

ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΔΗΜΟΣΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 20^{ΗΣ} ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2004

ΠΡΟΕΔΡΙΑ ΣΠΥΡΟΥ ΙΑΚΩΒΙΔΗ

ΕΝΕΡΓΕΙΑ

ΟΜΙΛΙΑ ΤΟΥ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΥ κ. ΛΟΥΚΑ Γ. ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ἡ ἐνέργεια εἶναι μία ἀπὸ τὶς βασικὲς ἔννοιες στὴν ἐπιστήμη. Ἡ μελέτη τῆς ὕλης καὶ ἡ κατανόηση τῶν ἀντιδράσεων καὶ φαινομένων στὴ φύση στηρίζονται σὲ μεγάλο βαθμὸ στὴν κατανόηση τοῦ ρόλου τῆς ἐνέργειας. Ἡ φυσικὴ ἐπιστήμη μελετᾷ τὶς διάφορες μορφὲς τῆς ἐνέργειας, τὴ μετατροπὴ τῆς ἐνέργειας ἀπὸ μία μορφή σὲ ἄλλη καὶ τὴ μεταφορὰ τῆς ἐνέργειας ἀπὸ ἓνα σύστημα σὲ ἄλλο. Ἡ φυσικὴ ἐπιστήμη, ἀκόμα, προσδιορίζει τὶς φυσικὲς ἀντιδράσεις ποὺ ἀποδεδειγμένως ἐνέργεια, εἴτε αὐτὲς εἶναι ἀντιδράσεις θερμοδυναμικὲς, εἴτε αὐτὲς εἶναι ἀντιδράσεις θερμοπυρηνικὲς. Ἡ φυσικὴ ἐπιστήμη τονίζει, ἐπίσης, ὅτι, ἐνῶ ἡ ἐνέργεια μπορεῖ νὰ μετατραπῆ ἀπὸ ἓνα εἶδος σὲ ἄλλο, ἡ ἐνέργεια δὲν μπορεῖ νὰ ἀνακυκλωθεῖ.

Οἱ μετατροπὲς τῆς ἐνέργειας ἀκολουθοῦν τὸν πρῶτο καὶ τὸ δεύτερο νόμο τῆς θερμοδυναμικῆς, τὸ νόμο τῆς διατήρησης τῆς ἐνέργειας καὶ τὸ νόμο τῆς ἐντροπίας ἀντιστοίχως. Σύμφωνα μὲ τὸν πρῶτο νόμο τῆς θερμοδυναμικῆς, ἡ ἐνέργεια ἑνὸς μεμονωμένου συστήματος διατηρεῖται σταθερὴ καὶ ἐκφράζει τὴν ἰκανότητα τοῦ συστήματος νὰ παράγει ἔργο. Σύμφωνα μὲ τὸ δεύτερο νόμο τῆς θερμοδυναμικῆς, ὅταν ἡ ἐνέργεια ἑνὸς συστήματος μετατρέπεται ἀπὸ μία μορφή σὲ ἄλλη, ἡ ἐντροπία τοῦ συστήματος αὐξάνεται καὶ ἡ ἰκανότητά του νὰ παράγει ἔργο ἐλαττώνεται. Ἔτσι, ἐνῶ ὁ πρῶτος νόμος τῆς θερμοδυναμικῆς δηλώνει ὅτι εἶναι

δυνατό να χρησιμοποιηθεί ή θερμότητα για παραγωγή έργου, ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής περιγράφει πώς αυτό μπορεί να γίνει αποδοτικά. Οί μηχανισμοί που μετατρέπουν την ενέργεια σε χρήσιμες μορφές έχουν περιορισμένες θερμοδυναμικές αποδοτικότητες (thermodynamic efficiencies), που κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 10-40%. Κατά κανόνα, λοιπόν, στις μετατροπές της πρωτογενούς ενέργειας (ενέργειας από τις πρωτογενείς πηγές) σε άλλες μορφές ενέργειας για πρακτικούς σκοπούς, οι απώλειες της πρωτογενούς ενέργειας ανέρχονται στα 60-90%.

Η φυσική επιστήμη επιτάχυνε την παραγωγή χρήσιμης ενέργειας και την τελειοποίηση των τρόπων μεταφοράς, χρήσης, αποθήκευσης και αποδοτικότητάς της. Έτσι, ενώ για εκατομμύρια χρόνια ο άνθρωπος στηριζόταν στη μυϊκή δύναμη να παράγει έργο και για χιλιάδες χρόνια στη χρήση του αέρα να κινεί καράβια και στη ροή των ποταμών να γυρίζει υδρόμυλους, στους τελευταίους τρεις αιώνες, με τη βοήθεια της επιστήμης, ο άνθρωπος κατασκεύασε μηχανές για παραγωγή έργου χρησιμοποιώντας τη θερμότητα και τον ατμό καίγοντας ξύλα και κάρβουνο, βρήκε το πετρέλαιο και το χρησιμοποίησε σαν καύσιμο για μηχανές, εντόπισε υπόγειες πηγές φυσικού αερίου για φωτισμό, θέρμανση και οικιακές χρήσεις, ανακάλυψε την ηλεκτρική ενέργεια και ασφαλείς τρόπους παραγωγής και χρήσης της, και έμαθε να παράγει ενέργεια από ούρανιουχα πετρώματα. Έτσι, αν και η παραγωγή ενέργειας για τις ανάγκες του ανθρώπου βασίζεται ακόμα σε μεγάλο βαθμό στη θερμοδυναμική, η επιστήμη της ενέργειας επεκτάθηκε στα τελευταία 60 περίπου χρόνια στην πυρηνική φυσική και στη φυσική πλάσματος. Και αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στη σχέση ισοδυναμίας μάζας και ενέργειας, που για την παρούσα συζήτηση διατυπώνεται ως

$$\Delta E = \Delta m c^2 \quad (1)$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό και Δm είναι η ποσότητα της μάζας που μετατρέπεται σε ενέργεια ΔE . Σύμφωνα με τη σχέση (1) τεράστια ποσά ενέργειας θα μπορούσαν να παραχθούν από τη μετατροπή ύλης (μάζας) σε ενέργεια. Η σύγχρονη φυσική απέδειξε ότι είναι δυνατή η παραγωγή ενέργειας σύμφωνα με την απλή αυτή σχέση με δύο θεμελιώδεις, «πρωτογενείς» τρόπους: την πυρηνική σχάση και την πυρηνική σύντηξη. Η φυσική επιστήμη δίδαξε τον

άνθρωπο πῶς νὰ διασπᾶ τὰ σχάσιμα στοιχεῖα τοῦ οὐρανίου ($^{92}\text{U}_{235}$ καὶ $^{92}\text{U}_{233}$) καὶ πλουτωνίου ($^{94}\text{Pu}_{239}$) καὶ πῶς νὰ δημιουργεῖ συνθῆκες γιὰ τὴ σύντηξη τῶν πυρήνων τῶν ἐλαφρῶν ἀτόμων [π.χ., τῶν ἰσοτόπων (*D* καὶ *T*) τοῦ ἀτόμου τοῦ ὑδρογόνου] καὶ νὰ παράγει ἐνέργεια. Τέτοια πηγή ἐνέργειας ἀπὸ τὴν πυρηνικὴ σχάση εἶναι διαθέσιμη στὸν ἄνθρωπο καὶ χρησιμοποιεῖται σήμερα γιὰ τὶς ἀνάγκες του. Πρὶν περιγράψω τὶς νέες αὐτὲς πηγὲς ἐνέργειας, θὰ ἀναφερθῶ περιληπτικὰ στὸν κοινωνικὸ ρόλο τῆς ἐνέργειας.

Ὁ Κοινωνικὸς Ρόλος τῆς Ἐνέργειας

Ἡ ἐνέργεια εἶναι ἴσως ἡ οὐσιωδέστερη τῶν «πρώτων ὑλῶν» ποὺ χρησιμοποιεῖ ὁ ἄνθρωπος. Ἡ ἱκανότητα τοῦ ἀνθρώπου νὰ ἐκμεταλλευθεῖ τὶς πηγὲς ἐνέργειας ποὺ ἐκάστοτε εἶχε στὴ διάθεσή του διαδραμάτισε πρωταρχικὸ ρόλο στὴν πολιτιστικὴ καὶ στὴν κοινωνικὴ του ἐξέλιξη. Ὁ ἄνθρωπος πάντοτε ἀξιοποίησε κάθε πηγή ἐνέργειας ποὺ ἀνακάλυψε.

Σήμερα, ἡ ἐνέργεια εἶναι ὁ κατ' ἐξοχὴν ὑπηρέτης τοῦ ἀνθρώπου. Χωρὶς ἐνέργεια δὲν λειτουργεῖ ἡ σύγχρονη κοινωνία (χαρακτηριστικὰ πρόσφατα παραδείγματα εἶναι τὰ blackouts στὶς Ἡνωμένες Πολιτεῖες καὶ στὴν Εὐρώπη) καὶ οὔτε εἶναι βιώσιμη ἡ ἐξέλιξή της. Χρειαζόμαστε ἐνέργεια γιὰ φωτισμό, ἠλεκτρικὲς καὶ ἠλεκτρονικὲς συσκευές, τὸ αὐτοκίνητο, τὰ φάρμακα, τὰ τρόφιμα, τὰ ὑλικά ποὺ ἔχουμε ἀνάγκη. Ὅλες οἱ βιομηχανίες βασικά μετατρέπουν ὑλικά ἐνὸς εἶδους σὲ ὑλικά ἐνὸς ἄλλου εἶδους καὶ ὅλες ἀνεξαιρέτως ἀπαιτοῦν ἐνέργεια. Ἡ παραγωγή, ἡ μεταφορὰ καὶ ἡ χρῆση τῆς ἐνέργειας εἶναι στενὰ συνδεδεμένες μὲ τὸ περιβάλλον, τὴν υγεία, τὴν εὐημερία, τὴν πολιτικὴ, τὴν παγκόσμια εἰρήνη. Ἡ ἔλλειψη καθαρῆς καὶ εὐχρηστῆς μορφῆς ἐνέργειας ἔχει σοβαρὰς ἐπιπτώσεις στὴν ποιότητα ζωῆς καὶ στὸ πολιτιστικὸ ἐπίπεδο τῆς κοινωνίας.

Στὸ σύνολό της ἡ σημερινὴ κοινωνία καταναλώνει τεράστια ποσὰ ἐνέργειας ποὺ συνολικὰ αὐξάνονται. Ἡ πρώτη εἰκόνα δείχνει αὐτὴ τὴ συνεχῆ αὔξηση κατανάλωσης¹. Τὸ Ὑπουργεῖο Ἐνέργειας τῶν ΗΠΑ προβλέπει² ὅτι ἡ συνολικὴ

1. Science 256, 981 (1992).

2. Physics Today, April 2002, p. 38.

παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας θά αυξηθεῖ περίπου 60% μεταξύ 1999 και 2020, ἀπὸ περίπου 380 σὲ 610 quads [ἓνα quad ἀντιστοιχεῖ σὲ περίπου 10^{18} Joules ἢ περίπου 300×10^9 kilowatt hours]. Στὴν ἴδια εἰκόνα βλέπουμε ἐπίσης ὅτι ἡ χρήση τοῦ πετρελαίου θά σημειώσει μία προσωρινὴ αὔξηση καὶ ἀκολούθως κάμψη, ἐν ἀντιθέσει μὲ τὸ κάρβουνο ποὺ θά συνεχίσει νὰ ἀποτελεῖ τὸ κύριο ὀρυκτὸ καύσιμο στὸ προσεχὲς μέλλον. Ἐπὶ πλεόν, φαίνεται ἀπὸ τὴν εἰκόνα 1, ὅτι στὸ μέλλον ὁ ἄνθρωπος θά στηρίζεται ὅλο καὶ περισσότερο στὴν ἡλιακὴ ἐνέργεια καὶ στὶς ἄλλες ἀνανεώσιμες πηγές ἐνέργειας. Ἐνδεικτικὰ, ἡ εἰκόνα 1 δείχνει ὅτι ἡ πλεόν σημαντικὴ πηγὴ ἐνέργειας στὸ μέλλον εἶναι ἡ ἐξοικονόμηση τῆς ἐνέργειας.

