



ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ (Α.Τ.Ε.Ι.) ΠΕΙΡΑΙΑ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ  
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ  
ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:  
ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ Α. ΤΑΤΑΡΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:  
ΠΕΤΡΟΣ Δ. ΚΑΡΑΪΣΑΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2012



*Αφιερώνω αυτή την εργασία  
με αγάπη στην οικογένειά μου  
που μου συμπαραστάθηκε*



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τη μετατροπή κάποιας άλλης μορφής ενέργειας πρώτα σε μηχανική (κινητήριες μηχανές-στρόβιλοι) και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στον καταναλωτή σήμερα από τα ανά τον κόσμο συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων (άνθρακες, πετρέλαια) από τη ροή ή την πτώση των υδάτων, από την πυρηνική σχάση, και τα τελευταία χρόνια από εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως είναι ο άνεμος (αιολική ενέργεια), θαλάσσια κύματα, η ηλιακή ενέργεια (με απευθείας μετατροπή) κλπ.

Από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, οι ατμοηλεκτρικοί και οι πυρηνικοί χρησιμοποιούν τον ατμό ως μέσον (εξωτερική καύση) για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας μέσω αμμοστρόβιλων. Αντίθετα, οι νηζελοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσεως (ΜΕΚ), οι οποίες μπορεί να είναι είτε εμβολοφόρες νηζελογεννήτριες, είτε αεριοστρόβιλοι (gas turbines).

Η βασική διαφορά μεταξύ συμβατικών και πυρηνικών σταθμών παραγωγής έγκειται στον τρόπο παραγωγής του ατμού ο οποίος κινεί τους αμμοστρόβιλους. Σε ένα συμβατικό σταθμό αυτό γίνεται, όπως είναι γνωστό, με την καύση άνθρακα ή πετρελαίου στην εστία ενός αμοπαραγωγού. Στον πυρηνικό σταθμό ο αμοπαραγωγός αντικαθίσταται από ένα πυρηνικό αντιδραστήρα. Στον πυρηνικό αντιδραστήρα η ενέργεια η οποία εκλύεται υπό μορφή θερμότητας κατά τη σχάση του πυρηνικού καυσίμου μεταφέρεται σε ένα ψυκτικό μέσο, το οποίο είτε χρησιμοποιείται για να παράγει ατμό σε έναν εναλλάκτη θερμότητας, ή, σε μια περίπτωση ψύξεως με ύδωρ, είναι δυνατόν το ίδιο το ψυκτικό μέσο να αφηθεί να ατμοποιηθεί απευθείας.

Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η εφαρμογή της πυρηνικής τεχνολογίας στους πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η περιγραφή και λειτουργία τους.

Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι χρησιμοποιούν πυρηνικούς αντιδραστήρες ως πηγή ενέργειας, χαρακτηρίζονται ως πυρηνικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ή πυρηνικοί σταθμοί ισχύος) και χρησιμοποιούνται για την κάλυψη του φορτίου βάσης.

Η εργασία χωρίζεται σε έξι κεφάλαια:

Στο **1<sup>ο</sup> κεφάλαιο** γίνεται ανασκόπηση των βασικών εννοιών από την πυρηνική φυσική που είναι απαραίτητες για την κατανόηση της φυσικής των νετρονίων στους πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Στο **2<sup>ο</sup> κεφάλαιο** γίνεται εκτενής περιγραφή της πυρηνικής αντιδράσεως που είναι γνωστή ως πυρηνική σχάση, και αναφέρονται στοιχεία για τα υλικά με τους πυρήνες των οποίων μπορούν να πραγματοποιηθούν σχάσεις, τα πυρηνικά καύσιμα.

Στο **3<sup>ο</sup> κεφάλαιο** δίνονται μερικές βασικές έννοιες και αρχές συγκροτήσεως των πυρηνικών αντιδραστήρων καθώς επίσης και περιγραφή των διαφόρων τύπων αντιδραστήρων που χρησιμοποιούνται σήμερα ή βρίσκονται σε εξέλιξη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο **4<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι ατμοστρόβιλοι και οι σύγχρονες γεννήτριες που χρησιμοποιούνται στους πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στους ατμοστρόβιλους γίνεται αναφορά στους κύκλους ατμού, αφού οι ατμοστρόβιλοι υλοποιούν το τμήμα εκείνο του κύκλου που παράγει τη μηχανική ενέργεια. Η κατανόηση των κύκλων είναι αναγκαία για να γίνουν αντιληπτοί οι λόγοι που οδηγούν στην επιλογή των βασικών διατάξεων ατμοστροβίλων που συναντούνται σήμερα. Παραπέρα, γίνεται μια εισαγωγή στα κύρια χαρακτηριστικά των ατμοστροβίλων, με απόκτηση κάποιας εποπτείας τόσο ως προς τον ρόλο τους μέσα σε μια ενεργειακή εγκατάσταση όσο και ως προς τη μηχανική τους συγκρότηση. Στις σύγχρονες γεννήτριες περιγράφονται τα χαρακτηριστικά τους και γίνεται η ανάλυσή τους τόσο όταν αυτές εργάζονται αυτόνομα όσο και όταν συνεργάζονται με άλλες γεννήτριες.

Στο **5<sup>ο</sup> κεφάλαιο** περιγράφονται οι πυρηνικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αναφέρονται η συγκρότησή τους, ο τρόπος λειτουργίας τους, η απόδοσή τους, οι συνιστώσες του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τους, οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή της τοποθεσίας τους, και τέλος τεχνικά προβλήματα, προβλήματα προστασίας και ασφάλειας που συναντώνται σε αυτούς.

Στο **6<sup>ο</sup> κεφάλαιο** και τελευταίο δίνονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την εργασία αυτή.

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>1.</b>	<b>ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ.....</b>	<b>1.</b>
1.1	Η δομή του ατόμου και του πυρήνα.....	1.
1.2	Ευσταθείς - ασταθείς πυρήνες.....	5.
1.3	Έλλειμμα μάζας και ενέργεια συνδέσεως.....	8.
1.4	Στάθμες διεγέρσεως πυρήνα.....	9.
1.5	Ραδιενεργός διάσπαση.....	11.
1.6	Πυρηνικές αντιδράσεις.....	14.
1.7	Μικροσκοπική και μακροσκοπική ενεργός διατομή πυρηνικής αντιδράσεως.....	18.
1.8	Πυρηνικές αντιδράσεις με νετρόνια.....	20.
	1.8.1 Ελαστική σκέδαση νετρονίου-πυρήνα, $(n, n)$ .....	21.
	1.8.2 Μη ελαστική σκέδαση νετρονίου-πυρήνα, $(n, n')$ .....	23.
	1.8.3 Ραδιενεργή ενσωμάτωση, $(n, \gamma)$ .....	26.
	1.8.4 Πυρηνικές αντιδράσεις τύπου $(n, p)$ και $(n, \alpha)$ .....	27.
	1.8.5 Πυρηνικές αντιδράσεις τύπου $(n, 2n)$ και $(n, 3n)$ .....	28.
	1.8.6 Σχάση βαρέως πυρήνα με νετρόνια.....	30.
	1.8.7 Κατατεμαχισμός πυρήνων.....	30.
<b>2.</b>	<b>ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΧΑΣΗ - ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ.....</b>	<b>31.</b>
2.1	Γενικά για την πυρηνική σχάση.....	31.
2.2	Γενικές ιδιότητες των θραυσμάτων σχάσεως.....	32.
2.3	Σχάση βαρέως πυρήνα με νετρόνια.....	33.
2.4	Αλυσωτή αντίδραση σχάσεων και η έννοια της κρισιμότητας.....	38.
2.5	Γενικά για τα πυρηνικά καύσιμα.....	42.
2.6	Επώαση - αναπαραγωγή.....	43.
2.7	Χαρακτηριστικά κύκλου πυρηνικού καυσίμου.....	44.
	2.7.1 Τύποι κύκλου καυσίμου.....	44.
	2.7.2 Στάδια κύκλου καυσίμου.....	46.
2.8	Αρχική φάση κύκλου πυρηνικού καυσίμου.....	46.
	2.8.1 Εξόρυξη και άλεση ουρανίου.....	46.
	2.8.2 Εμπλουτισμός του ουρανίου.....	48.
	2.8.3 Επεξεργασία καυσίμου.....	51.
	2.8.4 Άλλοι τύποι καυσίμων.....	51.
2.9	Χρησιμοποίηση πυρηνικού καυσίμου.....	52.
	2.9.1 Παραχθείσα ενέργεια ως μέτρο χρησιμότητας καυσίμου.....	52.
	2.9.2 Ενέργεια από την κατανάλωση καυσίμου.....	52.
	2.9.3 Απαίτηση μεταλλεύματος ουρανίου.....	54.
2.10	Τελική φάση κύκλου πυρηνικού καυσίμου.....	55.
	2.10.1 Διαχείριση αναλωθέντος καυσίμου.....	55.
	2.10.2 Επανεπεξεργασία.....	56.
	2.10.3 Εναπόθεση αποβλήτων.....	57.

<b>3.</b>	<b>ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ.....</b>	<b>59.</b>
3.1	Γενικά.....	59.
3.2	Κανονική λειτουργία αντιδραστήρα.....	59.
3.3	Μεταβατική λειτουργία αντιδραστήρα.....	59.
3.4	Κύριες συνιστώσες πυρηνικού αντιδραστήρα.....	61.
3.5	Βασική συγκρότηση πυρηνοληλεκτρικού σταθμού.....	63.
3.6	Κατηγορίες αντιδραστήρων ισχύος.....	64.
3.7	Αερίψυκτοι αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων.....	65.
	3.7.1 Αερίψυκτος αντιδραστήρας γραφίτη-φυσικού ουρανίου.....	65.
	3.7.2 Εξελιγμένος αερίψυκτος αντιδραστήρας (AGR).....	66.
	3.7.3 Αερίψυκτος αντιδραστήρας υψηλής θερμοκρασίας (HTGR).....	67.
3.8	Αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWR).....	68.
	3.8.1 Αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος (BWR).....	69.
	3.8.2 Αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος (PWR).....	74.
3.9	Αντιδραστήρες βαρέως ύδατος (HWR).....	78.
	3.9.1 Αντιδραστήρες πεπιεσμένου βαρέως ύδατος (PHWR/CANDU).....	78.
	3.9.2 Αντιδραστήρες βαρέως-ελαφρού ύδατος (HWLWR).....	80.
	3.9.3 Αερίψυκτος αντιδραστήρας βαρέως ύδατος (HWGCR).....	80.
3.10	Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες.....	81.
	3.10.1 Ψυχόμενος με τετηγμένο μέταλλο αναπαραγωγικός αντιδραστήρας ταχέων νετρονίων (LMFBR).....	83.
	3.10.2 Ψυχόμενος με αέριο αναπαραγωγικός αντιδραστήρας ταχέων νετρονίων (GCFR).....	84.
	3.10.3 Αναπαραγωγικός αντιδραστήρας τετηγμένου άλατος (MSBR).....	85.
	3.10.4 Αναπαραγωγικός αντιδραστήρας ελαφρού ύδατος (LWBR).....	88.
<b>4.</b>	<b>ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ - ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....</b>	<b>91.</b>
4.1	Γενικά για τους ατμοστρόβιλους.....	91.
4.2	Ο ατμοστρόβιλος ως τμήμα εγκατάστασης που υλοποιεί τον κύκλο ατμού.....	91.
4.3	Βασικές παραλλαγές απλού κύκλου.....	93.
4.4	Κατηγορίες ατμοστροβίλων.....	95.
4.5	Ιδιαιτερότητες ατμοστροβίλων.....	97.
4.6	Παραδείγματα διατάξεων ατμοστροβίλων.....	98.
4.7	Γενικά για τις σύγχρονες γεννήτριες.....	103.
4.8	Ταχύτητα περιστροφής των σύγχρονων γεννητριών.....	107.
4.9	Παραγόμενη τάση στο εσωτερικό μιας σύγχρονης γεννήτριας.....	108.
4.10	Ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας.....	109.
4.11	Ανάλυση της σύγχρονης γεννήτριας με στρεφόμενα διανύσματα.....	113.
4.12	Ισχύς και ροπή στην έξοδο των σύγχρονων γεννητριών.....	114.
4.13	Παραλληλισμός γεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος.....	116.



<b>5.</b>	<b>ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΙΣΧΥΟΣ.....</b>	<b>131.</b>
5.1	Γενικά.....	131.
5.2	Συγκρότηση πυρηνοληλεκτρικών σταθμών ισχύος (ΠΗΣ).....	131.
5.3	Κύκλωμα ατμού ύδατος ΠΗΣ.....	132.
5.4	Απόδοση πυρηνοληλεκτρικού σταθμού ισχύος.....	133.
5.5	Κόστος παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.....	135.
	5.5.1 Εισαγωγή στο κόστος.....	135.
	5.5.2 Εξισώνοντας το ισοδύναμο κόστος.....	136.
	5.5.3 Κόστη κεφαλαίου.....	137.
5.6	Επιλογή τοποθεσίας πυρηνοληλεκτρικού σταθμού ισχύος.....	144.
	5.6.1 Όρια κατοικημένων περιοχών.....	144.
	5.6.2 Φυσικά χαρακτηριστικά της περιοχής.....	147.
5.7	Τεχνικά προβλήματα και προβλήματα προστασίας από τις ακτινοβολίες, τα προϊόντα της σχάσεως και από τα ραδιενεργά απόβλητα των αντιδραστήρων.....	150.
5.8	Ασφάλεια λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων.....	153.
<b>6.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>157.</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>159.</b>

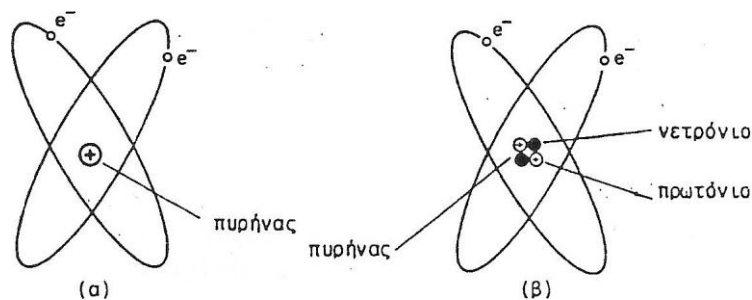


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

#### 1.1 Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ

Η ύλη αποτελείται από άτομα που όταν ενώνονται συγκροτούν τα μόρια. Τα συστατικά ενός ατόμου είναι ο πυρήνας και τα περιφερειακά του ηλεκτρόνια. Ο πυρήνας είναι συγκρότημα  $Z$  πρωτονίων και  $N$  νετρονίων. Οι αριθμοί  $Z$  και  $N$  χαρακτηρίζουν τη σύσταση του πυρήνα και καλούνται αντίστοιχα ατομικός αριθμός και νετρονικός αριθμός. Τα συστατικά του πυρήνα, πρωτόνια και νετρόνια, καλούνται χωρίς διάκριση, νουκλεόνια και είναι πλήθους  $A = Z + N$ . Ο αριθμός  $A$  καλείται μαζικός αριθμός. Μια απλή εικόνα του ατόμου αποδίδεται γραφικά στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Απλοποιημένη εικόνα του ατόμου.

Το νετρόνιο ( $n$ ) είναι σωματίδιο ηλεκτρικά ουδέτερο, το οποίο σε ελεύθερη κατάσταση (έξω από τον πυρήνα) δεν είναι σταθερό, αλλά μετατρέπεται αυτόματα σε ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο, με ταυτόχρονη εκπομπή ενός αντινετρίνου. Η <<επιβίωση>> ενός ελεύθερου νετρονίου, μέχρι της μετατροπής του, διαρκεί κατά μέσο όρο περίπου 15 min. Η αστάθεια αυτή των νετρονίων δεν έχει πρακτική σημασία για τους πυρηνικούς αντιδραστήρες, γιατί σ' αυτούς τα νετρόνια, ναί μεν παραμένουν ελεύθερα από τη στιγμή που θα εμφανιστούν μέχρι τη στιγμή που κατά οποιοδήποτε τρόπο θα εξαφανιστούν, όμως ο σχετικός χρόνος, κατά μέσο όρο, έχει τάξη μεγέθους msec.

Το πρωτόνιο ( $p$ ) είναι σταθερό σωματίδιο, με μάζα λίγο μικρότερη από τη μάζα του νετρονίου και φέρει θετικό φορτίο ίσο απολύτως προς το φορτίο  $e$  ενός ηλεκτρονίου. Ένας πυρήνας ατομικού αριθμού  $Z$  έχει λοιπόν συνολικό φορτίο  $+eZ$ . Ένα άτομο στη συνήθη κατάσταση έχει  $Z$  περιφερειακά ηλεκτρόνια και έτσι το άτομο, στο σύνολο του, είναι ηλεκτρικά ουδέτερο.

Κάθε χημικό στοιχείο έχει το δικό του χαρακτηριστικό ατομικό αριθμό  $Z$  ή αλλιώς ο ατομικός αριθμός χαρακτηρίζει τις χημικές ιδιότητες των ατόμων. Στη φύση υπάρχουν όμως άτομα με πυρήνες που έχουν το ίδιο πλήθος πρωτονίων, αλλά διαφορετικό πλήθος νετρονίων. Είναι φανερό ότι πρόκειται για άτομα του ίδιου χημικού στοιχείου, που ονομάζονται ισότοπα του στοιχείου. Τα ισότοπα ενός στοιχείου έχουν τον ίδιο ατομικό αριθμό  $Z$ , αλλά διαφορετικό μαζικό αριθμό  $A$  και διαφορετικό νετρονικό αριθμό  $N$ .

Για το ισότοπο μαζικού αριθμού  $A$  και ατομικού αριθμού  $Z$  κάποιου στοιχείου με χημικό σύμβολο  $X$  χρησιμοποιείται ο συμβολισμός  ${}^A_Z X$ . Ο ίδιος συμβολισμός χρησιμοποιείται και για τον πυρήνα του ισότοπου. Επειδή σε κάθε χημικό στοιχείο αντιστοιχεί ένας χαρακτηριστικός ατομικός αριθμός, τότε για τον πλήρη καθορισμό ενός

ισοτόπου αρκεί η αναγραφή του συμβόλου του χημικού στοιχείου και του μαζικού του αριθμού, π.χ.  $^{35}\text{Cl}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  (ή και απλούστερα Cl-35, U-235, U-238).

Τα περισσότερα χημικά στοιχεία που υπάρχουν στη φύση είναι μίγμα ισοτόπων τους, με ορισμένη ισοτοπική αναλογία, που μερικές φορές εξαρτάται από την προέλευση του στοιχείου. Το ήλιο (He) της ατμόσφαιρας, για παράδειγμα, έχει ισοτοπική σύσταση διαφορετική από εκείνη του ηλίου κοιτασμάτων του υπεδάφους. Τέτοιες διαφορές στην ισοτοπική σύσταση είναι για πολλές εφαρμογές χωρίς πρακτική σημασία. Ο Πίνακας 1.1 δίνει την ισοτοπική σύσταση μερικών στοιχείων.

**Πίνακας 1.1** Ισοτοπική σύσταση ορισμένων στοιχείων.

Z	Ίσότοπο	Αναλογία* άτομων α/ο
1	H-1	99,985
	H-2	0,0148
3	Li-6	7,5
	Li-7	92,5
5	B-10	19,8
	B-11	80,2
6	C-12	98,89
	C-13	1,11
7	N-14	99,63
	N-15	0,366
8	O-16	99,76
	O-17	0,038
	O-18	0,204
90	Th-232	100
92	U-234	0,0054
	U-235	0,720
	U-238	99,275

\*α/ο = άτομα %

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί μια διαπίστωση που έγινε από Γάλλους επιστήμονες το 1972, και αφορά την <<ανώμαλη>> ισοτοπική σύσταση του ουρανίου ενός κοιτάσματος (OKLO) στη Gabon της Δ. Αφρικής. Το ουράνιο στο κοιτάσμα αυτό βρέθηκε να περιέχει το ισότοπο  $^{235}\text{U}$  σε αναλογία πολύ μικρότερη της συνηθισμένης, που είναι 0,72%. Η αναλογία αυτή σε ορισμένες θέσεις έφτανε το 0,28%. Η ερμηνεία που δόθηκε στο φαινόμενο αυτό είναι ότι, πριν από 2.000 εκατ. χρόνια περίπου, τα δύο ισότοπα U-235 και U-238 ήταν σε τέτοια αναλογία στο πλούσιο σε ουράνιο κοιτάσμα, ώστε να δημιουργηθούν <<συνθήκες λειτουργίας πυρηνικού αντιδραστήρα>>. Η ερμηνεία αυτή επιβεβαιώθηκε από διάφορα ευρήματα στο κοιτάσμα (ραδιενεργά προϊόντα της σχάσεως), υπολογίστηκε δε ότι ο αντιδραστήρας αυτός στη φύση θα πρέπει να λειτούργησε τουλάχιστον 100.000 χρόνια, με αποτέλεσμα την <<κατανάλωση>> ισοτόπων U-235.

Τα ατομικά βάρη (ατομικές μάζες) των διαφόρων στοιχείων στη χημεία εκφράζονται σε σχετική κλίμακα, στην οποία το ατομικό βάρος του χημικώς καθαρού στοιχείου

οξυγόνου λαμβάνεται ίσο με 16 μονάδες ατομικού βάρους. Η κλίμακα αυτή καλείται χημική κλίμακα ατομικών βαρών (η χημική κλίμακα ατομικών βαρών συναντάται μόνο σε παλαιότερη βιβλιογραφία).

