

3. ΓΑΙΑΝΘΡΑΚΑΣ

3.1. Εισαγωγή

Ο **ορυκτός άνθρακας (γαιάνθρακας, κάρβουνο - coal)** αποτελεί οργανικό ορυκτό με κύρια συστατικά τον άνθρακα και το υδρογόνο. Άλλα συστατικά που βρίσκονται στον άνθρακα, σε μικρές σχετικά ποσότητες, είναι το οξυγόνο, το θείο, το άζωτο, καθώς και ορισμένες ανόργανες ουσίες. Ο όρος γαιάνθρακας είναι γενικός και χρησιμοποιείται για υλικά με πολύ διαφορετικές ιδιότητες.

Έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα που προσπαθούν να προσομοιάσουν το πολύπλοκο «μόριο» του άνθρακα. Είναι προφανές ότι αφού ακόμα και άνθρακες του ίδιου τύπου διαφέρουν σημαντικά, τα μοντέλα αυτά έχουν μόνο θεωρητική σημασία. Η μοριακή δομή είναι αρκετά περίπλοκη, αλλά από τη στοιχειακή ανάλυση μπορούν να γραφούν εμπειρικοί τύποι, όπως $C_{137}H_{97}O_9NS$ για τον πισσούχο άνθρακα και $C_{240}H_{90}O_4NS$ για τον καλής ποιότητας ανθρακίτη.

Ο γαιάνθρακας έχει χρησιμοποιηθεί σε οικιακές χρήσεις (θέρμανση, μαγείρεμα) από τους Κινέζους τουλάχιστον από το 500 π.Χ. Υπάρχουν ενδείξεις επίσης ότι οι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν άνθρακα στην Γαλατία και τη Βρετανία. Στην Αγγλία ήταν διαδεδομένη η χρήση του από τον 12^ο αιώνα, ενώ το 1275 μ.Χ. αναφέρεται η πρώτη νομοθεσία για έλεγχο της χρήσης του λόγω των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την καύση του.

3.2. Σχηματισμός γαιανθράκων

Οι γαιάνθρακες προέρχονται από την ενανθράκωση (coalification) φυτικής ύλης και πολλά είδη γαιανθράκων δείχνουν ακόμη την ξυλώδη προέλευσή τους. Όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος ενανθράκωσης, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο βαθμός ενανθράκωσης. Ο χρόνος σχηματισμού των ανθράκων κυμαίνεται από 350.000.000 χρόνια περίπου για τους παλαιότερους άνθρακες ως λιγότερο από 30.000.000 χρόνια για τα κοιτάσματα τύρφης. Στο μεγαλύτερο από αυτό το διάστημα το κλίμα ήταν τροπικό ή υποτροπικό. Τα διάφορα στάδια δημιουργίας των γαιανθράκων μπορούν να περιγραφούν συνοπτικά ως εξής:

1) Με τη συσσώρευση φυτικής ύλης με τα χρόνια και τον τερματισμό της βιοχημικής αποσύνθεσής της σχηματίζεται αρχικά με θερμική και βακτηριακή αποσύνθεση η τύρφη (peat), η οποία περιέχει περίπου 60% κ.β. άνθρακα (επί ξηρού δείγματος). Η βιοχημική αποσύνθεση σταμάτησε είτε λόγω παρουσίας τοξινών ή λόγω έλλειψης οξυγόνου από την επικάλυψη της φυτικής ύλης από γαιώδη υλικά ή το νερό. Η διαδικασία μετατροπής της τύρφης σε άνθρακα ονομάζεται *ενανθράκωση*, ενώ ο βαθμός στον οποίο έχει προχωρήσει η διαδικασία αυτή προσδιορίζεται από το *βαθμό ενανθράκωσης*.

2) Με την κάλυψη των αποθέσεων τύρφης από ιζηματογενή πετρώματα και την άσκηση πίεσης σε θερμοκρασίες μέχρι 100°C, η τύρφη μετατρέπεται σε λιγνίτη, ο οποίος περιέχει 70% άνθρακα (C).

3) Σε υψηλότερη πίεση, ο λιγνίτης μετατρέπεται σε υποπισσούχο άνθρακα (ο οποίος έχει 80% C).

4) Τέλος, σε ακόμη υψηλότερη πίεση, ο υποπισσούχος άνθρακας μετατρέπεται σε ανθρακίτη (περίπου 90% C).

Ένα κοίτασμα άνθρακα πάχους 10 m αντιπροσωπεύει μέχρι και 400.000 χρόνια συσσώρευση.

3.3. Ταξινόμηση και ιδιότητες γαιανθράκων

Η ταξινόμηση των διαφόρων τύπων άνθρακα γίνεται συνήθως με το βαθμό της ενανθράκωσης κάθε τύπου. Γενικά, εκτός από τη τύρφη, τέσσερις είναι οι κυριότεροι τύποι ανθράκων: ο λιγνίτης (lignite), ο υποπισσούχος ή υποβιτουμινιούχος άνθρακας (subbituminous coal), συχνά αναφέρεται και ως ανώτερης ποιότητας λιγνίτης, ο πισσούχος ή βιτουμινιούχος άνθρακας ή λιθάνθρακας (bituminous coal) και ο ανθρακίτης (anthracite). Έχουν επίσης προταθεί και διάφορες υποδιαίρεσεις των παραπάνω τύπων άνθρακα. Ο βαθμός ενανθράκωσης καθορίζει σε μεγάλο βαθμό και τις ιδιότητες των ανθράκων. Γενικά, καθώς αυξάνει ο βαθμός ενανθράκωσης (από την τύρφη στο γραφίτη, ο οποίος αποτελείται από 100% άνθρακα, αλλά δεν συμπεριλαμβάνεται στους γαιάνθρακες) μειώνεται το πτητικό κλάσμα, αυξάνεται το στοιχειακό θείο και μειώνεται το στοιχειακό οξυγόνο. Όσο χαμηλότερος είναι ο βαθμός ενός άνθρακα, τόσο χαμηλότερη είναι η θερμαντική του ικανότητα και μεγαλύτερο το ποσοστό της υγρασίας και των πτητικών συστατικών. Οι ιδιότητες των κυριότερων τύπων ανθράκων συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1. Ιδιότητες των ανθράκων (Radovic, 1997).

	Λιγνίτης	Υποπισσούχος άνθρακας	Πισσούχος άνθρακας	Ανθρακίτης
Ποιότητα	χαμηλή	χαμηλή	υψηλή	υψηλή
Ηλικία (10 ⁶ έτη)	50-100		350	
% C	65-72	72-76	76-90	90-95
% H	~5			~2
% N		~1-2		
% O	~30			~1
% S	~1		~4	0
% H ₂ O	70-30	30-10	10-5	~5
Θερμογόνος δύναμη (MJ/kg)	~6-12	~22	25-30	~32

Περιεκτικότητα σε θείο. Το θείο αποτελεί ίσως την κυριότερη πηγή ρύπανσης από τη χρήση των γαιανθράκων. Η περιεκτικότητα σε θείο ποικίλλει με τον τύπο του γαιάνθρακα, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1. Το συνολικό θείο στους άνθρακες συνίσταται από οργανικό θείο (0,5-2%), από θείο που βρίσκεται στο σιδηροπυρίτη (με τη κόκκων σιδηροπυρίτη, FeS₂, 0,5-7%) και από θείο που βρίσκεται στα θειικά άλατα (κυρίως ως FeSO₄ και, σε μικρά συνήθως ποσοστά, ως CaSO₄). Ο σιδηροπυρίτης απομακρύνεται με φυσικές διεργασίες πριν από τη χρήση του άνθρακα. Το οργανικό θείο είτε αποτελεί υπόλειμμα από τις πρωτεΐνες του ξύλου ή είναι αποτέλεσμα βακτηριακής δράσης. Παρά τις εντατικές προσπάθειες για την εύρεση μεθόδων απομάκρυνσης του οργανικού

θείου πριν από την καύση, αυτό δεν έχει επιτευχθεί μέχρι σήμερα. Το θείο μπορεί να προκαλέσει κατά την καύση σημαντικά προβλήματα διάβρωσης των καυστήρων και ρύπανσης της ατμόσφαιρας. Όμως, σε περιπτώσεις όπως η υγροποίηση του άνθρακα μικρές ποσότητες θείου είναι επιθυμητές επειδή δρα ως καταλύτης.

Περιεκτικότητα σε υδρογόνο. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το «ελεύθερο» υδρογόνο, δηλαδή η διαφορά ανάμεσα στο συνολικό υδρογόνο και στο υδρογόνο της υγρασίας. Το ελεύθερο υδρογόνο αποτελεί ένα από τα κριτήρια για την ικανότητα του άνθρακα για παραγωγή κοκ.

Περιεκτικότητα σε οξυγόνο. Έχει αποδειχθεί ότι η περιεκτικότητα του άνθρακα σε οξυγόνο μειώνει τη θερμογόνο αξία του. Η παρουσία του έχει μεγάλη σημασία για τις διεργασίες αεριοποίησης και υγροποίησης του άνθρακα, επειδή αποδεσμεύει σημαντικές ποσότητες υδρογόνου.

Τέφρα. Τέφρα καλείται το υπόλειμμα από την καύση του άνθρακα, το οποίο είναι πλούσιο σε ανόργανα συστατικά και αποτελεί ανεπιθύμητο παραπροϊόν. Περιέχει κυρίως οξείδια Si, Al, Fe, Ca, Ti και άλλα ανόργανα συστατικά. Διακρίνεται σε *μόνιμη* και *ελεύθερη* τέφρα. Η ελεύθερη τέφρα απομακρύνεται πριν από τη χρήση του άνθρακα, με τη βοήθεια διάφορων μεθόδων εμπλουτισμού του άνθρακα. Η μόνη τέφρα αναφέρεται στα ανόργανα συστατικά που βρίσκονται στη χημική δομή του άνθρακα και φυσικά δεν μπορούν να απομακρυνθούν με μεθόδους εμπλουτισμού. Ο όρος ιπτάμενη τέφρα αναφέρεται στην τέφρα που παρασύρεται από τα καυσαέρια στις συσκευές καύσης του άνθρακα και κανονικά κατακρατείται σε ηλεκτροστατικά φίλτρα ή συγκεντρώνεται στον πυθμένα του καυστήρα. Η τυπική σύσταση της τέφρας από το πεδίο της Πτολεμαΐδας δίνεται στον Πίνακα 3.2. Περίπου το 30% ενός αποξηραμένου δείγματος λιγνίτη της Πτολεμαΐδας είναι τέφρα. Οι ποσότητες της τέφρας είναι τεράστιες και δημιουργούν προβλήματα τόσο στις συσκευές καύσης, όσο και με τη διάθεσή τους. Η ύπαρξη τέφρας στον άνθρακα διαφοροποιεί το καύσιμο αυτό από τα άλλα δύο ορυκτά καύσιμα. Η καύση του φυσικού αερίου δεν αφήνει προφανώς καθόλου τέφρα, ενώ το πετρέλαιο θέρμανσης αφήνει ελάχιστη τέφρα (<0,1%) κατά την καύση του.

Πίνακας 3.2. Τυπική χημική σύσταση της ιπτάμενης τέφρας από το πεδίο Πτολεμαΐδας.

Συστατικό	% κ.β.
SiO ₂	30,0
TiO ₂	0,7
Al ₂ O ₃	13,5
Fe ₂ O ₃	5,5
MgO	2,6
CaO	32,3
K ₂ O	1,1
Na ₂ O	0,5
P ₂ O ₅	0,3
CO ₂	3,1
S	3,2

Θερμογόνος Δύναμη. Ανώτερη θερμογόνος δύναμη (Α.Θ.Δ.) ενός άνθρακα καλείται το ποσό της θερμότητας που ελευθερώνεται με την πλήρη καύση του υπό σταθερό όγκο και τη ψύξη όλων των προϊόντων της καύσης σε μία θερμοκρασία αναφοράς και τη συμπύκνωση του παραγόμενου ατμού.

Ο προσδιορισμός της θερμογόνου δύναμης γίνεται πειραματικά με θερμιδόμετρο, ενώ προσεγγιστικά προσδιορίζεται όταν είναι γνωστή η σύστασή του από τον τύπο του Dulong:

$$\text{Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (σε MJ/kg)} = 33,83 C + 144,3 (H-O/8) + 9,42 S \quad (3.1)$$

όπου C, H, O, S είναι οι περιεκτικότητες των αντίστοιχων στοιχείων στον άνθρακα σε % κ.β.

Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη περιλαμβάνει προφανώς και τη θερμότητα που ελευθερώνεται από τη συμπύκνωση του ατμού. Επειδή αυτό δεν συμβαίνει στην πράξη, περισσότερο σημαντική είναι η γνώση της *καθαρής (ή κατώτερης) θερμογόνου δύναμης* (Κ.Θ.Δ.), η οποία είναι περίπου 10% μικρότερη από την Α.Θ.Δ. και μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\text{Καθαρή Θερμογόνος Δύναμη (σε MJ/kg)} = \text{Αν. Θερμ. Δυν.} - 21,6 H \quad (3.2)$$

Όλες οι σχέσεις ισχύουν για ξηρά καύσιμα. Σε περίπτωση που το καύσιμο περιέχει υγρασία W (kg/kg), τότε από την Καθαρή Θερμογόνο Δύναμη πρέπει να αφαιρεθεί το μέγεθος 2,45 W.

Υγρασία. Οι περισσότεροι άνθρακες καθώς εξορύσσονται από τη γη περιέχουν σημαντικές ποσότητες υγρασίας. Ο προσδιορισμός της υγρασίας γίνεται με προσεκτική θέρμανση του άνθρακα σε θερμοκρασία λίγο μεγαλύτερη από το σημείο ζέσεως του νερού. Η υγρασία των ανθράκων κυμαίνεται από 5% μέχρι σχεδόν 70%. Το περιεχόμενο νερό διακρίνεται σε τριχοειδές και σε προσροφημένο. Η υγρασία είναι προφανώς ανεπιθύμητο συστατικό των ανθράκων, καθώς μειώνει τη θερμαντική ικανότητά τους και προσθέτει επιπλέον βάρος κατά τη μεταφορά τους. Αποτελεί σημαντικό πρόβλημα για τους «φτωχούς» ιδιαίτερα άνθρακες.

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη διεργασία της καύσης στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς προσδιορίζονται με την ακόλουθη σειρά αναλύσεων:

- Χημικές αναλύσεις
- Φυσικοχημικές αναλύσεις
- Ορυκτολογική ανάλυση της τέφρας
- Ανθρακο-πετρογραφική ανάλυση

3.4. Ανάλυση γαιάνθρακα

3.4.1. Χημικές αναλύσεις

Σκοπός της ανάλυσης του καυσίμου είναι ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων και ο χαρακτηρισμός του δείγματος και, κατά συνέπεια, η προσεγγιστική εκτίμηση της ποιότητας του κοιτάσματος από όπου προέρχεται. Συνήθως διακρίνεται σε *άμεση* (proximate) και *στοιχειακή* (ultimate) ανάλυση.

Άμεση ανάλυση. Μια τυποποιημένη άμεση ανάλυση περιλαμβάνει τις αναλύσεις και ειδικές μετρήσεις για τέσσερις ιδιότητες του άνθρακα: υγρασία, πτητικό κλάσμα, μόνιμο άνθρακα και τέφρα. Η άμεση ανάλυση μάς δίνει μια ιδέα για τη συμπεριφορά του καυσίμου κατά την καύση του. Οι αναλύσεις αυτές γίνονται σε αυστηρά καθορισμένες συνθήκες με συγκεκριμένες μεθόδους.

- **Υγρασία.** Προσδιορίζεται συνήθως από την απώλεια βάρους κονιοποιημένου δείγματος 0,5-1,0 g ύστερα από θέρμανση στους 105-110°C για μία ώρα σε κενό ή σε αδρανή ατμόσφαιρα (π.χ. καθαρό άζωτο).

- **Πτητικό κλάσμα** (% κ.β. σε πτητικά συστατικά). Προσδιορίζεται με τη θέρμανση αποξηραμένου δείγματος απουσία αέρα σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 750°C και ζύγιση. Αποτελείται κυρίως από υδρογονάνθρακες, CO και CO₂. Άνθρακες με υψηλά ποσοστά πτητικών έχουν

χαμηλότερη θερμογόνο δύναμη, καθώς αναφλέγονται σχετικά εύκολα, αλλά καίγονται γρήγορα δημιουργώντας μακριά και καπνίζουσα φλόγα.

- *Τέφρα*. Η τέφρα προσδιορίζεται θερμαίνοντας 1-2 g δείγματος στους $725 \pm 25^\circ\text{C}$ σε αέρα και εκφράζεται ως το ποσοστό της μάζας του υπολείμματος της καύσης προς τη μάζα του αρχικού δείγματος γαιάνθρακα. Η αρχική θερμοκρασία αποτέφρωσης πρέπει να είναι χαμηλή, ώστε να διασπαστούν τα θειούχα άλατα και να αποφευχθούν αντιδράσεις που μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια των μετρήσεων.

- *Μόνιμος (fixed) άνθρακας*. Το υλικό που μένει μετά την απομάκρυνση της υγρασίας, των πτητικών συστατικών και της τέφρας.

$$[\text{Μόνιμος Άνθρακας}] \% = 100 - [\text{πτητικά ξηρού γαιάνθρακα}] \% - [\text{τέφρα ξηρού γαιάνθρακα}] \% \quad (3.3)$$

Γαιάνθρακες πλούσιοι σε μόνιμο άνθρακα, όπως ο ανθρακίτης, συναντούν δυσκολία στην έναυση της καύσης, αλλά κατόπιν καίγονται σταθερά για μεγάλο χρονικό διάστημα με μια χαμηλή και καθαρή φλόγα. Η καύσιμη ύλη των ανθράκων περιλαμβάνει τον μόνιμο άνθρακα και τα πτητικά συστατικά.

Στοιχειακή ανάλυση. Είναι ουσιαστικά η στοιχειακή ανάλυση ενός ξηρού δείγματος του καυσίμου. Δεν περιλαμβάνει συνήθως και την στοιχειακή ανάλυση της τέφρας, παρά μόνο την περιεκτικότητα της τέφρας σε θείο. Η ανάλυση παρέχει τα παρακάτω δεδομένα:

- Στοιχειακό άνθρακα (C).
- Στοιχειακό υδρογόνο (H).
- Στοιχειακό οξυγόνο (O). Συνήθως προσδιορίζεται όχι άμεσα, αλλά από τη διαφορά των άλλων συστατικών.
- Στοιχειακό θείο (S): οργανικό και ανόργανο.
- Στοιχειακό άζωτο (N).
- Θείο στην τέφρα
- Θερμογόνος δύναμη (με θερμιδόμετρα).

3.4.2. Ορυκτή ύλη

Με τον όρο *ορυκτή ύλη* (mineral matter) νοούνται όλες οι μορφές ανόργανων ουσιών που υπάρχουν στον γαιάνθρακα. Η ύλη αυτή αποτελείται από ορυκτά που συναποτέθηκαν με τα οργανικά υλικά κατά τη δημιουργία της τύρφης, από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα ηφαιστειακής προέλευσης και από ορυκτά που αποτέθηκαν από ροή υπόγειων νερών. Προέρχονται επίσης από τα ανόργανα ή οργανομεταλλικά συστατικά των ίδιων των φυτών που δημιούργησαν την τύρφη. Η ορυκτή ύλη είτε περιέχεται στον ιστό του άνθρακα είτε έχει τη μορφή λεπτών στρώσεων και πληρώσεων ρωγμών, οπότε και μπορεί να διαχωριστεί από τον άνθρακα σχετικά εύκολα με έκπλυση. Στην ορυκτή ύλη συμπεριλαμβάνονται επίσης και ανόργανα συστατικά που προέρχονται από την αναπόφευκτη ανάμειξη κατά την εξόρυξη των στρωμάτων του γαιάνθρακα με γειτονικά στρώματα.

Τα ορυκτά που συνήθως περιέχονται στους γαιάνθρακες είναι αργιλούχες ενώσεις (κυρίως ιλλίτης, καολινίτης και μοντμοριλονίτης), ανθρακικά ορυκτά (όπως ασβεστίτης, δολομίτης, σιδηρίτης), θειούχα άλατα και χαλαζίας. Οι αργιλούχες ενώσεις αποτελούν περίπου το 50% της συνολικής ορυκτής ύλης, ενώ ο χαλαζίας το 20%. Όπως λέχθηκε και προηγουμένως, τα θειικά άλατα είναι συνήθως σπάνια, ενώ δευτερεύοντα ανόργανα συστατικά που περιέχονται σε συγκεντρώσεις της τάξης ppm είναι το B, Be, Ge, As, Cd, Zr, Ga, V, Co, Se, κτλ.

Τα δέκα στοιχεία που συνήθως προσδιορίζονται ποσοτικά, εκφρασμένα ως οξειδία, είναι τα ακόλουθα: SiO₂, Al₂O₃, CaO, Na₂O, K₂O, Fe₂O₃, TiO₂, MgO, P₂O₃, και SO₃. Σημειώνεται ότι η ορυκτή ύλη διαφέρει ποιοτικά και ποσοτικά από την τέφρα που υπολογίζεται κατά την προσεγγιστική ανάλυση λόγω των συνθηκών υψηλής θερμοκρασίας που επικρατούν κατά την παραγωγή της τέφρας και έχουν ως αποτέλεσμα την αφυδάτωση, διάσπαση και οξείδωση κάποιων ανόργανων ουσιών, καθώς επίσης και τη μερική απώλεια πτητικών συστατικών (Hg, K, Na, Cl, P και S).

3.4.3. Φυσικοχημικές αναλύσεις

Με τις αναλύσεις αυτές προσδιορίζονται φυσικές ιδιότητες, όπως η πυκνότητα (απόλυτη και σχετική), η ειδική επιφάνεια και το πορώδες. Επίσης προσδιορίζονται μια σειρά από μεγέθη που σχετίζονται με τη συμπεριφορά των ανθράκων κατά τη θραύση και λειοτριβήση (Grindability, Bond's index), τη φθοροποιό δράση διαφόρων ορυκτών που περιέχονται στους άνθρακες (wear tests) και τα χαρακτηριστικά καύσης όπως, σχηματισμός φλόγας, ομοιομορφία φλόγας, θερμοκρασία φλογοθαλάμου, κ.α.

3.4.4. Ορυκτολογική ανάλυση της τέφρας

Οι χημικές αναλύσεις της τέφρας θα πρέπει να συμπληρώνονται με την ορυκτολογική σύσταση του ανόργανου μέρους του γαιάνθρακα και των στείρων για την αντιμετώπιση προβλημάτων μηχανικής διάβρωσης λόγω παρουσίας ορυκτών με υψηλή σκληρότητα, επισκωριώσεων και επικαθίσεων και τη γενικότερη πρόβλεψη της συμπεριφοράς της τέφρας.

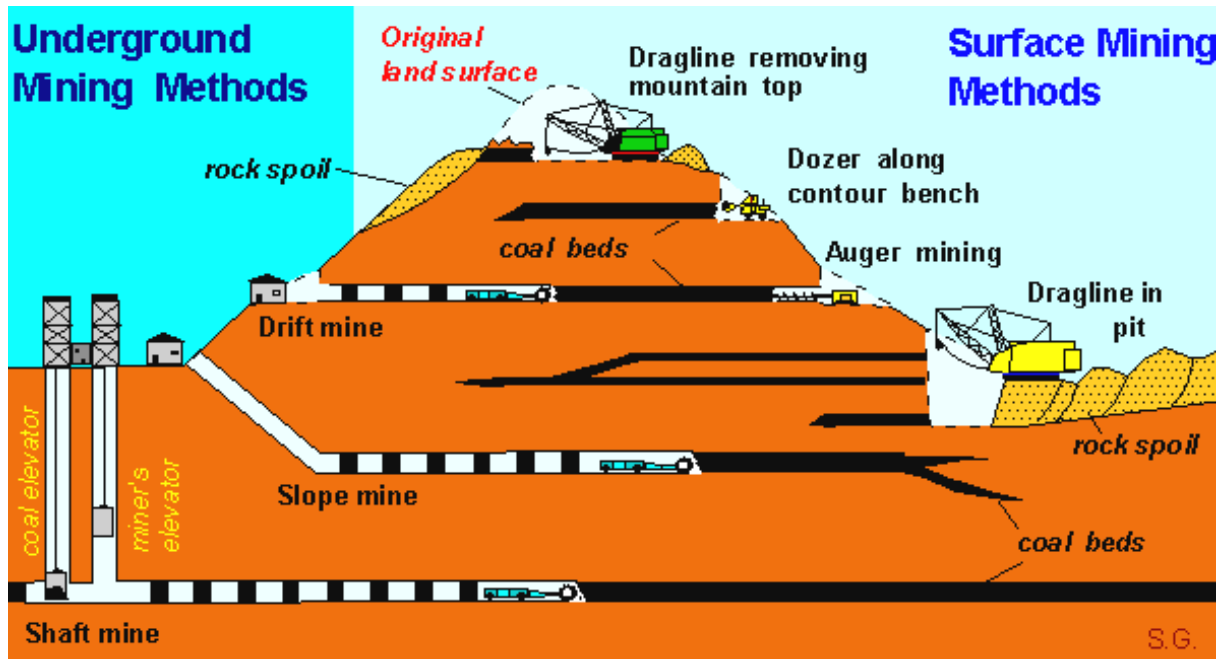
Οι αναλύσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω βρίσκουν εφαρμογή σε δύο βασικούς ερευνητικούς τομείς. Πρώτον, στον τομέα της μελέτης της συμπεριφοράς των γαιανθράκων κατά την καύση τους και, δεύτερον, στον τομέα της διερεύνησης της δυνατότητας αξιοποίησης των γαιανθράκων σε εξηλεκτρικές χρήσεις.

3.5. Εξόρυξη, Επεξεργασία και Μεταφορά

Η εξόρυξη των γαιανθράκων γίνεται είτε υπόγεια ή επιφανειακά (Σχήμα 3.1). Η επιφανειακή εξόρυξη είναι αρκετά αποδοτική και πρακτικά η πλειονότητα των λιγνιτών εξορύσσονται με αυτόν τον τρόπο. Από την άλλη μεριά, η επιφανειακή εξόρυξη συνοδεύεται από σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Με κατάλληλη προσπάθεια μπορεί να γίνει ανάπλαση των χώρων στους οποίους έχει ολοκληρωθεί η εξόρυξη. Συνήθως αποθηκεύεται με προσοχή το επιφανειακό στρώμα που υπήρχε πριν από την έναρξη της εξόρυξης και τοποθετείται μετά το πέρας της εκμετάλλευσης, ενώ γίνεται φύτευση ειδών με κατάλληλη υποδομή για πότισμα.

Η υπόγεια εξόρυξη γίνεται κυρίως με τη μέθοδο του ανοίγματος στοών και απόληψη του άνθρακα. Μόνο το 40% του άνθρακα εξορύσσεται συνήθως. Πάντως η μέθοδος αυτή συνδέεται με σειρά τεχνικών προβλημάτων τα οποία συχνά οδηγούν σε ατυχήματα. Τέτοια προβλήματα είναι η απελευθέρωση αέριων παραπροϊόντων (CH₄ και CO₂), η ύπαρξη λεπτόκοκκης σκόνης άνθρακα, η οποία και αποτελεί ισχυρό εκρηκτικό σε επαφή με τον αέρα και επιφέρει βλάβες στο αναπνευστικό σύστημα των εργαζομένων, η άντληση και επεξεργασία των όξινων νερών, η κατάρρευση και πλημμύριση των στοών. Δεν πρέπει ίσως να ξεχνάμε ότι η ανάγκη για αποδοτική και γρήγορη άντληση των νερών σε πλημμυρισμένα ορυχεία άνθρακα στην Αγγλία οδήγησε στην εφεύρεση της ατμοκίνησης. Απαιτείται επαρκής εξαερισμός των στοών και έλεγχος της συγκέντρωσης της σκόνης.

Συχνά στις περιοχές εξόρυξης γίνεται επεξεργασία ή και εμπλουτισμός του καυσίμου με το διαχωρισμό των ανόργανων συστατικών και των συστατικών που δημιουργούν την ιπτάμενη τέφρα και λειοτρίβηση του άνθρακα. Ο βαθμός επεξεργασίας εξαρτάται κυρίως από τη χρήση του άνθρακα και από τον τύπο του. Για παράδειγμα, για την παρασκευή κοκ απαιτείται πισσούχος άνθρακας, με χαμηλή υγρασία (<5%) και χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο. Ο άνθρακας που προορίζεται για καύση σε ατμοηλεκτρικές μονάδες (ΑΗΜ) δεν έχει ιδιαίτερες προδιαγραφές, αν και για χρήση σε ΑΗΜ με σύγχρονους καυστήρες ή για μεταφορά πολφού απαιτείται η παρασκευή κονιοποιημένου προϊόντος. Αυτό γίνεται με πολλά είδη μύλων (μύλος πρόσκρουσης, σφαιρόμυλος, μύλος άλεσης κτλ.).



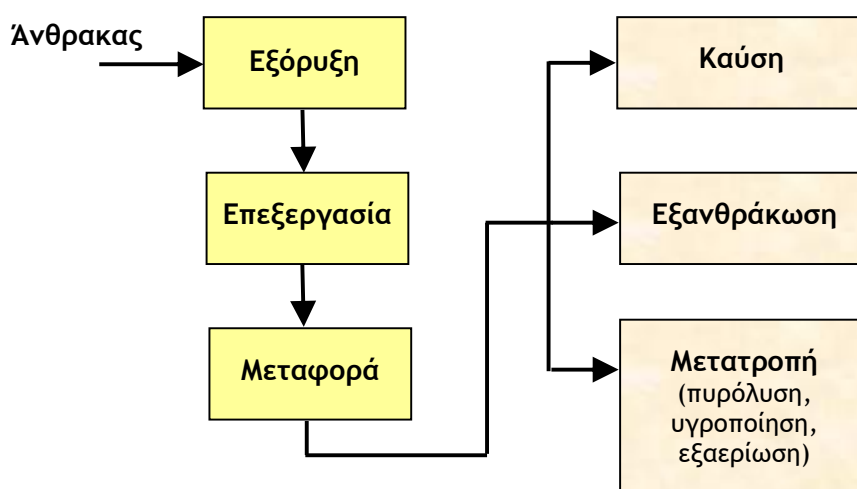
Σχήμα 3.1. Τρόποι εξόρυξης του γαιάνθρακα.

Μετά την επεξεργασία ο άνθρακας μεταφέρεται στον τόπο αξιοποίησής του, όπου μπορεί να αποθηκευτεί για ορισμένο χρονικό διάστημα. Η μεταφορά άνθρακα είναι μια αποδοτική εργασία, αλλά πολύ δαπανηρή, που μπορεί να διπλασιάσει την τιμή του. Το κόστος μεταφοράς είναι προφανώς απαγορευτικό για τους χαμηλής ποιότητας γαιάνθρακες. Για μεγάλες αποστάσεις χρησιμοποιούνται τρένα ή πλοία. Μια εναλλακτική μέθοδος μεταφοράς είναι οι αγωγοί πολφού (slurry). Ο θρυμματισμένος άνθρακας (σε μεγέθη 0,1-10 mm) αναμιγνύεται με αντίστοιχη ποσότητα νερού και αντλείται σε μεγάλες αποστάσεις μέσω αγωγών. Ένα πρόβλημα που προκύπτει από τη μέθοδο αυτή είναι ο αποδοτικός διαχωρισμός σε κυκλώνες και η επεξεργασία του νερού.

Γενικά οι άνθρακες, όπως ο λιγνίτης, αποθηκεύονται συνήθως σε ανοικτές αυλές (stock-piles ή bunkers) με δυνατότητα αποθήκευσης από έναν έως τρεις μήνες. Στην περίπτωση του φτωχού Ελληνικού λιγνίτη το απόθεμα ασφαλείας δεν μπορεί να υπερβαίνει τον ένα μήνα. Προσοχή θα πρέπει να δοθεί κατά τον σχηματισμό των σωρών του άνθρακα ώστε να μην αυτο-αναφλεγεί ο αποθηκευμένος άνθρακας.

3.6. Χρήσεις

Τρεις είναι οι σημαντικότερες μέθοδοι αξιοποίησης των γαιανθράκων, όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 3.2. Η κύρια διεργασία αξιοποίησης του άνθρακα είναι η καύση του για την παραγωγή θερμότητας ή ατμού, κυρίως σε ατμοηλεκτρικές μονάδες. Επίσης από την εποχή πριν από την βιομηχανική επανάσταση ο άνθρακας μετατρεπόταν σε κοκ για χρήση στα χαλυβουργεία. Υπάρχει επίσης πληθώρα άλλων διεργασιών, οι περισσότερες από τις οποίες δεν μπορούν να εφαρμοστούν ακόμη με αυστηρά οικονομικά κριτήρια, που μετατρέπουν τον άνθρακα σε χρήσιμα προϊόντα, κυρίως για εξηλεκτρικές χρήσεις. Οι κυριότερες από αυτές τις διεργασίες μετατροπής είναι η πυρόλυση, η υγροποίηση και η εξαερίωση. Οι διεργασίες αυτές δίνουν χρήσιμα στερεά, υγρά ή αέρια προϊόντα με υψηλότερη θερμική αξία από ότι ο άνθρακας, και λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.



Σχήμα 3.2. Διεργασίες αξιοποίησης γαιανθράκων.

3.6.1. Καύση

Η καύση γίνεται με την παρουσία αέρα και έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση θερμικής ενέργειας (θερμότητας). Η κύρια και επιθυμητή αντίδραση της καύσης είναι η τέλεια καύση προς παραγωγή CO₂:



Συγχρόνως όμως μπορεί να συμβούν και πολλές άλλες αντιδράσεις, οι κυριότερες από τις οποίες είναι:

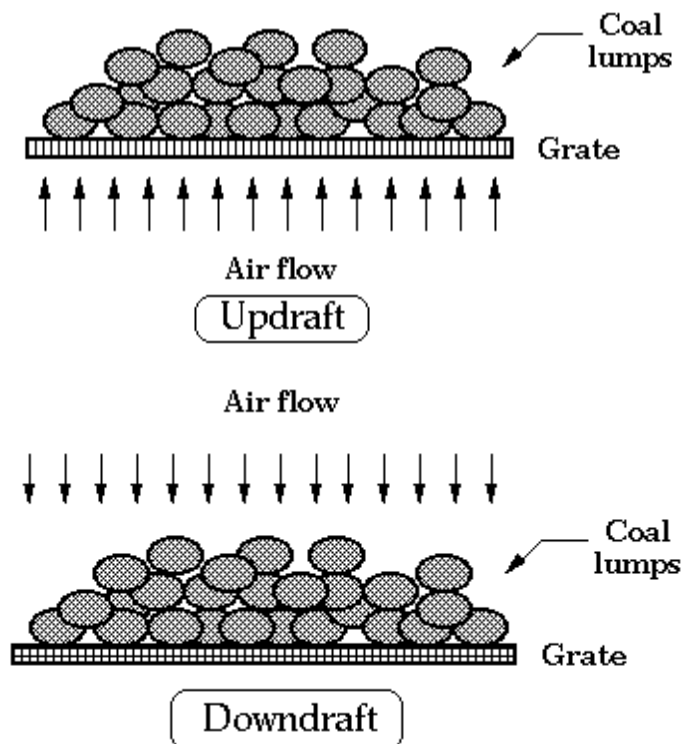


Η αντίδραση της ατελούς καύσης είναι εντελώς ανεπιθύμητη γιατί απελευθερώνεται λιγότερη ενέργεια και παράγεται το τοξικό μονοξείδιο του άνθρακα (ενώνεται με άτομα σιδήρου στην αιμοσφαιρίνη του αίματος). Όπως φαίνεται από τις αντιδράσεις 3.7 και 3.8, κατά την καύση παράγονται επίσης οξειδία του θείου και του αζώτου, τα οποία είναι οι κύριοι υπαίτιοι του φαινομένου της όξινης βροχής. Ένα άλλο πρόβλημα από την καύση άνθρακα σε μικρές μονάδες είναι

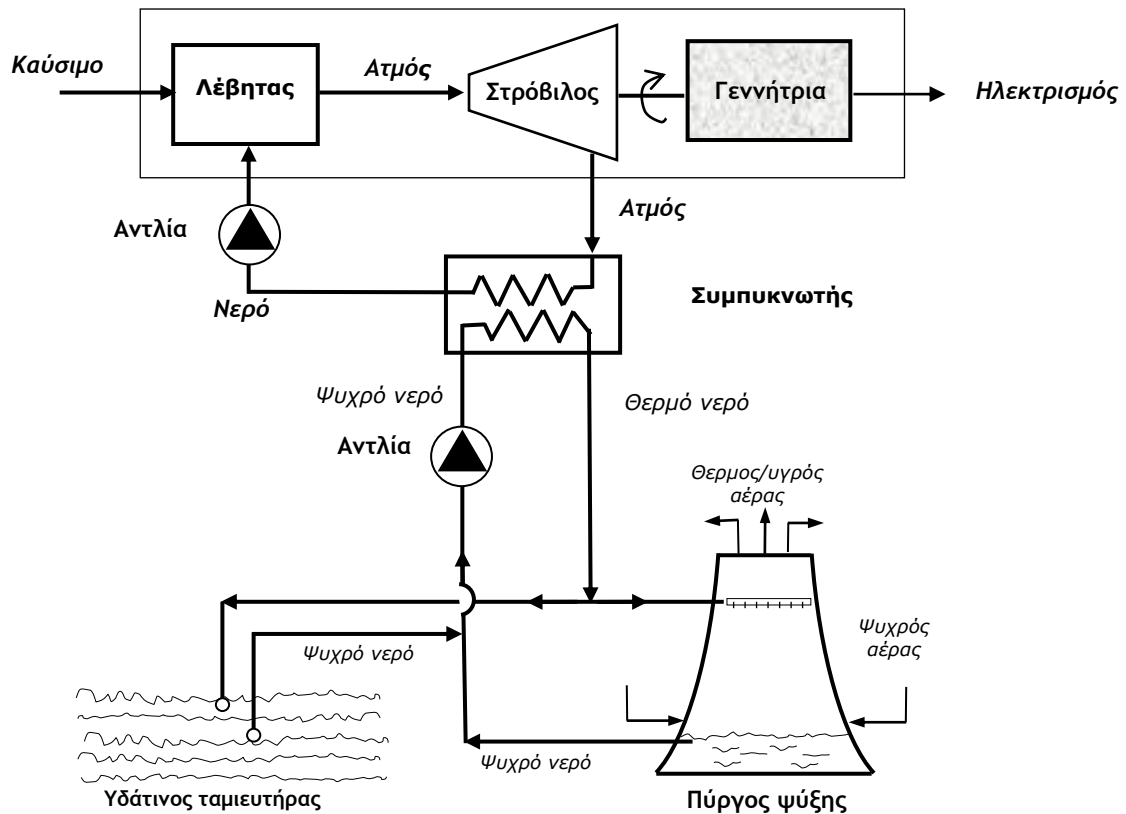
η παραγωγή καπνού και αιθάλης. Τα πρώτα παράπονα για τους παραπάνω ρυπαντές από την καύση του άνθρακα έγιναν στο Λονδίνο το 1275 ! Τέλος, η τέφρα που μένει από την καύση του άνθρακα κανονικά θα έπρεπε να συλλέγεται και να αφαιρείται από τον πυθμένα του καυστήρα. Μέρος όμως αυτής της τέφρας (τα μικρότερα σωματίδια) παρασύρεται από τα καυσαέρια και θα πρέπει να δεσμεύεται προτού αυτά διατεθούν στη ατμόσφαιρα.

Η καύση αποτελεί την σημαντικότερη χρήση του άνθρακα. Περισσότερο από το 80% της παραγωγής του καταναλώνεται σε ΑΗΜ, επειδή αποτελεί το φθηνότερο καύσιμο (χωρίς να περιλαμβάνεται συνήθως το εξωτερικό κόστος του καυσίμου). Ποσοστό περίπου 10% χρησιμοποιείται σε βιομηχανικούς λέβητες και φούρνους. Ο άνθρακας όσο περισσότερα πτητικά συστατικά περιέχει τόσο ευκολότερη είναι η ανάφλεξή του.

Για περισσότερα από 3000 χρόνια, ή καύση του άνθρακα για οικιακή ή βιομηχανική χρήση γίνεται με ροή του αέρα προς τα πάνω, μέσω σχάρας, η οποία αποτελεί τη θερμότερη επιφάνεια φούρνο (Σχήμα 3.3). Στα θερμότερα τμήματα των λεβήτων των ΑΗΜ η θερμοκρασία ανέρχεται στους 1500°C, ενώ το νερό μέσα στους αυλούς φτάνει μέχρι τους 600°C σε πίεση 300 atm. Στην καλύτερη περίπτωση η απόδοση μιας ΑΗΜ φτάνει το 43%. Σχηματικό διάγραμμα μιας ΑΗΜ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4. Σήμερα, μείωση εκπομπών NO_x επιτυγχάνεται με νέους καυστήρες χαμηλού NO_x, ενώ εάν υπάρχει ανάγκη εγκαθίστανται μονάδες εκλεκτικής καταλυτικής ή μη αναγωγής (με αμμωνία ή ουρία). Η αποθείωση των καυσαερίων γίνεται με συσκευές έκπλυσης καυσαερίων (πλυντρίδες-scrubbers) που εγκαθίστανται μεταξύ του ατμοπαραγωγού και της καμινάδας. Το σπουδαιότερο πρόβλημα παραμένει η απομάκρυνση των σωματιδίων τέφρας και άκαυστων από τα καυσαέρια της καμινάδας που αντιμετωπίζεται με τη χρήση ηλεκτροστατικών φίλτρων (electrostatic precipitators). Σε μικρές εγκαταστάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν με υψηλότερη απόδοση και τα σακόφιλτρα. (Περισσότερες λεπτομέρειες σε επόμενο κεφάλαιο.)



