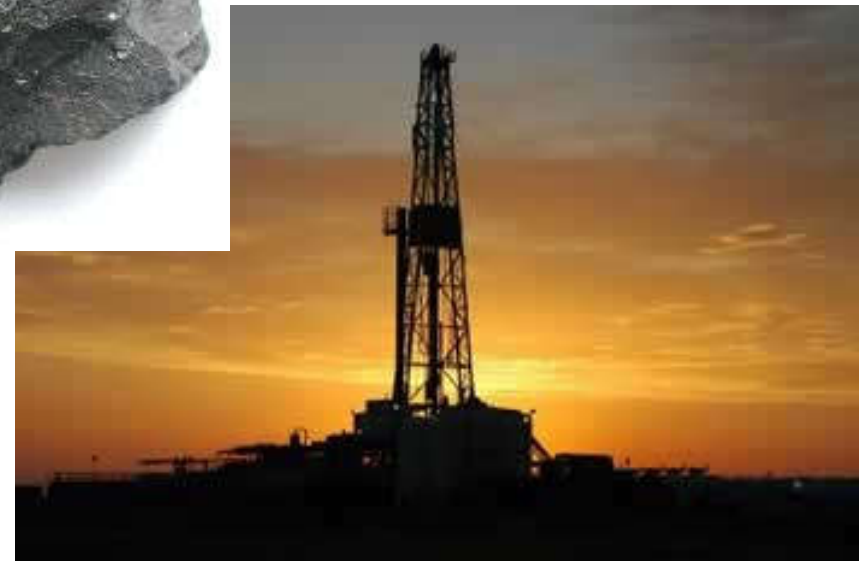


Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

1^ο και 5^ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

Ορυκτά καύσιμα και ενέργεια



Νίκος Μαμάσης & Ανδρέας Ευστρατιάδης

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2021-22

Διάρθρωση παρουσίας: *Ορυκτά καύσιμα και ενέργεια*

- Εισαγωγή
- Πρωτογενής ενέργεια
- Παραγωγή CO₂ από ορυκτά καύσιμα
- Ορυκτά καύσιμα (γαιάνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ουράνιο)
- Τα ορυκτά καύσιμα στην Ελλάδα
- Συμμετοχή των ορυκτών καυσίμων στην ηλεκτροπαραγωγή
- Εφαρμογή

Εισαγωγή

Μονάδες

Μετρικός τόνος 1 mt = 1000 kg = 1 Mg (SI)

1 short ton = 907.18474 kg (Αμερικανικό σύστημα μονάδων)

1 long ton = 1016.0469088 kg (Βρετανικό σύστημα μονάδων)

1 kilolitre = 1 m³ = 6.2898 barrels

1 kilocalorie (kcal) = 4.187 kJ = 3.968 Btu

1 kilojoule (kJ) = 0.239 kcal = 0.948 Btu

1 British thermal unit (Btu) = 0.252 kcal = 1.055 kJ

1 kilowatt-hour (kWh) = 860 kcal = 3600 kJ = 3412 Btu

Τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου - tones oil equivalent (toe)

Τα ορυκτά καύσιμα με βάση τη θερμογόνο τους δύναμη μετρούνται σε toe

1 toe ισοδυναμεί με: 42 GJ ή 11.7 MWh ή 10⁶ kcal ή 40*10⁶ Btu

Εισαγωγή

Προσεγγιστικοί συντελεστές μετατροπών

Ακατέργαστο πετρέλαιο

Πυκνότητα: 0.8581 tn/m³

1 mt = 1.165 m³ = 7.33 barrels = 307.86 US gallons

1 barrel = 159 lt = 136 kg = 42 US gallons 1 barrel/day = 49.8 mt/year

Παράγωγα πετρελαίου

	Πυκνότητα tn/m ³	Barrels/mt
LPG	0.542	11.6
Gasoline	0.740	8.5
Kerosene	0.806	7.8
Gas oil/ diesel	0.839	7.5
Residual fuel oil	0.939	6.7

Φυσικό αέριο (NG) και υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG)

1 m³ NG = 35.3 ft³ = 0.73 kg LNG **1 m³ NG = 1000 kcal = 37.7 MJ = 10.5 kWh**

1000 m³ NG = 0.73 mt LNG = 0.90 toe = 6.29 barrels = 36 * 10⁶ BTU = 38 GJ

Πηγή: BP-Statistical Review of World Energy 2021

Εισαγωγή

Τυπική σύσταση και θερμογόνος δύναμη

Συστατικά καυσίμων	Ασφαλτούχος άνθρακας	Υποασφαλτούχος άνθρακας	Λιγνίτης	Βενζίνη	Αργό πετρέλαιο	Φυσικό αέριο
Θερμογόνος δύναμη MJ/kg	28.4	19.40	8.5	45.2	42.5	54.4
Σύσταση (%)						
Άνθρακας	67	48	14.5	87	86	74
Υδρογόνο	5	3.3		12.5	9.7	23.9
Θείο	1.5	0.4	0.5	0.3	2.3	0
Άζωτο	1.5	0.7		0.02	1.2	1.7
Οξυγόνο	8.7	11.9			0.8	
Στάχτη	9.8	5.3	5.3		0.1	
Υγρασία	6.7	30.2	62.0		0.3	

**Θερμογόνος
Δύναμη**

Εισαγωγή

(kJ/kg)

(kJ/m³)

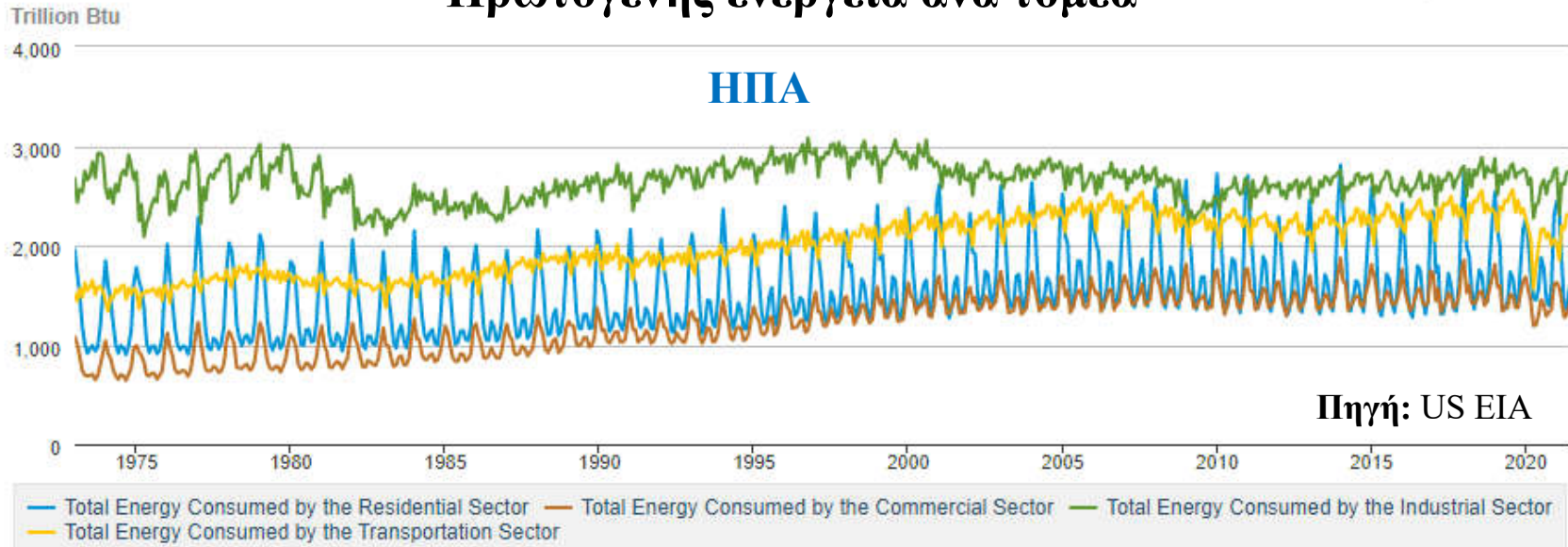
(kWh/kg)

(kWh/m³)

	Ανώτερη	Κατώτερη	Ανώτερη	Κατώτερη	Ανώτερη	Κατώτερη	Ανώτερη	Κατώτερη
Ανθρακας	33820	33820			9.4	9.4		
Κωκ	29281	28886			8.1	8.0		
Ανθρακίτης	34336	33281			9.5	9.2		
Λιθάνθρακας	32026	31401			8.9	8.7		
Λιγνίτης	20676	19681			5.7	5.5		
Τύρφη	16951	15701			4.7	4.4		
Βενζόλη	41870	40150			11.6	11.2		
Βενζίνη	46050	42700			12.8	11.9		
Ελαφρύ πετρέλαιο	44380	41870			12.3	11.6		
Βαρύ πετρέλαιο	43120	40600			12.0	11.3		
Επτάνιο	47980	44380			13.3	12.3		
Οκτάνιο	48150	44590			13.4	12.4		
Μονοξ.άνθρακα	10110	10110	12640	12640	2.8	2.8	3.5	3.5
Υδρογόνο	14760	119950	12750	10780	4.1	33.3	3.5	3.0
Θείο	9250	9250			2.6	2.6		
Μεθάνιο	55360	50000	39810	35870	15.4	13.9	11.1	10.0
Αιθάνιο	51923	47492			14.4	13.2		
Προπάνιο	50340	46360	101800	93560	14.0	12.9	28.3	26.0
Βουτάνιο	49500	45730	134000	123530	13.8	12.7	37.2	34.3
Αιθυλένιο	50290	47150	63420	59480	14.0	13.1	17.6	16.5
Ακετυλένιο	49900	48220	58830	56800	13.9	13.4	16.3	15.8

Πρωτογενής ενέργεια

Πρωτογενής ενέργεια ανά τομέα



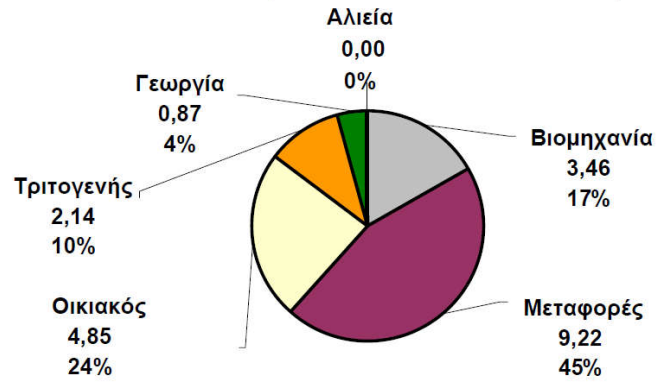
Ελλάδα και ΕΕ το 2009 (δεν περιλαμβάνεται η ηλεκτρική ενέργεια)



Ελλάδα

Συνολική τελική ενεργειακή
κατανάλωση ανά τομέα
(σε % επί των συνολικών ΜΤΙΠ)

2009

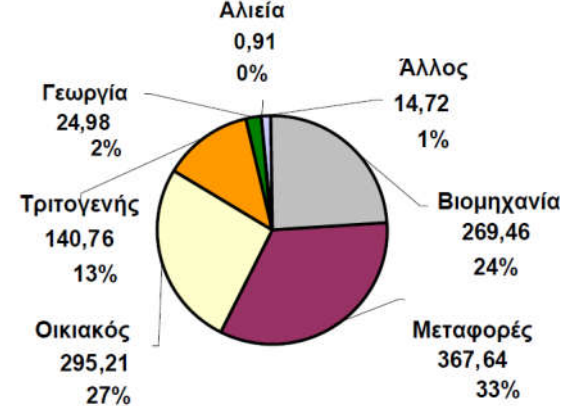


Σύνολο ΜΤΙΠ 20,54



ΕΕ-27

Συνολική τελική ενεργειακή
κατανάλωση ανά τομέα
(σε % επί των συνολικών ΜΤΙΠ)



Σύνολο ΜΤΙΠ 1113,67

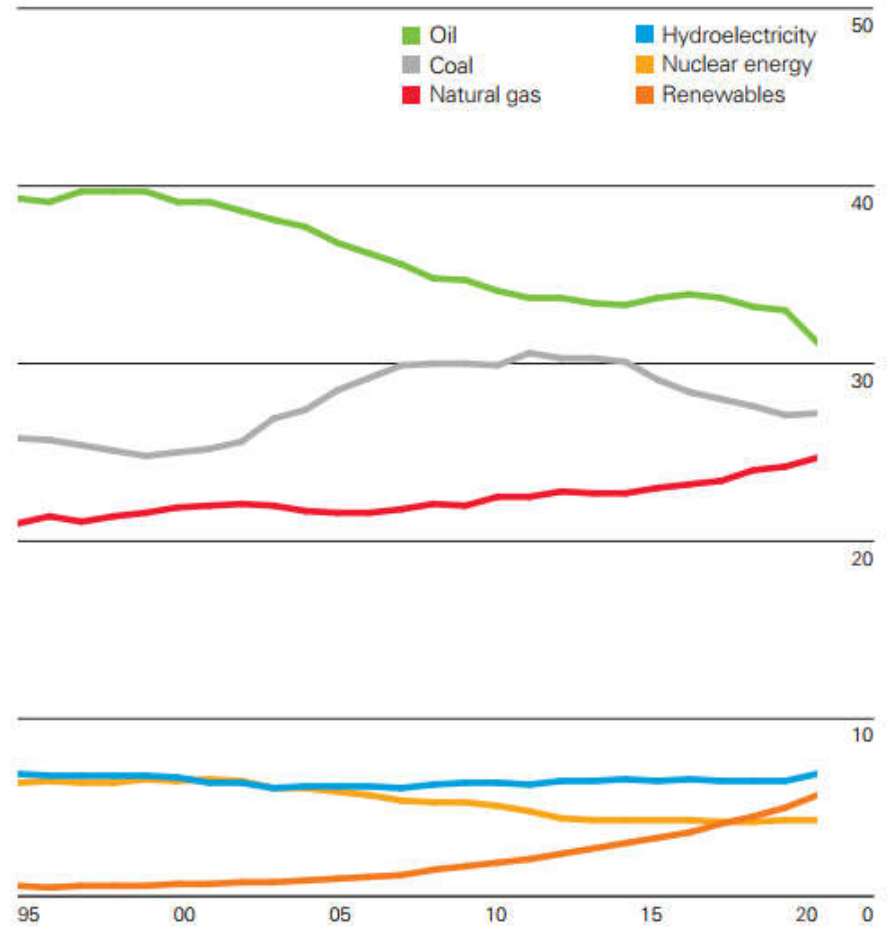
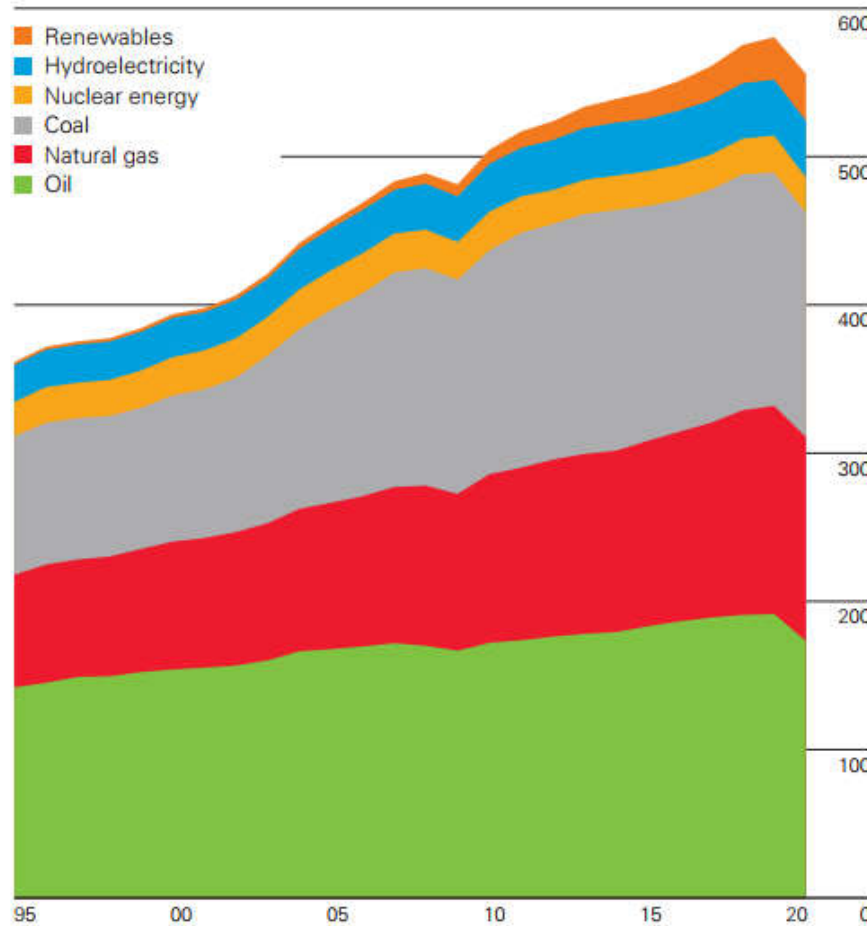
Πρωτογενής ενέργεια