Στην Πυρηνική Φυσική πρωταρχική σημασία έχει η έκφραση των ατομικών βαρών των διαφόρων ισοτόπων σε μια σχετική κλίμακα και με βάση συγκεκριμένο ισότοπο. Το ισότοπο που χρησιμοποιείται για τη σχετική έκφραση των ατομικών βαρών είναι το ουδέτερο άτομο του ισοτόπου  $^{12}\text{C}$  του οποίου το ατομικό βάρος λαμβάνεται ίσο προς 12 <<μονάδες ατομικής μάζας>> amu (αρχικά των λέξεων atomic mass unit). Από τον πιο πάνω ορισμό συμπεραίνεται ότι είναι:

$$\text{Ατομικό βάρος ατόμου} = 12 \frac{\text{μάζα ουδετέρου ατόμου}}{\text{μάζα ουδετέρου } ^{12}\text{C}} \text{ amu} \quad (1.1)$$

Με τον τρόπο αυτό τα ατομικά βάρη εκφράζονται στη λεγόμενη φυσική κλίμακα ατομικών βαρών.

Η φυσική κλίμακα ατομικών βαρών με βάση το ουδέτερο άτομο του  $^{12}\text{C}$  θεσπίστηκε το 1961. Παλαιότερα, η φυσική κλίμακα ατομικών βαρών είχε βάση το ουδέτερο άτομο του ισοτόπου  $^{16}\text{O}$  με αυθαίρετα καθορισμένο ατομικό βάρος 16 μονάδες ατομικού βάρους. Οι τιμές των ατομικών βαρών που προκύπτουν με βάση το  $^{12}\text{C}$  ή το  $^{16}\text{O}$  διαφέρουν μεταξύ τους. Γι' αυτό το λόγο ο συμβολισμός amu για τη μονάδα ατομικής μάζας διατηρήθηκε για τη φυσική κλίμακα με βάση το  $^{16}\text{O}$ , ενώ για τη φυσική κλίμακα με βάση το  $^{12}\text{C}$  χρησιμοποιήθηκε ο συμβολισμός u (unit). Παρ' όλα αυτά, ακόμη και σε πρόσφατη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ο συμβολισμός amu, έστω και αν τα διάφορα ατομικά βάρη εκφράζονται με βάση το ουδέτερο ισότοπο  $^{12}\text{C}$ . Αυτό έχει σημασία, και χρειάζεται προσοχή, όταν κανείς χρησιμοποιεί ατομικά βάρη από διαφορετικές πηγές. Στη συνέχεια θα χρησιμοποιείται ο συμβολισμός amu και θα νοείται με βάση το  $^{12}\text{C}$ .

Σύμφωνα με τον ορισμό, μια μονάδα ατομικής μάζας είναι ίση προς το 1/12 της μάζας του ουδετέρου ατόμου του  $^{12}\text{C}$ . Έτσι είναι:

$$1 \text{ amu} = 1,660566 \cdot 10^{-24} \text{ gr} \quad (1.2)$$

Το ατομικό βάρος (A.B) ενός στοιχείου προσδιορίζεται από τα ατομικά βάρη (A.B)<sub>i</sub> των διαφόρων ισοτόπων του i και της ισοτοπικής αναλογίας γ<sub>i</sub> (α/ο) με την όποια εμφανίζεται στη φύση καθένα από αυτά, δηλαδή:

$$(A.B) = \sum_i \frac{\gamma_i}{100} (A.B)_i \quad (1.3)$$

Το μοριακό βάρος ενός μορίου σε μονάδες amu, δηλαδή στη φυσική κλίμακα, είναι το άθροισμα των ατομικών βαρών (σε amu) όλων των ατόμων που συγκροτούν το μόριο. Είναι φανερό ότι τα μόρια μιας χημικής ένωσης δεν έχουν όλα το ίδιο βάρος, αφού στο μόριο συμμετέχει, χωρίς διάκριση, οποιοδήποτε από τα φυσικά ισότοπα των στοιχείων της ένωσης. Το μέσο μοριακό βάρος μιας χημικής ένωσης, προσδιορίζεται εύκολα από τα ατομικά βάρη των χημικών στοιχείων της ένωσης. Π.χ. για την ένωση X<sub>m</sub>Y<sub>n</sub>, το μέσο μοριακό της βάρους (M.B) είναι:

$$(M.B) = m(A.B)_X + n(A.B)_Y \quad (1.4)$$

όπου βέβαια τα ατομικά βάρη (A.B)<sub>X</sub> και (A.B)<sub>Y</sub> των στοιχείων X, Y προσδιορίζονται από τη σχέση (1.3).

Στην ίδια φυσική κλίμακα, δηλαδή με μονάδα το amu, εκφράζονται ακόμη και οι μάζες των πυρήνων και των διαφόρων σωματιδίων. Π.χ., οι μάζες του πρωτονίου (M<sub>p</sub>) και του νετρονίου (M<sub>n</sub>) σε amu είναι:

$$M_p = 1,007276 \text{ amu} \quad M_n = 1,008665 \text{ amu}$$

Από τη σχέση του Einstein:

$$E = mc^2 \quad (1.5)$$

όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός στο κενό, η οποία εκφράζει την ισοδυναμία μάζας ( $m$ ) και ενέργειας ( $E$ ), προκύπτει η ενέργεια που είναι ισοδύναμη προς τη μονάδα ατομικής μάζας:

$$1 \text{ amu} = 931,5016 \text{ MeV} \quad (1.6)$$

Είναι γνωστό, ότι ένα γραμμοάτομο ενός στοιχείου (ή ένα γραμμομόριο μιας ένωσης) περιέχει το ίδιο πλήθος  $N_A$  ατόμων (αντίστοιχα μορίων). Η σταθερά  $N_A$  είναι η σταθερά του Avogadro. Η τιμή της, είναι φανερό, εξαρτάται από τη μονάδα που χρησιμοποιείται για τα ατομικά (μοριακά) βάρη. Έτσι είναι:

$$\text{Για τη χημική κλίμακα} \quad N_A = 0,60232 \cdot 10^{24} \text{ mol}^{-1}$$

$$\text{Για τη φυσική κλίμακα (}^{12}\text{C)} \quad N_A = 0,602205 \cdot 10^{24} \text{ mol}^{-1}$$

Αν ένα υλικό αποτελείται από ένα χημικό στοιχείο που έχει ατομικό βάρος ( $A.B$ ), τότε η πυκνότητα ατόμων (άτομα/cm<sup>3</sup>) του στοιχείου στο υλικό αυτό είναι:

$$N = N_A \frac{\rho}{(A.B)} \quad (1.7)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα (gr/cm<sup>3</sup>) του υλικού. Στη σχέση (1.7) για τη σταθερά του Avogadro θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η τιμή της που είναι σύμφωνη με την κλίμακα εκφράσεως του ατομικού βάρους του στοιχείου. Για τις τεχνικές εφαρμογές είναι συνήθως ικανοποιητική η προσεγγιστική τιμή:

$$N_A = 0,602 \cdot 10^{24} \text{ mol}^{-1}$$

ανεξάρτητα από την κλίμακα αναφοράς του ( $A.B$ ).

Είναι φανερό ότι η (1.7) παρέχει την πυκνότητα μορίων μιας χημικής ενώσεως, αν στον παρονομαστή τεθεί το μοριακό βάρος ( $M.B$ ) της ενώσεως.

Ο πυρήνας μπορεί, σε πρώτη προσέγγιση, να θεωρηθεί σφαιρικός. Η ακτίνα του  $R$  προσδιορίζεται έμμεσα με την εφαρμογή διαφόρων πειραματικών μεθόδων. Τα αποτελέσματα αυτών των πειραματικών μεθόδων εμφανίζουν την ακτίνα  $R$  ενός πυρήνα να εξαρτάται από το πλήθος  $A$  των νουκλεονίων του ως εξής:

$$R = R_0 \cdot A^{1/3} \cdot 10^{-13} \text{ cm} \quad (1.8)$$

όπου όμως η σταθερά  $R_0$  βρίσκεται να εξαρτάται από την πειραματική μέθοδο προσδιορισμού της  $R$ . Μια κατάλληλη τιμή είναι η  $R_0 = 1,5$ , οπότε:

$$R = 1,5 \cdot A^{1/3} \cdot 10^{-13} \text{ cm} \quad (1.9)$$

Η πιο πάνω έκφραση της  $R$  σημαίνει ότι ο όγκος ενός πυρήνα είναι ανάλογος του πλήθους  $A$  των νουκλεονίων του. Η παρατήρηση αυτή, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα νουκλεόνια έχουν όλα περίπου την ίδια μάζα, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η πυκνότητα της ύλης στον πυρήνα είναι, σε πρώτη προσέγγιση, σταθερή και ανεξάρτητη του είδους του πυρήνα. Η πυκνότητα αυτή, αν υπολογιστεί με την σχέση (1.9) για την  $R$ , βρίσκεται ότι είναι περίπου  $10^{14} \text{ gr/cm}^3$ . Από την άποψη αυτή οι πυρήνες μοιάζουν με τις σταγόνες υγρού, γιατί και σ' αυτές η πυκνότητα είναι ανεξάρτητη του μεγέθους της σταγόνας.

Η συγκράτηση των νουκλεονίων στον πυρήνα είναι δυνατή μόνο με την ανάπτυξη ελκτικών δυνάμεων. Η φύση των δυνάμεων αυτών δεν ερμηνεύεται με την κλασική Φυσική, η οποία άλλωστε προβλέπει μόνο πολύ ισχυρές απωστικές δυνάμεις μεταξύ των πρωτονίων του πυρήνα, λόγω της πολύ μικρής αποστάσεώς τους. Οι ελκτικές δυνάμεις

που ασκούνται μεταξύ των νουκλεονίων του πυρήνα, φορτισμένων και μη, ερμηνεύονται με την κυματομηχανική και καλούνται πυρηνικές δυνάμεις. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των πυρηνικών δυνάμεων είναι η μικρή τους εμβέλεια. Δηλαδή, εκδηλώνονται τότε μόνον, όταν η μεταξύ δύο νουκλεονίων απόσταση έχει την τάξη μεγέθους της πυρηνικής ακτίνας, όπως συμβαίνει όταν τα νουκλεόνια βρίσκονται μέσα σε ένα πυρήνα.

**Πίνακας 1.2** Μερικές χρήσιμες φυσικές σταθερές (στρογγυλοποιημένες τιμές).

Φυσική σταθερά	Σύμβολο	Τιμή
Μονάδα ατομικής μάζας	amu	$1,660566 \cdot 10^{-24}$ gr 931,5016 MeV
Αριθμός του Avogadro	$N_A$	$0,602205 \cdot 10^{24}$ mol <sup>-1</sup>
Μάζα ήρεμίας ηλεκτρονίου	$m_e$	$9,10953 \cdot 10^{-28}$ gr $5,485803 \cdot 10^{-4}$ amu 0,5110034 MeV
Μάζα ήρεμίας νετρονίου	$M_n$	$1,67495 \cdot 10^{-24}$ gr 1,008665 amu 939,5731 MeV
Μάζα ήρεμίας πρωτονίου	$M_p$	$1,67265 \cdot 10^{-24}$ gr 1,007276 amu 938,2796 MeV
Στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο	e	$1,602189 \cdot 10^{-19}$ coul.
Ταχύτητα φωτός (κενό)	c	$2,997925 \cdot 10^{10}$ cm/sec

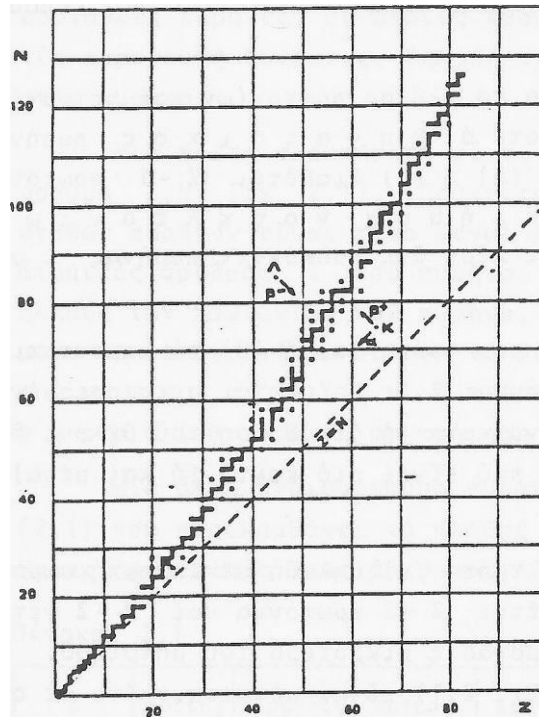
## 1.2 ΕΥΣΤΑΘΕΙΣ – ΑΣΤΑΘΕΙΣ ΠΥΡΗΝΕΣ

Τα 92 χημικά στοιχεία που υπάρχουν στη φύση εμφανίζουν ~340 φυσικά ισότοπα. Ορισμένων φυσικών ισοτόπων οι πυρήνες είναι ευσταθείς, δηλαδή με την πάροδο του χρόνου δεν υφίστανται μόνοι τους καμιά μεταβολή, ενώ των υπόλοιπων οι πυρήνες είναι ασταθείς. Οι ασταθείς πυρήνες φυσικών ισοτόπων καλούνται φυσικώς ραδιενεργοί και μεταβάλλονται χωρίς εξωτερική πρόκληση. Αυτή η αυτόματη μεταβολή καλείται διάσπαση του πυρήνα. Όλα τα φυσικά χημικά στοιχεία με  $Z > 80$ , αλλά και μερικά με μικρότερο  $Z$ , έχουν ασταθή ισότοπα.

Εκτός από τα φυσικά χημικά στοιχεία υπάρχουν και άλλα που έχουν παραχθεί τεχνητά. Επίσης τεχνητά έχει παραχθεί ένας μεγάλος αριθμός ισοτόπων τόσο των φυσικών, όσο και των τεχνητών στοιχείων. Ο όρος διάσπαση χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση μεταβολής ενός ασταθούς πυρήνα, είτε αυτός υπάρχει στη φύση, είτε έχει παραχθεί τεχνητά.

Ένας ασταθής πυρήνας υφίσταται μία ή και περισσότερες διαδοχικές διασπάσεις, μέχρις ότου τελικά μεταπέσει σε ευσταθή πυρήνα.

Κάθε πυρήνας, με το ζεύγος των χαρακτηριστικών του αριθμών ( $Z$ ,  $N$ ), μπορεί να παρασταθεί με ένα σημείο σε διάγραμμα αξόνων  $Z$ ,  $N$  (Σχήμα 1.2). Σε ένα τέτοιο διάγραμμα, οι ευσταθείς πυρήνες εμφανίζονται με προσέγγιση μέσα σε μια στενή σχετικά <<ζώνη>>, τη ζώνη των ευσταθών πυρήνων (βλ. Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2 Διάγραμμα Z-N των πυρήνων ( ■ ευσταθής πυρήνας).

Η ζώνη των ευσταθών πυρήνων για μικρό  $Z$  είναι πολύ στενή και συμπίπτει περίπου με την ευθεία  $Z = N$ . Καθώς αυξάνει το  $Z$ , η ζώνη αυτή διευρύνεται και απομακρύνεται όλο και περισσότερο από την ευθεία  $Z = N$ .

Η πιο πάνω παρατήρηση σημαίνει ότι για τους ευσταθείς πυρήνες με μικρό ατομικό αριθμό  $Z$  (ελαφροί πυρήνες) ο λόγος  $N/Z$  έχει τιμή περίπου ίση προς τη μονάδα. Καθώς το  $Z$  αυξάνει, ο λόγος  $N/Z$  γενικώς αυξάνει, προσεγγίζει δε την τιμή 1,6 περίπου για τους βαρείς ευσταθείς πυρήνες.

Ένας ασταθής πυρήνας, που το παραστατικό του σημείο  $K$  στο διάγραμμα  $Z, N$  κείται έξω και κάτω της ζώνης των ευσταθών πυρήνων, μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει είτε έλλειψη νετρονίων, είτε περίσσεια πρωτονίων. Τέτοιοι πυρήνες υφίστανται συνήθως μία από τις επόμενες μεταβολές (τρόποι διασπάσεως).

**α) Εκπομπή ενός ποζιτρονίου ( $\beta^+$ ),** που προκύπτει από τη μετατροπή ενός πρωτονίου του πυρήνα σε ένα ποζιτρόνιο και ένα νετρόνιο, με ταυτόχρονη εκπομπή ενός νετρίνου ( $p^+ \rightarrow \beta^+ + n + \nu$ ).

**β) Αρπαγή  $K$  ή  $L$ .** Σ' αυτή την περίπτωση ο πυρήνας <<συλλαμβάνει>> ένα περιφερειακό ηλεκτρόνιο του ατόμου, συνήθως από το φλοιό  $K$  ή σπανιότερα από το φλοιό  $L$ , και με το ηλεκτρόνιο αυτό ένα πρωτόνιο του πυρήνα μετατρέπεται σε νετρόνιο ( $p^+ \rightarrow \beta^- + n$ ). Το κενό που δημιουργείται στο φλοιό  $K$  (ή  $L$ ) συμπληρώνεται συνήθως με μεταπήδηση ηλεκτρονίου από πιο εξωτερικό φλοιό και ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας  $X$ .

**γ) Εκπομπή σωματιδίου  $\alpha$ .** Πρόκειται για εκπομπή πυρήνα ήλιου ( ${}^4_2\text{He}$ ).

Αν  $Z$  και  $N$  είναι αντίστοιχα το πλήθος πρωτονίων και νετρονίων του μητρικού (αρχικού) πυρήνα, τότε ο θυγατρικός πυρήνας που προκύπτει από τις πιο πάνω μεταβολές (α) ή (β) διαθέτει  $Z - 1$  πρωτόνια και  $N + 1$  νετρόνια, δηλαδή το ίδιο πλήθος νουκλεονίων  $A = Z + N$  με το μητρικό πυρήνα. Έτσι λέμε ότι προκύπτει πυρήνας ισοβαρής προς το μητρικό.

Στην περίπτωση διασπάσεως κατά τον τρόπο (α) ή (β) το παραστατικό σημείο του



θυγατρικού πυρήνα στο διάγραμμα  $Z, N$  βρίσκεται μετατοπισμένο σε σχέση με το σημείο του μητρικού πυρήνα κατά τη διεύθυνση του βέλους  $\beta^+$ . Μια τέτοια, διάσπαση οδηγεί σε πυρήνα που είναι πιο κοντά (ή και μέσα) στη ζώνη των ευσταθών πυρήνων (Σχήμα 1.2).

Αν ο πυρήνας διασπαστεί με τον τρόπο ( $\gamma$ ), δηλαδή με εκπομπή σωματιδίου  $\alpha$ , τότε ο θυγατρικός πυρήνας θα διαθέτει  $Z - 2$  πρωτόνια και  $N - 2$  νετρόνια, δηλαδή θα έχει μαζικό αριθμό κατά 4 μονάδες μικρότερο του μητρικού. Το παραστατικό του σημείο στο διάγραμμα (Σχήμα 1.2) είναι μετατοπισμένο σε σχέση με το σημείο του μητρικού πυρήνα κατά τη διεύθυνση του βέλους  $\alpha$ , δηλαδή πιο κοντά (ή και μέσα) στη ζώνη των ευσταθών πυρήνων.

Ένας ασταθής πυρήνας με παραστατικό σημείο  $\Lambda$  στο διάγραμμα  $Z, N$  έξω και πάνω από τη ζώνη των ευσταθών πυρήνων, μπορεί να θεωρηθεί πως έχει είτε περίσσεια νετρονίων, είτε έλλειψη πρωτονίων. Ο συνηθισμένος τρόπος διασπάσεως ενός τέτοιου πυρήνα είναι με εκπομπή ενός ηλεκτρονίου, ( $\beta^-$ ) που προέρχεται από τη μετατροπή ενός νετρονίου του πυρήνα σε ένα πρωτόνιο και σε ένα ηλεκτρόνιο με ταυτόχρονη εκπομπή ενός αντινετρίνου ( $n \rightarrow p^+ + \beta^- + \bar{\nu}$ ).

Στην προηγούμενη περίπτωση ο θυγατρικός πυρήνας θα διαθέτει  $Z + 1$  πρωτόνια και  $N - 1$  νετρόνια, θα είναι δηλαδή ισοβαρής προς το μητρικό πυρήνα. Το παραστατικό του σημείο στο διάγραμμα  $Z, N$  θα είναι μετατοπισμένο σε σχέση με το σημείο του μητρικού πυρήνα κατά τη διεύθυνση του βέλους  $\beta^-$  (Σχήμα 1.2). Δηλαδή, και αυτός ο τρόπος διασπάσεως οδηγεί σε πυρήνες που είναι πιο κοντά (ή και μέσα) στη ζώνη των ευσταθών πυρήνων.

Υπάρχουν περιπτώσεις ασταθών πυρήνων που η διάσπαση τους γίνεται με εκπομπή ενός νετρονίου ή ενός πρωτονίου. Είναι ακόμη ενδεχόμενο, σε ορισμένες περιπτώσεις ασταθών πυρήνων, να πραγματοποιηθεί ακαριαία σχάση, δηλαδή τεμαχισμός του πυρήνα σε δύο, συνήθως, θραύσματα με ίσες περίπου μάζες.

Στη συνέχεια θα αναφερθούν ορισμένες παρατηρήσεις σχετικές με τους ευσταθείς πυρήνες, οι οποίες έχουν υποβοηθήσει στη διατύπωση θεωριών για τις πυρηνικές δυνάμεις, δηλαδή τις δυνάμεις που συγκρατούν τα νουκλεόνια στον πυρήνα.