Σχήμα 3.3. Τρόποι καύσης του άνθρακα με ροή αέρα προς τα πάνω και προς τα κάτω (Radovic, 1997).



Απαιτήσεις καυσίμων μιας Μονάδας Ηλεκτροπαραγωγής 1000 MWe		
Άνθρακας (πισσούχος):	9000 τόνοι/ημέρα	1 τρένο με 100 βαγόνια κάρβουνο
Πετρέλαιο:	40.000 BBL/ημέρα	1 δεξαμενόπλοιο κάθε 3 εβδομάδες
Φυσικό αέριο:	$6,6 \times 10^6$ m ³ /ημέρα	
Πυρηνική σχάση:	3 kg/ημέρα Ουράνιο (ως ²³⁵ U) (προερχόμενο από ½ τόνο ουρανίου)	
Πυρηνική σύντηξη(;):	13 g Δευτέριο + 220 g Τρίτιο/ημέρα	

Σχήμα 3.4. Σχηματική παράσταση μιας ΑΗΜ.

3.6.2. Εξανθράκωση

Η εξανθράκωση (carbonization) είναι η διεργασία που οδήγησε στη βιομηχανική επανάσταση. Ουσιαστικά γίνεται θέρμανση του άνθρακα σε υψηλή θερμοκρασία (1000°C), απουσία αέρα, για την παραγωγή κοκ (ουσιαστικά καθαρός μόνιμος άνθρακας), το οποίο χρησιμοποιείται για αναγωγή των οξειδίων του σιδήρου



Οι διάφοροι κατάλληλοι τύποι άνθρακα αποτελούν τα φθηνότερα αναγωγικά μέσα. Προτού αναπτυχθεί αυτή η διεργασία χρησιμοποιούνταν για την αναγωγή του σιδήρου ο ξυλάνθρακας. Στη χρήση άνθρακα μπορεί να οδήγησε η απαγόρευση κοπής ξυλείας για παραγωγή ξυλάνθρακα που έγινε στην Αγγλία κατά τον 17^ο αιώνα. Η καλύτερη ποιότητα κοκ προέρχεται από ορισμένους πισσούχους άνθρακες. Είναι ενδεικτικό ότι η χαλυβουργία ουσιαστικά αναπτύχθηκε δίπλα σε πλούσια

κοιτάσματα γαιάνθρακα (π.χ. περιοχή Ρουρ της Γερμανίας και Πίτσμπουργκ των Η.Π.Α.). Η αγορά κοκ σήμερα αντιπροσωπεύει ένα μικρό, αλλά σημαντικό, τμήμα της αγοράς των γαιανθράκων.

Το κοκ που χρησιμοποιείται στη χαλυβουργία θα πρέπει να πληροί τα εξής κριτήρια: να είναι ικανό αναγωγικό μέσο, να μην περιέχει υψηλά ποσοστά θείου και τέφρας που ρυπαίνουν το σίδηρο, να δίνει άφθονη θερμότητα (δηλ. να περιέχει πολύ μόνιμο άνθρακα), να επιτρέπει τον αέρα να διέλθει από την κλίνη του καυσίμου, να είναι αρκετά πορώδες και συγχρόνως ανθεκτικό και, τέλος, να είναι φθηνό.

3.6.3. Μετατροπή του άνθρακα

Μετατροπή του άνθρακα (coal conversion) είναι η διεργασία που μετατρέπει τον άνθρακα σε καθαρότερα και ευκολόχρηστα καύσιμα, υγρά ή αέρια, τα ονομαζόμενα «συνθετικά καύσιμα». Η διεργασία βασίζεται στο γεγονός ότι οι άνθρακες είναι ελλειμματικοί ως προς το υδρογόνο σε σχέση με τα άλλα ορυκτά καύσιμα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.3. Οι κυριότερες διεργασίες μετατροπής του άνθρακα είναι η πυρόλυση, η υγροποίηση και η εξαερίωση.



Συχνά αναφέρεται και ο όρος *αναβάθμιση ή εξευγενισμός των ανθράκων*. Γενικά η έννοια αυτή περιλαμβάνει τη μετατροπή σε στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα, αλλά επεκτείνεται και σε άλλες διεργασίες. Με αυτήν την έννοια, ακόμα και η μπρικετοποίηση του άνθρακα είναι μια μορφή αναβάθμισης. Άλλου είδους αναβάθμιση είναι η παραγωγή αιωρημάτων (πολφών) άνθρακα με νερό ή πετρέλαιο (coal-water ή coal-oil slurries). Τα αιωρήματα αυτά υπέχουν θέση υγρού καυσίμου και παρασκευάζονται με σύγχρονες μεθόδους επίπλευσης για να απομακρυνθούν οι ανόργανες ύλες. Τα αιωρήματα, εάν είναι σταθερά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υγρά καύσιμα σε ατμοπαραγωγούς (είτε ως βασικό ή ως ενισχυτικό καύσιμο). Τέλος, η παραγωγή ακετυλενίου μέσω ανθρακασβεστίου είναι μια από παλιά γνωστή μέθοδος παρασκευής οργανικών ενώσεων.

Πίνακας 3.3. Αναλογία τυπικών λόγων C/H των ορυκτών καυσίμων.

Καύσιμο	C/H (μαζική)	C/H (μοριακή)	Κατάσταση
Πισσούχος άνθρακας	15	1,25	στερεό
Αργό πετρέλαιο	9	0,77	υγρό
Βενζίνη	6	0,50	υγρό
Φυσικό Αέριο	3	0,25	αέριο

3.6.4. Πυρόλυση

Πυρόλυση είναι η θερμική διάσπαση του άνθρακα σε αδρανή ατμόσφαιρα για την παραγωγή στερεών, υγρών και αέριων προϊόντων. Αρχικά με τη θέρμανση απομακρύνονται τα αέρια και το μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας από τους πόρους του άνθρακα. Μετά τους 300°C αρχίζουν οι αντιδράσεις διάσπασης που συνεχίζονται μέχρι τη θερμοκρασία των 1000°C περίπου. Ανάλογα με τις δομικές μονάδες του άνθρακα που διασπώνται παράγονται διάφορα προϊόντα της πυρόλυσης. Τα υγρά προϊόντα παράγονται από τη διάσπαση κυκλικών ομάδων με ασθενείς δεσμούς, το CO₂ από τις καρβοξυλικές ομάδες, το CO από καρβονυλικές ομάδες (καθώς και από τη διάσπαση αρωματικών

πυρήνων), το νερό από υδροξυλικές ομάδες και οι διάφοροι ελαφροί υδρογονάνθρακες από αλκυλικές ομάδες.

Το στερεό προϊόν της πυρόλυσης ονομάζεται **εξανθράκωμα** ή **ημικόκ** (char) και βέβαια είναι εμπλουτισμένο σε στοιχειακό άνθρακα σε σχέση με τον αρχικό ορυκτό άνθρακα. Τα υγρά προϊόντα της πυρόλυσης αποτελούνται από μίγμα οργανικών ενώσεων υψηλού μοριακού βάρους, στις οποίες κυριαρχούν οι πολυαρωματικές ενώσεις. Τα αέρια προϊόντα της πυρόλυσης είναι ελαφροί υδρογονάνθρακες (CH₄, C₂H₆, C₃H₈, κτλ.) και ενώσεις οξυγόνου (CO, CO₂).

Εάν η πυρόλυση γίνεται σε ατμόσφαιρα υδρογόνου, η διεργασία ονομάζεται υδρογονο-πυρόλυση. Παράγονται λιγότερα στερεά και υγρά προϊόντα και το αέριο προϊόν είναι εμπλουτισμένο σε μεθάνιο.

Οι συνθήκες που επηρεάζουν τις αποδόσεις και την κατανομή των προϊόντων πυρόλυσης είναι η θερμοκρασία πυρόλυσης, η πίεση πυρόλυσης, το είδος του άνθρακα, ο τύπος του αντιδραστήρα, ο ρυθμός θέρμανσης των σωματιδίων του άνθρακα και η πίεση που λαμβάνει χώρα η πυρόλυση.

3.6.5. Υγροποίηση

Η υγροποίηση είναι η διεργασία μετατροπής του άνθρακα σε υγρά προϊόντα (καύσιμα). Η υγροποίηση του άνθρακα γίνεται καταλυτικά, παρουσία υδρογόνου ή ενώσεων που μπορούν να δώσουν υδρογόνο. Ο άνθρακας εισέρχεται στον αντιδραστήρα υπό μορφή πολφού (slurry) και εμπλουτίζεται σε υδρογόνο. Τα υγρά προϊόντα που παράγονται είναι κυρίως ναφθενικές και αρωματικές ενώσεις (για το ορισμό των ενώσεων αυτών, βλ. κεφάλαιο 4.3). Απλοποιημένα η αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι:



Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μετατροπή του άνθρακα σε υγρά και το είδος των υγρών προϊόντων που παράγονται είναι ο τύπος του άνθρακα που χρησιμοποιείται (χρησιμοποιείται κυρίως ο πισσούχος άνθρακας), η θερμοκρασία, η πίεση, ο χρόνος παραμονής στον αντιδραστήρα, το είδος του αντιδραστήρα και ο καταλύτης που χρησιμοποιείται.

Η πίεση έχει θετική επίδραση στην υγροποίηση του άνθρακα, με την παραγωγή υγρών προϊόντων να αυξάνει με την αύξηση της πίεσης από τις 70 στις 280 atm. Αντίθετα με την πίεση, η βέλτιστη θερμοκρασία για μεγιστοποίηση των παραγόμενων υγρών είναι περίπου 450°C. Η διεργασία εφευρέθηκε στη Γερμανία το 1913 από τον F. Bergius και εξελίχθηκε σε εμπορική διεργασία στη Γερμανία και την Αγγλία κατά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο. Η υγροποίηση του άνθρακα είναι μια δύσκολη διεργασία που βρίσκει ακόμη και σήμερα εμπορική εφαρμογή (στην Νότια Αφρική). Γενικά, τα συνθετικά υγρά καύσιμα από άνθρακα μπορεί να γίνουν ελκυστικά μόνον στην περίπτωση που η τιμή του πετρελαίου υπερβεί τα 50-70 δολάρια το βαρέλι.

3.6.6. Εξαερίωση

Εξαερίωση είναι η μετατροπή του άνθρακα σε αέρια προϊόντα, όπως στο αέριο σύνθεσης (CO+H₂), το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο. Το αέριο σύνθεσης κατόπιν μπορεί να μετατραπεί σε υγρούς υδρογονάνθρακες (έμμεση υγροποίηση) μέσω της σύνθεσης Fischer-Tropsch (που αναπτύχθηκε το 1925 στη Γερμανία) ή να χρησιμοποιηθεί για άλλες χρήσεις. Η διεργασία της εξαερίωσης έχει ηλικία μεγαλύτερη των 200 ετών, με την παραγωγή του «φωταερίου» (coal gas, αέριο με μέτρια συγκέντρωση σε μεθάνιο), η οποία γινόταν με θέρμανση του άνθρακα απουσία αέρα.

Η εξαερίωση επιτελείται με τη χρήση αέρα, οξυγόνου ή ατμού. Μεταξύ αυτών των αερίων και του άνθρακα συμβαίνουν ποικίλες αντιδράσεις που περιλαμβάνουν:

α) Ενδόθερμες αντιδράσεις υδρόλυσης:



β) Εξώθερμες αντιδράσεις καύσης του άνθρακα:



γ) Άλλες αντιδράσεις όπως:



Αποτέλεσμα των παραπάνω αντιδράσεων είναι η παραγωγή αερίου σύνθεσης, το οποίο αποτελεί την πρώτη ύλη για την παραγωγή πολλών βιομηχανικών προϊόντων, όπως αμμωνίας ($\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$) και μεθανόλης ($\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$). Η μεθανόλη κατόπιν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνθεση αλκενίων, αρωματικών ενώσεων, οξικού οξέος, φορμαλδεΐδης κ.ά. Αέριο σύνθεσης παράγεται σήμερα κυρίως από το φυσικό αέριο.

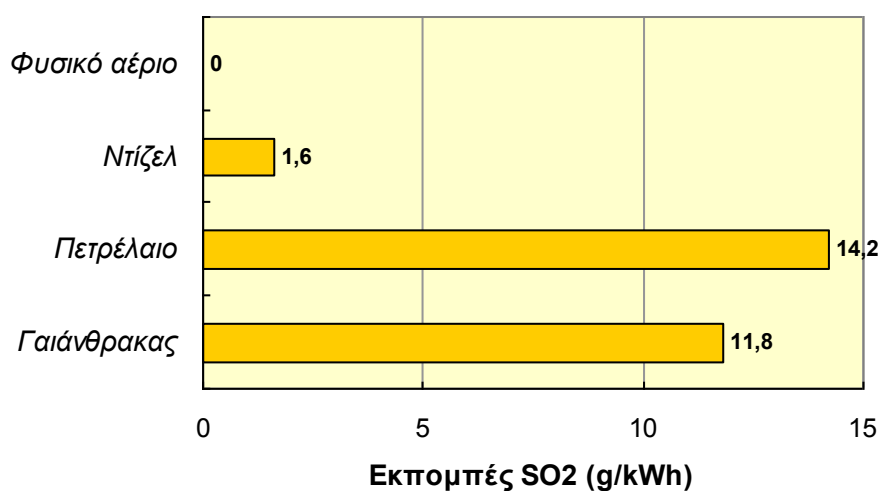
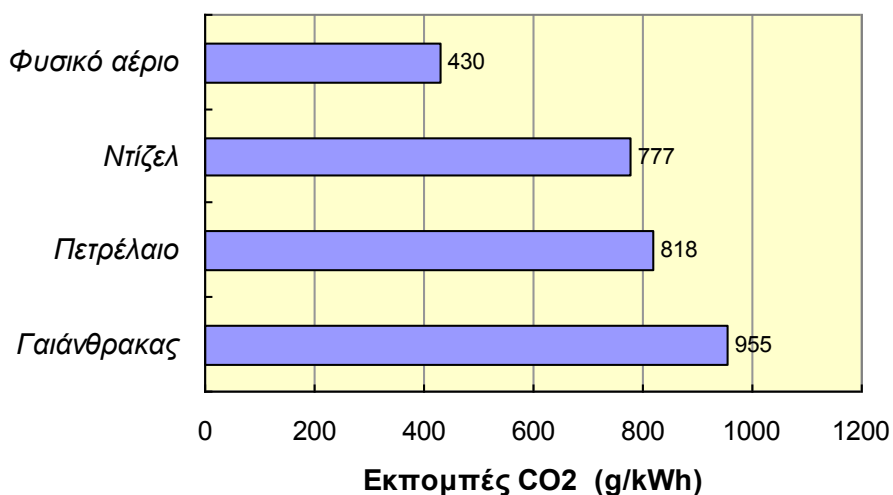
Στην Βιομηχανία ΑΕΒΑΛ μέχρι το κλείσιμό της πριν από αρκετά χρόνια, από το λιγνίτη Πτολεμαΐδας παραγόταν H_2 για την παραγωγή αμμωνίας. Η μέση σύσταση του αερίου εξαερίωσης της ΑΕΒΑΛ παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4. Σύσταση αερίου εξαερίωσης Λιγνίτη Πτολεμαΐδας.

Συστατικό	% mol
CO	54,8
H ₂	29,5
N ₂	1,7
CH ₄	0,2
CO ₂	13,8
H ₂ S	0,8

3.7. Περιβαλλοντικά προβλήματα

Ο άνθρακας είναι το λιγότερο καθαρό καύσιμο, λόγω κυρίως των εκπομπών οξειδίων θείου και αζώτου (όπως καταδεικνύεται στο Σχήμα 3.5) και σωματιδίων (ιπτάμενη τέφρα). Προβλήματα επίσης δημιουργούνται στο στάδιο της εξόρυξης (και κυρίως με τα επιφανειακά ορυχεία και τις καθιζήσεις), τις εκπομπές CO₂ και αιθάλης (επιπτώσεις στο αναπνευστικό σύστημα και στα μνημεία), την απόθεση-διάθεση της τέφρας. Μέρος της ιπτάμενης τέφρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία τσιμέντου και κεραμικών, ως εδαφικό πρόσθετο για μείωση της οξύτητας του εδάφους και στην παρασκευή συνθετικών ζεολίθων. Η ιπτάμενη τέφρα από τα ελληνικά πεδία λιγνίτη κρίνεται ακατάλληλη για την τελευταία χρήση, επειδή περιέχει μεγάλο ποσοστό οξειδίου του ασβεστίου. Χρησιμοποιείται όμως στη βιομηχανία τσιμέντου, στην κεραμοποιία, στην οδοποιία και στην κατασκευή φραγμάτων.



Σχήμα 3.5. Σύγκριση των εκπεμπόμενων ρύπων CO₂ και SO₂ ανά παραγόμενη kWh για διαφορετικά ορυκτά καύσιμα.

Οι προσεγγίσεις που μπορεί να γίνουν για τη μείωση των εκπομπών από ΑΗΜ μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

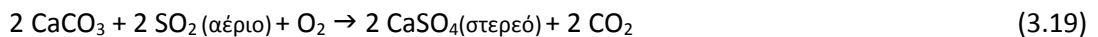
- 1) Χρήση ανθράκων με μικρότερο ποσοστό θείου και τέφρας. Πρακτικά δεν μπορεί να γίνει στις περισσότερες των περιπτώσεων.
- 2) Απομάκρυνση των οξειδίων του θείου και της τέφρας
- 3) Απομάκρυνση του θείου πριν από την καύση.
- 4) Αλλαγή στο καύσιμο που χρησιμοποιείται, π.χ. αντικατάσταση του γαϊάνθρακα με φυσικό αέριο.
- 5) Αραίωση των καυσαερίων με τη χρήση υψηλής υψικαμίνου για την καλύτερη διασπορά των ρύπων. Βέβαια αυτό δεν αποτρέπει το σχηματισμό όξινης βροχής στην ευρύτερη περιοχή.

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφούν εν συντομία οι προσεγγίσεις 2 και 3.

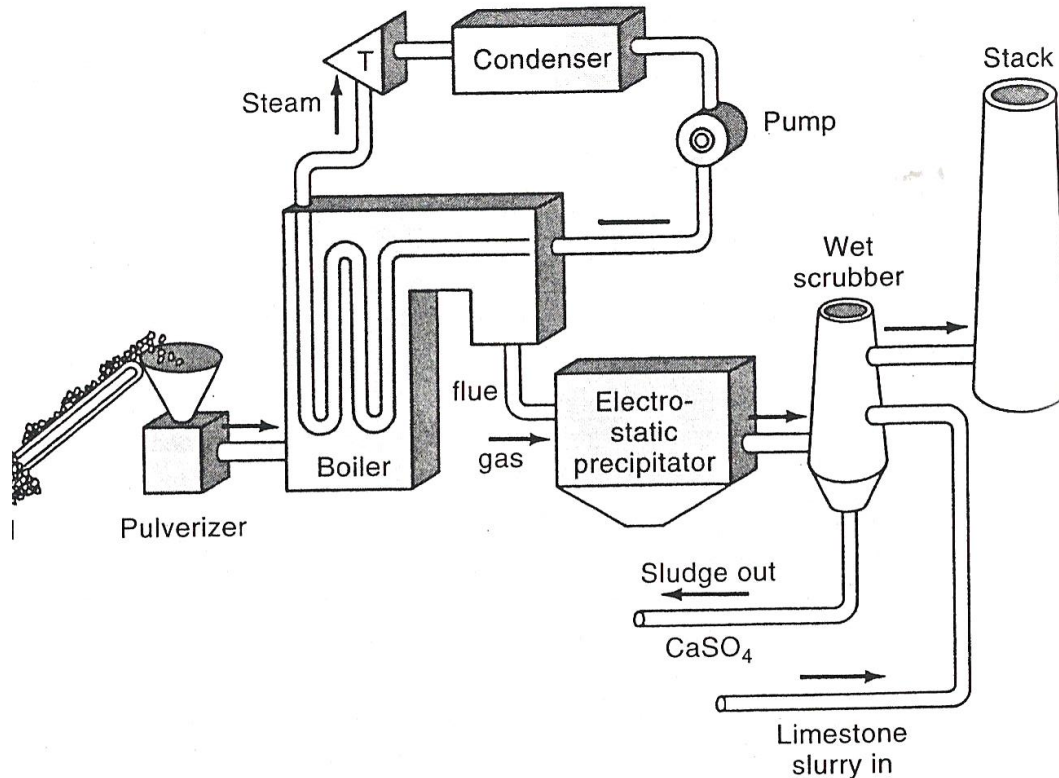
Για τον έλεγχο των ρύπων από τις ΑΗΜ έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί πολλές μέθοδοι. Τα σωματίδια που εκπέμπονται (το μέσο μέγεθος τους κυμαίνεται από 0,01 μέχρι 100 μm) μπορούν να απομακρυνθούν με κυκλώνες, ηλεκτροστατικά φίλτρα (electrostatic precipitators) και πλυντρίδες (scrubbers). Οι κυκλώνες είναι αποδοτικοί στην απομάκρυνση των μεγάλων σωματιδίων (>50 μm), αλλά όχι των σωματιδίων που είναι μικρότερα από 5 μm. Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα είναι απαραίτητα

σε κάθε ΑΗΜ και συνήθως επαρκούν για το σκοπό που τοποθετούνται. Αφαιρούν το 99% κ.β. της ιπτάμενης τέφρας, αλλά δεν είναι αποτελεσματικά στα σωματίδια με μέγεθος μικρότερο από 1 μm. Και βέβαια τα μικρότερα σωματίδια είναι που προκαλούν προβλήματα στο αναπνευστικό σύστημα. Μία άλλη τεχνική είναι η χρήση σακόφιλτρων (από βαμβάκι ή ίνες υάλου). Η απόδοση των σακόφιλτρων πλησιάζει το 99,9% κ.β. και μπορούν να απομακρυνθούν σωματίδια μέχρι και 0,1 μm σε μέγεθος.

Για την απομάκρυνση-δέσμευση των οξειδίων του θείου χρησιμοποιούνται ειδικές πλυντρίδες. Σε αυτές, τα καυσαέρια διέρχονται από πύργο, από την κορυφή του οποίου γίνεται ψεκασμός υδατικού διαλύματος ή καλύτερα αιωρήματος νερού και κονιοποιημένου ανθρακικού ασβεστίου ή δολομίτη. Η διεργασία αυτή καλείται αποθείωση των καυσαερίων. Το SO₂ αντιδρά με τα παραπάνω άλατα και σχηματίζεται θειικό ασβέστιο σύμφωνα με την αντίδραση.

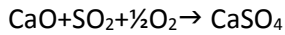


Το στερεό προϊόν είναι μια υγρή ιλύς θειικού ασβεστίου που μπορεί να διατεθεί με σχετική ευκολία. Η απόδοση της πλυντρίδας ανέρχεται σε 98%. Το υπόλοιπα καυσαέρια, αφού θερμανθούν ξανά, οδηγούνται στην υψικάμινο. Το Σχήμα 3.6 παρουσιάζει σχηματικά τα στάδια ελέγχου των ρύπων από μία ΑΗΜ. Το κόστος μιας μονάδας αποθείωσης δεν είναι μικρό. Το κόστος εγκατάστασης της μονάδας αποθείωσης αντιπροσωπεύει περίπου το 25% του παγίων κεφαλαίων της ΑΗΜ. Επιπλέον, η προσθήκη της μονάδας μειώνει τη συνολική απόδοση της μονάδας κατά 2-4% και αυξάνει το κόστος της kWh κατά 10-15%.

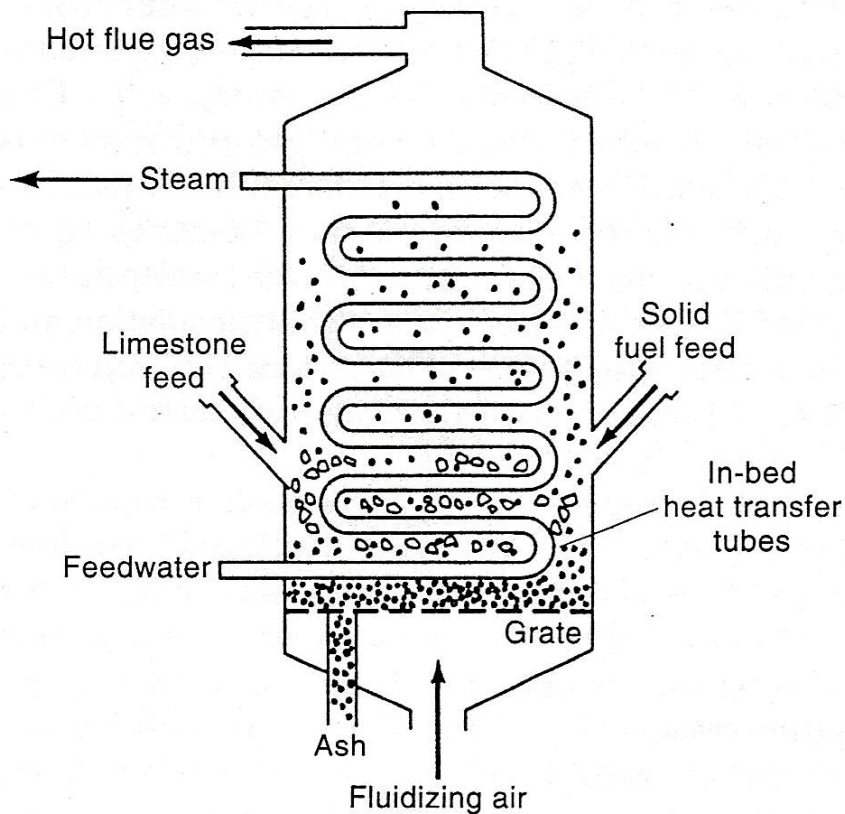


Σχήμα 3.6. Σχηματικό διάγραμμα μιας ΑΗΜ που παρουσιάζει τις κύριες μεθόδους ελέγχου των ρύπων.

Έλεγχος των εκπομπών οξειδίων του θείου πριν από ή κατά τη καύση του άνθρακα είναι δυνατόν να γίνει με διάφορους τρόπους, αλλά με υψηλό κόστος. Μία κατεύθυνση είναι να γίνει πρώτα ο εξευγενισμός του άνθρακα (μετατροπή σε συνθετικά καύσιμα) και κατόπιν να γίνει η καύση των «καθαρών» προϊόντων. Ένας άλλος αποδοτικά τρόπος είναι η καύση του άνθρακα σε ρευστοστερεά κλίνη (fluidized bed coal combustion, FBC), που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7. Στη ρευστοστερεά κλίνη καίγεται θρυμματισμένος άνθρακας σε μία κινούμενη κλίνη από αέρα και άμμο, στην οποία έχει προστεθεί ασβεστόλιθος. Η αντίδραση



συμβαίνει στο λέβητα και το θειικό ασβέστιο αφαιρείται ως μέρος των σωματιδίων στα καυσαέρια. Αν και η ιδέα της ρευστοστερεάς κλίνης υπάρχει από το 1920, η εφαρμογή της στην καύση του άνθρακα είναι σχετικά πρόσφατη. Υπάρχει μεγάλος αριθμός μικρών μονάδων ρευστοστερεάς κλίνης, αλλά στην περιοχή των μονάδων ισχύος 100-200 MW ο αριθμός τους είναι περιορισμένος.



Σχήμα 3.7. Μονάδα καύσης άνθρακα σε ρευστοστερεά κλίνη.

Τα οξείδια του αζώτου είναι δυσκολότερο να ελεγχθούν από τα οξείδια του θείου. Αυτό μπορεί να γίνει εν μέρει με τη μείωση της θερμοκρασίας καύσης ώστε να ελαττωθεί ο σχηματισμός των θερμικών NO_x . Μια άλλη προσέγγιση είναι η αποαζωτοποίηση (εισαγωγή αμμωνίας που αντιδρά με τα NO_x προς άζωτο και νερό, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως), μια διεργασία παρόμοια με την αποθείωση.

3.8. Πόροι και Αποθέματα

Εκτιμάται ότι με τον τρέχοντα ρυθμό κατανάλωσης των γαιανθράκων οι πόροι άνθρακα θα διαρκέσουν περισσότερο από 800 χρόνια, ενώ τα αποθέματα (πόροι άνθρακα που πληρούν ορισμένα οικονομικά και τεχνολογικά κριτήρια) 258 χρόνια (δεδομένα 2015, BP Statistical Review). Αντίθετα, αν η χρήση αυξάνει κατά 2% το χρόνο (ρεαλιστική εκτίμηση ιδιαίτερα με το ρυθμό αύξησης των τελευταίων ετών), οι πόροι θα διαρκέσουν 150 χρόνια και τα αποθέματα μόνον 65 χρόνια. Οι εκτιμήσεις αυτές ισχύουν προφανώς κάτω από τις εξής προϋποθέσεις: δεν θα ανακαλυφθούν νέα αξιόλογα κοιτάσματα και δεν θα βελτιωθεί η τρέχουσα απόδοση των διεργασιών εξόρυξης και αξιοποίησης των ανθράκων.

Τα μεγαλύτερα αποθέματα ανθράκων βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο. Οι Η.Π.Α., η Ρωσία και η Κίνα κατέχουν το 80% των παγκόσμιων ανακλήσιμων πόρων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8.

Η παραγωγή και κατανάλωση άνθρακα αυξήθηκε σημαντικά τα τελευταία 5 χρόνια (2010-2014, περίπου κατά 13%, Σχήμα 1.15), και παρά την οικονομική κρίση του 2008, ενώ οι τιμές του παρουσίασαν συστηματική άνοδο τη δεκαετία του 2000, τελευταία όμως 2-3 χρόνια, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.9, παρουσιάζουν κάμψη.

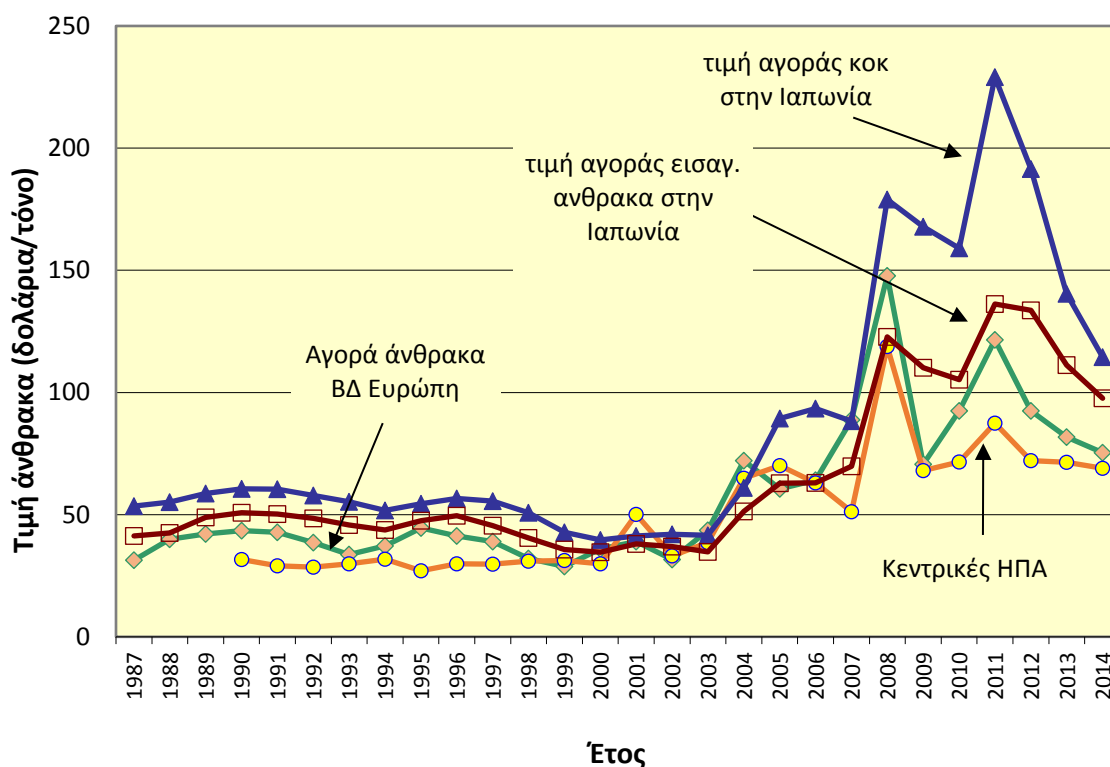


Σχήμα 3.8. Λόγοι αποθεμάτων γαιάνθρακα ανά περιοχή (αριστερά) και λόγοι αποθεμάτων (δεξιά) προς το ρυθμό παραγωγής του. Με το λόγο αυτόν εκτιμάται ο χρόνος εξάντλησης αυτού του καυσίμου στα 268 χρόνια με την προϋπόθεση του σταθερού ρυθμού παραγωγής (BP Statistical Review 2015).

3.9. Η κατάσταση στη χώρα μας

Το σημαντικότερο ενεργειακό καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα παραμένει ο λιγνίτης αν και το ποσοστό του μειώθηκε τα τελευταία χρόνια λόγω της λειτουργίας

μονάδων με φυσικό αέριο. Στον Πίνακα 1.9 έχει παρουσιαστεί ή εγκατεστημένη ισχύς της ΔΕΗ από διάφορες ενεργειακές πηγές. Δύο είναι οι κύριες περιοχές εξόρυξης λιγνίτη, η Πτολεμαΐδα (και η γύρω περιοχή) και η Μεγαλόπολη. Στο Σχήμα 3.10 δίνεται η εξέλιξη με το χρόνο της παραγωγής και της κατανάλωσης άνθρακα στην χώρα μας, ενώ στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζονται τα συνολικά αποθέματα λιγνίτη της χώρας μας και το ποσοστό που έχει ήδη εξορυχθεί. Η χώρα μας κατέχει τη δεύτερη θέση σε παραγωγή λιγνίτη στην Ευρωπαϊκή Ένωση και την έκτη θέση παγκοσμίως. Το σύνολο του ελληνικού λιγνίτη διατίθεται στην ηλεκτροπαραγωγή της χώρας και μικρό μόνο μέρος της τάξης του 1% χρησιμοποιείται για παραγωγή μπρικετών λιγνίτη για εξηλεκτρική χρήση (ως αναγωγικού μέσου σε δύο μεταλλουργικά εργοστάσια σιδηρονικελίου της Βαλκανικής).

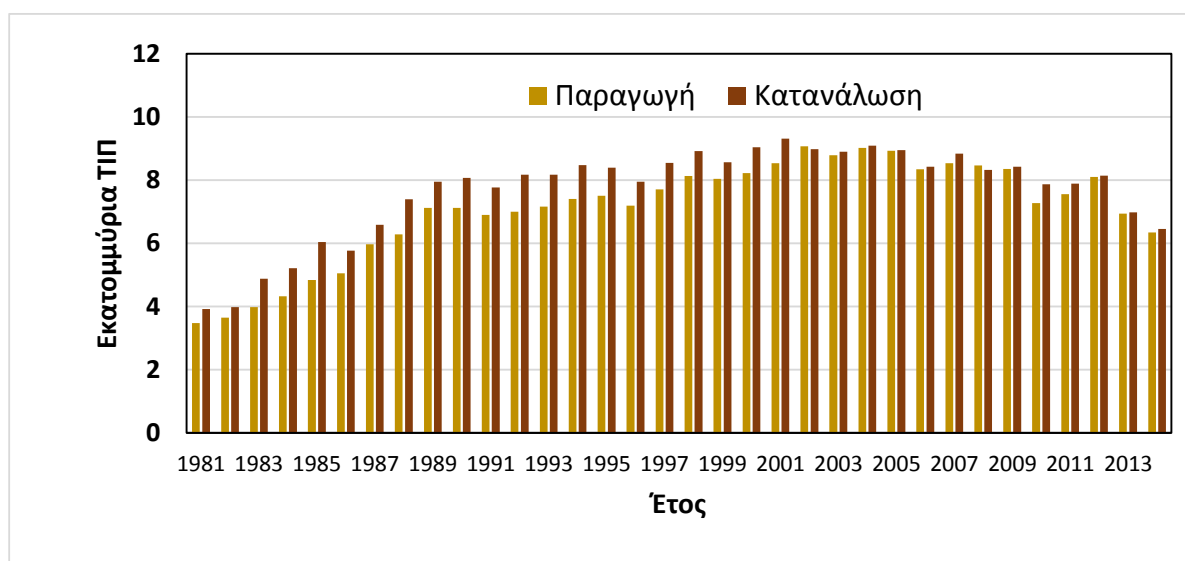


Σχήμα 3.9. Εξέλιξη των τιμών άνθρακα για 20 χρόνια.

Με βάση τα συνολικά αποθέματα και τον προγραμματιζόμενο ρυθμό κατανάλωσης στο μέλλον, υπολογίζεται ότι στην Ελλάδα οι ποσότητες λιγνίτη επαρκούν για τα επόμενα 61 χρόνια. Τα συνολικά βεβαιωμένα γεωλογικά αποθέματα λιγνίτη στη χώρα μας ανέρχονται σε περίπου 3 δισ. τόνους. Το 2014 εξορύχθηκαν συνολικά 50 εκ. τόνοι λιγνίτη. Οι επτά λιγνιτικοί σταθμοί της ΔΕΗ αποτελούν το 25% της εγκατεστημένης ισχύος και παρήγαγαν το 2014 περίπου το 48% της ηλεκτρικής ενέργειας στο διασυνδεδεμένο δίκτυο (Πίνακας 1.9). Τέλος, εκτός από το λιγνίτη, η Ελλάδα διαθέτει και ένα μεγάλο κοιτάσμα τύρφης (χαμηλής ποιότητας) στην περιοχή των Φιλιππων.

Η ποιότητα των ελληνικών λιγνιτών είναι χαμηλή. Η θερμογόνος δύναμη κυμαίνεται από 4-5 MJ/kg στις περιοχές Μεγαλόπολης, Αμυνταίου και Δράμας, από 5,4-6,0 MJ/kg στην περιοχή Πτολεμαΐδας και 7,5-10 MJ/kg στις περιοχές Φλώρινας και Ελασσόνας (Πίνακας 3.5). Σημαντικό συγκριτικό πλεονέκτημα των λιγνιτών της χώρας μας είναι η χαμηλή σχετικά περιεκτικότητα σε θείο. Για το λιγνίτη της Περιοχής Πτολεμαΐδας, με βάση τις συνηθισμένες τιμές περιεκτικότητας θείου σε

ξηραθέντα δείγματα ($S_{ολικό}=1,3\%$, $S_{καύσιμο}=0,6\%$, $S_{τέφρας}=3\%$) και θεωρώντας περιεκτικότητα τέφρας επί ξηρού 30% και υγρασία 55%, το θείο που περιέχεται σε 100 g φυσικού δείγματος είναι 0,58 g, από τα οποία 0,40 g δεσμεύονται στην τέφρα και 0,18 g διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα.

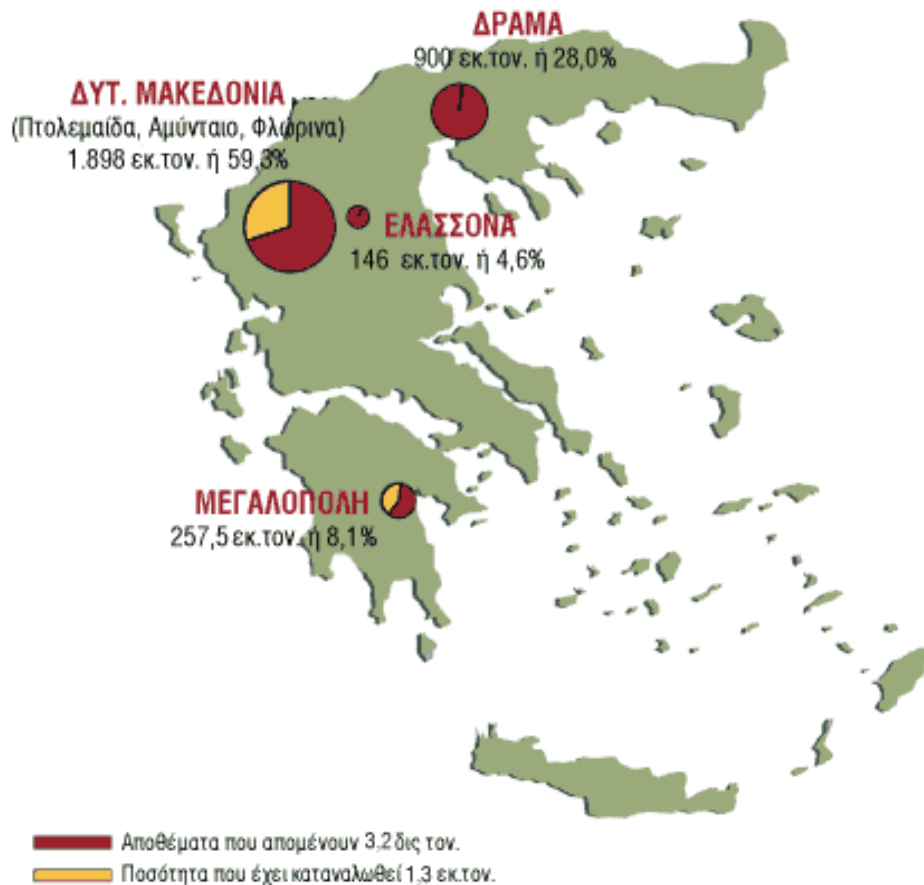


Σχήμα 3.10. Παραγωγή και κατανάλωση άνθρακα στην Ελλάδα μεταξύ 1981 και 2014. Πηγή: BP Statistical Review, 2015.

