ενέργεια (Joule ή kWh)

1 kWh = 10^3 W × 3600 s = 3.6 MJ (εφαρμογή στον **ηλεκτρισμό**)

1 cal = 4.184 J (απαιτούμενη ενέργεια για να αυξηθεί η θερμοκρασία 1 g νερού κατά 1°C)

1 toe (tones oil equivalent) = 10^7 kcal = 42 GJ = 40×10^6 Btu = 11.7 MWh (για **ορυκτά καύσιμα**)

1 Btu (British thermal unit) = 0.252 kcal (για εφαρμογές **θέρμανσης/ψύξης**)

Χαρακτηριστικά ενεργειακά μεγέθη

- **Ενεργειακές ανάγκες ανθρώπου:**
  - Η ημερήσια ενέργεια μεταβολισμού που χρειάζεται ένας μέσος άνθρωπος είναι περίπου 8.4 ως 10.5 MJ (2000-2500 kcal).
  - Η ωριαία ενέργεια που χρειάζεται ένας άνθρωπος μάζας 75 kg που τρέχει με ταχύτητα 13 km/h είναι περίπου 3.5 MJ (800 kcal)
  - Η χημική ενέργεια που λαμβάνεται από τις τροφές μετατρέπεται σε *κινητική* (κίνηση σώματος), *δυναμική* (σύσπαση μυών), *θερμική* (διατήρηση θερμοκρασίας) και *ηλεκτρική* (επικοινωνία εγκεφάλου με τα λοιπά μέρη του σώματος)
- **Ενέργεια που αποδίδεται από την καύση υλικών μάζας 1 kg:**

Άνθρακας: 34 MJ	Λιγνίτης: 10 MJ	Βενζίνη: 44 MJ
Πετρέλαιο: 42 MJ	Φυσικό αέριο: 47 MJ	Ξύλο: 15 MJ

- **Ισχύς και ενέργεια:**
  - Λαμπτήρας ισχύος 100 W που λειτουργεί επί μία ημέρα αποδίδει 2.4 kWh (8.6 MJ)
  - Κινητήρας αυτοκινήτου 1400 cm^3 έχει ισχύ 56 kW και σε μία ώρα αποδίδει 200 MJ
  - Κινητήρας αεροπλάνου Boeing 707 έχει ισχύ 21 MW και σε 1 s αποδίδει 21 MJ
- **Ηλιακή ενέργεια:** Η μέση ημερήσια τιμή της στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας, η οποία προσπίπτει σε 1 m^2 ενός τόπου που βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος 40°, ανέρχεται σε 42 MJ (11.7 kWh) τον Ιούνιο και σε 14 MJ (3.9 kWh) τον Δεκέμβριο.

«Πρωτογενείς» πηγές ενέργειας & φυσικές διεργασίες

Ηλιακή ακτινοβολία: Στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας προσπίπτουν περίπου 1367 W/m^2 (ηλιακή σταθερά). Η ενέργεια αυτή: (α) απορροφάται από τη γη και μετατρέπεται σε θερμότητα, διατηρώντας τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, (β) συντηρεί τον υδρολογικό κύκλο (εξάτμιση, βροχόπτωση), (γ) συντηρεί την κατακόρυφη μεταφορά (αιολική ενέργεια, ρεύματα), και (δ) συντηρεί την φωτοσύνθεση.

Γη: Θερμικές, χημικές και ραδιενεργές πηγές που βρίσκονται στο εσωτερικό της γης, οι οποίες προκαλούν ροή ενέργειας στην επιφάνεια της τάξης των 0.063 W/m^2.

Βαρύτητα: Προέρχεται από τη σχετική θέση Γης, Ηλίου και Σελήνης και δημιουργεί τις παλίρροιες και τα θαλάσσια ρεύματα, ενώ συντηρεί τον υδρολογικό κύκλο. Εκτιμάται στο 10% της γήινης ενέργειας.

Βιομάζα: Η χρήση της ξεκίνησε πριν 400 000 έτη (homo erectus) και η χρήση της για καύση προκάλεσε «τεχνολογική επανάσταση».

Ορυκτά καύσιμα: Άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο που προέρχονται από τα λείψανα της αρχαίας χλωρίδας και πανίδας. Είναι αποθηκευμένα για 600 εκατομμύρια έτη και η καύση τους παράγει ενέργεια τα τελευταία 300 έτη. Ο ρυθμός κατανάλωσής τους είναι πολλαπλάσιος από το ρυθμό δημιουργίας τους, και στο μέλλον θα εξαντληθούν.