Μια πρώτη παρατήρηση είναι εκείνη που αναφέρθηκε σε σχέση με το διάγραμμα  $Z, N$  (Σχήμα 1.2). Πρόκειται για το γεγονός ότι ο λόγος  $N/Z$  των ευσταθών πυρήνων είναι τόσο μεγαλύτερος της μονάδας, όσο μεγαλύτερος είναι ο ατομικός αριθμός  $Z$  του πυρήνα. Επειδή, όμως, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των πρωτονίων του πυρήνα, τόσο πιο δύσκολη είναι η συγκράτησή τους μέσα σε αυτόν, είναι εύλογο να διατυπωθεί η υπόθεση πως η παρουσία των νετρονίων στον πυρήνα έχει ιδιαίζουσα σημασία για τη συγκράτηση μέσα σ' αυτόν των νουκλεονίων του.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα παρατήρηση προκύπτει από τον επόμενο Πίνακα 1.3 που περιλαμβάνει το πλήθος των ευσταθών πυρήνων, οι οποίοι έχουν τους χαρακτηριστικούς τους αριθμούς  $Z, N$  κατά περίπτωση: και τους δύο άρτιους, και τους δύο περιττούς, ή τον ένα άρτιο, και τον άλλο περιττό.

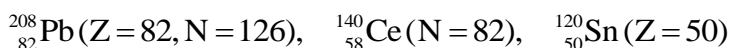
Παρατηρείται λοιπόν, ότι το μεγαλύτερο ποσοστό (πάνω από 50%) των ευσταθών πυρήνων έχουν και τους δύο αριθμούς  $Z, N$  άρτιους. Οι περιπτώσεις ευσταθών πυρήνων που έχουν ένα μόνο από τα  $Z, N$  άρτιο εμφανίζονται με μικρότερο ποσοστό (το ίδιο περίπου αν  $Z$  ή  $N$  άρτιο), ενώ εξαιρετικά σπάνιες είναι οι περιπτώσεις ευσταθών πυρήνων με περιττούς και τους δύο αριθμούς  $Z, N$ .

**Πίνακας 1.3**

Z	Άρτιος	Περιττός	Άρτιος	Περιττός
N	Άρτιος	Περιττός	Περιττός	Άρτιος
Πλήθος ευσταθών πυρήνων	162	4	56	52
	59,1%	1,5%	20,4%	19%

Οι πιο πάνω παρατηρήσεις δικαιολογούν την υπόθεση, ότι η κατά ζεύγη εμφάνιση στον πυρήνα ενός είδους νουκλεονίου θα πρέπει να έχει ευνοϊκή σημασία για την ευστάθεια του πυρήνα, ιδιαίτερα δε αν αυτό συμβαίνει για τα δύο είδη νουκλεονίων.

Τέλος, η πειραματική έρευνα των πυρηνικών ιδιοτήτων οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι οι πυρήνες των οποίων ο Z ή ο N έχει μία από τις τιμές 2, 8, 20, 28, 50, 82, ή 126 παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευστάθεια από ότι οι γειτονικοί τους πυρήνες. Αυτό συμβαίνει π.χ. στην περίπτωση των πυρήνων  ${}^4_2\text{He}$  και  ${}^{16}_8\text{O}$ . Άλλα παραδείγματα τέτοιων πυρήνων είναι:



Στους πιο πάνω αριθμούς δόθηκε το όνομα <<μαγικοί αριθμοί>> για να δοθεί έμφαση στη συσχέτισή τους με την πυρηνική ευστάθεια που προαναφέρθηκε, γεγονός που δεν έχει βρει απόλυτα ικανοποιητική ερμηνεία. Σύμφωνα με μία υπόθεση, όταν τα νετρόνια ή τα πρωτόνια του πυρήνα έχουν πλήθος ίσο προς κάποιον από τους μαγικούς αριθμούς, τότε αυτά συγκροτούν είδος <<συμπληρωμένου φλοιού>>, αντίστοιχα νετρονίων ή πρωτονίων, κάτι ανάλογο δηλαδή με τους συμπληρωμένους ηλεκτρονικούς φλοιούς των ατόμων.

### 1.3 ΕΛΛΕΙΜΜΑ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΣΕΩΣ

Από όσα έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα, θα περίμενε κανείς, ότι η μάζα ενός πυρήνα θα ήταν ίση προς το άθροισμα των μαζών των νουκλεονίων από τα οποία αποτελείται αυτός. Όμως, έχει διαπιστωθεί πειραματικά, ότι οι μάζες των πυρήνων είναι πάντα μικρότερες από το άθροισμα των μαζών των νουκλεονίων τους, κατά ποσότητα:

$$\Delta m = Z \cdot M_p + (A - Z) \cdot M_n - m_{Z,A} \quad (1.10)$$

όπου:  $M_p$  = η μάζα του πρωτονίου,

$M_n$  = η μάζα του νετρονίου,

$m_{Z,A}$  = η μάζα του πυρήνα, ατομικού αριθμού Z και μαζικού αριθμού A

Η διαφορά αυτή στη μάζα του πυρήνα είναι γνωστή ως έλλειμμα μάζας του πυρήνα.

Η ενέργεια που αντιστοιχεί, σύμφωνα με τη θεωρία της Σχετικότητας στο έλλειμμα μάζας, είναι γνωστή ως ενέργεια συνδέσεως του πυρήνα και δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \quad (1.11)$$

ή, δεδομένου ότι σε 1 amu αντιστοιχεί ενέργεια 931,5016 MeV, απευθείας από τη σχέση,

$$\Delta E (\text{MeV}) = 931,5016 \cdot [Z \cdot M_p + (A - Z) \cdot M_n - m_{Z,A}] \quad (1.12)$$

όπου οι μάζες  $M_p$ ,  $M_n$  και  $m_{Z,A}$  εκφράζονται σε amu.

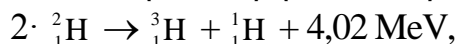
Από φυσικής απόψεως το έλλειμμα μάζας, ή η ενέργεια συνδέσεως δικαιολογείται ως εξής:

Ο πυρήνας ενός ατόμου μπορεί να εξομοιωθεί προς σταγόνα υγρού, οπότε, όπως όταν από μία σταγόνα υγρού για να αποσπάσουμε ένα μόριο καταβάλλουμε έργο, έτσι και για να αποσπάσουμε ένα νουκλεόνιο από πυρήνα, χρειάζεται να προσφέρουμε ενέργεια. Αντιστρόφως, όταν ενσωματώνεται ένα νουκλεόνιο σε ένα πυρήνα τότε αποβάλλεται ενέργεια.

Τόσο η συγκρότηση ενός πυρήνα από τα συστατικά του, όσο και η προσθήκη ενός νουκλεονίου σε ένα πυρήνα αποδίδει σχετικά μεγάλο ποσό ενέργειας, συγκριτικά με τις ενέργειες που εκλύονται κατά τις χημικές αντιδράσεις, όπου π.χ. κατά τη καύση ενός ατόμου άνθρακα σύμφωνα με την αντίδραση:  $C + O_2 \rightarrow CO_2$ , εκλύεται ποσό ενέργειας, της τάξεως των 4 eV!

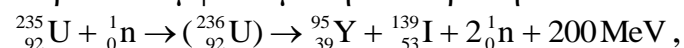
Η ενέργεια συνδέσεως ανά νουκλεόνιο ( $\Delta E/A$ ), ως συνάρτηση του μαζικού αριθμού  $A$ , παρουσιάζει τη μορφή του Σχήματος 1.3. Από τη μορφή αυτής της καμπύλης ( $\Delta E/A = f(A)$ ), προκύπτουν τα ακόλουθα ενδιαφέροντα συμπεράσματα, όσον αφορά στις δυνατότητες άντλησης ενέργειας από τους πυρήνες των ατόμων:

(α) Με συνένωση ελαφρών πυρήνων για δημιουργία βαρύτερων πυρήνων, όπως π.χ. κατά τη συνένωση δύο πυρήνων δευτερίου προς τρίτιο, σύμφωνα με την πυρηνική αντίδραση:

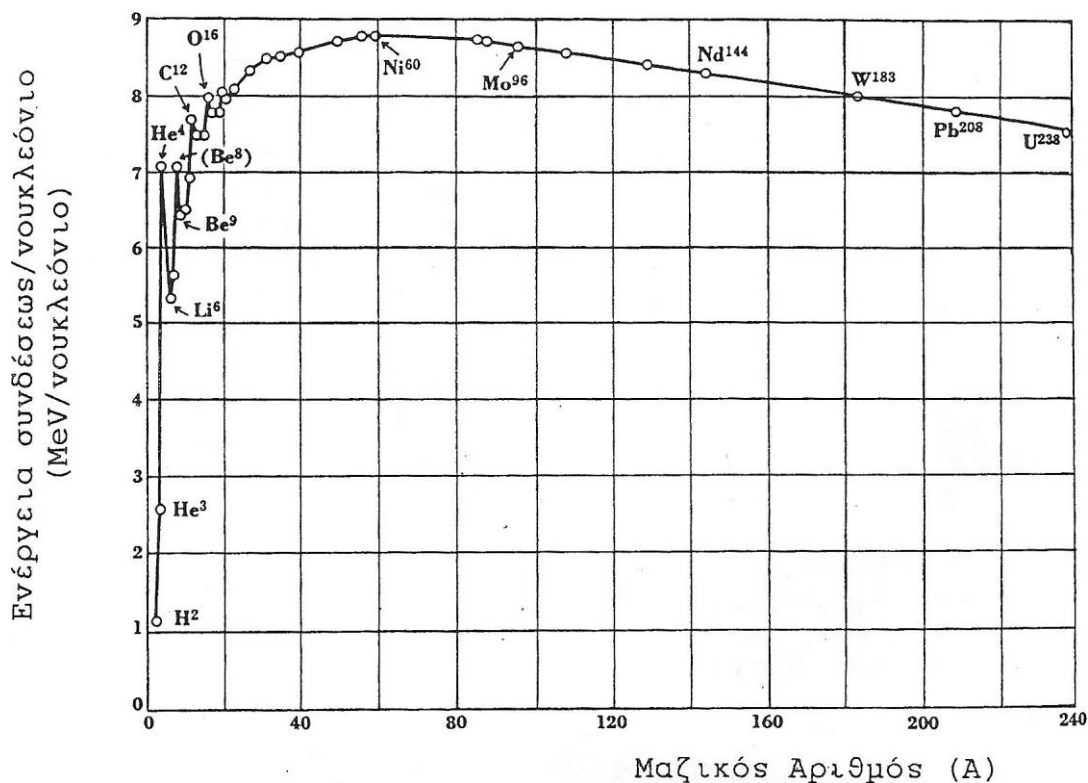


εκλύεται ενέργεια 4,02 MeV. Η αντίδραση αυτή είναι γνωστή ως σύντηξη.

(β) Με σχάση βαρέων πυρήνων προς ελαφρότερους, όπως π.χ. κατά τη σχάση του  ${}^{235}_{92}\text{U}$  με νετρόνια σύμφωνα με την αντίδραση:



εκλύεται ενέργεια της τάξεως των 220 MeV.



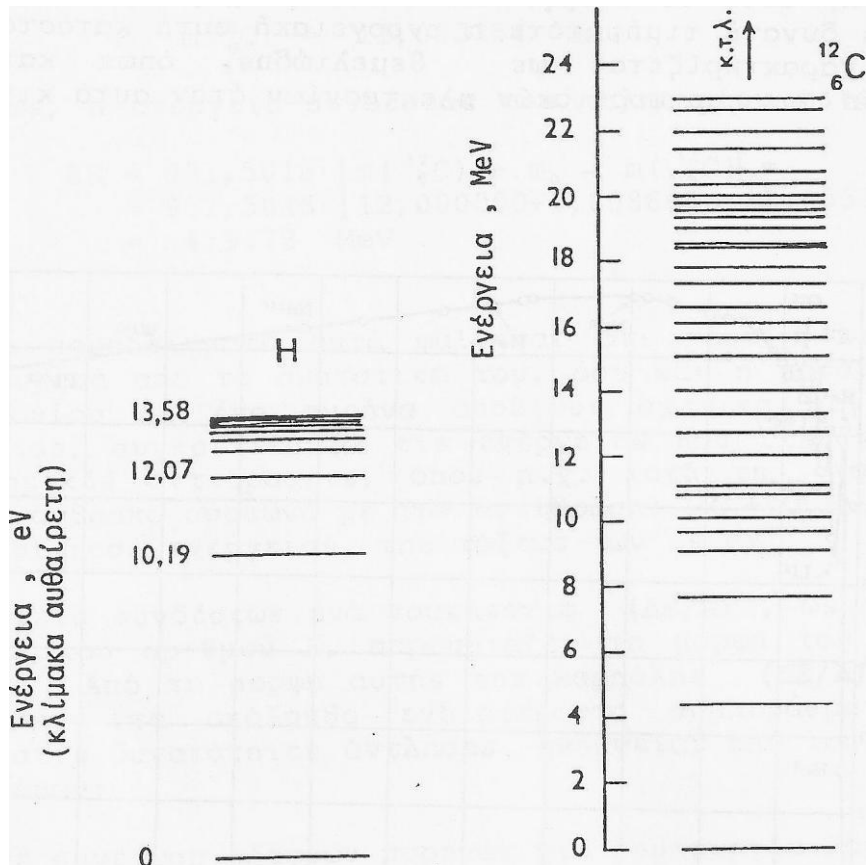
Σχήμα 1.3 Η ενέργεια συνδέσεως ανά νουκλεόνιο συναρτήσει του μαζικού αριθμού.

## 1.4 ΣΤΑΘΜΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΣ ΠΥΡΗΝΑ

Κατ' αντιστοιχία με την έννοια των σταθμών διεγέρσεως του ατόμου (στάθμες διεγέρσεως των περιφερειακών ηλεκτρονίων του ατόμου), έχουμε και τις ενεργειακές στάθμες διεγέρσεως του πυρήνα. Τα νουκλεόνια στον πυρήνα, όπως και τα ηλεκτρόνια γύρω από τον πυρήνα, βρίσκονται σε συνεχή κίνηση, έτσι ώστε ο πυρήνας να χαρακτηρίζεται από ορισμένο ενεργειακό περιεχόμενο. Όταν ο πυρήνας βρίσκεται σε κατάσταση, ώστε το ενεργειακό του περιεχόμενο να έχει την ελάχιστη δυνατή τιμή, τότε η ενεργειακή αυτή κατάσταση του πυρήνα χαρακτηρίζεται

ως θεμελιώδης, όπως και στην περίπτωση των περιφερειακών ηλεκτρονίων όταν αυτά κινούνται στις τροχιές όπου (αυτά) έχουν την ελάχιστη ολική ενέργεια, σύμφωνα με τη θεωρία του Bohr και την απαγορευτική αρχή του Pauli. Αν στον πυρήνα που βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση, προσφερθεί με κάποιο τρόπο ενέργεια, τότε το ενεργειακό περιεχόμενο του πυρήνα αυξάνει και ο πυρήνας μεταπίπτει σε μια νέα ενεργειακή κατάσταση. Οι ενεργειακές καταστάσεις των πυρήνων είναι όπως και οι ενεργειακές καταστάσεις των ηλεκτρονίων κβαντισμένες, δηλαδή χαρακτηρίζονται από καθορισμένες για κάθε πυρήνα τιμές ενέργειας.

Στο Σχήμα 1.4 αποδίδονται γραφικά οι ενεργειακές στάθμες ενός ατόμου και ενός πυρήνα για λόγους συγκρίσεως της τάξεως μεγέθους των ενεργειών που τις χαρακτηρίζουν.



**Σχήμα 1.4** Οι στάθμες ενέργειας του ατόμου του υδρογόνου και του πυρήνα του άνθρακα, C.

Είναι ενδιαφέρον να συγκρίνει κανείς τις <<διαδικασίες διαμορφώσεως>> των διαδοχικών ενεργειακών σταθμών στα άτομα και τους πυρήνες.

Στα άτομα οι διαδοχικές ενεργειακές στάθμες διαμορφώνονται ως αποτέλεσμα των διαδοχικών μεταθέσεων ενός και του αυτού ηλεκτρονίου σε διαδοχικά υψηλότερες ενεργειακές καταστάσεις, μέχρις αποσπάσεώς του από το άτομο (ιονισμός). Εντονότερες καταστάσεις διεγέρσεως στο άτομο προκύπτουν, όταν μετά την αποδέσμευση του πρώτου ηλεκτρονίου, ένα δεύτερο ηλεκτρόνιο αρχίσει να μετατίθεται σε υψηλότερες ενεργειακές καταστάσεις, μέχρι του διπλού ιονισμού του ατόμου κ.ο.κ. Οι διαδοχικές ενεργειακές καταστάσεις προκύπτουν κατ' αυτόν τον τρόπο, γιατί η μετάθεση ενός ήδη διεγερμένου ηλεκτρονίου από την στάθμη στην οποία βρίσκεται, στην επόμενη ενεργειακή στάθμη, απαιτεί μικρότερο ποσό ενέργειας απ' ότι η μετάθεση ενός άλλου ηλεκτρονίου του ατόμου σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη.

Αντιθέτως, στους πυρήνες, οι διαδοχικές ενεργειακές καταστάσεις αυτών δημιουργούνται κατά

τις μεταθέσεις περισσοτέρων του ενός νουκλεονίων σε υψηλότερης ενέργειας τιμές. Και αυτό διότι, όταν ένα νουκλεόνιο έχει ενέργεια μεγαλύτερη από αυτήν που αντιστοιχεί στη θεμελιώδη κατάσταση, όταν δηλαδή ο πυρήνας βρίσκεται ήδη σε κάποια κατάσταση διεγέρσεως, τότε απαιτείται συνήθως μικρότερο ποσό ενέργειας για τη μετάθεση ενός δευτέρου νουκλεονίου σε ενεργειακή κατάσταση υψηλότερη αυτής στην οποία βρίσκεται, απ' ό,τι για να μετατεθεί το αρχικό νουκλεόνιο στην επόμενη επιτρεπτή ενεργειακή κατάσταση.

Έτσι λοιπόν, οι διαδοχικές ενεργειακές καταστάσεις ενός πυρήνα, δηλαδή οι διαδοχικές ενεργειακές στάθμες του, διαμορφώνονται ως επί το πλείστον από συνδυασμένες μεταθέσεις περισσοτέρων του ενός νουκλεονίων, και όχι με διαδοχικές μεταθέσεις ενός και του αυτού νουκλεονίου, σε υψηλότερες ενεργειακές καταστάσεις.

Αυτός είναι και ο λόγος υπάρξεως στους πυρήνες, ενεργειακών καταστάσεων υψηλότερων από την ενέργεια που αντιστοιχεί στην απόσπαση νουκλεονίου από τον πυρήνα.

Είναι π.χ. δυνατό να υπάρξει σε ένα πυρήνα ενεργειακή στάθμη στα 10 MeV, ενώ απαιτούνται μόνο 8 MeV για την απόσπαση ενός νουκλεονίου, και τούτο γιατί η ενέργεια διεγέρσεως των 10 MeV κατανέμεται μεταξύ περισσοτέρων του ενός νουκλεονίων.

Η ελάχιστη ενέργεια που αντιστοιχεί στην ενέργεια αποσπάσεως νουκλεονίου από πυρήνα, είναι γνωστή ως κατώφλι αποσπάσεως νουκλεονίου. Οι ενεργειακές στάθμες του πυρήνα που βρίσκονται στο ενεργειακό διάγραμμά του, υψηλότερα από το κατώφλι αυτό, χαρακτηρίζονται ως δυνητικές στάθμες ενέργειας, ενώ εκείνες που βρίσκονται χαμηλότερα, δεσμευμένες στάθμες ενέργειας.

Τα φωτόνια που προκύπτουν κατά την αποδιέγερση πυρήνα έχουν συνήθως ενέργειες κατά πολύ μεγαλύτερες από τις ενέργειες των φωτονίων που προκύπτουν κατά τις ατομικές αποδιεγέρσεις, όπως άλλωστε διαπιστώνεται και από το Σχήμα 1.4.

## 1.5 ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗ

Έχει παρατηρηθεί ότι πολλοί πυρήνες, είτε από αυτούς που υπάρχουν στη φύση, είτε από αυτούς που παράγονται τεχνητά κατά τις πυρηνικές αντιδράσεις, διασπώνται με εκπομπή σωματιδίων-α, η σωματιδίων-β, και ότι οι μετά την εκπομπή απομένοντες πυρήνες εκπέμπουν ή όχι ακτίνες-γ, ή ξαναδιασπώνται με εκπομπή σωματιδίων α ή β, κ.ο.κ.

Το φαινόμενο εκπομπής σωματιδίων α, β ή φωτονίων-γ από πυρήνες έχει ονομαστεί από την εποχή των Curie, ραδιενέργεια, και αν μεν αναφέρεται σε πυρήνες που υπάρχουν στη φύση χαρακτηρίζεται ως φυσική ραδιενέργεια, αν δε αναφέρεται σε τεχνητά παρασκευαζόμενους πυρήνες, τεχνητή ραδιενέργεια.

Η εκπομπή σωματιδίου-α (πυρήνα ηλίου,  ${}^4_2\text{He}$ ) περιγράφεται γενικά από την αντίδραση:



Ο παραγόμενος θυγατρικός πυρήνας  ${}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$ , έχει ατομικό αριθμό μικρότερο κατά δύο μονάδες από τον ατομικό αριθμό του μητρικού πυρήνα  ${}^A_Z\text{X}$  και μαζικό αριθμό κατά τέσσερις μονάδες μικρότερο.

Συνεπώς ακτινοβολία α είναι σωματία α που στην πραγματικότητα είναι πυρήνες ηλίου (δηλαδή ιόντα  $\text{He}^{2+}$ ). Η διεισδυτική ικανότητα των σωματίων α είναι σχετικά μικρή και μπορούμε να προστατευτούμε από αυτά, ακόμη και με ελαστικά γάντια. Πρέπει όμως να πάρουμε αυστηρές προφυλάξεις ώστε ούτε να εισπνεύσουμε ούτε να καταπιούμε ραδιενεργό υλικό που εκπέμπει σωματία α.