Ο ελληνικός λιγνίτης της Πτολεμαΐδας έχει μέση υγρασία 58% κ.β. και μέση θερμογόνο δύναμη 5,6 MJ/kg. Τα χαρακτηριστικά αυτά μαζί με την υψηλή τέφρα τον καθιστούν από τους φτωχότερους ίσως λιγνίτες διεθνώς, που προορίζονται για ηλεκτροπαραγωγή. Ο λιγνίτης Μεγαλόπολης πιθανώς να είναι και ο φτωχότερος υπό εκμετάλλευση λιγνίτης στον κόσμο.

Πίνακας 3.5. Στοιχειακή ανάλυση ελληνικών γαιανθράκων ύστερα από ξήρανση και αφαίρεση της τέφρας.

	Λιγνίτης Πτολεμαΐδας	Λιγνίτης Μεγαλόπολης	Τύρφη Φιλίππων
C % κ.β	65,8	60,2	61,4
H % κ.β	4,7	5,5	5,3
O % κ.β	26,6	25,6	29,2
N % κ.β	1,0	2,3	2,0
S % κ.β	1,9	6,4	2,1
A.Θ.Δ. MJ/kg	5,6	4,8	5,9
Πτητικά % κ.β	58,7	63,2	62,3



Σχήμα 3.11. Κοιτάσματα λιγνίτη στην Ελλάδα
(Πηγή ΔΕΗ: <https://www.dei.gr/el/i-dei/i-etairia/tomeis-drastiriotitas/oruxeia>).

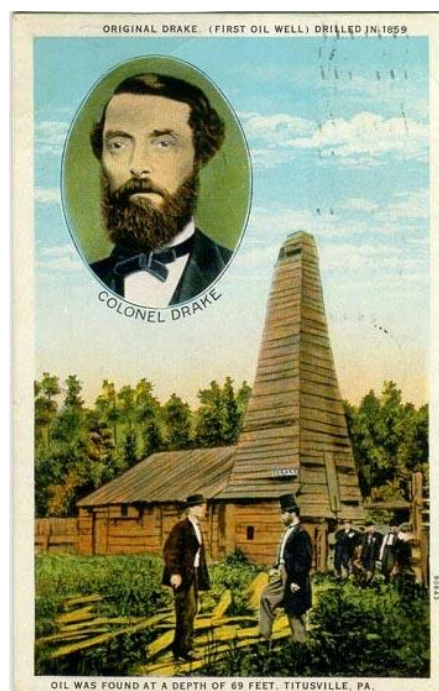
Τα κεφάλαια 3-6 βασίστηκαν κυρίως στην παρακάτω βιβλιογραφία:

- Βασάλος Ι. και Λεμονίδου Α., «Σημειώσεις - Ενεργειακές Πρώτες Ύλες», Τμήμα Χημικών Μηχανικών ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 2002.
- Νικολαΐδης, Ι., «Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης Ορυκτών Πόρων», Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Παν. Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, 2006.
- Χρηστάνης, Κ. «Ενεργειακές Πηγές & Ενεργειακές Πρώτες Ύλες», Τμήμα Γεωλογίας Παν. Πατρών, 2005.
- Boyle, G. et al. (ed.) "Energy Systems and Sustainability". Oxford Univ. Press, 2003.
- BP Company, "BP Statistical Review of World Energy, 2015" (www.bp.com)
- Hinrichs, R.A., "Energy – Its Use and the Environment", Saunders College Publ., 1996.
- Nelson, W.L., "Petroleum Refinery Engineering", Fourth Edition, McGraw-Hill, 1985.
- Radovic, L.R. "Energy and Fuels in Society", McGraw-Hill, 1997 (και <http://www.ems.psu.edu/~radovic/matsc101.html>)
- Ristinen, R.A., Kraushaar, J.J., "Energy and the Environment", John Wiley & Sons, 1999.
- Tyler Miller, G. «Βιώνοντας το Περιβάλλον», Ένατη έκδοση, Μετάφραση, Εκδόσεις Ίων, 1999.

4. ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ

4.1. Εισαγωγή – Ιστορικό

Το πετρέλαιο αποτελεί την κυριότερη πηγή ενέργειας στο σύγχρονο κόσμο, αλλά και την πρώτη ύλη για την παραγωγή πληθώρας χημικών και φαρμακευτικών προϊόντων. Το πετρέλαιο (αργό πετρέλαιο – crude oil) είναι ουσιαστικά ένα πολύπλοκο μίγμα αερίων, υγρών και στερεών υδρογονανθράκων (που περιέχουν όμως και μικρές ποσότητες οξυγόνου, θείου και αζώτου), το οποίο ανευρίσκεται σε πετρελαιοφόρα κοιτάσματα σε διάφορα μέρη του πλανήτη και κυρίως στην περιοχή της Μέσης Ανατολής. Τα κοιτάσματα αυτά έγιναν διαθέσιμα στον κόσμο σε χαμηλό κόστος μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο και διαφοροποίησαν τον τρόπο που ζούμε σήμερα. Συχνά αναφέρεται και ως «μαύρος χρυσός». Ο σουλτάνος του Μπρουνέι, οι βασιλικοί οίκοι της Μέσης Ανατολής, οι Ροκφέλλερ και οι Γκέττυ σίγουρα δεν θα διαφωνούσαν με τον όρο αυτό.



Σύντομη ιστορική ανασκόπηση

Η χρήση προϊόντων πετρελαίου πηγαίνει αρκετές χιλιετίες πίσω. Στην Μεσοποταμία υπήρχαν τουλάχιστον τριάντα περιοχές με επιφανειακές ενδείξεις και ροές πετρελαίου. Για τους Ασσύριους του 9^{ου} αιώνα π.Χ. η εκροή των απελευθερούμενων αερίων από τα κοιτάσματα πετρελαίου ήταν «η φωνή των θεών που έβγαινε από τους βράχους». Στο εύφλεκτο πετρέλαιο δόθηκε από τους Βαβυλώνιους το όνομα «νάφθα», δηλ. το υλικό που καίγεται με έντονη φλόγα. Η χρησιμοποίηση της πίσσας για τη στεγανοποίηση πλοιαρίων και την αδιαβροχοποίηση στεγών, στην τοιχοποιία και για φαρμακευτικούς σκοπούς ανάγεται στο 3000 π.Χ. Η ασφάλτος απετέλεσε σημαντικό εμπορικό προϊόν της Μεσοποταμίας και αναφέρεται από τον Στράβωνα και τον Τάκιτο. Η νάφθα, σε συνδυασμό με ασβέστη και άλλες προσμίξεις, ήταν το κύριο υλικό που χρησιμοποιούσαν οι Βυζαντινοί του 7^{ου} μ.Χ. αιώνα στο περίφημο «υγρό πυρ» (Greek fire). Ο Αγκικόλας, τον 16^ο αιώνα, περιγράφει στο De Re Metallica το διαχωρισμό της ασφάλτου από ασφαλτούχα πετρώματα με θέρμανση. Η πρώτη περιγραφή απόσταξης πετρελαίου καταγράφεται σε ένα φυλλάδιο που εκδόθηκε το 1625 στο Στρασβούργο. Κατά την προσεχτική απόσταξη αργού πετρελαίου, εκτός από τα βαριά κλάσματα που είναι κατάλληλα για φαρμακευτικές χρήσεις, λαμβάνονταν και κλάσματα που μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για λίπανση αξόνων, στη βαφική και ως φωτιστικό πετρέλαιο στις λάμπες.

Από το τέλος του 17^{ου} αιώνα χρονολογείται ευρεσιτεχνία στην Αγγλία που περιγράφει την επεξεργασία βιτουμενιούχων σχιστών (κονιοποίηση και απόσταξη) στο Pitchford-on-Severn με προϊόντα το διαλύτη «νέφτι» και την πίσσα (pitch). Το 1712 ο Έλληνας γιατρός Eyrini d'Eyrinis στο Neuchâtel της Ελβετίας εφηύρε τα επικαλυπτικά υλικά για του δρόμους που περιείχαν ασφάλτο και τριμμένα

πετρώματα. Έπρεπε όμως να περάσουν εβδομήντα και πλέον χρόνια για να αρχίσει κάπως να γενικεύεται η χρήση βελτιωμένων υλικών του πετρελαίου.

Η σύγχρονη βιομηχανία πετρελαίου δεν προήλθε πάντως από τις παραπάνω χρήσεις, αλλά από την ανάγκη για καλύτερο και αποδοτικότερο φωτισμό στη δεκαετία του 1850. Άλλωστε, η ίδια ανάγκη οδήγησε και στην τεχνολογία παραγωγής του φωταερίου από άνθρακα. Στην παραπάνω δεκαετία άρχισε να διατίθεται για φωτισμό το φωτιστικό πετρέλαιο ή παραφινέλαιο (paraffin-oil) στην Αγγλία (προερχόμενο από τους βιτουμενιούχους σχίστες της Σκωτίας), ενώ στην Αμερική το ίδιο υλικό, με το όνομα κηροζίνη, παραγόταν από την άσφαλτο του Τρινιδάντ. Το υλικό αυτό αντικατέστησε το όλο και ακριβότερο λίπος των φαλαινών που χρησιμοποιούνταν ως τότε για φωτιστικό έλαιο.

Οι πρώτες σχετικά προηγμένες τεχνολογικά γεωτρήσεις (που είχαν δανειστεί αρκετές ιδέες από τους Κινέζους) έγιναν μετά το 1830 για την εύρεση νερού ή ορυκτών αλάτων. Δεν ήταν λίγες οι φορές όμως που έπεφταν επάνω σε φλέβες πετρελαίου. Αν και η πρώτη ηθελημένη προσπάθεια για ανόρυξη γεώτρησης πετρελαίου ξεκίνησε τον Απρίλιο του 1857 στο Αμβούργο (και την ίδια χρονιά ολοκληρώθηκαν δύο χειροποίητες γεωτρήσεις στο Πλοέστι της Ρουμανίας), συχνά αναφέρεται ως απαρχή της εποχής του πετρελαίου η ανόρυξη γεώτρησης στις 27 Αυγούστου του 1859 στο Titusville της Πενσυλβάνιας από τον Edwin L. Drake, κατόπιν παραγγελίας του βιομηχάνου G.H. Bissell. Το βάθος της επιτυχούς αυτής γεώτρησης ήταν μόλις 69½ ft (21 m). Μέσα σε 15 χρόνια η παραγωγή πετρελαίου στην Πενσυλβάνια έφτασε τα 10 εκατομμύρια βαρέλια ετησίως.

Αρχικά, για την απόσταξη του αργού πετρελαίου χρησιμοποιούνταν οριζόντιοι κυλινδρικοί αποστακτήρες που θερμαίνονταν με ατμό και παρήγαγαν τρία κύρια προϊόντα: (1) τη βενζίνη (το ελαφρύτερο κλάσμα, που αρχικά θεωρήθηκε επικίνδυνο και άχρηστο), (2) την κηροζίνη και (3) το βαρύ υπόλειμμα που πωλούνταν ως καύσιμο. Μέχρι το 1880 στην Αμερική η όλη διεργασία απόσταξης γινόταν σε παρτίδες (διαλείπουσα διεργασία), ενώ στην Ευρώπη είχε εισαχθεί η συνεχής διεργασία.

Η έλευση του ηλεκτρισμού στη δεκαετία του 1880 και η συνεχής γενίκευση του ηλεκτρικού φωτισμού άρχισε να κάνει δύσκολη τη χρήση της κηροζίνης και να πιέζει τις τιμές του πετρελαίου προς τα κάτω. Έπρεπε να βρεθούν νέες χρήσεις των προϊόντων πετρελαίου. Αρχικά, το 1878, παρουσιάστηκε η σόμπα πετρελαίου στην Διεθνή Έκθεση του Παρισιού. Μέσα σε ένα χρόνο πουλήθηκαν μισό εκατομμύριο σόμπες. Έπρεπε όμως να περάσουν άλλα 25 χρόνια για να αρχίσει να παίρνει επάνω της η βιομηχανία πετρελαίου με τη μαζική παραγωγή βενζινοκίνητων αυτοκινήτων. Η εφεύρεση του βενζινοκίνητου από τους Daimler και Benz το 1885 έφερε τη μεγάλη επανάσταση στη χρησιμοποίηση των προϊόντων του πετρελαίου ως καύσιμα αυτοκινήτων. Η σημαντική αύξηση της κυκλοφορίας των βενζινοκίνητων αυτοκινήτων είχε ως συνέπεια να παρατηρηθεί έλλειψη σε βενζίνη με ταυτόχρονο πλεόνασμα σε κηροζίνη, λόγω της αυξανόμενης χρήσης των ηλεκτρικών λαμπτήρων. Η αλλαγή των δεδομένων της αγοράς ήταν η κύρια αιτία για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που θα παρήγαγαν επιπλέον βενζίνη χρησιμοποιώντας τα βαρέα κλάσματα.

Κύρια πηγή: Derry, T.K. & Williams, T.I., "A short history of technology", Dover, New York, 1960.

4.2. Σχηματισμός του πετρελαίου

Αν και η προέλευση του πετρελαίου δεν έχει πλήρως διαλευκανθεί, κατά την επικρατέστερη θεωρία, πιστεύεται ότι το πετρέλαιο δημιουργήθηκε κατά την περίοδο πριν από 100-300 εκατομμύρια χρόνια, όταν θαλάσσιοι φυτικοί μικροοργανισμοί (μονοκύτταρα φυτά – φυτοπλαγκτόν) και μονοκύτταροι ζωικοί μικροοργανισμοί (ζωοπλαγκτόν) συσσωρεύτηκαν, εξαιτίας διαφόρων τοπικών συνθηκών, και εγκλωβίστηκαν με τα χρόνια σε υδάτινους ταμιευτήρες (λίμνες, ωκεανούς), σχηματίζοντας μια αναερόβια μαύρη λάσπη. Με το χρόνο το πάχος των θαλάσσιων οργανικών

αποθέσεων μεγάλωσε, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης που επενεργούσε επάνω τους. Τα διάφορα στάδια δημιουργίας είναι:

1. Ανώριμο στάδιο (διαγένεση). Στο στάδιο αυτό σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία και πίεση και με τη βοήθεια βακτηριακής δράσης δημιουργήθηκε το **κηρογόνο** (kerogen) και το βιογενές μεθάνιο (biogenic methane), το οποίο συμμετέχει περίπου κατά 20% στα παγκόσμια αποθέματα μεθανίου. Το κηρογόνο συνίσταται από άνθρακα (69-80%), υδρογόνο (7-11%), άζωτο (1,25-2,5%), θείο (1-8%) και οξυγόνο (9-17%).

2. Ώριμο στάδιο. Σε μεγαλύτερα βάθη και υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις το κηρογόνο μετατράπηκε σε αργό πετρέλαιο και φυσικό αέριο, όταν από το κηρογόνο απομακρύνθηκαν το οξυγόνο και το άζωτο με κάποιο μηχανισμό. Το αρχικό υγρό ήταν μίγμα πετρελαίου και νερού, το οποίο με το χρόνο διαχωρίστηκε για να σχηματιστούν τα κοιτάσματα πετρελαίου.

3. Μετα-ώριμο στάδιο. Σε ιδιαίτερα υψηλή θερμοκρασία το αργό πετρέλαιο μετατράπηκε σε φυσικό αέριο πλούσιο σε μεθάνιο.

Επειδή το πετρέλαιο είναι ρευστό, μπορεί να «μεταναστεύσει» μέσα στο υπέδαφος καθώς σχηματίζεται. Απαραίτητη προϋπόθεση για το σχηματισμό μεγάλων και οικονομικά ανακτήσιμων αποθέματων πετρελαίου είναι η παρουσία συγκεκριμένων γεωλογικών σχηματισμών: (α) ενός ταμιευτήρα (ή «λίμνης»- oil pool, reservoir) πετρελαίου και (β) ένα πέτρωμα-κάλυμμα («παγίδα»-oil trap, cap rock) του πετρελαίου. Ένας ταμιευτήρας πετρελαίου χαρακτηρίζεται από υψηλό πορώδες (3-30%) και ικανή διαπερατότητα. Με άλλα λόγια ένας ταμιευτήρας πετρελαίου είναι μια συλλογή σταγόνων πετρελαίου σε ένα αμμώδες ή πορώδες πέτρωμα. Οι υδρογονάνθρακες συσσωρεύονται κυρίως σε πορώδη ψαμμιτικά ή ασβεστολιθικά πετρώματα. Από την άλλη μεριά, μια «παγίδα» πετρελαίου είναι ένα σχηματισμός μη πορώδους πετρώματος που συγκρατεί στη θέση του το πετρέλαιο του ταμιευτήρα. Είναι πράγματι φανερό ότι για να παραμείνουν στη θέση τους το πετρέλαιο και τα συνδεδεμένα αέρια, θα πρέπει να είναι παγιδευμένα έτσι ώστε να μη μεταναστεύσουν ούτε, κυρίως, προς στην επιφάνεια της γης, αλλά ούτε και πλευρικά. Τα πετρώματα-καλύμματα αποτελούνται συνήθως από σχιστόλιθους, αργίλους, ορυκτό αλάτι, γύψο κ.ά. Τα πετρώματα αυτά θα πρέπει να διαθέτουν πλαστικότητα, έτσι ώστε όταν δέχονται πιέσεις να ρηγματώνονται.

Ταμιευτήρες πετρελαίου μπορούν να σχηματιστούν με διαφορετικούς τρόπους. Το απλούστερο παράδειγμα είναι όταν διαστρωματωμένα ιζηματογενή πετρώματα (layered sedimentary rocks), που περικλείουν και ένα πέτρωμα-κάλυμμα, αναδιπλώνονται σε ένα αντίκλινο (Σχήμα 4.1α). Τα αντίκλινα θεωρήθηκαν από τους γεωλόγους ως οι καλύτερες περιοχές για αναζήτηση πετρελαίου για περισσότερα από 150 χρόνια, μια που σε τέτοιους γεωλογικούς σχηματισμούς βρίσκεται περίπου το 88% των πόρων πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η κάλυψη ενός πετρώματος που περιέχει πετρέλαιο από πέτρωμα-κάλυμμα μπορεί να γίνει και λόγω συνδυασμού ρηγμάτων (faults), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1β. Άλλες περιπτώσεις που μπορούν να σχηματιστούν κυρτά ιζηματογενή στρώματα είναι η

Η ηλικία του πετρελαίου:

10% : από την Παλαιozoική εποχή (>240 εκατ. χρόνια)

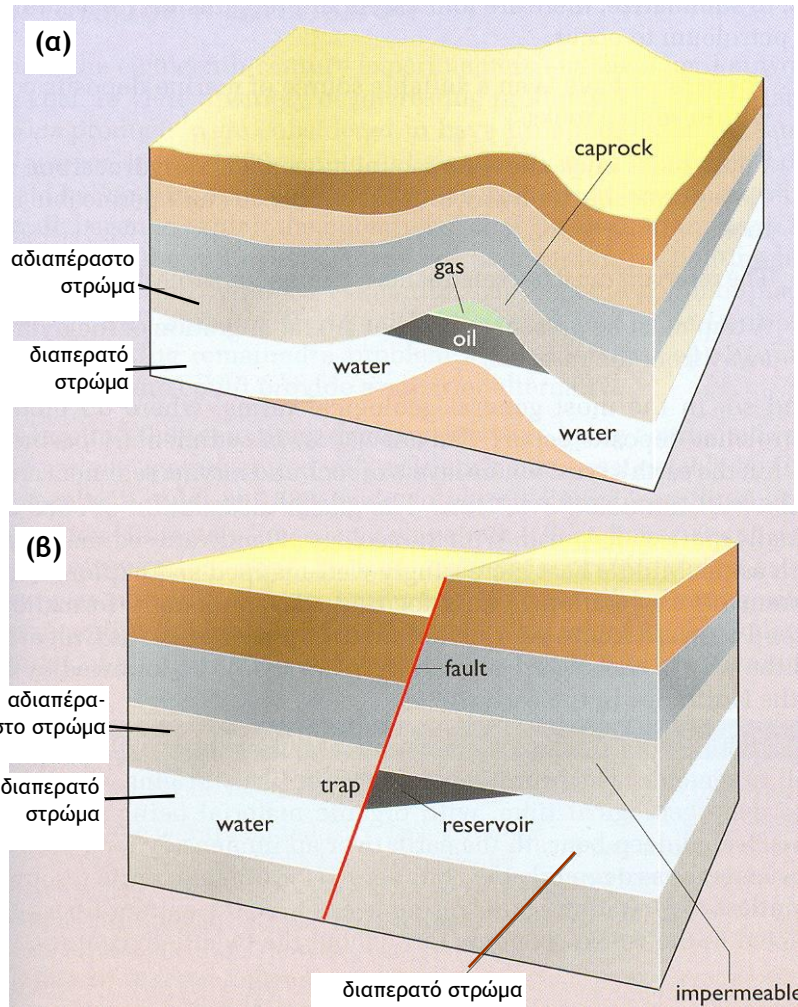
70% : από την Μεσοζωική εποχή (<240 και >65 εκατ. χρόνια)

20% : από την Καινοζωική εποχή (<65 εκατ. χρόνια)

Κατά τη Μεσοζωική εποχή:

- Το κλίμα ήταν τροπικό.
- Το πλαγκτόν ήταν άφθονο στους ωκεανούς.
- Οι πυθμένες των ωκεανών ήταν στάσιμοι και χωρίς οξυγόνο, σε αντίθεση με τη σημερινή κατάσταση.
- Εκεί είχε συσσωρευτεί μία μαύρη, πλούσια σε οργανικά, λάσπη.

πτύχωση των ιζημάτων ως προς ένα υψηλό σημείο και ο σχηματισμός τοξωτής κλίνης από την κίνηση προς τα πάνω ενός θόλου άλατος (Σχήμα 4.2). Στον ταμιευτήρα με τα χρόνια τα διάφορα ρευστά κατανέμονται σε σχεδόν οριζόντιες ζώνες ανάλογα με την πυκνότητά τους. Έτσι, το φυσικό αέριο βρίσκεται στο ανώτερο τμήμα του ταμιευτήρα και το αλατούχο νερό (αλμόλιπο-brine) στο κατώτερο



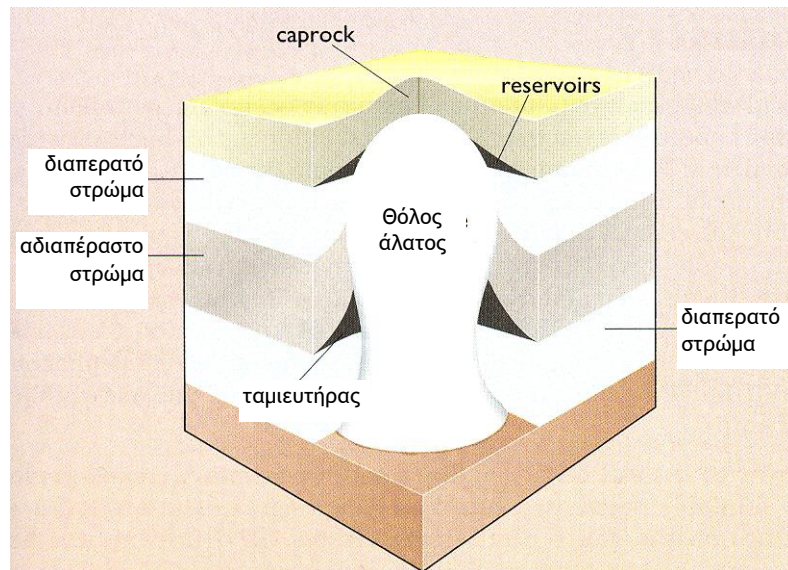
Σχήμα 4.1. Μηχανισμοί δημιουργίας παγίδων πετρελαίου. (Πηγή: Boyle et al., 2003)

Τέλος, έχουν προταθεί και θεωρίες για τη μη βιολογική προέλευση των υδρογονανθράκων, θεωρίες που βασίζονται κυρίως στην παρουσία υδρογονανθράκων και σε άλλα σώματα στο κοσμικό μας σύστημα. Μία ένδειξη για τη θεωρία αυτή αποτελεί η ύπαρξη του ισότοπου ^3He στο φυσικό αέριο και όχι του ^4He , το οποίο επικρατεί στην ατμόσφαιρα.

4.3. Συμβατικό και μη-συμβατικό πετρέλαιο

Το αργό πετρέλαιο βρίσκεται κυρίως εγκλωβισμένο σε πορώδεις ψαμμίτες οι οποίες καλύπτονται από αδιαπέραστα πετρώματα, όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.1 και 4.2. Το αλάτι αποτελεί άριστο αδιαπέραστο στρώμα (μικρό πορώδες, μικροί κόκκοι) και προέρχεται από την εξάτμιση θαλασσινού νερού. Το πετρέλαιο που μπορεί να ανακτηθεί με την πρωτογενή και τη δευτερογενή ανάκτηση, όπως θα δούμε παρακάτω, ανέρχεται σε ποσοστό 20-40% του συνολικού

πετρελαίου που βρίσκεται σε έναν ταμιευτήρα και καλείται «**συμβατικό**» πετρέλαιο (conventional oil). Το υπόλοιπο ποσοστό που μπορεί εν μέρει να ανακτηθεί με εξειδικευμένες και δαπανηρές μεθόδους καλείται «**μη-συμβατικό πετρέλαιο**». Στην δεύτερη κατηγορία κατατάσσεται και το πετρέλαιο που μπορεί να ανακτηθεί από τους βιτουμενιούχους σχίστες (shale oil, κοιτάσματα στις δυτικές Η.Π.Α. και αλλού), από πισσούχους άμμους (tar sands, βρίσκονται στον Καναδά) και από το βαρύ πετρέλαιο. Οι δύο πρώτοι τύποι μη-συμβατικού πετρελαίου συζητούνται στο τέλος αυτού του κεφαλαίου. Αυτοί οι τύποι πετρελαίου σχηματίζονται κατά την μετακίνηση του αργού πετρελαίου προς την επιφάνεια της γης και την απώλεια των ελαφρύτερων και πτητικότερων συστατικών του.



Σχήμα 4.2. Γεωλογική παράσταση εγκλείσματος πετρελαίου με θόλο άλατος.
(Πηγή: : Boyle et al., 2003).

4.4 Σύσταση του αργού πετρελαίου

Το αργό πετρέλαιο είναι ένα ανομοιογενές υγρό που αποτελείται από πληθώρα υδρογονανθράκων. Περισσότερες από 3000 ενώσεις έχουν ταυτοποιηθεί στο αργό πετρέλαιο και περιλαμβάνουν από αέρια, όπως το μεθάνιο, μέχρι και βαριές ασφαλικές ενώσεις που δεν αποστάζουν. Η σύστασή του κατά βάρος είναι κατά 80-87% από άνθρακα (ενώσεις με αριθμό ατόμων C από 5 μέχρι και 100) και κατά 11-16% από υδρογόνο (πολύ μεγαλύτερο ποσοστό από ότι τους άνθρακες), ενώ βρίσκονται σε μικρότερες ποσότητες οξυγόνο (<3%), θείο (<4%) και άζωτο (<1%). Επίσης απαντώνται και πολύ μικρές συγκεντρώσεις (μέχρι 0,1%) μετάλλων, όπως σίδηρος, νικέλιο, χρώμιο, βανάδιο κτλ. Σημειώνεται ότι παρά τις μικρές ποσότητες του θείου και του αζώτου, η παρουσία τους προκαλεί τα γνωστά περιβαλλοντικά προβλήματα με τις εκπομπές οξειδίων θείου και αζώτου (βλ. Κεφάλαιο 2).

Το αργό πετρέλαιο παρουσιάζει μεγάλες διαφορές σε όλες τις φυσικές ιδιότητές του, εξαιτίας της έντονης διαφοροποίησής της σύστασής του. Το χρώμα του μπορεί να είναι μαύρο, πράσινο ή φαιοκίτρινο. Επίσης η πυκνότητά του και το ιξώδες ποικίλλουν αρκετά. Το σημείο ζέσεως των διαφόρων συστατικών του πετρελαίου κυμαίνεται από -160°C μέχρι 540°C. Οι κυριότερες οργανικές ενώσεις στο αργό πετρέλαιο ανήκουν στις παραφινικές, τις ολεφινικές, τις ναφθενικές και τις

αρωματικές σειρές υδρογονανθράκων και περιέχουν συνήθως από πέντε μέχρι είκοσι άτομα άνθρακα. Οι παραφίνες συγκεντρώνονται κυρίως στα χαμηλού σημείου ζέσεως κλάσματα, οι ναφθενικές και οι μονοαρωματικές ενώσεις στα μέσου σημείου ζέσεως κλάσματα, ενώ τα πολυαρωματικά μόνο στα βαριά κλάσματα. Η σύσταση του αργού και, συνεπώς, οι ιδιότητές του εξαρτώνται σημαντικά από την περιοχή από την οποία προέρχεται το κοίτασμα. Τα πετρέλαια που είναι πλούσια σε θείο παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα κατά την επεξεργασία και την αξιοποίησή τους, όπως είναι η διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών, οι οσμές, η χαμηλή απόδοση και οι εκπομπές οξειδίων του θείου.

Οι φυσικές διεργασίες της διύλισης πετρελαίου (κλασματική απόσταση, απορρόφηση και ψύξη) επηρεάζονται σημαντικά από τις ιδιότητες των υδρογονανθράκων, ενώ οι χημικές διεργασίες (π.χ. αποθείωση, πυρόλυση) επηρεάζονται από την παρουσία του θείου, του αζώτου και του οξυγόνου και από το είδος των υδρογονανθράκων.

Οι **παραφίνες** ή **αλκάνια** είναι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες με χημικό τύπο C_nH_{2n+2} και χαρακτηρίζονται από σταθερότητα. Το όνομα κάθε μέλους της ομάδας αυτής των υδρογονανθράκων έχει κατάληξη -ανιο, όπως το αιθάνιο και το εξάνιο (Σχήμα 4.3α). Υπάρχουν κανονικές και διακλαδισμένες παραφίνες, όπως το 2-2 διμέθυλοβουτάνιο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3β. Οι παραφίνες με $n < 5$ βρίσκονται σε αέρια κατάσταση σε συνθήκες περιβάλλοντος, ενώ οι παραφίνες με $n > 15$ είναι ιξώδη (κηρώδη) υγρά. Παραφίνες υπάρχουν σε κάθε αργό πετρέλαιο, αν και έχει αναφερθεί αργό πετρέλαιο από το Οχάιο (Η.Π.Α.) που δεν περιέχει καθόλου παραφινικά συστατικά.

Οι **ολεφίνες** ή **αλκένια** (χημικός τύπος C_nH_{2n}) αποτελούν ακόρεστους υδρογονάνθρακες που μπορούν να ενωθούν με άλλα στοιχεία ή ομάδες (Cl, Br, κ.ά.). Το όνομα κάθε μέλους της ομάδας αυτής καταλήγει -ένιο, όπως αιθυλένιο και εξένιο (Σχήμα 4.3γ και δ). Οι ολεφίνες αντιδρούν και διαλύονται στο θειικό οξύ και έτσι μπορούν να απομακρυνθούν από άλλους υδρογονάνθρακες. Οι ελαφρότερες ολεφίνες δεν απαντώνται στο πετρέλαιο, αλλά βρίσκονται στα προϊόντα πυρόλυσης.

Οι **ναφθενικές ενώσεις** (χημικός τύπος C_nH_{2n}), αν και έχουν τον ίδιο χημικό τύπο με τις ολεφίνες, είναι κυκλικές, κορεσμένες ενώσεις (Σχήμα 4.3ε). Στην ονομασία προηγείται το πρόθεμα κύκλο- (κυκλοβουτάνιο, κυκλοπεντάνιο, κυκλοεξάνιο). Τα ναφθένια βρίσκονται σχεδόν σε όλα τα είδη πετρελαίου.

Οι **αρωματικοί υδρογονάνθρακες** (χημικός τύπος C_nH_{2n-6}) είναι ακόρεστοι κυκλικοί υδρογονάνθρακες που αποτελούνται από έναν ή περισσότερους βενζολικούς δακτυλίους (Σχήμα 4.3στ), και τυπικά αποτελούν παράγωγα του βενζολίου, C_6H_6 . Έχουν χαρακτηριστικό άρωμα και πολλές από αυτές τις ενώσεις έχουν χαρακτηριστεί καρκινογόνες. Οι υδρογονάνθρακες αυτοί είναι ιδιαίτερα επιδεκτικοί στην οξείδωση και παραγωγή οργανικών οξέων. Μερικά πετρέλαια, όπως της Σουμάτρας, είναι πλούσια σε αρωματικά συστατικά.

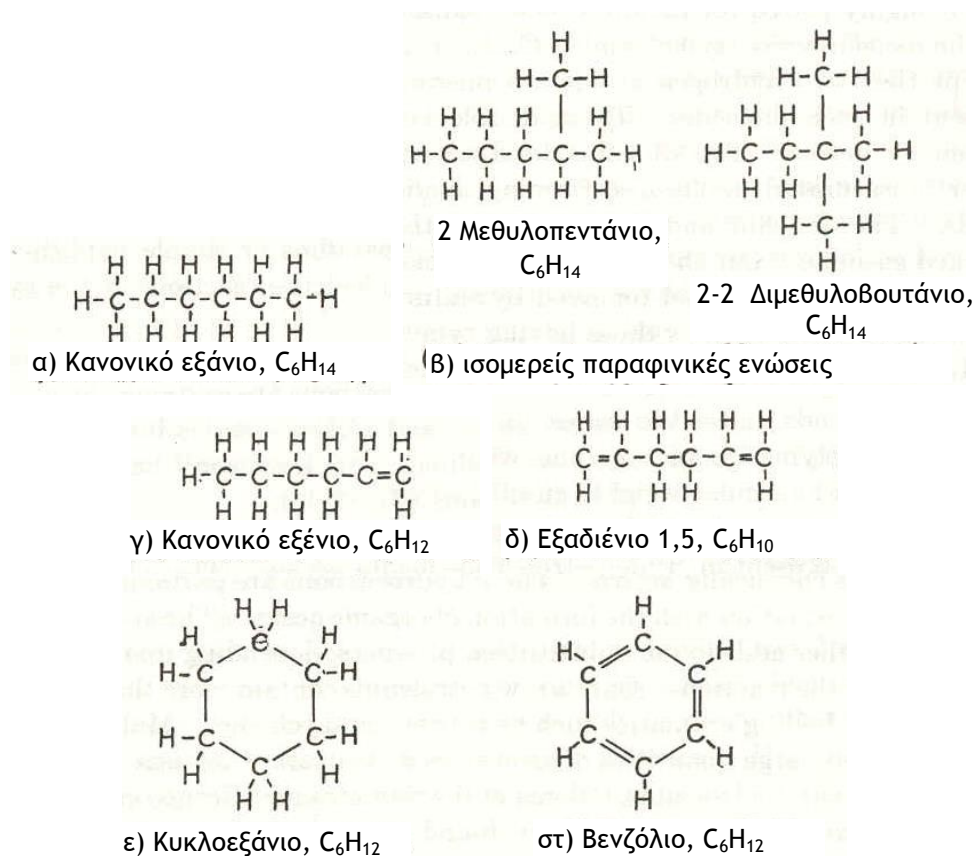
4.5. Ταξινόμηση των πετρελαίων

Το αργό πετρέλαιο ταξινομείται με διάφορους τρόπους. Ο πλέον συνήθης τρόπος αφορά στην ταξινόμησή του σε σχέση με την πυκνότητά του σε μια ορισμένη θερμοκρασία στην κλίμακα °API, η οποία ορίζεται ως

$$^{\circ}\text{API} = 141,5/\rho - 131,5 \quad (4.1)$$

όπου ρ είναι το ειδικό βάρος του πετρελαίου στους 15,6°C. Έτσι, °API=10 αντιστοιχεί σε $\rho=1$, όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 4.1. Τα περισσότερα πετρέλαια ανήκουν στην κατηγορία των

ελαφρών και των ενδιάμεσων αργών πετρελαίων. Βαρύτερα πετρέλαια χαρακτηρίζονται ως μη συμβατικά. Ένα ελαφρύ αργό πετρέλαιο παράγει κατά τη διύλιση του πολύ περισσότερα ελαφρά προϊόντα (βενζίνη) και λιγότερα βαριά από ό,τι παράγει ένα βαρύ αργό πετρέλαιο.



Σχήμα 4.3. Χημικοί τύποι υδρογονανθράκων.

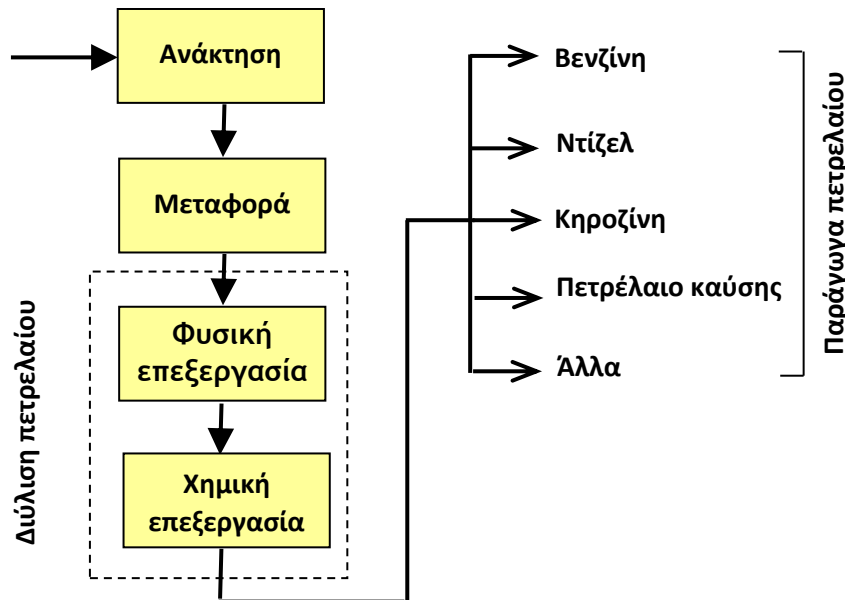
Πίνακας 4.1. Ταξινόμηση του πετρελαίου σε σχέση με την πυκνότητά του

	°API	ρ (στους 15,6°C)
Ελαφρύ	>40 °API	<0,825
Μέσο	30 - 40 °API	0,825-0,875
Βαρύ	< 30 °API	0,825- 0,875
Πολύ βαρύ	< 10 °API	> 1

4.6. Αξιοποίηση αργού πετρελαίου

Η αξιοποίηση του αργού πετρελαίου είναι πολύ πιο σύνθετη διεργασία από την αξιοποίηση του άνθρακα, όπως παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 4.4. Ειδικότερα, ή όλη προετοιμασία-επεξεργασία του πετρελαίου προτού φθάσει στον καταναλωτή είναι εξαιρετικά περίπλοκη διαδικασία και περνάει από πολλά στάδια. Ο λόγος είναι ότι παρά την παραπλήσια στοιχειακή ανάλυση, τα

διάφορα είδη αργού πετρελαίου έχουν πολύ διαφορετική χημική δομή. Επίσης, τα προϊόντα του διυλιστηρίου μπορεί να είναι πολλά και διαφορετικά. Τα περισσότερα χρησιμοποιούνται ως καύσιμα, αλλά ένα σημαντικό ποσοστό χρησιμοποιούνται ως βάση στην πετροχημική βιομηχανία για παραγωγή πλαστικών, φαρμακευτικών ουσιών, υφασμάτων κτλ.



Σχήμα 4.4. Σχηματική παράσταση των σταδίων αξιοποίησης του πετρελαίου.

4.6.1. Ανάκτηση πετρελαίου

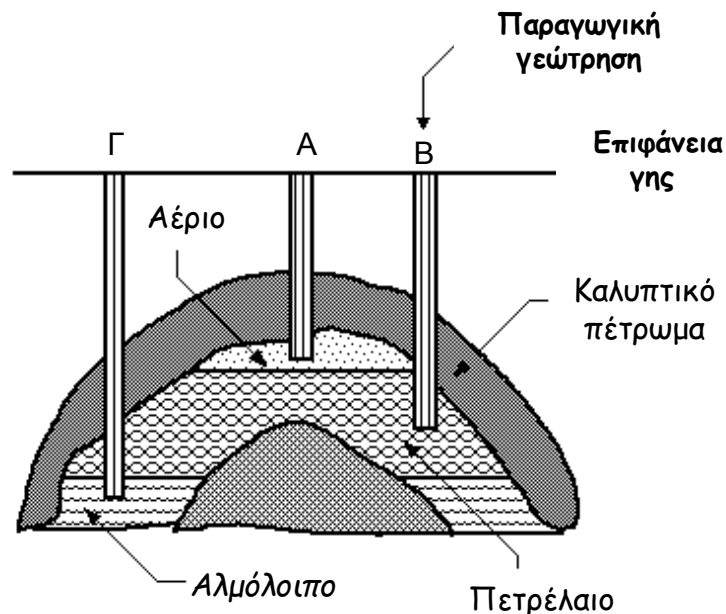
Η ανάκτηση του πετρελαίου γίνεται με γεώτρηση στη τοποθεσία που έχουν επιλέξει οι γεωλόγοι. Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται ότι από τις τρεις γεωτρήσεις, μόνον η γεώτρηση Β θα δώσει πετρέλαιο. Επιπλέον γεωτρήσεις χρειάζονται για να διαπιστωθεί το μέγεθος του κοιτάσματος και το βάθος του.