Σημείωση: Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στο έδαφος τη γης σε ένα έτος είναι περίπου 14 000 φορές μεγαλύτερη από την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας

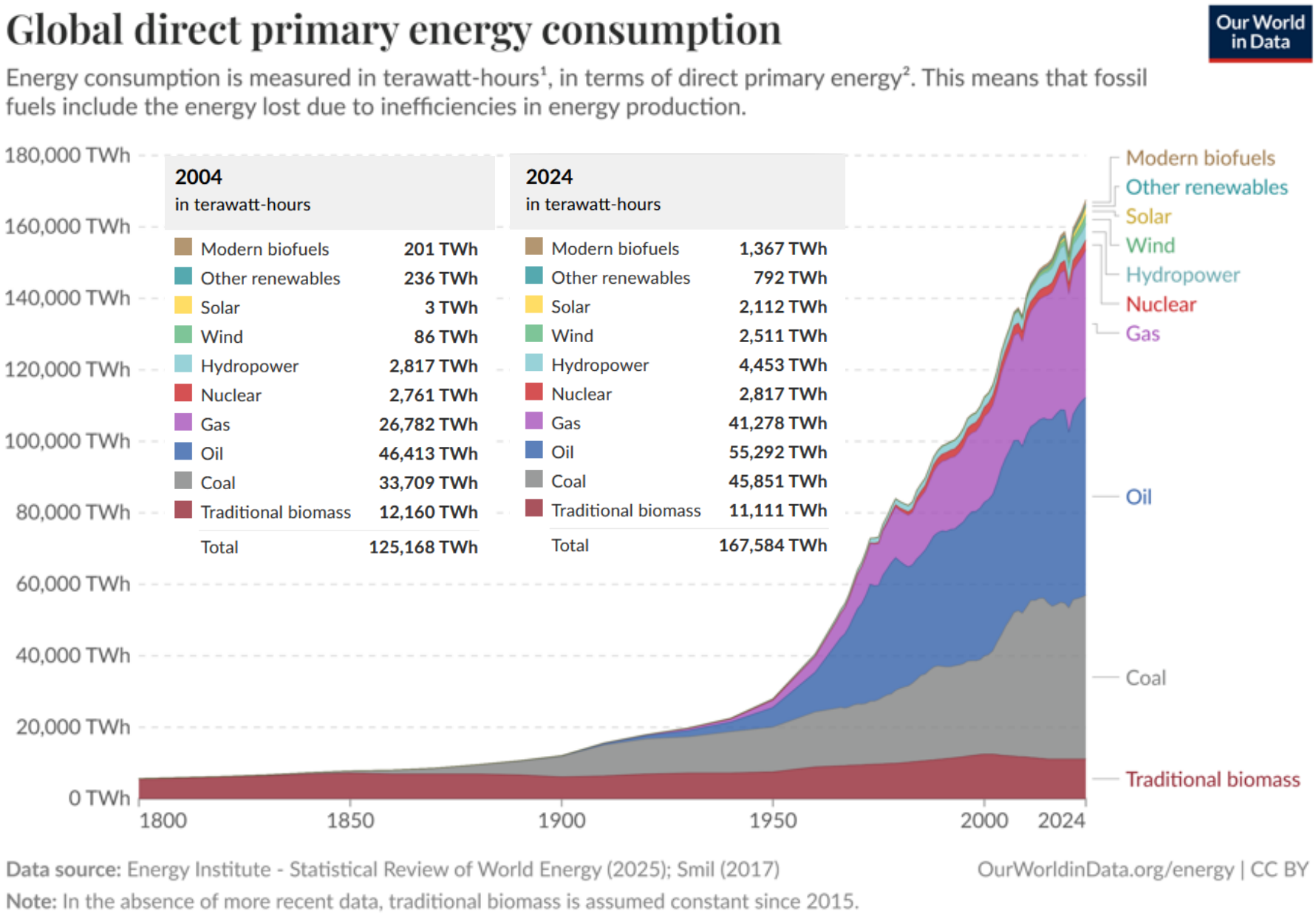
Τυπική διάκριση πηγών ενέργειας

- **Ορυκτά καύσιμα (αναφέρονται και ως *συμβατικές* πηγές ενέργειας):**
  - Στερεά (άνθρακας, σε διάφορες μορφές)
  - Υγρά (πετρέλαιο και παράγωγα αυτού)
  - Αέρια (φυσικό αέριο, σε διάφορες μορφές)
  - Πυρηνικά (ουράνιο)
- **Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)**
  - Ηλιακή (με κυρίαρχη τεχνολογία τα φωτοβολταϊκά συστήματα)
  - Αιολική
  - Υδραυλική (κυρίως υδροηλεκτρική)
  - Βιομάζα
  - Γεωθερμική
  - Θαλάσσια (κυμάτων, παλιρροιών, ρευμάτων)