Η εκπομπή σωματιδίου-β, δηλαδή ηλεκτρονίου ( ${}_{-1}^0e$ ) ή ποζιτρονίου ( ${}_{+1}^0e$ ) περιγράφεται γενικά από τις πυρηνικές αντιδράσεις:



Κατά την εκπομπή ηλεκτρονίου, ο θυγατρικός πυρήνας έχει ατομικό αριθμό αυξημένο κατά μονάδα και μαζικό αριθμό τον ίδιο (ισοβαρής πυρήνας) με τον μητρικό πυρήνα, ενώ κατά την εκπομπή ποζιτρονίου, ο θυγατρικός πυρήνας έχει ατομικό αριθμό μικρότερο κατά μονάδα από τον ατομικό αριθμό του μητρικού και μαζικό τον ίδιο. Την εκπομπή ηλεκτρονίου συνοδεύει η εκπομπή ενός σωματιδίου <<μηδενικής μάζας ηρεμίας>>, γνωστού ως αντινεutrino ( $\bar{\nu}$ ), ενώ την εκπομπή του ποζιτρονίου το νεutrino ( $\nu$ ), μηδενικής επίσης μάζας ηρεμίας. Το αντινεutrino, όπως και το ποζιτρονιο αποτελούν σωματίδια της αντύλης.

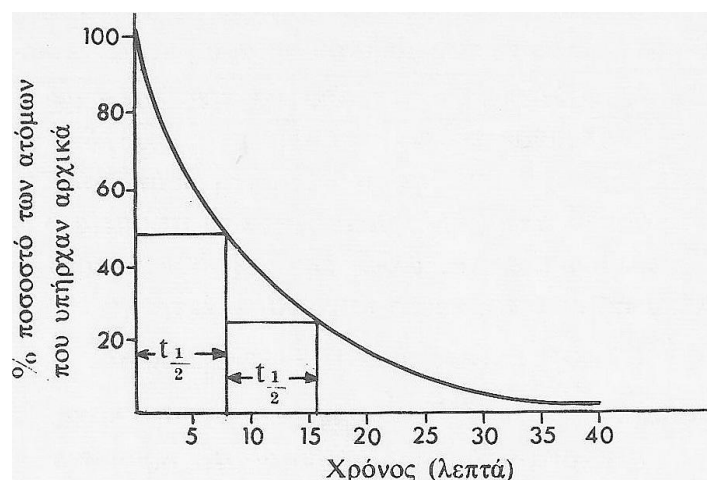
Άρα η ακτινοβολία β αποτελείται, απλώς, από μια δέσμη ηλεκτρονίων με υψηλή ενέργεια που εκπέμπονται από τον πυρήνα με τρομακτικές ταχύτητες (που κάποτε πλησιάζουν την ταχύτητα του φωτός!). Η διεισδυτική ικανότητα των σωματίων β είναι περίπου εκατό φορές μεγαλύτερη από εκείνη των σωματίων α. Χρειάζεται λοιπόν ουσιαστικότερη θωράκιση όταν χειριζόμαστε ουσίες που εκπέμπουν σωματίδια β.

Η εκπομπή φωτονίου από ένα, πυρήνα χαρακτηρίζεται ως ισομερής μετατροπή. Κατά την μετατροπή αυτή δεν έχουμε παραγωγή νέου πυρήνα. Απλά, ο πυρήνας μετά την εκπομπή του φωτονίου διαφέρει μόνο ως προς το ενεργειακό του περιεχόμενο από τον αρχικό πυρήνα.

Η ακτινοβολία γ διαφέρει χαρακτηριστικά από τους άλλους τύπους ακτινοβολίας στο ότι δεν έχει ηλεκτρικό φορτίο. Οι ακτίνες γ είναι μια μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με εξαιρετικά μικρά μήκη κύματος. Πρέπει λοιπόν να χειριζόμαστε τις πηγές ακτίνων γ από μακριά και πίσω από ογκώδη θωράκιση από μόλυβδο ή μπετόν.

### Ο νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων

Η ραδιενεργός διάσπαση των πυρήνων είναι μια αδιάκοπη διεργασία με την έννοια ότι κανένας εξωτερικός παράγων δεν μπορεί να αλλάξει την πορεία της. Ο ρυθμός της διάσπασης ελαττώνεται εκθετικά σε συνάρτηση με το χρόνο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5 Τυπική καμπύλη ραδιενεργής διάσπασης ( ${}^{131}\text{I}$ ).

Ο νόμος της ραδιενεργής διάσπασης εκφράζεται ως εξής:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.15)$$

όπου:  $N_0$  = ο αριθμός των ατόμων που υπήρχαν αρχικά, σε χρόνο  $t = 0$

$N_t$  = ο αριθμός των ατόμων που απέμειναν μετά από χρόνο  $t$

$\lambda$  = σταθερά ραδιενεργής διάσπασης (αυτή η παράμετρος έχει μια χαρακτηριστική τιμή για κάθε είδος πυρήνα)

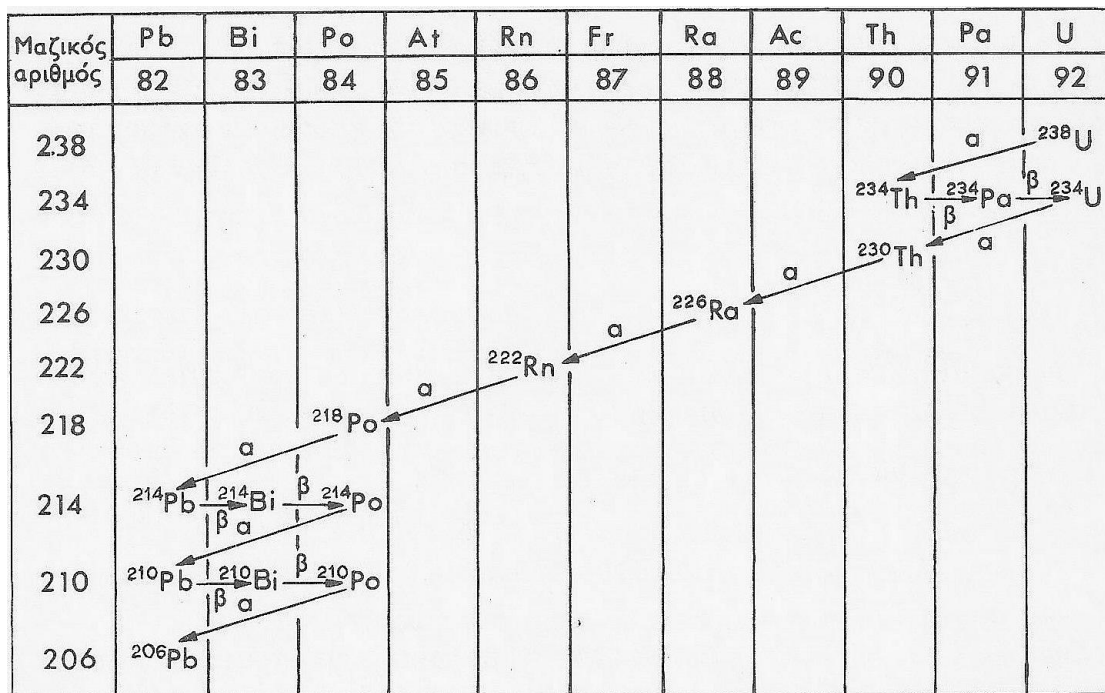
Ένα σπουδαίο συμπέρασμα του νόμου των ραδιενεργών διασπάσεων είναι η έννοια του χρόνου ημιζωής (ή χρόνος υποδιπλασιασμού ή χρόνος <<ημίσειας ζωής>> ή και περίοδος) του πυρήνα,  $t_{\frac{1}{2}}$  που προσφέρει μια σχετικά απλή μέθοδο για να συγκρίνουμε

τη σταθερότητα των πυρήνων. Μπορεί να οριστεί ως ο χρόνος που χρειάζεται να μεσολαβήσει για να διασπαστούν ακριβώς τα μισά άτομα από μια ορισμένη αρχική ποσότητα ενός ραδιενεργού υλικού. Ο χρόνος ημιζωής του Ra-226, για παράδειγμα, είναι 1620 χρόνια έτσι, από ένα γραμμάριο ραδίου που ζυγίστηκε σήμερα θα έχει μείνει μετά 1620 χρόνια το μισό, και με τον ίδιο τρόπο θα μείνει το ένα τέταρτο του γραμμαρίου σε 3240 χρόνια. Ο χρόνος ημιζωής των διαφόρων στοιχείων ποικίλλει πάρα πολύ, από πολλά εκατομμύρια χρόνια ως κλάσματα του δευτερολέπτου.

### Οι οικογένειες των ραδιενεργών πυρήνων

Γενικά οι θυγατρικοί πυρήνες είναι επίσης ραδιενεργοί και ασταθείς με τους μητρικούς ραδιενεργούς πυρήνες από τους οποίους προκύπτουν. Έτσι η διάσπαση ενός μητρικού ραδιενεργού πυρήνα δεν καταλήγει πάντοτε αμέσως στον τελικό σταθερό πυρήνα, αλλά μεσολαβούν μια σειρά από διαδοχικές διασπάσεις κατά τις οποίες παράγονται όλα τα θυγατρικά του παράγωγα, με συνέπεια να δημιουργούνται ολόκληρες οικογένειες ραδιενεργών πυρήνων (ραδιενεργές οικογένειες). Υπάρχουν στη φύση τρεις τέτοιες οικογένειες που αρχίζουν η καθεμιά με το Th-232, το U-235 και το U-238 αντίστοιχα. Σε κάθε περίπτωση έχουμε μία περίπου δωδεκάδα γενεές προτού φθάσουμε σ' ένα σταθερό ισότοπο του μολύβδου. Μια τέταρτη σειρά, μολονότι είχε προβλεφθεί από το 1923, ανακαλύφθηκε μόλις το 1944, όταν δημιουργήθηκε τεχνητά το πρώτο μέλος της (το Pu-241). Μετέπειτα μελέτη απέδειξε ότι η τέταρτη αυτή σειρά μοιάζει πολύ με τις υπόλοιπες, διαφέρει όμως κατά το ότι το τελικό προϊόν είναι ένα ισότοπο του βισμούθιου. Η σειρά του πλουτωνίου έχει από καιρό εκλείψει, γιατί ο χρόνος ημιζωής του σταθερότερου μέλους της ( $\text{Np-237}$ ,  $t_{\frac{1}{2}} = 2,2 \times 10^6$  χρόνια) είναι μικρός σε σύγκριση με την ηλικία της γης.

Μια τυπική ραδιενεργή οικογένεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.6 (η ραδιενεργή οικογένεια του U-238). Παρατηρούμε ότι κάθε στάδιο διαδέχεται το προηγούμενο με τους μηχανισμούς (εκπομπή σωματίων  $\alpha$  ή  $\beta$ ) που έχουμε ήδη περιγράψει. Αυτή η σειρά καταλήγει στο Pb-206 αφού περάσει στο μεταξύ και από άλλα δύο ισότοπα του μολύβδου (δηλαδή το Pb-214 και το Pb-210). Με την ευκαιρία αυτή αξίζει να θυμηθούμε ότι οι ερευνητές υποπτεύτηκαν για πρώτη φορά την ύπαρξη ισοτόπων από τέτοιου είδους παρατηρήσεις.



Σχήμα 1.6 Η ραδιενεργή οικογένεια του U-238.

## 1.6 ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ

Οι πρώτες προσπάθειες τεχνητής διασπάσεως πυρήνων που συνήθως είναι ευσταθείς, έγιναν το 1919 με έκθεση πυρήνων σε βομβαρδισμό με σωματίδια α προερχόμενα από φυσικώς ραδιενεργούς πυρήνες. Η σκέψη ήταν ότι αν ένα σωματίδιο α εισχωρούσε στο βομβαρδιζόμενο πυρήνα, τότε θα μπορούσε να προκαλέσει τη διάσπασή του. Τα σωματίδια α των φυσικώς ραδιενεργών πυρήνων χρησιμοποιήθηκαν σ' αυτά τα πειράματα επειδή διαθέτουν μεγάλη ενέργεια και ορμή.

Τα πρώτα πειράματα τεχνητής διασπάσεως έγιναν από τον Rutherford, ο οποίος βομβάρδισε άζωτο με σωματίδια α εκπεμπόμενα από Bi-214 και παρατήρησε ότι προκαλείται απόσπαση πρωτονίων από πυρήνες αζώτου. Την ερμηνεία της αποσπάσεως αυτής έδωσε ο Blackett, ο οποίος χρησιμοποίησε θάλαμο Wilson και απέδειξε μ' αυτόν ότι, κατά το βομβαρδισμό, σωματίδιο α ενσωματώνεται σε πυρήνα αζώτου και σχηματίζεται έτσι σύνθετος πυρήνας ασταθής, ο οποίος στη συνέχεια διασπάται με εκπομπή πρωτονίου. Το πείραμα αυτό του Blackett με το θάλαμο Wilson απέκλεισε την άλλη δυνατή ερμηνεία, ότι δηλαδή η απόσπαση του πρωτονίου από πυρήνα αζώτου είναι αποτέλεσμα <<βιαίας συγκρούσεως>> του τελευταίου με σωματίδιο α.

Η πιο πάνω αλληλεπίδραση ενός σωματιδίου α και ενός πυρήνα αζώτου, που είχε σαν αποτέλεσμα να δημιουργηθεί από τη συγχώνευσή τους σύνθετος πυρήνας και στη συνέχεια να γίνει εκπομπή ενός πρωτονίου από το σύνθετο πυρήνα, ονομάζεται πυρηνική αντίδραση. Γενικότερα, όταν δύο πυρηνικά σωματίδια, δηλαδή δύο πυρήνες ή ένας πυρήνας και ένα νουκλεόνιο, αλληλεπιδράσουν με αποτέλεσμα τη δημιουργία δύο ή περισσότερων πυρηνικών σωματιδίων ή ακτινοβολίας γ, τότε λέμε ότι πραγματοποιήθηκε πυρηνική αντίδραση. Θα πρέπει να διευκρινισθεί ότι μία πυρηνική αντίδραση, όπως θα δούμε στη συνέχεια, δεν πραγματοποιείται πάντα με ενδιάμεσο σχηματισμό ενός συνθέτου πυρήνα.

Αν a και b είναι τα σωματίδια πριν από την πυρηνική αντίδραση και c, d τα προϊόντα



της αντιδράσεως (για απλούστευση θεωρούμε 2 προϊόντα αντιδράσεως), τότε για την πυρηνική αντίδραση χρησιμοποιείται η επόμενη παράσταση:

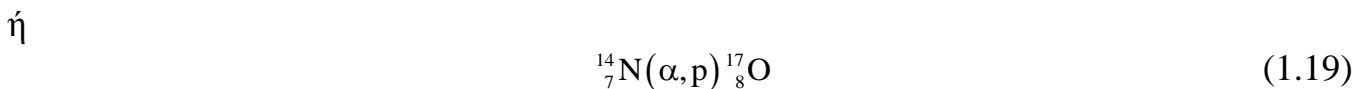


Η διατύπωση της (1.16) γίνεται πάντα με τα ουδέτερα άτομα των πυρήνων που συμμετέχουν, ακόμη και αν μερικά από αυτά εμφανίζονται κατά την αντίδραση ιονισμένα.

Συνήθως σε μια πυρηνική αντίδραση ένα από τα σωματίδια που συμμετέχουν θεωρείται ως στόχος, π.χ. το  $a$ , ενώ το άλλο ως βλήμα, οπότε αντί της (1.16) χρησιμοποιείται η ακόλουθη παράσταση:



Έτσι λοιπόν η πυρηνική αντίδραση που πραγματοποιήθηκε με το πείραμα του Rutherford είναι η:



Οι πυρηνικές αντιδράσεις που ενδιαφέρουν την πυρηνική τεχνολογία πληρούν τους έξι θεμελιώδεις νόμους:

**(1) Διατήρηση των νουκλεονίων:** Ισότητα συνολικού πλήθους νουκλεονίων πριν και μετά την αντίδραση. Στην περίπτωση της αντιδράσεως (1.18) είναι  $14+4 = 17+1$ .

**(2) Διατήρηση ηλεκτρικού φορτίου:** Ισότητα αλγεβρικού αθροίσματος φορτίων πριν και μετά την αντίδραση. Στην περίπτωση της αντιδράσεως (1.18) είναι  $7+2 = 8+1$ .

**(3) Διατήρηση της ορμής και στροφορμής:** Ισότητα συνολικής ορμής των σωματιδίων πριν και μετά την αντίδραση, αφού κατά την αντίδραση δεν ασκούνται στα σωματίδια εξωτερικές δυνάμεις. Το ίδιο ισχύει και για τη στροφορμή.

**(4) Διατήρηση της ενεργείας:** Για τη διατύπωση της αρχής της διατηρήσεως της ενεργείας πρέπει να ληφθεί υπόψη και ενδεχόμενη μεταβολή μάζας κατά την αντίδραση, δηλαδή διαφορά στη συνολική μάζα των σωματιδίων πριν και μετά την αντίδραση, όπως ακριβώς αναπτύσσεται στη συνέχεια.

Αν  $E_a, E_b, E_c, E_d$  είναι οι κινητικές ενέργειες των σωματιδίων  $a, b, c, d$  αντίστοιχα της πυρηνικής αντιδράσεως (1.16) και  $m_a, m_b, m_c, m_d$  οι μάζες ηρεμίας των σωματιδίων, τότε η αρχή της διατηρήσεως της ενεργείας γι' αυτή την αντίδραση διατυπώνεται ως έξης:

$$(E_a + m_a c^2) + (E_b + m_b c^2) = (E_c + m_c c^2) + (E_d + m_d c^2) \quad (1.20)$$

Στη σχέση (1.20) για κάθε σωματίδιο εμφανίζεται ως ενέργεια το άθροισμα της κινητικής του ενεργείας και της ενεργείας της ισοδύναμης προς τη μάζα ηρεμίας του σωματιδίου. Αυτό είναι απαραίτητο γιατί συνήθως στις πυρηνικές αντιδράσεις η συνολική μάζα πριν και μετά από αυτές δεν είναι ίδια, οπότε ανάλογα πραγματοποιείται έκλυση ή απορρόφηση ενεργείας.

Η σχέση (1.20) γράφεται και ως έξης:

$$(E_c + E_d) - (E_a + E_b) = [(m_a + m_b) - (m_c + m_d)] c^2 \quad (1.21)$$

Το δεξιό μέλος της (1.21) ονομάζεται μέγεθος  $Q$  της πυρηνικής αντιδράσεως στην οποία αναφέρεται, δηλαδή:

$$Q = [(m_a + m_b) - (m_c + m_d)] c^2 \quad (1.22)$$

Αν είναι  $Q > 0$ , που σημαίνει η συνολική μάζα ηρεμίας των προϊόντων της αντιδράσεως είναι μικρότερη της συνολικής μάζας ηρεμίας των συμμετεχόντων στην αντίδραση σωματιδίων, τότε η πυρηνική αντίδραση είναι εξώθερμη. Η ενέργεια που

εκλύεται είναι το ισοδύναμο του <<ελλείμματος>> μάζας που δημιουργείται κατά την αντίδραση. Η ενέργεια αυτή, όπως φαίνεται από την (1.21) είναι ίση προς την αύξηση της κινητικής ενεργείας των σωματιδίων πριν και μετά την πυρηνική αντίδραση.

Αν είναι  $Q < 0$ , που σημαίνει ότι η συνολική μάζα ηρεμίας των προϊόντων της αντιδράσεως είναι μεγαλύτερη της συνολικής μάζας ηρεμίας των συμμετεχόντων στην αντίδραση σωματιδίων, τότε η πυρηνική αντίδραση είναι ενδόθερμη. Η ενέργεια που απορροφάται είναι το ισοδύναμο της <<αυξήσεως>> της μάζας που δημιουργείται κατά την αντίδραση. Η ενέργεια αυτή, όπως φαίνεται από την (1.21) είναι ίση προς τη μείωση της κινητικής ενεργείας των σωματιδίων πριν και μετά την πυρηνική αντίδραση.

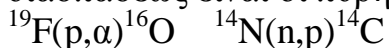
Έτσι λοιπόν στις εξώθερμες πυρηνικές αντιδράσεις πραγματοποιείται μετατροπή μάζας σε κινητική ενέργεια, ενώ στις ενδόθερμες πραγματοποιείται μετατροπή κινητικής ενεργείας σε μάζα.

Το μέγεθος  $Q$  μιας οποιασδήποτε πυρηνικής αντιδράσεως υπολογίζεται εύκολα αν είναι γνωστές οι μάζες των διαφόρων σωματιδίων με την προϋπόθεση ότι οι πυρήνες που προκύπτουν είναι στη θεμελιώδη κατάσταση.

Αν από μία αντίδραση προκύψουν πυρήνες σε κατάσταση διεγέρσεως, τότε η ενέργεια που ελευθερώνεται ή απορροφάται σ' αυτή την αντίδραση δεν είναι το  $Q$  που υπολογίζεται από τη σχέση (1.22) με τις μάζες των ουδέτερων ατόμων, αλλά στο  $Q$  από την (1.22) πρέπει να γίνει διόρθωση για να ληφθούν υπόψη οι ενέργειες διεγέρσεως των πυρήνων - προϊόντων της αντιδράσεως.

Στη συνέχεια θα αναφερθούν οι γενικές κατηγορίες των πιο συνηθισμένων πυρηνικών αντιδράσεων με βασικό σκοπό την εισαγωγή της σχετικής ορολογίας. Αργότερα, θα γίνει λεπτομερέστερη ανάπτυξη των πυρηνικών αντιδράσεων που προκαλούνται με νετρόνια, γιατί αυτές ακριβώς οι αντιδράσεις έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την πυρηνική τεχνολογία.