Χρονική εξέλιξη παγκόσμιας
κατανάλωσης (EJ) - 1 EJ \approx 23.9 Mtoe)

Χρονική εξέλιξη συμμετοχής (%)
μορφών ενέργειας στο παγκόσμιο μίγμα

World consumption 2020: $13.3 \cdot 10^9$ toe
Exajoules

Shares of global primary energy
Percentage



Πηγή: BP Statistical Review of World Energy, June 2021

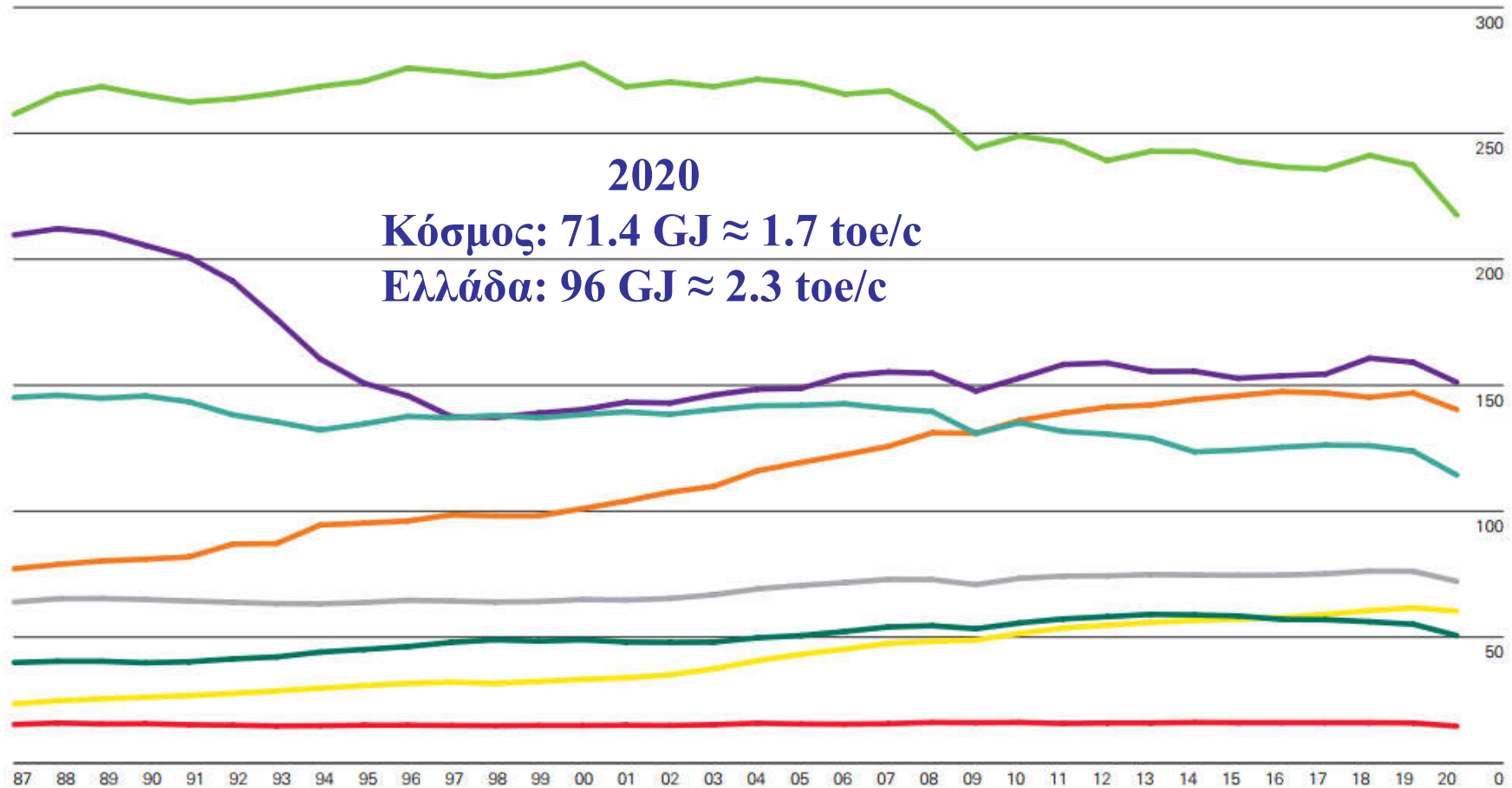
(<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>)

Πρωτογενής ενέργεια

Κατανάλωση ανά κάτοικο (GJ) στις διάφορες γεωγραφικές περιοχές

Energy per capita by region
Gigajoules per head

North America S. & Cent. America Europe CIS
Middle East Africa Asia Pacific World



Πηγή: BP Statistical Review of World Energy, June 2021 (<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>)

Παραγωγή CO₂

Μοριακό βάρος άνθρακα (C): 12

Μοριακό βάρος οξυγόνου (O): 16

Μοριακό βάρος διοξειδίου του άνθρακα (CO₂): 44

*Για την καύση 1 kg C απαιτούνται 2.67 (2*16/12) kg O₂ και εκλύονται 3.67 (44/12) kg CO₂*

Η καύση 1 L πετρελαίου με:
θερμογόνο δύναμη 45 MJ/kg
με πυκνότητα περίπου 0.8 kg/L
και περιεκτικότητα 87% σε άνθρακα
έχει αποτέλεσμα:

Την καύση 0.69 kg C και απόδοση στο
περιβάλλον 2.5 kg CO₂
Την παραγωγή ενέργειας 36 MJ (10 kWh)
Την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 3.8
kWh (βαθμός απόδοσης 38%)

Αντιστοιχούν 0.7 kg CO₂ ανά kWh
ηλεκτρικής ενέργειας

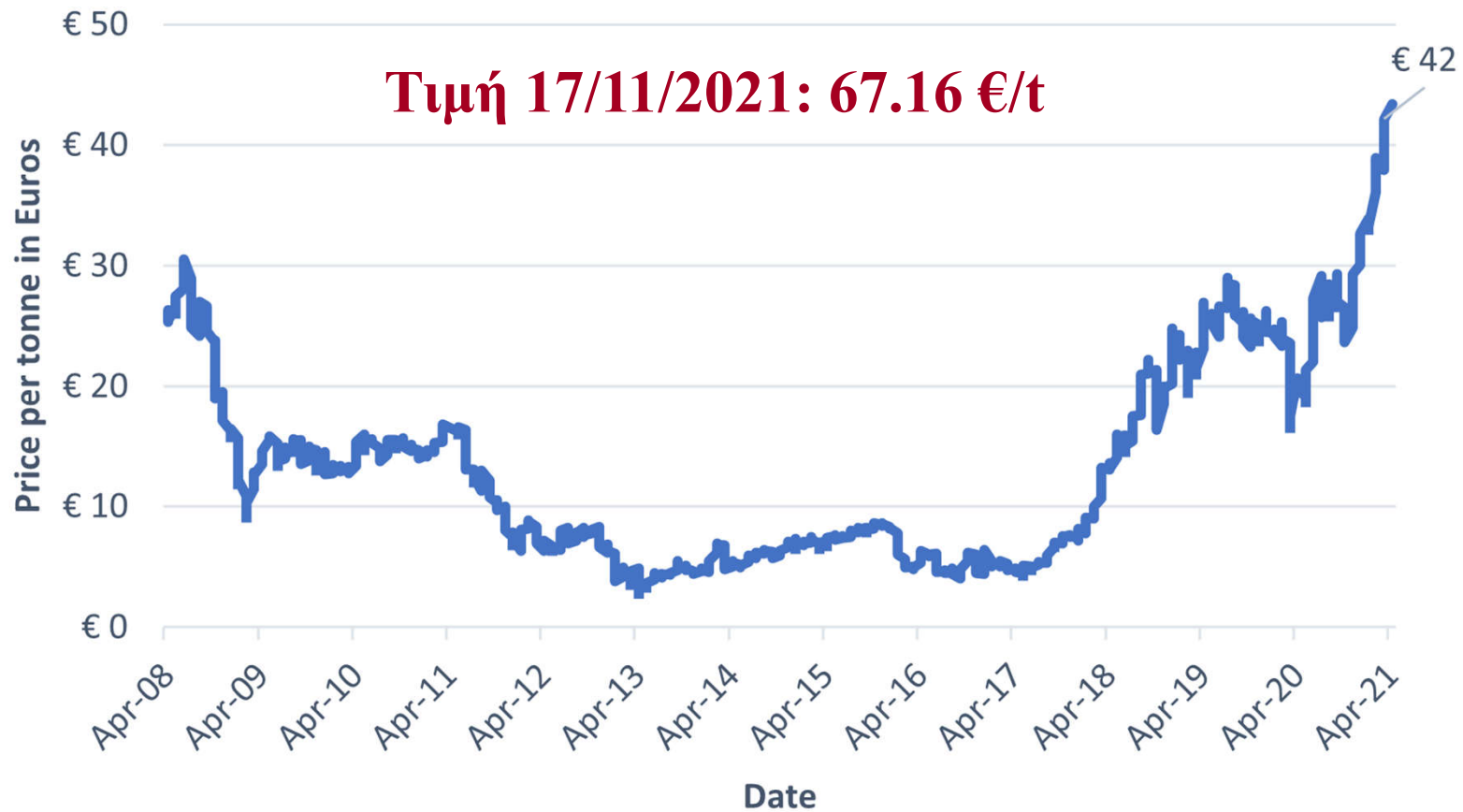
Η καύση 1 kg Ελληνικού λιγνίτη με:
θερμογόνο δύναμη 8 MJ/kg
και περιεκτικότητα 19% σε άνθρακα
έχει αποτέλεσμα:

Την καύση 0.19 kg C και απόδοση στο
περιβάλλον 0.7 kg CO₂
Την παραγωγή ενέργειας 2.2 kWh
Την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 0.9
kWh (βαθμός απόδοσης 40%)

Αντιστοιχούν 0.8 kg CO₂ ανά kWh
ηλεκτρικής ενέργειας

Παραγωγή CO₂

Δικαιώματα εκπομπής CO₂ (Ευρώπη)



Πηγή: <https://ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/>

Παραγωγή CO₂

Μύθοι που επηρεάζουν τις ενεργειακές επιλογές: το CO₂ είναι ρύπος

- Το διοξείδιο του άνθρακα στη γήινη ατμόσφαιρα θεωρείται ιχνοστοιχείο με μέση συγκέντρωση της τάξης των 400 ppm (0.04%). Το 1750 η συγκέντρωση ήταν 280 ppm, ενώ σε χρονικές κλίμακες εκατομμυρίων ετών ή συγκέντρωση ήταν έως και 20 φορές μεγαλύτερη.
- Είναι ακίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία μέχρι τα 5000 ppm (Οργανισμός Επαγγελματικής Ασφάλειας και Υγείας των ΗΠΑ). Οι επιπτώσεις υψηλότερων συγκεντρώσεων φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα.

5,000 ppm (0.5%)	OSHA Permissible Exposure Limit (PEL) and ACGIH Threshold Limit Value (TLV) for 8-hour exposure
10,000 ppm (1.0%)	Typically no effects, possible drowsiness
15,000 ppm (1.5%)	Mild respiratory stimulation for some people
30,000 ppm (3.0%)	Moderate respiratory stimulation, increased heart rate and blood pressure, ACGIH TLV-Short Term
40,000 ppm (4.0%)	Immediately Dangerous to Life or Health (IDLH)
50,000 ppm (5.0%)	Strong respiratory stimulation, dizziness, confusion, headache, shortness of breath
80,000 ppm (8.0%)	Dimmed sight, sweating, tremor, unconsciousness, and possible death

Πηγή: USA Department of Agriculture

https://www.fsis.usda.gov/sites/default/files/media_file/2020-08/Carbon-Dioxide.pdf

Παραγωγή CO₂

Μύθοι που επηρεάζουν τις ενεργειακές επιλογές: το CO₂ είναι ρύπος

Πραγματικοί ατμοσφαιρικοί ρύποι

Pollutant	Averaging time	Interim target				AQG level
		1	2	3	4	
PM _{2.5} , µg/m ³	Annual	35	25	15	10	5
	24-hour ^a	75	50	37.5	25	15
PM ₁₀ , µg/m ³	Annual	70	50	30	20	15
	24-hour ^a	150	100	75	50	45
O ₃ , µg/m ³	Peak season ^b	100	70	–	–	60
	8-hour ^a	160	120	–	–	100
NO ₂ , µg/m ³	Annual	40	30	20	–	10
	24-hour ^a	120	50	–	–	25
SO ₂ , µg/m ³	24-hour ^a	125	50	–	–	40
CO, mg/m ³	24-hour ^a	7	–	–	–	4

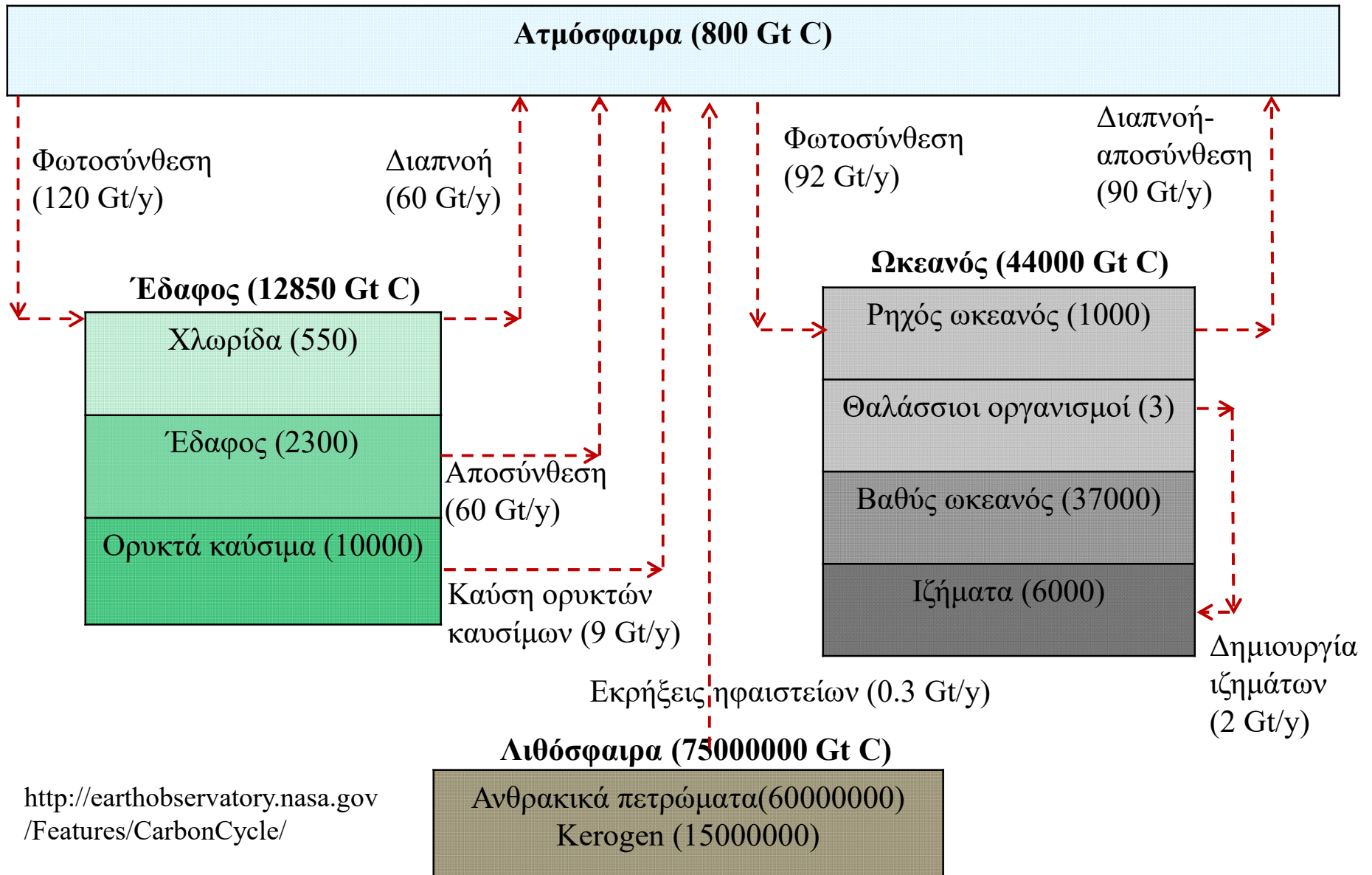
Η κύρια πηγή των παραπάνω ρύπων είναι η καύση ορυκτών καύσιμων και θεωρούνται υπεύθυνοι για το θάνατο **4.2 εκατομμυρίων** ανθρώπων ετησίως