Ἡ σημερινὴ κοινωνία ἔχει ἰδιαίτερη ἀνάγκη ἀπὸ μία συγκεκριμένη μορφή ἐνέργειας, τὴν ἠλεκτρικὴ. Ἡ ἠλεκτρικὴ ἐνέργεια παράγεται ἀπὸ πρωτογενεῖς πηγές ἐνέργειας καὶ στηρίζει τὴν τεχνολογικὴ μας κοινωνία. Εἶναι εὐκόλη στὴ χρήση, στὴ μετατροπὴ, στὴ ρύθμιση καὶ στὴν προσαρμογὴ στὶς ἀνάγκες χρήσης της, καὶ σὲ ὅλες τὶς χρήσεις της δὲν ρυπαίνει τὸ περιβάλλον οὔτε καὶ παράγει ἀέρια θερμοκηπίου. Οἱ τεράστιες ἐφαρμογές τῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας ἐκτείνονται ἀπὸ τὶς παραδοσιακὲς ἐφαρμογές της γιὰ φωτισμὸ, οἰκιακὲς χρήσεις, ἠλεκτρονικὰ μέσα ἐπικοινωνίας καὶ ἠλεκτρικὰ μέσα μεταφορᾶς, ἕως ἓνα συνεχῶς αὐξανόμενο ἀριθμὸ νέων ἐφαρμογῶν ποὺ περιλαμβάνει συσκευές μικροκυμάτων, βιομηχανικὰ λέιζερ, κυκλώματα ὑπολογιστῶν, ἰατρικὲς ἐγκαταστάσεις, καί, στὸ μέλλον, ἠλεκτρικὰ αὐτοκίνητα καὶ ἀεροπλάνα. Δύσκολα θά μπορούσαμε νὰ φαντασθοῦμε τὴ σύγχρονη κοινωνία χωρὶς ἠλεκτρικὴ ἐνέργεια.

Στὶς ἀναπτυγμένες καὶ ἀναπτυσσόμενες χῶρες, παρατηρεῖται μία ποσοτικὴ σχέση μεταξύ τοῦ Ἀκαθάριστου Ἐθνικοῦ Προϊόντος (ΑΕΠ) καὶ τῆς κατανάλωσης ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας. Τὸ ἴδιο ἰσχύει, σύμφωνα μὲ μελέτες τῶν Ἡνωμένων Ἐθνῶν, καὶ γιὰ τὸν λεγόμενον Human Development Factor (ἓνα συνδυασμὸ μακροζωίας καὶ μορφωτικοῦ καὶ βιοτικοῦ ἐπιπέδου). Γιὰ παράδειγμα, ὅπως δείχνει ἡ εἰκόνα 2, στὶς ΗΠΑ, ἡ ἄνοδος τοῦ ΑΕΠ ἀκολουθεῖ τὴν ἄνοδο τῆς παραγωγῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας³. Μεταξὺ 1948 καὶ 1978, ἐνῶ ἡ συνολικὴ κα-

3. Physics Today, July 1991.

τανάλωση ενέργειας στις ΗΠΑ αύξήθηκε μόλις κατά ένα παράγοντα 2,4, στην ίδια χρονική περίοδο ή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αύξήθηκε κατά ένα παράγοντα 8. Σήμερα στις ΗΠΑ περίπου 40% της συνολικής πρωτογενούς ενέργειας καταναλώνεται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ανάλογα συμπεράσματα συνάγονται και από τα δεδομένα της Διεθνούς Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ)⁴ όπως διαφαίνονται από την εικόνα 3. Οί πλέον τεχνολογικά προηγμένες περιοχές της γης καταναλώνουν τα μεγαλύτερα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ δύο περίπου δισεκατομμύρια άνθρωποι, κυρίως στις αγροτικές περιοχές των υπό ανάπτυξη χωρών, στερούνται πρόσβασης στις νέες μορφές ενέργειας.

Αντίστοιχα είναι επίσης και τα δεδομένα στην Ελλάδα όπως δείχνουν οι μελέτες της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ)⁵ στην εικόνα 4. Μεταξύ 1950 και 2001 ή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά κάτοικο στην Ελλάδα αύξήθηκε κατά ένα παράγοντα 47. Η αύξηση αυτή εξακολουθεί και συμβαδίζει με την τεχνολογική ανάπτυξη της χώρας και την άνοδο του βιοτικού επιπέδου των Ελλήνων.

Ίσως, ή σχέση μεταξύ της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και της στάθμης του βιοτικού επιπέδου των λαών της γης θα μπορούσε να διαπιστωθεί και από την κατανομή του φωτισμού στην επιφάνεια της γης⁶ που χαρακτηριστικά δείχνει η εικόνα 5. Δεν υπάρχουν πολλά φώτα στην Αφρική! Η εικόνα αυτή μάς επιτρέπει να παρατηρήσουμε ότι τεράστια ποσά ενέργειας καταναλώνονται για φωτισμό (περίπου το 25% της συνολικής παγκόσμιας πρωτογενούς ενέργειας) και επομένως στον τομέα αυτό πρέπει να καταβληθεί προσπάθεια εξοικονόμησης ενέργειας με αποδοτικότερους τρόπους παραγωγής και χρήσης φωτισμού.

4. International Atomic Energy Agency, *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2020*, Reference Data Series No. 1, July, 2002.

5. Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) Α. Ε., 2003 (προσωπική επικοινωνία με τον Δρ. Δ. Σταυρόπουλο).

6. *Physics Today*, April 2002.

Τὰ ἴδια συμπεράσματα ἀπορρέουν καὶ ἀπὸ τὰ δεδομένα τὰ σχετικὰ μὲ τὴ χρήση ὑγρῶν ὀρυκτῶν καυσίμων. Τὸ πάνω μέρος τῆς εἰκόνας 6 εἶναι χαρακτηριστικό τῶν τεχνολογικά προηγμένων χωρῶν καὶ τὸ κάτω μέρος εἶναι χαρακτηριστικό τῶν τεχνολογικά ὑποανάπτυκτων χωρῶν.

Πρωτογενεῖς Πηγές Ἐνέργειας

Οἱ κύριες πρωτογενεῖς πηγές ἐνέργειας στὴ διάθεση τοῦ ἀνθρώπου σήμερα ἐμπίπτουν σὲ τρεῖς κατηγορίες:

- Ὄρυκτὰ καύσιμα (fossil fuels), κυρίως κάρβουνο, πετρέλαιο καὶ φυσικό αἲριο,
- Ἀνανεώσιμες πηγές ἐνέργειας (renewables), κυρίως ὑδροηλεκτρική, ἥλιακή, αἰολική καὶ γεωθερμική ἐνέργεια, καθὼς καὶ ἐνέργεια ἀπὸ βιομάζα, καὶ
- Πυρηνική ἐνέργεια (nuclear energy) ἀπὸ τὴν πυρηνική σχάση καί, στὸ μέλλον, ἀπὸ τὴν πυρηνική σύντηξη.

Τὰ ὀρυκτὰ καύσιμα καλύπτουν περίπου τὸ 80-85% τῆς συνολικῆς ἐνέργειας ποὺ χρησιμοποιεῖται σήμερα. Ἡ χρήση τους ὑπολογίζεται νὰ αὐξηθεῖ κατὰ 50% μέχρι τὸ 2020. Τὸ μόνο ὀρυκτὸ καύσιμο ποὺ μπορεῖ νὰ ἱκανοποιήσει αὐτὲς τὲς ἐνεργειακὲς ἀνάγκες τοῦ ἀνθρώπου εἶναι τὸ κάρβουνο, τὸ ὁποῖον ἀντιπροσωπεύει περίπου τὸ 90% ὅλων τῶν ὀρυκτῶν καυσίμων. Δυστυχῶς, ἡ καύση μεγάλης ποσότητας κάρβουνο συντελεῖ στὴ ρύπανση τῆς ἀτμόσφαιρας μὲ μεγάλες ποσότητες ἐνώσεων ἀνθρακος κυρίως ὑπὸ μορφή διοξειδίου τοῦ ἀνθρακος (CO_2). Ἡ καύση τοῦ κάρβουνο ρυπαίνει ἐπίσης τὴν ἀτμόσφαιρα μὲ ἐνώσεις θείου καὶ ἄζωτου, μὲ σωματίδια καὶ ἀερολύματα (aerosols) διαφόρων μεγεθῶν, μὲ βαρῆα μέταλλα (ὅπως τὸν ὑδράργυρο καὶ τὸ κάδμιο), μὲ ραδιενεργὰ στοιχεῖα (ὅπως τὸ ράδιο καὶ τὸ ραδόνιο), μὲ θερμότητα, καὶ μὲ τεράστιες ποσότητες σκόνης καὶ ὑπολειμμάτων ἐξόρυξης, μεταφορᾶς καὶ καύσης. Οἱ ἐπιπτώσεις αὐτῶν τῶν παραγόντων στὴν ὑγεία καὶ στὸ περιβάλλον θεωροῦνται σοβαρές. Ἡ αὐξηση τοῦ CO_2 στὴν ἀτμόσφαιρα ἀπὸ τὴν καύση ὀρυκτῶν καυσίμων, γιὰ παράδειγμα, ἔχει ἐπιστημονικά ἀποδειχθεῖ⁷ (εἰκόνα 7) καὶ εἶναι ἀνησυχητική γιὰ τὸ ἀτμοσφαι-

7. F. Joos, Europhysics News 27, 213 (1996).

ρικό CO₂ συντελεί στη ρύθμιση της θερμοκρασίας τόσο της ατμόσφαιρας όσο της επιφάνειας της γης. Βεβαίως, εκτός από την καύση του άνθρακα, οι μηχανές εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν υγρά καύσιμα (όπως αυτές των αυτοκινήτων) ρυπαίνουν το περιβάλλον με CO₂ και άλλες ουσίες. Σύμφωνα με μελέτες της Στατιστικής Υπηρεσίας (Census Bureau) των ΗΠΑ², προβλέπεται αύξηση του CO₂ γύρω στα 60% στα επόμενα 20 χρόνια, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας θα προέλθει από τις αναπτυσσόμενες περιοχές της γης. Ο άνθρωπος χρειάζεται περισσότερη ενέργεια, αλλά ταυτόχρονα και λιγότερη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Ωστόσο, τα ορυκτά καύσιμα θα παραμείνουν η κύρια πρωτογενής πηγή ενέργειας στις επόμενες δεκαετίες, έστω και αν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προωθηθούν δυναμικά. Επιβάλλεται επομένως η χρήση των ορυκτών καυσίμων να καταστεί πιο αποδοτική, πιο καθαρή και λιγότερο περιεκτική σε άνθρακα. Προς την κατεύθυνση αυτή καταβάλλονται σοβαρές προσπάθειες, όπως η αποδοτικότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με συμπαραγωγή (cogeneration) ηλεκτρισμού και θερμότητας (άτμου), η ελάττωση απωλειών κατά τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, η αποτελεσματικότερη κατακράτηση και καθαρισμός των προϊόντων της καύσης του άνθρακα και η μεγαλύτερη χρήση του φυσικού αερίου. Το φυσικό αέριο παράγει περίπου 50% λιγότερο άνθρακα ανά kWh παραγόμενης ενέργειας και υπάρχει σε μεγάλες ποσότητες. Παράλληλα με τα μέτρα που αφορούν στην καύση ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, προφανώς χρειάζεται να τονισθεί η ανάγκη αποδοτικότερων μηχανών εσωτερικής καύσης και πιο εκτεταμένων και αποτελεσματικών μέσων μαζικής μετακίνησης (η έλευθρία του αυτοκινήτου κινδυνεύει να μας επιβάλει την ανάγκη της ελευθερίας από το αυτοκίνητο!).