Η εξόρυξη του πετρελαίου γίνεται με διάφορους τρόπους και με διαφορετικό κόστος. Συνήθως διακρίνεται σε:

Πρωτογενής ανάκτηση (primary recovery). Η ανάκτηση αυτή βασίζεται στη φυσική ροή του πετρελαίου λόγω της πίεσης που επικρατεί στον ταμειευτήρα και στην άντληση. Η πρώτη μέθοδος είναι προφανώς η περισσότερο οικονομική μέθοδος παραγωγής και εφαρμόζεται εφόσον η παραγωγή είναι ικανοποιητική. Σε μερικές περιοχές στη Μέση Ανατολή η φυσική ροή ανέρχεται σε 65 m³/hr. Κατά μέσο όρο ανακτάται περίπου το 15-20% των αποθεμάτων, αν και η πρωτογενής ανάκτηση μπορεί να φτάνει μόλις το 5%. Αν και η πρώτη ουσιαστικά γεώτρηση πετρελαίου έφτασε στα 21 m, σήμερα έχουν γίνει ερευνητικές γεωτρήσεις σε βάθος 8 km.

Δευτερογενής ανάκτηση (secondary recovery). Η ανάκτηση αυτή βασίζεται στην πλημμύριση του κοιτάσματος με νερό ή στην εισαγωγή αερίου (Σχήμα 4.6). Συνήθως ανακτάται ένα 5-20% από το κοίτασμα. Ο συνδυασμός πρωτογενούς και δευτερογενούς ανάκτησης καλείται συμβατική ανάκτηση. Με τη συμβατική ανάκτηση εξορύσσεται κατά μέσο όρο το 30% ενός κοιτάσματος (η περιοχή τιμών κυμαίνεται από 15-40%).

Τριτογενής ή προχωρημένη ανάκτηση (*tertiary or enhanced recovery*). Αποτελεί δαπανηρή μέθοδο και πραγματοποιείται με τη μείωση του ιξώδους του πετρελαίου που επιτυγχάνεται με θέρμανση με ατμό ή με εισαγωγή διοξειδίου του άνθρακα ή κατάλληλων τασιενεργών ουσιών. Αποδοτικότερη είναι η τριτογενής ανάκτηση με την εισαγωγή ατμού. Με το συνδυασμό των τριών τρόπων ανάκτησης μπορεί να ανακτηθεί ποσοστό πετρελαίου της τάξης του 40 με 80%, αλλά ξοδεύεται περίπου το ένα τρίτο της παραγωγής.



Σχήμα 4.5. Επιλογή θέσης για γεώτρηση.

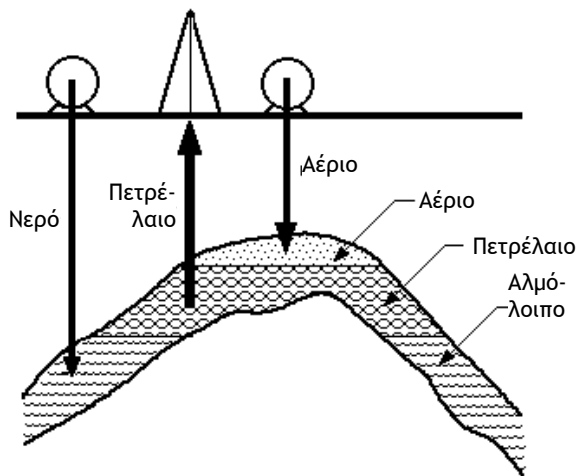
Τριτογενής ή προχωρημένη ανάκτηση (*tertiary or enhanced recovery*). Αποτελεί δαπανηρή μέθοδο και πραγματοποιείται με τη μείωση του ιξώδους του πετρελαίου που επιτυγχάνεται με θέρμανση με ατμό ή με εισαγωγή διοξειδίου του άνθρακα ή κατάλληλων τασιενεργών ουσιών. Αποδοτικότερη είναι η τριτογενής ανάκτηση με την εισαγωγή ατμού. Με το συνδυασμό των τριών τρόπων ανάκτησης μπορεί να ανακτηθεί ποσοστό πετρελαίου της τάξης του 40 με 80%, αλλά ξοδεύεται περίπου το ένα τρίτο της παραγωγής.

Ο ταμιευτήρας πετρελαίου συχνά βρίσκεται στη θάλασσα, οπότε πρέπει να κατασκευαστεί κάποιο είδος σταθερής πλατφόρμας για να προχωρήσει η συχνά επικίνδυνη και δαπανηρή διαδικασία ανόρυξης της γεώτρησης. Οι πλατφόρμες χωρίζονται σε επιπλέουσες με αγκύρωση και σε σταθερές, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.7. Η ανόρυξη γεωτρήσεων στη θάλασσα κοστίζουν μέχρι και 10 φορές περισσότερο από το αν η ανόρυξη γινόταν στην ξηρά.

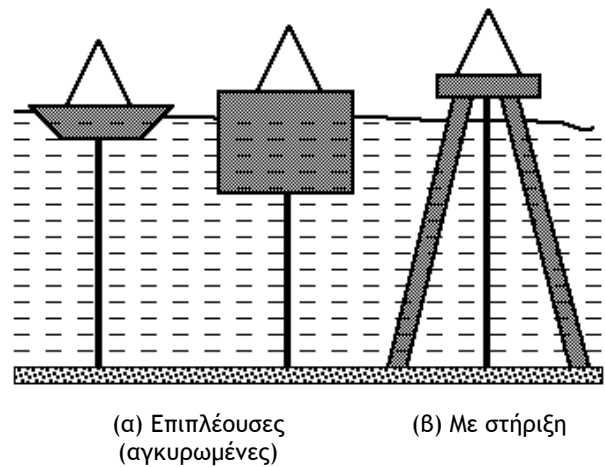
4.6.2. Μεταφορά αργού πετρελαίου

Το αργό πετρέλαιο μετά την εξόρυξή του μεταφέρεται στα διυλιστήρια πετρελαίου για την αξιοποίηση των κλασμάτων του. Για την ασφαλή μεταφορά του είναι απαραίτητη η απομάκρυνση ορισμένων αερίων συστατικών του, όπως είναι το μεθάνιο, το αιθάνιο, το προπάνιο, το υδρόθειο κτλ. Η μεταφορά γίνεται με δύο κυρίως τρόπους: με αγωγούς πετρελαίου και με δεξαμενόπλοια. Μόνο στις Η.Π.Α. υπάρχει ένα δίκτυο αγωγών μεταφοράς αργού πετρελαίου μήκους μεγαλύτερου από 320.000 km. Ο αγωγός πετρελαίου της Αλάσκας (που αρχίζει από το Prudhoe Bay μέχρι το γνωστό, σήμερα, λιμάνι του Valdez και ολοκληρώθηκε το 1977), μήκους 1300 km, έχει δυνατότητα μεταφοράς

2 εκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου την ημέρα, δηλ. το 25% της παραγωγικής δυναμικότητας των Η.Π.Α.



Σχήμα 4.6. Δευτερογενής ανάκτηση πετρελαίου με την εισαγωγή νερού και αερίων.



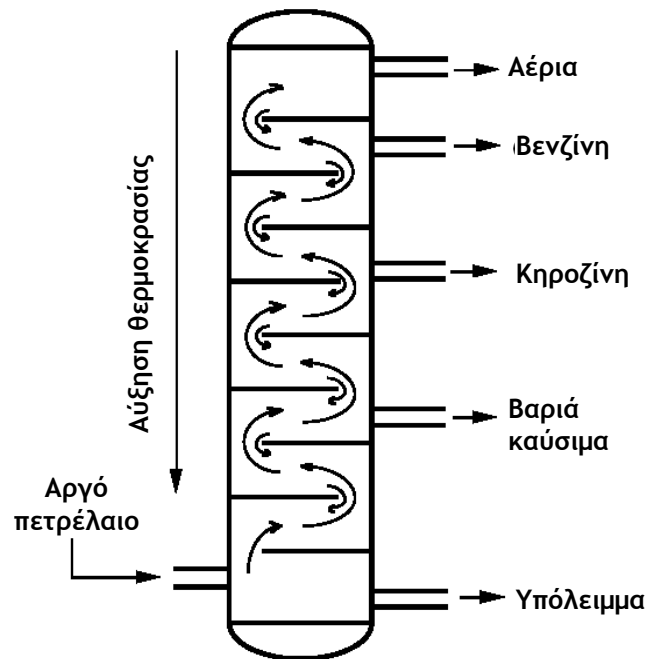
Σχήμα 4.7. Τύποι πλατφόρμας άντλησης πετρελαίου.

Η μεταφορά του αργού πετρελαίου με υπερδεξαμενόπλοια (supertankers) είναι ιδιαίτερα οικονομική. Τα πλοία αυτά μπορούν να μεταφέρουν μέχρι 50 εκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου (ποσότητα που αντιστοιχεί σε τριήμερη κατανάλωση πετρελαίου στις Η.Π.Α.) και ένα μειονέκτημά τους είναι ότι δεν μπορούν να περάσουν από τη διώρυγα του Παναμά. Ένα άλλο πρόβλημα σχετίζεται με το κίνδυνο διαρροών και δημιουργίας πετρελαιοκηλίδων από τέτοια μεγάλα δεξαμενόπλοια, όπως συνέβη το 1989 με το πλοίο Ecxhon Valdez που κτύπησε σε βράχο στις ακτές της Αλάσκας.

4.6.3. Διύλιση του αργού πετρελαίου

Το αργό πετρέλαιο αποθηκεύεται σε δεξαμενές και υφίσταται αρχικά μια φυσική διεργασία απομάκρυνσης των περιεχόμενων ανόργανων αλάτων. Κατόπιν οδηγείται στην ατμοσφαιρική στήλη απόσταξης για το διαχωρισμό του σε επιμέρους κλάσματα και την αναβάθμιση του πετρελαίου σε προϊόντα που να ικανοποιούν τις εκάστοτε ανάγκες του καταναλωτή. Η όλη διεργασία αναβάθμισης του πετρελαίου καλείται **διύλιση** (refining). Το κύριο στάδιο της διύλισης είναι η απόσταξη (distillation), που είναι η φυσική διεργασία του διαχωρισμού ουσιών ανάλογα με την πτητικότητα τους (σημείο ζέσεως). Η διεργασία επιτελείται σε μία στήλη ή πύργο απόσταξης (distillation tower), όπως παρουσιάζεται εντελώς απλοποιημένα στο Σχήμα 4.8. Οι ατμοί από το θερμανθέν αργό πετρέλαιο ανέρχονται στη στήλη και επανασυμπυκνώνονται καθώς ανεβαίνουν από δίσκο σε δίσκο. Οι πλέον πτητικές ουσίες (ενώσεις με το χαμηλότερο σημείο ζέσεως) γίνονται καθαρότερες κοντά στην κορυφή της στήλης, ενώ ουσίες με πολύ υψηλά σημεία ζέσεως εμπλουτίζονται στον πυθμένα. Σε οποιαδήποτε θέση στον πύργο υπάρχει ένα μίγμα ατμών υδρογονανθράκων, που όταν υγροποιηθούν δίνουν ένα υγρό με χαρακτηριστική σύσταση και περιοχή πτητικότητας των συστατικών του. Επειδή ο διαχωρισμός βασίζεται σε μία φυσική διεργασία, το βρασμό, δε γίνονται //χημικές αντιδράσεις και διάσπαση ενώσεων.

Τα κυριότερα κλάσματα που διαχωρίζονται στην ατμοσφαιρική στήλη είναι: ελαφρά αέρια και ελαφρά νάφθα, βαριά νάφθα, κηροζίνη, ντίζελ, ελαφρύ αεριέλαιο και βαρύ υπόλειμμα. Προκειμένου να γίνει ο διαχωρισμός των κλασμάτων είναι απαραίτητη η προθέρμανση του αργού σε υψηλή θερμοκρασία, περίπου 370°C, ώστε να σχηματιστούν δύο φάσεις διαχωρισμού, μία αέρια και μία υγρή. Αυτό σημαίνει ότι η διύλιση του πετρελαίου απαιτεί σημαντικά ποσά ενέργειας.

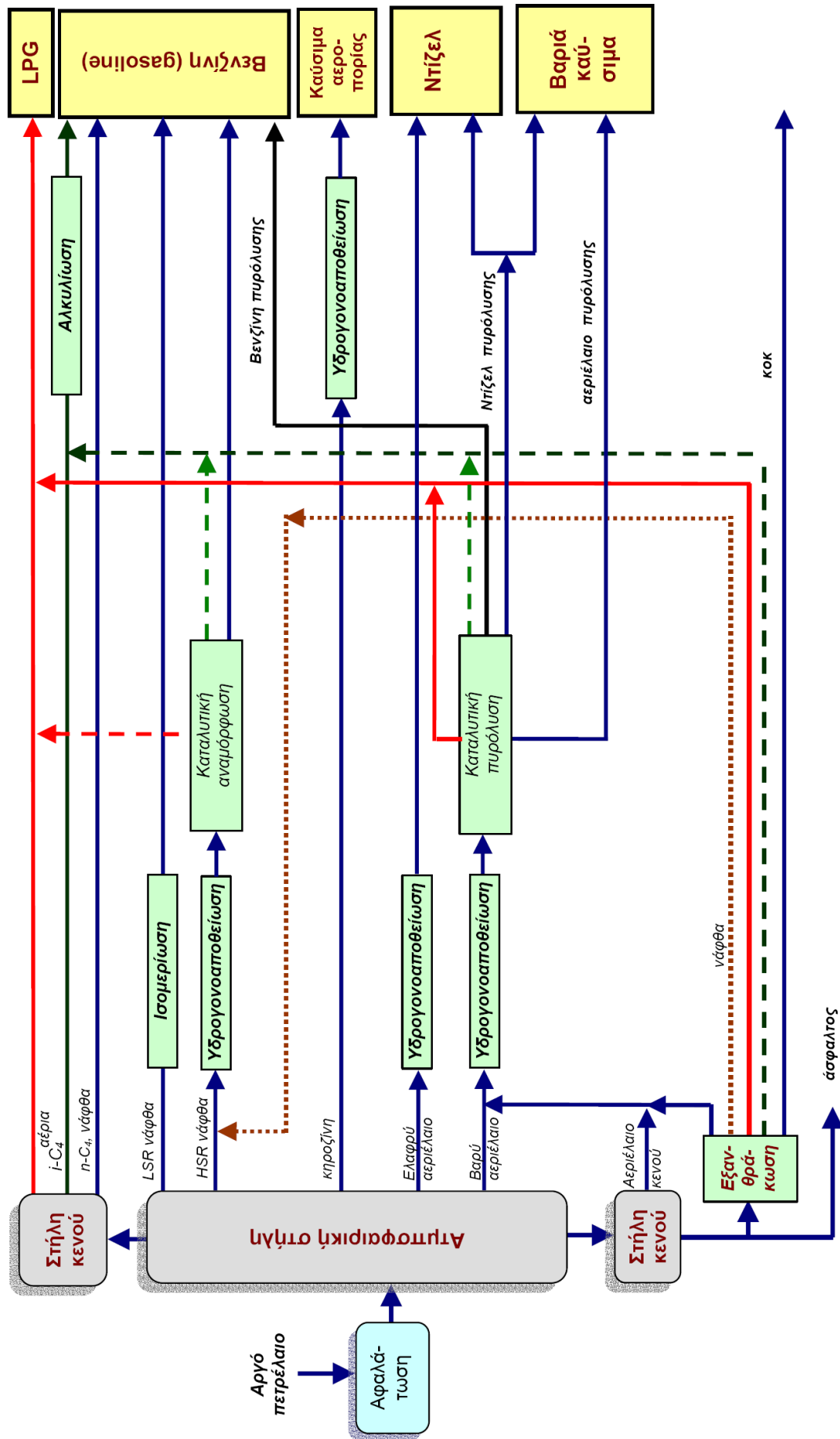


Σχήμα 4.8. Σχηματική απεικόνιση στήλης απόσταξης.

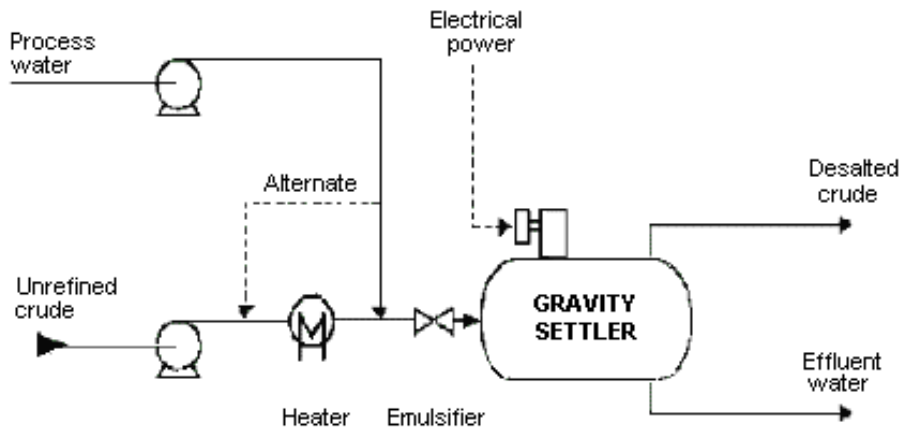
Τα κλάσματα από την ατμοσφαιρική στήλη απόσταξης οδηγούνται σε άλλες εγκαταστάσεις για περαιτέρω επεξεργασία και βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Στο Σχήμα 4.9 δίδεται το διάγραμμα ροής ενός σύγχρονου διυλιστηρίου. Ακολουθούν οι ορισμοί των σπουδαιότερων διεργασιών που γίνονται σε ένα διυλιστήριο, ενώ στο επόμενο κεφάλαιο θα περιγραφούν τα κυριότερα προϊόντα από ένα διυλιστήριο. Υπενθυμίζεται, ότι κάθε διυλιστήριο έχει το δικό του διάγραμμα ροής, το οποίο συνήθως καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του αργού πετρελαίου που χρησιμοποιεί, το διαθέσιμο εξοπλισμό, τη ζήτηση των προϊόντων και το κόστος λειτουργίας.

- **Αφαλάτωση (desalting).** Αφαλάτωση είναι η κατεργασία του αργού πετρελαίου για την απομάκρυνση των διαλυμένων αλάτων, και κυρίως των χλωριούχων αλάτων, NaCl και MgCl₂, που βρίσκονται είτε διαλυμένα στο πετρέλαιο ή μέσα στο νερό του γαλακτώματος νερού/πετρελαίου. Γίνεται με τη προσθήκη νερού και το διαχωρισμό των δύο μη-αναμίξιμων φάσεων με χημικό ή ηλεκτροστατικό τρόπο (Σχήμα 4.10). Η αφαλάτωση πραγματοποιείται πριν από την είσοδο στη στήλη της ατμοσφαιρικής απόσταξης.

- **Ατμοσφαιρική απόσταξη (atmospheric distillation).** Απόσταξη είναι η μέθοδος του φυσικού διαχωρισμού των κλασμάτων του αργού πετρελαίου που βασίζεται στη διαφορά πτητικότητας των συστατικών του σε πίεση λίγο ανώτερη της ατμοσφαιρικής. Πρόκειται για θεμελιώδη διεργασία σε κάθε διυλιστήριο. Το υπόλειμμα της ατμοσφαιρικής στήλης οδηγείται στη στήλη απόσταξης κενού. Τα κυριότερα προϊόντα από τη στήλη αυτή έχουν αναφερθεί προηγουμένως.



Σχήμα 4.9. Η αλληλουχία των διεργασιών και τα προϊόντα σε διυλιστήριο αργού πετρελαίου (πηγή: Βασάλας και Λεμονίδου, 2002).



Σχήμα 4.10. Σχηματική παρουσίαση της αφαλάτωσης.

- **Απόσταξη κενού (vacuum distillation).** Η απόσταξη γίνεται σε μειωμένη πίεση, χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής. Η χαμηλότερη πίεση ελαττώνει τα σημεία ζέσεως των ενώσεων του μίγματος, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός χωρίς φαινόμενα διάσπασης των βαρύτερων μορίων, τα οποία θα ήταν δυνατόν να συμβούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες στην ατμοσφαιρική στήλη. Λαμβάνονται το αερίελο κενού και το υπόλειμμα κενού. Το τελευταίο μπορεί να υποστεί περαιτέρω θερμική πυρόλυση στη μονάδα εξανθράκωσης, ενώ αν δεν υποστεί θερμική διεργασία διατίθεται ως άσφαλτος ή ως βαρύ καύσιμο.

- **Θερμική πυρόλυση (thermal cracking).** Είναι η θερμική μετατροπή βαρέων κλασμάτων πετρελαίου σε ελαφρότερα και κοκ, με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης του αργού σε ελαφρά προϊόντα. Πραγματοποιείται σε συνθήκες 1-3 atm και 450-480°C, χωρίς την παρουσία καταλυτών. Παράδειγμα θερμικής πυρόλυσης αποτελεί η διάσπαση του δωδεκανίου, $C_{12}H_{26}$, σε βουτάνιο (C_4H_{10}) και οκτάνιο (C_8H_{18}). Η μέθοδος αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου για να ικανοποιήσει τις αυξημένες ανάγκες σε βενζίνη.

- **Καταλυτική πυρόλυση (catalytic cracking).** Αποτελεί σήμερα την κύρια διεργασία για τη βελτίωση της απόδοσης ενός διυλιστηρίου σε βενζίνη και αναπτύχθηκε κατά τη δεκαετία του 1940. Με τη διεργασία αυτή μίγματα βαρέων κλασμάτων μικρής αξίας διασπώνται παρουσία εκλεκτικών καταλυτών (κυρίως αργιλοπυριτικών ενώσεων, φυσικών ή συνθετικών) σε ελαφρότερα προϊόντα (ολεφίνες, βενζίνη, ντίζελ κ.α.). Πραγματοποιείται σε συνθήκες πίεσης 1,5-2 atm και θερμοκρασίας 480-530°C. Παράλληλα βέβαια παράγεται και κοκ που εναπ τίθεται στους πόρους του καταλύτη. Η κατανομή των προϊόντων από τη διεργασία αυτή εξαρτάται από την ποιότητα τροφοδοσίας, τις ιδιότητες του καταλύτη και τις συνθήκες λειτουργίας της μονάδας.



- **Καταλυτική αναμόρφωση (catalytic reforming).** Με την καταλυτική αναμόρφωση επιτυγχάνεται η μετατροπή ναφθενικών ή παραφινικών υδρογονανθράκων σε ενδιάμεσα προϊόντα υψηλότερων οκτανίων που χρησιμοποιούνται ως συστατικά της βενζίνης. Η μετατροπή αυτή επιτυγχάνεται παρουσία εκλεκτικών καταλυτών σε πίεση 20-40 atm και θερμοκρασία 500-530°C. Οι καταλύτες που χρησιμοποιούνται δηλητηριάζονται από την παρουσία βαρέων μετάλλων, υδροθείου

και άλλων προσμίξεων και γι' αυτό το λόγο η τροφοδοσία αυτής της διεργασίας θα πρέπει προηγουμένως να υδρογονοαποθειώνεται.

- *Κατεργασία με υδρογόνο (hydrotreating)*. Υδρογονοκατεργασία είναι η επεξεργασία κλασμάτων πετρελαίου με υδρογόνο υπό συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας και παρουσία καταλύτη με σκοπό τη μείωση της περιεκτικότητας σε θείο, άζωτο, μέταλλα, αρωματικούς υδρογονάνθρακες και ολεφίνες. Περικλείει διάφορες υπο-διεργασίες. *Υδρογονοαποθείωση (hydrodesulfurization)* είναι πιο συγκεκριμένα η μετατροπή των οργανικών ουσιών που περιέχουν θείο σε υδρογονάνθρακες και υδρόθειο, με σκοπό τη μείωση της περιεκτικότητας των κλασμάτων πετρελαίου (π.χ. ντίζελ, κηροζίνη) σε θείο και την τήρηση των σχετικών προδιαγραφών των τελικών προϊόντων. Επίσης, *υδρογονοδιάσπαση (hydrocracking)* καλείται η καταλυτική διάσπαση υδρογονανθράκων σε περιβάλλον υδρογόνου και σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες.

- *Ισομερίωση (isomerization)*. Ισομερίωση είναι αναδιάταξη των ατόμων στη μοριακή δομή, χωρίς αλλαγή της χημικής σύστασης, με τη χρήση εκλεκτικών καταλυτών σε συνθήκες πίεσης 13-26 atm και θερμοκρασίας 120-180°C. Σε ένα διυλιστήριο χρησιμοποιείται για τη βελτίωση των φυσικών και λειτουργικών ιδιοτήτων, π.χ. για την αύξηση του αριθμού οκτανίων της νάφθας.

- *Αλκυλίωση (alkylation)*. Αλκυλίωση ονομάζεται η παραγωγή διακλαδισμένων παραφινών (με υψηλό αριθμό οκτανίων) από ολεφίνες (με αριθμό ατόμων άνθρακα 3-5 και κυρίως βουτυλένιο) με αντίδραση με ισοπαραφίνες (4 ή 5 άτομα άνθρακα, π.χ. ισοβουτάνιο). Γίνεται παρουσία καταλύτη H_2SO_4 ή HF σε θερμοκρασία 10-20°C.

- *Εξανθράκωση (coking)*. Σκοπός της διεργασίας αυτής είναι η θερμική μετατροπή και η αναβάθμιση βαριών κλασμάτων (π.χ. μαζούτ) σε ελαφρότερα προϊόντα και σε κοκ πετρελαίου.

- *Ανάκτηση θείου*. Η επεξεργασία του υδροθείου που παράγεται σε διάφορες μονάδες του διυλιστηρίου με τελικό αποτέλεσμα την ανάκτηση μοριακού θείου, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως ως πρώτη ύλη στη χημική βιομηχανία.

- *Ιξωδόλυση (visbreaking)*. Η επεξεργασία του ατμοσφαιρικού υπολείμματος και αποστάγματος κενού σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία με αποτέλεσμα τη διάσπασή του και συνακόλουθη ελάττωση του ιξώδους και του σημείου ροής των προϊόντων, με παραγωγή υγραερίων, νάφθας και ντίζελ.

Το αργό πετρέλαιο ως καύσιμο

Ο άνθρακας και το φυσικό αέριο απαιτούν σχετικά μικρή προετοιμασία πριν από τη χρήση τους ως καύσιμα. Σε σύγκριση με αυτούς τους ορυκτούς πόρους, το πετρέλαιο απαιτεί πολύ μεγάλη προετοιμασία πριν χρησιμοποιηθεί, διότι αποτελείται από εκατοντάδες ενώσεις που συμπεριφέρονται πολύ διαφορετικά στην καύση. Η καύση αργού πετρελαίου είναι δυνατή για ηλεκτροπαραγωγή αφού ως υγρό καύσιμο έχει κάποια πλεονεκτήματα έναντι του άνθρακα. Όμως, αποτελεί μεγάλη σπατάλη μια τέτοια εφαρμογή επειδή ο εξευγενισμός του μπορεί να δώσει δεκάδες προϊόντα με μεγάλη προστιθέμενη αξία. Η καλύτερη χρήση του αργού πετρελαίου απαιτεί το διαχωρισμό του σε μικρές ομάδες συστατικών και αυτό γίνεται στο διυλιστήριο. Τα προϊόντα αυτά είναι μίγματα διαφόρων ενώσεων και όχι καθαρές ενώσεις.

Για παράδειγμα η βενζίνη είναι μίγμα ενώσεων και κοστίζει σήμερα περίπου 1,50 €/L. Το οκτάνιο κοστίζει 100 €/L, αλλά κανένας μας δεν θα το χρησιμοποιούσε αντί της βενζίνης στο αυτοκίνητό του. Έτσι δηλαδή, χρησιμοποιώντας κλάσματα πετρελαίου επιτυγχάνεται ένας συμβιβασμός μεταξύ ποιότητας και κόστους.

4.6.4. Προϊόντα Πετρελαίου

Τα διάφορα προϊόντα που λαμβάνονται από τη διύλιση του αργού πετρελαίου μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

- Καύσιμα μηχανών εσωτερικής καύσης (βενζίνη, ντίζελ, καύσιμα αεροπλάνων)
- Καύσιμα θέρμανσης (υγραέρια, ντίζελ θέρμανσης, μαζούτ)
- Μη καύσιμα προϊόντα (άσφαλτος, λιπαντικά, διαλύτες, κηροί κ.ά.)
- Τροφοδοσίες στην παραγωγή πετροχημικών (νάφθα, αερίελαιο κ.ά.)

Εκτός από την τελευταία κατηγορία, που χρησιμοποιείται όπως λαμβάνεται από τον πύργο απόσταξης, για την παραγωγή των άλλων απαιτούνται διάφορες διεργασίες. Τα κυριότερα προϊόντα του πετρελαίου περιγράφονται εν συντομία παρακάτω.

1) Αέρια Προϊόντα - Υγραέρια

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται ενώσεις που βρίσκονται στην αέρια φάση σε κανονικές συνθήκες: CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} και οι αντίστοιχες ολεφίνες. Το CH_4 συχνά χρησιμοποιείται ως καύσιμο στο διυλιστήριο, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως πρώτη ύλη για παραγωγή υδρογόνου με αναμόρφωση με ατμό (steam reforming). Το C_2H_6 επίσης χρησιμοποιείται ως καύσιμο και ως πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου ή αιθυλενίου. Το C_3H_8 συχνά χρησιμοποιείται κυρίως στο υγραέριο LPG (liquefied petroleum gas, μίγμα βουτανίου και προπανίου υπό πίεση σε υγρή κατάσταση). Τα βουτάνια χρησιμοποιούνται ως συστατικά της βενζίνης, του υγραερίου LPG και ως τροφοδοσία στη μονάδα της αλκυλίωσης.

2) Βενζίνη

Η βενζίνη (motor gasoline) αποτελεί μίγμα υδρογονανθράκων με όρια απόσταξης από 38 έως 205°C. Στην πράξη, το τελικό εμπορικό προϊόν που διατίθεται προς πώληση προέρχεται από ανάμιξη πολλών ρευμάτων σε τέτοια αναλογία, ώστε το μίγμα να είναι κατάλληλο για καύσιμο στους βενζινοκινητήρες. Σήμερα, η παραγωγή της βενζίνης αντιπροσωπεύει το 30% της παραγωγής ενός διυλιστηρίου. Τα συστατικά ρεύματα που χρησιμοποιούνται για ανάμιξη στην παραγωγή βενζίνης είναι απευθείας απόσταγμα βενζίνης (LSR), βενζίνη καταλυτικής πυρόλυσης (catalytic cracking gasoline), καταλυτικής αναμόρφωσης (catalytic reformat), βενζίνη υδρογονοπυρόλυσης (hydrocracked gasoline), βενζίνη πολυμερισμού (polymer gasoline), βενζίνη αλκυλίωσης (alkylate gasoline) και οξυγονούχα πρόσθετα για την αύξηση του αριθμού οκτανίου. Οι κύριες ιδιότητες που ενδιαφέρουν στο τελικό προϊόν και δεδομένου ότι η βενζίνη χρησιμοποιείται αποκλειστικά σχεδόν στους βενζινοκινητήρες είναι η τάση ατμών, η καμπύλη απόσταξης και τα αντικροτικά χαρακτηριστικά της (αριθμός οκτανίων, research octane number – RON και motor octane number – MON).

Η βενζίνη (ή νάφθα) απευθείας απόσταξης (LSR gasoline) λαμβάνεται από τον πύργο ατμοσφαιρικής απόσταξης με όρια απόσταξης 82°C. Αποτελείται κυρίως από παραφίνες χαμηλού μοριακού βάρους και έχει αριθμό οκτανίου χαμηλό (RON=60-70). Αύξηση του αριθμού οκτανίου αυτής της βενζίνης κατά 12 έως 15 μονάδες μπορεί να επιτευχθεί με ισομερισμό.

Η βενζίνη καταλυτικής πυρόλυσης είναι το κύριο προϊόν της διεργασίας της καταλυτικής πυρόλυσης των βαρέων κλασμάτων του πετρελαίου και συμμετέχει κατά 30-40% στην τελική παραγωγή βενζίνης. Περιέχει υψηλά ποσοστά αρωματικών (25-30%), ολεφινών (22-30%), με τις παραφίνες να κυμαίνονται από 35 μέχρι 45%. Ο αριθμός οκτανίου της βενζίνης αυτής είναι περίπου 92-93.

Η βενζίνη καταλυτικής αναμόρφωσης είναι το προϊόν που είναι βαρύτερο από το πεντάνιο στη μονάδα καταλυτικής αναμόρφωσης (RON=94-100 χωρίς προσθήκη μολύβδου). Η αύξηση του αριθμού οκτανίου μέσω της καταλυτικής αναμόρφωσης οφείλεται κυρίως στη μετατροπή των παραφινών σε αρωματικά, τα οποία παρουσιάζουν υψηλό αριθμό οκτανίου. Ορισμένες αρωματικές ενώσεις εμφανίζουν καρκινογόνο δράση και υπάρχει περιορισμός στη χρήση τους.

Η βενζίνη πολυμερισμού παρασκευάζεται με πολυμερισμό ελαφρών ολεφινών, οπότε και παράγονται ολεφίνες στην περιοχή απόσταξης της βενζίνης. Είναι γνωστό βέβαια ότι οι ολεφίνες συμβάλλουν στη δημιουργία φωτοχημικού νέφους.

Η βενζίνη αλκυλίωσης είναι αποτέλεσμα της αντίδρασης του ισοβουτανίου με προπυλένιο, βουτυλένιο ή πεντένιο για παραγωγή διακλαδισμένων υδρογονανθράκων στην περιοχή βρασμού της βενζίνης. Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτού του προϊόντος είναι η απουσία αρωματικών και ολεφινών και ο υψηλός RON.

Τα οξυγονούχα πρόσθετα προστίθενται στη βενζίνη κυρίως για την αύξηση του αριθμού οκτανίου. Κυρίως χρησιμοποιείται MTBE (μεθυλιωμένος τεταρτοταγής βουτυλαιθέρας) σε ποσοστά που δεν ξεπερνούν το 3-5% της βενζίνης. Εκτός από την αύξηση του αριθμού οκτανίου, η ύπαρξη των οξυγονούχων προσθέτων στη βενζίνη επιδρά ευνοϊκά στην ελάττωση των εκπομπών σε CO και σε υδρογονάνθρακες. Παρά τις θετικές επιπτώσεις στην καύση της βενζίνης, πρόσφατα έχει απαγορευτεί στην Καλιφόρνια ως καρκινογόνος (λόγω κυρίως της υδατοδιαλυτότητας της).

Αριθμός οκτανίου (ή οκτανίων ή απλώς οκτάνια): γενικός όρος που περιγράφει την ικανότητα μιας βενζίνης να μειώνει το «κτύπημα» σε ένα βενζινοκινητήρα. Η ενεργειακή απόδοση ενός καυσίμου μπορεί να εκτιμηθεί με περισσότερους από έναν αριθμούς οκτανίου. Έτσι έχουμε:

Αντικροτικός δείκτης (Pump Octane ή Antiknock index: όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον αριθμό οκτανίων στα βενζινάδικα.

$$\text{Αντικροτικός δείκτης} = (\text{RON} + \text{MON}) / 2$$

Αριθμός οκτανίου κινητήρα (Motor Octane Number, MON): ο αριθμός οκτανίων μετριέται σε δοκιμαστική μηχανή ενός κυλίνδρου με μεταβλητό λόγο συμπίεσης (CR 4:1 - 18:1) σε υψηλές ταχύτητες και έντονες συνθήκες. Ο αισθητήρας μετράει τις μικρές μεταβολές πίεσης από το «κτύπημα» που καταγράφεται σε ειδικό όργανο με κλίμακα 0-100 (0 για το κανονικό επτάνιο και 100 για το ισοοκτάνιο). Μικρότερο από τον RON.

Ερευνητικός Αριθμός οκτανίου (Research Octane Number, PON): ελέγχεται ο αριθμός οκτανίων σε μονοκυλινδρική μηχανή δοκιμών σε ήπιες συνθήκες (χαμηλές στροφές). Ο RON ενός καυσίμου είναι υψηλότερος από τον MON.

Το μηδέν και στους δύο αριθμούς αποτελεί το κανονικό επτάνιο και το εκατό το ισοοκτάνιο (2,2,4-τριμεθυλο-πεντάνιο). Η κλίμακα οκτανίου μπορεί προφανώς να προεκταθεί προς τιμές υψηλότερες από 100, αφού το ισοοκτάνιο δεν είναι η ουσία με τη μεγαλύτερη αντικροτική ικανότητα. Ο αριθμός οκτανίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μοριακή δομή της οργανικής ένωσης. Γενικά, ο αριθμός οκτανίου μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των ατόμων άνθρακα για ενώσεις της ίδιας κατηγορίας, ενώ τα διακλαδισμένα αλκάνια, τα αλκένια και ειδικότερα οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες εμφανίζουν υψηλό αριθμό οκτανίου Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1. Αριθμός οκτανίου κινητήρα για διάφορα καύσιμα.

Υδρογονάνθρακας	Χημικός τύπος	MON
n-Επτάνιο	C ₇ H ₁₆	0
2-μεθυλο-επτάνιο	C ₈ H ₁₈	13
n-Εξάνιο	C ₆ H ₁₄	26
1-οκτένιο	C ₈ H ₁₆	35
2,5-διμεθυλο-εξάνιο	C ₈ H ₁₈	56
n-Πεντάνιο	C ₅ H ₁₂	62
1-εξένιο	C ₆ H ₁₂	63
Κυκλοεξάνιο	C ₆ H ₁₂	77
1,2-διμεθυλο-κυκλοεξάνιο	C ₈ H ₁₆	79
Βουτάνιο	C ₄ H ₁₀	90
2,2,4-τριμεθυλο-πεντάνιο (ισοοκτάνιο)	C ₈ H ₁₈	100
Τολουόλιο	C ₆ H ₁₂	103
Βενζόλιο	C ₆ H ₆	115

3) Καύσιμα μέσης απόσταξης

Ως καύσιμα μέσης απόσταξης συνήθως νοούνται τα καύσιμα αεροπλάνων και μηχανών ντίζελ, καθώς και τα καύσιμα θέρμανσης. Τα καύσιμα αυτά προέρχονται από την ανάμιξη διαφόρων ρευμάτων του διυλιστηρίου ώστε να πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές. Τα προϊόντα αυτής της κατηγορίας έχουν όρια απόσταξης από 180 έως και 370°C.

α) Καύσιμα αεροπορίας

Τα καύσιμα αεροπορίας (aviation fuels) χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη της πολιτικής και στρατιωτικής αεροπορίας. Προέρχονται κυρίως από ανάμιξη του κλάσματος κηροζίνης από τον πύργο ατμοσφαιρικής απόσταξης με κλάσμα της περιοχής βρασμού κηροζίνης από τη μονάδα υδρογονοπυρόλυσης. Λόγοι ασφαλείας επιβάλλουν για τα καύσιμα αεροπλάνων στενά όρια απόσταξης (180-300°C), χαμηλό σημείο πήξης (-40 έως -50°C), σημείο ανάφλεξης (45-65°C) και κινηματικό ιξώδες (<8 mm²/s στους -20°C). Δύο από τις πιο αυστηρές προδιαγραφές έχουν σχέση με την ποιότητα καύσης του καυσίμου (ανώτατο όριο στο περιεχόμενο των αρωματικών 20%-22%). Η επίτευξη αυτών των ανώτατων ορίων επιτυγχάνεται μέσω υδρογονοπυρόλυσης βαρέων κλασμάτων.

β) Καύσιμα μηχανών εσωτερικής καύσης (ντίζελ κίνησης)

Το ντίζελ κίνησης προέρχεται από την ανάμιξη κλασμάτων ατμοσφαιρικής απόσταξης και προϊόντων της υδρογονοπυρόλυσης με αριθμό κετανίου μεγαλύτερου του 45. Η περιοχή απόσταξης του κυμαίνεται από 230 μέχρι 370°C και χρησιμοποιείται σε φορτηγά, λεωφορεία κτλ. Οι ιδιότητες που χαρακτηρίζουν το ντίζελ συναρτώνται άμεσα με τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, που είναι:

- Το σύστημα εισαγωγής του καυσίμου
- Η διαδικασία ανάφλεξης και διατήρησης της καύσης
- Η ρύθμιση της ισχύος εξόδου

Το καύσιμο που χρησιμοποιείται στις μηχανές εσωτερικής καύσης πρέπει να έχει τέτοια χαρακτηριστικά που να μεγιστοποιούν την απόδοση του κινητήρα. Το καύσιμο ψεκάζεται σε λεπτό διαμερισμό στον κύλινδρο, όπου υπάρχει αέρας σε υψηλή συμπίεση και εξαερώνεται. Οι ατμοί του καυσίμου αυτοαναφλέγονται σε μία ή περισσότερες ζώνες στις κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης και συγκέντρωσης. Στον κινητήρα ντίζελ ο αέρας στον κύλινδρο συμπιέζεται σε μεγάλο βαθμό πριν από την εισαγωγή του καυσίμου. Εξαιτίας της συμπίεσης η θερμοκρασία αυξάνει σε τέτοια επίπεδα ώστε το καύσιμο να αναφλέγεται ταυτόχρονα με την εισαγωγή του στον κύλινδρο. Συνεπώς, για τη σωστή λειτουργία της μηχανής το καύσιμο θα πρέπει να έχει ευκολία στην αυτανάφλεξη. *Η ικανότητα ή ευκολία αυτανάφλεξης εκφράζεται ποσοτικά με τον αριθμό ή δείκτη κετανίου.*

Ο αριθμός κετανίου εκφράζει το ποσοστό κατ' όγκο του κετανίου ($C_{16}H_{34}$, υψηλή ποιότητα αυτανάφλεξης) σε ένα μίγμα με α -μέθυλο ναφθαλίνιο ($C_{11}H_{10}$, χαμηλή ποιότητα ανάφλεξης). Ο αριθμός κετανίου μετρείται σε πρότυπη μηχανή ντίζελ. Συνήθως όμως χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό του.