Πηγή: WHO global air quality guide lines

Παραγωγή CO₂

Μύθοι που επηρεάζουν τις ενεργειακές επιλογές:
μεγάλη συνεισφορά των ανθρωπογενών εκπομπών CO₂ στο συνολικό ισοζύγιο

Κύκλος Άνθρακα. Αποθηκευμένες ποσότητες και κύριες διεργασίες μεταφοράς



Παραγωγή CO₂

**Μύθοι που επηρεάζουν τις ενεργειακές επιλογές:
το CO₂ είναι το κύριο αέριο θερμοκηπίου**

Επίδραση ατμοσφαιρικών αερίων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου

Υδρατμοί: 50%

Σύννεφα: 25%

CO₂: 19%

Άλλα: 7%

Υδρατμοί: 36-72%

CO₂: 9-26%

Μεθάνιο: 4-9%

Όζον: 3-7%

Σε συνθήκες ανέφελου καιρού:

Υδρατμοί : 67%

CO₂ : 24%

Άλλα : 9%

Schmidt, *et al.* (2010)

Πηγή: Wikipedia

Παραγωγή CO₂

Το Πακέτο 20-20-20

Με στόχο την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής η ΕΕ στις 9/3/2007 έθεσε τρεις στόχους μέχρι το 2020:

- μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 20%,
- συμμετοχή των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε 20% και
- **μείωση των εκπομπών CO₂ κατά τουλάχιστον 20% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990**

Ειδικότερα για την Ελλάδα:

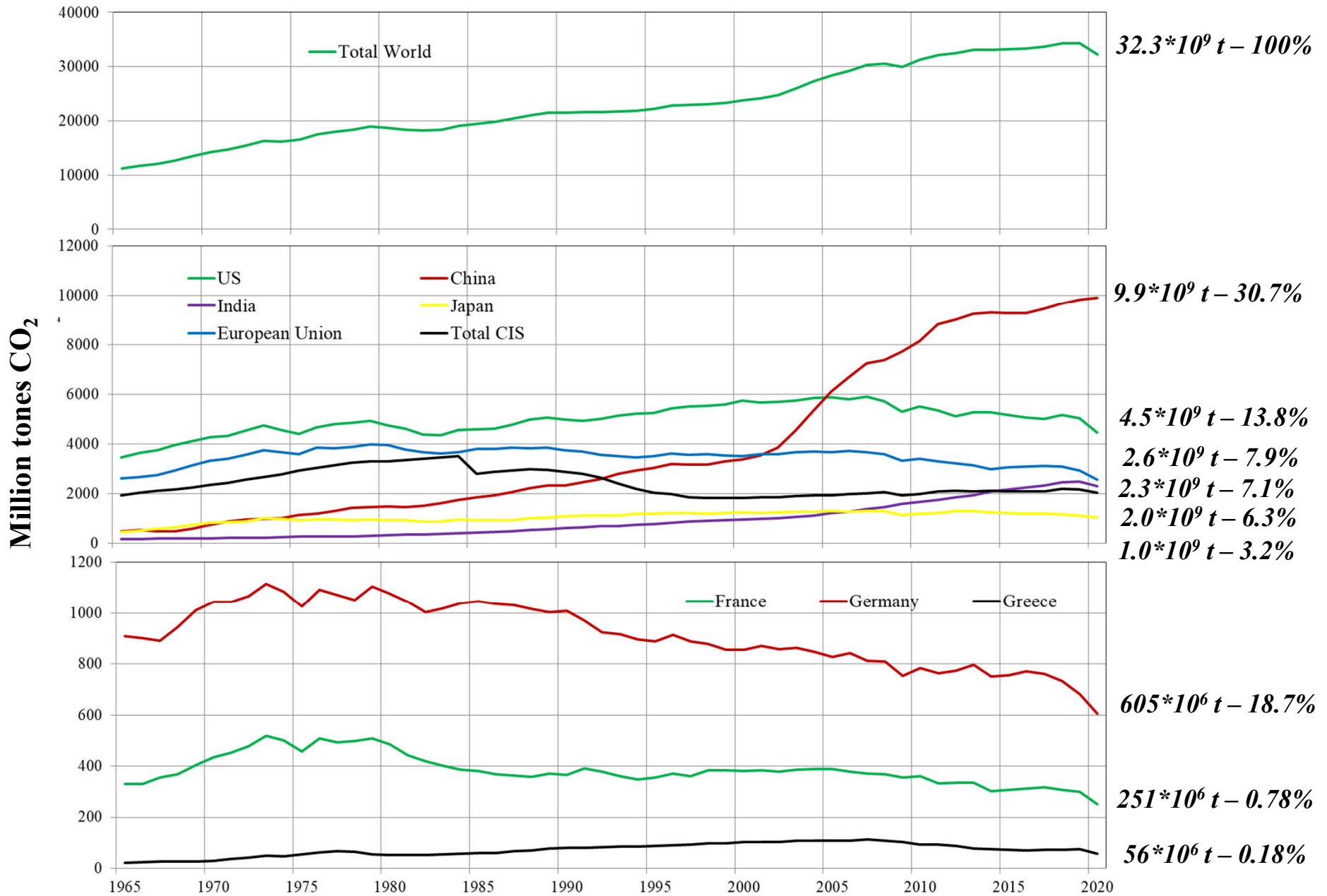
- ΑΠΕ: 18% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας υποχρεωτικά μέχρι το 2020 (Οδηγία 2009/28/ΕΚ)
- Υποχρεωτικός στόχος 10% μέχρι το 2020 για βιοκαύσιμα
- Εξοικονόμηση 20% πρωτογενούς ενέργειας μέχρι το 2020
- **Μείωση κατά 4% των εκπομπών του CO₂ 2005 μέχρι το 2020**

Πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής Επιτροπή 20-20-20, 21 Ιουνίου 2010

Παραγωγή CO₂

Χρονική εξέλιξη εκπομπών

**Εκπομπές
2020**



Γαιάνθρακας (coal)

Ο **Γαιάνθρακας (coal)** είναι σκληρό οργανικό υλικό που σχηματίστηκε σε στρώματα μέσα σε αποθέσεις ιζημάτων. Συνίσταται (α) από οργανικό υλικό φυτών (άνθρακας, άζωτο, υδρογόνο, οξυγόνο) που στερεοποιήθηκαν κάτω ειδικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης και (β) ανόργανα υλικά σε ποσοστό 10-30%, Με τη θέρμανση του γαιάνθρακα απελευθερώνονται CO, CO₂, CH₄ και υδρατμοί

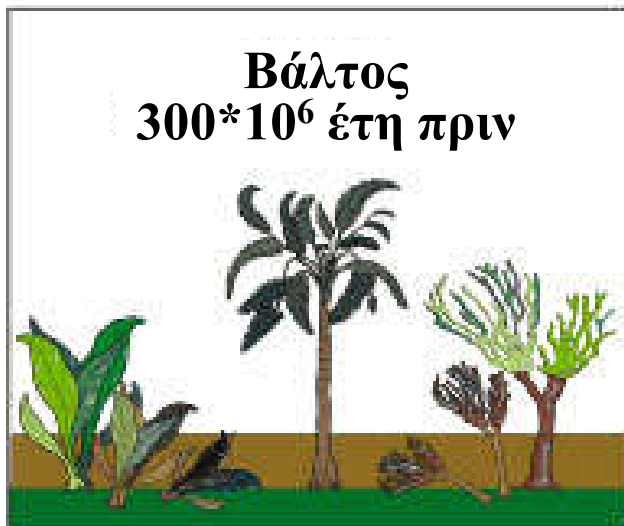
- Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες κοιτασμάτων ανάλογα με τη θερμογόνο δύναμη και την περιεκτικότητα σε άνθρακα και υδρογόνο.
- Ο παλαιότερος σχηματισμός είναι ο ανθρακίτης (95-98% C και 3-4% H) με θερμογόνο δύναμη μεγαλύτερη από 32MJ/kg (8.9 kWh/kg).
- Ο νεότερος σχηματισμός είναι ο λιγνίτης (73-78% C και 5-6% H) με θερμογόνο δύναμη μικρότερη από 19 MJ/kg (5.3 kWh/kg).
- Τα ελληνικά κοιτάσματα λιγνίτη έχουν χαμηλή θερμογόνο δύναμη της τάξης των 1.1-2.6 kWh/kg.

Παράδειγμα

Για να παραχθεί 1 kWh (3.6 MJ) ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμικό σταθμό με απόδοση 37 % απαιτούνται $3.6 / 0.37 = 9.7$ MJ θερμικής ενέργειας τα οποία περιέχονται σε 1.6 kg λιγνίτη με θερμογόνο δύναμη 6.1 MJ/kg. Ακόμη απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα 300 gr C που ισοδυναμούν με 1.1 kg CO₂

Γαϊάνθρακας (coal)

Σχηματισμός



Πολλά γιγάντια φυτά θάφτηκαν στους βάλτους

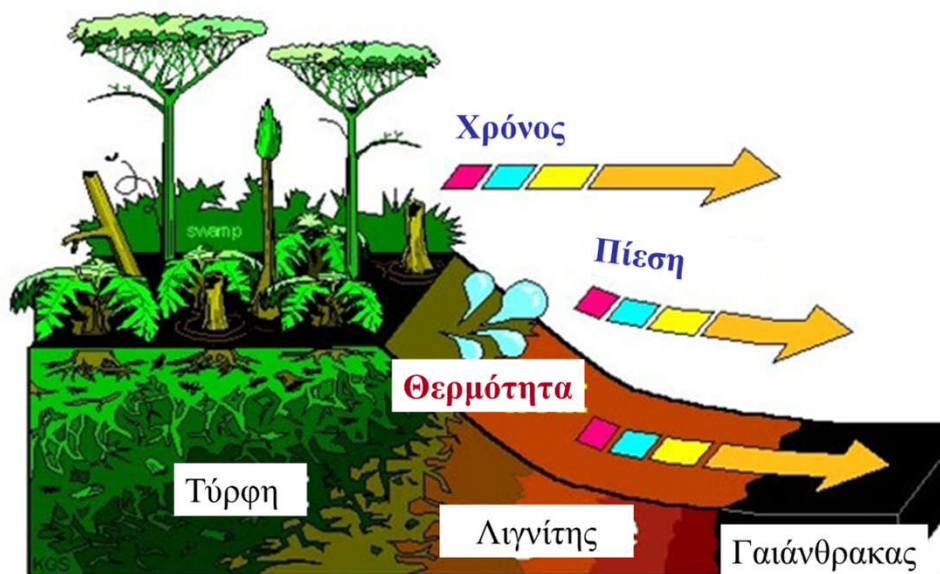


Για πολλά εκατομμύρια χρόνια τα φυτά ήταν θαμμένα κάτω από λάσπη



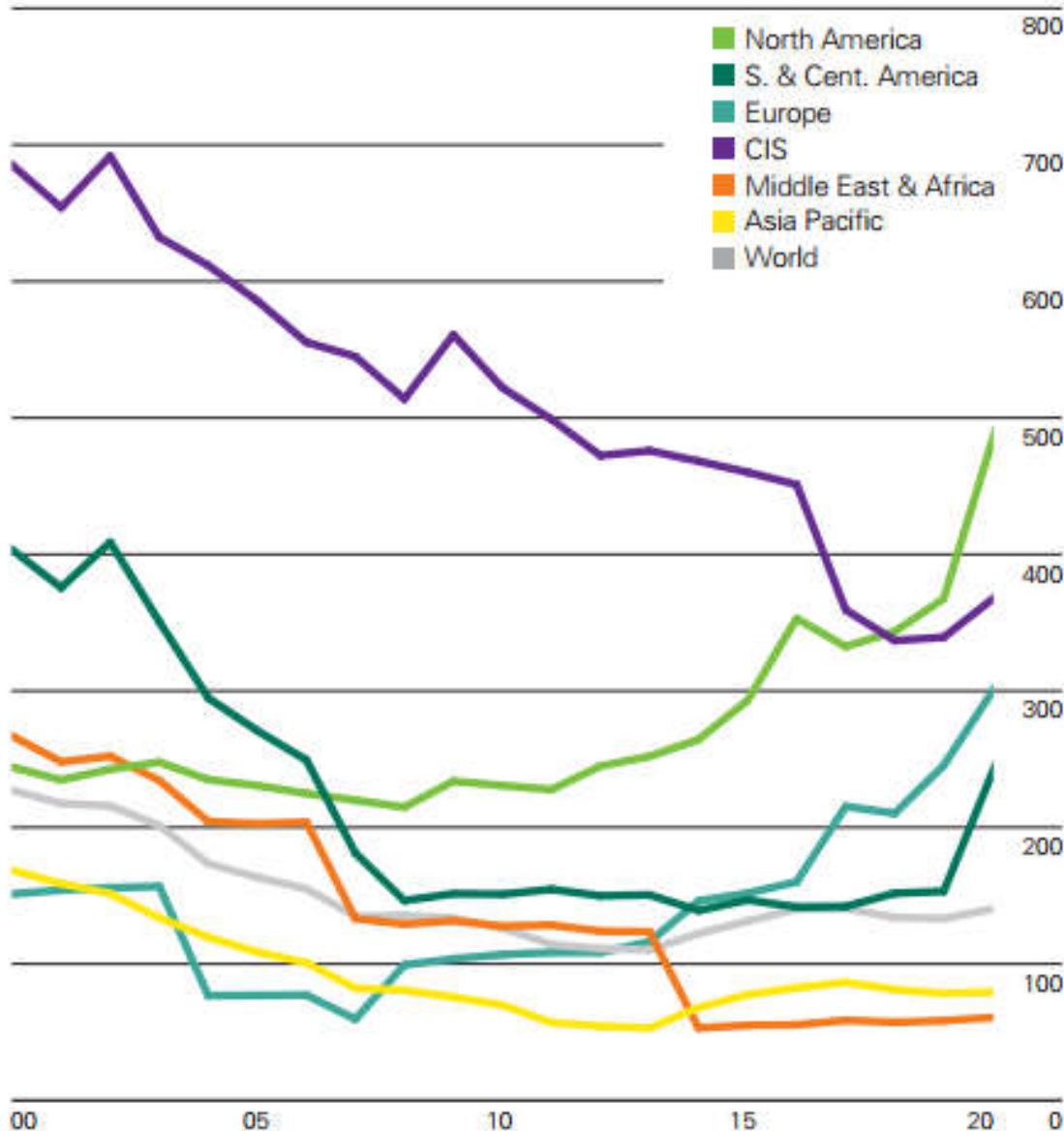
Θερμότητα και πίεση μετέτρεψαν τα θαμμένα φυτά σε άνθρακα

Σχηματισμός τύρφης, λιγνίτη και γαϊάνθρακα



Γαιάνθρακας (coal)

Πηλίκo αποθεμάτων προς παραγωγή (R/P reserves to production ratio)



Τα παγκόσμια βεβαιωμένα αποθέματα στο τέλος του 2020 εκτιμώνται σε $1074 \cdot 10^9$ t