Σύμφωνα με στοιχεία της ΔΕΗ⁵ και της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ)⁸, το Ελληνικό ενεργειακό σύστημα κυριαρχείται από τα ορυκτά καύσιμα και θα εξακολουθήσει να βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα. Η Ελλάδα εισάγει

8. Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), *Μακροχρόνιος Ενεργειακός Σχεδιασμός της Ελλάδας για την Περίοδο 2001-2010*, Ιανουάριος 2003 (προσωπική επικοινωνία με τον Δρ. Γ. Κουτζούκο).

μεγάλες ποσότητες ορυκτών καυσίμων. Το 2000, το εισαγόμενο πετρέλαιο αντιπροσώπευε το 63% των συνολικών χρήσεων καυσίμων. Οί εγχώριοι πόροι πρωτογενούς ενέργειας στην Ελλάδα περιλαμβάνουν κυρίως το λιγνίτη και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η σημαντικά αυξανόμενη χρήση φυσικού αερίου και η αύξηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μικρά υδροηλεκτρικά φράγματα και από άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ενθαρρυντικές νέες κατευθύνσεις στη χώρα μας. Μελέτες της ΔΕΗ⁵ και της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ)⁸ σχετικά με το ενεργειακό σύστημα της Ελλάδας, δείχνουν, μεταξύ άλλων, ότι στην Ελλάδα (1) οι μεταφορές είναι ο κοινωνικός τομέας με τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, (2) η ενεργειακή ζήτηση στον τομέα υπηρεσιών και στον οικιακό τομέα αυξάνεται ταχύτερα από όλους τους άλλους τομείς, (3) οι μεγαλύτερες εκπομπές CO₂ προέρχονται από την ηλεκτροπαραγωγή και τα μεταφορικά μέσα (48% και 24% αντιστοίχως) και (4) το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για οικιακούς καταναλωτές στην Ελλάδα είναι το χαμηλότερο στην Ευρώπη⁵ (εικόνα 8).

Ας ελθουμε όμως στις *ανανεώσιμες πηγές ενέργειας* (ΑΠΕ), στην υδροηλεκτρική, στην ηλιακή, στην αιολική και στη γεωθερμική ενέργεια, καθώς και στην ενέργεια από βιομάζα (ο όρος βιομάζα συμπεριλαμβάνει τα υποπροϊόντα και κατάλοιπα της φυτικής, ζωικής και δασικής παραγωγής και τα άστικά λύματα και απορρίμματα). Αν και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν τις δικές τους περιβαλλοντικές επιπτώσεις, είναι εν τούτοις πιο καθαρές πηγές ενέργειας από ό,τι τα ορυκτά καύσιμα. Το 1998, περίπου 14% της όλικης παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας προήλθε από αυτές τις πηγές. Η υδροηλεκτρική ενέργεια συμβάλλει σήμερα ουσιαστικά στις ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου με περίπου 20% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρισμού. Η επέκτασή της όμως θεωρείται περιορισμένη, κυρίως για περιβαλλοντικούς λόγους.

Η ηλιακή ενέργεια είναι ασφαλώς ανεξάντλητη και παρέχεται δωρεάν. Όμως, η ηλιακή ενέργεια είναι διάχυτη και διακοπτόμενη και πρέπει να μετατραπεί σε άλλη μορφή και να αποθηκευθεί. Στις δυνατότητες συσσώρευσης και αποθήκευσης της ηλιακής ενέργειας συμπεριλαμβάνονται συσσωρευτές, φωτοβολταϊκά και κυψέλες καυσίμων (fuel cells) με βάση, για παράδειγμα το H₂ ή καύσιμα πλούσια σε υδρογονάνθρακες όπως το μεθάνιο και η μεθανόλη. Το υδρογόνο είναι καθαρή και βιώσιμη πηγή ενέργειας, πρέπει όμως, όπως και ο

ήλεκτρισμός, να παραχθεί από πρωτογενείς πηγές ενέργειας. Εκτός λοιπόν από τις θερμικές τεχνολογίες ήλιακής ενέργειας και βιομάζας, η ήλιακη ακτινοβολία μετατρέπεται απ' ευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα φωτοβολταϊκά όμως έχουν ακόμα σχετικά υψηλό κόστος και οι κυψέλες H_2 χρειάζονται περαιτέρω τελειοποίηση. Η ήλιακή ενέργεια μάλλον θα παραμείνει συμπληρωματική και όχι κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παραγωγή ηλεκτρισμού από την αιολική ενέργεια αυξήθηκε σημαντικά τελευταία, κυρίως η δυνατότητα σύνδεσης των ανεμογεννητριών με ύφισταμένα ηλεκτρικά δίκτυα. Προβλέπεται αύξηση ηλεκτροπαραγωγής από αυτήν την ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, αν και η συνεισφορά της στις ενεργειακές ανάγκες της σύγχρονης βιομηχανικής κοινωνίας θα παραμείνει ίσως αμελητέα. Τέλος, η γεωθερμική ενέργεια (ενέργεια από τη θερμότητα του εσωτερικού της γης που είναι διαθέσιμη κοντά στην επιφάνεια του φλοιού της) χρησιμοποιείται για θέρμανση και ηλεκτροπαραγωγή σε αρκετά μέρη της γης. Η συνεισφορά όμως και αυτής της ανανεώσιμης πηγής ενέργειας θα παραμείνει ίσως αμελητέα.

Στην Ελλάδα, σύμφωνα πάλι με πληροφορίες της ΔΕΗ⁵ και της ΡΑΕ⁸, η ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, καλύπτοντας λίγο πάνω από το 10% της συνολικής παραγωγής. Καταβάλλονται όμως προσπάθειες για μεγαλύτερη εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με θερμικές ήλιακές τεχνολογίες, επέκταση της υδροηλεκτρικής ενέργειας με μικρά υδροηλεκτρικά φράγματα, ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά και κυψέλες καυσίμων. Σε αρκετά νησιά του Αιγαίου το εξαιρετικό αιολικό δυναμικό αξιοποιείται με αιολικά πάρκα (πολλές ανεμογεννήτριες τοποθετημένες στην ίδια περιοχή για μείωση κόστους). Η παρουσία τους όμως αλλοιώνει οπτικά το περιβάλλον. Η χρήση φωτοβολταϊκών είναι ιδιαίτερα ελκυστική για απομακρυσμένες περιοχές στις οποίες η επέκταση του ηλεκτρικού δικτύου είναι αδύνατη ή πολύ δαπανηρή. Φωτοβολταϊκοί σταθμοί εξυπηρετούν σήμερα⁵ τις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας πολλών ελληνικών νησιών όπως της Κύθνου, Χίου, Σάμου, Λέσβου, κ.λπ. Ωστόσο, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Ελλάδα προβλέπεται να παραμείνει χαμηλή (γύρω στα 10% της συνολικής). Αυτή η πρόβλεψη είναι πιο χαμηλή από τον εθνικό στόχο (γύρω στα 20% μέχρι το 2010) στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Πυρηνική ενέργεια από την πυρηνική σχάση. Για μισό περίπου αιώνα ο άνθρωπος παράγει χρήσιμη ενέργεια από τη σχάση του πυρήνα του ατόμου του ουρανίου. Όταν ο πυρήνας $^{92}\text{U}_{235}$ διεγερθεί με την απορρόφηση ενός χαμηλής ενέργειας νετρονίου, διασπάζεται σε δύο ίσης περίπου μάζας πυρήνες. Ταυτόχρονα, κατά την πυρηνική σχάση παράγονται επί πλέον νετρόνια (n) και μετατρέπεται ένα μικρό μέρος της μάζας του αρχικού πυρήνα σε ενέργεια κυρίως υπό μορφή κινητικής ενέργειας των προϊόντων της αντίδρασης



Στους πυρηνικούς αντιδραστήρες, μερικά από τα νετρόνια που παράγονται στην αντίδραση (2) χρησιμοποιούνται για να προκαλέσουν σχάση άλλων πυρήνων $^{92}\text{U}_{235}$ και συνεχίζουν έτσι μία ελεγχόμενη αυτοσυντηρούμενη πυρηνική αντίδραση. Ένα μέρος των νέων νετρονίων που παράγονται στην αντίδραση (2) απορροφούνται από το $^{92}\text{U}_{238}$ και το μετατρέπουν σε $^{94}\text{Pu}_{239}$, που μπορεί δυστυχώς να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή πυρηνικών όπλων. Τα θραύσματα της σχάσης του $^{92}\text{U}_{235}$ είναι ραδιενεργά και τα πυρηνικά απόβλητα (nuclear waste) των πυρηνικών αντιδραστήρων περιέχουν ραδιενεργούς πυρήνες, μερικοί από τους οποίους έχουν μεγάλους χρόνους υποδιπλασιασμού, όπως το $^{94}\text{Pu}_{239}$ με χρόνο υποδιπλασιασμού 24.000 χρόνια.

Μέρος της ενέργειας που απελευθερώνεται στις πυρηνικές σχάσεις στους αντιδραστήρες θερμότητας (thermal reactors) μετατρέπεται σε θερμότητα και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο πλέον συνήθης τύπος αντιδραστήρος θερμότητας είναι ο αντιδραστήρας ελαφρού νερού (light water reactor), ο οποίος χρησιμοποιεί ουράνιο ελαφρώς εμπλουτισμένο (3.3% - 4.0%) με το ισότοπο $^{92}\text{U}_{235}$. Το νερό στους αντιδραστήρες εξυπηρετεί δύο σκοπούς, ως επιβραδυντής νετρονίων και ως μέσο μεταφοράς θερμότητας. Περίπου 80% των πυρηνικών αντιδραστήρων που λειτουργούν στον κόσμο για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι light water reactors (LWRs) και έχουν καλό ρεκόρ ασφάλειας.

Σήμερα η πυρηνική ενέργεια προμηθεύει ~17% της παγκόσμιας ηλεκτρικής

ἐνέργειας^{4,9}. Ἡ εἰκόνα 9 δείχνει τὴν παραγωγή ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας ἀπὸ τὴν πυρηνικὴ σχάση σὲ διάφορες χῶρες⁴. Δεκαπέντε (15) χῶρες παράγουν τουλάχιστο 30% τῆς ἠλεκτρικῆς τους ἐνέργειας ἀπὸ τὴν πυρηνικὴ σχάση. Τὸ 2001, 77% τῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας τῆς Γαλλίας, 34% τῆς Ἰαπωνίας, 22% τῆς Ἀγγλίας καὶ 20% τῆς Ἀμερικῆς ἦταν πυρηνικῆς προέλευσης.

Ἡ πυρηνικὴ ἐνέργεια ὁμως δὲν αὐξήθηκε ὅσο εἶχε ἀρχικὰ προβλεφθεῖ, παρὸλο πού ἡ καύση τοῦ οὐρανίου δὲν παράγει ἀέρια θερμοκηπίου. Οἱ κύριοι λόγοι εἶναι τὸ σχετικὰ ὑψηλὸ ἀρχικὸ κόστος τῶν πυρηνικῶν ἀντιδραστήρων, οἱ φόβοι τῆς κοινωνίας σὲ ὅ,τι ἀφορᾷ στὴν ἀσφάλεια τῶν πυρηνικῶν ἀντιδραστήρων, ἡ διαχείριση τῶν πυρηνικῶν ἀποβλήτων (nuclear waste) καὶ ἡ ἐξάπλωση (proliferation) τῶν πυρηνικῶν ὑλικῶν καὶ ὄπλων. Τελευταῖα, ὑπάρχει ἀνανεωμένο ἐνδιαφέρον γιὰ τὴν ἐπόμενη γενιὰ πυρηνικῶν ἀντιδραστήρων, ἡ ὁποία προβλέπεται νὰ συνεισφέρει στὶς ἐνεργειακὲς ἀνάγκες τοῦ σύγχρονου ἀνθρώπου καὶ νὰ στηρίξει τὴ λεγόμενη «οἰκονομία ὑδρογόνου» (hydrogen economy). Πιστεύεται ὅτι μεγαλύτερης ἀσφάλειας, μικροῦ μεγέθους ἀντιδραστήρες (100-400 MW) εἶναι κατάλληλοι γιὰ μικρὲς χῶρες καὶ γιὰ τοπικὲς ἐνεργειακὲς ἀνάγκες.