γ) Καύσιμα θέρμανσης

Τα καύσιμα θέρμανσης χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση χώρων και αποτελούν το 15% του όγκου του αργού πετρελαίου, αν και τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί τάση μείωσής τους λόγω υποκατάστασής τους από το φυσικό αέριο ή το υγραέριο. Οι κύριες προδιαγραφές αυτού του καυσίμου αφορούν στο σημείο ροής, ανάφλεξης και το ποσοστό θείου. Προέρχονται κυρίως από την ανάμιξη διαφόρων ρευμάτων με όρια απόσταξης 205-400°C απευθείας από τον πύργο απόσταξης, τις μονάδες καταλυτικής πυρόλυσης και εξανθράκωσης. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα η ομαλή ροή του καυσίμου στο σύστημα τροφοδοσίας του καυστήρα εξασφαλίζεται όταν το καύσιμο θέρμανσης έχει χαμηλό σημείο ροής. Σε αντίθεση με το ντίζελ κίνησης, για το πετρέλαιο θέρμανσης δεν απαιτείται ελάχιστο όριο στο δείκτη κετανίου αφού η απόδοση του καυστήρα δεν εξαρτάται από τους ίδιους παράγοντες. Συμπερασματικά, αν και τα χαρακτηριστικά του πετρελαίου κίνησης είναι κοντά στα χαρακτηριστικά του πετρελαίου θέρμανσης, η ποιότητα του τελευταίου είναι σαφώς κατώτερη.

4) Βαρέα καύσιμα (μαζούτ - residual fuel oils)

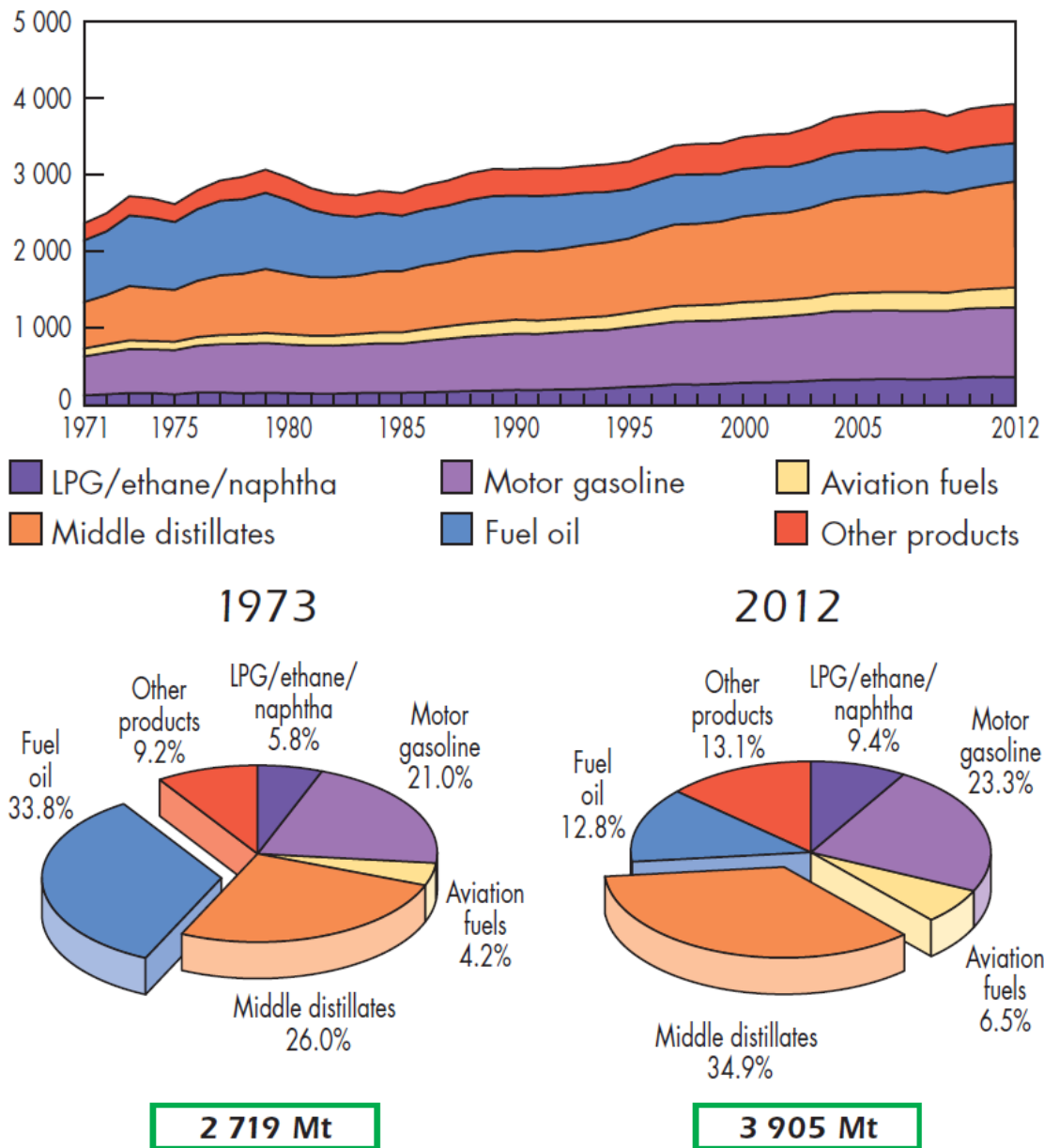
Παρασκευάζονται με ανάμιξη των υπολειμμάτων της στήλης απόσταξης κενού με κλάσματα μέσης απόσταξης. Αποτελεί βιομηχανικό καύσιμο, όμως η χρήση του βαίνει μειούμενη. Περιέχει σημαντικές ποσότητες θείου και αζώτου.

Σήμερα, σε παγκόσμια κλίμακα, η παραγωγή (και κατανάλωση) βενζίνης αντιπροσωπεύει το 23% της συνολικής παραγωγής του αργού πετρελαίου, ποσοστό που έχει αυξηθεί σε μικρό βαθμό τα τελευταία 30 χρόνια, τα προϊόντα μέσης απόσταξης (ντίζελ κίνησης) αντιστοιχούν σε ποσοστό 36% (με μικρή τάση ανόδου). Στα διαγράμματα του Σχήματος 4.11. παρουσιάζεται η παραγωγή των προϊόντων διύλισης για τα τελευταία 40 χρόνια καθώς και τα μερίδια αγοράς των διαφόρων προϊόντων.

12.7. Αποθέματα πετρελαίου

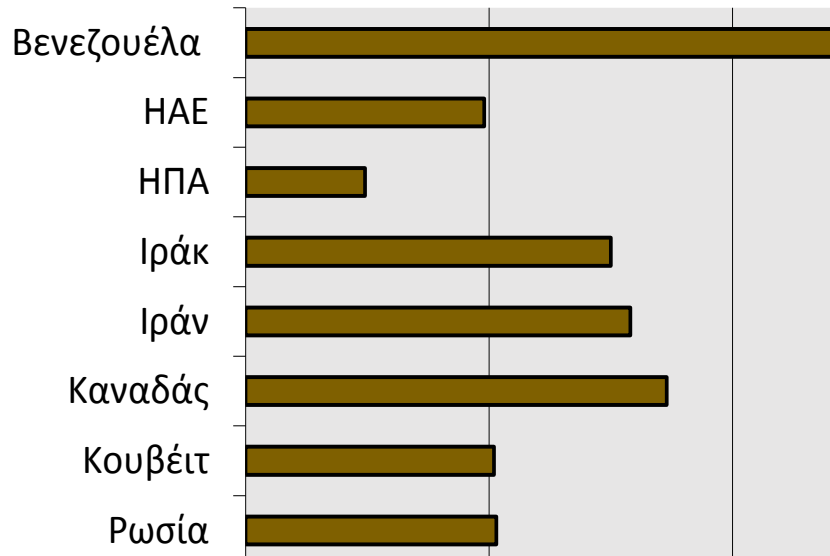
Τα κοιτάσματα πετρελαίου δεν κατανέμονται δημοκρατικά· λίγες αριθμητικά χώρες παράγουν τις μεγαλύτερες ποσότητες πετρελαίου, ενώ ακόμη λιγότερες είναι οι χώρες με αποθέματα που θα διαρκέσουν περισσότερα από 20 χρόνια από το σήμερα. Τα μεγαλύτερα αποθέματα πετρελαίου

βρίσκονται στην Μέση Ανατολή και στη Νότιο Αμερική (Σχήμα 4.12). Οι 13 χώρες του ΟΠΕΚ διαθέτουν το 71% των αποθεμάτων, και οι χώρες του ΟΟΣΑ το 13%.

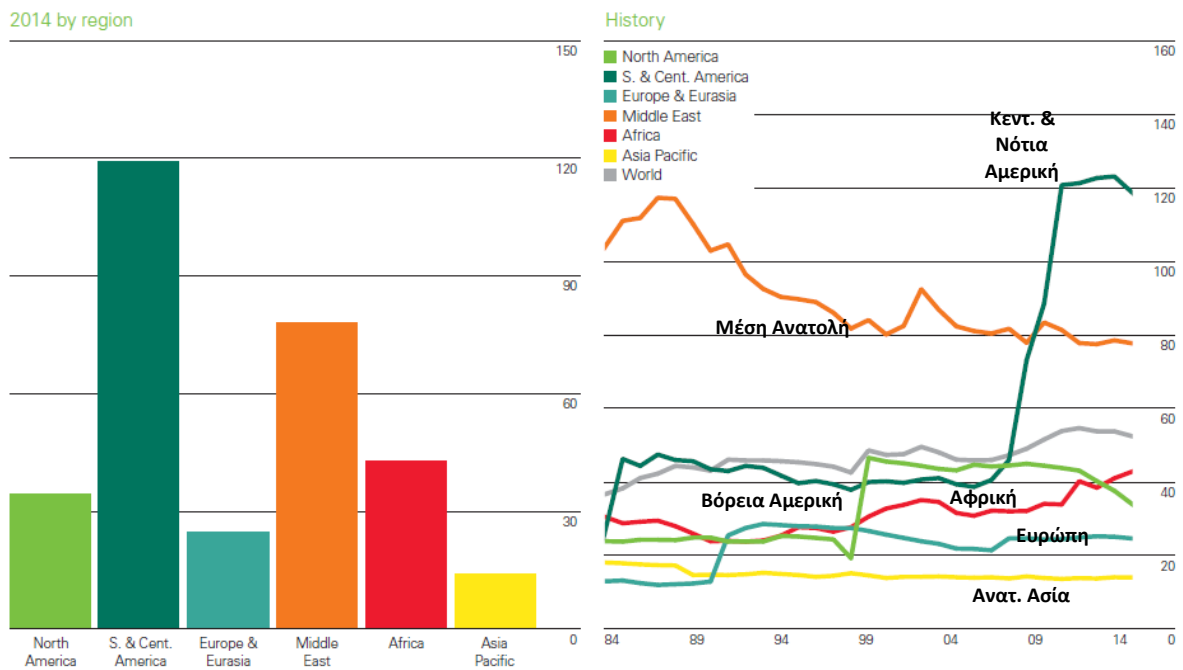


Σχήμα 4.11. Επάνω, η εξέλιξη της παραγωγής των προϊόντων των διυλιστηρίων και κάτω, μερίδια προϊόντων διύλισης το 1973 και το 2008 (IEA Key World Statistics, 2014)

Με οικονομικά κριτήρια έχει εξαντληθεί το 80% των αποθεμάτων. Εκτιμάται ότι παγκόσμια αποθέματα θα διαρκέσουν για περίπου 52 ακόμη χρόνια με τον τρέχοντα ρυθμό κατανάλωσης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.12. Εκτιμάται ότι με νέες τεχνικές ανακάλυψης νέων αποθεμάτων και με καλύτερη ανάκτηση από τα υπάρχοντα κοιτάσματα η διάρκεια αυτή μπορεί να αυξηθεί για άλλα 20-40 χρόνια. Στα αποθέματα πετρελαίου δεν συμπεριλαμβάνονται τα συνθετικά καύσιμα.



Σχήμα 4.12. Κατανομή των αποθεμάτων πετρελαίου κατά το 2014 (δεδομένα από το BP Statistical Review, 2015).



Σχήμα 4.12. Αποθέματα ανά περιοχή (αριστερά) και λόγοι αποθεμάτων πετρελαίου (δεξιά) προς το ρυθμό παραγωγής του. Με το λόγο αυτόν εκτιμάται ο χρόνος εξάντλησης αυτού του καυσίμου στα 52 χρόνια με την προϋπόθεση του σταθερού ρυθμού παραγωγής (BP report 2015).

4.8. Αξιοποίηση Κοιτασμάτων Βιτουμενιούχου Σχίστη και Πισσούχου Άμμου

Ο πισσούχος ή βιτουμενιούχος σχίστης ή πετρελαιοσχίστης (shale oil, φωτογραφία σχήματος 4.13) είναι στρωματωμένο, ιζηματογενές πέτρωμα που περιέχει κάποιες μορφές οργανικών συστατικών που ονομάζονται κηρογενή (kerogen, ένα κηρώδες μίγμα υδρογονανθράκων) σε ποσοστό μέχρι και 40%. Η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για την αξιοποίησή τους μετά τις ενεργειακές κρίσεις

της δεκαετίας του 1970 ήταν η εξής: αφού αφαιρούνταν με επιφανειακή ή υποεπιφανειακή εξόρυξη, ο σχίστης θρυμματιζόταν και θερμαινόταν ώστε να εξατμιστούν οι υδρογονάνθρακες (Σχήμα 4.14). Οι αέριοι πλέον υδρογονάνθρακες συμπυκνώνονται και σχηματίζουν ένα βαρύ, παχύρρευστο πετρέλαιο. Υπάρχει και η τεχνική η απόληψη του πετρελαίου να γίνει υπόγεια (*in situ*). Στη διεργασία αυτή ανοίγονται οπές στο κοίτασμα από όπου εισάγονται θερμά αέρια που μετατρέπουν το κηρογόνο σε πετρέλαιο. Πριν από τη μεταφορά του στο διυλιστήριο το πετρέλαιο αυτό πρέπει να τύχει επεξεργασίας ώστε να αφαιρεθούν το θείο, το άζωτο και άλλα τοξικά στοιχεία. Αν και μερική αξιοποίηση των πισσούχων σχιστών ξεκίνησε στις Η.Π.Α. πριν από το 1855 από τους Μορμόνους, ουσιαστικά η σύγχρονη βιομηχανική αξιοποίησή τους κορυφώθηκε το 1980, μετά τις δύο ενεργειακές κρίσεις. Με την πτώση των τιμών του πετρελαίου μετά το 1980 όλες οι προσπάθειες εγκαταλείφθηκαν.



Σχήμα 4.13. Βιτουμενιούχος σχίστης και παραγόμενο πετρέλαιο.

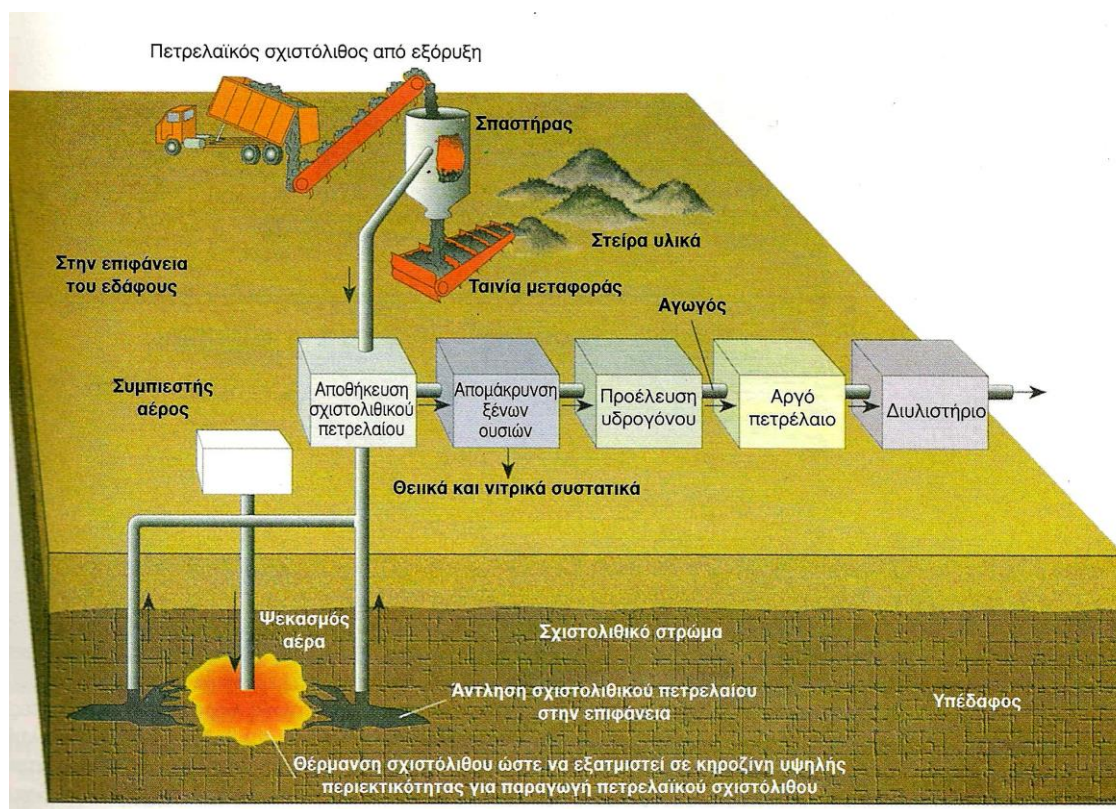
Τα 2/3 των αποθεμάτων βιτουμενιούχου σχίστη στον κόσμο βρίσκονται στις Η.Π.Α. (π.χ. Κολοράντο, Γιούτα και Γουαϊόμινγκ) και εκτιμάται ότι μπορεί να καλύψουν τις ανάγκες της χώρας αυτής σε πετρέλαιο για τα επόμενα 40 χρόνια, με τα παρόντα επίπεδα κατανάλωσης. Όμως η χρήση του πισσούχου σχίστη παρουσιάζει και ορισμένα προβλήματα. Έχει μικρότερη ενεργειακή απόδοση από ό,τι το συμβατικό πετρέλαιο, επειδή για την εξαγωγή, επεξεργασία και αναβάθμισή του καταναλώνει ενέργεια μισού βαρελιού συμβατικού πετρελαίου για να δώσει ένα βαρέλι πετρελαίου. Η επεξεργασία του πετρελαίου απαιτεί άφθονο νερό που είναι γενικά σπάνιο στις περιοχές που βρίσκονται τα πλούσια αποθέματα. Επίσης πρέπει να απομακρυνθούν το άζωτο και το θείο. Κάτω από το έδαφος, οι υπεδαφικές εξορύξεις του πισσούχου σχίστη αφήνουν τεράστιες ποσότητες αργιλικών καταλοίπων. Τέλος, διάφορα τοξικά μέταλλα και ενώσεις μπορούν να περάσουν στον υδροφόρο ορίζοντα.

Η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων πισσούχου σχίστη με την μέθοδο της υδραυλικής ρωγμάτωσης (*hydraulic fracturing, fracking*) ξεκίνησε ουσιαστικά την τελευταία δεκαετία και έχει εξαπλωθεί σε πολλές πολιτείες των Η.Π.Α. Αρκετές Ευρωπαϊκές χώρες έχουν εκδηλώσει ενδιαφέρον τους να αρχίσουν διερευνητικά την αξιοποίηση αντίστοιχων κοιτασμάτων, αν και υπάρχουν πολλές αναπάντητες ερωτήσεις για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνοδεύουν την τεχνική αυτή.

Η τεχνική αυτή ουσιαστικά έχει στόχο την «ενεργοποίηση» γεωτρήσεων με την διάρρηξη των πετρωμάτων από ένα υγρό υπό πίεση. Η διαδικασία περιλαμβάνει διοχέτευση υπό υψηλή πίεση του «υγρού fracking» (κυρίως νερό, που περιέχει άμμο και ορισμένες χημικές ουσίες) σε μία γεώτρηση για τη δημιουργία ρωγμών στους σχηματισμούς των πετρωμάτων μέσω των οποίων το πετρέλαιο (ή/και το φυσικό αέριο) και το αλμόλοιπο θα ρέουν ευκολότερα.

Με τη μέθοδο αυτή η παραγωγή πετρελαίου στις Η.Π.Α. αυξήθηκε από 5,6 εκατομμύρια βαρέλια την ημέρα το 2010, στο σημερινό επίπεδο των 9,3 εκατομμυρίων.

Η *βιτουμειούχος ή πισσούχος άμμος* (bituminous or tar/oil sand) είναι μίγμα αργίλου, άμμου και ενός είδους πίσσας (bitumen). Πρόκειται για δευτερογενή κοιτάσματα που προέκυψαν από τη μεταναστευση αργού πετρελαίου. Η πίσσα βρίσκεται σε ποσοστό 10-15%. Τα μεγαλύτερα γνωστά αποθέματα πισσούχου άμμου στον κόσμο βρίσκονται στην Αλμπέρτα του Καναδά. Τα αποθέματα του μη-συμβατικού αυτού πετρελαίου πλησιάζουν τα αποθέματα της Σαουδικής Αραβίας. Άλλα αποθέματα πισσούχου άμμου βρίσκονται στη Βενεζουέλα, στη Κολομβία, αλλά και σε αρκετές χώρες της βόρειας και ανατολικής Ευρώπης (Γερμανία, Πολωνία, Ρουμανία, βαλτικές χώρες).

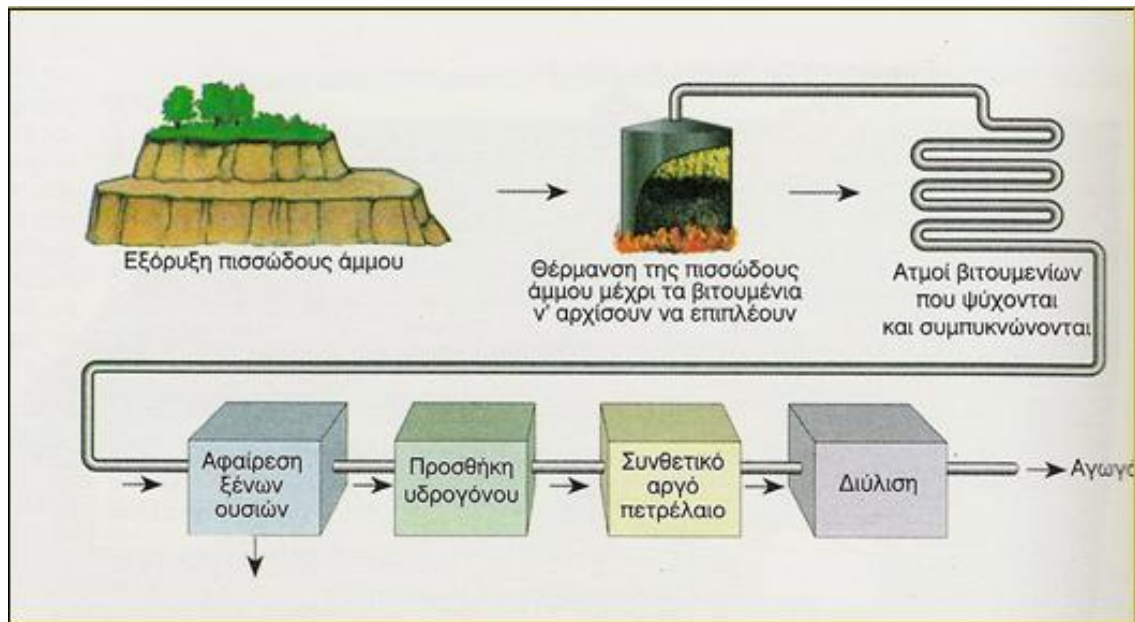


Σχήμα 4.14. Υπόγειες και επιφανειακές μέθοδοι παραγωγής συνθετικού πετρελαίου από αποθέματα πισσούχου σχίστη (Tyler-Miller, 1999).

Η *βιτουμειούχος άμμος* εξορύσσεται επιφανειακά και θερμαίνεται με ατμό (σε περίπου 50-70°C) με αποτέλεσμα να μειωθεί το ιξώδες της ασφάλτου και να αρχίσει να επιπλέει. Η ασφαλτος καθαρίζεται και αναβαθμίζεται με χημικό τρόπο (με την προσθήκη υδροξειδίου του νατρίου) σε συνθετικό αργό πετρέλαιο, κατάλληλο για διύλιση. Ο Καναδάς σήμερα είναι η μόνη χώρα στην οποία αξιοποιούνται συστηματικά αυτοί οι πόροι. Το 2015, η ημερήσια παραγωγή πετρελαίου από

βιτουμενιούχο άμμο ανήλθε στα 1,3 εκατ. βαρέλια, αντιπροσωπεύοντας το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής παραγωγής πετρελαίου του Καναδά.

Η αξιοποίηση της ασφαλτούχου άμμου παρουσιάζει παρόμοια προβλήματα με την αξιοποίηση του πισσούχου σχίστη: χαμηλή ενεργειακή απόδοση, απαιτούνται τεράστιες ποσότητες νερού και απελευθερώνονται διάφοροι αέριοι, υγροί και στερεοί ρύποι.



Σχήμα 4.15. Σχηματική παράσταση παραγωγής συνθετικού πετρελαίου από αποθέματα ασφαλτούχου άμμου (Tyler-Miller, 1999).

5. ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ

5.1. Εισαγωγή

Εξ ορισμού, το **φυσικό αέριο** είναι ένα **μίγμα υδρογονανθράκων** (και μη καύσιμων αερίων) σε αέρια κατάσταση, το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο. Συνήθως βρίσκεται σε ξεχωριστούς ταμειυτήρες στο φλοιό της γης ή εν διαλύσει στο πετρέλαιο. Η σύσταση του φυσικού αερίου στην έξοδο της γεώτρησης ποικίλλει σημαντικά τόσο ως προς τα συστατικά, όσο και ως προς τη συγκέντρωση αυτών των συστατικών και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κάθε ταμειυτήρα.

Το φυσικό αέριο ήταν γνωστό από την αρχαιότητα και αρκετοί αρχαίοι ναοί, κυρίως στη Μέση Ανατολή, κτίστηκαν κοντά σε εκροές φυσικού αερίου. Ακόμη και για τους Δελφούς έχει διατυπωθεί η θεωρία ότι από την Κασταλία πηγή αναδυσόταν μεθάνιο. Είναι πιθανόν ότι οι αναφορές του Πλούταρχου (100-125 μ.Χ.) στις «αιώνιες φωτιές» στην περιοχή του σύγχρονου Ιράκ να αφορούν στη φυσική διαρροή από το έδαφος και καύση φυσικού αερίου. Αναφέρεται ακόμη ότι ο Ιούλιος Καίσαρας είδε από κοντά την «καιόμενη πηγή» κοντά στη Γκρενόμπλ της Γαλλίας. Υποτυπώδεις γεωτρήσεις φυσικού αερίου είχαν ανορυχθεί στην Ιαπωνία πριν από το 615 μ.Χ., ενώ το 900 μ.Χ. αναφέρεται ότι οι Κινέζοι μετέφεραν φυσικό αέριο με σωλήνες από μπαμπού σε μικρές αποστάσεις για να το χρησιμοποιήσουν στην εξάτμιση αλατούχου νερού. Πρακτικά, η σύγχρονη χρήση του φυσικού αερίου ξεκίνησε το 1821 στη Fredonia της Νέας Υόρκης, όπου ανοίχθηκε η πρώτη γεώτρηση φυσικού αερίου, το οποίο χρησιμοποιούνταν για το φωτισμό παρακείμενων οικιών. Η πρώτη βιομηχανική χρήση του φυσικού αερίου έγινε σε χαλυβουργία και υαλουργία στο Πίτσμπουργκ των Η.Π.Α. το 1883. Το 1885 ο Robert Bunsen εφηύρε ένα σύστημα όπου αναμιγνυόταν φυσικό αέριο και αέρας. Ο «λύχνος Bunsen» κατέδειξε πως μπορεί να παραχθεί αποδοτικά θερμότητα από το φυσικό αέριο.

5.2. Σχηματισμός Φυσικού Αερίου

Διάφορες διεργασίες οδηγούν στο σχηματισμό του μεθανίου. Γενικά, μεθάνιο σχηματίζεται κατά τη βακτηριακή αποσύνθεση της οργανικής ύλης, όπως συμβαίνει στους σύγχρονους χώρους υγειονομικής ταφής των απορριμμάτων. Η κυριότερη διεργασία σχηματισμού του είναι ο διαχωρισμός του από το πετρέλαιο. Καθώς το πετρέλαιο θερμάνθηκε σε υψηλές θερμοκρασίες μέσα στο φλοιό της γης, μερικά από τα μακρομόρια του διασπάστηκαν, δημιουργώντας μεθάνιο και άλλους ελαφρούς υδρογονάνθρακες («θερμογενές μεθάνιο»). Όσο βαθύτερα βρισκόταν το πετρέλαιο, τόσο μεγαλύτερος ήταν ο ρυθμός διάσπασης (και παραγωγής μεθανίου) λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών. Στη ουσία, σε εξαιρετικά μεγάλα βάθη όλοι οι υδρογονάνθρακες έχουν διασπαστεί σε αέρια και εκεί βρίσκουμε βασικά μόνο φυσικό αέριο. Τα μεγαλύτερα και πιο εμπορεύσιμα κοιτάσματα φυσικού αερίου έχουν σχηματιστεί με αυτό τον τρόπο.

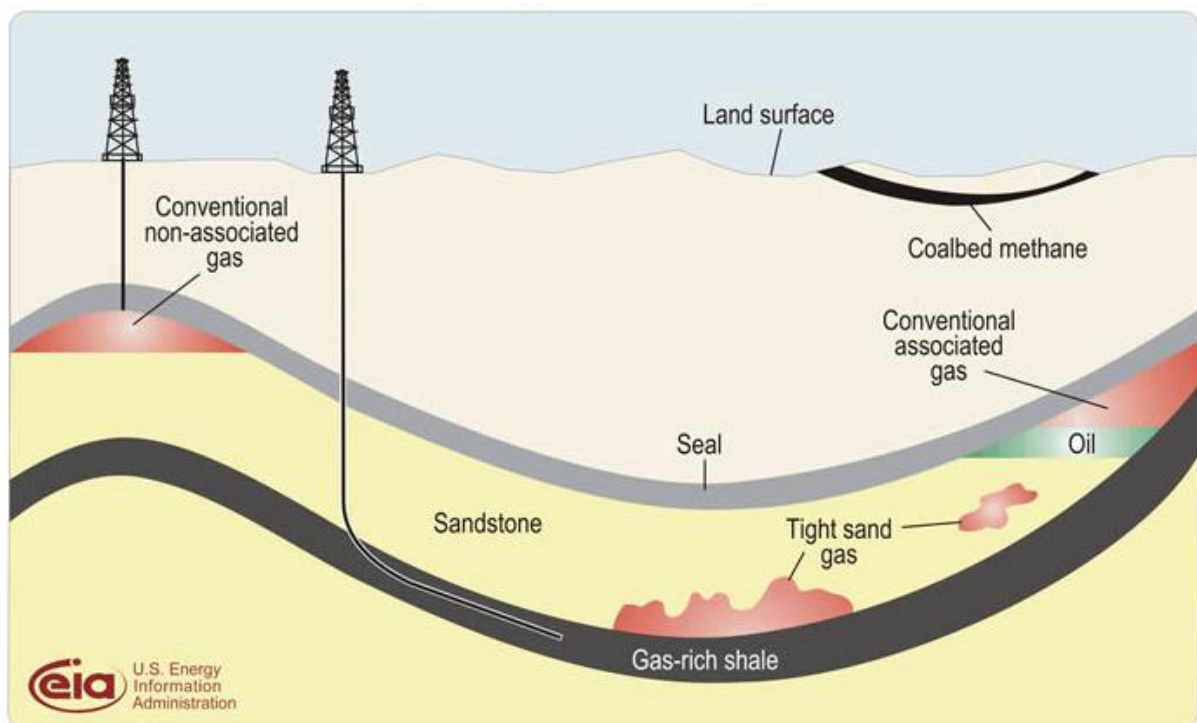
Κατά τη διάρκεια του σχηματισμού των γαιανθράκων, η αυξανόμενη συμπύκνωση δακτυλίων ατόμων άνθρακα σε μεγαλύτερα συστήματα δακτυλίων μπορεί να συνοδευτεί με την απόσπαση μεμονωμένων ατόμων άνθρακα με τη μορφή του μεθανίου. Υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για το

εγκλωβισμένο μεθάνιο σε κοιτάσματα άνθρακα ως μια νέα πηγή μεθανίου. Το φυσικό αυτό αέριο ονομάζεται *μεθάνιο από κλίνες άνθρακα* (coalbed methane). Η εκμετάλλευση τέτοιων κοιτασμάτων είναι σημαντική διότι παρέχει μια νέα πηγή μεθανίου και μειώνει τον κίνδυνο συγκέντρωσης μεθανίου στις υπόγειες στοές άνθρακα. Το μεθάνιο είναι εξαιρετικά εύφλεκτο και τυχαία ανάφλεξη του μεθανίου μπορεί να έχει πολύ θλιβερά αποτελέσματα.

Φυσικό αέριο βρίσκεται μέσα στο φλοιό τη γης μαζί με το πετρέλαιο, όπως έχει παρουσιαστεί στο Σχήμα 4.5. Το μεθάνιο αυτό αναφέρεται ως *συνδεδεμένο μεθάνιο* (associated gas). Σε πολύ υψηλές πιέσεις, το φυσικό αέριο μπορεί να διαλυθεί μέσα στο πετρέλαιο, οπότε αυτό αναφέρεται ως *διαλυμένο φυσικό αέριο* (dissolved gas). Το αέριο αυτό ελευθερώνεται καθώς το πετρέλαιο έρχεται στην επιφάνεια. Είναι επίσης πιθανόν ένας θύλακας φυσικού αερίου να βρίσκεται ως μια γιγαντιαία φυσαλίδα πάνω από έναν ταμιευτήρα πετρελαίου. Σε αυτήν την περίπτωση καλείται *φυσικό αέριο από θύλακα αερίου* (gas cap gas).

Το φυσικό αέριο μπορεί ακόμα να μεταναστεύσει μακριά από το πετρέλαιο και να παγιδευτεί μόνο του κάτω από ένα αδιαπέραστο πέτρωμα σε ένα άλλο ανεξάρτητο θύλακα. Σε αυτή την περίπτωση ονομάζεται *μη-συνδεδεμένο αέριο* (non-associated gas). Περίπου το 65% του φυσικού αερίου που ανακτάται στις Η.Π.Α. ανήκει σε αυτήν την κατηγορία.

Φυσικό αέριο υπάρχει, σε αντιστοιχία με το πετρέλαιο, και σε βιτουμενιούχους σχίστες πλούσιους σε φυσικό αέριο (Σχήμα 5.1). Τα τελευταία 15 χρόνια αποδέσμευση του φυσικού αερίου από πετρώματα με χαμηλή διαπερατότητα, όπως ψαμμίτες ή σχίστες επιτυγχάνεται με τη διαδικασία της υδραυλικής ρωγματώσης (hydrofracking). Εκτιμάται ότι η υδραυλική ρωγμάτωση μπορεί να αντιπροσωπεύει περίπου το 70% του φυσικού αερίου που ανακτάται σήμερα στη Βόρεια Αμερική.



Σχήμα 5.1. Σχηματική παράσταση της γεωλογίας των πόρων φυσικού αερίου.

5.3. Ιδιότητες του φυσικού αερίου

Το φυσικό αέριο κυρίως αποτελείται από μεθάνιο CH_4 , ένα άχρωμο και άοσμο, μη τοξικό αέριο. Συνήθως περιέχει και μικρές ποσότητες από άλλους ελαφρούς υδρογονάνθρακες (αιθάνιο, προπάνιο και βουτάνιο) και, σπάνια, σε ακόμη μικρότερες συγκεντρώσεις πεντάνιο και εξάνιο. Σε κανονικές θερμοκρασίες οι δύο τελευταίοι υδρογονάνθρακες είναι υγροί με χαμηλό σημείο ζέσεως. Όμως σε στις υψηλές θερμοκρασίες που απαντούν μέσα στη γη, είναι σε αέρια κατάσταση και αποτελούν τμήμα του φυσικού αερίου. Εκτός από υδρογονάνθρακες, τα φυσικά αέριο μπορεί να περιέχει διάφορα ανόργανα συστατικά, όπως άζωτο, αργό, ήλιο, διοξείδιο του άνθρακα και υδροθείο. Η σημαντική πρόοδος στις αναλυτικές συσκευές έχει κάνει δυνατή την ανίχνευση πολλών άλλων συστατικών σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις. Έχουν ανιχνευθεί υδράργυρος και ενώσεις αρσενικού σε επίπεδα συγκέντρωσης ppb.

Το φυσικό αέριο συχνά χαρακτηρίζεται από την παρουσία ή απουσία συγκεκριμένων συστατικών. Έτσι έχουμε τους χαρακτηρισμούς:

- (1) *Υγρό αέριο* (wet): συνήθως το μη επεξεργασμένο αέριο που περιέχει συμπυκνώσιμους υδρογονάνθρακες (προπάνιο, βουτάνιο κ.α.). Το φυσικό αέριο γίνεται περισσότερο «υγρό», καθώς αυξάνει το βάθος από το οποίο προέρχεται.
- (2) *Ξηρό αέριο* (dry): όταν δεν περιέχει συμπυκνώσιμους υδρογονάνθρακες και έχει απομακρυνθεί το νερό.
- (3) *Οξινο αέριο* (sour): όταν περιέχει CO_2 (σε ποσοστό >2%), υδροθείο και άλλες ενώσεις θείου, σε συγκεντρώσεις που υπερβαίνουν συγκεκριμένα όρια.
- (4) *Γλυκό αέριο* (sweet): όταν περιέχει CO_2 σε μικρές συγκεντρώσεις (<2%), ενώ οι συγκεντρώσεις του υδροθείου και άλλων ενώσεων θείου είναι μικρότερες από κάποια όρια.

Είναι προφανές και επιθυμητό ένα φυσικό αέριο να είναι ισχνό, ξηρό και γλυκό. Εάν δεν έχει αυτές τις ιδιότητες το φυσικό αέριο, τότε υφίσταται επεξεργασία ώστε να αποκτήσει αυτές τις ιδιότητες πριν οδηγηθεί στην κατανάλωση. Τυπικές συστάσεις και χαρακτηρισμός φυσικού αερίου δίδονται στον Πίνακα 5.1, ενώ στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι τυπικές αναλύσεις φυσικού αερίου από Αλγερία και Ρωσία, χώρες από τις οποίες η χώρα μας προμηθεύεται το φυσικό αέριο.

Το ποσοστό κάθε συστατικού στο φυσικό αέριο μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη λειτουργία μίας διεργασίας επεξεργασίας του φυσικού αερίου, τη μέτρηση της παροχής (και επομένως το κόστος αγοράς του καυσίμου), και, πάνω από όλα, τον καταναλωτή. Για το λόγο αυτόν καθορίζονται συνήθως προδιαγραφές της σύστασης του φυσικού αερίου. Αν και δεν υπάρχουν διεθνώς αποδεκτές προδιαγραφές του φυσικού αερίου που διατίθενται την αγορά, προδιαγραφές που ισχύουν στις Η.Π.Α. για ορισμένα συστατικά παρατίθενται στον Πίνακα 5.3. Εκτός από αυτές τις προδιαγραφές, υπάρχουν και μερικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά καύσης του φυσικού αερίου, όπως είναι ο δείκτης της κίτρινης φλόγας και ο αριθμός ή δείκτης Wobbe.

Πίνακας 5.1. Συστάσεις φυσικού αερίου από την Βόρειο Αμερική (Πηγή: Kirk & Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Vol. 12, 1997).

	Rio Arriba, N. Mexico, Η.Π.Α.	Terrel County, Τέξας, Η.Π.Α.	Stanton County, Kansas, Η.Π.Α.	San Juan, N. Mexico, Η.Π.Α.	Olds Field, Alberta, Καναδάς
Συστατικό, mol%					
CH ₄	96,91	46,64	67,56	77,28	52,34
C ₂ H ₆	1,33	0,21	6,23	11,18	0,41
C ₃ H ₈	0,19	-	3,18	5,83	0,14
C ₄ H ₁₀	0,05	-	1,42	2,34	0,16
≥C ₅ H ₁₂	0,02	-	0,40	1,18	0,41
CO ₂	0,82	53,93	0,07	0,80	8,22
H ₂ S	-	0,01	-	-	35,79
N ₂	0,68	0,21	21,14	1,39	2,53
Χαρακτηρισμός					
υγρό			✓	✓	
ξηρό	✓	✓			✓
γλυκό	✓		✓	✓	
όξινο		✓			✓
Θερμογόνος δύναμη, MJ/m³	37,6	17,3	34,9	46,8	30,0
Σχετική πυκνότητα	0,574	1,077	0,733	0,741	0,882

Πίνακας 5.2. Συστάσεις φυσικού αερίου από τη Ρωσία, την Αλγερία και το Αζερμπαϊτζάν. (Πηγή: ΔΕΠΑ, 2010).