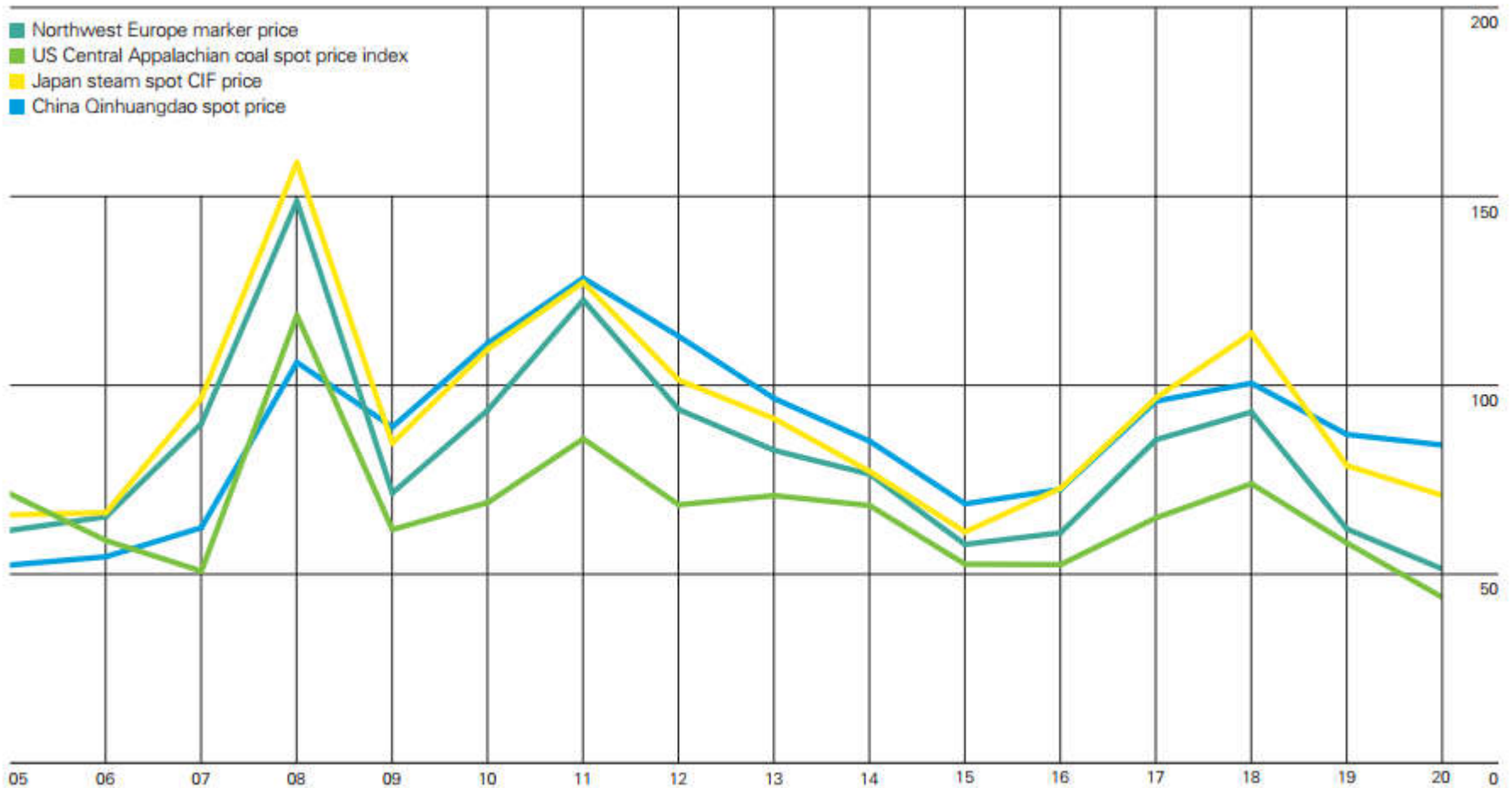
Η παγκόσμια παραγωγή το 2020 ήταν $7.7 \cdot 10^9$ t

Άρα $R/P \approx 140$ έτη

Πηγή: *BP-Statistical Review of World Energy 2021*

Γαιάνθρακας (coal)

Χρονική εξέλιξη τιμών (US\$ per tone)

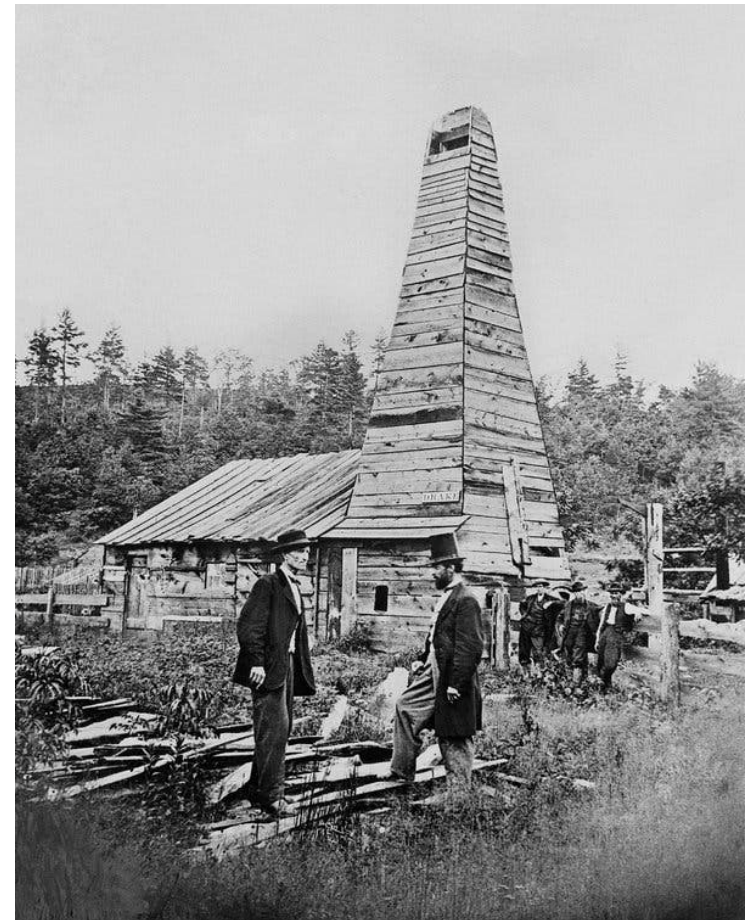


Πηγή: *BP-Statistical Review of World Energy 2021*

Πετρέλαιο (Petroleum)

Πετρέλαιο (Petroleum) ονομάζεται μια μεγάλη ποικιλία υδρογονανθράκων που περιλαμβάνει το πετρέλαιο, την πίσσα και την παραφίνη.

- Σχηματίστηκε από θαλάσσια φυτά που θάφτηκαν σε αποθέσεις ιζημάτων ειδικότερα σε λιμναίους βράχους που σχηματίστηκαν μέσα σε λίμνες και υδροτόπους.
- Οι σχηματισμοί στους οποίους βρίσκεται πετρέλαιο είναι παλαιότεροι από αυτούς του άνθρακα (ο παλαιότερος ανήκει στην Προκάμβρια εποχή $1 \cdot 10^9$ έτη πριν).
- Το πετρέλαιο είναι γνωστό από την αρχαιότητα (νάφθα) όταν ανέβλυζε επιφανειακά σε θέσεις της Κεντρικής Ασίας. Η ασφαλτος χρησιμοποιείται από πολύ παλιά ως στεγανωτικό, ενώ αργότερα επιφανειακά κοιτάσματα πετρελαίου χρησιμοποιήθηκαν ως καύσιμο.
- Η πρώτη συστηματική εκμετάλλευση κοιτασμάτων πετρελαίου έγινε στην Πενσυλβανία των ΗΠΑ το 1859 από τον Edwin Drake. Σήμερα είναι κατανομημένη σε όλες τις περιοχές του πλανήτη και ειδικότερα στις ηπειρωτικές περιοχές που κάποτε ήταν ωκεανοί. Εξορύσσεται ως αργό (crude) και μεταφέρεται σε διυλιστήρια για την παραγωγή πολλών προϊόντων αλλά κυρίως πετρελαίου (gasoline, petrol), βενζίνης και diesel.



Πετρέλαιο (Petroleum)

Σχηματισμός πετρελαίου και φυσικού αερίου



Μικρά θαλάσσια φυτά και ζώα θάφτηκαν στο πυθμένα των ωκεανών. Σταδιακά καλύφθηκαν από στρώματα λάσπης και άμμου



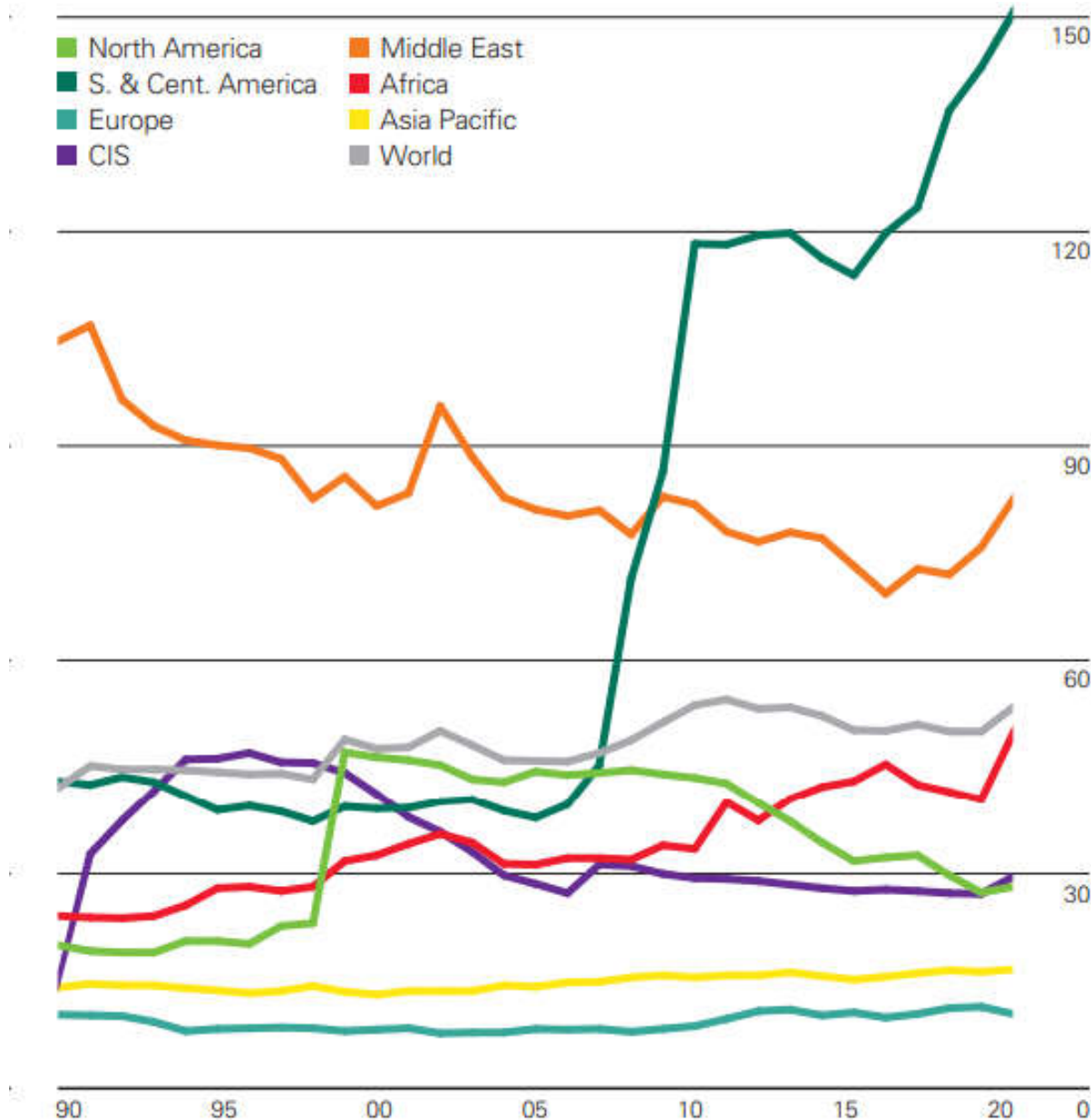
Με την πάροδο εκατομμυρίων ετών τα υπολείμματα θάβονται βαθύτερα. Η μεγάλη θερμότητα και πίεση τα μετέτρεψε σε πετρέλαιο και αέριο



Σήμερα οι γεωτρήσεις γίνονται διαμέσου στρωμάτων άμμου, λάσπης και βράχων για να φτάσουν στους βραχώδεις σχηματισμούς που περιέχουν πετρέλαιο και αέριο

Πετρέλαιο (Petroleum)

Πηλίκo αποθεμάτων προς παραγωγή (R/P reserves to production ratio)



Τα παγκόσμια βεβαιωμένα αποθέματα στο τέλος του 2020 εκτιμώνται σε $1732 \cdot 10^9$ barrels

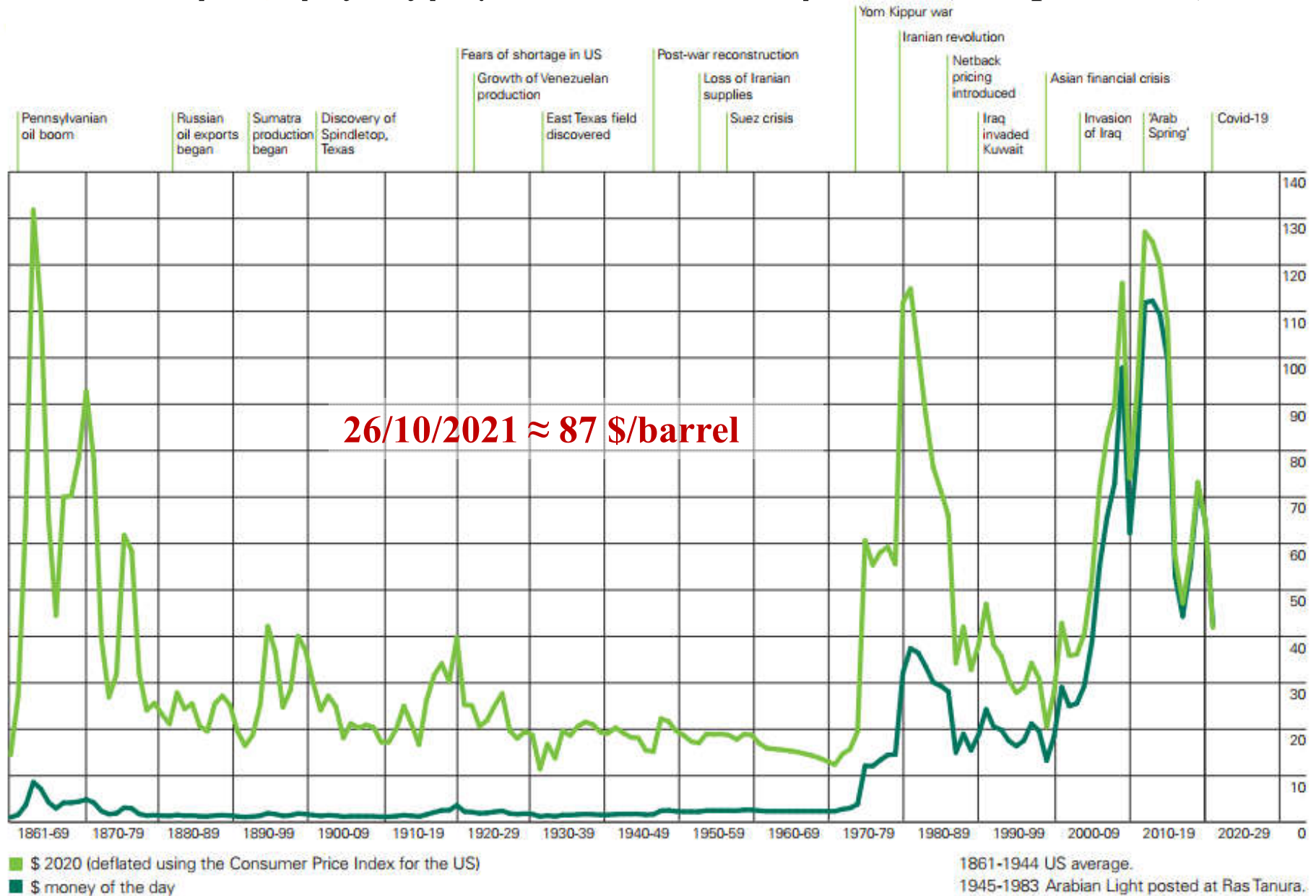
Η παγκόσμια παραγωγή το 2020 ήταν $88391 \cdot 10^3$ barrels/day $\approx 32.3 \cdot 10^9$ B/year

Άρα **R/P ≈ 54 έτη**

Πηγή: BP-Statistical Review of World Energy 2021

Πετρέλαιο (Petroleum)

Χρονική εξέλιξη τιμών αδιύλιστου πετρελαίου (US\$ per barrel)



Πηγή: *BP-Statistical Review of World Energy 2021*

Πετρέλαιο (Petroleum)

Το αρχικό πετρέλαιο που αντλείται περιέχει μίγμα υδρογονανθράκων, λάσπη και διάφορες άλλες προσμίξεις (π.χ θείο). Αυτά καθορίζουν την ποιότητά και το όνομά του.