Παρὰ ταῦτα καὶ παρὰ τὸ γεγονός ὅτι τὰ κύρια τεχνικὰ προβλήματα πού ἀφοροῦν στὴν ἀσφάλεια καὶ στὴ διαχείριση τῶν πυρηνικῶν ἀποβλήτων ἔχουν ἐν γένει τεχνολογικὰ ἐπιλυθεῖ ἢ εἶναι τεχνολογικὰ ἐπιλύσιμα, ἡ πυρηνικὴ ἐνέργεια δὲν ἔχει τύχει ἀκόμα τῆς εὐρείας ἀποδοχῆς καὶ ὑποστήριξης ἀπὸ τὴν κοινωνία. Ἀναγνωρίζει ἡ κοινωνία ὅτι κάθε πηγὴ ἐνέργειας ἔχει τοὺς δικούς της κινδύνους, θεωρεῖ ὁμως ὅτι ἡ πυρηνικὴ ἐνέργεια συνοδεύεται ἀπὸ σοβαροὺς καὶ μοναδικοὺς σπὸ εἶδος τοὺς κινδύνους καὶ ἀπὸ προβλήματα πού ἀπαιτοῦν ὑπεύθυνη κοινωνικὴ δράση καὶ μακροχρόνιο (γιὰ χιλιετίες ἴσως) προγραμματισμό. Ἡ κοινωνία αἰσθάνεται ἀβέβαιη καὶ ἱστορικὰ ἀδύναμη νὰ ἀναλάβει τέτοια δέσμευση, καὶ ἀδυνατεῖ ἢ δὲν θέλει νὰ διαχωρίσει τὸν πυρηνικὸ ἀντιδραστήρα ὡς πηγὴ χρήσιμης ἐνέργειας ἀπὸ τὴν ἀτομικὴ βόμβα ὡς πηγὴ ἀσύλληπτης καταστροφῆς. Ἔτσι, ἡ κοινωνία παραμένει σκεπτικὴ σὲ ὅ,τι ἀφορᾷ τὰ πλεονεκτήματα τῆς παραγωγῆς

9. L. G. Christophorou, *Place of Science in a World of Values and Facts*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2001, Ch. 2.

χρήσιμης ενέργειας από την πυρηνική σχάση, όταν μάλιστα οι ενεργειακές της ανάγκες ικανοποιούνται με άλλες πηγές ενέργειας.

Στήν Ελλάδα εξακολουθεί να αποκλείεται η χρήση της πυρηνικής ενέργειας.

Πυρηνική ενέργεια από την πυρηνική σύντηξη. Προσπάθειες για την παραγωγή χρήσιμης ενέργειας από ελεγχόμενες (controlled) πυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης άρχισαν ήδη από το 1951. Ωστόσο, ελεγχόμενες αντιδράσεις πυρηνικής σύντηξης δεν έχουν ακόμα καταστεί πηγή χρήσιμης ενέργειας. Ο κύριος λόγος είναι οι υπερβολικά δύσκολες φυσικές συνθήκες που απαιτούνται για την ελεγχόμενη «ανάφλεξη» των αντιδράσεων σύντηξης και την απελευθέρωση αξιόλογων ποσών ενέργειας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ελεγχόμενη πυρηνική σύντηξη είναι ίσως η πλέον δύσκολη επιστημονική και τεχνολογική προσπάθεια που έχει ποτέ αναλάβει ο άνθρωπος.

Επιστημονικά δεδομένα¹⁰ όπως εκείνα στην εικόνα 10 προσδιορίζουν γενικά το είδος των υλικών τα όποια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα πυρηνικής σύντηξης και τις συνθήκες οι οποίες είναι αναγκαίες για την «ανάφλεξη» τους. Οι αντιδράσεις απαιτούν ελαφρούς πυρήνες, όπως εκείνους του ατόμου του υδρογόνου (τα πρωτόνια) και των ισότοπων του υδρογόνου (το δευτέριο και το τρίτιο), και για την ανάφλεξή τους χρειάζονται θερμοκρασίες άνω των 100 εκατομμυρίων βαθμών Κελσίου. Σ' αυτές τις θερμοκρασίες το θερμοπυρηνικό καύσιμο (έν προκειμένω αέριο υδρογόνο σε χαμηλή πυκνότητα) υπάρχει μόνο υπό μορφή πλάσματος συνιστάμενο από ίσο αριθμό θετικών πυρήνων (ιόντων) και αρνητικών ηλεκτρονίων. Ένα τέτοιο θερμοπυρηνικό πλάσμα πρέπει να κρατηθεί μακριά από το υλικό τοίχωμα που το περικλείει.

Το κύριο καύσιμο σε ένα θερμοπυρηνικό αντιδραστήρα στο μέλλον προβλέπεται να είναι το δευτέριο (D), ο πυρήνας του οποίου απαρτίζεται από ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο. Η αντίδραση του δευτέρου (D) με το τρίτιο (T) είναι σημαντική γιατί έχει τη χαμηλότερη θερμοκρασία ανάφλεξης (περίπου 100 εκα-

10. F. K. McGowan et al., *Nuclear Data Tables*, **A6**, 353 (1969).

τομμύρια βαθμούς Κελσίου), τη μεγαλύτερη ενεργό διατομή (πιθανότητα) σύντηξης σ' αυτές τις σχετικά «χαμηλές» θερμοκρασίες και απελευθερώνει μεγάλα ποσά ενέργειας (Πίνακας 1). Τα προϊόντα της $D - T$ αντίδρασης



Πίνακας 1: Οί Πλέον Σημαντικές Άντιδράσεις Σύντηξης με Δευτέριο (D)

Άντιδραση Σύντηξης ^{a,6}	Ένέργεια ^γ (MeV)	Ένέργεια ^γ (kWh/g)
$D + D \rightarrow T + p$	3,25	22.000
$D + D \rightarrow He_3 + n$	4,0	27.000
$D + T \rightarrow He_4 + n$	17,6	94.000
$D + He_3 \rightarrow He_4 + p$	18,3	98.000

^a Το τρίτιο (T) είναι ισότοπο του υδρογόνου (H) με δύο νετρόνια και ένα πρωτόνιο. Είναι ραδιενεργό με χρόνο υποδιπλασιασμού (half-life) 12,3 χρόνια. Δεν είναι στοιχείο που υπάρχει στη φύση. Παράγεται με τεχνητούς τρόπους, όπως στις συγκρούσεις νετρονίων (n) με άτομα λιθίου (Li).

⁶ Το He_3 είναι σταθερό (stable) ισότοπο του ήλιου (He_4) με δύο πρωτόνια και ένα νετρόνιο.

^γ Για σύγκριση, η απελευθέρωση ενέργειας στην αντίδραση της χημικής καύσης



όπως δείχνουν τα δεδομένα στον Πίνακα 1, είναι ένα σωματίδιο α με κινητική ενέργεια 3,52 MeV και ένα νετρόνιο με κινητική ενέργεια 14,08 MeV. Σε σύγκριση με τη χημική αντίδραση καύσης $2 H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2O$, ή θερμοπυρηνική αντίδραση (3) ελευθερώνει 30 εκατομμύρια φορές μεγαλύτερο ποσό ενέργειας.

Σε ένα θερμοπυρηνικό αντιδραστήρα ή ενέργεια των σωματιδίων α θα διατηρεί τη θερμοκρασία του δευτέρου και του τρίτου ύψηλή ώστε να συντηρείται η πυρηνική σύντηξη, ενώ τα νετρόνια (όντας ηλεκτρικά ουδέτερα) θα διαφεύγουν από το πλάσμα. Η ενέργειά τους θα απορροφάται από το υλικό που θα περιβάλλει το θερμοπυρηνικό πλάσμα, επιβραδύνοντάς τα και μετατρέποντας την ενέργειά τους σε θερμότητα (ατμό) για τις ηλεκτρικές γεννήτριες. Τα νετρόνια που έχουν επιβραδυνθεί θα παγιδεύονται σε ένα στρώμα λιθίου (Li) που θα επικαλύπτει το πλάσμα και με την αντίδραση



θα αναπαράγουν το καύσιμο τρίτιο. Έτσι, τα δύο βασικά θερμοπυρηνικά καύσιμα, δευτέριο και τρίτιο, είναι ουσιαστικά ανεξάντλητα: το δευτέριο υπάρχει άφθονο στη φύση (ένα σε κάθε 6.500 άτομα υδρογόνου) και είναι φτηνό και το τρίτιο μπορεί να παραχθεί επίσης άφθονα με την αντίδραση (4), καθότι το λίθιο είναι κοινό στοιχείο στο φλοιό της γης.

Το πλέον κρίσιμο επιστημονικοτεχνολογικό πρόβλημα στην προσπάθεια του ανθρώπου να παράγει χρήσιμη ενέργεια από την πυρηνική σύντηξη είναι ο περιορισμός του πλάσματος (plasma confinement). Στους αστέρες, ή βαρύτητα κρατά τους πυρήνες στο αστρικό πλάσμα σε αποστάσεις εξαιρετικά μικρές ώστε να συντήκονται. Προφανώς αυτό δεν μπορεί να γίνει στον πλανήτη μας. Η επιστήμη όμως βρήκε δύο άλλους τρόπους περιορισμού του θερμοπυρηνικού πλάσματος¹¹⁻¹⁴: μαγνητικό περιορισμό (magnetic confinement) και περιορισμό αδράνειας (inertial confinement) (εικόνα 11).

Στη σύντηξη με μαγνητικό περιορισμό, το πλάσμα θερμαίνεται με μικροκύ-

11. J. Sheffield, *Magnetic Fusion Progress: A History and Review*, Oak Ridge National Laboratory Review, No.4, 1987, pp. 1-18.

12. *Journal of Fusion Research* **10**, 83 (1991).

13. J. Nuckols, J. Emmett, and L. Wood, *Physics Today*, August 1973, p. 46; J. H. Nuckolls, *Physics Today*, September 1982, p. 24.

14. J. Wesson, *Tokamaks*, 2nd edition, Clarendon, Oxford, 1997.

ματα (ή άλλα μέσα) και περιορίζεται με μαγνητικά πεδία μεγάλης έντασης και ειδικού σχήματος (εικόνα 11) για χρονικά διαστήματα μεγαλύτερα από ~ 1 s. Στη σύντηξη με περιορισμό αδράνειας, ένα μικρό σφαιρίδιο (pellet) συντήξιμου καύσιμου συμπιέζεται και ακολούθως θερμαίνεται με ισχυρά λέιζερ ή με δέσμες ιόντων από έπιταχυντές (εικόνα 11). Η αδράνειά του το περιορίζει για χρονικά διαστήματα της τάξης του ενός δεσεκατομμυριοστού του δευτερολέπτου (1 ns)¹¹. Για να παραχθεί ενέργεια από την πυρηνική σύντηξη, οι πυρήνες πρέπει να παραμείνουν περιορισμένοι (confined) και η θερμοκρασία τους πρέπει να κρατηθεί ύψηλή για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να απελευθερωθεί περισσότερη ενέργεια από αυτήν που δαπανήθηκε να τους θερμάνει και να τους περιορίσει.

Τελευταία, όλοι οι δείκτες ποιότητας του θερμοπυρηνικού πλάσματος [πυκνότητα (n), θερμοκρασία (T), χρόνος περιορισμού (τ), ισχύς σύντηξης (fusion power, P_f)] έχουν αυξηθεί σημαντικά. Για παράδειγμα, όπως δείχνει η εικόνα 12, η fusion power μεταξύ 1975 και 1995 αυξήθηκε κατά ένα παράγοντα μεγαλύτερο από 100 εκατομμύρια¹⁵, από 0,1 Watt το 1975 σε περισσότερο από 10 εκατομμύρια Watt το 1995. Η τιμή του λεγόμενου τριπλού γινομένου, nTE , Πυκνότητα του Πλάσματος \times Χρόνος Περιορισμού του Πλάσματος \times Ενέργεια Πυρήνων του Πλάσματος είναι σήμερα μόλις 3 έως 5 φορές πιο χαμηλή από το «breakeven level» ($\sim 5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s}$) (δηλαδή την τιμή που πρέπει να έχει το γινόμενο των τριών αυτών μεγεθών για να παραχθεί τόση ενέργεια όση έχει δαπανηθεί για να θερμάνει και περιορίσει το πλάσμα)^{14,16}, και περίπου 10 φορές πιο χαμηλή από την τιμή ανάφλεξης του καύσιμου¹⁷.