Σημείωση 1: Ο όρος *ανανεώσιμη* αφορά στη *χρονική κλίμακα* επαναδημιουργίας της πηγής ενέργειας. Στη γεωλογική κλίμακα, τα ορυκτά καύσιμα είναι ανανεώσιμα.

Σημείωση 2: Η παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, βιομάζα και γεωθερμία έχει ως κοινή βάση τη διεργασία της *καύσης*.

Χρονική εξέλιξη πρωτογενούς ενέργειας (1800-2024)



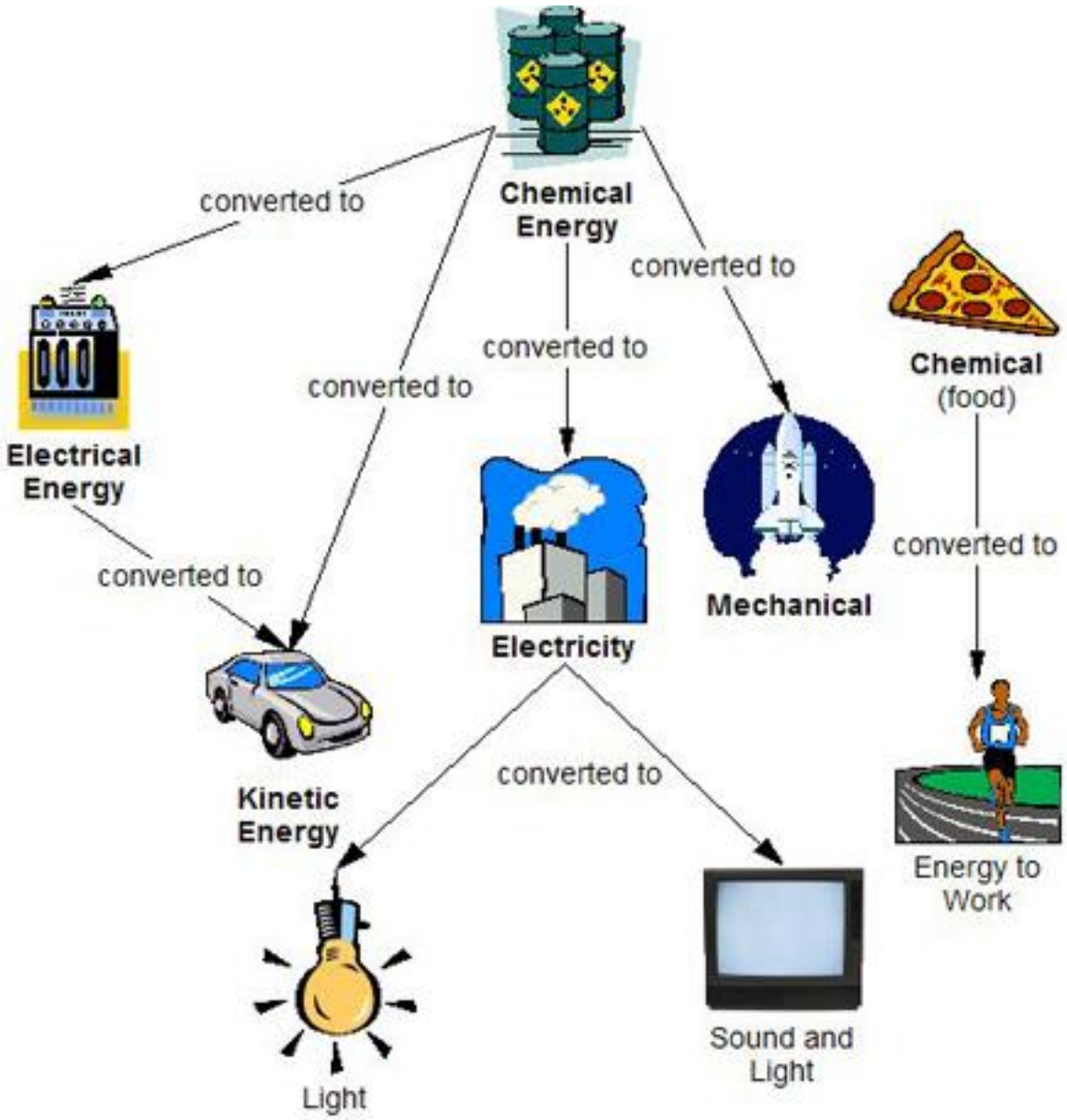
Μετατροπές ενέργειας

Σημείωση 1: Οποιαδήποτε μεταβολή στον φυσικό κόσμο συνδέεται με κάποια *μετατροπή ενέργειας*

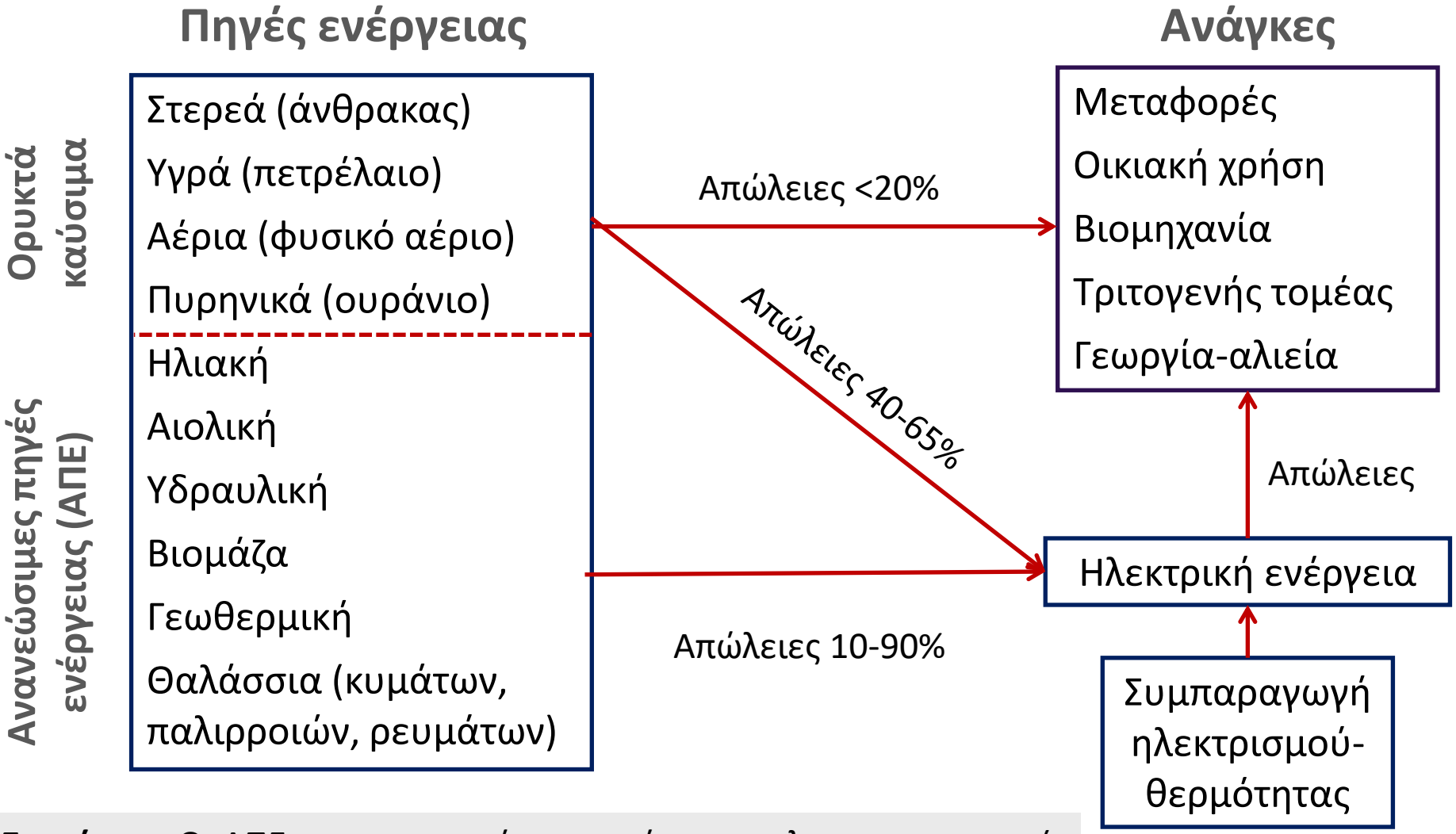
Σημείωση 2: Σε κάθε μετατροπή ενέργειας από μια μορφή σε κάποια άλλη πραγματοποιούνται *απώλειες* ενέργειας