1 βαρέλι (159 L) αργού πετρελαίου παράγει:

- Βενζίνη 43%
- Απόσταγμα πετρελαίου 21,5%
- Διάφορα κατάλοιπα 11,5%
- Καύσιμα αεροπλάνων 7%
- Πρώτες ύλες για καθαριστικά 5%
- Υπόλοιπα (φυσικό αέριο, άσφαλτος, κοκ , υγραέριο, κηροζίνη, λιπαντικά) 12%

Η τιμή 1 λίτρου βενζίνης στο πρατήριο περιλαμβάνει:

- Πρώτη ύλη: 39%
- Έξοδα Διύλισης: 1%
- Φόροι: 49%
- Εμπορικό κέρδος: 11%

Φυσικό αέριο (Natural gas-NG)

Το **φυσικό αέριο (natural gas-NG)** είναι μείγμα υδρογονανθράκων και άλλων αερίων και αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (85-95%). Η σύστασή του διαφέρει στα διάφορα κοιτάσματα.

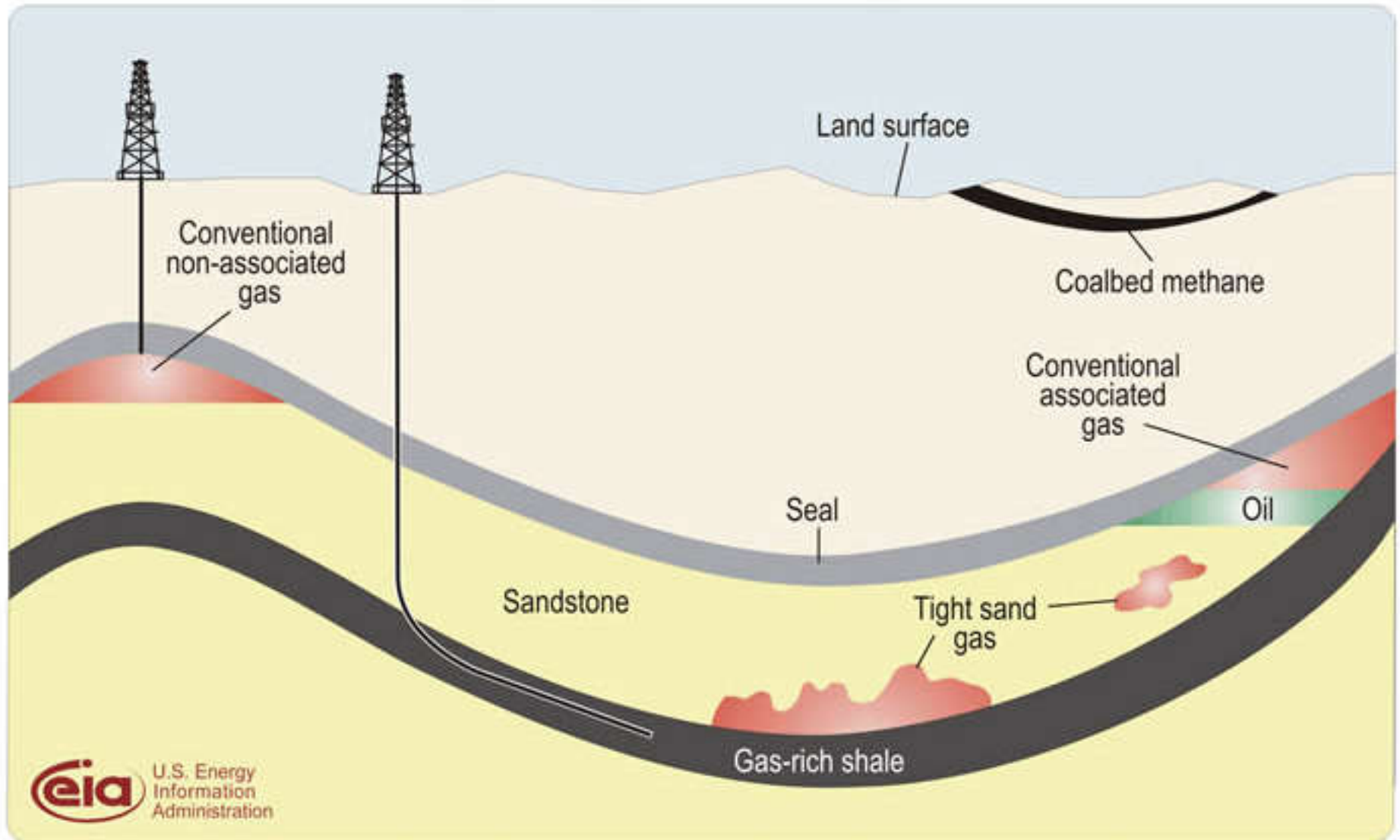
Το φυσικό αέριο βρίσκεται:

- (α) στο πάνω μέρος κοιτασμάτων πετρελαίου,
- (β) διαλυμένο μέσα στο πετρέλαιο και
- (γ) σε πολύ βαθιές αποθέσεις ανεξάρτητα από κοιτάσματα του πετρελαίου.

- Τα τελευταία προέρχονται από οργανικό υλικό συνήθως άνθρακα μετά από θερμική αποσύνθεση και φυσική αεριοποίηση του, στα βαθύτερα στρώματα όπου η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη.
- Τα πρώτα χρόνια εκμετάλλευσης του πετρελαίου η θερμική αξία του ‘συνοδεύοντος’ αερίου δεν αξιοποιήθηκε εμπορικά.
- Η βιομηχανική επεξεργασία του άνθρακα δίνει αέριο που χρησιμοποιείται όπως και το φυσικό σε διάφορες εφαρμογές.
- Το φυσικό αέριο πολλές φορές υγροποιείται σε **LNG (Liquified Natural Gas)** για ευκολία στην αποθήκευση και μεταφορά

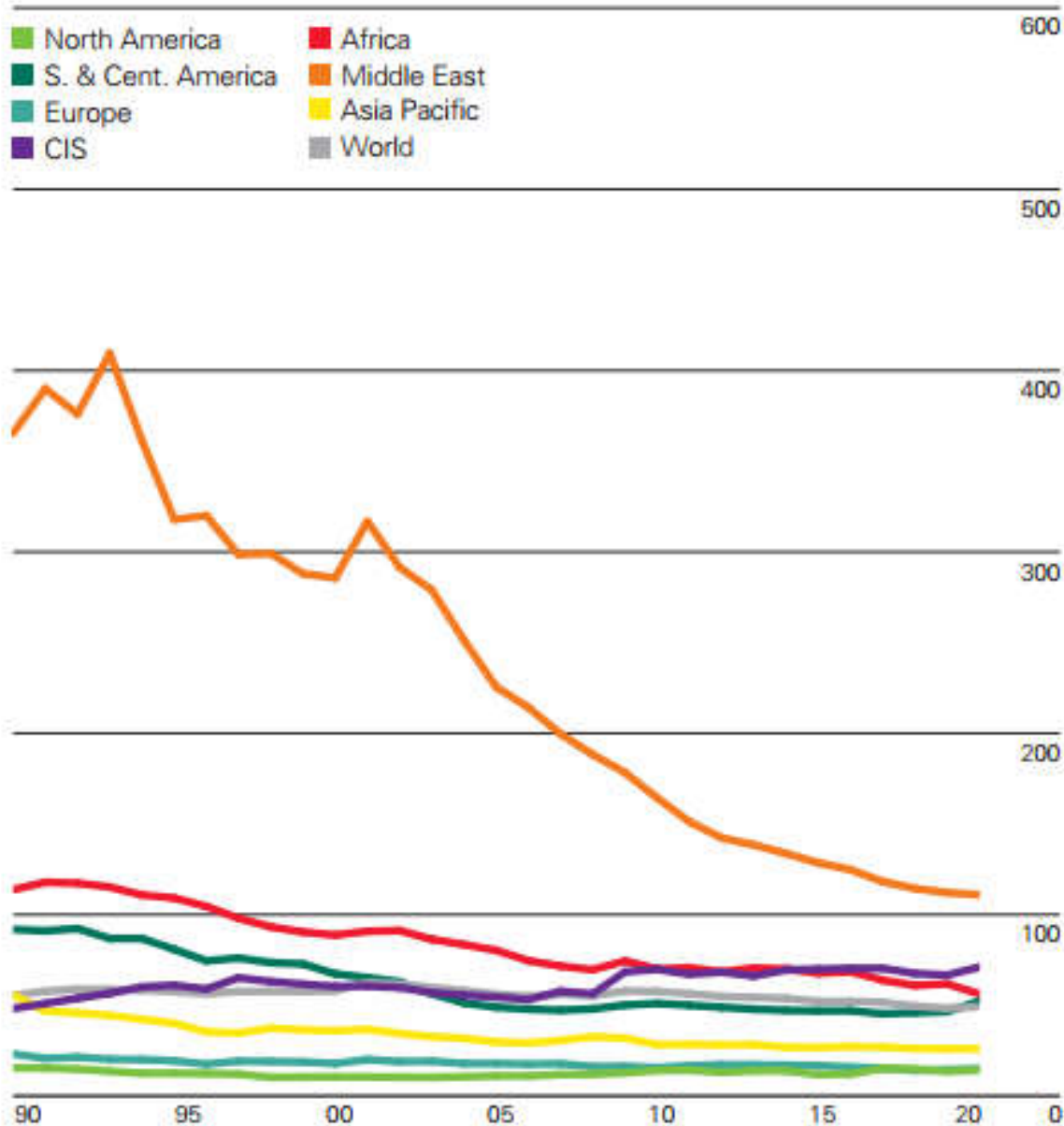
Φυσικό αέριο (natural gas-NG)

Σχηματισμός πετρελαίου και φυσικού αερίου



Φυσικό αέριο (Natural gas-NG)

Πηλίκιο αποθεμάτων προς παραγωγή (R/P reserves to production ratio)



Τα παγκόσμια βεβαιωμένα αποθέματα στο τέλος του 2020 εκτιμώνται σε $188.1 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$

Η παγκόσμια κατανάλωση το 2020 ήταν $3.8 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$

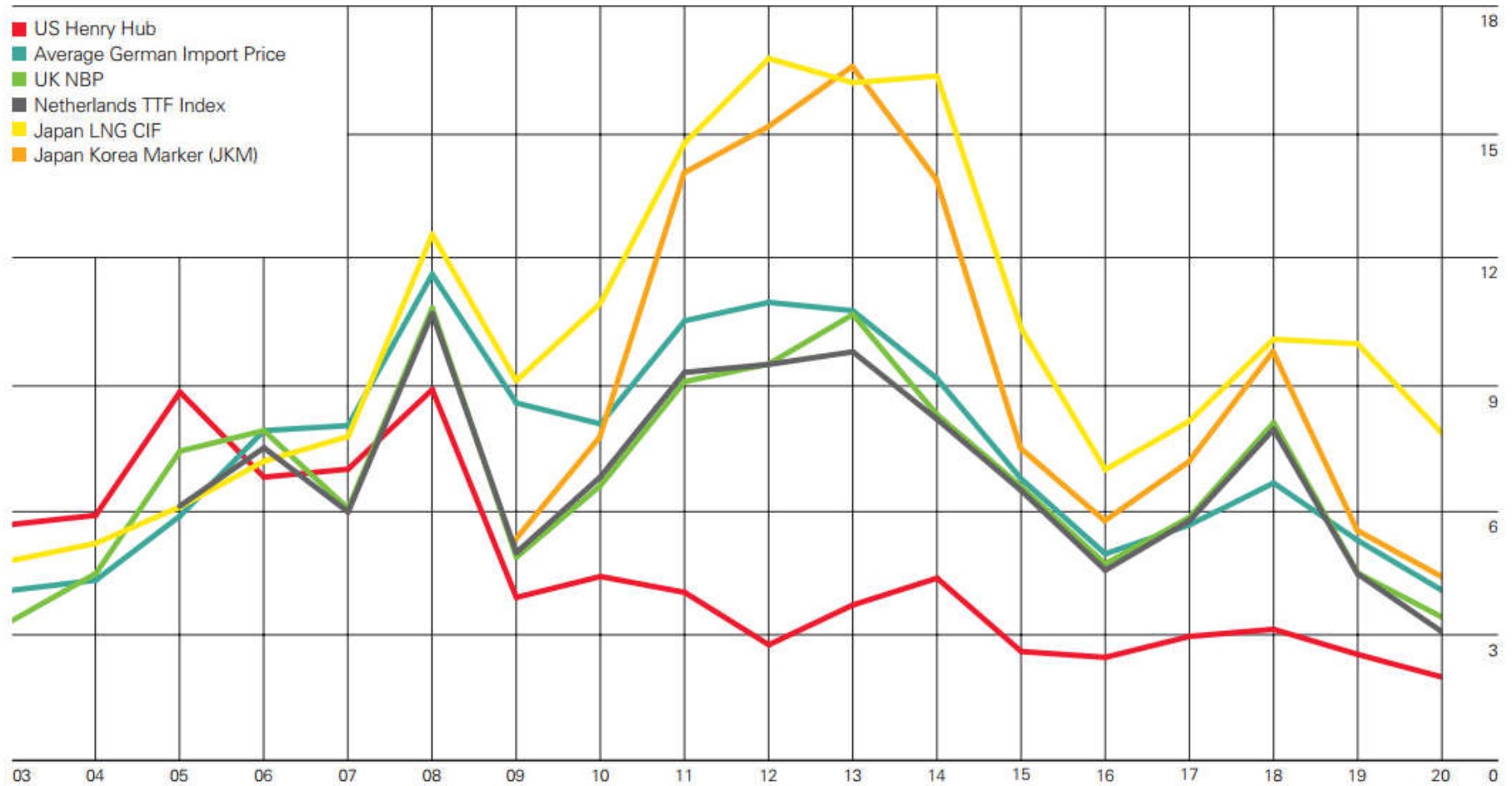
Άρα $R/P \approx 50$ έτη

Πηγή: *BP-Statistical Review of World Energy 2021*

Φυσικό αέριο (Natural gas-NG)

Χρονική εξέλιξη τιμών (US\$ per mmBTU)