Η πυρηνική ενέργεια από τη θερμοπυρηνική σύντηξη θεωρείται ασφαλής, καθαρή και ανεξάντλητη. Είναι σχετικά ελεύθερη από περιβαλλοντική ρύπανση, πυρηνικά απόβλητα και πυρηνικά υλικά που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για πυρηνικά όπλα. Η περαιτέρω ανάπτυξη της απαιτεί έπιστημονική έρευνα και νέα γνώση (π.χ., στη φυσική του θερμοπυρηνικού πλάσματος), νέα τεχνολο-

15. J. P. Holdren et al., Journal of Fusion Energy **14**, No. 2, 213 (1995).

16. R. C. Wolf, Plasma Phys. Control. Fusion **4**, R1 (2003).

17. R. R. Parker, Journal of Fusion Research **10**, 83 (1991).

για και υλικά (π.χ., υπεραγώγιμα υλικά), διεθνή συνεργασία και μακροχρόνιο προγραμματισμό. Είναι μάλιστα άπιθανο να διατεθούν σημαντικά ποσά ενέργειας στην ύπηρεσία του ανθρώπου από την πυρηνική σύντηξη πριν από τα μέσα του 21ου αιώνα. Συμμερίζομαι όμως την άποψη πολλών επιστημόνων ότι η ενέργεια από την πυρηνική σύντηξη δυνατόν να αποτελέσει την κύρια πηγή ενέργειας του ανθρώπου στο μέλλον.

Πιστεύω ότι από την τελειοποίηση, αξιοποίηση και επίβλεψη των πυρηνικών πηγών ενέργειας (από την πυρηνική σχάση και από την πυρηνική σύντηξη) θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό το βιοτικό επίπεδο και η ελευθερία του ανθρώπου στο μέλλον.

Ἐξοικονόμηση τῆς Ἐνέργειας (Energy Conservation)

Ἄς δοῦμε ὅμως, τελικά, μία ἄλλη πλευρά τῶν ἐνεργειακῶν θεμάτων, τήν ἐξοικονόμηση τῆς ἐνέργειας. Ἡ ἐξοικονόμηση τῆς ἐνέργειας ἀποτελεῖ ἴσως τήν σημαντικότερη πηγή ἐνέργειας. Εἶναι καθήκον κάθε χώρας και κάθε πολίτη και ἐξαρτᾶται ἄμεσα ἀπό τόν καθένα μας.

Ἦνυπάρχουν δυνατότητες ἐξοικονόμησης μεγάλων ποσῶν ἐνέργειας σέ πολλοὺς τομεῖς, ὅπως στόν τομέα

- τῆς παραγωγῆς, μεταφορᾶς και χρήσης τῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας,
- τῶν μέσων μεταφορᾶς και τῆς εὐρύτερης χρήσης μέσων μαζικῆς μετακίνησης,
- τῆς ἀνακύκλωσης ὑλικῶν,
- τῆς ἐπεξεργασίας ἀχρήστων (ἀπορριμμάτων).
- τῆς υἱοθέτησης νέων μεθόδων και νέας τεχνολογίας.

Ἐπιτρέψατέ μου νά ἀναφερθῶ σέ δύο συγκεκριμένες περιοχές αὐτῶν τῶν τομέων.

1. Στήν ἀποδοτικότερη χρήση τῆς ἐνέργειας, κυρίως τῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας. Μεγάλα ποσά ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας θά μπορούσαν νά ἐξοικονομηθοῦν μέ τήν καλύτερη ἀποδοτικότητα και συνετή χρήση ἠλεκτρονικῶν και ἠλεκτρικῶν συσκευῶν, π.χ., ψυγείων και συσκευῶν κλιματισμοῦ (air conditioners) (ὅταν

αγοράζει ένας τέτοιες συσκευές πρέπει να λαμβάνει υπ' όψει του δύο τιμές, την τιμή τῆς συσκευῆς καὶ τὸ κόστος λειτουργίας της στὸ χρόνο ζωῆς της). Μεγάλα ποσὰ ἐνέργειας θὰ μπορούσαν ἐπίσης νὰ ἐξοικονομηθοῦν στὴν παραγωγή καὶ στὴ χρήση τοῦ φωτισμοῦ. Γιὰ παράδειγμα, μὲ νέες πηγές φωτισμοῦ (ὅπως τὰ plasma display panels), μὲ ἀποδοτικότερες λάμπες (ὅπως τὶς λάμπες φθορισμοῦ) καὶ μὲ καλύτερους τρόπους φωτισμοῦ (ὅπως προγραμματισμένους διακόπτες). Μεγάλα ποσὰ ἐνέργειας θὰ μπορούσαν ἀκόμα νὰ ἐξοικονομηθοῦν μὲ καλύτερους τρόπους θέρμανσης (π.χ., μὲ προγραμματισμένους θερμοστάτες) καὶ μὲ ἀποτελεσματικότερα μέσα θέρμανσης καὶ ψύξης [π.χ., μὲ χρήση ἀντλιῶν θερμότητας (heat pumps), μὲ καλύτερη μόνωση καὶ μὲ ἐφαρμογὴ τῶν νέων τεχνολογιῶν ἀπεικόνισης τῆς διάχυσης τῆς θερμότητας ἀπὸ οἰκίες καὶ κτίρια].

2. Στὴν ἀνακύκλωση. Ἀνακυκλώνω ἓνα ὑλικὸ πού ἔχει ἤδη χρησιμοποιηθεῖ, σημαίνει ὅτι τὸ καθιστῶ κατάλληλο γιὰ νέα χρήση. Ἐφημερίδες μπορούν νὰ χρησιμοποιηθοῦν γιὰ νὰ γίνεῖ χαρτί γιὰ νέες ἐφημερίδες, κουτιά ἀλουμινίου γιὰ νέα κουτιά ἀλουμινίου, γυάλινα δοχεῖα γιὰ νέα γυάλινα δοχεῖα. Ἡ σημασία τῆς ἀνακύκλωσης εἶναι διττή: (1) λιγότευει τὰ ἀπορρίμματα καὶ (2) ἐξοικονομεῖ ὑλικά καὶ ἐνέργεια. Συνήθως ἡ ἐνέργεια πού χρησιμοποιεῖται γιὰ τὴν παραγωγή ἐνὸς ὑλικοῦ ἀπὸ ἀνακυκλούμενα ὑλικά εἶναι πιὸ χαμηλὴ ἀπὸ τὴν ἐνέργεια πού ἀπαιτεῖται γιὰ τὴν παραγωγή τοῦ ἴδιου ὑλικοῦ ἀπὸ νέα ὑλικά. Τὸ ποσὸ ὅμως τῆς ἐνέργειας πού δαπανᾶται γιὰ ἀνακύκλωση ἐνὸς ὑλικοῦ ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὸ ἴδιο τὸ ἀνακυκλούμενο ὑλικό. Ἡ ἀνακύκλωση μετάλλων ἐξοικονομεῖ τὰ μεγαλύτερα ποσὰ ἐνέργειας, ἐνῶ ἡ ἀνακύκλωση τῶν πλαστικῶν δυνατὸν νὰ στοιχίσει περισσότερα ἀπὸ τὸ νὰ παραχθοῦν ἐξ ἀρχῆς (ἐνδείκνυται ἐπομένως νὰ καίγονται τὰ πλαστικά γιὰ παραγωγή ἀτμοῦ). Παρὰ ταῦτα, πολλὰ ὑλικά πού μπορούν νὰ ἀνακυκλωθοῦν συνήθως δὲν ἀνακυκλώνονται καὶ ὅσα ἀνακυκλώνονται δὲν ἀνακυκλώνονται στὸ βαθμὸ πού θὰ ἔπρεπε ἢ θὰ ἦταν δυνατὸν. Αὐτὴ ἡ διαπίστωση ἰσχύει δυστυχῶς στὸν τόπο μας, ὅπου ἡ ἀνακύκλωση πρέπει νὰ ἀντιμετωπισθεῖ μὲ ἀποφασιστικὴ καὶ συστηματικὸ προγραμματισμό, ὁ ὁποῖος νὰ συμπεριλαμβάνει τὴ διαφώτιση καὶ καθοδήγηση τοῦ πολίτη, οἰκονομικὰ κίνητρα, πρακτικὰ μέσα γιὰ διαχωρισμὸ τῶν ἀνακυκλούμενων ὑλικῶν στὰ σπίτια, καθὼς καὶ τὴν ἀπαιτούμενη ὑποδομὴ.

Ἡ ἐξοικονόμηση τῆς ἐνέργειας στὴ χώρα μας χρειάζεται λεπτομερῆ καὶ ποσοτικὴ ἀνάλυση καὶ συστηματικὴ μελέτη καὶ κατανόηση τῶν διασυνδέσεων της

μέ την έρευνα και τεχνολογία, τὸ περιβάλλον, και τὴν ἑλληνικὴ κοινωνία. Πρὸς τοῦτο, χρειαζόμαστε ἐκπαίδευση και ἐξάσκηση εἰδικῶν στὴν ἀξιοποίηση και διαχείριση τῶν νέων ἐνεργειακῶν τεχνολογιῶν. Ἐνδείκνυται ἐπίσης συντονισμός, ἐνεργοποίηση και κατάλληλη χρηματοδότηση τῆς ἐπιστήμης και τῆς τεχνολογίας τῆς ἐνέργειας τοῦ τόπου μας.

Συμπεράσματα

Κύριε Πρόεδρε, κυρίες και κύριοι,

Θὰ κλείσω τὴν ὁμιλία μου με τὰ ἐξῆς συμπεράσματα:

Ἡ ἐνέργεια παραμένει ἀναγκαία πρώτη ὕλη γιὰ ἓνα ἀσφαλές και αἴσιο μέλλον.

Κάθε πηγὴ ἐνέργειας ἔχει τὰ πλεονεκτήματα και τὰ μειονεκτήματά της.