**(1) Πυρηνική διάσπαση.** Τυπική αντίδραση αυτού του είδους είναι εκείνη που το σωματίδιο - βλήμα είναι ελαφρό σωματίδιο, δηλαδή νουκλεόνιο ή ελαφρός πυρήνας (π.χ. δευτερόνιο, σωματίδιο  $\alpha$  κλπ.) και από την αλληλεπίδραση του με πυρήνα - στόχο προκύπτει ένας νέος πυρήνας και ένα νέο ελαφρό σωματίδιο. Παραδείγματα πυρηνικής διασπάσεως είναι οι πυρηνικές αντιδράσεις:



Οι πρώτες πυρηνικές αντιδράσεις έγιναν με βλήματα φορτισμένα σωματίδια. Όμως σ' αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητο τα σωματίδια - βλήματα να έχουν αρκετά μεγάλη ενέργεια, ώστε να μπορέσουν να έρθουν σε <<στενή συνάφεια>> με τον πυρήνα - στόχο για να πραγματοποιηθεί η πυρηνική αντίδραση, παρ' όλο τον ανταγωνισμό των δυνάμεων Coulomb. Είναι φανερό ότι η πρόκληση πυρηνικής διασπάσεως με νετρόνια πρέπει να είναι πολύ πιο <<εύκολη>>, αφού τα νετρόνια δεν έχουν φορτίο.

**(2) Ελαστική σκέδαση.** Ελαστική σκέδαση ονομάζεται η πυρηνική αντίδραση η οποία έχει προϊόντα τα ίδια τα σωματίδια που συμμετέχουν σ' αυτή και δεν προκαλεί καμιά αλλαγή στην εσωτερική ενέργεια (διέγερση) των πυρήνων που συμμετέχουν. Η ελαστική σκέδαση έχει σαν μόνο αποτέλεσμα τη μεταβολή της κινητικής ενεργείας των σωματιδίων. Αν, όπως συνήθως συμβαίνει, ο πυρήνας στόχος είναι πριν από τη σκέδαση κατά προσέγγιση σε ηρεμία, τότε, μετά τη σκέδαση, το σωματίδιο - βλήμα εμφανίζεται με μειωμένη κινητική ενέργεια (επιβράδυνση) ενώ ο πυρήνας στόχος αποκτά κινητική ενέργεια. Η ελαστική σκέδαση, αν και σαν πυρηνική αντίδραση μπορεί να θεωρηθεί

<<οριακή>>, όμως έχει ιδιαίτερη σημασία για την πυρηνική τεχνολογία, η οποία, για λόγους που θα γίνουν αντιληπτοί στη συνέχεια, ενδιαφέρεται για την επιβράδυνση των ταχέων νετρονίων.

**(3) Μη ελαστική σκέδαση.** Στη μη ελαστική σκέδαση τα προϊόντα της είναι μεν τα ίδια με τα σωματίδια που συμμετέχουν σ' αυτή, όμως ο συμμετέχων πυρήνας προκύπτει από την αντίδραση σε κατάσταση διεγέρσεως για να αποδιεγερθεί τελικά με εκπομπή ακτινοβολίας  $\gamma$ . Για τη μη ελαστική σκέδαση χρησιμοποιείται η ακόλουθη συμβολική παράσταση:

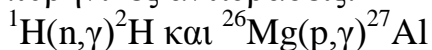


όπου ο αστερίσκος υποδηλώνει ότι ο πυρήνας  $X$  είναι σε κατάσταση διεγέρσεως.

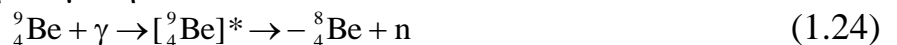
Η διέγερση του πυρήνα - στόχου γίνεται σε βάρος της κινητικής ενεργείας του συστήματος των δύο σωματιδίων πριν από την αντίδραση, δηλαδή του πυρήνα - στόχου και του βλήματος. Έτσι λοιπόν, η κινητική ενέργεια του συστήματος μετά τη μη ελαστική σκέδαση είναι μειωμένη κατά ποσό ίσο προς την ενέργεια διεγέρσεως που εμφανίζει ο διεγερμένος πυρήνας στόχος. Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα, για τις στάθμες ενεργείας των πυρήνων, γίνεται αντιληπτό ότι μια συγκεκριμένη μη ελαστική σκέδαση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί παρά μόνον όταν η κινητική ενέργεια του συστήματος των σωματιδίων πριν από την αντίδραση είναι μεγαλύτερη ή ίση μιας ελάχιστης τιμής. Αυτή η ελάχιστη τιμή της κινητικής ενεργείας του συστήματος των σωματιδίων που συμμετέχουν είναι εκείνη που επαρκεί ακριβώς προκειμένου ο πυρήνας - στόχος με την μη ελαστική σκέδαση ν' αχθεί στην πρώτη του στάθμη ενεργείας.

Ο όρος σκέδαση χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να μιλήσουμε για πυρηνική αντίδραση που είναι, αδιακρίτως, είτε ελαστική σκέδαση, είτε μη ελαστική σκέδαση.

**(4) Ραδιενεργός ενσωμάτωση (ή ραδιενεργός σύλληψη).** Σ' αυτή την πυρηνική αντίδραση το σωματίδιο - βλήμα ενσωματώνεται στον πυρήνα - στόχο, οπότε προκύπτει ένας νέος πυρήνας σε έντονη κατάσταση διεγέρσεως, ο οποίος στη συνέχεια αποδιεγείρεται με εκπομπή ενός ή περισσοτέρων φωτονίων, για να μεταπέσει έτσι στη θεμελιώδη του κατάσταση. Παραδείγματα ραδιενεργών ενσωματώσεων είναι οι εξής πυρηνικές αντιδράσεις:



**(5) Διάσπαση με φωτόνια.** Διάσπαση πυρήνων μπορεί να προκληθεί και με φωτόνια ( $\gamma$ ), αν αυτά έχουν ενέργεια επαρκή για την απόσπαση σωματιδίου από τον πυρήνα στόχο. Είναι φανερό ότι αυτές οι αντιδράσεις είναι ενδόθερμες και ότι για μία συγκεκριμένη αντίδραση αυτού του είδους απαιτείται μια ελάχιστη τιμή της ενεργείας των φωτονίων, ή, αλλιώς, υπάρχει ορισμένο κατώφλι ενέργειας. Παράδειγμα τέτοιας πυρηνικής αντιδράσεως είναι η επόμενη:



Η πρακτική σημασία αυτής της πυρηνικής αντιδράσεως είναι ότι προσφέρεται για τη συγκρότηση πηγής παραγωγής νετρονίων με συνδυασμό βηρυλλίου και μιας  $\gamma$ -ραδιενεργού πηγής που εκπέμπει φωτόνια με ενέργεια επαρκή για την αντίδραση (1.24).

Μια τέτοια πηγή αποτελείται από μία ράβδο που περιέχει το  $\gamma$ -ραδιενεργό ισότοπο  $\text{Sb-124}$ , το οποίο εκπέμπει φωτόνια ενεργείας 1,71 MeV ικανά για την αντίδραση (1.24), τοποθετημένη σε μανδύα από βηρύλλιο (100%  $\text{Be-9}$ ). Έτσι φωτόνια αυτής της ενεργείας της ράβδου, καθώς διέρχονται από το μανδύα της, προκαλούν την πυρηνική αντίδραση (1.24) <<παραγωγής>> νετρονίων. Τα νετρόνια αυτά έχουν ενέργεια περίπου 25 keV.

Η ράβδος της πιο πάνω πηγής είναι από αντιμόνιο (Sb), του οποίου η μία ισοτοπική συνιστώσα είναι το Sb-123 (42,75%). Όταν η ράβδος του αντιμονίου τοποθετηθεί σε αντιδραστήρα και εκτεθεί σε βομβαρδισμό νετρονίων, τότε πραγματοποιούνται πυρηνικές αντιδράσεις ενσωμάτωσης νετρονίων σε πυρήνες Sb-123, από τις οποίες προκύπτουν οι επιθυμητοί γ-ραδιενεργοί πυρήνες Sb-124. Το Sb-124 έχει χρόνο υποδιπλασιασμού περίπου 60 d. Για το λόγο αυτό, η ράβδος του Sb πρέπει να ακτινοβολείται σε αντιδραστήρα περιοδικώς, ώστε η παροχή φωτονίων της ράβδου, επομένως και η παροχή νετρονίων του συγκροτήματος Sb-Be, να είναι στα επιθυμητά όρια.

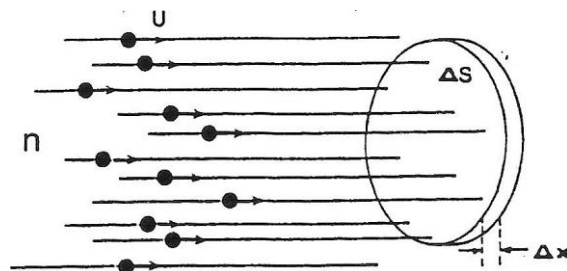
**(6) Σχάση.** Σχάση ονομάζεται η πυρηνική αντίδραση η οποία οδηγεί στον τεμαχισμό του πυρήνα στόχου σε δύο ή σε περισσότερους καμιά φορά πυρήνες, με μάζες που λίγο διαφέρουν μεταξύ τους. Η σχάση πραγματοποιείται όταν ο σύνθετος πυρήνας από την ενσωμάτωση του σωματιδίου - βλήματος στον πυρήνα στόχο προκύπτει σε τόσο έντονη κατάσταση διεγέρσεως, ώστε να είναι δυνατός ο τεμαχισμός του που προαναφέρθηκε.

**(7) Απορρόφηση.** Με τον όρο απορρόφηση χαρακτηρίζεται κάθε πυρηνική αντίδραση που οδηγεί σε <<εξαφάνιση>> του σωματιδίου βλήματος. Συνεπώς, η πυρηνική διάσπαση, η ραδιενεργός ενσωμάτωση και η σχάση είναι αντιδράσεις απορροφήσεως.

## 1.7 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΚΑΙ ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΣ

Το μέγεθος που χαρακτηρίζει την πιθανότητα πραγματοποίησης ορισμένου τύπου πυρηνικής αντιδράσεως σωματιδίων με ορισμένου είδους πυρήνες είναι γνωστό ως μικροσκοπική ενεργός διατομή της πυρηνικής αντιδράσεως. Η έννοια του μεγέθους αυτού μπορεί να γίνει αντιληπτή ως εξής:

Θεωρούμε ότι παράλληλη δέσμη μονοενεργειακών σωματιδίων πέφτει κάθετα πάνω στην επιφάνεια  $\Delta S$  λεπτού πλακιδίου-στόχου πάχους  $\Delta x$  (βλ. Σχήμα 1.7).



**Σχήμα 1.7** Βομβαρδισμός πλακιδίου με παράλληλη δέσμη μονοενεργειακών σωματιδίων.

Έστω ότι η ένταση της δέσμης των σωματιδίων είναι:

$$I = n \cdot u \quad (\text{σωματίδια/cm}^2 \cdot \text{sec}) \quad (1.25)$$

όπου:  $n$  η πυκνότητα σωματιδίων της δέσμης (σωματίδια/cm<sup>3</sup>)

και,

$u$  η ταχύτητα των σωματιδίων της δέσμης (cm/sec),

και ότι ο στόχος βρίσκεται ολόκληρος μέσα στη δέσμη (η διατομή της δέσμης θεωρείται μεγαλύτερη από την  $\Delta S$ ). Αν:

$$\Delta N = N \cdot \Delta S \cdot \Delta x \quad (1.26)$$

είναι το πλήθος των πυρήνων του πλακιδίου, όπου  $N$  είναι η πυκνότητα πυρήνων\* του υλικού του (πυρήνες/cm<sup>3</sup>), τότε το συνολικό πλήθος των πυρηνικών αντιδράσεων ( $\Delta R$ ) ορισμένου τύπου που θα πραγματοποιηθούν μέσα σε χρονικό διάστημα  $\Delta t$  στο πλακίδιο θα είναι ανάλογο της εντάσεως  $I$  της δέσμης, του μεγέθους  $\Delta N$  και του χρονικού διαστήματος  $\Delta t$ :

$$\Delta R = \sigma \cdot I \cdot \Delta N \cdot \Delta t \quad (1.27)$$

ή, λόγω της σχέσεως (1.26),

$$\Delta R = \sigma \cdot I \cdot N \cdot \Delta S \cdot \Delta x \cdot \Delta t \quad (1.28)$$

όπου  $\sigma$  συντελεστής αναλογίας.

Ο συντελεστής αναλογίας  $\sigma$ , που βάσει της σχέσεως (1.27) παριστάνει το πλήθος των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται ανά μονάδα χρόνου, ανά μονάδα εντάσεως της δέσμης και ανά πυρήνα, είναι γνωστός ως μικροσκοπική ενεργός διατομή της υπόψη πυρηνικής αντιδράσεως. Το μέγεθος  $\sigma$  έχει διαστάσεις επιφάνειας και εκφράζεται συνήθως σε μονάδες  $b$  (barn),  $mb$  και  $\mu b$ , όπου:

$$1 b = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$1 mb = 10^{-27} \text{ cm}^2$$

$$1 \mu b = 10^{-30} \text{ cm}^2$$

Η μικροσκοπική ενεργός διατομή  $\sigma$  αποτελεί λοιπόν φυσική σταθερά, χαρακτηριστική του πυρήνα-στόχου και της συγκεκριμένης πυρηνικής αντιδράσεως. Πειραματικά διαπιστώνεται ότι η  $\sigma$  εξαρτάται και από την ταχύτητα ή την ενέργεια των σωματιδίων που προκαλούν την συγκεκριμένη πυρηνική αντίδραση.

Το μέγεθος:

$$\Sigma = \sigma \cdot N \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (1.29)$$

όπου  $N$  η πυκνότητα πυρήνων του υλικού, είναι γνωστό ως μακροσκοπική ενεργός διατομή του υλικού για τον τύπο της πυρηνικής αντιδράσεως στον οποίο αναφέρεται η  $\sigma$ .

Έτσι, το πλήθος των πυρηνικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα όγκου του υλικού εκφράζεται ως εξής:

$$\dot{R} = \sigma \cdot n \cdot u \cdot N = \Sigma \cdot I \quad (\text{αντιδρ./cm}^3 \cdot \text{sec}) \quad (1.30)$$

Αν, με ορισμένης ταχύτητας σωματίδια και με ορισμένου είδους πυρήνες-στόχους, είναι δυνατή η πραγματοποίηση πυρηνικών αντιδράσεων διαφόρων τύπων που χαρακτηρίζονται με τις μικροσκοπικές ενεργές διατομές  $\sigma_1(u)$ ,  $\sigma_2(u)$ , ..., τότε το άθροισμα:

$$\sigma_t(u) = \sigma_1(u) + \sigma_2(u) + \dots \quad (1.31)$$

είναι γνωστό ως ολική μικροσκοπική ενεργός διατομή, ενώ το άθροισμα:

$$\begin{aligned} \Sigma_t(u) &= N \cdot \sigma_1(u) + N \cdot \sigma_2(u) + \dots \\ &= \Sigma_1(u) + \Sigma_2(u) + \dots = N \cdot \sigma_t(u) \end{aligned} \quad (1.32)$$

όπου  $N$  η πυκνότητα πυρήνων του υλικού, είναι γνωστό ως ολική μακροσκοπική ενεργός διατομή.

Το ολικό πλήθος των πυρηνικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται ανά μονάδα όγκου και

\*Αν  $\rho$  είναι η φυσική πυκνότητα του υλικού, και (AB) ή (MB) το ατομικό, ή το μοριακό βάρος, αντιστοίχως, του υλικού, τότε θα είναι:

$$\text{Πυκνότητα πυρήνων (ή ατόμων)} : N_a = N_A \cdot \rho / (AB)$$

$$\text{Πυκνότητα μορίων} : N_\mu = N_A \cdot \rho / (MB)$$

όπου  $N_A$  η σταθερά του Avogadro.

Αντιστοίχως, το πλήθος των ατόμων ή μορίων που περιλαμβάνονται σε ορισμένη μάζα  $m$  του υλικού, θα εκφράζεται ως εξής:

$$N_{a,ολ} = N_A \cdot m / (AB), \text{ και } N_{\mu,ολ} = N_A \cdot m / (MB).$$

χρόνου στην περίπτωση αυτή, δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{R}_t = \Sigma_t(u) \cdot n \cdot u \quad (1.33)$$

ενώ το μερικό πλήθος των πυρηνικών αντιδράσεων ανά μονάδα όγκου και χρόνου, τύπου-ν, δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{R}_v = \Sigma_v(u) \cdot n \cdot u \quad (1.34)$$

Το πηλίκο:

$$p_v = \frac{\dot{R}_v}{\dot{R}_t} = \frac{\Sigma_v(u)}{\Sigma_t(u)} = \frac{\sigma_v(u)}{\sigma_t(u)} \quad (1.35)$$

εκφράζει την πιθανότητα, αν πραγματοποιηθεί πυρηνική αντίδραση με σωματίδια ταχύτητας υ με τους δεδομένους πυρήνες-στόχους, αυτή να είναι τύπου-ν.

Αν το υλικό το οποίο βομβαρδίζεται με σωματίδια ταχύτητας-υ είναι χημική ένωση ή, γενικότερα μείγμα ατόμων με κατ' άτομο σύσταση  $N_i$  (πυρήνες είδους- $i$  ανά  $\text{cm}^3$ ), και με κάθε είδος πυρήνων  $i$ , πραγματοποιείται πυρηνική αντίδραση ορισμένου τύπου χαρακτηριζόμενη με μικροσκοπική ενεργό διατομή  $\sigma_i(u)$ , τότε η ολική μακροσκοπική ενεργός διατομή του μείγματος για την αντίδραση αυτή είναι:

$$\begin{aligned} \Sigma_\mu(u) &= N_t \cdot \sigma_\mu(u) = N_1 \cdot \sigma_1(u) + N_2 \cdot \sigma_2(u) + \dots = \\ &= \Sigma_1(u) + \Sigma_2(u) + \dots \end{aligned} \quad (1.36)$$

όπου:

$$\sigma_\mu(u) = \frac{N_1}{N_t} \cdot \sigma_1(u) + \frac{N_2}{N_t} \cdot \sigma_2(u) + \dots \quad (1.37)$$

η ολική μικροσκοπική ενεργός διατομή του μείγματος, και

$$N_t = N_1 + N_2 + \dots \quad (1.38)$$

η ολική πυκνότητα πυρήνων (πυρήνες/ $\text{cm}^3$ ).

Στην περίπτωση π.χ. της χημικής ενώσεως  $X_\kappa Y_\lambda$  θα έχουμε:

$$\Sigma_\mu(u) = \Sigma_X(u) + \Sigma_Y(u) \quad (1.39)$$

ή,

$$N_\mu \cdot \sigma_\mu(u) = N_X \cdot \sigma_X(u) + N_Y \cdot \sigma_Y(u) \quad (1.40)$$

όπου  $N_\mu$  το πλήθος των μορίων ανά μονάδα όγκου, και  $N_X$ ,  $N_Y$  αντιστοίχως τα πλήθη των ατόμων είδους  $X$  και  $Y$  ανά μονάδα όγκου. Είναι όμως  $N_X = \kappa \cdot N_\mu$  και  $N_Y = \lambda \cdot N_\mu$ , οπότε η σχέση (1.37) δίνει:

$$\sigma_\mu(u) = \kappa \cdot \sigma_X(u) + \lambda \cdot \sigma_Y(u) \quad (1.41)$$

Το αντίστροφο της μακροσκοπικής ενεργού διατομής μέγεθος,

$$\lambda = 1/\Sigma \quad (\text{cm}) \quad (1.42)$$

είναι γνωστό ως μέση ελευθέρα διαδρομή.

## 1.8 ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΜΕ ΝΕΤΡΟΝΙΑ

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η μικροσκοπική ενεργός διατομή πυρηνικής αντιδράσεως σωματιδίου με ορισμένο πυρήνα εξαρτάται από την ενέργεια του σωματιδίου. Παράλληλα, μπορεί κανείς να πει ότι από την ενέργεια του σωματιδίου εξαρτάται, ή καθορίζεται με κάποια πιθανότητα, το είδος της πυρηνικής αντιδράσεως που θα πραγματοποιηθεί με ορισμένο πυρήνα, και τούτο γιατί, αν μπορούν να πραγματοποιηθούν περισσότερες από μία πυρηνικές αντιδράσεις για κάποια τιμή της ενέργειας του σωματιδίου, είναι πιθανότερο να

πραγματοποιηθεί εκείνη, για την οποία η αντίστοιχη μικροσκοπική ενεργός διατομή παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή από τις άλλες βλ. σχέση (1.35).

Στην περίπτωση που τα σωματίδια-βλήματα είναι νετρόνια, έχει παρατηρηθεί ότι για αρκετά μεγάλου εύρους περιοχές ενέργειας των νετρονίων, τα χαρακτηριστικά των μηχανισμών αλληλεπιδράσεως με ορισμένου είδους πυρήνες δεν μεταβάλλονται. Γι' αυτό, το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων διαχωρίζεται, πολλές φορές, σε τέσσερις χονδρικά περιοχές και τα νετρόνια με ενέργεια που εμπίπτει μέσα σ' αυτές, χαρακτηρίζονται αντιστοίχως ως:

- (α) Θερμικά νετρόνια ( $E: 0 \leq E < 0,4 \text{ eV}$ )
- (β) Επιθερμικά νετρόνια ( $E: 0,4 \text{ eV} < E < 1 \text{ keV}$ )
- (γ) Ενδιάμεσης ενέργειας ( $E: 1 \text{ keV} < E < 500 \text{ keV}$ )
- (δ) Ταχεία νετρόνια ( $E: 0,5 \text{ MeV} < E < 18 \text{ MeV}$ ).

Οι δυνατές πυρηνικές αντιδράσεις περιγράφονται στη συνέχεια.