1 metric million British Thermal Unit \approx 0.293 MWh



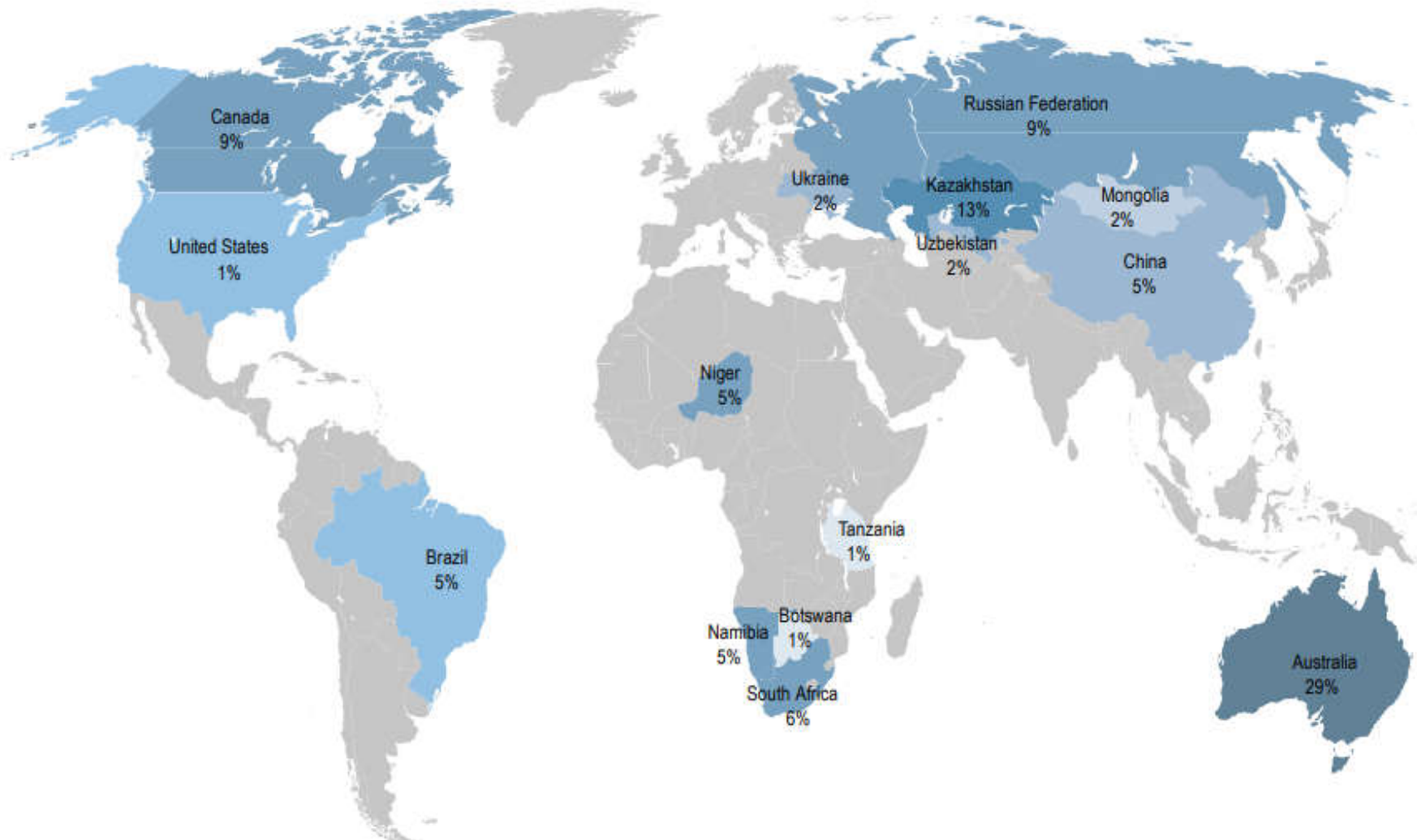
Πηγή: BP-Statistical Review of World Energy 2021

Ουράνιο (Uranium)

- Το **φυσικό ουράνιο** βρίσκεται σε πυριγενή πετρώματα και ειδικότερα στο γρανίτη.
- Η σχάση ενός κιλού φυσικού ουρανίου 235 παράγει ενέργεια 500-650 GJ και ισοδυναμεί με 12-15.5 toe.
- Το 2015 437 πυρηνικοί αντιδραστήρες ήταν συνδεδεμένοι στο ηλεκτρικό δίκτυο με συνολική ισχύ 377 GW και παρήγαγαν 2576 TWh (μέσος συντελεστής δυναμικότητας 83.5%).
- Το 2015 η απαιτούμενη ετήσια ποσότητα ουρανίου ήταν 56600 t και με βάση την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια προκύπτουν 46 MWh/kg
- Το 2015 τα βεβαιωμένα αποθέματα με κόστος εξόρυξης <260 \$/kg εκτιμήθηκαν σε 7.641.600 τόνους, ενώ με κόστος εξόρυξης <130 \$/kg σε 5.718.400 τόνους
- Με βάση τα παραπάνω το R/P εκτιμάται σε 135 έως 101 έτη
- Η Αυστραλία, το Καζακστάν, ο Καναδάς και η Ρωσία έχουν το 60% των βεβαιωμένων αποθεμάτων ουρανίου με κόστος εξόρυξης <130 \$/kg

Ουράνιο (Uranium)

Κατανομή αποθεμάτων το 2015 (<130 USD/kg)

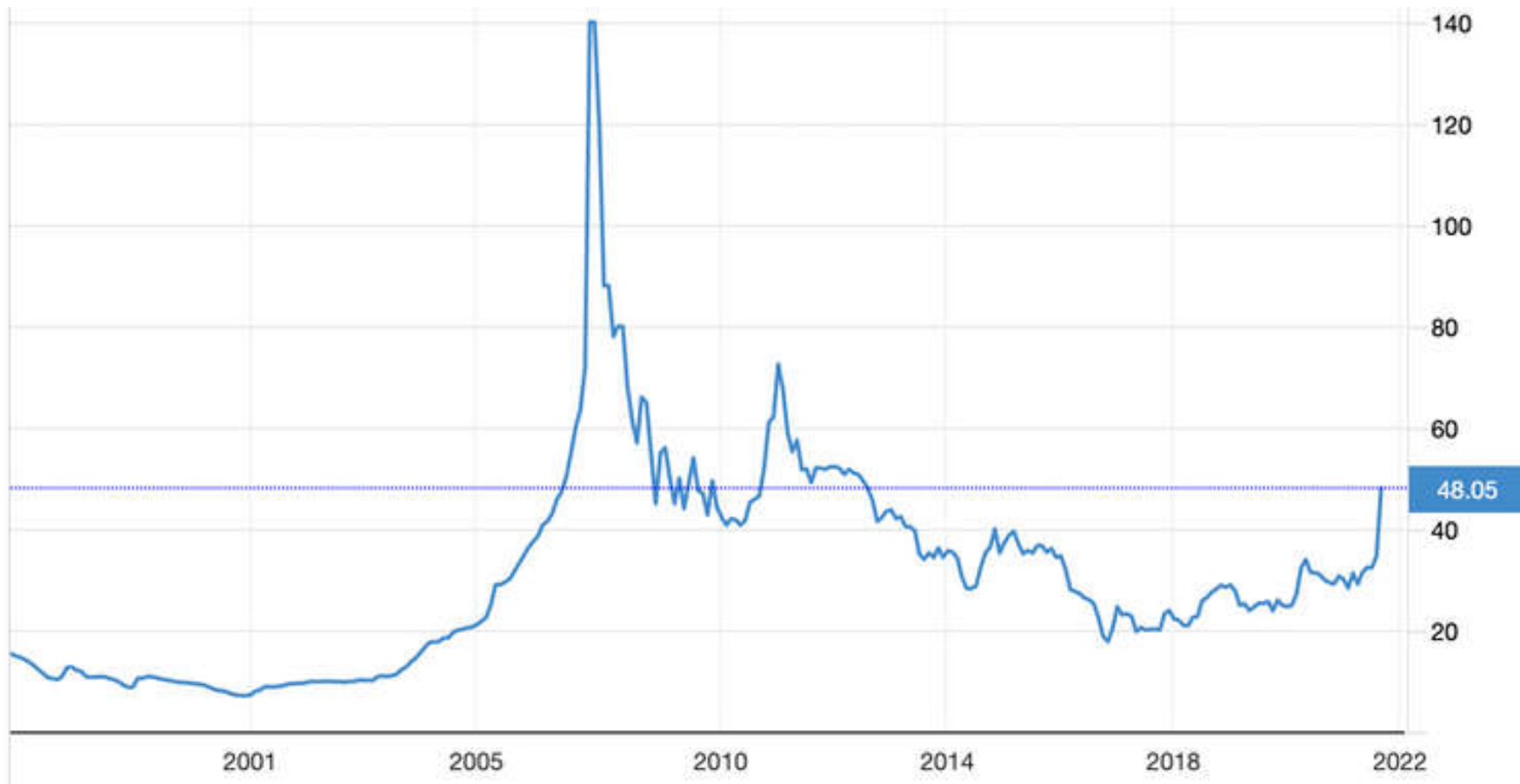


Πηγή: Uranium 2016: Resources, Production and Demand, A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency

Ουράνιο (Uranium)

Χρονική εξέλιξη τιμών (US\$ per pound)

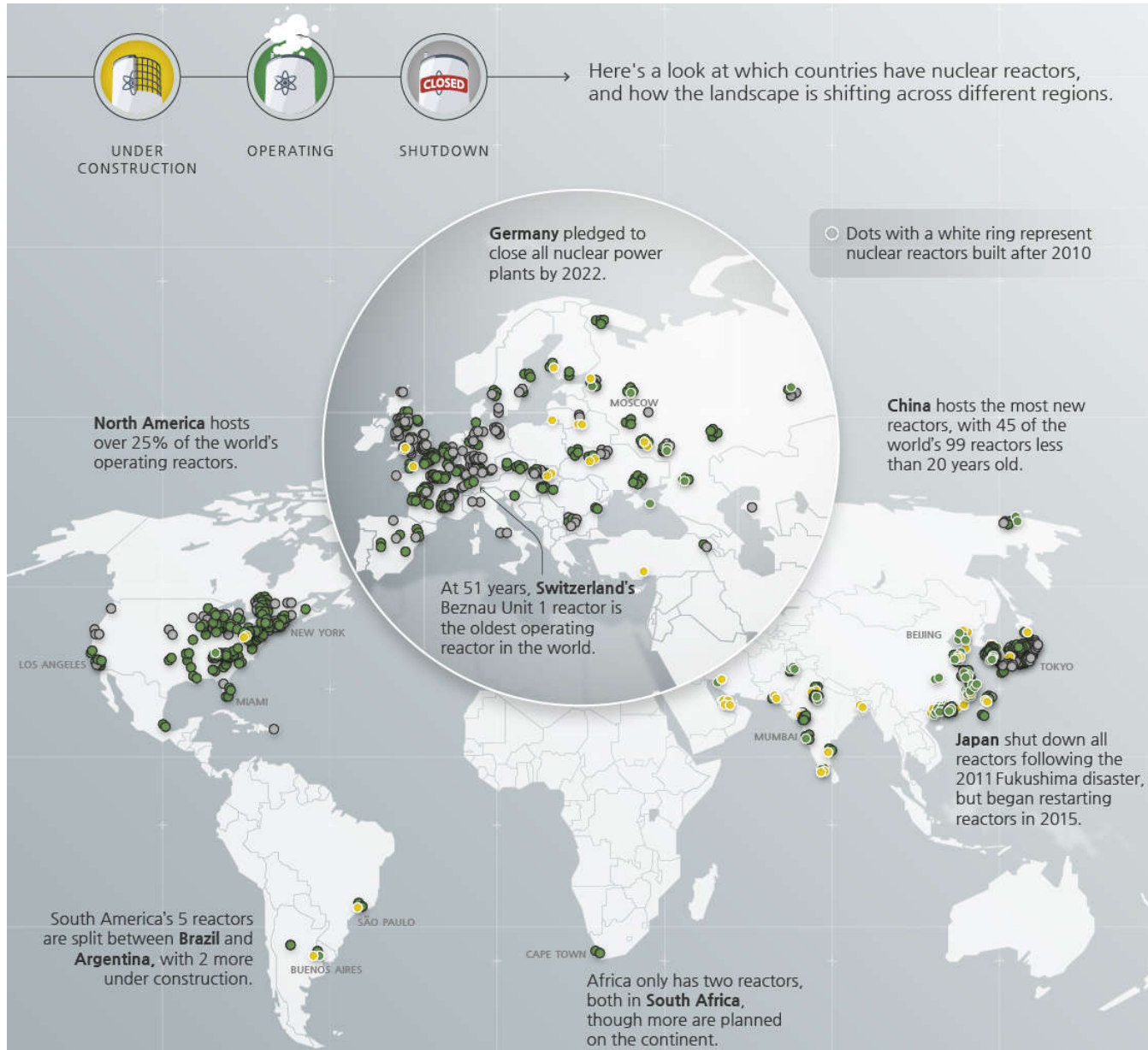
1 pound = 0.453 kg



Πηγή: <https://www.intellinews.com/uranium-what-the-explosion-in-prices-means-for-the-nuclear-industry-221994/?source=kazakhstan>

Ουράνιο (Uranium)

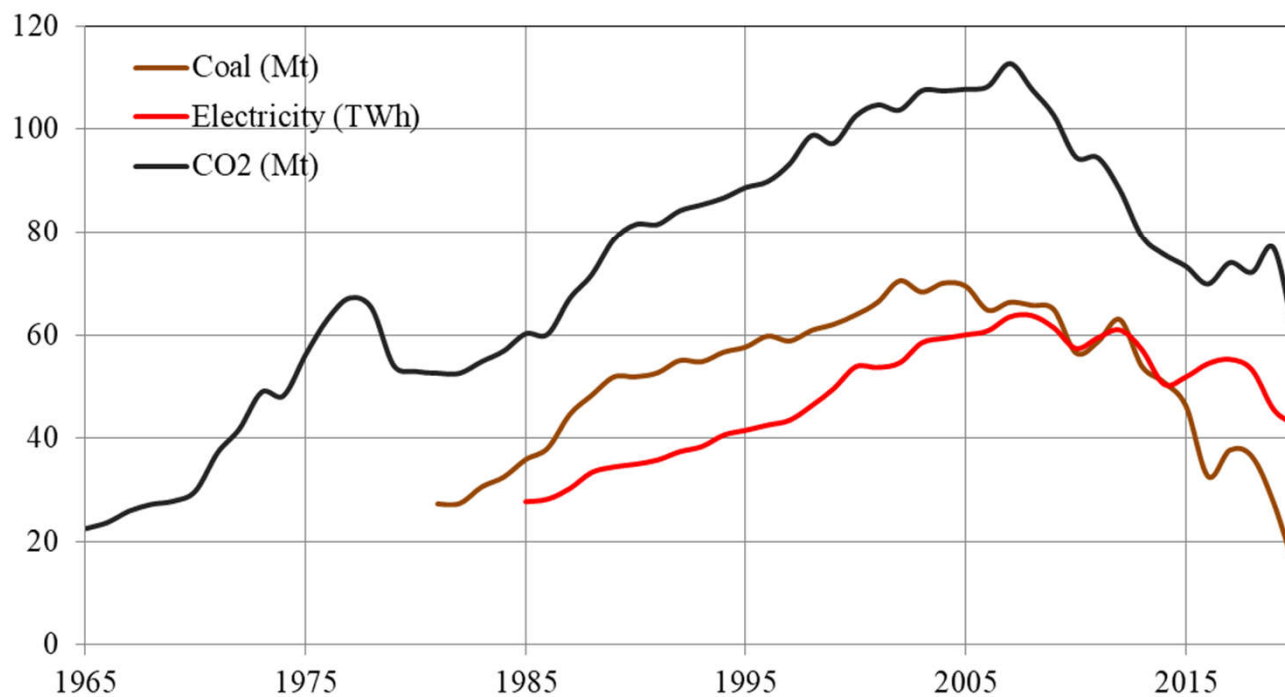
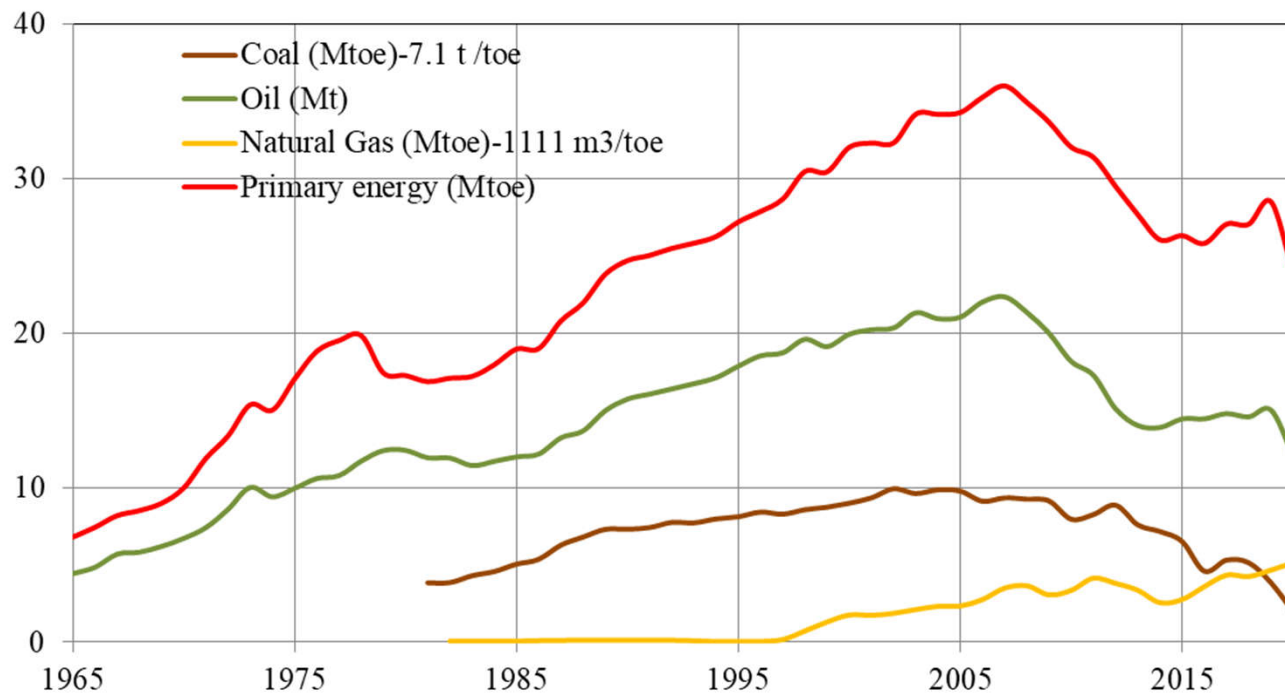
Πυρηνικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (2020)



Πηγή: <https://www.visualcapitalist.com/mapped-the-worlds-nuclear-reactor-landscape/>

Ελλάδα

Χρονική εξέλιξη ενεργειακών μεγεθών



Επεξεργασία με βάση τα
δεδομένα της έκθεσης BP-
Statistical Review of World
Energy 2021

Ελλάδα

Αποθέματα λιγνίτη

Τα συνολικά βεβαιωμένα γεωλογικά αποθέματα λιγνίτη στη χώρα ανέρχονται σε περίπου **$5 \cdot 10^9$ τόνους**. Τα κοιτάσματα παρουσιάζουν μεγάλη γεωγραφική εξάπλωση στον ελληνικό χώρο.