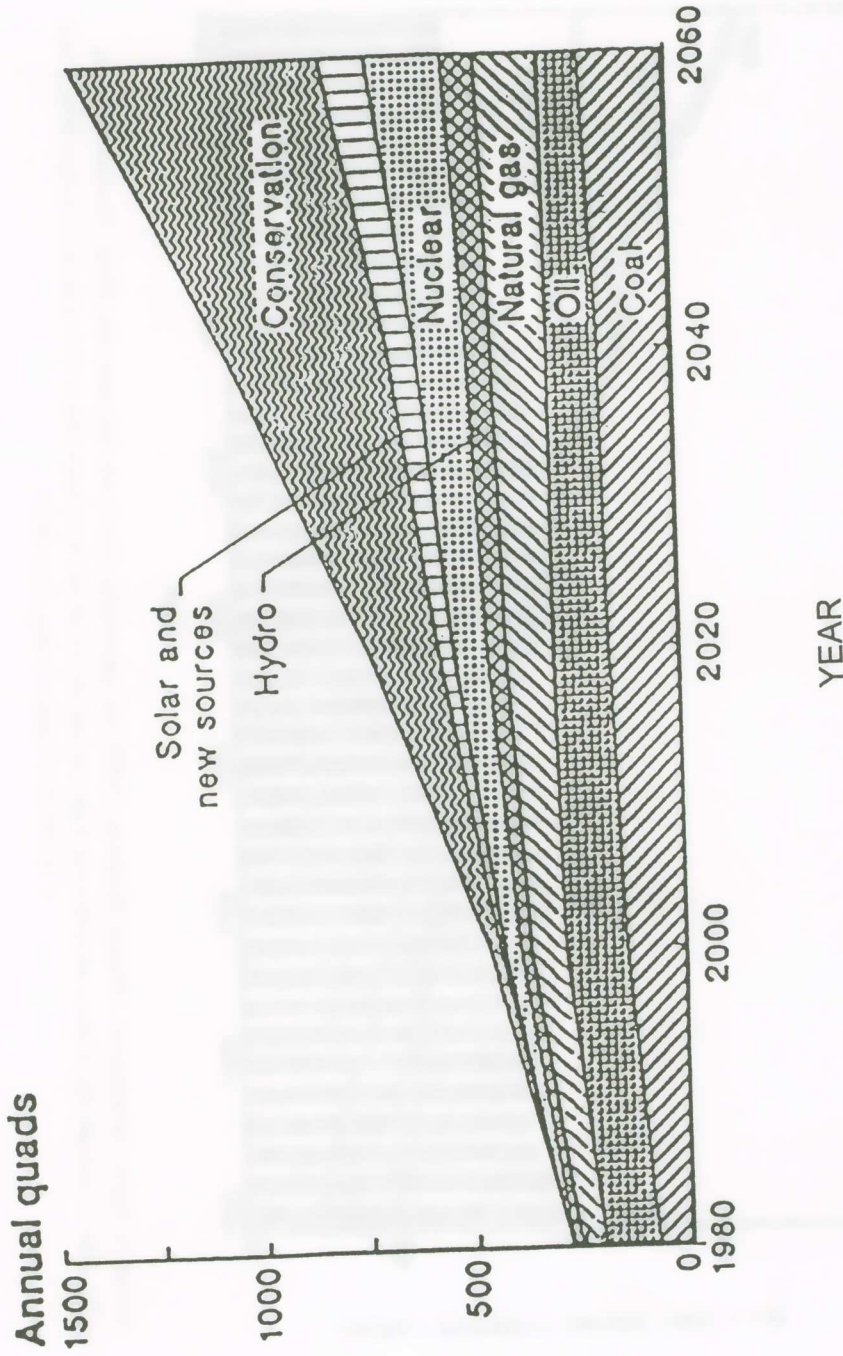
Ὡς οἰκουμένη και ὡς χώρα χρειαζόμαστε:

- τεράστια ποσὰ ἐνέργειας τὰ ὁποῖα καθημερινὰ γίνονται μεγαλύτερα,
- συντονισμένη προσπάθεια γιὰ ἐξοικονόμηση ἐνέργειας και ἀποδοτικότητα στὴ χρήση τῆς ἐνέργειας,
- ἐκτεταμένη και συντονισμένη διακλαδικὴ βασικὴ και ἐφαρμοσμένη ἔρευνα στὴν ἐπιστὴμη τῆς ἐνέργειας,
- κάθε δυνατὴ πηγὴ ἐνέργειας και κάθε δυνατότητα ἐνεργειακῆς ἐπιλογῆς, συμπεριλαμβανομένης και τῆς πυρηνικῆς ἐνέργειας.

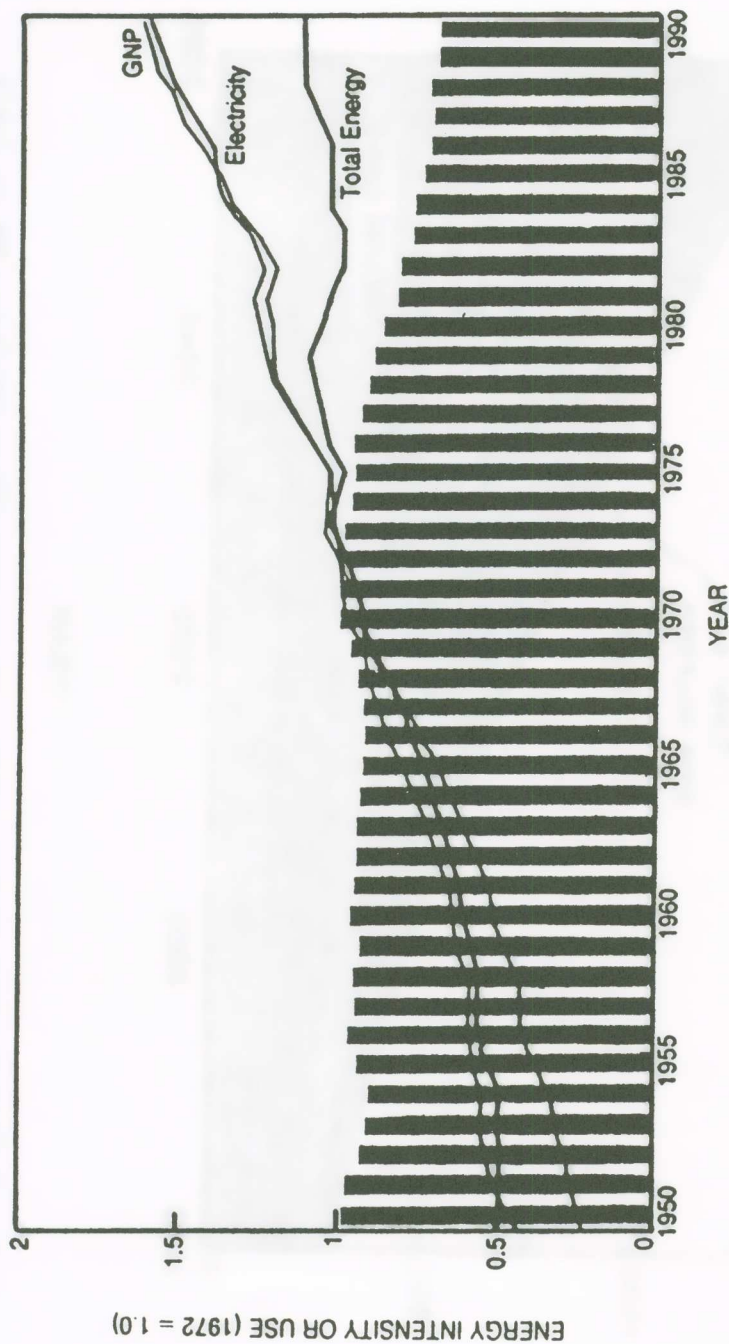
- Στὴν Ἑλλάδα, ἐπίσης, χρειαζόμαστε:

- καλλιέργεια ἀτομικῆς και συλλογικῆς ὑπευθυνότητας γιὰ τὴν ἐνέργεια και τὸ περιβάλλον,
- ἀποτελεσματικότερο προγραμματισμὸ και μελέτη τῶν ἐνεργειακῶν ἀναγκῶν, και
- προώθηση τῆς ἐπιστήμης και τῆς τεχνολογίας τῆς ἐνέργειας.

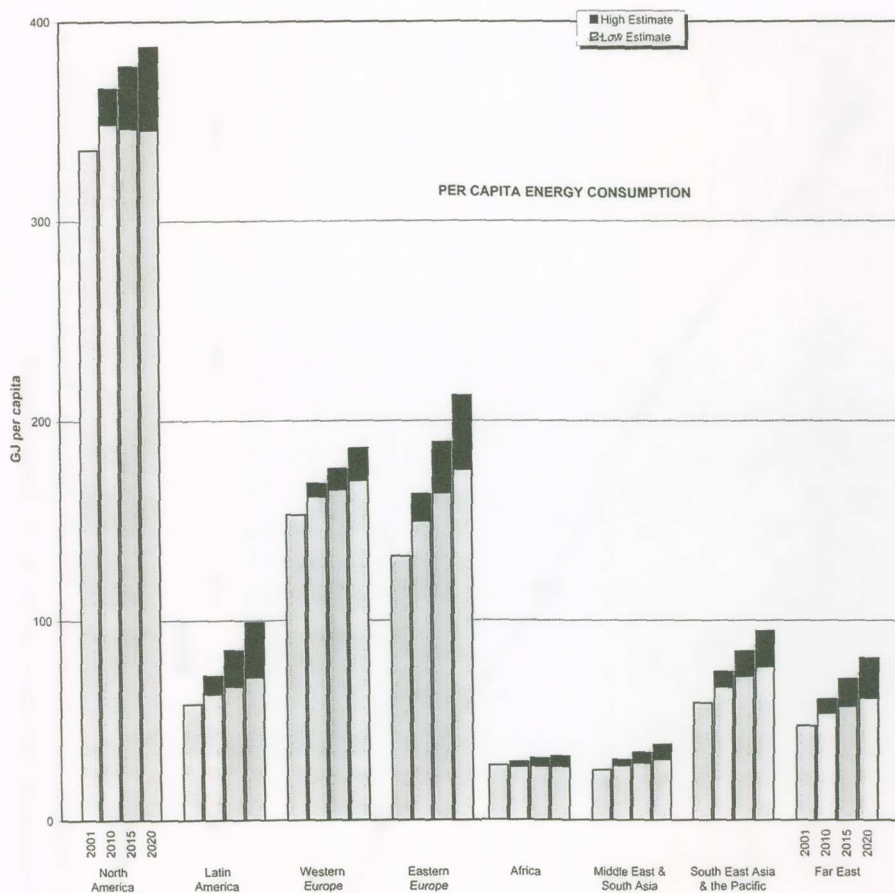
Σὰς εὐχαριστῶ.



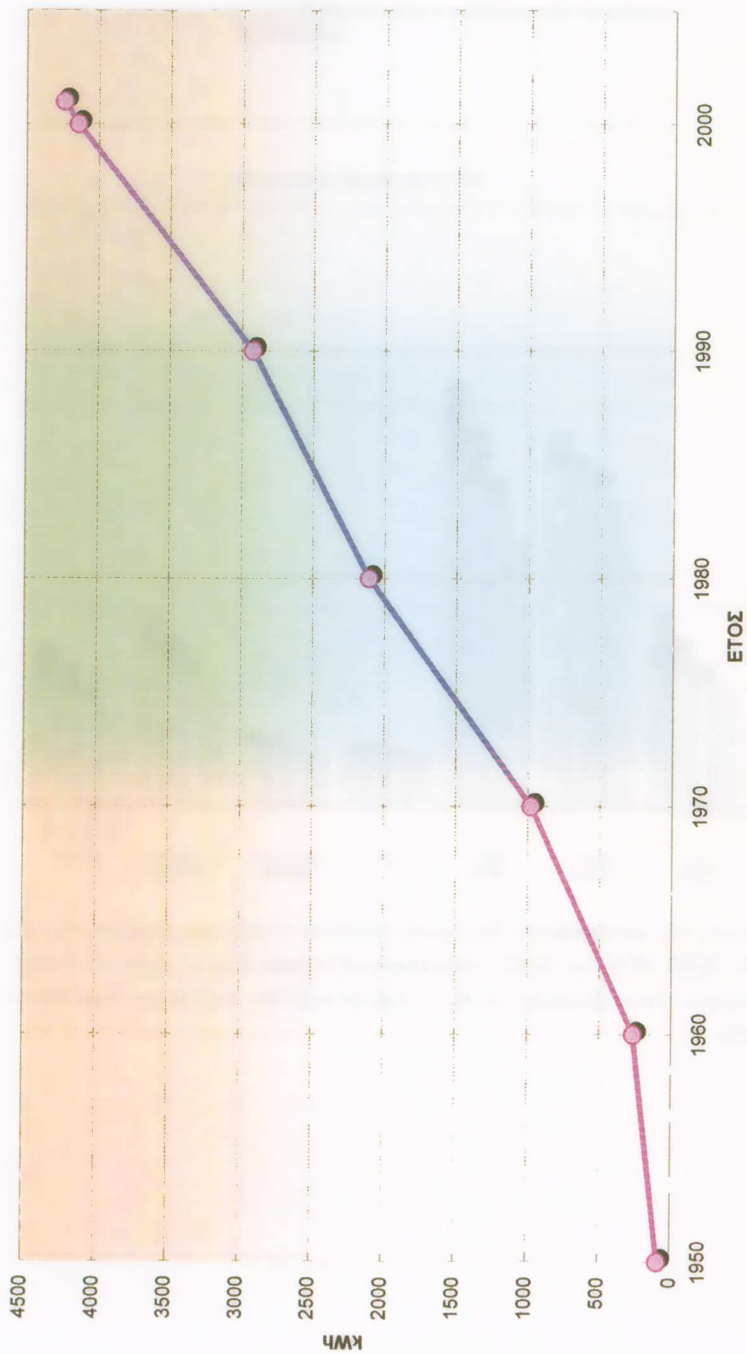
Εικόνα 1. Προβλεπόμενη συνολική παραγωγή κατανάλωση ενέργειας μεταξύ 1980 και 2060 [Science 256, 981 (1992)].