Συστατικό, mol %	Ρωσία		Αλγερία		Αζερμπαϊτζάν	
	min%	max%	min%	max%	min%	max%
CH ₄	85	-	85,65	96,6	82	-
C ₂ H ₆	0	7	3,2	8,5	-	12
C ₃ H ₈	0	3	0	3	-	4
C ₄ H ₁₀	0	2	0	0,70	-	2,5
C ₅ H ₁₂	0	1	0	0,23	-	1
N ₂	0	5	0,2	1,4	1,4	5,5
H ₂ S	0	5 mg/m ³	0	0,83 mg/m ³	-	5,1 mg/m ³
CO ₂	0,1	3	-	-	-	3
O ₂	0	0,02	-	-	-	0,15

Προβλήματα και ποιότητα φυσικού αερίου

1) Οξυγόνο. Το οξυγόνο γενικά δεν απαντά στο φυσικό αέριο. Μπορεί όμως να εισχωρήσει στα συστήματα διανομής χαμηλής πίεσης μέσω ανεπιθύμητων ανοιγμάτων (διαρροών). Το οξυγόνο είναι ένα έντονα διαβρωτικό μέσο, ακόμη και σε μικρές συγκεντρώσεις. Το ποσοστό του O₂ στο φυσικό αέριο δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,1% κατ' όγκον και θα πρέπει να λαμβάνεται κάθε πρόνοια ώστε το φυσικό αέριο να μην περιέχει καθόλου οξυγόνο.

2) Υδρόθειο. Το υδρόθειο είναι ένα τοξικό αέριο (σε συγκέντρωση περίπου 500 ppm προκαλείται θάνατος), σχηματίζει όξινα διαλύματα σε επαφή με το νερό, είναι έντονα διαβρωτικό (π.χ. στο χαλκό και στα κράματά του) και έχει έντονη οσμή, η οποία μπορεί να

επηρεάσει και να μεταβάλλει τη «χαρακτηριστική» οσμή του φυσικού αερίου. Η συγκέντρωση του υδροθείου στο φυσικό αέριο δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 4 ppmv (~5,7 mg/m³).

3) Μερκαπτάνες. Οι μερκαπτάνες έχουν έντονη οσμή και η συγκέντρωσή τους στο φυσικό αέριο δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 3 ppmv.

4) Συνολικό θείο. Η συγκέντρωση του θείου θα πρέπει να είναι μικρότερη των 20 mg/m³ (συμπεριλαμβανομένων του υδροθείου και των μερκαπτανών).

5) Διοξείδιο του άνθρακα. Το διοξείδιο του άνθρακα, όπως και το νερό, οξυγόνο, άζωτο, υδροθείο κτλ., δεν συνεισφέρει στη θερμοκρασιακή αξία του φυσικού αερίου και γι' αυτό η συγκέντρωσή του πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Είναι ένα αδρανές και μη τοξικό αέριο. Η παρουσία διοξειδίου του άνθρακα (όπως και του αζώτου) περιπλέκει τον υπολογισμό του συντελεστή συμπίεστικότητας του φυσικού αερίου, ενώ με το νερό δημιουργεί όξινα διαβρωτικά διαλύματα. Το ποσοστό του στο φυσικό αέριο πρέπει να είναι μικρότερο του 2% κατ' όγκον.

6) Άζωτο. Το άζωτο είναι ένα αδρανές και μη τοξικό αέριο, αλλά αναφορικά με το φυσικό αέριο καταλαμβάνει πολύτιμο χώρο, μειώνοντας έτσι την χωρητικότητα των αγωγών μεταφοράς, και καταναλώνεται ενέργεια για τη μεταφορά του. Επιπλέον μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στην έξοδο του καυστήρα αερίου ανυψώνοντας τη φλόγα. Το ποσοστό του αζώτου στο φυσικό αέριο δεν πρέπει να υπερβαίνει το 3% κατ' όγκον.

7) Ισοπεντάνιο και βαρύτεροι υδρογονάνθρακες. Μπορούν να υγροποιηθούν στους αγωγούς μεταφοράς, δημιουργώντας λειτουργικά προβλήματα και προβλήματα στους καταναλωτές. Τα υγρά συστατικά σε μεγάλες συγκεντρώσεις μειώνουν την χωρητικότητα των αγωγών μεταφοράς. Η παρουσία ισοπεντανίου και βαρύτερων υδρογονανθράκων μειώνει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας προσθήκης της χαρακτηριστικής οσμής του φυσικού αερίου. Το φυσικό αέριο δεν θα πρέπει να περιέχει περισσότερο από περίπου 25 mL/m³ υγρούς υδρογονάνθρακες.

8) Νερό. Το φυσικό αέριο δεν θα πρέπει να περιέχει νερό (και άλλα υγρά) στις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης που γίνεται η διανομή του. Το νερό, σε χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλές πιέσεις, δημιουργεί με το μεθάνιο και τους άλλους ελαφρούς υδρογονάνθρακες ένυδρες στερεές ουσίες (hydrates), οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά λειτουργικά προβλήματα (ένα είδος απόφραξης των αγωγών), και προκαλεί διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών. Γενικά, το φυσικό αέριο δεν πρέπει να περιέχει νερό πάνω από 0,1 g/m³.

9) Υδρογόνο και άλλα αέρια. Το φυσικό αέριο δεν πρέπει να περιέχει μονοξείδιο του άνθρακα, αλογόνα ή ακόρεστους υδρογονάνθρακες, ενώ η συγκέντρωση του υδρογόνου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 400 ppmv.

10) Σκόνη, κόμμεα και στερεά συστατικά. Το φυσικό αέριο που προορίζεται για εμπορική χρήση πρέπει να είναι εντελώς απαλλαγμένο από σκόνες, κόμμεα και στερεές ουσίες.

11) Θερμοκρασία. Η υψηλή θερμοκρασία μπορεί να είναι επιβλαβής στις προστατευτικές επικαλύψεις των αγωγών, ενώ πολύ χαμηλές θερμοκρασίες μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα λόγω της δημιουργίας πάγου και ένυδρων συστατικών.

12) Θερμοκρασιακή αξία. Η θερμογόνο δύναμη, σε ημερήσια, μηνιαία ή ετήσια βάση, δεν πρέπει να είναι μικρότερη από ~36, ούτε μεγαλύτερη από ~44 MJ/m³.

Δείκτης Wobbe

Ο ρυθμός παροχής ενέργειας σε έναν καυστήρα εξαρτάται βασικά από την παροχή του καυσίμου και τη θερμογόνο δύναμή του. Δεδομένου ότι η παροχή είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της πίεσης, P, και αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της σχετικής πυκνότητας, d,

$$\dot{q} \propto \frac{\Theta \cdot \Delta \cdot \sqrt{P}}{\sqrt{d}}$$

Το μέγεθος $\Theta \cdot \Delta / \sqrt{d}$ καλείται δείκτης Wobbe και αποτελεί χρήσιμο χαρακτηριστικό ενός φυσικού αερίου.

Πίνακας 5.3. Προδιαγραφές φυσικού αερίου σε αγωγούς διανομής στις Η.Π.Α. (Πηγή: Kirk & Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Vol. 12, 1997).

Χαρακτηριστικό	Προδιαγραφή
Περιεκτικότητα σε νερό, mg/m ³	64-112
Υδροθείο, mg/m ³	5,7
Μέση θερμογόνος δύναμη, MJ/m ³	35,4
Σημείο δρόσου υδρογονανθράκων σε πίεση 5,5 MPa, K	264,9
Μερκαπτάνες, mg/m ³	4,6
Ολικό θείο, mg/Nm ³	80
Διοξείδιο του άνθρακα, mol %	0-3
Οξυγόνο, mol %	0-0,2
Θερμοκρασία (°C)	0-50

5.4. Αξιοποίηση του Φυσικού Αερίου

Από πολλές απόψεις, το φυσικό αέριο αποτελεί το ιδανικό καύσιμο και δεν έχουμε να πούμε πολλά για τις χρήσεις του, αρκεί να διαθέσιμο. Έχει μια σχετικά απλή και σχεδόν σταθερή χημική σύσταση, υψηλή θερμογόνος δύναμη και χρειάζεται πολλή μικρή προετοιμασία πριν από τη χρήση του σε σχέση με το πετρέλαιο και τον άνθρακα. Επειδή είναι αέριο, αναμιγνύεται εύκολα με τον αέρα για αποδοτική και πλήρη καύση. Δεν περιέχει στερεά συστατικά και συνεπώς δεν παράγει τέφρα.

5.4.1 Κατεργασία του φυσικού αερίου

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την κατεργασία του φυσικού αερίου εξαρτώνται από το είδος των συστατικών που περιέχει. Για παράδειγμα, ένα ξηρό αέριο σχεδόν δεν χρειάζεται κατεργασία εκτός από τη σταθεροποίηση της υγρασίας του. Αν το αέριο είναι ξηρό, αλλά όξινο, είναι απαραίτητη η απομάκρυνση των όξινων αερίων.

Η κατεργασία υγρού και όξινου φυσικού αερίου περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. **Απομάκρυνση όξινων αερίων (CO₂, H₂S και άλλων θειούχων ενώσεων).** Τα όξινα αέρια δημιουργούν προβλήματα διάβρωσης, οσμών και επίδρασης σε καταλύτες. Το υδροθείο, εκτός από τον όξινο χαρακτήρα του, είναι ένα ιδιαίτερα τοξικό αέριο και οι προδιαγραφές ως προς τη συγκέντρωσή του στο φυσικό αέριο είναι αυστηρές. Υπάρχουν περισσότερες από 30 μέθοδοι απομάκρυνσης των όξινων αερίων. Η πλέον συνήθης τεχνική είναι η χρήση μονο- και διαιθανολαμινών (MEA και DEA), οι οποίες αντιδρούν με τα όξινα αέρια σε στήλη απορρόφησης κατ' αντιρροή και σχηματίζονται θειούχα και ανθρακικά αλάτων. Οι αμίνες αναγεννώνται με ατμό. Η MEA είναι ο παλαιότερος και ο πλέον διαδεδομένος διαλύτης για τη δέσμευση των CO₂ και H₂S. Η DEA προτιμάται στην απομάκρυνση των θειούχων ενώσεων, όπως του θειούχου καρβονυλίου. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλοι φυσικοί διαλύτες (π.χ. ανθρακικό προπυλένιο, Sulfinal κ.α.), κυρίως για μεγάλες συγκεντρώσεις όξινων αερίων. Εκλεκτική απομάκρυνση του υδροθείου μπορεί να γίνει με τη χρήση κλίνης από ρινίσματα σιδήρου ή από άλλα υλικά επικαλυμμένα με οξειδία του σιδήρου. Η παλαιότατη αυτή μέθοδος χρησιμοποιείται σήμερα μόνο για μικρές συγκεντρώσεις υδροθείου. Τέλος, η πρόσφατη πρακτική είναι η μετατροπή (οξειδωση)

του υδροθείου σε στοιχειακό θείο με πληθώρα διεργασιών, όπως οι μέθοδοι Claus, Super Claus, ARS sulfoxide, κ.α.). Η διεργασία αυτή ονομάζεται *γλύκανση* (sweetening). Η επιλογή της ή των μεθόδων επεξεργασίας εξαρτάται από τη σύσταση του φυσικού αερίου, την πίεση και την παροχή του, καθώς και από τα επιθυμητά όρια απομάκρυνσης των όξινων αερίων.

2. *Απομάκρυνση υγρασίας*. Το ποσοστό της υγρασίας στο φυσικό αέριο είναι πολύ βασικός παράγοντας γιατί αποτρέπει το σχηματισμό ένυδρων στερεών ουσιών (hydrates). Οι ένυδρες ουσίες είναι στερεές λευκές ενώσεις που σχηματίζονται από φυσικοχημικές αντιδράσεις μεταξύ του νερού και των υδρογονανθράκων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και χαμηλής θερμοκρασίας (συνθήκες που επικρατούν σε υποθαλάσσιους αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου). Το νερό απομακρύνεται είτε με κατεργασία του αερίου με υγροσκοπικά υγρά (αλκοόλες και, κυρίως, γλυκόλες) ή με την προσρόφησή του σε στερεά μέσα (silica gel, ενεργοποιημένη αλουμίνα, ενεργά κόσκινα κ.ά.).
3. *Απομάκρυνση των συμπυκνώσιμων υδρογονανθράκων*. Οι συμπυκνώσιμοι υδρογονάνθρακες απομακρύνονται από το φυσικό αέριο με ψύξη του αερίου σε χαμηλή θερμοκρασία (μέχρι και -45°C). Με την ψύξη, το πεντάνιο και το εξάνιο θα συμπυκνωθούν και θα δώσουν ένα υγρό που λέγεται *φυσική βενζίνη* (natural gasoline). Η ψύξη του φυσικού αερίου θα επιτρέψει στο προπάνιο και το βουτάνιο να υγροποιηθούν επίσης. Αυτές οι ενώσεις βρίσκονται με το όνομα υγροποιημένο πετρέλαιο από αέριο (LPG, liquefied petroleum gas). Το LPG είναι πολύ χρήσιμο ιδιαίτερα σε αγροτικές περιοχές που δεν τροφοδοτούνται από δίκτυα φυσικού αερίου.
4. *Απομάκρυνση του αζώτου*. Η διεργασία βασίζεται στη διαφορά των σημείων ζέσεως του αζώτου και του μεθανίου και γίνεται με κρυογονική απόσταξη, με την προϋπόθεση ότι έχουν αφαιρεθεί όλες οι ουσίες που μπορεί να δημιουργήσουν στερεά.

5.4.2 Μεταφορά του φυσικού αερίου

Το φυσικό αέριο μεταφέρεται κυρίως με αγωγούς. Ένας τυπικός αγωγός φυσικού αερίου περιέχει αέριο σε πίεση 65 ατμοσφαιρών. Το αέριο κινείται με μία ταχύτητα 20-24 km/h. Οι αγωγοί εκτός του ότι είναι μία εύκολη λύση για την μεταφορά του, έχουν το πλεονέκτημα ότι αποτελούν και μια καλή αποθηκευτική λύση. Στις Η.Π.Α. μόνο, υπάρχουν αγωγοί μήκους περισσότερο από 1.800.000 km για συλλογή, μεταφορά και διανομή του φυσικού αερίου, σε σχέση με τα 320.000 km των αγωγών πετρελαίου. Επιπλέον το φυσικό αέριο μπορεί να αποθηκευτεί σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις ανενεργών ορυχείων.

Η διεθνής μεταφορά φυσικού αερίου γίνεται με ειδικά δεξαμενόπλοια (υγραεριοφόρα πλοία, Σχήμα 5.2). Το αέριο αποθηκεύεται ως υγρό σε χαμηλές θερμοκρασίες. Το μεθάνιο γίνεται υγρό στους -164°C σε ατμοσφαιρική πίεση. Παραμένει υγρό μέχρι τους -82°C και πίεση 46 atm. Το υγροποιημένο φυσικό αέριο LNG (liquefied natural gas) απαιτεί μόνο το 1/600 του όγκου του αερίου μεθανίου σε κανονικές συνθήκες. Τα δεξαμενόπλοια αυτά είναι στην ουσία τεράστια επιπλέοντα θερμός. Η Αλγερία εξάγει τεράστιες ποσότητες LNG με πελάτη και τη χώρα μας.

5.4.3 Καύση φυσικού αερίου

Από πολλές πλευρές το φυσικό αέριο είναι ένα άριστο καύσιμο. Έχει την υψηλότερη θερμογόνο δύναμη από όλα τα ορυκτά καύσιμα. Είναι πολύ εύκολο να ελέγξουμε την παραγόμενη ενέργεια από την καύση, διότι οι καυστήρες φυσικού αερίου έχουν τη δυνατότητα άμεσης έναρξης ή σταματήματος. Το φυσικό αέριο είναι εντελώς καθαρό, δεν παράγει τέφρα (εκπομπές σωματιδίων)

και δεν απαιτεί αποθηκευτικούς χώρους. Δεν χρειάζεται να κανονίζουμε περιοδικές λήψεις καυσίμου και έχουμε καύσιμο αμέσως μόλις ανοίξουμε μια βάνα.



Σχήμα 5.2 Μεταφορά φυσικού αερίου με υγραεριοφόρα πλοία.

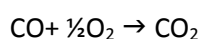
Η καύση του φυσικού αερίου εξαρτάται από τη δυνατότητα των ελευθέρων ριζών (π.χ. μεθυλική ρίζα, $\text{CH}_3\cdot$), που σχηματίστηκαν λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και της προσβολής από τα ενεργά συστατικά, να συμμετέχουν σε διάφορες αλυσιδωτές αντιδράσεις. Αρχικά, το μεθάνιο αντιδρά με την $\text{CH}_3\cdot$ για το σχηματισμό φορμαλδεΐδης (HCHO). Η τελευταία αντιδρά προς μια φορμολική ρίζα (HCO), η οποία δίδει μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Μέσω τέτοιων σταδίων καταναλώνονται τα αντιδρώντα συστατικά και δίνουν H_2 , H_2O και CO . Η συνολική διεργασία μπορεί να περιγραφεί από την αντίδραση:



Η διεργασία γίνεται σχεδόν ακαριαία, σε χρόνο της τάξης του χιλιοστού του δευτερολέπτου (ms), κάτι που εξαρτάται από τη θερμοκρασία της φλόγας, την πίεση και ο λόγος καυσίμου-αέρα. Η διεργασία αυτή καλείται *οξειδωτική πυρόλυση*. Εν συνεχεία, το H_2 οξειδώνεται σχηματίζοντας H_2O και απελευθερώνει επιπλέον ενέργεια, σε χρόνο μικρότερο από ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου



Τελικά, και το CO οξειδώνεται προς CO_2 με την απελευθέρωση ενέργειας. Η τελευταία διεργασία είναι το αργότερο στάδιο και τυπικά συμβαίνει σε μερικά ms.



Επομένως, όταν υπάρχει περίσσεια αέρα από τη καύση του φυσικού αερίου (κυρίως CH_4) παράγεται CO_2 και H_2O , σύμφωνα με την συνολική αντίδραση:



Εάν το οξυγόνο δεν επαρκεί πλήρως για καύση, παράγεται CO :



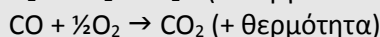
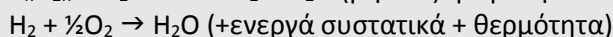
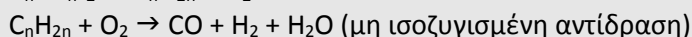
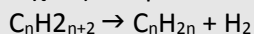
που σημαίνει ότι χάνεται ενέργεια, αλλά και παράγεται τοξικό μονοξείδιο του άνθρακα. Όμως η μερική καύση του φυσικού αερίου μπορεί να είναι και επιθυμητή, εάν απαιτείται η παραγωγή H_2 και CO (αέριο σύνθεσης). Όταν το ποσοστό οξυγόνου είναι ακόμα μικρότερο τότε παράγεται αιθάλη δηλαδή άνθρακας και αυτό είναι ακόμα χειρότερο διότι όχι μόνο χάνεται ενέργεια αλλά και δημιουργούνται επικαθίσεις (κάπνα).



Και πάλι όμως μπορεί αυτή η καύση να είναι επιθυμητή εάν επιθυμούμε να παράγουμε «carbon black» για ορισμένες βιομηχανίες, όπως για παράδειγμα ελαστικών, χρωμάτων και πλαστικών.

Η καύση των αλκανίων

Όταν τα αλκάνια ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) με $n \geq 2$ καίγονται, ο μηχανισμός της αντίδρασης είναι διαφορετικός από το μηχανισμό καύσης του μεθανίου. Αρχικά, τα αλκάνια μετατρέπονται σε ένα ή περισσότερα αλκένια (C_nH_{2n}), ιδιαίτερα σε αιθυλένιο (C_2H_4) και προπυλένιο (C_3H_6). Τα αλκένια κατόπιν υφίστανται οξειδωτική πυρόλυση προς CO , H_2 , και H_2O , αλλά με διαφορετικούς μηχανισμούς από τους αντίστοιχους του μεθανίου. Οι τελικές αντιδράσεις μπορούν να γραφούν ως εξής:

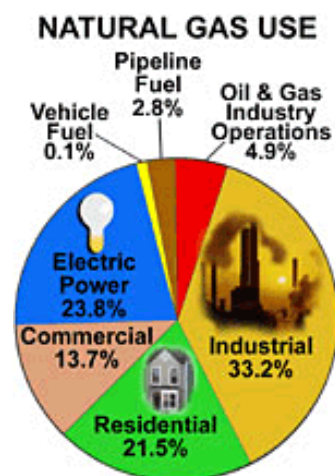


5.5. Χρήσεις

Το φυσικό αέριο, λόγω των συγκριτικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει σε σχέση με τους γαιάνθρακες και το πετρέλαιο, έχει πολλές και σημαντικές εφαρμογές. Οι κύριοι τομείς που χρησιμοποιείται το φυσικό αέριο είναι:

1) *Ηλεκτροπαραγωγή.* Το φυσικό αέριο αποτελεί άριστο καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του (πολλά από τα οποία ισχύουν και για τις χρήσεις του σε άλλους τομείς) είναι η συνεχής ροή του καυσίμου, οι πολύ μικρότερες εκπομπές ρύπων (μεταξύ άλλων δεν εκπέμπονται καθόλου σωματιδιακοί ρύποι), η αυξημένη ενεργειακή απόδοση της μονάδας, η ευχέρεια χειρισμού και ελέγχου, η αποκέντρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα και η διασπορά στις πρωτογενείς πηγές της χώρας (ή διασπορά της ενεργειακής εξάρτησης). Μερικό μειονέκτημα της χρήσης του φυσικού αερίου στην ηλεκτροπαραγωγή είναι ότι το κόστος παραγωγής ανά είναι υψηλότερο από ότι το αντίστοιχο κόστος με τη χρήση γαιάνθρακα.

Οι εκπεμπόμενοι ρύποι από τις ΑΗΜ ανάλογα με το ορυκτό καύσιμο που χρησιμοποιούν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4. Επίσης, αναφορικά με το CO_2 , από την καύση του φυσικού αερίου παράγονται 30% λιγότερες εκπομπές CO_2 σε σχέση με την καύση του πετρελαίου και 45% λιγότερες εκπομπές σε σχέση με την καύση πισσούχου άνθρακα.



Πίνακας 5.4. Εκπεμπόμενοι ρύποι από μονάδες ατμοπαραγωγής με τη χρήση διαφορετικών καυσίμων (σε mg/MJ παραγόμενης θερμότητας)

Καύσιμο	Σωματίδια	NO _x	SO ₂	CO	Υδρογ/κες
Γαιάνθρακας	1090	387	2456	12	2
Μαζούτ	100	170	1400	14	3
Ντίζελ	6	100	220	16	3
Φυσικό αέριο	4	100	0,3	7	1

- 2) *Συμπαγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.* Με το φυσικό αέριο παρέχεται η ευκολία συμπαγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ), στις περιπτώσεις που απαιτούνται ταυτόχρονα σημαντικές ποσότητες θερμικού φορτίου και ηλεκτρισμού. Ήδη, σε διεθνή κλίμακα, λειτουργεί μεγάλος αριθμός μονάδων ΣΗΘ.
- 3) *Βιομηχανικός τομέας.* Έχει μεγάλη σημασία για έναν ορυκτό πόρο, όπως είναι το φυσικό αέριο, να είναι δυνατή η σύνθεση οργανικών ενώσεων. Ο βιομηχανικός τομέας χρησιμοποιεί το φυσικό αέριο τόσο για θερμικές χρήσεις, όσο και την παραγωγή πληθώρας προϊόντων. Τέτοια προϊόντα είναι το ακετυλένιο, το χλωρομεθάνιο, ο διθειάνθρακας και, κυρίως, το αέριο σύνθεσης (CO+H₂). Η μεγαλύτερη εφαρμογή του φυσικού αερίου στη χημική βιομηχανία είναι αναμφισβήτητη η παραγωγή αερίου σύνθεσης. Η ενδοθερμική αντίδραση παραγωγής του γράφεται ως:



Παρουσία καταλυτών το CO αντιδρά με ατμό και παράγεται επιπλέον υδρογόνο, καθώς και διοξείδιο του άνθρακα:



Οι κυριότερες μέθοδοι που επιλέγονται ανάλογα το κόστος της επένδυσης, την κατανάλωση ενέργειας, τις απαιτήσεις σε οξυγόνο και τη τελική διεργασία για την οποία κατευθύνεται το αέριο σύνθεσης είναι:

- Αναμόρφωση με ατμό
- Συνδυασμένη αναμόρφωση
- Αυτοθερμική αναμόρφωση
- Μη καταλυτική μερική οξείδωση
- Αναμόρφωση με CO₂
- Καταλυτική μερική οξείδωση

Το μεγαλύτερο ποσοστό του παραγόμενου αερίου σύνθεσης χρησιμοποιείται ως πηγή υδρογόνου για παραγωγή αμμωνίας (την πρώτη ύλη λιπασμάτων) ή ως πρώτη ύλη σε διυλιστήρια, όπου χρησιμοποιείται στην υδρογονοπυρόλυση και υδρογονοαποθείωση.

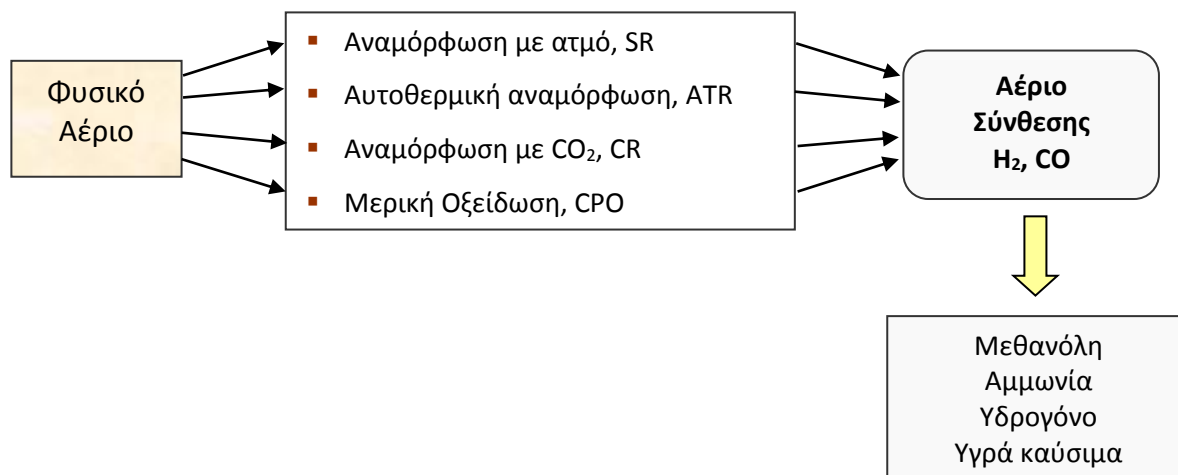
Ένα άλλο σημαντικό προϊόν που παράγεται από το αέριο σύνθεσης είναι η μεθανόλη, η οποία από τη μεριά της αποτελεί πρώτη ύλη για την παραγωγή φορμαλδεΰδης (HCHO) ή οξικού οξέος (CH₃COOH), καθώς και προσθέτων στη βενζίνη (MTBE), ενώ μπορεί να χαρακτηριστεί και ως εναλλακτικό καύσιμο.

Πέραν του μεθανίου, το περιεχόμενο αιθάνιο ή προπάνιο παρουσία ατμού παράγει αιθυλένιο ή προπυλένιο, ενώ τα βουτάνια μετά το διαχωρισμό τους χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μηλεϊνικού ανυδρίτη.

Μεγάλη πρόκληση για τον επιστημονικό κόσμο της σύνθεσης αποτελεί η μετατροπή του μεθανίου σε αιθυλένιο, την πρώτη ύλη για πληθώρα υδρογονανθράκων, αλλά και το πολυαιθυλένιο. Η μετατροπή του μεθανίου σε αιθυλένιο:



χαρακτηρίζεται ως διμερισμός. Μέχρι σήμερα δεν κατέστη δυνατή η εύρεση οικονομικής λύσης σε αυτό το ζήτημα.

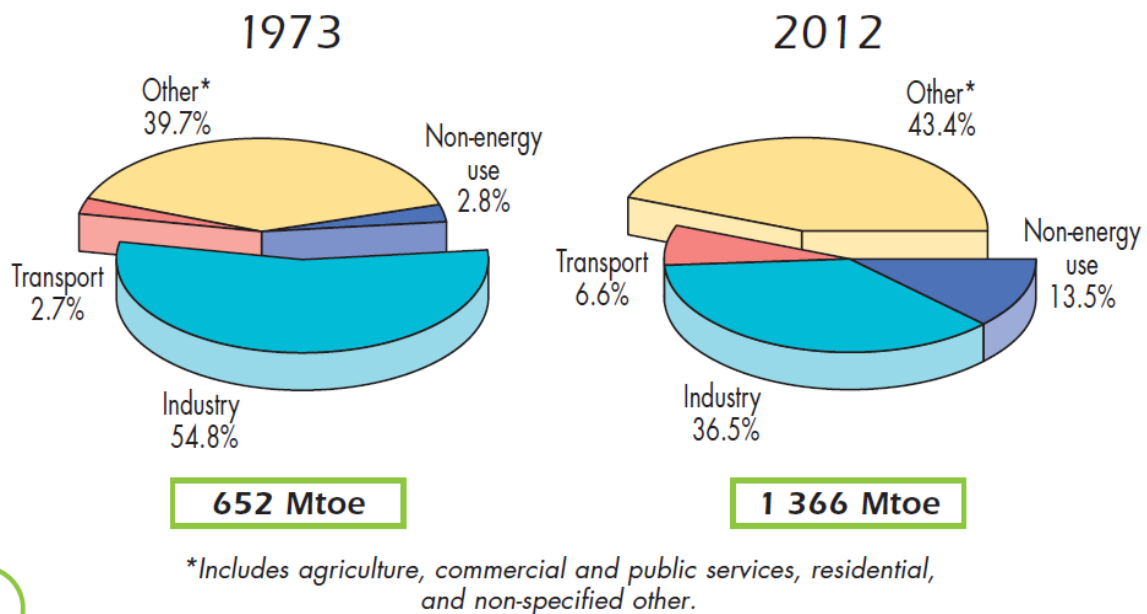


4) *Εμπορικός τομέας.* Η χρήση του φυσικού αερίου (για θέρμανση, παραγωγή ζεστού νερού χρήσης κτλ.) στον εμπορικό τομέα περιλαμβάνει σχεδόν όλες τις κατηγορίες καταναλωτών ενέργειας, όπως καταστήματα, σχολεία, νοσοκομεία, αθλητικά και εμπορικά κέντρα, θερμοκήπια, μεταφορές κ.ά. Στα θερμοκήπια ένα επιπλέον πλεονέκτημα της χρήσης του φυσικού αερίου είναι η δυνατότητα εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας του θερμοκηπίου με το CO₂ των καυσαερίων. Τα λεωφορεία που κινούνται μέσα στην πόλη, χρησιμοποιώντας φυσικό αέριο εκπέμπουν πολύ λιγότερους ρύπους συγκρινόμενα με τα βενζινοκίνητα ή τα ντιζελοκίνητα αυτοκίνητα και για το λόγο αυτό η χρήση τους διευρύνεται σε μεγάλα αστικά κέντρα.

5) *Οικιακός τομέας.* Σημαντική θέση στις χρήσεις του φυσικού αερίου κατέχει παγκοσμίως ο οικιακός τομέας με θέρμανση χώρων, παραγωγή ζεστού νερού, μαγείρεμα, ψύξη κτλ

Σύμφωνα με διαθέσιμα στοιχεία για το 2012, σε παγκόσμιο επίπεδο, το φυσικό αέριο κατέχει ποσοστό 21,3% στην παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας, από το 16% που ήταν το 1973. Τα ποσοστά συμμετοχής του φυσικού αερίου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι 22,5% το 2012 (12,1% το 1973). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.3, το μερίδιο της βιομηχανίας στην κατανάλωση του φυσικού αερίου είναι περίπου 36% (τόσο για θερμικές, όσο και για μη-θερμικές, χημικές χρήσεις), ενώ η οικιακή, η εμπορική και η αγροτική κατανάλωση κατέχει μερίδιο 43%. Ένα ποσοστό της τάξης του 6,6% χρησιμοποιείται στις μεταφορές.

Η κατανομή των χρήσεων φυσικού αερίου στην Ελλάδα (σύμφωνα με στοιχεία της ΔΕΠΑ) το 2009 παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.3. Κατανομή κατανάλωσης φυσικού αερίου στον κόσμο το 2012 και σύγκριση με το 1973 ανά τομέα δραστηριότητας (πηγή: IEA Key World Energy Statistics, 2014).

Σύνολο: 3,373 δισ. κ.μ.



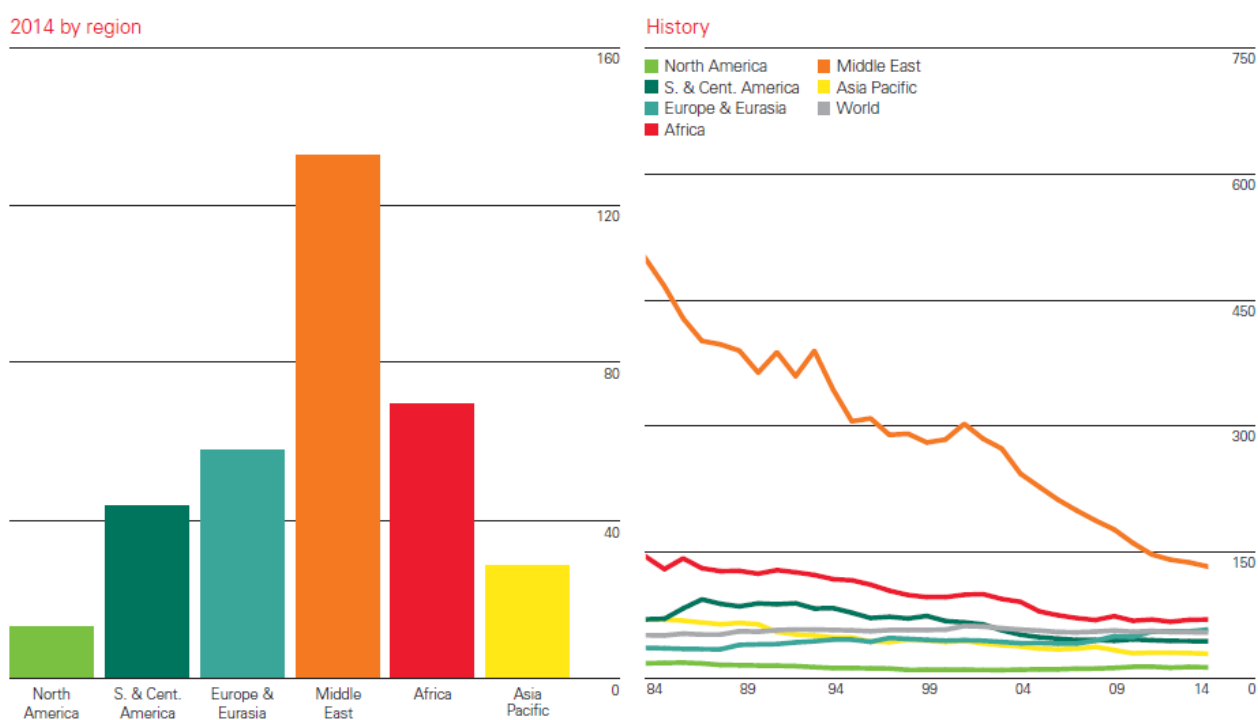
Σχήμα 5.4. Κατανομή κατανάλωσης φυσικού αερίου στην Ελλάδα το 2009 ανά τομέα δραστηριότητας (πηγή: ΔΕΠΑ, 2011).

5.6. Παραγωγή και Αποθέματα Φυσικού Αερίου

Η Ρωσία και οι ΗΠΑ κυριαρχούν στην παραγωγή φυσικού αερίου κατέχοντας η πρώτη περίπου το 21% της παγκόσμιας παραγωγής και η δεύτερη το 17,4%. Ακολουθούν το Κατάρ, το Ιράν και ο Καναδάς με περίπου 5% η κάθε χώρα.

Η παγκόσμια παραγωγή το 2014 ανήλθε σε $3461 \times 10^9 \text{ m}^3$ (+1,6% σε σχέση με το 2013). Η μέση ετήσια αύξηση κατανάλωσης φυσικού αερίου κατά την τελευταία δεκαετία (2000-2014), και παρά την οικονομική ύφεση του 2008, ήταν 2,3%. Το ποσοστό αυτό μπορεί να συγκριθεί με τα αντίστοιχα ποσοστά για το πετρέλαιο (+1,2%), τον άνθρακα (+3,3%) και την πυρηνική ενέργεια (-0,1%) [BP Statistical Review 2015].

Όπως έχει λεχθεί το φυσικό αέριο είναι ένα ιδιαίτερα ελκυστικό καύσιμο. Το μόνο πρόβλημα στη χρήση του σήμερα είναι η διαθεσιμότητα και η τιμή του. Πριν από 30 χρόνια υπήρχε διεθνώς η αίσθηση της υπερεπάρκειας, αλλά σήμερα γνωρίζουμε ότι με την παρούσα κατανάλωση τα αποθέματα του φυσικού αερίου δεν θα διαρκέσουν για περισσότερα από 54 χρόνια, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.5.

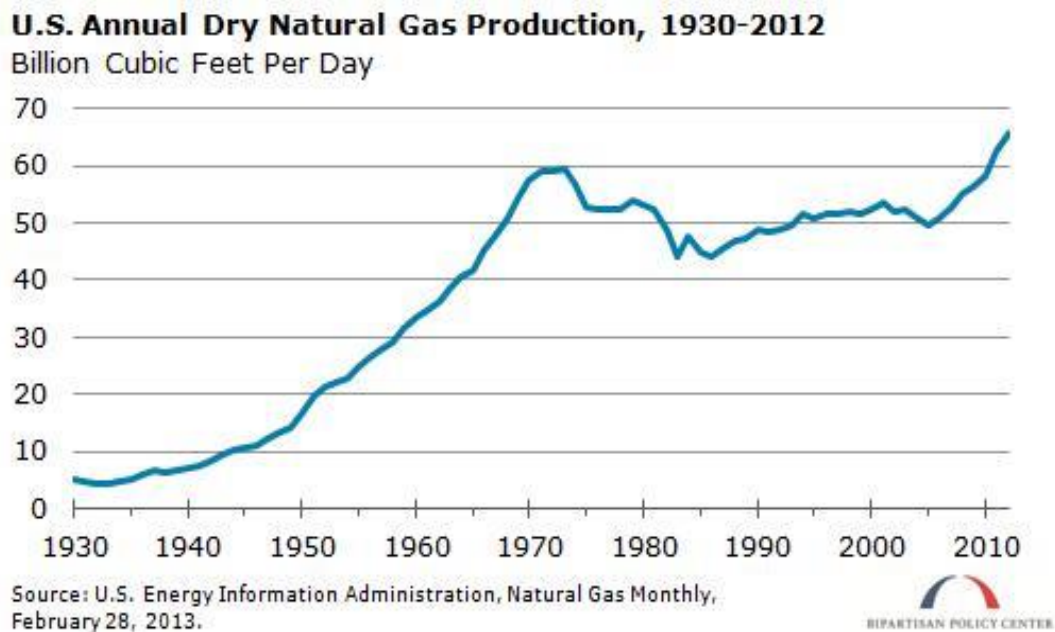


Σχήμα 5.5. Δεξιά οι λόγοι αποθεμάτων φυσικού αερίου προς το ρυθμό παραγωγής του (R/P ratio), δίνοντας έτσι το χρόνο εξάντλησης αυτού του καυσίμου με την προϋπόθεση του σταθερού ρυθμού παραγωγή (BP report 2015). Για το 2014 ο χρόνος αυτός ήταν 54 χρόνια. Αριστερά, οι λόγοι αποθεμάτων για τις διάφορες περιοχές.

Μεγάλα αποδεδειγμένα αποθέματα φυσικού υπάρχουν στην πρώην Σοβιετική Ένωση, και κυρίως στην Σιβηρία (Ρωσία: 17,4%, Τουρμενιστάν: 9,3%), στη Μέση Ανατολή (Ιράν: 18%, Κατάρ: 13%, Σαουδική Αραβία: 4,4%, ΗΑΕ: 3,3%), Η.Π.Α. (5,2%) και Αλγερία (2,4%). Το Σχήμα 5.6 δείχνει την παραγωγή φυσικού αερίου στις Η.Π.Α. για 80 χρόνια. Σε αντίθεση με τα άλλα ορυκτά καύσιμα, η

παραγωγή μένει σχετικά σταθερή με σημαντική αύξηση τελευταία λόγω της αξιοποίησης πετρωμάτων με την μέθοδο της υδραυλικής ρωγμάτωσης.