Με τα σημερινά τεχνικά και οικονομικά δεδομένα τα κοιτάσματα που είναι κατάλληλα για ενεργειακή εκμετάλλευση, ανέρχονται σε περίπου **$3.2 \cdot 10^9$ τόνους** και ισοδυναμούν με **$450 \cdot 10^6$ toe**.

Τα κυριότερα εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα λιγνίτη βρίσκονται στις περιοχές

- Πτολεμαΐδας, Αμυνταίου και Φλώρινας (εκτιμώμενο απόθεμα $1.8 \cdot 10^9$ τόνοι)
- Δράμας (εκτιμώμενο απόθεμα $900 \cdot 10^6$ τόνοι)
- Ελασσόνας με εκτιμώμενο απόθεμα $169 \cdot 10^6$ τόνοι)
- Μεγαλόπολης (εκτιμώμενο απόθεμα $223 \cdot 10^6$ τόνοι)

Εκτιμάται ότι τα αποθέματα αυτά επαρκούν για περισσότερο από **45 έτη**, ενώ μέχρι σήμερα οι εξορυχθείσες ποσότητες φτάνουν περίπου στο 29% των συνολικών αποθεμάτων.

Ακόμη η Ελλάδα διαθέτει και ένα μεγάλο κοιτάσμα τύρφης στην περιοχή των Φιλιππων (Ανατολική Μακεδονία). Τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα εκτιμώνται σε **$4 \cdot 10^9$ m³** και ισοδυναμούν περίπου με **125 toe**.

Η ποιότητα των ελληνικών λιγνιτών είναι χαμηλή. Η θερμογόνο δύναμη κυμαίνεται από

1.1 - 1.6 kWh/kg στις περιοχές Μεγαλόπολης, Αμυνταίου και Δράμας, από

1.5 - 1.9 kWh /kg στην περιοχή Πτολεμαΐδας και

2.2 - 2.6 kWh στις περιοχές Φλώρινας και Ελασσόνας.

Σημαντικό συγκριτικό πλεονέκτημα των λιγνιτών της χώρας μας είναι η χαμηλή περιεκτικότητα σε καύσιμο θείο.

Πηγή: ΔΕΗ, <https://www.dei.gr/el/oruxeia/apothemata-kai-poiotita>

Ελλάδα

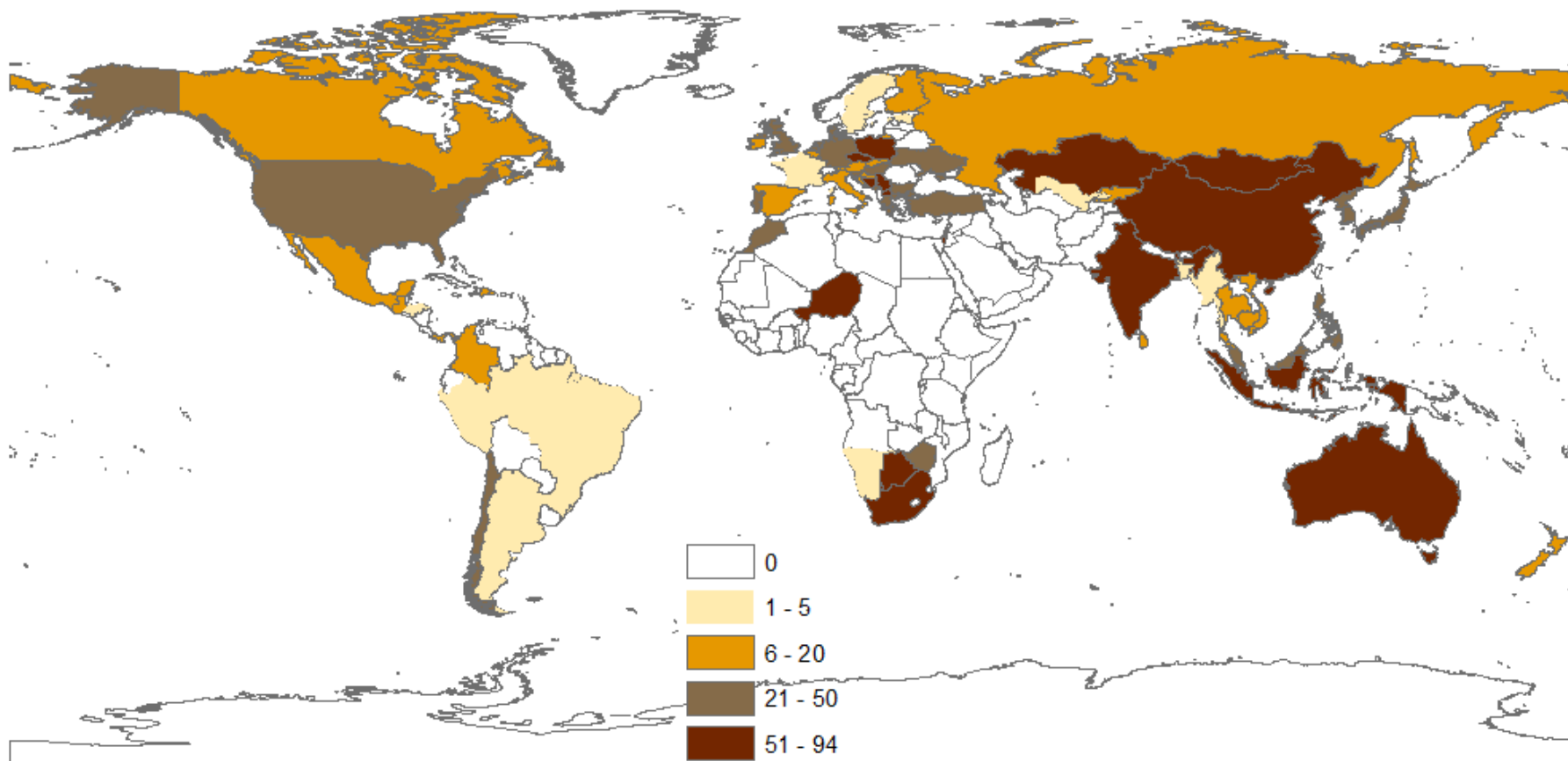
Αποθέματα πετρελαίου

Κοίτασμα Πρίνου

- Στα μέσα της δεκαετίας του 1980 η παραγωγή έφτανε ακόμη και τα 11.000.000 βαρέλια το έτος
- Συνολικά η παραγωγή από το 1981, έχει ανέλθει στα 120.000.000 βαρέλια
- Τα συνολικά απολήψιμα αποθέματα εκτιμώνται σε 19.000.000 βαρέλια.
- Η παραγωγή του Πρίνου τα έτη 2018 και 2020 ήταν περίπου 1.500.000 και 660.000 βαρέλια αντίστοιχα
- Το κόστος παραγωγής φτάνει στα 60 δολάρια το βαρέλι μετά τις αποσβέσεις
- Η κατανάλωση πετρελαίου στην Ελλάδα το 2020 ήταν $12 \cdot 10^6$ t (περίπου 88.000.000 βαρέλια)

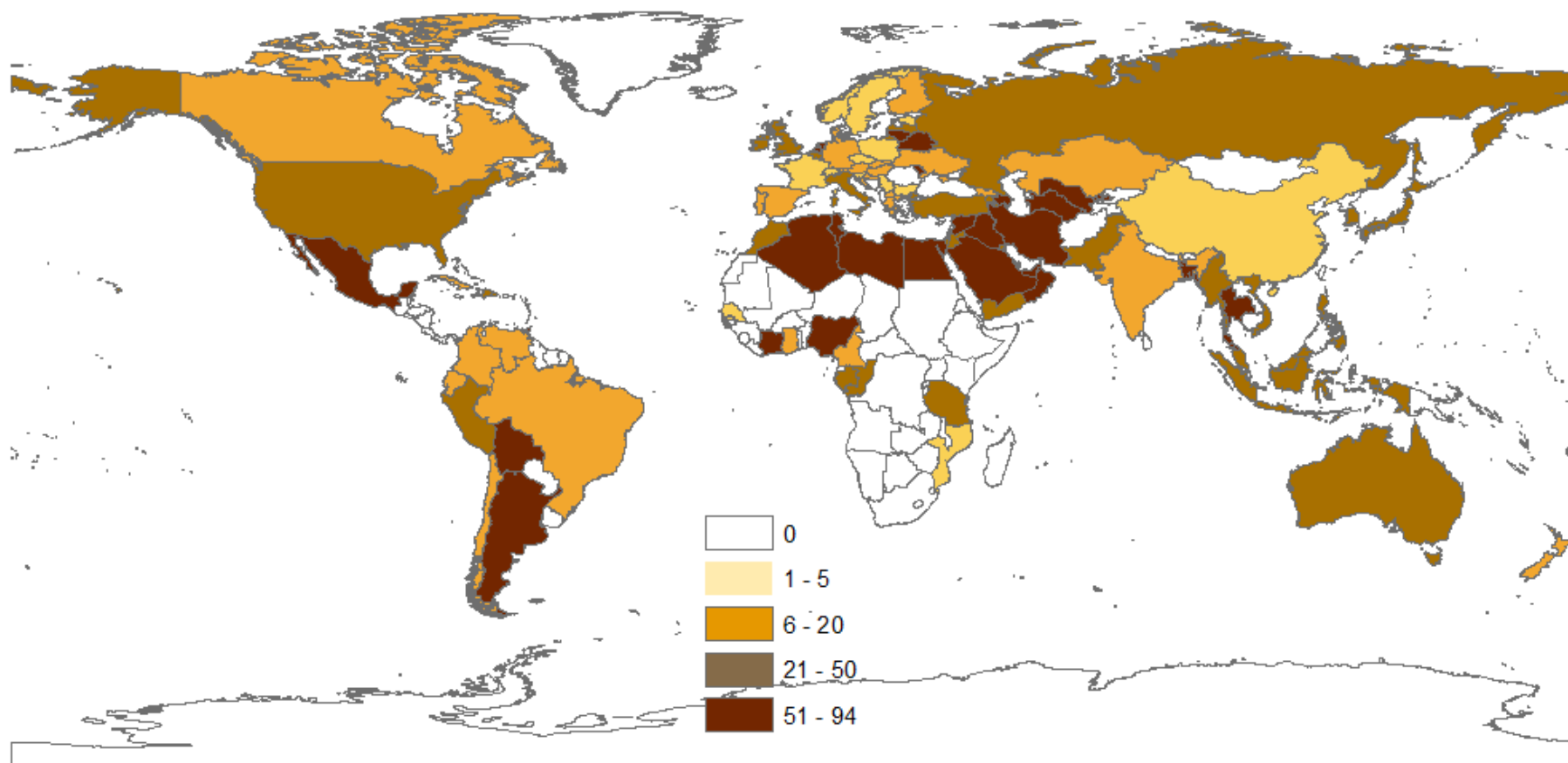
Συμμετοχή στην ηλεκτροπαραγωγή το 2013 (%)

Άνθρακας



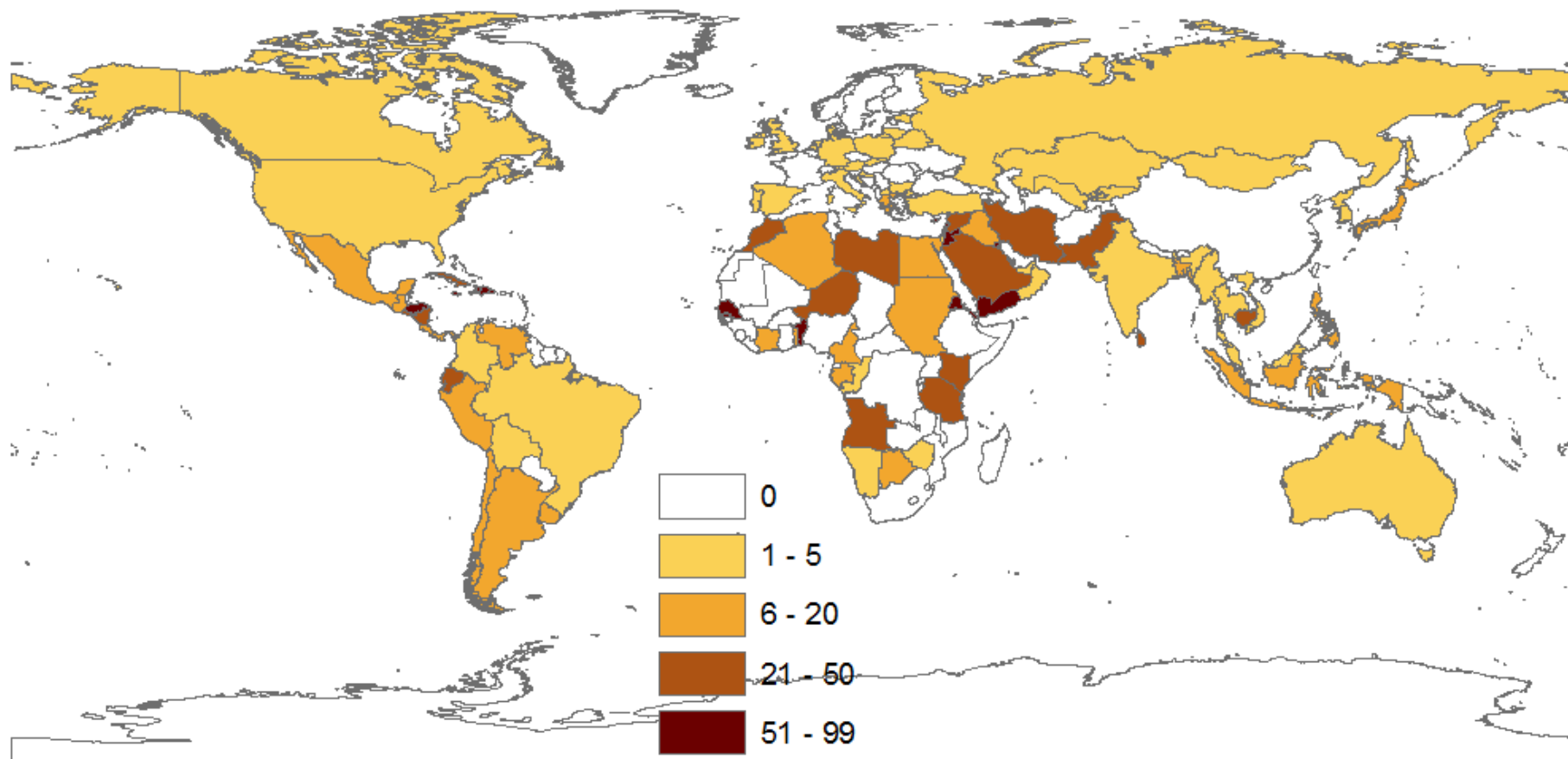
Συμμετοχή στην ηλεκτροπαραγωγή το 2013 (%)