Εικόνα 2. Σχέση Ακαθάριστου Εθνικού Προϊόντος (GNP) και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ. Οι κάθετες μαύρες λωρίδες είναι το κλάσμα της επίσης καταναλώσεως ενέργειας και του GNP το αντίστοιχου έτους (στο κλάσμα αυτό έχει δοθεί η τιμή 1 το 1972) (Physics Today, July 1991).

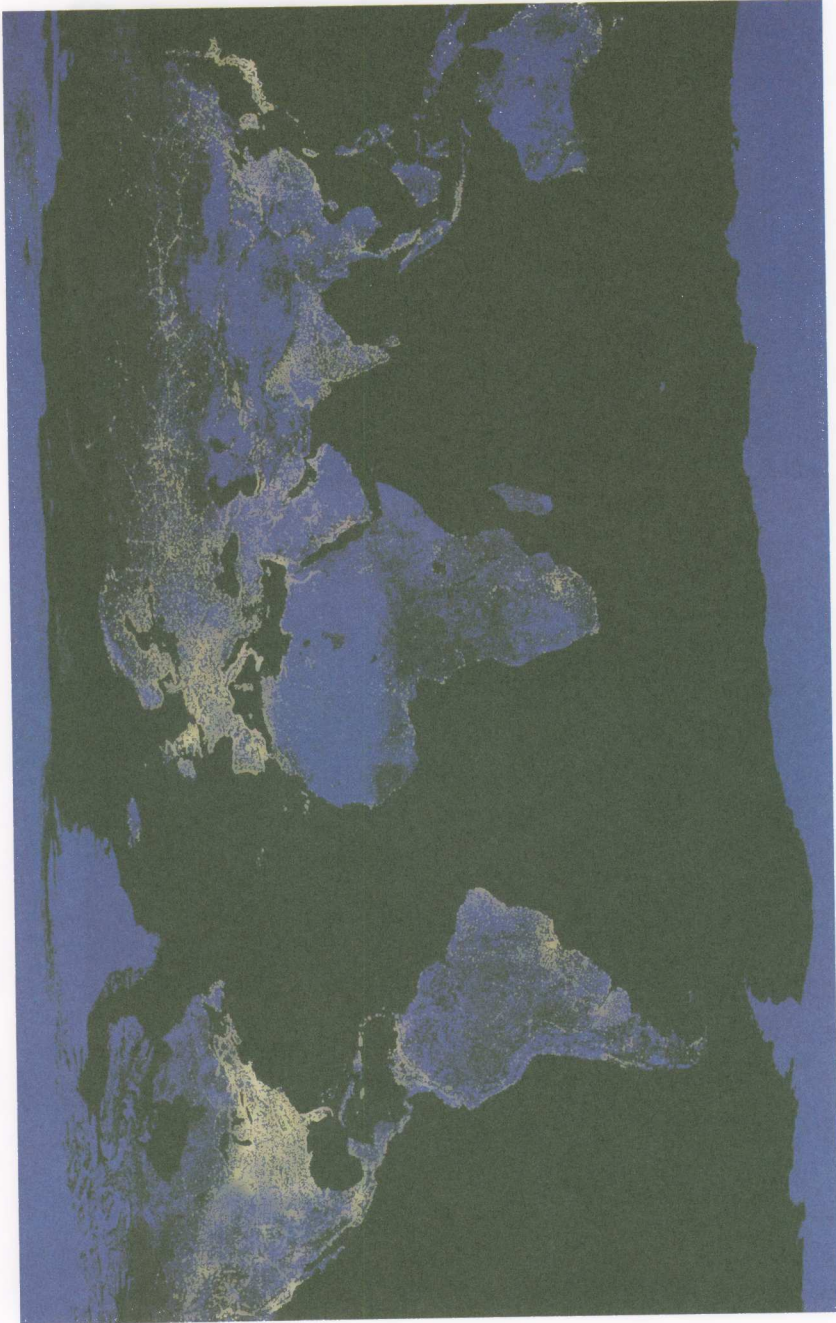


Εικόνα 3. Έκτιμηση τής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορες περιοχές τής γῆς (για τὰ ἔτη 2001, 2010, 2015 καὶ 2020) (International Atomic Energy Agency, *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2020*, Reference Data Series No. 1, July 2002).



ΕΤΗΣΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΑΝΑ ΚΑΤΟΙΚΟ

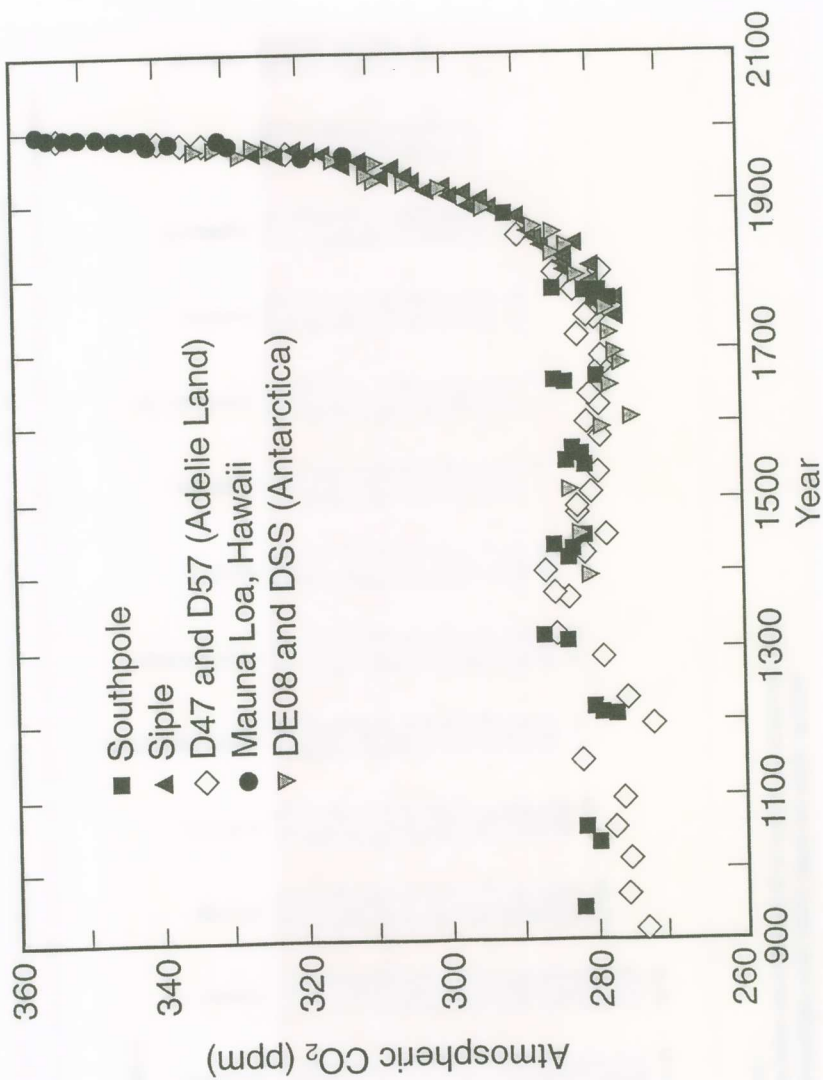
Εικόνα 4. Έτησια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά κάτοικο στην Ελλάδα [Δημόσια Έπιχειρήση Ήλεκτρισμού (ΔΕΗ) Α. Ε., 2003 (προσωπική επικοινωνία με τον Δρ. Δ. Σταυρόπουλο)].



Εικόνα 5. Κατανομή του φωτισμού στην επιφάνεια της γης (Physics Today 2002).

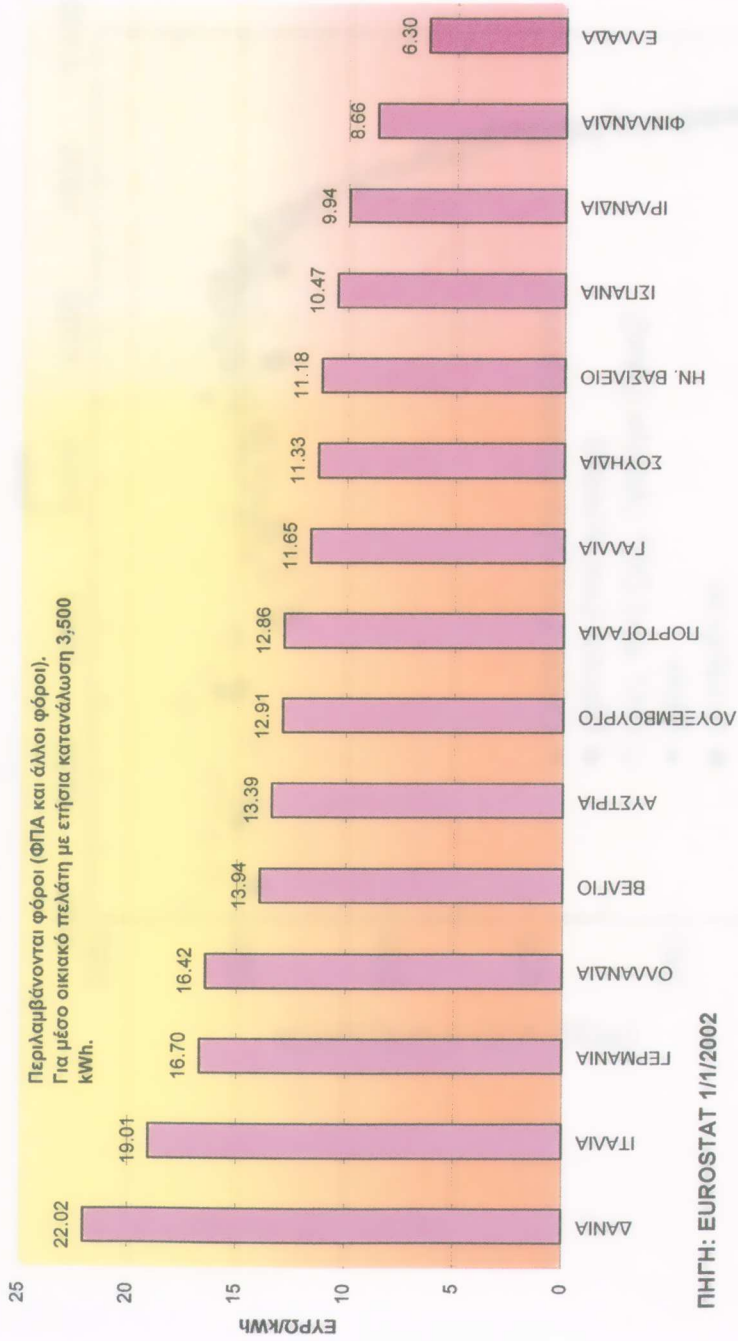


Εικόνα 6. Άνω μέρος: τεχνολογικά προηγμένες χώρες. Κάτω μέρος: τεχνολογικά υποανάπτυκτες χώρες.