Σημείωση 3: Απώλειες πραγματοποιούνται και κατά τη *μεταφορά* και *αποθήκευση* της ενέργειας

Σημείωση 4: Η σύγχρονη τάση είναι η χρήση του *ηλεκτρισμού* ως του κύριου μετατροπέα ενέργειας.



Γενικό σχήμα μετατροπών ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών



Σημείωση: Οι ΑΠΕ χρησιμοποιούνται κυρίως για *ηλεκτροπαραγωγή* (αιολική & υδραυλική ενέργεια → κίνηση, ηλιακή → θερμότητα)

Συστήματα μετατροπής ενέργειας (1)

- Για δεδομένη ισχύ, P_0, η οποία εισάγεται σε ένα σύστημα μετατροπής, η ισχύς που εξέρχεται, P, είναι πάντα μικρότερη, σύμφωνα με τη σχέση:

$$P = \eta \, P_0$$

  όπου $\eta < 1$ αδιάστατο μέγεθος που καλείται **βαθμός απόδοσης** (efficiency).
- Η **εισερχόμενη ισχύς** είναι μια σχέση της μορφής:

$$P_0 = P_0(x, \boldsymbol{\lambda})$$

  όπου x η ροή του μέσου/υλικού που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ισχύος και $\boldsymbol{\lambda}$ φυσικές ιδιότητες του μέσου παραγωγής και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος μετατροπής (π.χ. πυκνότητα ανέμου και διάμετρος ανεμογεννήτριας).
- Συνήθως η συνάρτηση $P_0(x, \boldsymbol{\lambda})$ μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά (**θεωρητική ισχύς**).
- Χαρακτηριστικά παραδείγματα του μεγέθους x είναι:
  - Ρυθμός μεταβολής μάζας καυσίμου που εισάγεται σε θερμοηλεκτρική μονάδα
  - Ρυθμός μεταβολής όγκου νερού (παροχή) που διέρχεται από υδροστρόβιλο
  - Ταχύτητα ανέμου που προσπίπτει σε ανεμογεννήτρια
- Η ροή x, και ως εκ τούτου η θεωρητική ισχύς μπορεί να είναι:
  - **Ελεγχόμενη** (π.χ., καύσιμο, βιομάζα, γεωθερμία, εκροή από ταμιευτήρα)
  - **Μη ελεγχόμενη** (π.χ., ροή ποταμού, άνεμος, ήλιος, κύματα), συνήθως επειδή εξαρτάται από τις *μεταβαλλόμενες υδρομετεωρολογικές συνθήκες*.

Συστήματα μετατροπής ενέργειας (2)

- Ο βαθμός απόδοσης είναι γενικά εξαρτώμενος από τη ροή ισχύος, x, και χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος μετατροπής, $\boldsymbol{\mu}$, ήτοι:

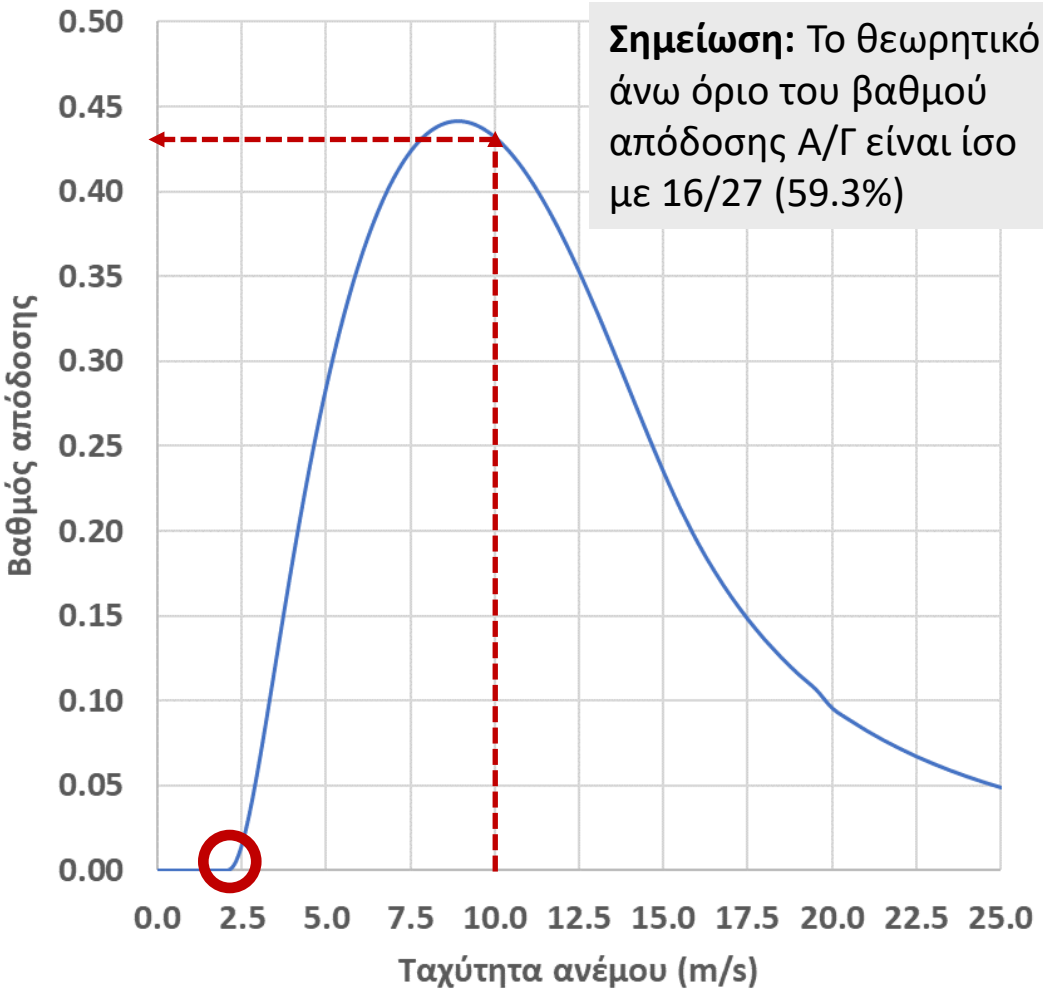
$$\eta = \eta(x, \boldsymbol{\mu})$$

- Σε αντίθεση με τη θεωρητική ισχύ, η σχέση μεταβολής του βαθμού απόδοσης δεν μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά, παρά μόνο με βάση εργαστηριακά πειράματα που αφορούν στο συγκεκριμένο και μόνο μηχάνημα μετατροπής (**καμπύλες ισχύος**).
- Σε αρκετά συστήματα, απαιτείται μια ελάχιστη ροή x προκειμένου να παραχθεί ισχύς, ενώ όλα τα συστήματα έχουν ένα άνω όριο παραγωγής, που καλείται **ονομαστική ισχύς** (nominal power). Η ονομαστική ισχύς χαρακτηρίζει το κάθε σύστημα (π.χ. φωτοβολταϊκό πάνελ 200 W, ανεμογεννήτρια 700 kW, θερμοηλεκτρική μονάδα 400 MW).
- Όταν η ροή x, και ως εκ τούτου η θεωρητική ισχύς, είναι ελεγχόμενες, επιδιώκεται η λειτουργία του συστήματος στη μέγιστη (ονομαστική) ισχύ του, με σταθερή ροή x, και συνακόλουθα με **σταθερό βαθμό απόδοσης**, ίσο ή κοντά στο μέγιστο.
- Τυπικές τιμές του (μέγιστου) βαθμού απόδοσης:
  - Θερμικές μονάδες: > 0.40
  - Υδροηλεκτρικά έργα: > 0.85 (μεγάλα έργα > 0.90)
  - Ανεμογεννήτριες: < 0.45
  - Φωτοβολταϊκά πάνελ: > 0.23