Φυσικό αέριο



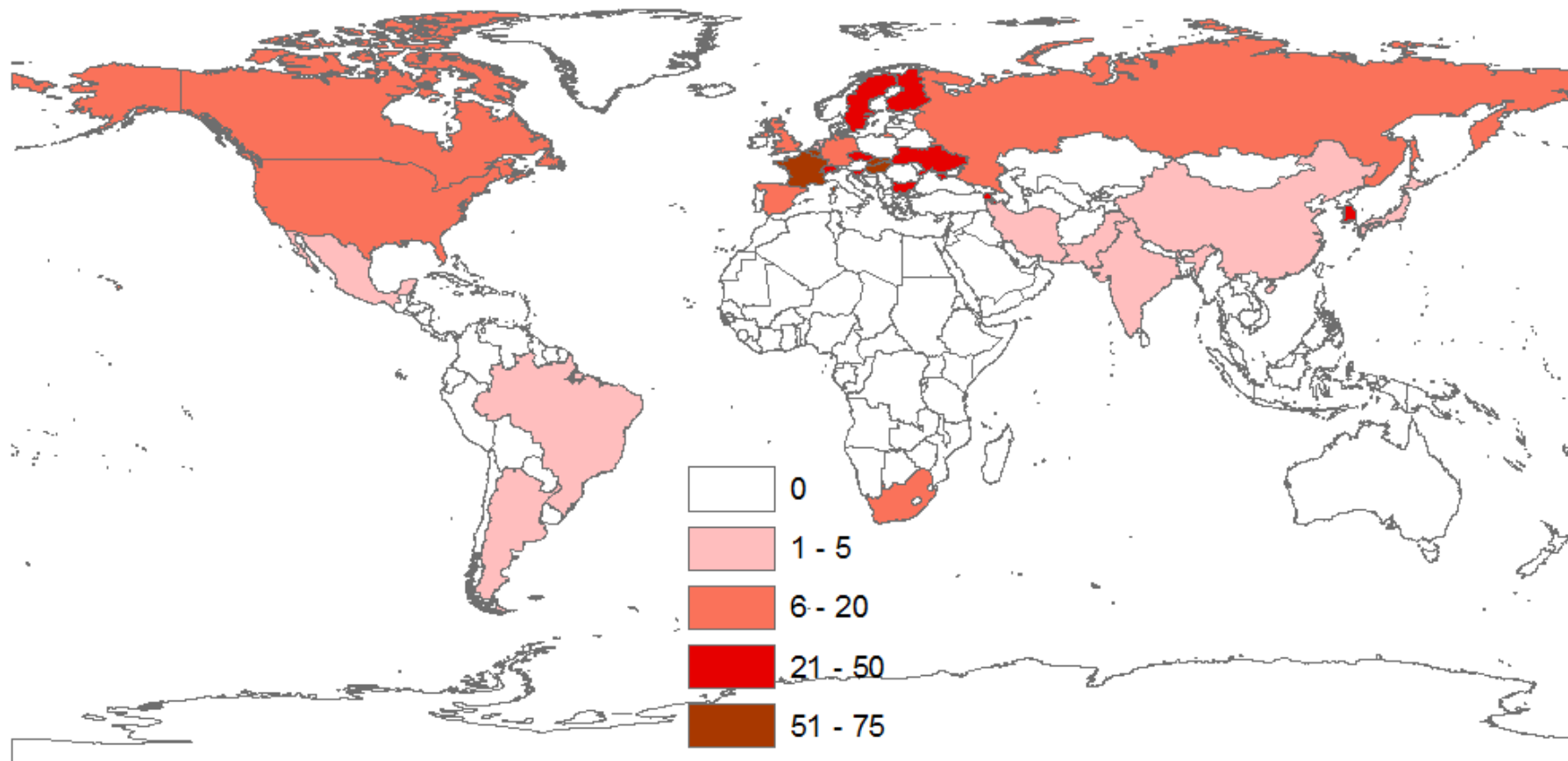
Συμμετοχή στην ηλεκτροπαραγωγή το 2013 (%)

Πετρέλαιο



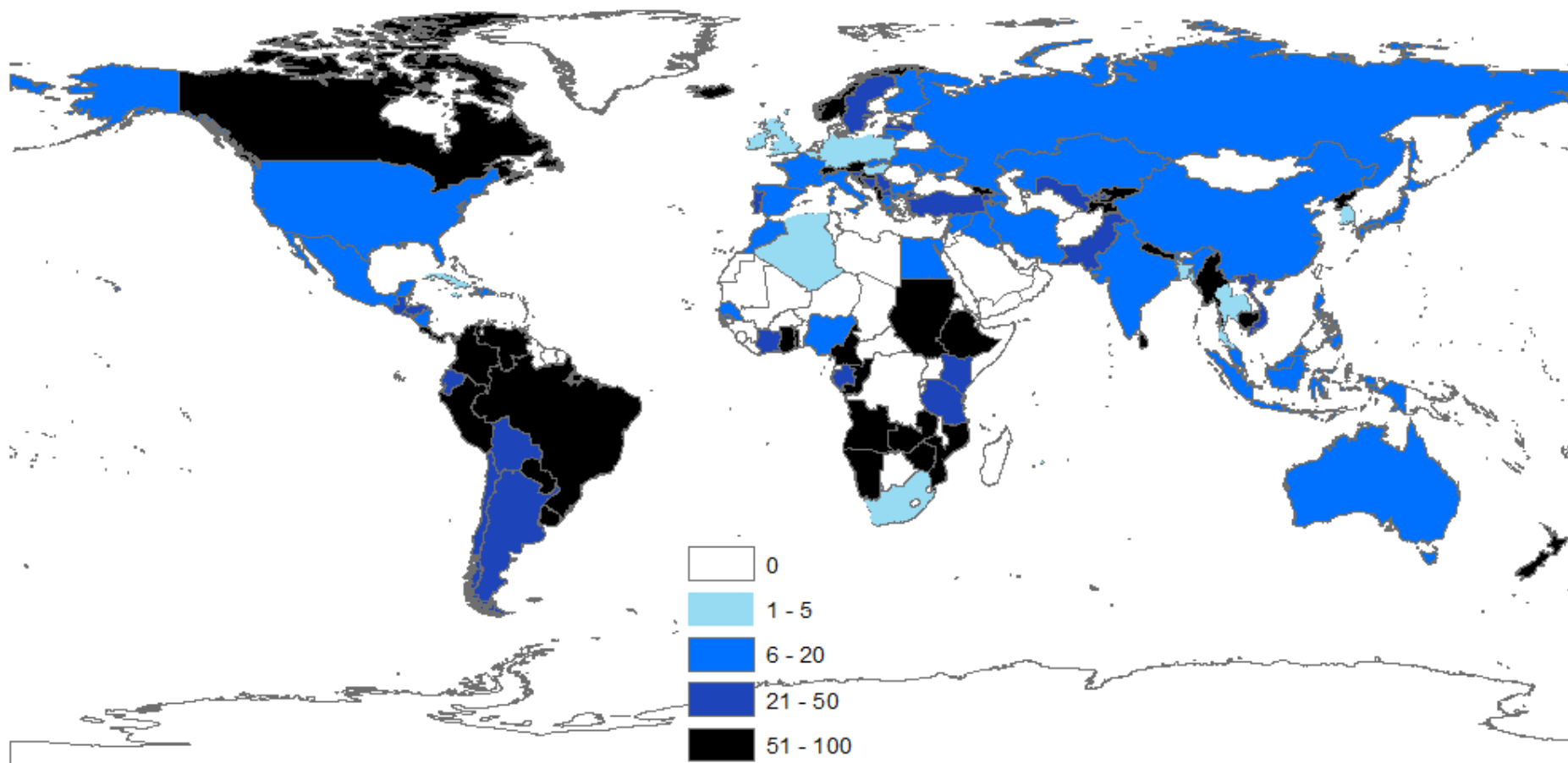
Συμμετοχή στην ηλεκτροπαραγωγή το 2013 (%)

Πυρηνικά



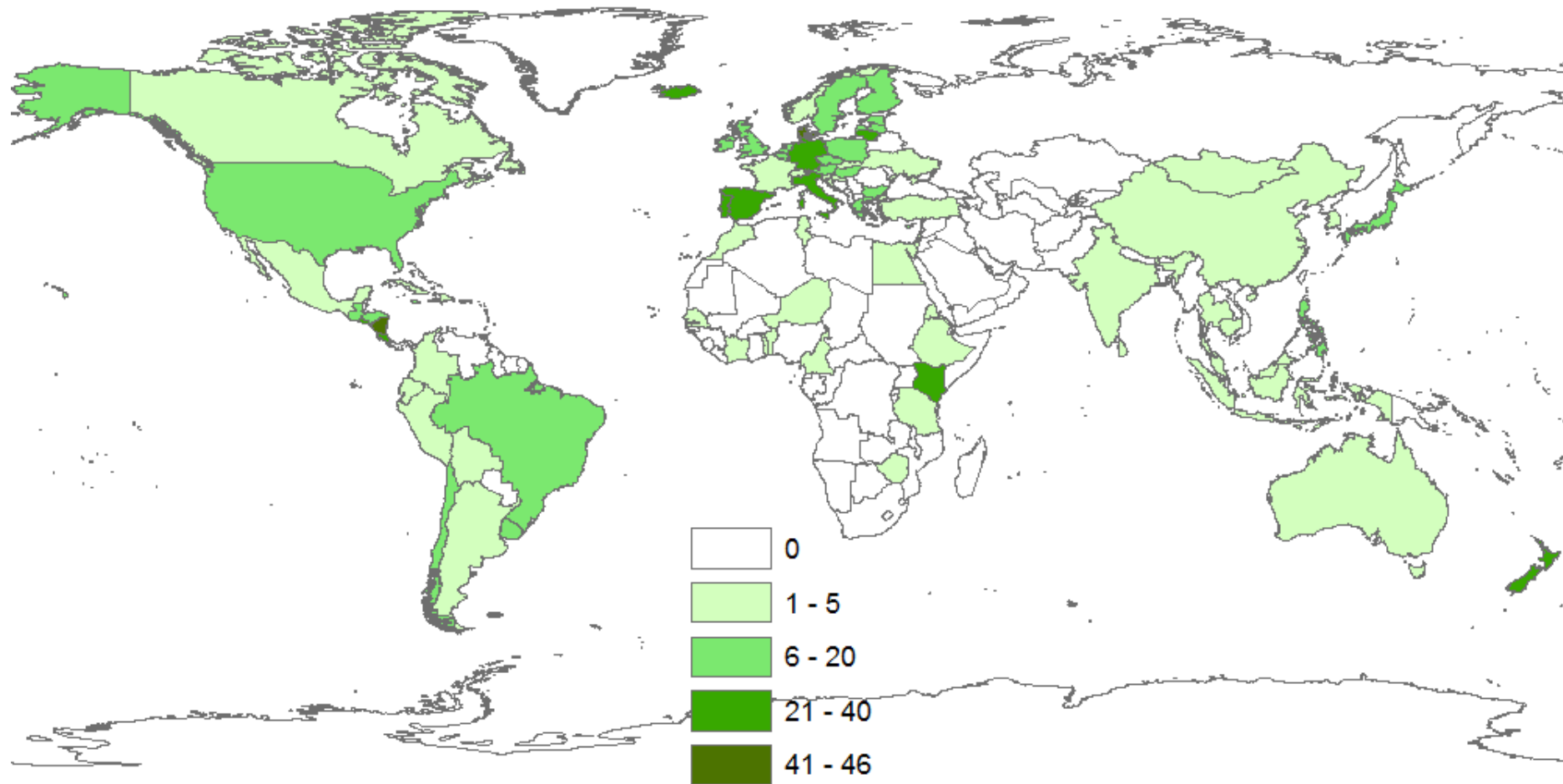
Συμμετοχή στην ηλεκτροπαραγωγή το 2013 (%)

Υδροηλεκτρικά



Συμμετοχή στην ηλεκτροπαραγωγή το 2013 (%)

Ανανεώσιμες



Εφαρμογή

Θερμοηλεκτρικός σταθμός ισχύος **500 MW** καίει λιγνίτη με θερμογόνο δύναμη **8 MJ/kg** και περιεκτικότητα σε άνθρακα, θείο και τέφρα **15, 0.5 και 5%** αντίστοιχα. Η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται στο **65%** της δυναμικότητας του σταθμού, ενώ ο συντελεστής απόδοσης είναι **36%**.

Να υπολογιστούν:

- (1) η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας,
- (2) η ετήσια κατανάλωση λιγνίτη,
- (3) οι εκπομπές CO_2 σε kg/MWh ηλεκτρικής ενέργειας, και
- (4) οι εκπομπές SO_2 και τέφρας και να συγκριθούν με τις επιτρεπόμενες τιμές που είναι 1350 και 3300 g/GJ αντίστοιχα.

Τα μοριακά βάρη C, S και O είναι 12, 32 και 16 αντίστοιχα. Θεωρείστε ότι όλος ο άνθρακας και το θείο που περιέχονται στο καύσιμο μετατρέπονται σε CO_2 και SO_2 αντίστοιχα.

Λύση

(1) Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας:

$$65\% * 500 \text{ MW} * 8.760 \text{ hr} = 2.847 \text{ GWh}$$

(2) Ετήσια κατανάλωση λιγνίτη

Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (GJ):

$$2.847 \text{ GWh} * 3600 = 10.249.200 \text{ GJ}$$

Συνολική ενέργεια καύσης λιγνίτη (GJ):

$$10.249.200 \text{ GJ} / 0.36 = 28.470.000 \text{ GJ}$$

Απαιτούμενοι τόνοι λιγνίτη:

$$28.470.000 \text{ GJ} / (8 \text{ GJ/tn}) = 3.558.750 \text{ tn}$$

Λύση (συνέχεια)

(3) Εκπομπές CO₂ σε kg/MWh ηλεκτρικής ενέργειας

Ποσότητα άνθρακα: $3.558.750 \text{ tn} * 15\% = 533.812,5 \text{ tn C}$

Από την εξίσωση καύσης του άνθρακα ($\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$) έχουμε:
 $12 + 2(16) = 44$ άρα 12 kg άνθρακα παράγουν 44 kg CO₂

Ποσότητα CO₂: $533.812,5 \text{ tn C} * (44/12) = 1.957.312,5 \text{ tn}$

Εκπομπές για ηλεκτρική ενέργεια:

$1.957.312,5 \text{ tn} / 2.847 \text{ GWh} = 687.5 \text{ tn/GWh}$ ή 687.5 kg/MWh

(4) Εκπομπές SO₂ και τέφρας

Ποσότητα θείου: $3.558.750 \text{ tn} * 0,5\% = 17.793,75 \text{ tn S}$

Ποσότητα τέφρας: $3.558.750 \text{ tn} * 5\% = 177.937,5 \text{ tn τέφρας}$

Από την εξίσωση καύσης του θείου ($\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$) έχουμε:
 $32 + 2(16) = 64$ άρα 32 kg θείου παράγουν 64 kg SO₂

Ποσότητα SO₂: $17.793,5 \text{ tn S} * (64/32) = 35587,5 \text{ tn}$

Εκπομπές για ηλεκτρική ενέργεια:

$35587,5 \text{ tn} / 28.470.000 \text{ GJ} = 1250 \text{ g SO}_2 / \text{GJ}$

$177.937,5 \text{ tn} / 28.470.000 \text{ GJ} = 6250 \text{ g τέφρας} / \text{GJ}$

Επιτρεπόμενες τιμές

1350 g/GJ

3300 g/GJ