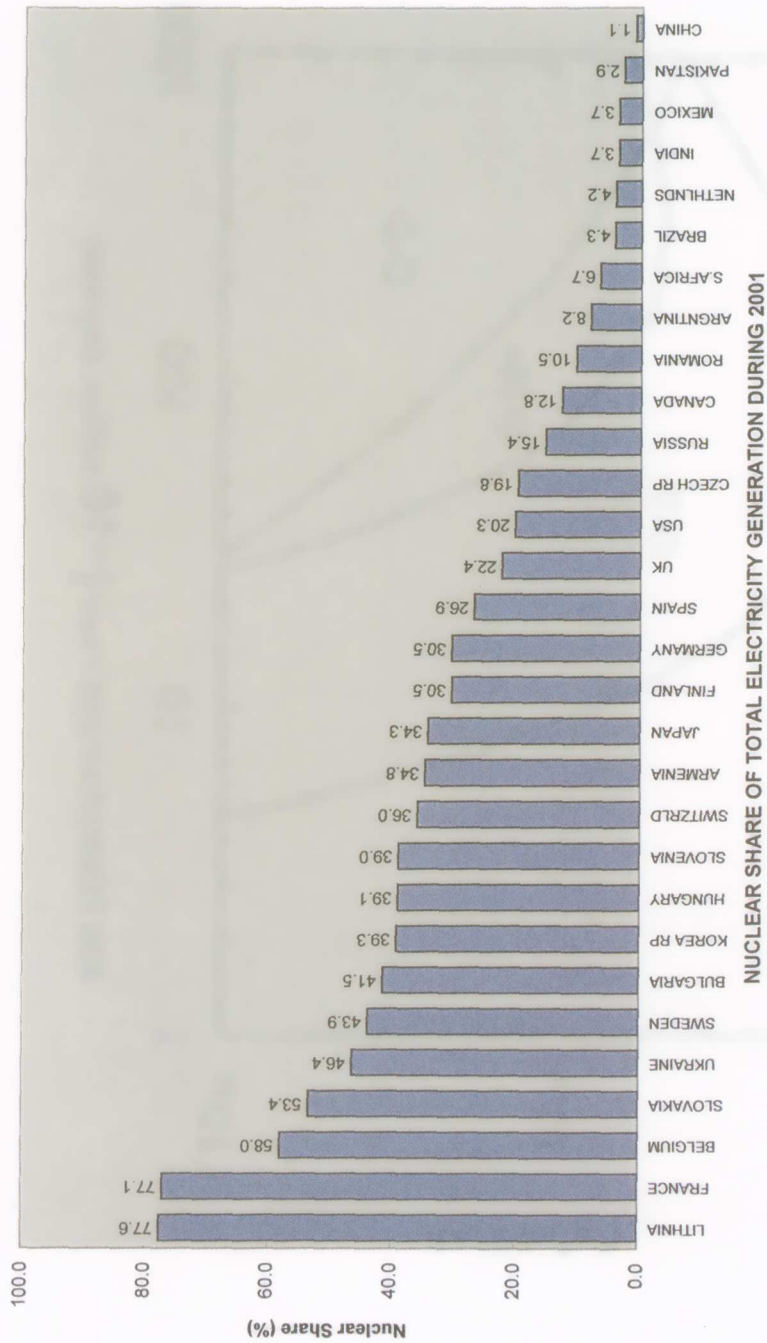


Εικόνα 7. Αύξηση του διοξειδίου του άνθρακος στην ατμόσφαιρα στους τελευταίους δύο αιώνες [F. Joos, Europhysics News 27, 213 (1996)].

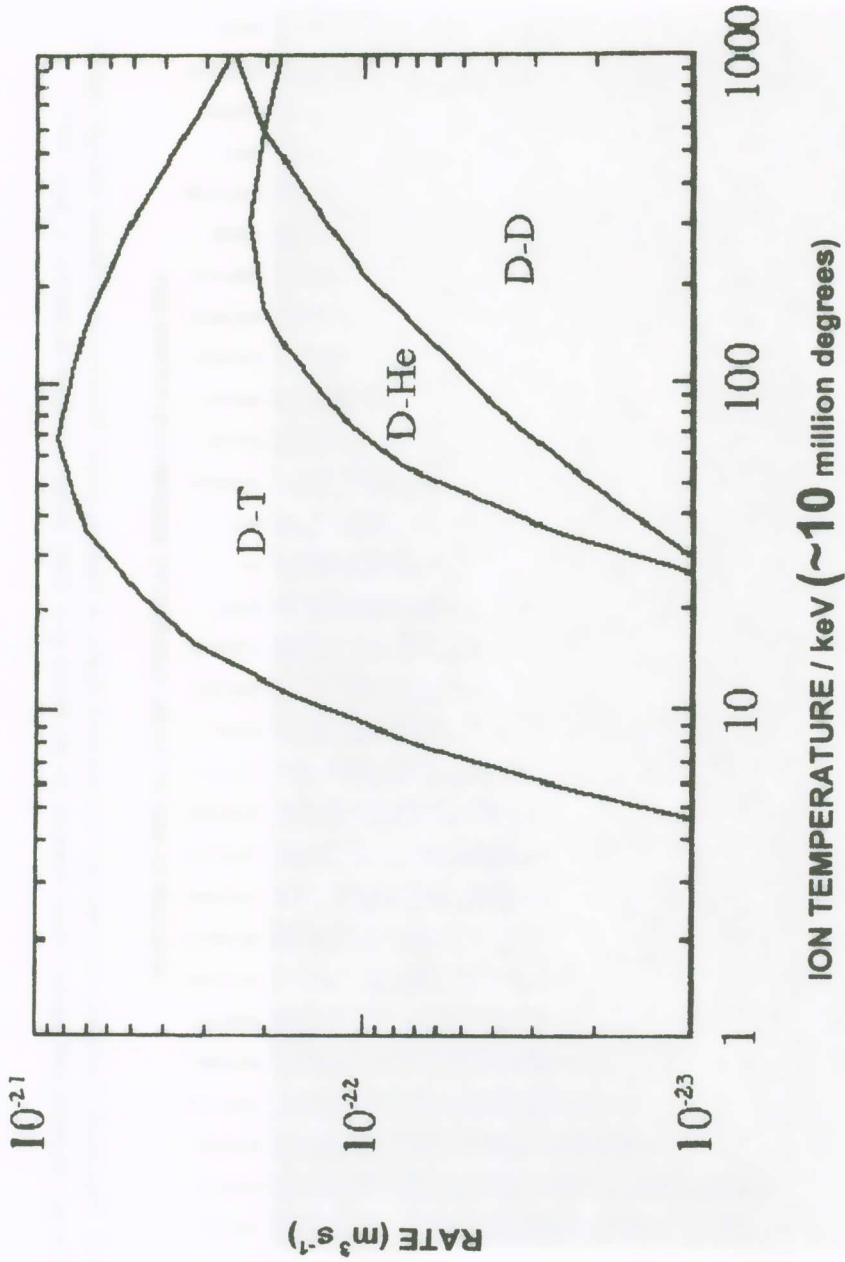
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΟΙΚΙΑΚΟΥΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ ΣΤΗΝ Ε.Ε.



Εικόνα 8. Σύγκριση τιμών ηλεκτρικής ενέργειας για οικιακή κατανάλωση στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης [Δημόσια Έπιχειρήση Ήλεκτρισμού (ΔΕΗ) Α. Ε., 2003 (προσωπική επικοινωνία με τον Δρ. Δ. Σταυρόπουλο)].



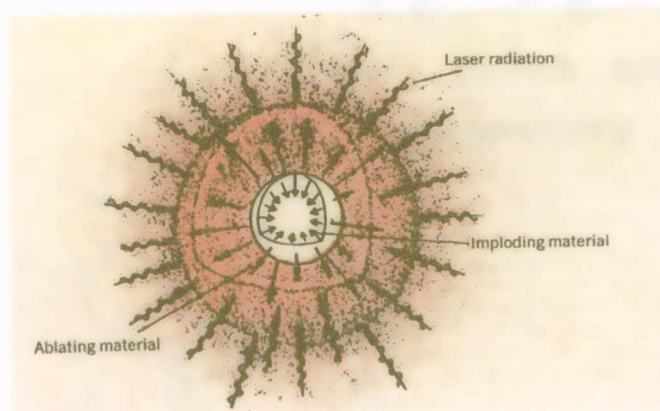
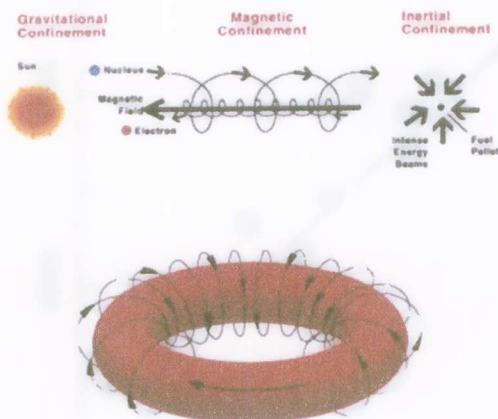
Εικόνα 9. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την πυρηνική στήση σε διάφορες χώρες (International Atomic Energy Agency, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2020, Reference Data Series No. 1, July, 2002).



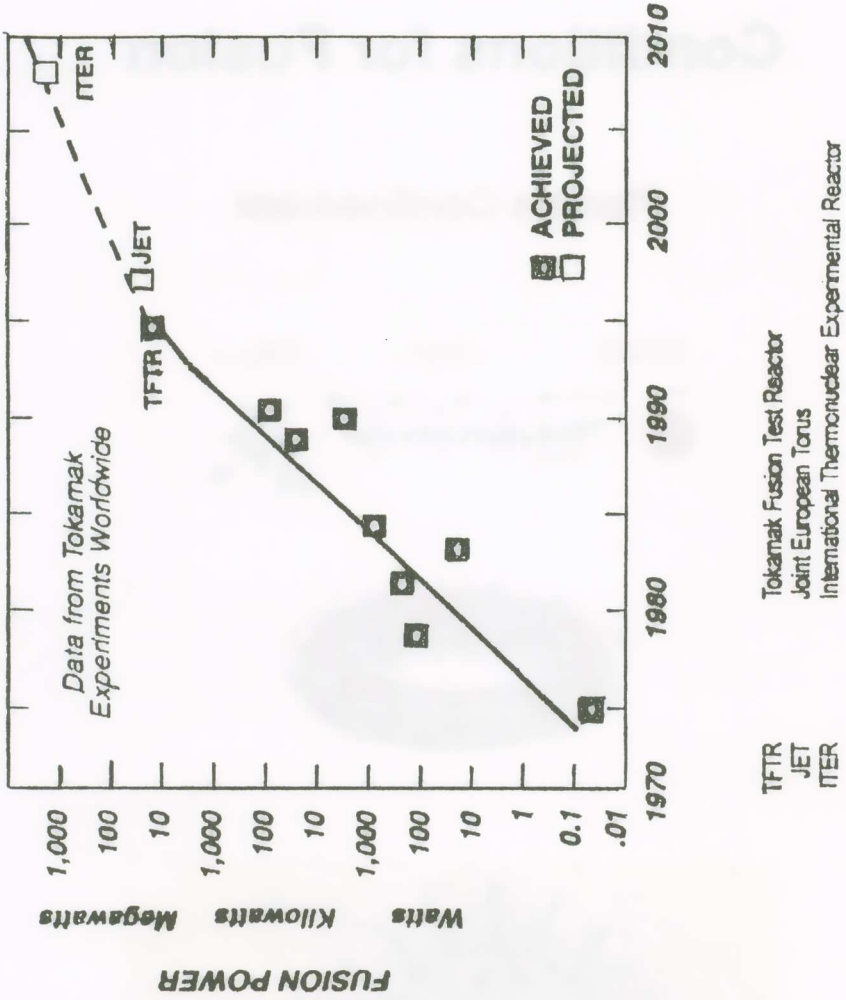
Εικόνα 10. Σταθερά αντίδρασης (rate constant) πυρήνων D με πυρήνες T, He και D σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του θερμοπυρηνικού πλάσματος (χινητική ενέργεια 1 keV αντιστοιχεί σε περίπου 10 εκατομμύρια βαθμούς Κελσίου).

Conditions for Fusion

Plasma Confinement



Εικόνα 11. Συνθήκες για θερμοπυρηνική σύντηξη: περιορισμός θερμοπυρηνικού πλάσματος (Princeton Plasma Physics Laboratory και παραπομπές 11-17).



Εικόνα 12. Επιτευχθέντα ισχύος σύντηξης μεταξύ 1975 και 1995 [J. P. Holdren et al., Journal of Fusion Energy 14, No. 2, 213 (1995)].