### **1.8.1 Ελαστική σκέδαση νετρονίου-πυρήνα, (n, n)**

Ως ελαστική σκέδαση νετρονίου με πυρήνα χαρακτηρίζεται η πυρηνική αντίδραση κατά την οποία διατηρούνται η κινητική ενέργεια και η ορμή του συστήματος νετρονίου-πυρήνα. Η πυρηνική αυτή αντίδραση μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά δύο τρόπους (δύο μηχανισμούς), είτε με σχηματισμό σύνθετου πυρήνα, οπότε η σκέδαση χαρακτηρίζεται ως σύνθετη ελαστική σκέδαση ή εκλεκτική ελαστική σκέδαση, είτε χωρίς σχηματισμό σύνθετου πυρήνα, οπότε χαρακτηρίζεται ως δυναμική ελαστική σκέδαση.

Κατά την σύνθετη ή εκλεκτική ελαστική σκέδαση θεωρούμε ότι το νετρόνιο απορροφάται από τον πυρήνα, οπότε δημιουργείται προσωρινά ένας νέος πυρήνας (ισοτοπικός του αρχικού) σε κατάσταση διεγέρσεως. Ο νέος αυτός πυρήνας αποδιεγυρόμενος εκπέμπει ένα νετρόνιο, μεταβαίνοντας έτσι στην αρχική του (μη διεγερμένη) κατάσταση.

Κατά την δυναμική ελαστική σκέδαση θεωρούμε ότι το νετρόνιο προσεγγίζει τον πυρήνα, δεν εισέρχεται σ' αυτόν, ώστε να σχηματισθεί σύνθετος πυρήνας, αλλά πραγματοποιείται ένα είδος ελαστικής κρούσεως, όπως στην περίπτωση δύο σφαιρών μπιλιάρδου.

Την ελαστική σκέδαση νετρονίου με <<ελεύθερο>> πυρήνα μπορούμε να την μελετήσουμε σαν ελαστική σύγκρουση δύο μικρών σφαιρών, εφαρμόζοντας τις αρχές διατηρήσεως ορμής και ενέργειας σε δύο συστήματα αναφοράς, το σύστημα εργαστηρίου (σύστημα-L) και το σύστημα κέντρου μάζας (σύστημα-C), βλ. Σχήμα 1.8.

Μερικές χρήσιμες σχέσεις που προκύπτουν από αυτήν την μελέτη είναι οι ακόλουθες:  
Συσχέτιση κινητικών ενεργειών του νετρονίου πριν και μετά την σκέδαση:

$$\frac{E'_L}{E_L} = \frac{A^2 + 2 \cdot A \cdot \cos \theta + 1}{(1 + A)^2} \quad (1.43)$$

όπου:  $E_L$  η κινητική ενέργεια του νετρονίου πριν από την σκέδαση στο σύστημα εργαστηρίου,

$E'_L$  η κινητική ενέργεια του νετρονίου μετά την σκέδαση στο σύστημα εργαστηρίου,

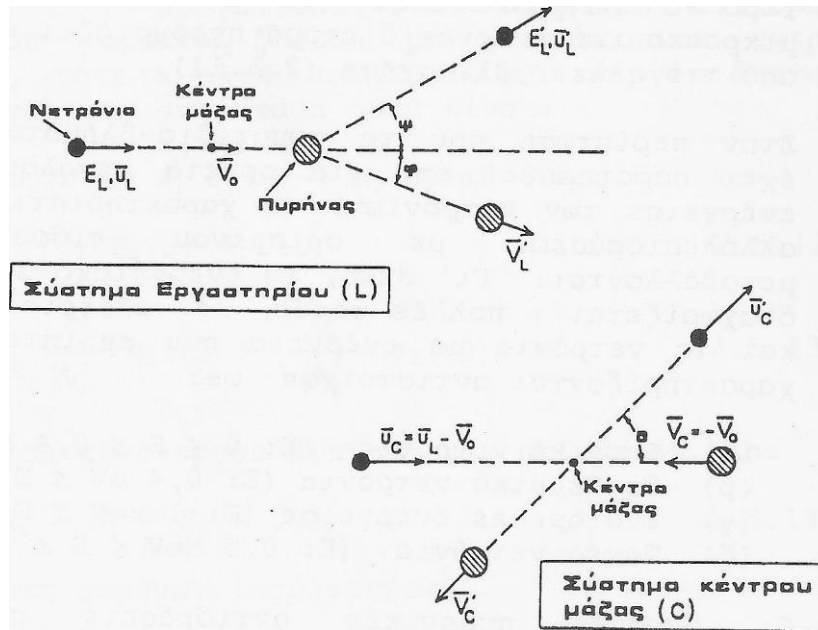
$A$  ο μαζικός αριθμός του πυρήνα-στόχου, και

$\theta$  η γωνία σκεδάσεως του νετρονίου στο σύστημα κέντρου μάζας.

Ελάχιστη ενέργεια νετρονίου μετά την σκέδαση:

Από την σχέση (1.43) προκύπτει για  $\theta = \pi$  :

$$E'_{L,\min} = E_L \cdot \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2} \quad (1.44)$$



Σχήμα 1.8 Για την μελέτη της ελαστικής σκεδάσεως.

Συσχέτιση γωνιών στα δύο συστήματα:

$$\tan \psi = \frac{\sin \theta}{\frac{1}{A} + \cos \theta} \quad (1.45)$$

ή,

$$\cos \psi = \frac{1 + A \cdot \cos \theta}{\sqrt{A^2 + 2A \cdot \cos \theta + 1}} \quad (1.46)$$

όπου  $\psi$  η γωνία σκεδάσεως του νετρονίου στο σύστημα-L.

Παρατηρούμε από την σχέση (1.45) ότι όσο βαρύτερος είναι ο πυρήνας ( $A \gg 1$ ) τόσο μικρότερη διαφορά υπάρχει μεταξύ των γωνιών σκεδάσεως  $\psi$  και  $\theta$ .

Η κατά μέσον όρο ενέργεια νετρονίου μετά την σκέδαση:

$$\bar{E}'_L = \frac{E_L}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2} \right] \quad (1.47)$$

Σχέση μεταξύ των ολικών κινητικών ενεργειών του συστήματος πριν από την σκέδαση στα δύο συστήματα:

$$E_C = \frac{A}{A+1} \cdot E_L \quad (1.48)$$

όπου  $E_C$  η ολική κινητική ενέργεια νετρονίου και πυρήνα πριν από την σκέδαση στο σύστημα-C.

Η μέση τιμή  $\mu$  του συνημιτόνου της γωνίας σκεδάσεως  $\psi$ :

$$\bar{\mu} = \overline{\cos \psi} = \frac{2}{3A} \quad (1.49)$$

Η μέση λογαριθμική μείωση της ενέργειας των νετρονίων ( $\xi$ ):

$$\xi = 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \cdot \ln \left( \frac{A+1}{A-1} \right) \quad (1.50)$$

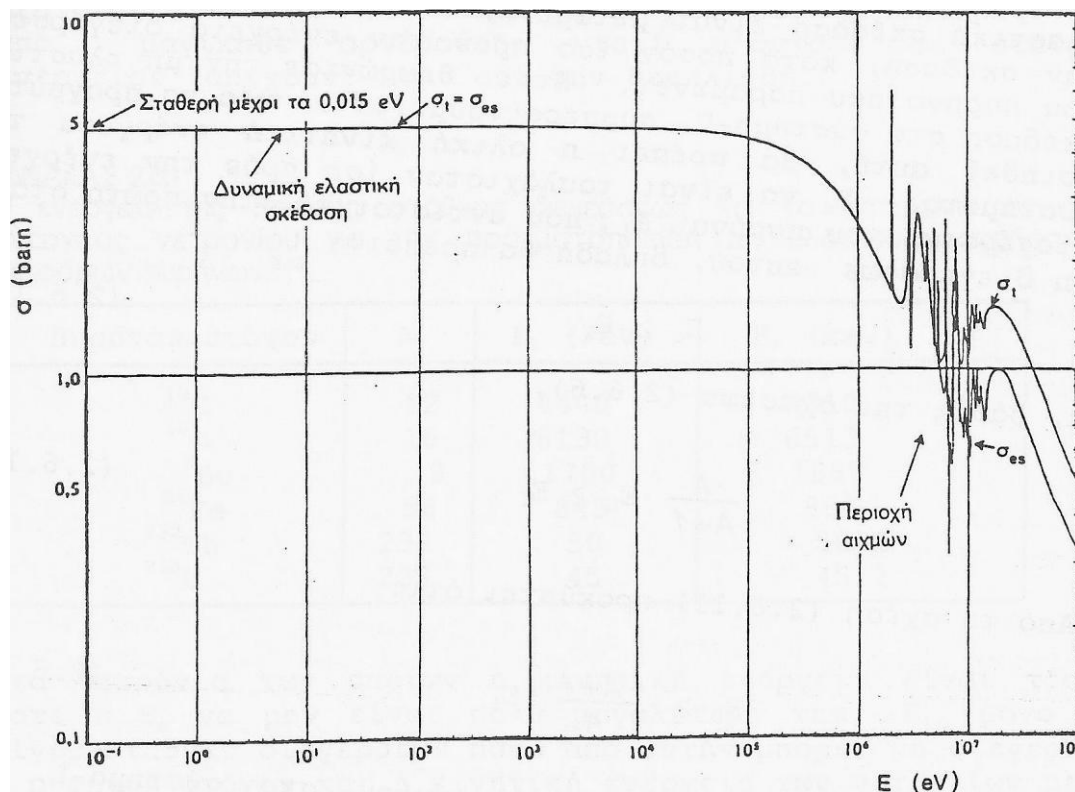
Η μικροσκοπική ενεργός διατομή ελαστικής σκεδάσεως ( $\sigma_{es}$ ) για χαμηλής ενέργειας νετρόνια έχει κατά προσέγγιση σταθερή τιμή. Η ελαστική σκέδαση στην περιοχή αυτή πραγματοποιείται ως επί το πλείστον με τον μηχανισμό της δυναμικής ελαστικής σκεδάσεως και η  $\sigma_{es}$  δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_{es} = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \quad (1.51)$$



όπου R η ακτίνα του πυρήνα.

Μετά την περιοχή αυτή των ενεργειών, η  $\sigma_{es}$  παρουσιάζει αιχμές εκλεκτικότητας, που οφείλονται στον σχηματισμό σύνθετου πυρήνα, και τέλος, για ταχέα νετρόνια, η  $\sigma_{es}$  μειώνεται ομαλά αυξανόμενης της ενέργειας των νετρονίων. Στο Σχήμα 1.9 απεικονίζεται γραφικά η μεταβολή της  $\sigma_{es}$  συναρτήσει της ενέργειας των νετρονίων για  $^{12}\text{C}$ . Για βαρύτερους πυρήνες, η περιοχή όπου η  $\sigma_{es}$  εμφανίζει αιχμές παρατηρείται σε χαμηλότερες ενέργειες. Για το  $^{238}\text{U}$  π.χ., η περιοχή των αιχμών παρατηρείται για ενέργειες μεταξύ 6 eV και  $\sim 1$  keV.



**Σχήμα 1.9** Η μικροσκοπική ενεργός διατομή ελαστικής σκέδασης ( $\sigma_{es}$ ) και η ολική μικροσκοπική ενεργός διατομή ( $\sigma_t$ ), για τον  $^{12}\text{C}$ .

Κατά την σχέση (1.49), όσο πιο μεγάλος είναι ο μαζικός αριθμός του πυρήνα με τον οποίο σκεδάζεται ελαστικά ένα νετρόνιο, τόσο πιο μικρή είναι η μέση τιμή του συνημίτονου της γωνίας σκέδασης στο σύστημα-L. Αυτό όμως σημαίνει ότι με τόσο μεγαλύτερη προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί η ελαστική σκέδαση σφαιρικά συμμετρική στο σύστημα-L. Όταν λοιπόν οι πυρήνες δεν είναι πολύ ελαφροί, η ελαστική σκέδαση μπορεί να θεωρηθεί με ικανοποιητική προσέγγιση σφαιρικά συμμετρική ως προς επίγειο σύστημα αξόνων. Η ιδιότητα αυτή είναι επιθυμητή από άποψη εξασθένισης δέσμης νετρονίων, γιατί έτσι προκαλείται συμμετρική διασκόρπιση των νετρονίων, πράγμα που έχει ως συνέπεια περιπλάνηση μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας αυτών μέσα στο υλικό και, επομένως, μεγαλύτερη πιθανότητα απορροφήσεώς τους από τους πυρήνες του, δεδομένου ότι είναι τώρα αυξημένη η συνολική διαδρομή και μεγαλύτερη η συνολική μείωση της ενέργειάς τους. Όπως αναφέρεται στην παράγραφο 1.8.3, τα μικρής ενέργειας νετρόνια (θερμικά) πραγματοποιούν ως επί το πλείστον πυρηνικές αντιδράσεις απορροφήσεως.

### 1.8.2 Μη ελαστική σκέδαση νετρονίου-πυρήνα, ( $n, n'$ )

Ως μη ελαστική σκέδαση νετρονίου-πυρήνα χαρακτηρίζεται η πυρηνική αντίδραση κατά την

οποία το νετρόνιο ενσωματώνεται στον πυρήνα, ο σύνθετος πυρήνας αποδιεγείρεται μερικά με εκπομπή νετρονίου και ο πυρήνας που απομένει βρίσκεται ακόμα σε κατάσταση διεγέρσεως. Ο διεγερμένος αυτός πυρήνας αποδιεγείρεται στη συνέχεια με εκπομπή ενός ή περισσότερων φωτονίων. Η αποδιέγερση αυτή πραγματοποιείται σχεδόν αμέσως μετά την εκπομπή του νετρονίου από τον σύνθετο πυρήνα. Επειδή κατά την μη ελαστική σκέδαση μεσολαβεί σύνθετος πυρήνας, η αντίδραση είναι γνωστή και ως σύνθετη μη ελαστική σκέδαση.

Η ολική κινητική ενέργεια νετρονίου και πυρήνα μετά την μη ελαστική σκέδαση είναι μειωμένη, σε σχέση με την πριν από την σκέδαση, κατά ποσόν ίσο προς την ενέργεια διεγέρσεως του πυρήνα που παραμένει. Έτσι, θεωρώντας την μη ελαστική σκέδαση στο σύστημα-C, συμπεραίνουμε ότι, για να πραγματοποιηθεί αυτή, θα πρέπει η ολική κινητική ενέργεια του συστήματος  $E_C$  να είναι τουλάχιστον ίση προς την ενέργεια διεγέρσεως του πυρήνα,  $E_1$ , που αντιστοιχεί στην πρώτη στάθμη διεγέρσεως αυτού, δηλαδή θα πρέπει:

$$E_C \geq E_1 \quad (1.52)$$

ή, βάσει της σχέσεως (1.48),

$$\frac{A}{A+1} \cdot E_L \geq E_1 \quad (1.53)$$

Από τη σχέση (1.53) προκύπτει ότι:

$$E_L \geq \frac{A+1}{A} \cdot E_1 \quad (1.54)$$

Η κινητική ενέργεια του νετρονίου στο σύστημα-L, που ορίζεται από την σχέση:

$$(E_L)_{\min} = \frac{A+1}{A} \cdot E_1 \equiv E_t \quad (1.55)$$

είναι γνωστή ως κατώφλιο κινητικής ενέργειας νετρονίου για την πραγματοποίηση μη ελαστικής σκεδάσεως.

Ωστε λοιπόν μπορούμε να διατυπώσουμε και την εξής <<πρόταση-συνθήκη>>, βάσει των σχέσεων (1.54) και (1.55),

<<για να πραγματοποιηθεί μη ελαστική σκέδαση, θα πρέπει η κινητική ενέργεια του νετρονίου στο σύστημα-L να είναι μεγαλύτερη ή ίση του αντιστοίχου κατωφλίου κινητικής ενέργειας>>.

Η μη ελαστική σκέδαση, ενδιαφέρει από άποψη <<εξασθενήσεως>> νετρονίων, γιατί συμβάλλει αποτελεσματικά στην μείωση της ενέργειας των ταχέων νετρονίων, μέχρι τιμής μικρότερης από εκείνη του κατωφλίου κινητικής ενέργειας μη ελαστικής σκεδάσεως των πυρήνων-στόχων.

Στον Πίνακα 1.4 αναφέρονται οι τιμές κατωφλίου κινητικής ενέργειας για διάφορους πυρήνες. Παρατηρούμε ότι, όσο βαρύτερος είναι ο πυρήνας-στόχος, τόσο η  $E_t$  είναι μικρότερη και, επομένως, τόσο αξιολογότερη θα είναι η μη ελαστική σκέδαση για την επιβράδυνση ταχέων νετρονίων. Εξαιρεση αποτελούν οι πυρήνες-στόχοι που χαρακτηρίζονται από μαγικούς αριθμούς, γιατί σ' αυτούς οι στάθμες ενέργειας <<απέχουν>> πολύ από την θεμελιώδη.

Για νετρόνια των οποίων η κινητική ενέργεια είναι τόση, ώστε η  $E_c$  να μην είναι πολύ μεγαλύτερη της  $E_1$ , μόνο σε λίγες στάθμες διεγέρσεως πάνω από αυτήν μπορεί να διεγερθεί ο πυρήνας-στόχος και η κινητική ενέργεια των νετρονίων μετά την μη ελαστική σκέδαση εμφανίζει <<γραμμικό φάσμα>>. Εμφανίζονται δηλαδή ομάδες νετρονίων με διακεκριμένες τιμές ενέργειας, καθεμιά από τις οποίες αντιστοιχεί σε διέγερση μιας από τις στάθμες του πυρήνα-στόχου.

Για νετρόνια όμως των οποίων η κινητική ενέργεια είναι πολύ μεγάλη, ώστε να είναι δυνατή η διέγερση πολλών σταθμών ενέργειας του πυρήνα-στόχου, το αντίστοιχο φάσμα ενέργειας των μη ελαστικά σκεδαζομένων νετρονίων, εμφανίζει μια συνεχή συνιστώσα πέρα από την γραμμική

συνιστώσα. Στην περίπτωση του συνεχούς μέρους του ενεργειακού φάσματος, η πιθανότητα  $P(E, E') \cdot dE'$  ένα νετρόνιο αρχικής ενέργειας  $E$  να εμφανιστεί μετά την μη ελαστική σκέδαση με ενέργεια μεταξύ  $E'$  και  $E'+dE'$ , δίνεται κατά το <<πυρηνικό υπόδειγμα σταγόνας υγρού>> από την σχέση:

$$P(E, E') = \frac{E'}{T_\pi^2} \cdot e^{-E'/T_\pi} \quad (1.56)$$

Το μέγεθος  $T_\pi$  είναι γνωστό ως πυρηνική θερμοκρασία και δίνεται προσεγγιστικά από την σχέση:

$$T_\pi = 3,2 \cdot \sqrt{\frac{E}{A}} \quad (1.57)$$

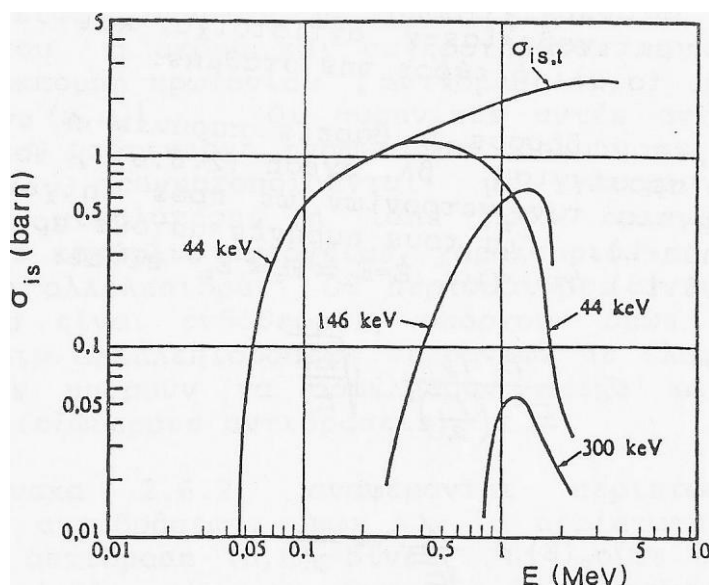
όπου τα μεγέθη  $T_\pi$  και  $E$  εκφράζονται σε MeV, ( $A$  είναι ο μαζικός αριθμός του πυρήνα-στόχου).

Το φάσμα των νετρονίων που καθορίζεται με την σχέση (1.56) παρουσιάζει μέγιστο για  $E'=T_\pi$ , δηλαδή η πυρηνική θερμοκρασία είναι η πιθανότερη ενέργεια του φάσματος.

**Πίνακας 1.4** Η ενέργεια της πρώτης στάθμης διεγέρσεως και το κατώφλιο κινητικής ενέργειας νετρονίου για την πραγματοποίηση μη ελαστικής σκεδάσεως, διαφόρων πυρήνων.

Πυρήνας-στόχος	A	$E_1$ (keV)	$E_t$ (keV)
$^{12}\text{C}$	12	4440	4810
$^{16}\text{O}$	16	6130	6513
$^9\text{Be}$	9	1700	1889
$^{56}\text{Fe}$	56	845	860
$^{232}\text{Th}$	232	50	50, 2
$^{238}\text{U}$	238	45	45, 2

Για ορισμένο είδος πυρήνων, η μικροσκοπική ενεργός διατομή μη ελαστικής σκεδάσεως ( $\sigma_{is}$ ) είναι μηδενική για κινητικές ενέργειες νετρονίων μέχρι το αντίστοιχο κατώφλιο. Με την αύξηση της κινητικής ενέργειας των νετρονίων πέρα από το κατώφλιο κινητικής ενέργειας μη ελαστικής σκεδάσεως, η  $\sigma_{is}$  αυξάνει, φθάνει κάποια μέγιστη τιμή, ή εμφανίζει αιχμές εκλεκτικότητας χαρακτηριστικές των σταθμών ενέργειας των πυρήνων και, για πιο μεγάλες τιμές κινητικής ενέργειας, παρουσιάζει έντονη μείωση. Στο Σχήμα 1.10, δίνεται η  $\sigma_{is}$  για το  $^{238}\text{U}$ .