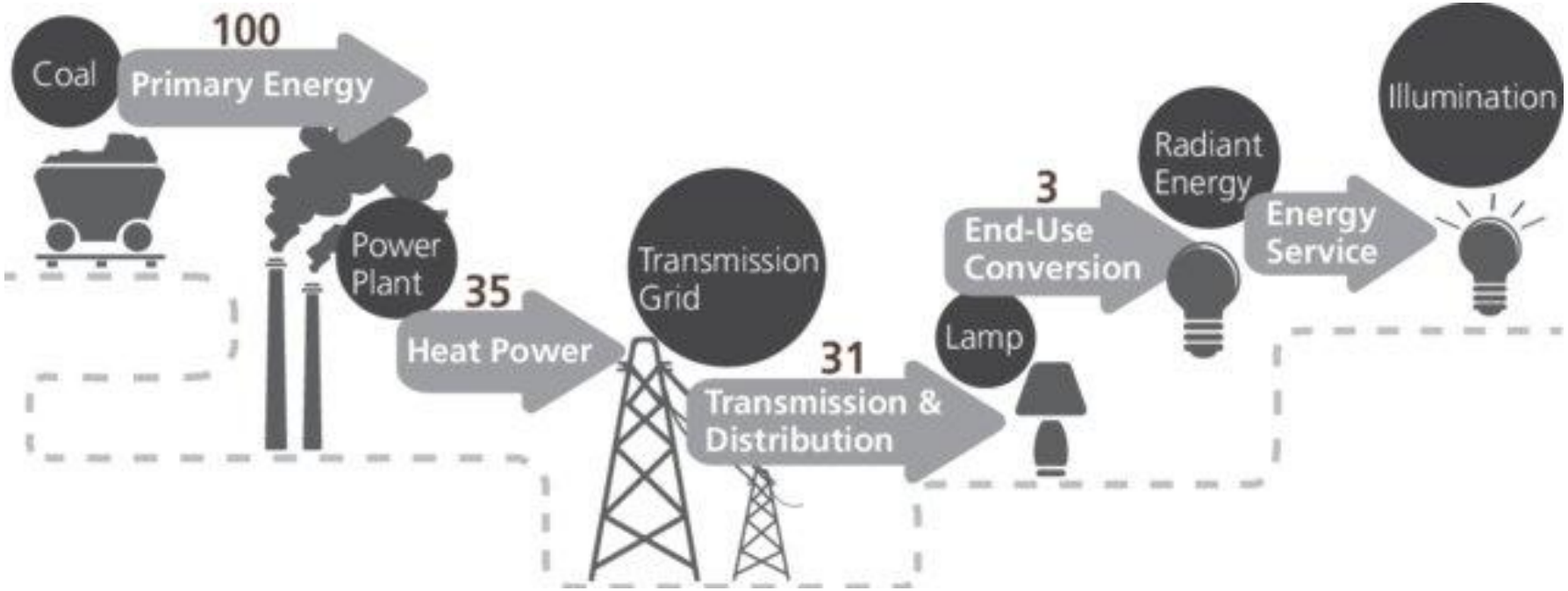
Σημείωση: Ο βαθμός απόδοσης είναι εξ ορισμού μικρότερος της μονάδας, ενώ για ορισμένες πηγές ενέργειας υπάρχει θεωρητικό άνω όριο

Παράδειγμα: Θεωρητική ισχύς ανέμου και βαθμός απόδοσης ανεμογεννητριών

- Η θεωρητική ισχύς του ανέμου (αιολική ισχύς) εξαρτάται από:
  - την ταχύτητα του ανέμου (ροή «καυσίμου»)
  - την πυκνότητα του αέρα (φυσική ιδιότητα καυσίμου)
  - τη διάμετρο της πτερωτής (γεωμετρικό μέγεθος)
- Στο νομογράφημα δίνεται η σχέση μεταβολής του βαθμού απόδοσης μιας Α/Γ εμπορίου (Enercon E-66/18.70), διαμέτρου 70 m και ονομαστικής ισχύος 1800 kW.
- Για ταχύτητα ανέμου 10 m/s, η θεωρητική ισχύς του ανέμου υπολογίζεται σε 2356 kW, ο βαθμός απόδοσης εκτιμάται σε 43.2%, άρα παράγεται ηλεκτρική ισχύς 1018 kW.



Σημείωση: Το θεωρητικό άνω όριο του βαθμού απόδοσης Α/Γ είναι ίσο με 16/27 (59.3%)

Πηγή: https://en.wind-turbine-models.com/ turbines/135-enercon-e-66-18.70 (ανακατασκευή σχέσης βαθμού απόδοσης, με βάση την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας)

Αντί επιλόγου: Πόση πρωτογενής ενέργεια απαιτείται για να ανάψουμε έναν λαμπτήρα;