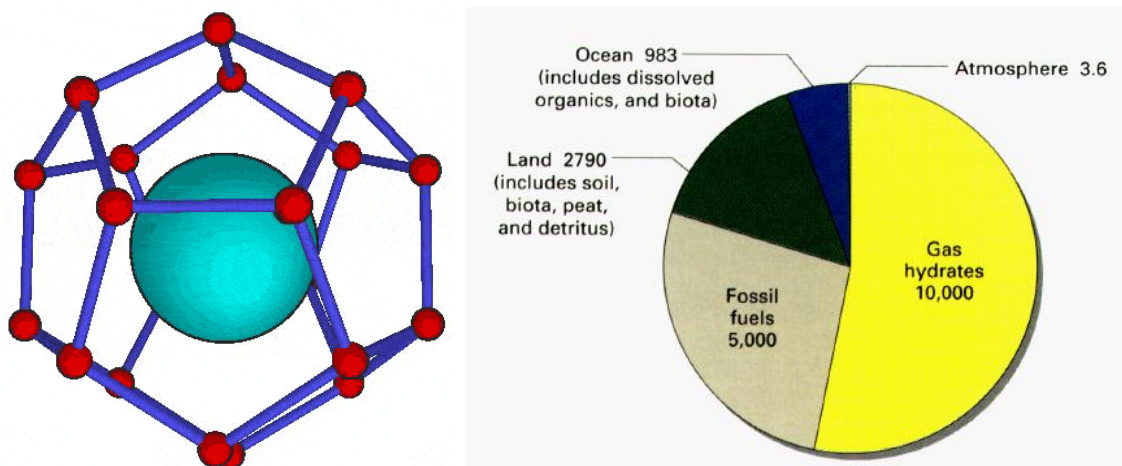
Έχουν διερευνηθεί και διερευνούνται και άλλοι τρόποι παραγωγής μεθανίου. Μία λύση είναι η περαιτέρω αξιοποίηση του μεθανίου των υπόγειων εκμεταλλεύσεων άνθρακα (coal bed gas). Άλλη μερική λύση είναι η παραγωγή μεθανίου από βακτηριακή αποσύνθεση αστικών λυμάτων και βιομάζας. Επίσης, η εξαερίωση του άνθρακα μπορεί να δώσει υποκατάστατο φυσικού αερίου έτσι ώστε να μετατρέψουμε ένα βρώμικο και δύσκολο χρησιμοποιούμενο καύσιμο σαν το κάρβουνο σε μια καθαρότερη μορφή. Για την ανάκτηση του φυσικού αερίου που βρίσκεται παγιδευμένο σε ψαμμίτες χαμηλού πορώδους απαιτούνται ειδικές μεθόδους ανάκτησης (π.χ. τεχνητά ρήγματα). Μία άλλη πηγή φυσικού αερίου είναι τα γεωσυμπιεσμένα συστήματα, δηλ. γεωλογικοί σχηματισμοί όπου το αέριο είναι παγιδευμένο σε κοιτάσματα νερού υψηλής αλατότητας σε υψηλές πιέσεις και σε βάθος περίπου 2 km. Πρόβλημα αποτελεί το κόστος επεξεργασίας των νερών, ενώ μπορεί να ανακτηθεί και θερμότητα. Τέλος, σε περίπτωση που αυξηθεί σημαντικά η τιμή του φυσικού αερίου, μπορεί να γίνει οικονομική η ανάκτηση των πόρων του φυσικού αερίου με τη μορφή των ένυδρων στερεών ενώσεων (methane clathrates ή hydrates, Σχήμα 5.7α), που όμως απαιτούν ειδικές μεθόδους ανάκτησης.



Σχήμα 5.6. Παραγωγή φυσικού αερίου στις Η.Π.Α. Η σημαντική αύξηση μετά το 2005 οφείλεται στο μη-συμβατικό αέριο με τη μέθοδο της υδραυλικής ρωγμάτωσης.

5.7. Το Φυσικό Αέριο στην Ελλάδα

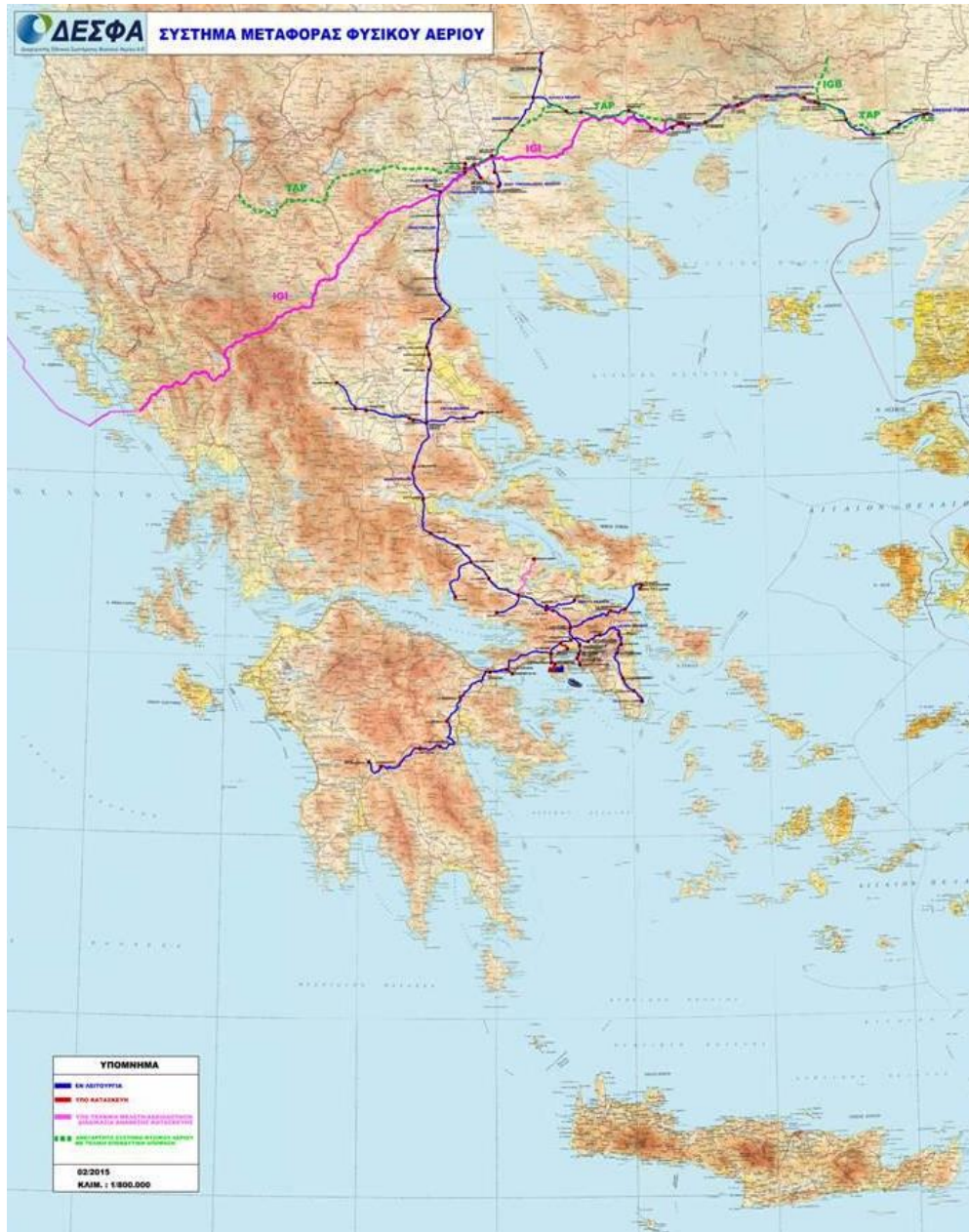
Το Εθνικό Σύστημα Φυσικού Αερίου (Σχήμα 5.8) μεταφέρει φυσικό αέριο από τα ελληνοβουλγαρικά και ελληνοτουρκικά σύνορα (ξεκίνησε τον Νοέμβριο του 2007), καθώς και από τον τερματικό σταθμό υγροποιημένου φυσικού αερίου, ο οποίος βρίσκεται εγκατεστημένος στη νήσο Ρεβυθούσα του κόλπου Μεγάρων, σε καταναλωτές εγκατεστημένους στην ηπειρωτική Ελλάδα. Αποτελείται από:



Σχήμα 5.7. Αριστερά, η δομή μιας ένυδρης ουσίας μεθανίου. Δεξιά, η κατανομή του ορυκτών καυσίμων στη γη, ανάλογα με τον τρόπο που βρίσκονται δεσμευμένοι.

- Τον κεντρικό αγωγό μεταφοράς αερίου υψηλής πίεσης (70 bar) και τους κλάδους αυτού
- Τους Μετρητικούς Σταθμούς Συνόρων Σιδηροκάστρου Σερρών και Κήπων Έβρου
- Το Σταθμό Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (ΥΦΑ) Ρεβυθούσας,
- Το Σταθμό Συμπύεσης στη Νέα Μεσήμβρια Θεσσαλονίκης,
- Τους Μετρητικούς και Ρυθμιστικούς σταθμούς φυσικού αερίου,
- Τα Κέντρα Ελέγχου και Κατανομής Φορτίου,
- Τα Κέντρα Λειτουργίας και Συντήρησης του Μετρητικού Σταθμού Συνόρων Σιδηροκάστρου, Ανατολικής Ελλάδος, Βορείου Ελλάδος, Κεντρικής Ελλάδος και Νοτίου Ελλάδος, και
- Το σύστημα Τηλελέγχου και Τηλεπικοινωνιών.
- Οι εγκαταστάσεις υγροποιημένου φ.α. (LPG) στη νήσο Ρεβυθούσα περιλαμβάνουν δύο δεξαμενές, χωρητικότητας 130.000 εκατ. m³, εγκαταστάσεις ελλιμενισμού δεξαμενόπλοιων, κρουγενικές εγκαταστάσεις και αεροποιητές για την επαναεριοποίηση του υγροποιημένου αερίου.

Σύμφωνα με στοιχεία του 2012 για το φυσικό αέριο που εγχύθηκε στο εθνικό σύστημα μεταφοράς φ.α., το 56% του φ.α. προερχόταν από τη Ρωσία, το 30% ήταν αζέρικο και το υπόλοιπο μεταφέρθηκε από την Αλγερία.



Σχήμα 5.8. Το σύστημα μεταφοράς φυσικού αερίου στη χώρα μας (<http://www.desfa.gr>).

6. ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

6.1. Εισαγωγή

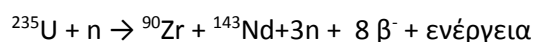
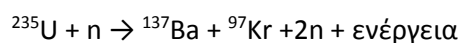
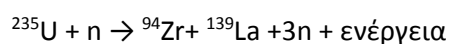
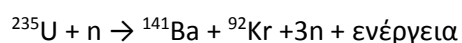
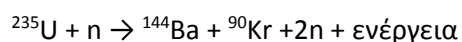
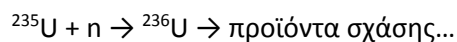
Πυρηνική ενέργεια είναι η ενέργεια που εκλύεται κατά τις πυρηνικές αντιδράσεις. Στην πράξη, ο όρος πυρηνική ενέργεια χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει την ενέργεια που απελευθερώνεται σε τεράστιες ποσότητες κατά την **πυρηνική σχάση**, δηλαδή τη διάσπαση των πυρήνων ορισμένων ατόμων σε ελαφρότερους πυρήνες, ή κατά την **πυρηνική σύντηξη**, δηλαδή την ένωση πυρήνων με το σχηματισμό βαρύτερων.

Εκτός από την κύρια χρήση της ενέργειας αυτής για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, η ενέργεια αυτή βρίσκει εφαρμογές και στη ναυσιπλοΐα (πολεμικά πλοία, υποβρύχια, παγοθραυστικά). Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των εγκαταστάσεων αυτών σε παγκόσμιο επίπεδο ανερχόταν το 2014 σε 2176 TWh, που ισοδυναμούν σε 574 εκατ. TWh (BP Statistical Review, 2015). Η παραγόμενη αυτή ενέργεια αντιπροσώπευε το 10,7% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος (ή 4,4% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας). Το 2014, 13 χώρες χρησιμοποιούν την πυρηνική ενέργεια για να καλύψουν τουλάχιστον το ένα τέταρτο της συνολικής κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. Γαλλία 77%, Σλοβακία 57% και Ουγγαρία 54%). Οι περισσότεροι πυρηνικοί αντιδραστήρες βρίσκονται στις Η.Π.Α. και ακολουθούν η Γαλλία και η Ιαπωνία. Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας παραμένει αμφισβητούμενη στις περισσότερες χώρες, τόσο από πολιτική όσο και από επιστημονική-τεχνολογική σκοπιά. Τα κύρια επιχειρήματα των αντιπάλων της πυρηνικής ενέργειας είναι οι κίνδυνοι (τόσο για τον άνθρωπο, όσο και για το περιβάλλον) σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος, καθώς και τα προβλήματα από τη διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων. Από την άλλη μεριά, οι υποστηρικτές της πυρηνικής ενέργειας αντιτείνουν ότι η μορφή αυτή της ενέργειας είναι η μόνη μορφή που μπορεί να συνεισφέρει σε μεγάλη κλίμακα στην αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου.

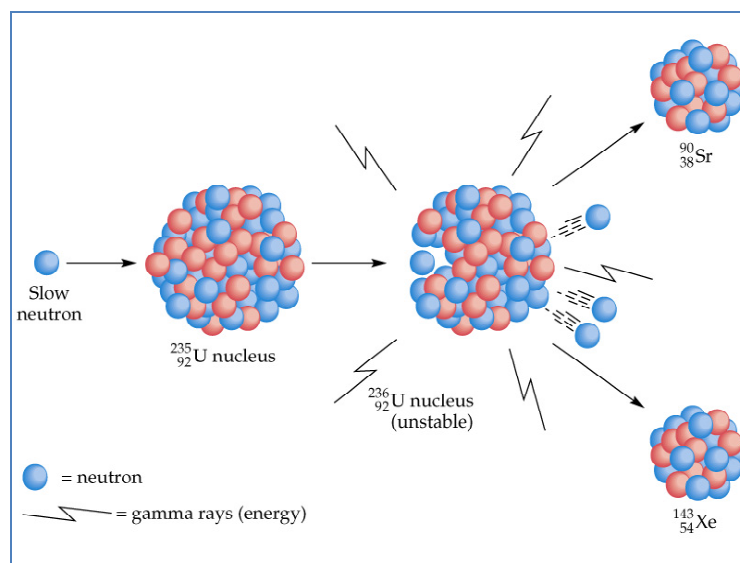
Ως **πυρηνικός χειμώνας** νοείται το σύνολο των καταστρεπτικών επιδράσεων που θα μπορούσε να έχει στο φυσικό περιβάλλον ένας πόλεμος με πυρηνικά όπλα. Ο όρος χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1982 σε μελέτη των Paul J. Crutzen και John W. Birks. Ακολούθησαν διάφορες μελέτες που εξέτασαν τις πιθανές επιπτώσεις που θα είχαν στο κλίμα της γης οι τεράστιες ποσότητες σκόνης και καπνού που θα εκτοξεύονταν στην ατμόσφαιρα ύστερα από πολλαπλές πυρηνικές εκρήξεις. Μια από αυτές είναι γνωστή με το όνομα «ΤΤΑΡS», το 1983, από τα αρχικά των επιστημόνων που τη συνέταξαν: R.P. Turco, O.B. Toon, T.P. Ackerman, J.B. Pollack, και Carl Sagan. Τα σωματίδια της σκόνης και ο καπνός θα μπορούσαν να σχηματίσουν έναν τεράστιο «μανδύα» που θα σκέπαζε τη γη, επιτρέποντας να φθάσει στην επιφάνεια του πλανήτη μας (για εβδομάδες ή και για μήνες) ένα πολύ μικρό ποσοστό μόνον της ηλιακής ακτινοβολίας. Το αποτέλεσμα θα ήταν συσκότιση και επικράτηση πολύ χαμηλών θερμοκρασιών, που σε συνδυασμό με τα τοξικά αέρια και τη συνεχή ραδιενεργό πρόσπτωση θα κατέστρεφαν τα περισσότερα οικοσυστήματα.

6.2. Μετατροπή μάζας σε ενέργεια

Το ουράνιο είναι 1,7 φορές πυκνότερο από το μόλυβδο και αποτελείται από άτομα που έχουν στον πυρήνα τους 92 πρωτόνια (θετικά φορτισμένα) και περίπου 140 νετρόνια (αφόρτιστα). Ένας από τους τύπους ατόμων ουρανίου ή καλύτερα ένα ισότοπο, έχει 143 νετρόνια. Αυτό το ουράνιο ^{235}U (ισότοπο ^{235}U) είναι αξιοπρόσεκτο διότι όταν ο πυρήνας του «χτυπηθεί» από ένα αργό νετρόνιο (επίσης γνωστό και ως θερμικό νετρόνιο), το άτομο μπορεί να διασπαστεί σε δύο μέρη και να απελευθερώσει ενέργεια ως θερμότητα. Αυτό ονομάζεται **πυρηνική σχάση** (nuclear fission) και το ^{235}U αποτελεί ένα «σχάσιμο υλικό». Με άλλα λόγια, χάνεται μάζα και μετατρέπεται σε ενέργεια. Την ίδια στιγμή πολλά νετρόνια εκπέμπονται από τον διασπασμένο πυρήνα. Εάν τα νετρόνια επιβραδυνθούν από ένα επιβραδυντή (moderator), όπως ο γραφίτης ή το νερό, είναι δυνατόν να προκαλέσουν τη σχάση άλλων ατόμων ^{235}U , κάνοντας την αρχή για τη δημιουργία μιας αλυσιδωτής αντίδρασης. Ορισμένα παραδείγματα σχάσης του U-235 (όπως και το παράδειγμα στο Σχήμα 6.1) είναι:

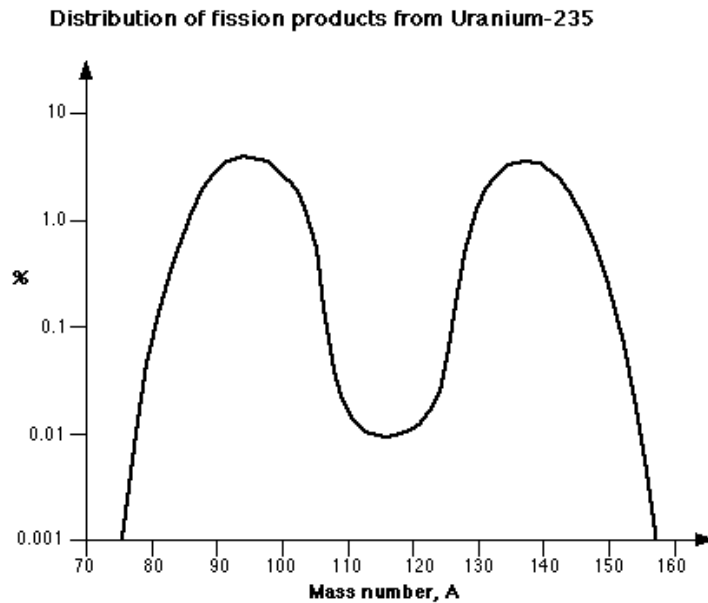


Όπως βλέπουμε από τις αντιδράσεις, η αξία της σχάσης του ουρανίου δεν έγκειται μόνο στην μεγάλη ενέργεια που απελευθερώνεται αλλά και στο ότι παράγονται από τις σχάσεις και 2-3 νετρόνια ακόμα που με τον ίδιο τρόπο θα «συντηρήσουν» την σχάση. Όσον αφορά τα παραγόμενα ισότοπα, είναι και αυτά ραδιενεργά και διασπώνται περαιτέρω εκπέμποντας σωματίδια π.χ. α, β, γ. Πως όμως αρχίζει η σχάση; Η αντίδραση αυτή «αρχίζει» με βομβαρδισμό του ^{235}U με νετρόνια που προέρχονται από βηρύλλιο που είναι αναμεμιγμένο με κάποιο πομπό ακτινοβολίας α π.χ. πολώνιο ή ράδιο.



Σχήμα 6.1. Ένα αργό νετρόνιο σχάζει έναν πυρήνα U-235 σε Sr-90 και Xe-143. Επίσης παράγονται περισσότερα νετρόνια και ακτινοβολία γ (ενέργεια).

Το 85% περίπου της ενέργειας που απελευθερώνεται είναι η κινητική ενέργεια των δύο θραυσμάτων του ^{235}U . Στο στερεό καύσιμο τα θραύσματα αυτά μπορούν να κινηθούν μόνο ελάχιστα και έτσι η ενέργεια τους γίνεται θερμότητα. Το υπόλοιπο 15% είναι ενέργεια ακτινών γ και η κινητική ενέργεια των νετρονίων. Τα δύο θραύσματα σπάνια είναι όμοια διότι η σχάση είναι τυχαία και η πιθανότητα να δημιουργηθούν δύο θραύσματα με μαζικό αριθμό $A=118$ είναι, όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.2, ελάχιστη. Οι δύο πυρήνες που προκύπτουν συνήθως δεν είναι του ίδιου μαζικού αριθμού, δηλαδή παλλάδιο (η βύθιση της καμπύλης), αλλά είναι πιο πιθανό να είναι Kr και Xe (οι δύο κορυφές της καμπύλης).



Σχήμα 6.2. Η κατανομή των προϊόντων σχάσης του U-235.

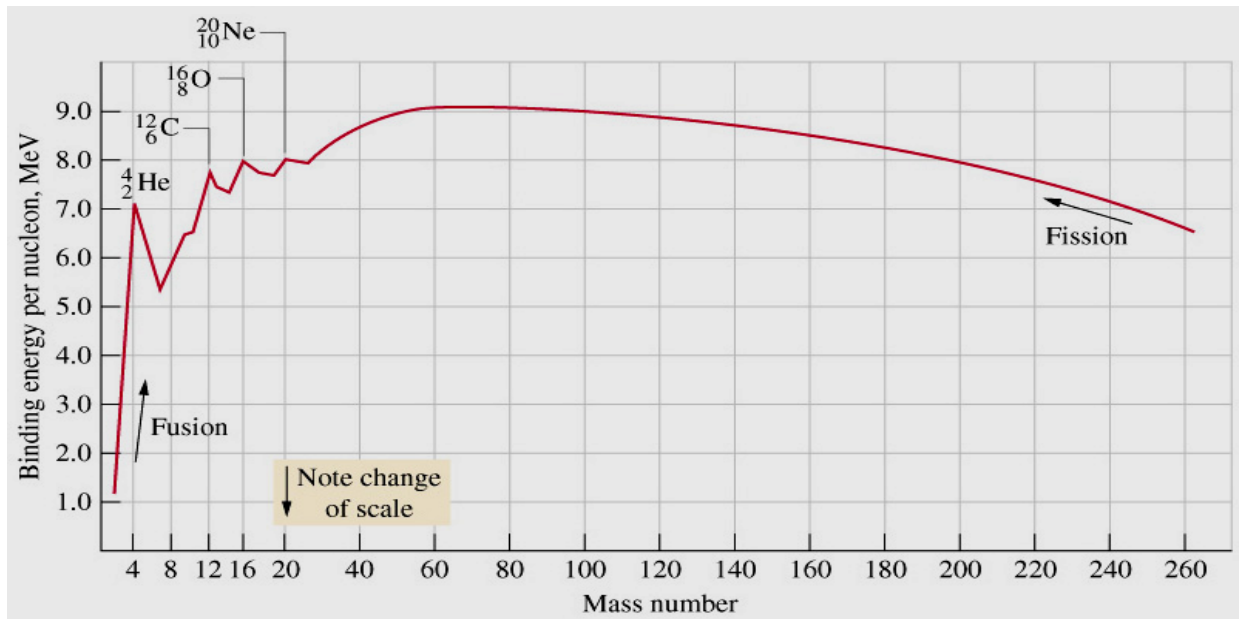
Εάν θεωρήσουμε τώρα έναν πυρήνα με μαζικό αριθμό A (νετρόνια και πρωτόνια), τότε το σύστημα του πυρήνα είναι ευσταθέστερο από την κατάσταση να είχαμε A νουκλεόνια σε άπειρη απόσταση μεταξύ των. Πάντα η μάζα ενός πυρήνα είναι μικρότερη από το άθροισμα των μαζών των συστατικών του. Το έλλειμμα αυτό μάζας Δm είναι ισοδύναμο με την ενεργειακή διαφορά ΔE που δίδεται από τον παρακάτω γνωστή σχέση της Φυσικής:

$$\Delta E = \Delta m c^2 \tag{6.1}$$

Η ενέργεια αυτή ελευθερώνεται κατά των σχηματισμό του πυρήνα από τα συστατικά του με αποτέλεσμα να μειωθεί η μάζα του. Εάν προσδοθεί στον πυρήνα, θα αποσυντεθεί στα συστατικά του (νουκλεόνια). Άρα έλλειμμα μάζας και ενέργεια σύνδεσης είναι το ίδιο πράγμα (βλ. και Σχήμα 6.3). Έτσι λοιπόν εάν το έλλειμμα μάζας των δύο προϊόντων σχάσης του ^{235}U είναι μεγαλύτερο από το έλλειμμα μάζας του ^{235}U τότε θα απελευθερωθεί ενέργεια. Η διαφορά αυτή για το παράδειγμά μας είναι $0,84 \text{ MeV/νουκλεόνιο}$ και έτσι απελευθερώνεται $E = 236 \times 0,84 \sim 200 \text{ MeV}$. Αυτή είναι η προέλευση της ενέργειας στους πυρηνικούς σταθμούς, δηλαδή της πυρηνικής ενέργειας!

Το άλλο σπουδαίο ισότοπο του φυσικού ουρανίου, το ^{238}U δεν είναι σχάσιμο σε συμβατικούς αντιδραστήρες αλλά κάθε άτομο μπορεί να συλλάβει ένα νετρόνιο και έμμεσα να γίνει σχάσιμο πλουτώνιο-239 (^{239}Pu). Το ^{239}Pu συμπεριφέρεται ανάλογα με το ^{235}U , με τη διαφορά ότι τα νετρόνια που παράγει είναι λίγο περισσότερα από τα νετρόνια του ^{235}U . Περίπου το ένα τρίτο της ενέργειας

ενός εμπορικού αντιδραστήρα προέρχεται από τη σχάση του πλουτωνίου που παράγεται σε έναν τέτοιο αντιδραστήρα.



Σχήμα 6.3. Η καμπύλη της ενέργειας σύνδεσης ως συνάρτηση του μαζικού αριθμού (Hill and Petrucci, *General Chemistry*, 2002).

Η καρδιά του αντιδραστήρα (reactor core) γεμίζεται με καύσιμο οξείδιο του ουρανίου. Στους αντιδραστήρες CANDU (όπου επιβραδυντής-ψυκτικό είναι D_2O), χρησιμοποιείται φυσικό ουράνιο (0,7% σε ${}^{235}\text{U}$), ενώ στους αντιδραστήρες ελαφρού νερού (H_2O) το καύσιμο είναι εμπλουτισμένο 3-4% ${}^{235}\text{U}$. Και στις δύο των περιπτώσεων το οξείδιο του ουρανίου ευρίσκεται σε μορφή κεραμικών δισκίων UO_2 συσκευασμένο μέσα σε σωλήνες από κράματα ζirkονίου ή ανοξείδωτου χάλυβα και περιτριγυρισμένου από ψυκτικό υγρό και επιβραδυντή. Ο επιβραδυντής επιβραδύνει την κίνηση των ταχέως κινούμενων νετρονίων που προέρχονται από την πυρηνική αλυσιδωτή αντίδραση έτσι ώστε να έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να δημιουργήσουν και άλλες σχάσεις. Τα αργά κινούμενα νετρόνια δημιουργούν νέες σχάσεις ατόμων ${}^{235}\text{U}$. Κάθε σχάση απελευθερώνει περίπου 200 MeV, ή $3,2 \times 10^{-11}$ J (σε σύγκριση με τα 4 eV ή $6,5 \times 10^{-19}$ J/mol CO_2 που απελευθερώνεται κατά την καύση του άνθρακα).

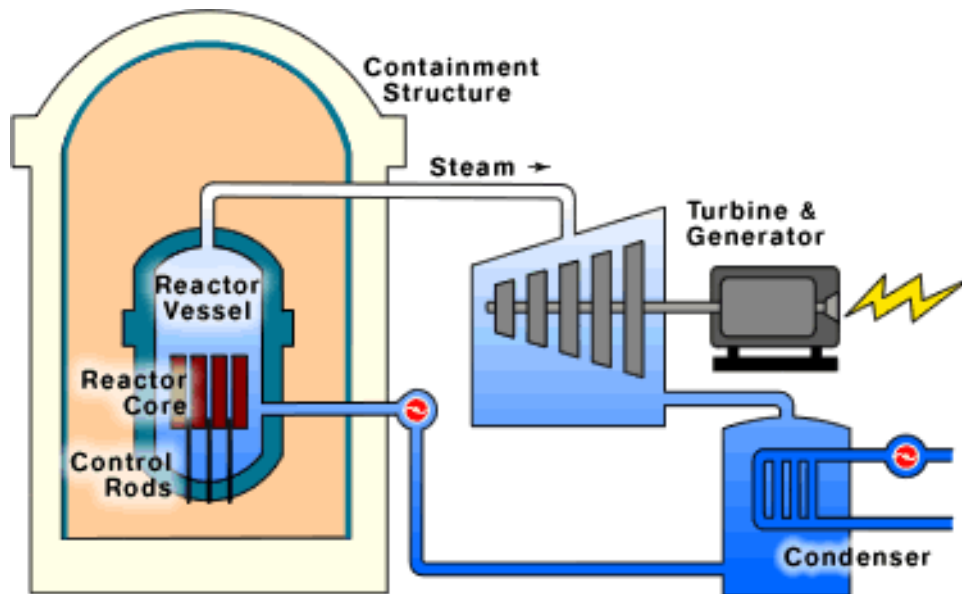
Εμπορικοί πυρηνικοί αντιδραστήρες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και ελέγχουν την αντίδραση σχάσης έτσι ώστε η θερμότητα να χρησιμοποιείται για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια.

6.3. Πυρηνικοί αντιδραστήρες

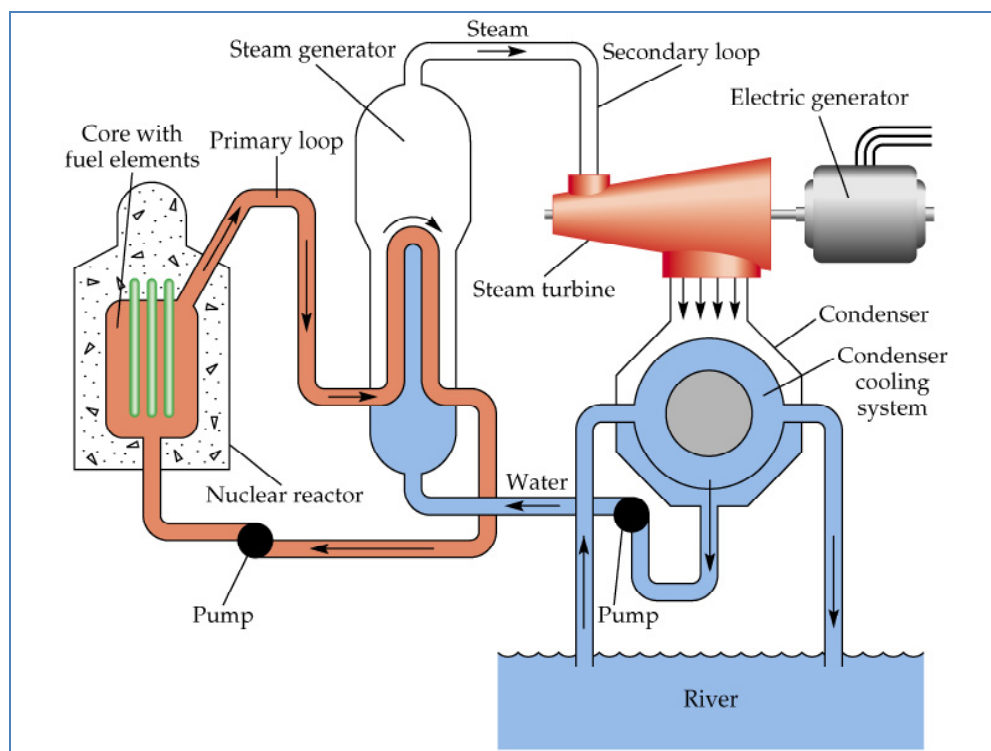
Τα Σχήματα 6.4 και 6.5 δείχνουν δύο διαφορετικούς τύπους αντιδραστήρων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τον αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος (BWR, boiling water reactor) και τον αντιδραστήρα νερού υπό πίεση (PWR, Pressurized Water Reactor). Στον πυρήνα του αντιδραστήρα το ουράνιο υφίσταται σχάση και επομένως μεγάλο ποσό θερμότητας απελευθερώνεται. Οι ράβδοι ελέγχου που φαίνονται στα διαγράμματα ρυθμίζουν τον ρυθμό της αντίδρασης και επομένως την θερμότητα που απελευθερώνεται, απορροφώντας μερικά από τα κινούμενα νετρόνια.

Στον αντιδραστήρα με νερό υπό πίεση, ο πυρήνας του αντιδραστήρα περιβάλλεται από κανονικό νερό και περικλείεται από ένα πολύ παχύ χαλύβδινο περίβλημα. Το νερό, σε μεγάλη πίεση

λειτουργεί σαν ψυκτικό/επιβραδυντής και ανακυκλοφορεί σε έναν εναλλάκτη (ατμοπαραγωγό) όπου νερό σε ένα άλλο κλειστό δίκτυο μετατρέπεται σε ατμό.



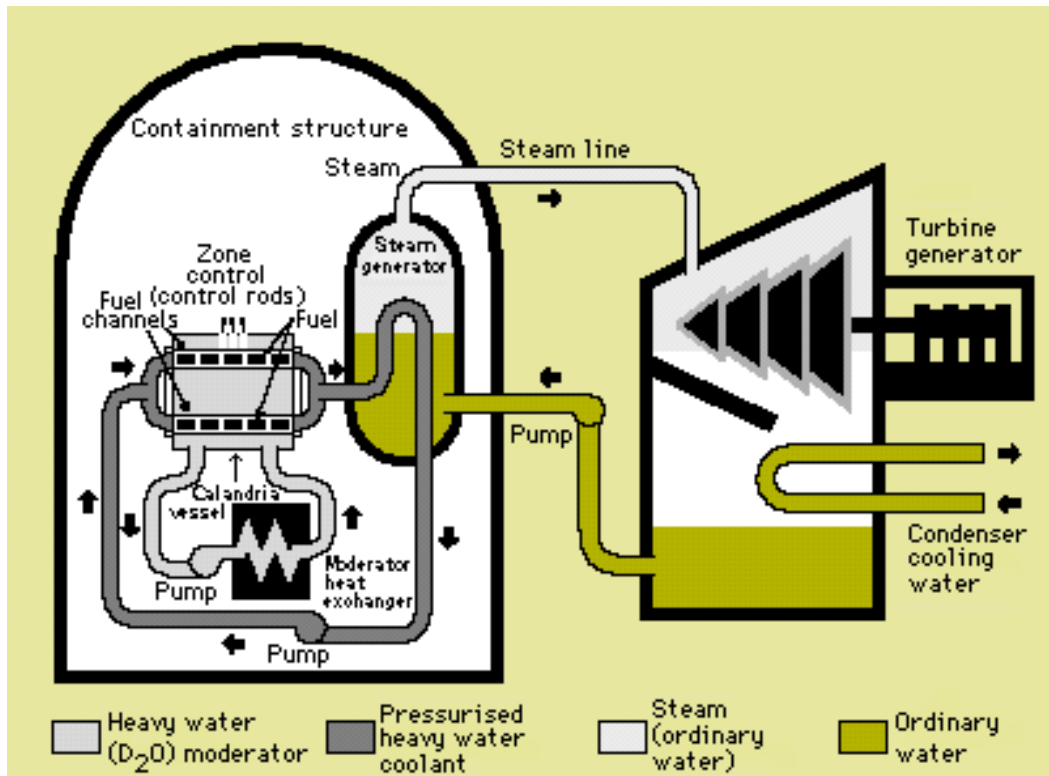
Σχήμα 6.4. Σχηματικό διάγραμμα αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος (boiling water reactor, BWR).



Σχήμα 6.5. Σχηματικό διάγραμμα αντιδραστήρας νερού υπό πίεση (PWR, Pressurized Water Reactor).

Το Σχήμα 6.6 δείχνει τον Καναδικής σχεδίασης και κατασκευής αντιδραστήρα CANDU. Αντί να βρίσκεται σε ένα δοχείο πίεσης, το καύσιμο τοποθετείται σε ένα αριθμό σωλήνων πίεσης μέσα σε έναν δοχείο αντιδραστήρα που λέγεται «calandria». Νερό ή βαρύ νερό υπό πίεση ρέει μέσα από

τους σωλήνες και μεταφέρει την θερμότητα σε έναν ατμοπαραγωγό. Βαρύ ύδωρ σε χαμηλή πίεση πληρώνει την calandria, περιβάλλοντας τους σωλήνες και δρώντας σαν επιβραδυντής.



Σχήμα 6.4. Ο αντιδραστήρας CANDU (Canadian Deuterium Uranium).

Και στις δύο περιπτώσεις όλα αυτά συμβαίνουν μέσα σε μία μεγάλη χαλύβδινη ή τσιμεντένια κατασκευή. Ο ατμός τροφοδοτείται σε μια στροβιλογεννήτρια περίπου ίδια με αυτές που είναι εγκατεστημένες σε μια θερμική μονάδα άνθρακα. Ο πυρήνας του καυσίμου ουρανίου απλά έχει τη θέση του ατμοπαραγωγού ή της εστίας καύσης του κάρβουνου (ή οποιαδήποτε άλλου ορυκτού καυσίμου) για να παράγει ατμό.

Το 2014, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ηλεκτροπαραγωγή από πυρηνική ενέργεια ήταν 2176 TWh, δηλ. περισσότερη από όλη την ηλεκτροπαραγωγή του έτους 1962. Οι λόγοι για την ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας είναι:

1) Η ονομαστική ισχύς αυξάνει σταθερά όσο νέες μονάδες εισέρχονται στο σύστημα. Στα μέσα του 2015 υπήρχαν 436 πυρηνικοί σταθμοί με ισχύ πάνω από 379 GWe που λειτουργούν σε 31 χώρες, με 67 πυρηνικούς αντιδραστήρες υπό κατασκευή. Σήμερα οι περισσότεροι νέοι πυρηνικοί σταθμοί κτίζονται στην Ασία (25 στην Κίνα και 9 στην Ινδία).

2) Η αυξημένη ονομαστική ισχύς σε διάφορες χώρες είναι αποτέλεσμα αναβαθμίσεων των υπαρχουσών μονάδων.

3) Η διαθεσιμότητα και η φόρτιση (load factor) των μονάδων αυξάνονται, έτσι ώστε περισσότερες kWh παράγονται από την εγκατεστημένη ισχύ. Οι περισσότερες χώρες σήμερα έχουν φόρτιση 80% από 67% που ήταν ο μέσος όρος παλαιότερα.

4) Η διάρκεια ζωής (service life) έχει επεκταθεί. Οι περισσότεροι πυρηνικοί σταθμοί αρχικά είχαν σχεδιαστεί για χρόνο λειτουργίας από 30 μέχρι 40 χρόνια, αλλά μπορούν να λειτουργούν περισσότερα χρόνια.

Κάποιες ακόμη πληροφορίες:

- Πρώτη μονάδα: Obninsk, Russia, 1954
- Μονάδα νε μεγαλύτερη ισχύ: Chooz, France, 1500 MW, Ignalina, Lithuania, 1500 MW
- Το 57% των αντιδραστήρων είναι τύπου PWR.

Ο Πίνακας 6.1 παρουσιάζει τις δέκα χώρες με την μεγαλύτερη παραγωγή πυρηνικής ενέργειας στον κόσμο, την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ πυρηνικών μονάδων και το ποσοστό κάλυψης της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ενέργεια αυτή κατά το 2013.

Πίνακας 6.1. Οι δέκα χώρες με την μεγαλύτερη παραγωγή πυρηνικής ενέργειας στον κόσμο, την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ πυρηνικών μονάδων και το ποσοστό κάλυψης της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ενέργεια αυτή κατά το 2012. [Πηγή: IEA, 2014]

Παραγωγή	TWh	% παγκ.	Εγκατ. ισχύς	GW	Χώρα*	% κάλυψη αναγκών
Η.Π.Α.	801	32,5	Η.Π.Α.	9102	Γαλλία	76,1
Γαλλία	425	17,3	Γαλλία	63	Ουκρανία	45,4
Ρωσία	178	7,2	Ιαπωνία	44	Σουηδία	38,5
Κορέα	150	6,1	Ρωσία	24	Κορέα	28,3
Γερμανία	99	4,0	Κορέα	21	Ην. Βασίλειο	19,5
Κίνα	97	3,9	Καναδάς	14	Η.Π.Α.	18,8
Καναδάς	95	3,9	Ουκρανία	13	Ρωσία	16,6
Ουκρανία	90	3,7	Κίνα	13	Γερμανία	16,0
Ην. Βασίλειο	70	2,8	Γερμανία	12	Καναδάς	15,0
Σουηδία	64	2,6	Σουηδία	9	Κίνα	2,0
Παγκόσμια	2461	100	Παγκόσμια	373	Παγκόσμια	10,9

*αναφέρεται μόνον στις 10 χώρες με την μεγαλύτερη παραγωγή πυρηνικής ενέργειας

6.4. Διαθεσιμότητα Ουρανίου

Το ουράνιο είναι αρκετά διαδεδομένο στη γη. Είναι ένα μέταλλο τόσο κοινό όσο ο κασσίτερος ή ο ψευδάργυρος και ευρίσκεται στους περισσότερους βράχους αλλά και στη θάλασσα. Μερικές τυπικές συγκεντρώσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2.