**Σχήμα 1.10** Η συνάρτηση  $\sigma_{is}(E)$  για τον πυρήνα  $^{238}\text{U}$ .

Η σημασία της μη ελαστικής σκεδάσεως για την εξασθένηση δέσμης νετρονίων βασίζεται στην αποτελεσματική συμβολή της, στην επιβράδυνση των ταχέων νετρονίων και μάλιστα στην περιοχή κινητικής ενέργειας αυτών, όπου ο άλλος μηχανισμός επιβραδύνσεως, η ελαστική σκέδαση, είναι όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.8.1, πολύ περιορισμένης αποτελεσματικότητας. Το σοβαρό μειονέκτημα της μη ελαστικής σκεδάσεως είναι το γεγονός ότι αυτή συνοδεύεται από εκπομπή φωτονίων και μάλιστα αξιόλογης ενέργειας, ειδικά στην περίπτωση ελαφρών πυρήνων (βλ. τιμές ενέργειας  $E_1$  στον Πίνακα 1.4), των οποίων η παρουσία είναι επιθυμητή για την δραστική επιβράδυνση ταχέων νετρονίων μέχρι πολύ χαμηλές τιμές ενέργειας με τις ελαστικές σκεδάσεις.

### 1.8.3 Ραδιενεργή ενσωμάτωση, (n, γ)

Αν ο σύνθετος πυρήνας που δημιουργείται κατά την ενσωμάτωση νετρονίου, αποδιεγερθεί με εκπομπή ενός ή περισσοτέρων φωτονίων χωρίς εκπομπή σωματιδίου, τότε η πυρηνική αντίδραση χαρακτηρίζεται ως ραδιενεργή ενσωμάτωση. Η αντίδραση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με νετρόνια οποιασδήποτε ενέργειας, παρουσιάζει όμως μεγάλη πιθανότητα πραγματοποίησεως, όταν τα νετρόνια είναι χαμηλής κινητικής ενέργειας, μικρότερης από 1 keV περίπου.

Η μικροσκοπική ενεργός διατομή για την ραδιενεργή ενσωμάτωση,  $\sigma_c$ , έχει βρεθεί από τους Breit και Wigner ότι εξαρτάται από την ενέργεια  $E_c$  που προσδίνεται από την κινητική ενέργεια στο σύστημα-C νετρονίου-πυρήνα, για την διέγερση του σύνθετου πυρήνα, στην περιοχή μεμονωμένης αιχμής εκλεκτικής ενσωματώσεως. Αυτή δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_c(E_c) = \sigma_0 \cdot \frac{\Gamma_n \cdot \Gamma_\gamma}{(E_c - E_r)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{E_r}{E_c}} \quad (1.58)$$

όπου:  $\sigma_0$  σταθερά,

$E_r$ , η τιμή της  $E_c$  για την οποία ο σύνθετος πυρήνας φέρεται, ακριβώς στη στάθμη ενέργειας που χαρακτηρίζει την αιχμή εκλεκτικότητας,

$\Gamma_n, \Gamma_\gamma$  τα μερικά εύρη της εν λόγω ενεργειακής στάθμης για αποβολή νετρονίου ή εκπομπή ακτινοβολίας-γ αντίστοιχα, και

$\Gamma = \Gamma_n + \Gamma_\gamma$ , το ολικό εύρος της στάθμης.

Για πυρήνες μέσου βάρους ή βαρείς πυρήνες η ενέργεια  $E_c$  είναι με καλή προσέγγιση, βλ. σχέση (1.48), ίση προς την κινητική ενέργεια των νετρονίων ως προς επίγειο σύστημα αξόνων (σύστημα-L). Για τους πυρήνες αυτούς προκύπτει από την σχέση (1.58) ότι για  $E = E_L \cong E_c \ll E_r$  είναι:

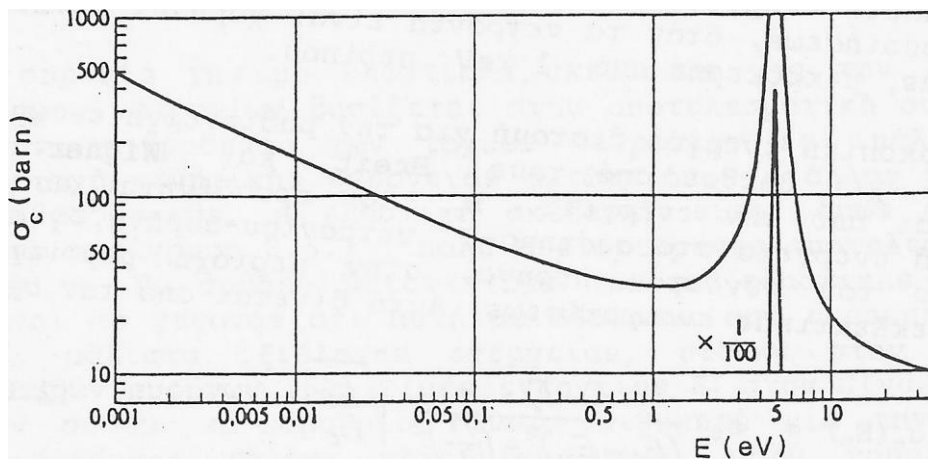
$$\sigma_c(E) = \sigma_0 \cdot \frac{\Gamma_n \cdot \Gamma_\gamma}{E_r^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{E_r}{E}} \quad (1.59)$$

ή,

$$\sigma_c(E) \sim \frac{1}{\sqrt{E}} \sim \frac{1}{u} \quad (1.60)$$

ότι δηλαδή η  $\sigma_c$ , για τιμές κινητικής ενέργειας των νετρονίων μικρότερες από εκείνη που αντιστοιχεί στην μεμονωμένη αιχμή εκλεκτικότητας, μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα της ταχύτητας  $u$  των νετρονίων.

Για ενέργειες  $E: E \gg E_T$  βρίσκεται ότι η  $\sigma_c$ , με την αύξηση της ενέργειας, ελαττώνεται γρήγορα κατά τον νόμο  $1/E$  ή και γρηγορότερα (π.χ. για το  $^{238}\text{U}$  είναι  $\sigma_c \sim 1/E^{1,1}$  μέχρι και  $1/E^{1,6}$ ). Τα συμπεράσματα αυτά φαίνονται και στο Σχήμα 1.11 για τον πυρήνα  $^{197}\text{Au}$  και για νετρόνια χαμηλής σχετικά ενέργειας.



**Σχήμα 1.11** Η μικροσκοπική ενεργός διατομή ραδιενεργού ενσωματώσεως για την πρώτη αιχμή εκλεκτικότητας του  $^{197}\text{Au}$ .

#### 1.8.4 Πυρηνικές αντιδράσεις τύπου (n, p) και (n, α)

Όταν η κινητική ενέργεια του νετρονίου που αλληλεπιδρά με ένα πυρήνα είναι αρκετά μεγάλη, ο δημιουργούμενος σύνθετος πυρήνας είναι δυνατόν να αποδιεγερθεί με εκπομπή ενός νουκλεονίου ή ακόμα και συγκροτήματος νουκλεονίων, όπως π.χ. με εκπομπή πρωτονίου [αντίδραση (n, p)] ή σωματιδίου-α [αντίδραση (n, α)]. Οι πυρηνικές αυτές αντιδράσεις, που όπως και η ραδιενεργή ενσωμάτωση οδηγούν σε εξαφάνιση του νετρονίου, πραγματοποιούνται με νετρόνια κινητικής ενέργειας μεγαλύτερης ή ίσης προς ορισμένη τιμή, το αντίστοιχο κατώφλιο ενέργειας, χαρακτηριστικό του πυρήνα με τον οποίο αλληλεπιδρά. Οι περισσότερες αντιδράσεις αυτού του τύπου είναι ενδόθερμες, υπάρχουν όμως και ορισμένες περιπτώσεις αλληλεπιδράσεως νετρονίων με ελαφρούς πυρήνες, οι οποίες μπορούν να προκληθούν ακόμα και με θερμικά νετρόνια (εξώθερμες αντιδράσεις).

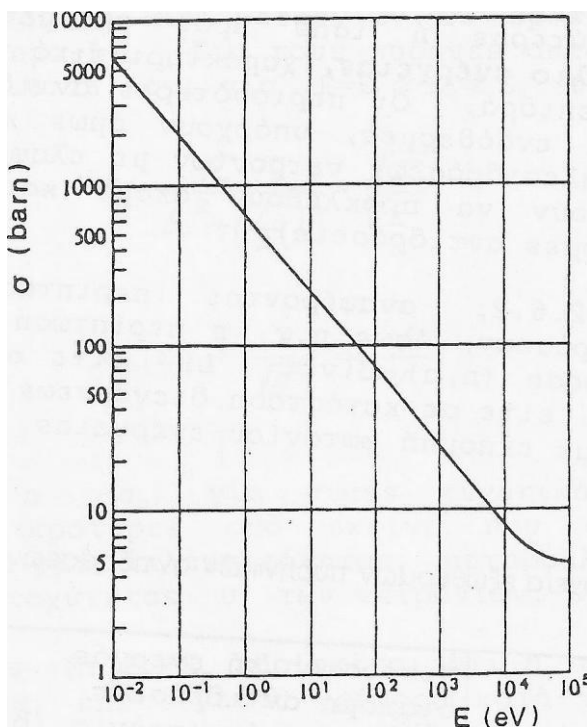
Στον Πίνακα 1.5, αναφέρονται περιπτώσεις τέτοιων εξώθερμων αντιδράσεων, όπως π.χ. η περίπτωση του  $^{10}\text{B}$  το οποίο με αντίδραση (n, α) δίνει  $^7\text{Li}$  είτε στην θεμελιώδη κατάσταση (~7%) είτε σε κατάσταση διεγέρσεως (~93%), οπότε αποδιεγείρεται με εκπομπή φωτονίου ενέργειας 0,48 MeV.

Το γεγονός, ότι οι αντιδράσεις εκπομπής φορτισμένων σωματιδίων οδηγούν σε απορρόφηση νετρονίου χωρίς εκπομπή ακτινοβολίας-γ, ή με εκπομπή φωτονίων μικρής ενέργειας, είναι φανεράς σημασίας για την εξασθένιση δέσμης νετρονίων.

Έτσι, η προσθήκη πυρήνων  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$ , και  $^{14}\text{N}$  στο υλικό θωρακίσεως που προορίζεται για την εξασθένιση νετρονίων είναι επιθυμητή, ιδιαίτερα μάλιστα για τους δύο πρώτους πυρήνες που παρουσιάζουν μεγάλη μικροσκοπική ενεργό διατομή αντιδράσεως του τύπου (n, α) για θερμικά νετρόνια (βλ. Πίνακα 1.5 και Σχήμα 1.12).

**Πίνακας 1.5** Χαρακτηριστικά στοιχεία εξωθέρμων πυρηνικών αντιδράσεων του τύπου (n, p) και (n, α).

Πυρήνας-στόχος	Πυρηνική αντίδραση	Μικροσκοπική ενεργός διατομή αντιδράσεως για θερμικά νετρόνια (b)		Εκλυόμενη ενέργεια (MeV)
		Στοιχείου	Ισοτόπου	
${}^6\text{Li}$	${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$	70	930	4,78
${}^{10}\text{B}$	${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$	50	266	2,78
${}^{10}\text{B}$	${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li} + \gamma(480 \text{ keV})$	700	3720	2,78
${}^{14}\text{N}$	${}^{14}\text{N}(n, p){}^{14}\text{C}$	1,68	1,68	0,624
${}^{14}\text{N}$	${}^{14}\text{N}(n, \gamma){}^{15}\text{N}$	0,10	0,10	10,8



**Σχήμα 1.12** Η μικροσκοπική ενεργός διατομή για την πυρηνική αντίδραση  ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$  με νετρόνια κινητικής ενέργειας στην περιοχή 0,01 eV έως 10 eV.

### 1.8.5 Πυρηνικές αντιδράσεις τύπου (n, 2n) και (n, 3n)

Για νετρόνια πολύ μεγάλης ενέργειας είναι δυνατή η πραγματοποίηση πυρηνικών αντιδράσεων που οδηγούν σε εκπομπή δύο (n, 2n) ή και τριών (n, 3n) νετρονίων.

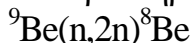
Η πυρηνική αντίδραση (n, 2n) πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Κατά το πρώτο πραγματοποιείται μη ελαστική σκέδαση του νετρονίου-βλήματος, ενώ κατά το δεύτερο ο πυρήνας που απομένει σε κατάσταση διεγέρσεως αποδιεγείρεται με εκπομπή ενός ακόμα νετρονίου. Αυτό βέβαια συμβαίνει, όταν το νετρόνιο-βλήμα έχει κινητική ενέργεια τόσο, ώστε να

αφήσει τον παραμένοντα πυρήνα (μετά την μη ελαστική σκέδασή του κατάσταση διεγέρσεως που να αντιστοιχεί σε ενέργεια διεγέρσεως μεγαλύτερη από την ενέργεια συνδέσεως του ασθενέστερα συνδεδεμένου με τον πυρήνα νετρονίου. Έτσι, αν όλη η ενέργεια διεγέρσεως συγκεντρωθεί στο νετρόνιο αυτό, μπορεί τούτο να εγκαταλείψει τον πυρήνα. Ωστε λοιπόν, για να πραγματοποιηθεί η πυρηνική αντίδραση  $(n, 2n)$  με ορισμένο είδος πυρήνων, θα πρέπει το νετρόνιο-βλήμα να έχει κινητική ενέργεια μεγαλύτερη ή τουλάχιστον ίση προς ορισμένο κατώφλιο  $E_t$ , που στο σύστημα-L δίνεται [βλ. και σχέση (1.55)] από την σχέση:

$$E_t = \frac{A+1}{A} \cdot Q \quad (1.61)$$

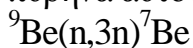
όπου  $Q \ll$  <το μέγεθος  $Q$ >> της αντιδράσεως  $(n, 2n)$ , (βλ. παράγραφο 1.6).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας τέτοιας πυρηνικής αντιδράσεως είναι η αντίδραση:



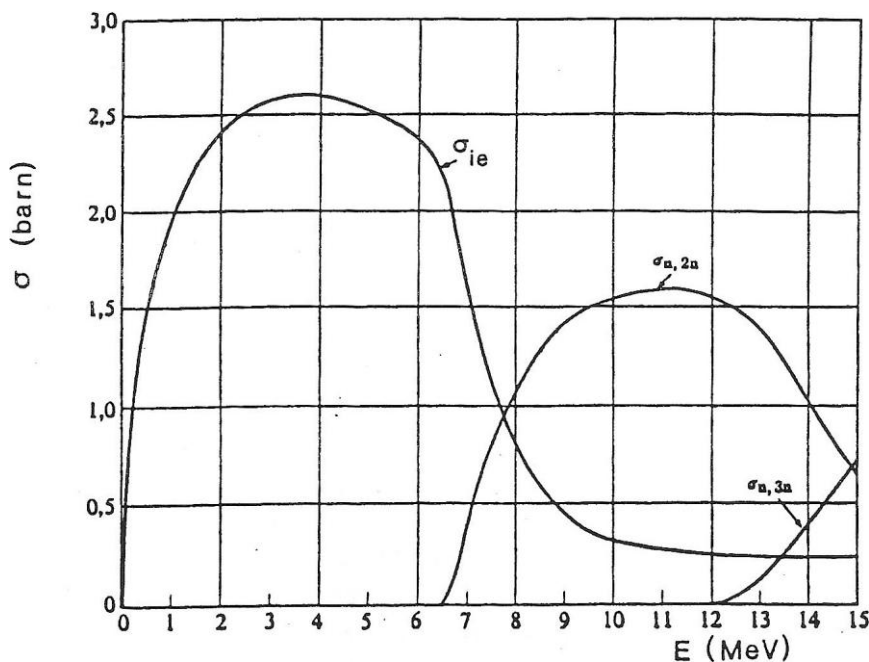
για την οποία το κατώφλιο κινητικής ενέργειας του νετρονίου-βλήματος είναι μόνο 1,8 MeV.

Η πυρηνική αντίδραση  $(n, 3n)$  πραγματοποιείται σε τρία στάδια. Τα δύο πρώτα είναι αυτά που αναφέρθηκαν για την πυρηνική αντίδραση  $(n, 2n)$ , ενώ το τρίτο στάδιο είναι εκείνο κατά το οποίο εκπέμπεται ένα τρίτο νετρόνιο, εφόσον μετά το δεύτερο στάδιο ο πυρήνας βρίσκεται σε κατάσταση διεγέρσεως τόση, ώστε να είναι δυνατή η αποδιέγερσή του με εκπομπή νετρονίου. Το κατώφλιο κινητικής ενέργειας του νετρονίου-βλήματος για την πυρηνική αντίδραση  $(n, 3n)$  με ορισμένο πυρήνα είναι αρκετά μεγαλύτερο από ότι για την πυρηνική αντίδραση  $(n, 2n)$  με τον πυρήνα αυτόν. Για την αντίδραση:



είναι:  $E_t = 21$  MeV.

Στο Σχήμα 1.13 δίνεται η μεταβολή των μικροσκοπικών ενεργών διατομών για μη ελαστική σκέδαση ( $\sigma_{ie}$ ), αντίδραση  $(n, 2n)$ , και αντίδραση  $(n, 3n)$  συναρτήσει της κινητικής ενέργειας του νετρονίου-βλήματος για τον πυρήνα  ${}^{238}\text{U}$ .



**Σχήμα 1.13** Οι μικροσκοπικές ενεργοί διατομές  $\sigma_{ie}$ ,  $\sigma_{n,2n}$ , και  $\sigma_{n,3n}$  συναρτήσει της ενέργειας του νετρονίου-βλήματος για τον πυρήνα  ${}^{238}\text{U}$ .

### **1.8.6 Σχάση βαρέως πυρήνα με νετρόνια**

Η σχάση βαρέως πυρήνα, δηλαδή ο τεμαχισμός του πυρήνα σε δύο ελαφρότερους πυρήνες, είναι φαινόμενο το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτόματα ή να προκληθεί με ενέργεια εξωτερικά προσδιδόμενη στον πυρήνα και συνοδεύεται από έκλυση ενέργειας περίπου 200 MeV. Η αυτόματη σχάση είναι σπάνιο φαινόμενο, ενώ η σχάση με πρόσδοση ενέργειας (π.χ. κατά την απορρόφηση της ενέργειας φωτονίου, ή κατά την ενσωμάτωση νετρονίου), μεγαλύτερης από ορισμένη ποσότητα που χαρακτηρίζεται ως κατώφλιο ενέργειας σχάσεως, είναι φαινόμενο πολύ πιθανό.

Το αντικείμενο της σχάσεως βαρέως πυρήνα περιγράφεται σε μεγάλη έκταση στο κεφάλαιο 2.

### **1.8.7 Κατατεμαχισμός πυρήνων**

Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες τα νετρόνια έχουν κινητικές ενέργειες μεγάλων τιμών, της τάξεως των 100 MeV και πάνω, πραγματοποιούνται πυρηνικές αντιδράσεις κατά τις οποίες παρατηρούνται κατατεμαχισμοί των πυρήνων με τους οποίους συγκρούονται τα νετρόνια αυτά. Με τον όρο κατατεμαχισμός εννοείται ο τεμαχισμός του πυρήνα σε διάφορα σωματίδια-συγκροτήματα νουκλεονίων, και θραύσματα-πυρήνες.

Η μικροσκοπική ενεργός διατομή για τέτοιου είδους πυρηνικές αντιδράσεις παρουσιάζει συνεχή αύξηση, όσο αυξάνει η ενέργεια των νετρονίων μέχρι τα 400 MeV περίπου, και από εκεί και πέρα παραμένει σταθερή. Το μεγαλύτερο μέρος της εκλυόμενης ενέργειας αποτίθεται τοπικά στην ύλη από τα ιονισμένα σε υψηλό βαθμό θραύσματα του δημιουργούμενου στιγμιαία συνθέτου πυρήνα.

Κατά τον τεμαχισμό των βαρέων ή μέσου βάρους πυρήνων εκλύονται, εκτός των άλλων, νετρόνια και ακτινοβολία-γ από τους αποδιεγειρόμενους πυρήνες-θραύσματα. Το γεγονός αυτό δημιουργεί πρόσθετα προβλήματα θωρακίσεως κατά των διεισδυτικών αυτών δευτερογενών ακτινοβολιών από νετρόνια και ακτίνες-γ.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΧΑΣΗ - ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

## 2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΧΑΣΗ

Η πυρηνική αντίδραση που στο προηγούμενο κεφάλαιο αποκαλέσαμε <<σχάση βαρέως πυρήνα>>, έχει μεγάλη σημασία για την πυρηνική τεχνολογία και για τον λόγο αυτόν εξετάζεται ιδιαίτερα εδώ.

Η σχάση βαρέως πυρήνα, δηλαδή ο τεμαχισμός του πυρήνα σε δύο ελαφρότερους πυρήνες, τα θραύσματα σχάσεως, είναι ένα φαινόμενο το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτόματα ή να προκληθεί με εξωτερικά προσδιδόμενη ενέργεια στον πυρήνα. Η σχάση συνοδεύεται από έκλυση ενέργειας της τάξεως των 200 MeV. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας αυτής (~ 168 MeV) εμφανίζεται υπό μορφή κινητικής ενέργειας των θραυσμάτων σχάσεως, ενώ το υπόλοιπο υπό μορφή φωτονίων (ακτίνες-γ), κινητικής ενέργειας των εκλυόμενων νετρονίων, σωματιδίων-α και νετρίνων.