Τα εκτιμημένα αποθέματα ουρανίου επίσης εξαρτώνται από το κόστος και τις τιμές. Οι τιμές επίσης εξαρτώνται και από την ένταση της εκμετάλλευσης. Αλλαγές σε κόστος ή τιμές μπορούν να αλλάξουν τις ποσότητες στον πίνακα των αποθεμάτων. Η Αυστραλία και ο Καναδάς κατέχουν μαζί το 42% των ανακτήσιμων αποθεμάτων ουρανίου.

Στην παρούσα κατάσταση τα βεβαιωμένα αποθέματα φθάνουν για 50 ακόμα χρόνια, εάν χρησιμοποιηθούν σε συμβατικούς αντιδραστήρες. Εάν υπάρξει εκτεταμένη χρήση αναπαραγωγικών αντιδραστήρων ταχέων νετρονίων (fast breeder reactor) η αξιοποίηση του ουρανίου θα πολλαπλασιαστεί. Αυτός ο τύπος αντιδραστήρα μπορεί να τεθεί σε λειτουργία με πλουτώνιο που προέρχεται από συμβατικούς αντιδραστήρες και λειτουργεί σε κλειστό κύκλο με την μονάδα επανεπεξεργασίας. Ένας τέτοιος αντιδραστήρας που τροφοδοτείται από φυσικό ουράνιο για γόνιμο επίστρωμα, πολύ γρήγορα φθάνει στην φάση όπου κάθε τόνος μεταλλεύματος δίδει πολλαπλάσια ενέργεια από ένα συμβατικό αντιδραστήρα.

Πίνακας 6.2. Συγκεντρώσεις ουρανίου στη φύση.

Υψηλής καθαρότητας μετάλλευμα	2% U ή 20000 ppm U
Υποβαθμισμένο μετάλλευμα	0,1% U ή 1000 ppm U
Γρανίτης	4 ppm U
Ιζηματογενή πετρώματα	2 ppm U
Μέση συγκέντρωση στο φλοιό της γης	2,8 ppm U
Θαλασσινό νερό	0,003 ppm U

6.5 Απαιτήσεις σε καύσιμο

Όλοι οι αντιδραστήρες του κόσμου με ισχύ 355 GWe, απαιτούν περίπου 75.000 τόνους οξειδίου του ουρανίου. Μολονότι η ποσότητα αυτή κατεργάζεται πιο παραγωγικά, οι απαιτήσεις καυσίμου αυξάνονται, αλλά όχι στο ίδιο ρυθμό.

Η εξάντληση του καυσίμου μετράται σε MWημέρες ανά τόνο U (MWd/t) και πολλές χώρες αυξάνουν τον αρχικό εμπλουτισμό του καυσίμου τους (π.χ. από 3,3 σε 4,0% ²³⁵U) και μετά το «καίνε» περισσότερο χρόνο ή εντατικότερα για να εξαντληθεί μέχρι το 0,5% ²³⁵U. Αυτό σημαίνει ότι η εξάντληση έχει αυξηθεί από 33.000 MWd/t σε 45.000 MWd/t. Από την άλλη πλευρά χαμηλές τιμές ουρανίου σημαίνει ότι τα εργοστάσια εμπλουτισμού λειτουργούν έτσι ώστε να μειώσουν τις ενεργειακές απαιτήσεις και να αφήσουν περισσότερο U-235 στα παραπροϊόντα τους.

Η επανάχρηση του εξαντλημένου υλικού από συμβατικούς αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος επίσης σημαίνει αξιοποίηση των κοιτασμάτων πιο σωστά. Σήμερα το πλουτώνιο που προέρχεται από επανεπεξεργασία χρησιμοποιείται σε φρέσκο οξείδιο μετάλλου με εξαντλημένο ουράνιο από εργοστάσια εμπλουτισμού. Επίσης τώρα υπάρχει και ένας κύκλος καυσίμου μεταξύ Κορέας και Καναδά που επιτρέπει το «ξοδευμένο» καύσιμο συμβατικών αντιδραστήρων να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε αντιδραστήρα CANDU. Οι αντιδραστήρες CANDU σήμερα λειτουργούν με φυσικό ουράνιο για καύσιμο (0,7% ²³⁵U) με εξαντλημένο καύσιμο 7500 MWd/t. Αυτά τα εργοστάσια μπορούν να τροφοδοτηθούν με εμπλουτισμένο ουράνιο (1.2% ²³⁵U) αυξάνοντας την εξάντληση σε 20.000 MWd/t.

6.6 Εμπλουτισμός Ουρανίου

Οι πιο κοινοί τύποι εμπορικών αντιδραστήρων χρησιμοποιούν το νερό για ψυκτικό και επιβραδυντή. Στις περιπτώσεις αυτές, κρισιμότητα (criticality), δηλαδή δυνατότητα να διατηρηθεί η πυρηνική αντίδραση, μπορεί να επιτευχθεί μόνον εάν το Ουράνιο είναι εμπλουτισμένο. Ο εμπλουτισμός αυξάνει το ποσοστό του σχάσιμου ισότοπου ²³⁵U περίπου 5 έως 6 φορές από 0,7% στο φυσικό ουράνιο. Ο εμπλουτισμός είναι μια φυσική διεργασία που συνήθως βασίζεται στη ελάχιστη διαφορά μάζας που έχουν τα δύο ισότοπα ²³⁵U και ²³⁸U. Ο εμπλουτισμός σήμερα σε βιομηχανική κλίμακα απαιτεί το ουράνιο να ευρίσκεται σε αέρια μορφή και επομένως χρησιμοποιείται το εξαφθορίδιο του ουρανίου (UF₆). Αυτή η ένωση είναι αέριο σε θερμοκρασία μόλις 56°C σε ατμοσφαιρική πίεση, αλλά εύκολα αποθηκεύεται σε χαλύβδινες φιάλες σαν υγρό ή και στερεό κάτω από υψηλότερη πίεση.

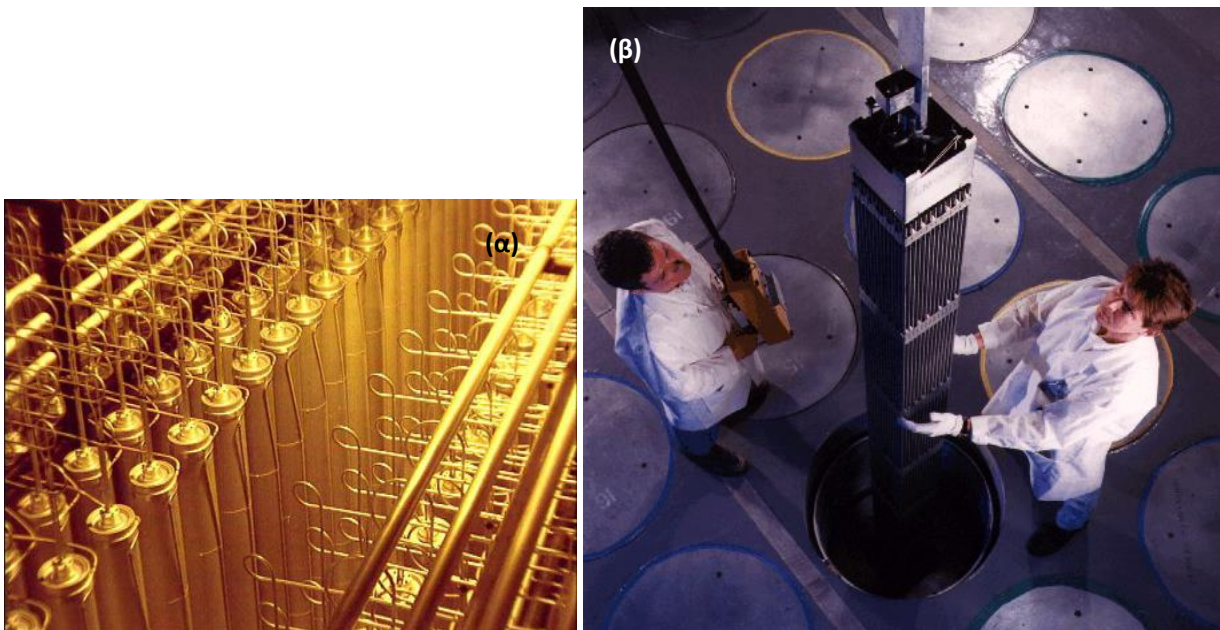
Οι δύο σπουδαιότερες μέθοδοι εμπλουτισμού, δηλαδή διαχωρισμού των δύο ισοτόπων, είναι η διάχυση και η φυγοκέντρωση. Στην διάχυση το αέριο υπό πίεση διαχέεται μέσα από μία μεμβράνη που έχει μικροσκοπικούς πόρους. Σε κάθε στάδιο της διεργασίας μόνον ένα πολύ μικρό ποσοστό διαχωρισμού των ισοτόπων λαμβάνει χώρα. Συνεπώς, συνεχείς διαχωρισμοί λαμβάνουν χώρα σε διαδοχικά στάδια. Το προϊόν κάθε βαθμίδας γίνεται τροφοδοσία για την παραπάνω βαθμίδα και το υπόλειμμα επίσης γίνεται τροφοδοσία για την παρακάτω βαθμίδα. Έτσι σε κάθε βαθμίδα έχουμε δύο τροφοδοσίες (το προϊόν από την κάτω βαθμίδα και το υπόλειμμα από την παραπάνω βαθμίδα). Οι βαθμίδες πάνω από την τροφοδοσία είναι η μονάδα εμπλουτισμού και οι βαθμίδες κάτω από την τροφοδοσία είναι η μονάδα απογύμνωσης. Τελικά το προϊόν είναι το 1/6 ή 1/7 του υπολείμματος και έτσι η μονάδα εμπλουτισμού πρέπει (και έχει) περισσότερες βαθμίδες. Το απεμπλουτισμένο προϊόν (depleted uranium), δηλαδή το υπόλειμμα, ονομάζεται tails και η συγκέντρωση του ^{235}U σε αυτό ονομάζεται «tails assay». Η διαχωριστική δυνατότητα των διαδοχικών βαθμίδων ή της κάθε βαθμίδας περιγράφεται σε σχέση με την παροχή και την δυνατότητα εμπλουτισμού χρησιμοποιώντας τον όρο μοναδιαίο έργο διαχωρισμού (separative work unit, SWU). Πρόκειται για μια ποσότητα με διαστάσεις μάζας, μολονότι αναφέρεται σε ενέργεια (για μια συγκεκριμένη μονάδα εμπλουτισμού, η ενεργειακή κατανάλωση μπορεί να περιγραφεί σε kWh/SWU). Δεδομένου ότι οι ποσότητες τροφοδοσίας ή προϊόντος μετρούνται σε τόνους ή κιλά, τα SWU επίσης περιγράφονται με αυτόν τον τρόπο. Για παράδειγμα, για να παραχθεί ένα κιλό ουρανίου εμπλουτισμένου σε 3,5% απαιτούνται 4,3 SWU εάν το εργοστάσιο λειτουργεί με περιεκτικότητα απόρριψης (tails assay) 0,30%, ή 4,8 SWU εάν το «tails assay» είναι 0,25% (επομένως απαιτούνται μόνο 7,0 kg αντί για 7,8 kg τροφοδοσίας φυσικού Ουρανίου). Περίπου 100.000 έως 120.000 SWU απαιτούνται για να εμπλουτιστεί η ετήσια τροφοδοσία καυσίμου για έναν τυπικό αντιδραστήρα ελαφρού ύδατος ισχύος 1.000 MWe. Το κόστος εμπλουτισμού σχετίζεται με την ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται. Η διεργασία αέριας διάχυσης καταναλώνει μέχρι και 2.400 kWh/SWU (8.600 MJ) ενώ από την άλλη πλευρά οι μονάδες εμπλουτισμού με φυγοκέντρωση απαιτούν μόνο 50 kWh/SWU (180 MJ). Εν τούτοις, ο ανταγωνισμός μεταξύ των εμπορικών μονάδων εμπλουτισμού συνεχίζεται διότι οι επενδύσεις που χρειάζονται για νέα εργοστάσια φυγοκέντρωσης ισοσταθμίζονται από τα χαμηλά έξοδα ηλεκτρικής ενέργειας.

Η διεργασία διάχυσης βασίζεται στην διαφορά σε μέση ταχύτητα των δύο τύπων μορίων UF_6 για να οδηγηθούν τα ελαφρότερα πιο γρήγορα μέσα από τις τρύπες των μεμβρανών. Κάθε βαθμίδα αποτελείται από έναν συμπιεστή, ένα διαχυτή και έναν εναλλάκτη θερμότητας για να απομακρύνει την θερμότητα της συμπίεσης. Το εμπλουτισμένο UF_6 απομακρύνεται από την πάνω πλευρά και το απεμπλουτισμένο από την άλλη. Η διεργασία μπορεί να έχει 1.400 βαθμίδες και η συγκέντρωση του ^{235}U μπορεί να κυμαίνεται από 3,0–4,0% στο προϊόν. Μολονότι το ποσοστό διαχωρισμού από στάδιο σε στάδιο είναι μικρό και απαιτούνται πολλά στάδια, υπάρχει η ικανότητα επεξεργασίας μεγάλων όγκων αερίου.

Ο φυγοκεντρικός εμπλουτισμός βασίζεται στη αδράνεια (λόγω διαφοράς στη μάζα) που συνδέεται με το τετράγωνο της περιφερειακής ταχύτητας σε ένα κύλινδρο που περιστρέφεται ταχύτατα (φυγοκεντρικός κινητήρας, Σχήμα 6.7α). Η κίνηση του αερίου στην αντίθετη φορά μέσα στον κινητήρα επαυξάνει το αποτέλεσμα. Το αέριο εισέρχεται σε μια σειρά από κενούς κυλίνδρους, κάθε ένας από τους οποίους περιέχει έναν ρότορα με μήκος 1-2 m και διάμετρο 15-20 cm. Όταν οι ρότορες αρχίζουν να περιστρέφονται με μεγάλη ταχύτητα, τα βαρύτερα μόρια με ^{238}U αυξάνουν την συγκέντρωσή τους στην επιφάνεια του κυλίνδρου (προς τα έξω) ενώ τα μόρια του ^{235}U αυξάνουν την συγκέντρωσή τους κοντά στο κέντρο. Η ροή αντίθετα με το ρεύμα επιτρέπει το εμπλουτισμένο προϊόν να απομακρύνεται αξονικά. Για να επιτευχθεί μεγάλη απόδοση, οι φυγόκεντροι περιστρέφονται με

ταχύτητα 50.000 έως 70.000 rpm με το προς τα έξω τοίχωμα του κυλίνδρου να κινείται με ταχύτητα 400–500 m/s ώστε να υπάρξει επιτάχυνση 1.000.000 g. Φυσικά υπάρχουν τεράστιες προκλήσεις για βελτιώσεις σε εξοπλισμό και υλικά σε μια τέτοια μονάδα εμπλουτισμού. Μολονότι ο όγκος μιας φυγόκεντρου είναι πολύ μικρός σε σχέση με μια βαθμίδα διάχυσης, η διαχωριστική ικανότητα είναι πολύ καλύτερη. Συνήθως υπάρχουν εν παραλλήλω πολλές φυγόκεντροι και κάθε τέτοια βαθμίδα δίδει το προϊόν της σε μια άλλη βαθμίδα εν παραλλήλω πάλι ευρισκομένων φυγόκεντρων. Όμως σε αυτή την περίπτωση 10 έως 20 βαθμίδες είναι αρκετές για να φθάσουμε στο ποθητό βαθμό εμπλουτισμού. Τέλος υπάρχουν και οι μέθοδοι διαχωρισμού ισοτόπων με laser αλλά δεν έχουν εμπορική εφαρμογή.

Το εμπλουτισμένο ουράνιο σε μορφή UF_6 οδηγείται στο εργοστάσιο παρασκευής καυσίμου (fuel fabrication plant) όπου το φθοριούχο ουράνιο μετατρέπεται σε UO_2 , ένα κεραμικό προϊόν και μορφοποιείται σε δισκία μήκους 2 cm και διαμέτρου 1,5 cm. Τα δισκία αυτά φορτώνονται μέσα σε σωλήνες από κράματα ζirkονίου ή ανοξειδωτου χάλυβα για να γίνουν οι ράβδοι καυσίμου. Αυτά συσκευάζονται σε υποσυστάδες (subassembly, bundles) περίπου τετραγωνικής διατομής 30 cm για να δημιουργήσουν τις συστάδες (reactor fuel assemblies, Σχήμα 6.7β). Ένας αντιδραστήρας με ισχύ 1.000 MWe έχει 75 τόνους καυσίμου μέσα του.

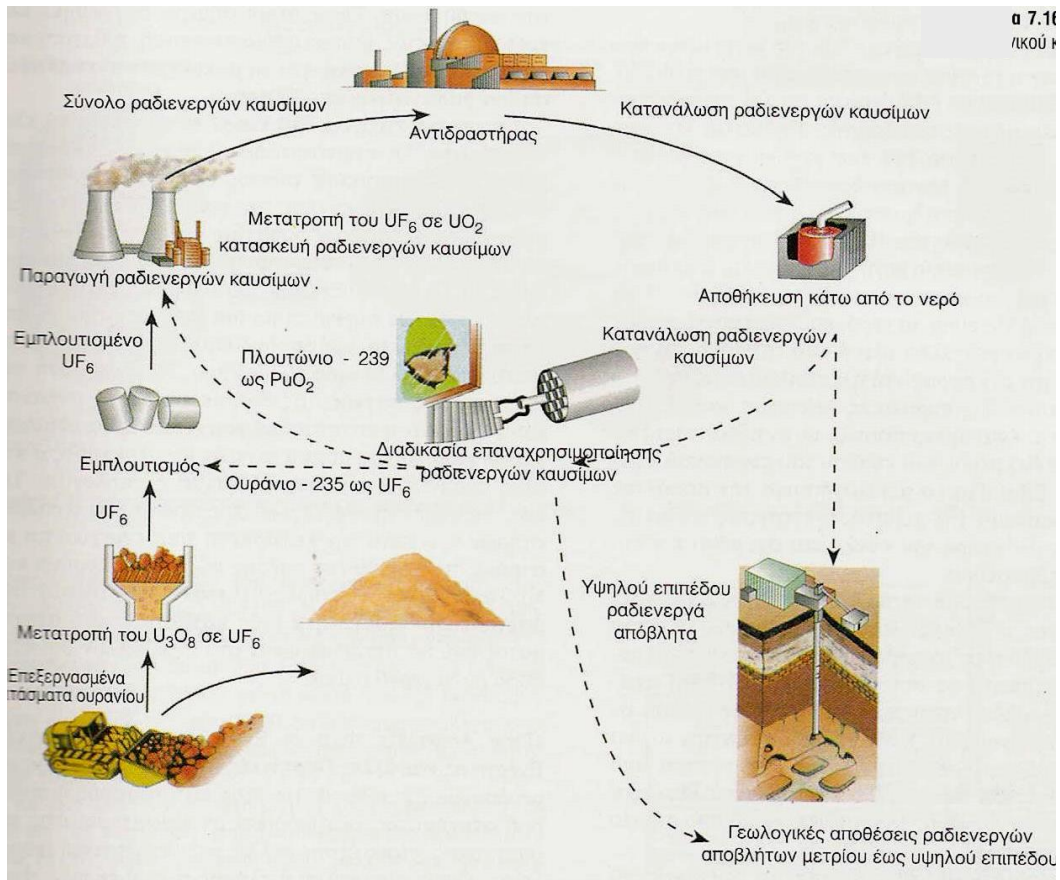


Σχήμα 6.7. (α) Σειρά φυγόκεντρητών σε ευρωπαϊκό εργοστάσιο (αριστερά) και (β) καύσιμο για αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος (δεξιά).

6.7 Ο κύκλος του Πυρηνικού Καυσίμου

Όλα τα θέματα που αφορούν την εκμετάλλευση του ουρανίου, την προετοιμασία του, τη χρήση του και τη διαχείριση του καταναλωθέντος καυσίμου είναι γνωστά ως ο **κύκλος καυσίμου** (fuel cycle). Όπως αφήνεται να εννοηθεί και από τον τίτλο υπάρχει η πρόθεση στην πυρηνική τεχνολογία να επανακυκλώνεται το αχρησιμοποίητο μέρος του καταναλωθέντος καυσίμου έτσι ώστε να τροφοδοτηθεί και πάλι με φρέσκο καύσιμο. Σε αντίθεση με το γαιάνθρακα, το ουράνιο δεν μπορεί να

τροφοδοτηθεί αμέσως σε ένα σταθμό παραγωγής ενέργειας διότι θα πρέπει να καθαριστεί, να εμπλουτιστεί και να μετατραπεί σε ράβδους καυσίμου (βλ. Σχήμα 6.8).



Σχήμα 6.8. Ο κύκλος του πυρηνικού καυσίμου (Tyller-Miller, 1999).

Το μέταλλευμα αρχικά εξορύσσεται και αλέθεται για να δώσει ουράνιο σε μορφή εμπλουτίσματος σε οξείδιο του ουρανίου. Είναι ένα μίγμα δύο οξειδίων, γνωστών ως U_3O_8 . Έχει την ίδια αναλογία ισotόπων όπως και το μέταλλευμα, δηλαδή 0,7% ^{235}U . Το υπόλοιπο είναι ^{238}U με ελάχιστο ^{234}U . Οι περισσότεροι αντιδραστήρες δεν μπορούν να το χρησιμοποιήσουν ως έχει και χρειάζεται να εμπλουτιστεί. Ο εμπλουτισμός καταλήγει στην κατασκευή των ράβδων καυσίμου σε διάταξη (reactor fuel assemblies). Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι αντιδραστήρες CANDU έχουν λίγο διαφορετικό σχεδιασμό και λειτουργούν με φυσικό ουράνιο. Μέσα σε όλους τους τύπους των αντιδραστήρων μια αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης λαμβάνει χώρα. Ταχέως κινούμενα νετρόνια επιβραδύνονται από νερό (ελαφρύ ή βαρύ ανάλογα) ή γραφίτη ώστε να προκαλέσουν σχάση. Ράβδοι ελέγχου (control rods) εισέρχονται ή απομακρύνονται (λίγο ή πολύ) από την καρδιά του αντιδραστήρα για να ελέγχεται η ταχύτητα της αντίδρασης. Θερμότητα απάγεται από το χώρο της καρδιάς του αντιδραστήρα για να παραχθεί ατμός και φυσικά ηλεκτρισμός.

Το καύσιμο μένει στον αντιδραστήρα τρία χρόνια παράγοντας θερμότητα από την σχάση του ^{235}U και του σχάσιμου ^{239}Pu που σχηματίζεται μέσα στον αντιδραστήρα. Μετά τρία χρόνια περίπου το επίπεδο των προϊόντων σχάσης και οι απορροφητές νετρονίων έχουν επιβαρυνθεί και οι ρυθμοί της αντίδρασης επιβραδύνονται και συνεπώς το ξοδευμένο καύσιμο υλικό απομακρύνεται. Περίπου το 1/3 του καυσίμου αλλάζει κάθε χρόνο. Στους αντιδραστήρες CANDU, το καύσιμο μένει μόνο 18 μήνες.

Όταν απομακρύνεται το καύσιμο, αποθηκεύεται σε νερό για να κρυώσει και να υπάρξει ασπίδα από την ραδιενέργεια αναμένοντας το επόμενο στάδιο. Το επόμενο στάδιο είναι η επιπλέον επεξεργασία του. Η Μεγάλη Βρετανία, η Γαλλία και η Ιαπωνία έχουν επιλέξει τον κλειστό κύκλο, ενώ στις Η.Π.Α., Καναδά και Σουηδία μπορεί να διατεθεί ως απόβλητο. Στην αρχή αποθηκεύεται στο πυρηνικό εργοστάσιο και κατόπιν ίσως απομακρυνθεί σε κάποια εγκατάσταση ξηρής αποθήκευσης.

Στον κλειστό κύκλο για αντιδραστήρες κοινού νερού, το καύσιμο υφίσταται κατεργασία όπως και πριν αλλά μετά την πρόσκαιρη αποθήκευση οι ράβδοι καυσίμου οδεύουν σε ένα εργοστάσιο για νέα επεξεργασία όπου τεμαχίζονται και διαλύονται σε οξύ. Με διάφορες χημικές διεργασίες ανακτώνται και διαχωρίζονται τα δύο βασικά και χρήσιμα συστατικά: πλουτώνιο και ουράνιο. Με αυτό τον τρόπο το 3% του καυσίμου απομακρύνεται ως απόβλητο υψηλού επιπέδου σε ραδιενέργεια. Μετά τη στερεοποίησή του μειώνονται τα απόβλητα σε μικρό όγκο και οδηγούνται σε μόνιμη απόθεση. Το πλουτώνιο είναι εξαιρετικό σχάσιμο υλικό και είναι περίπου το 1% του χρησιμοποιημένου καυσίμου. Μπορεί να αναμιχθεί με απεμπλουτισμένο ουράνιο και να χρησιμοποιηθεί σε νέες ράβδους καυσίμου. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες.

Το ανακτημένο ουράνιο μπορεί είτε να πάει για εξευγενισμό είτε ξανά μέσα στον αντιδραστήρα. Ο κλειστός κύκλος λοιπόν είναι καλύτερος διότι υπάρχει μεγαλύτερη αξιοποίηση του εξορυσσόμενου ουρανίου (περίπου 30% σε ενεργειακούς όρους) και για αυτό η βιομηχανία είχε διαλέξει αυτόν τον τρόπο. Όμως, από το 1980 και μετά οι τιμές ουρανίου είναι χαμηλές και νέα εργοστάσια επανεπεξεργασίας δεν έχουν κατασκευαστεί.

6.8 Αναπαραγωγικοί Αντιδραστήρες Ταχέων Νετρονίων

Οι αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων είναι μια αρκετά διαφορετική τεχνολογία. Αυτό συμβαίνει επειδή παράγουν ενέργεια από το πλουτώνιο αξιοποιώντας πολύ περισσότερο ^{238}U στην καρδιά του αντιδραστήρα, αντί να χρειάζονται απλά το σχάσιμο ^{235}U , που χρησιμοποιείται στους περισσότερους αντιδραστήρες. Συνεπώς αφού είναι σχεδιασμένοι να παράγουν περισσότερο πλουτώνιο από όσο καταναλώνουν, συνήθως ονομάζονται καυστήρες (burners). Για πολλά χρόνια η εστίαση της έρευνας βρισκόταν στο να παράγουν περισσότερο καύσιμο από όσο χρησιμοποιούν αλλά σήμερα, με τόσο χαμηλές τιμές ουρανίου αλλά και με δεδομένη την ανάγκη να αξιοποιηθεί το πλουτώνιο που προέρχεται από τον αφοπλισμό, το μόνο ενδιαφέρον τους είναι ως «αποτεφρωτές» (incinerators). Πολλές χώρες έχουν σήμερα προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης για αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες (FBR, fast breeder reactors) που είναι γενικά αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων.

Οι συμβατικοί αντιδραστήρες παράγουν δύο πλεονάσματα υλικών και συγκεκριμένα πλουτώνιο (από τη σύλληψη νετρονίων, που αργότερα διαχωρίζεται στην επανεπεξεργασία) και επεμπλουτισμένο ουράνιο (από τον εμπλουτισμό). Ο αντιδραστήρας ταχέων νετρονίων χρησιμοποιεί πλουτώνιο σαν βασικό καύσιμο ενώ την ίδια στιγμή μετατρέπει επεμπλουτισμένο ουράνιο (κυρίως ^{238}U) που βρίσκεται σε μια γόνιμη επικάλυψη γύρω από τον πυρήνα σε σχάσιμο πλουτώνιο. Με άλλα λόγια ο αντιδραστήρας «καίει» και «αναπαράγει» πλουτώνιο (σημείωση: τόσο το ^{238}U όσο και το ^{240}Pu είναι γόνιμα υλικά διότι με σύλληψη ενός νετρονίου, γίνονται άμεσα ή έμμεσα σχάσιμα υλικά ^{239}Pu και ^{241}Pu αντίστοιχα).

Οι αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων έχουν μεγάλη θερμική απόδοση εξαιτίας της μεγάλης θερμοκρασίας λειτουργίας. Η ψύξη γίνεται με υγρό νάτριο. Μολονότι σε πολλές περιπτώσεις είναι δύσκολο χειριστούμε το νάτριο, σε μερικές περιπτώσεις είναι αγαθότερο του νερού υψηλής πίεσης.

Η εμπειρία από το πρώτο εργοστάσιο FBR είναι ότι παρουσιάζει λιγότερα προβλήματα συντήρησης από ότι ο ατμός.

Ο αντιδραστήρας FBR έχει την δυνατότητα να αξιοποιήσει όλο το ουράνιο που παράγεται από εξορύξεις. Σημειώνεται ότι μπορεί να παραχθεί εξηκονταπλάσια ενέργεια από ότι παράγουν οι κοινοί αντιδραστήρες από το ίδιο μέταλλευμα. Αυτή η εξαιρετική απόδοσή του κάνει τον αναπαραγωγικό αντιδραστήρα ελκυστικότερο ενεργειακό σύστημα. Όμως, η υψηλή επένδυση που απαιτείται και ταυτόχρονα οι χαμηλές τιμές ουρανίου συνηγορούν στο ότι θα πρέπει να περάσουν πολλές δεκαετίες μέχρι ότου γίνει συναγωνιστική τεχνολογία (περίπου το 2050). Σήμερα λειτουργούν 18 FBR αντιδραστήρες από τα μέσα τις δεκαετίας του 1950. Το 1994 καταργήθηκε το πρόγραμμα κατασκευής μεγάλου Ευρωπαϊκού αντιδραστήρα 1.450 MWe. Το παρακάτω σχήμα δείχνει την σχέση σε συμβατικούς και αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες. Η σύγκριση δείχνει ότι περισσότερα νετρόνια παράγονται στον FBR (17 αντί για 15 για 6 σχάσεις) και επομένως το σύστημα έχει την δυνατότητα να αναπαράγει περισσότερο γόνιμο υλικό το οποίο μπορεί να καταναλωθεί αν το επιθυμούμε. Στο παράδειγμα αυτό 4 νετρόνια είναι διαθέσιμα για αναπαραγωγή του Pu-239 σε συμβατικό αντιδραστήρα αλλά 7 είναι διαθέσιμα σε FBR. Οι επακριβείς αριθμοί εξαρτώνται και από την σχεδίαση και λειτουργία των μονάδων.

6.9 Ανάγκες Ενέργειας στην Πυρηνική Ηλεκτρική Ενέργεια

Κάθε είδους ηλεκτροπαραγωγή απαιτεί κάποια ενέργεια για εκσκαφές, εμπλουτισμό, μεταφορά του καυσίμου, κατασκευές και επεξεργασία αποβλήτων. Η ενέργεια για εκσκαφές και μεταφορές εξαρτάται από τα ποσά μεταλλευμάτων για τα οποία αναφερόμαστε και επομένως κάθε σύγκριση ευνοεί το ουράνιο. Από την άλλη πλευρά η ένταση κεφαλαίου στο κύκλο του πυρηνικού καυσίμου αντανακλάται στη μονάδα και αυξάνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις.

Η σπουδαιότερη ανάγκη σε ενέργεια στον κύκλο του πυρηνικού καυσίμου είναι ο εμπλουτισμός του ουρανίου που είναι εξαιρετικής έντασης σε ενέργεια. Τα παρακάτω στοιχεία αφορούν μια μονάδα 1000 MWe που λειτουργεί με φόρτιση 80% παράγοντας 7.000 GWh/έτος. Αυτό θα απαιτούσε 153 τόνους φυσικού ουρανίου κάθε χρόνο το οποίο θα μπορούσε να εμπλουτιστεί για να δώσει 20 τόνους καυσίμου ουρανίου με περιεκτικότητα 3,5% ²³⁵U. Μετά την μετατροπή σε UF₆ αυτό θα απαιτούσε 4,2 GWh ηλεκτρικής ενέργειας για εμπλουτισμό σε μοντέρνα μονάδα φυγοκέντρησης ή 200 GWh σε μια παλιά μονάδα διάχυσης. Επίσης πρέπει να συνυπολογίσουμε την κατασκευή του καυσίμου όπως επίσης την κατασκευή και λειτουργία της πυρηνικής μονάδας. Οι ολικές ενεργειακές ανάγκες στο ενεργειακό κύκλο του καυσίμου αναπαριστούν το 1,7% ή μέχρι το 5% της αποδιδόμενης ενέργειας στη διαδικασία εμπλουτισμού. Η εκμετάλλευση του κοιτάσματος χρησιμοποιεί ενέργεια έως 0,05% της παραγωγής του ορυχείου εάν χρησιμοποιηθεί σε συμβατικό αντιδραστήρα.

Πέραν των βιομηχανικών αντιδραστήρων που λειτουργούν διεθνώς, υπάρχουν και άλλοι 280 που ασχολούνται με έρευνα και βρίσκονται σε 54 χώρες. Μολονότι είναι πολύ μικρότεροι, απαιτούν καύσιμο και παράγουν απόβλητα. Παράγουν ισότοπα, ιατρικά ισότοπα και άλλες ραδιενεργές πηγές για την βιομηχανία.

Η πυρηνική ενέργεια είναι πολύ χρήσιμη για πλοία που ευρίσκονται στη θάλασσα για μεγάλα διαστήματα χωρίς ανεφοδιασμό, ή για ισχυρά και ταχύτατα υποβρύχια μεγάλης πρόωσης. Τα πλοία που υπάρχουν σήμερα (υποβρύχια, αεροπλανοφόρα, παγοθραυστικά κτλ.) ανέρχονται σε περίπου 150.

6.10 Πυρηνικά Απόβλητα

Μολονότι υπάρχει εμπειρία και σχετικά καλό ιστορικό ασφάλειας για την 50ετία λειτουργίας πυρηνικών σταθμών (σπουδαιότερο ατύχημα στο Chernobyl, 1986) το πιο αμφιλεγόμενο θέμα του πυρηνικού κύκλου σήμερα είναι η διαχείριση και διευθέτηση των ραδιενεργών κατάλοιπων. Τα πιο επικίνδυνα από αυτά είναι τα απόβλητα υψηλού επιπέδου και υπάρχουν δύο εναλλακτικές επιλογές για την διαχείρισή των:

1. Η εκ νέου επεξεργασία του καμένου ή εξοδευμένου καυσίμου (spent fuel) με παραπέρα υάλωση και θάψιμο
2. Απ' ευθείας θάψιμο του καυσίμου που περιέχει υψηλά ποσά ραδιενέργειας σαν απόβλητο.

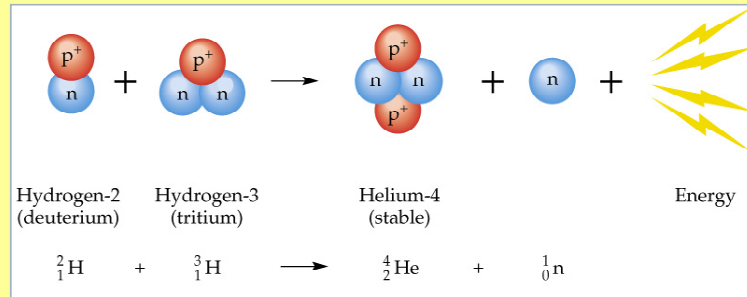
Όπως ήδη αναφέρθηκε η χρήση του καυσίμου στην καρδιά του αντιδραστήρα παράγει προϊόντα σχάσης όπως διάφορα ισότοπα του βαρίου, στροντίου, καισίου, ιωδίου, κρυπτού και ξένου. Πολλά από αυτά τα ισότοπα που παράγονται σαν προϊόντα σχάσης μέσα στο καύσιμο, είναι πολύ ραδιενεργά και «ζουν» μικρό χρονικό διάστημα. Όμως παράλληλα με αυτά τα άτομα σχηματίζονται και άλλα πέραν του ουρανίου (transuranic) που δημιουργούνται από συλλήψεις νετρονίων. Αυτά συμπεριλαμβάνουν τα Pu-239, Pu-240 και Pu-241 καθώς επίσης και μερικά που προέρχονται από το U-238 στον πυρήνα του αντιδραστήρα και συνακόλουθες εκπομπές σωματιδίων β. Όλα είναι ραδιενεργά και εκτός από το σχάσιμο πλουτώνιο που «καίγεται» μένουν στα κατάλοιπα. Τα ισότοπα πέραν του ουρανίου και άλλες ακτινίδες συνθέτουν τα μακροβιότερα ραδιενεργά υλικά στα υψηλού επιπέδου κατάλοιπα. Σήμερα τα πυρηνικά εργοστάσια συμπεριλαμβάνουν στο κόστος τους την διαχείριση των αποβλήτων που γίνεται με εξαιρετικό έλεγχο. Τα διάφορα ραδιενεργά ισότοπα έχουν ημιπεριόδους ζωής που κυμαίνονται από λίγα κλάσματα του δευτερολέπτου μέχρι δισεκατομμύρια χρόνια. Επειδή ο ρυθμός εξασθένησης της ραδιενεργής ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογος της ημιπεριόδου ζωής, όσο πιο μεγάλη είναι η ένταση της ακτινοβολίας, τόσο μικρότερη ημιζωή έχουν. Οι αρχές στις οποίες στηρίζεται η διαχείριση αποβλήτων είναι:

- Συγκέντρωση και Απομόνωση (Concentrate and contain)
- Διάλυση και Διασκορπισμός (Dilute and disperse)
- Καθυστέρηση και Αποσύνθεση (Delay and decay)

Οι δύο πρώτες μέθοδοι χρησιμοποιούνται σε όλα γενικώς τα απόβλητα της βιομηχανίας. Τα απόβλητα ή συλλέγονται, αυξάνονται οι περιεκτικότητές τους σε μολυντές και απομονώνονται ή διαλύονται (εάν είναι σε μικρές ποσότητες) σε επιτρεπτά όρια και απορρίπτονται. Η τρίτη μέθοδος είναι μοναδική για τα πυρηνικά κατάλοιπα και σημαίνει ότι τα απόβλητα συλλέγονται και αποθηκεύονται για κάποιο χρόνο ώστε να μειωθεί η ραδιενέργεια σε χαμηλότερα επίπεδα.

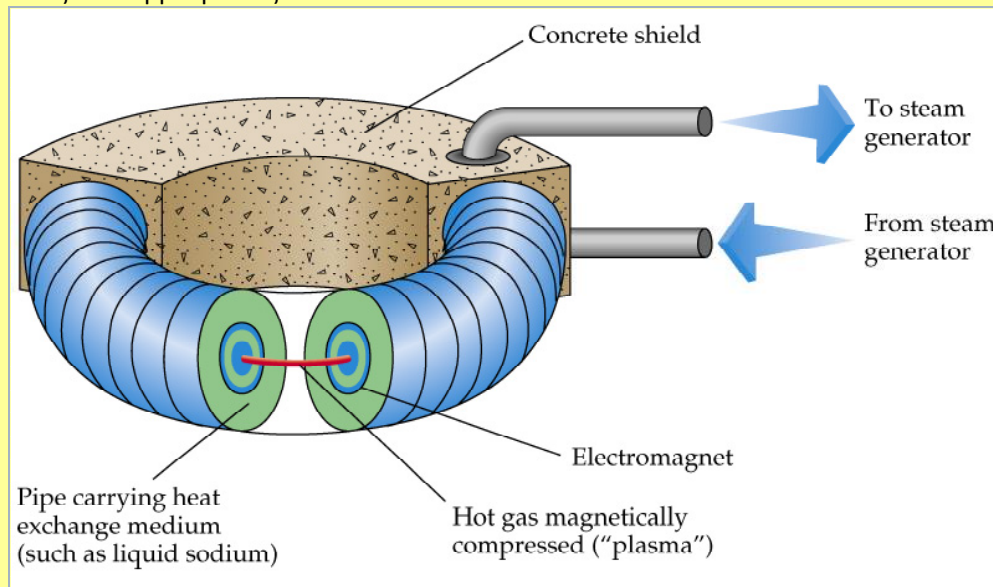
Πυρηνική σύντηξη

Η πλέον ελπιδοφόρα αντίδραση: δευτερίου-τριτίου:



Ένας πυρήνας ${}^2\text{H}$ (δευτέριο) συντήκεται με έναν πυρήνα ${}^3\text{H}$ (τριτίου) για να σχηματίσει έναν πυρήνα ${}^4\text{He}$ ηλίου. Απελευθερώνεται ένα νετρόνιο και μεγάλη ποσότητα ενέργειας.

Ένας γιγάντιος ηλεκτρομαγνήτης, που καλείται «tokamak», σχεδιάζεται για να «στεγάσει» το πλάσμα σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες.



Σε ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες, τα ηλεκτρόνια απομακρύνονται από τα άτομα και το μίγμα πυρήνες+ηλεκτρόνια καλείται πλάσμα.