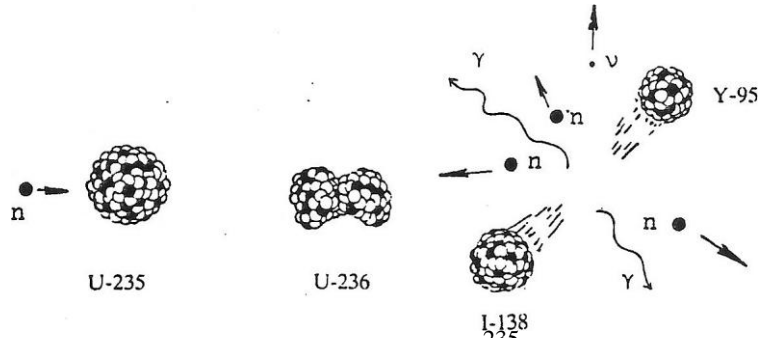
Η αυτόματη σχάση είναι ένα φαινόμενο που πραγματοποιείται με πολύ μικρή πιθανότητα και το προβλέπει η κβαντομηχανική θεωρία. Στην περίπτωση π.χ. του  $^{238}\text{U}$ , παρατηρείται μία αυτόματη σχάση ανά γραμμάριο στα 100 sec.

Η <<εξαναγκασμένη>> σχάση πραγματοποιείται εφ' όσον προσφερθεί ενέργεια στον πυρήνα, προσβάλλοντάς τον π.χ. με φωτόνια ή βομβαρδίζοντάς τον με νετρόνια κατάλληλης ενέργειας. Το ελάχιστο ποσόν ενέργειας που πρέπει να προσφερθεί σε ένα βαρύ πυρήνα για να υποστεί αυτός αμέσως σχάση είναι γνωστό ως κατώφλιο σχάσεως. Στον Πίνακα 2.1 δίδονται τιμές του κατωφλίου σχάσεως  $E_{\text{φ}}$  για <<φωτονιακή σχάση>>, ενώ στον Πίνακα 2.3 της παραγράφου 2.3 δίδονται τιμές του κατωφλίου κινητικής ενέργειας  $E_{\text{nf}}$  για <<σχάση με νετρόνια>>. Οι τιμές στην δεύτερη περίπτωση είναι χαμηλές, λόγω της συμβολής της ενέργειας συνδέσεως του νετρονίου στον δημιουργούμενο προσωρινά βαρύ πυρήνα.

**Πίνακας 2.1** Ενέργειες κατωφλίου σχάσεως για <<φωτονιακή σχάση>>.

Πυρήνας	$E_{\text{φ}}$ (MeV)
$^{232}\text{Th}$	5,9
$^{233}\text{U}$	5,5
$^{235}\text{U}$	5,75
$^{238}\text{U}$	5,85
$^{239}\text{Pu}$	5,5

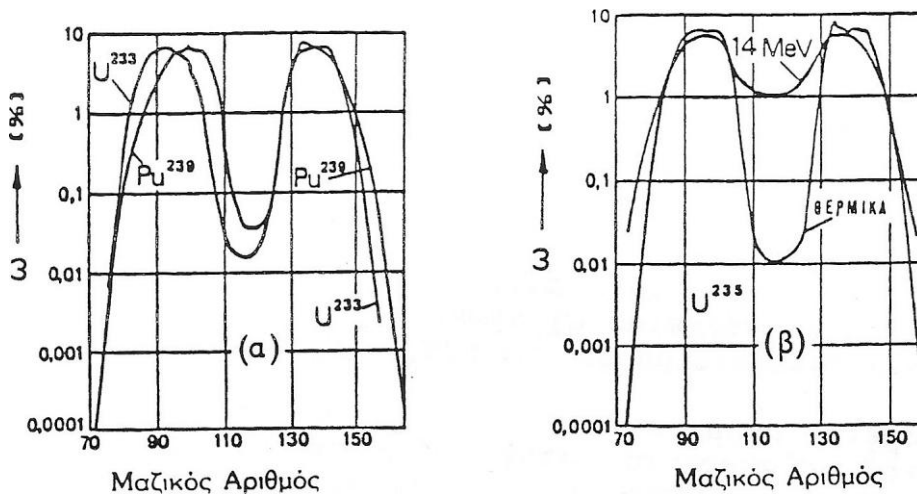
Στο Σχήμα 2.1 αποδίδεται γραφικά μία περίπτωση σχάσεως του  $^{235}\text{U}$  με νετρόνιο.



Σχήμα 2.1 Σχάση του πυρήνα  $^{235}\text{U}$  με νετρόνιο.

## 2.2 ΓΕΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΘΡΑΥΣΜΑΤΩΝ ΣΧΑΣΕΩΣ

Ως θραύσματα σχάσεως (ή προϊόντα σχάσεως) των βαρέων σχάσιμων πυρήνων προκύπτουν πυρήνες, οι οποίοι έχουν μαζικό αριθμό ( $A$ ) μεταξύ των ορίων  $A \cong 72$  και  $A \cong 162$ . Η εμφάνιση όμως ενός συγκεκριμένου προϊόντος σχάσεως, κατά την σχάση ορισμένου πυρήνα, πραγματοποιείται με πιθανότητα χαρακτηριστική του προϊόντος. Στο Σχήμα 2.2 δίνεται ως ποσοστό % των σχάσεων, η πιθανότητα  $\omega$  εμφάνισης των διαφόρων πυρήνων-θραυσμάτων κατά τις σχάσεις με θερμικά νετρόνια, των σχάσιμων πυρήνων  $^{233}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ , και  $^{235}\text{U}$ . Για το  $^{235}\text{U}$  δίνεται επίσης η αντίστοιχη καμπύλη για την περίπτωση σχάσεώς του με ταχέα νετρόνια ενέργειας 14 MeV. Καθεμιά από τις γραφικές αυτές παραστάσεις δίνει την πιθανότητα  $\omega$  ανά σχάση ορισμένου σχαζόμενου πυρήνα και εμφανίζει έντονα μέγιστα για δύο τιμές του μαζικού αριθμού των προϊόντων της σχάσεως. Η ομάδα των προϊόντων της σχάσεως με μαζικούς αριθμούς γύρω από την μικρότερη τιμή του μαζικού αριθμού για τον οποίον εμφανίζεται το ένα από τα μέγιστα χαρακτηρίζεται ως ομάδα ελαφρών θραυσμάτων και οι αντίστοιχοι πυρήνες ως ελαφρά θραύσματα, ενώ η ομάδα των προϊόντων με μαζικούς αριθμούς γύρω από την μεγαλύτερη τιμή του μαζικού αριθμού για τον οποίον εμφανίζεται το άλλο μέγιστο χαρακτηρίζεται ως ομάδα βαρέων θραυσμάτων και οι αντίστοιχοι πυρήνες βαρέα θραύσματα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η σχάση είναι εξόχως ασυμμετρική για χαμηλές ενέργειες διεγέρσεως του σύνθετου πυρήνα, όσο όμως αυξάνει η ενέργεια, η σχάση τείνει να γίνει συμμετρική.



Σχήμα 2.2 Πιθανότητα  $\omega$ , % των σχάσεων, εμφάνισης των πυρήνων-θραυσμάτων, κατά τις σχάσεις των σχάσιμων πυρήνων (α)  $^{233}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ , με θερμικά νετρόνια, και (β)  $^{235}\text{U}$  με θερμικά και ταχέα νετρόνια ενέργειας 14 MeV.

Στον Πίνακα 2.2 δίνονται διάφορα στοιχεία για τις δύο ομάδες θραυσμάτων σχάσεως του  $^{235}\text{U}$ , χαρακτηριστικά του μέσου θραύσματος που κατά κάποιο τρόπο είναι αντιπροσωπευτικό κάθε ομάδας.

**Πίνακας 2.2** Μέσες ιδιότητες των προϊόντων σχάσεως του  $^{235}\text{U}$  με θερμικά νετρόνια.

Ιδιότητα	Ελαφρύ θραύσμα	Βαρύ θραύσμα
Μαζικός αριθμός	~ 95	~ 139
Ατομικός αριθμός	~ 38	~ 54
Αρχική ενέργεια (MeV)	97	65
Αρχικό φορτίο	~ + 20e	~ + 22e
Μέση εμβέλεια στον αέρα (15 °C, 760 mmHg) σε mm	27	21

### 2.3 ΣΧΑΣΗ ΒΑΡΕΩΣ ΠΥΡΗΝΑ ΜΕ ΝΕΤΡΟΝΙΑ

Η σχάση βαρέως πυρήνα με πρόσδοση έξωθεν ενέργειας (π.χ. κατά την απορρόφηση της ενέργειας φωτονίου, ή κατά την ενσωμάτωση νετρονίου), μεγαλύτερης από ορισμένη ποσότητα, το κατώφλιο ενέργειας σχάσεως, είναι ένα φαινόμενο που με μεγάλη πιθανότητα μπορεί να πραγματοποιηθεί.

Οι βαρείς πυρήνες που μπορούν να υποστούν σχάση με νετρόνια, αναφέρονται στην πρώτη στήλη του Πίνακα 2.3. Στην τρίτη στήλη του ίδιου πίνακα, αναφέρεται η ελάχιστη κινητική ενέργεια  $E_{nf}$  (το κατώφλιο κινητικής ενέργειας σχάσεως), την οποία πρέπει να διαθέτει ένα νετρόνιο, για να είναι σε θέση να προκαλέσει σχάση του αντίστοιχου πυρήνα.

**Πίνακας 2.3** Στοιχεία για πυρήνες που σχάζονται με νετρόνια.

Πυρήνας-στόχος	Σύνθετος πυρήνας	$E_{nf}$ (MeV)	$\nu_{nf}$
$^{232}\text{Th}$	$^{233}\text{Th}$	1,3	2,1
$^{233}\text{U}$	$^{234}\text{U}$	0,0	2,5
$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	0,4	-
$^{235}\text{U}$	$^{236}\text{U}$	0,0	2,4
$^{236}\text{U}$	$^{237}\text{U}$	0,8	-
$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{U}$	1,2	2,5
$^{237}\text{Np}$	$^{238}\text{Np}$	0,4	-
$^{239}\text{Pu}$	$^{240}\text{Pu}$	0,0	2,9
$^{241}\text{Pu}$	$^{242}\text{Pu}$	0,0	3,0

Παρατηρείται από τις τιμές της  $E_{nf}$ , ότι οι πυρήνες  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  και  $^{241}\text{Pu}$  μπορούν να σχασθούν ακόμα και με νετρόνια μηδενικής ενέργειας. Οι πυρήνες αυτοί είναι γνωστοί ως σχάσιμοι πυρήνες, ενώ οι υπόλοιποι χαρακτηρίζονται ως πυρήνες που μπορούν να σχασθούν με νετρόνια κατάλληλης κινητικής ενέργειας.

Κατά τη σχάση των βαρέων πυρήνων εκλύονται, νετρόνια και ακτίνες-γ. Το πλήθος των νετρονίων,  $\nu_{nf}$ , τα οποία εκλύονται κατά μέσον όρο ανά σχάση για κινητική ενέργεια νετρονίου ίση προς την κινητική ενέργεια κατωφλίου  $E_{nf}$ , δίνεται στην τετάρτη στήλη του Πίνακα 2.3.

Η απορρόφηση νετρονίου κατάλληλης κινητικής ενέργειας από βαρύ πυρήνα δεν οδηγεί πάντοτε σε σχάση του παραγόμενου σύνθετου πυρήνα. Είναι δυνατόν ο σύνθετος πυρήνας να

αποδιεγερθεί με εκπομπή φωτονίου (η γνωστή περίπτωση της ραδιενεργού ενσωματώσεως). Γι' αυτό, το μέγεθος που δίνει το πλήθος των νετρονίων που εκλύονται κατά μέσον όρο από σχάσεις ανά απορροφώμενο νετρόνιο από σχάσιμο πυρήνα,  $\eta(E)$ , εκφράζεται συναρτήσει του μεγέθους  $\nu(E)$  ως εξής:

$$\eta(E) = \frac{\sigma_f(E)}{\sigma_a(E)} \cdot \nu(E) \quad (2.1)$$

όπου:  $\sigma_a(E) = \sigma_f(E) + \sigma_c(E)$ ,  $\sigma_f(E)$  και  $\sigma_c(E)$  είναι οι μικροσκοπικές ενεργές διατομές απορροφήσεως, σχάσεως και ενσωματώσεως, αντίστοιχα, του σχάσιμου πυρήνα.

Στον Πίνακα 2.4 δίδονται τιμές των μεγεθών  $\sigma_a$ ,  $\sigma_f$ ,  $\alpha = \sigma_c/\sigma_f$ ,  $\eta$  και  $\nu$  για θερμικά νετρόνια ( $E_t = 0,0253$  eV), για διάφορους σχάσιμους πυρήνες.

**Πίνακας 2.4** Στοιχεία για σχάση πυρήνων με θερμικά νετρόνια.

Σχάσιμο ισότοπο	$\sigma_a$ (b)	$\sigma_f$ (b)	$\alpha$	$\eta$	$\nu$
$^{233}\text{U}$	578,8	531,1	0,0899	2,287	2,492
$^{235}\text{U}$	680,8	582,2	0,169	2,068	2,418
$^{239}\text{Pu}$	1011,3	742,5	0,362	2,108	2,871
$^{241}\text{Pu}$	1377,0	1009,0	0,365	2,145	2,927

Τα νετρόνια και τα φωτόνια τα οποία εκλύονται αμέσως (ακαριαία), ή αργότερα από τα θραύσματα σχάσεως (καθυστερημένα) δεν έχουν ενιαία ενέργεια, αλλά εμφανίζουν ενεργειακά φάσματα.

#### (α) Ακαριαία νετρόνια.

Ένα από τα σπουδαιότερα προϊόντα της σχάσεως είναι τα νετρόνια τα οποία εκλύονται στιγμιαία (μέσα σε  $10^{-17}$  sec από τον τεμαχισμό του πυρήνα) κατά το φαινόμενο της σχάσεως.

Το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων αυτών περιγράφεται από τη σχέση:

$$X_{n,p}(E) = 0,453 \cdot e^{-1,036 \cdot E} \cdot \sinh \sqrt{2,29 \cdot E} \quad (\text{νετρόνια/σχάση} \cdot \text{MeV}) \quad (2.2)$$

όπου η ενέργεια  $E$  εκφράζεται σε MeV, και  $X_{n,p}(E) \cdot dE$  παριστάνει το ποσοστό των ακαριαίων νετρονίων που εκπέμπονται ανά σχάση με κινητική ενέργεια (στο σύστημα-L) μεταξύ  $E$  και  $E+dE$ .

Στο Σχήμα 2.3 αποδίδεται γραφικά η συνάρτηση (2.2) μαζί με την ακόλουθη, απλούστερη, έκφρασή της:

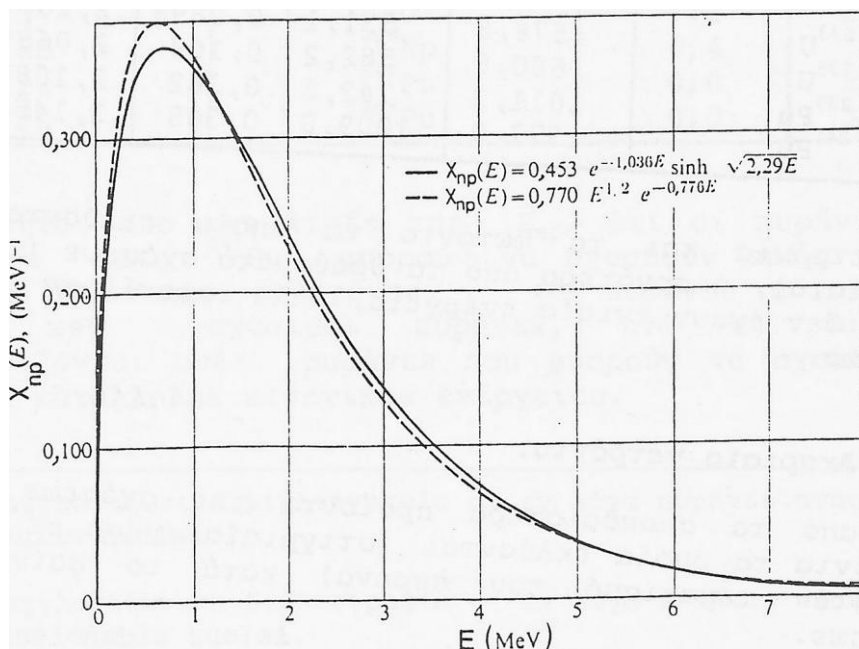
$$X_{n,p}(E) = 0,770 \cdot e^{-0,776 \cdot E} \cdot \sqrt{E} \quad (2.3)$$

Το ενεργειακό φάσμα των ακαριαίων νετρονίων εκτείνεται πρακτικά από 0 μέχρι 17 MeV περίπου. Θεωρητικά ισχύει από 0 έως  $\infty$ , οπότε:

$$\int_0^{\infty} X_{n,p}(E) \cdot dE = 1 \quad (2.4)$$

Εύκολα προκύπτει ότι η πιθανότερη ενέργεια ακαριαίου νετρονίου, η αντιστοιχούσα στην κορυφή της καμπύλης  $X_{n,p}(E)$ , είναι  $\sim 0,73$  MeV, ενώ η μέση ενέργεια είναι:

$$\bar{E} = \int_0^{\infty} E \cdot X_{n,p}(E) \cdot dE = 1,98 \text{ MeV} \quad (2.5)$$

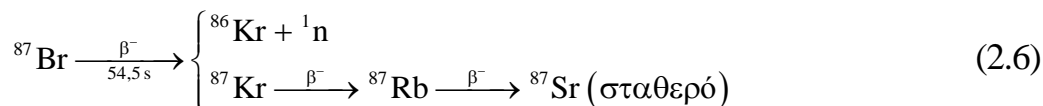


Σχήμα 2.3 Γραφική παράσταση εκφράσεων της συναρτήσεως  $X_{n,p}(E)$ .

**(β) Καθυστερημένα νετρόνια.**

Αν και τα καθυστερημένα νετρόνια αποτελούν το 1/100 ή και λιγότερο, του συνόλου των νετρονίων της σχάσεως, τα νετρόνια αυτά παίζουν σημαντικό ρόλο στην λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων. Τα καθυστερημένα νετρόνια εμφανίζονται κατά τις διασπάσεις των πυρήνων-θραυσμάτων. Τα θραύσματα αυτά παρουσιάζουν περίσσεια νετρονίων κατά τη δημιουργία τους ( $N/Z = 1,55 \div 1,60$ ), και ως εκ τούτου είναι πυρήνες ασταθείς, τείνοντες να μεταπέσουν σε ευσταθέστερους με εκπομπή ηλεκτρονίων ( ${}^1_0n \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^1_1p + \bar{\nu}$ ) ή με εκπομπή νετρονίων, εφ' όσον η κατάσταση διεγέρσεώς τους εμπίπτει στην περιοχή των δυνητικών σταθμών διεγέρσεων για απόσπαση νετρονίου.

Στην περίπτωση π.χ., του πυρήνα-θραύσματος  ${}^{87}\text{Br}$ , πραγματοποιείται η ακόλουθη αλυσίδα διασπάσεων:

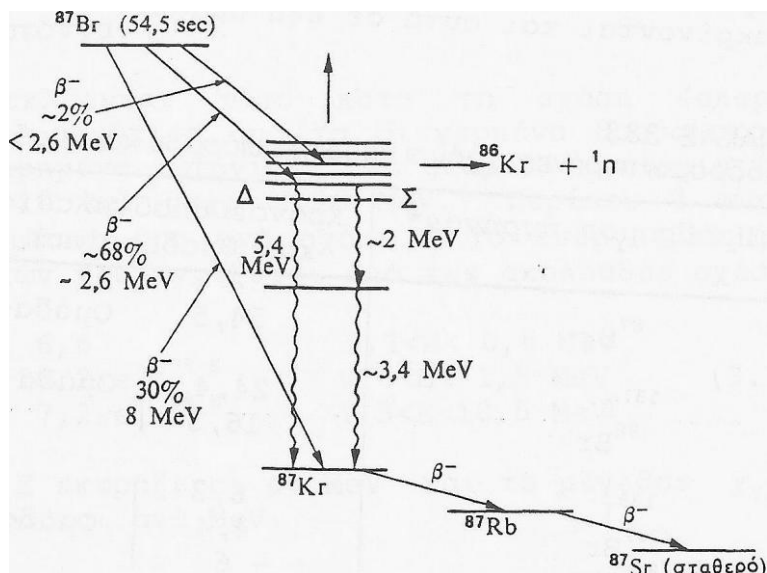


που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4.

Παρατηρούμε ότι το  ${}^{87}\text{Br}$ , με εκπομπή  $\beta^-$  διασπάται ( $T_{1/2} = 54,5 \text{ sec}$ ) προς  ${}^{87}\text{Kr}$ . Αν ο προκύπτων πυρήνας βρίσκεται σε υψηλή κατάσταση διεγέρσεως, όπως στην περίπτωση εκπομπής σωματιδίων-β ενέργειας 2,6 MeV, τότε βρίσκεται σε δυνητική ενεργειακή κατάσταση για εκπομπή νετρονίου, τότε είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί το άνω σκέλος της αντιδράσεως (2.6) και να εκπεμφθεί καθυστερημένο νετρόνιο. Αν ο πυρήνας του  ${}^{87}\text{Kr}$  δεν αποδιεγερθεί κατ' αυτόν τον τρόπο, αποδιεγείρεται με εκπομπή (καθυστερημένων) φωτονίων και εν συνεχεία με εκπομπή ηλεκτρονίου διασπάται προς  ${}^{87}\text{Rb}$ , και αυτό στη συνέχεια προς τον σταθερό πυρήνα  ${}^{87}\text{Sr}$ .

Στην περίπτωση εκπομπής νετρονίου, αυτή πραγματοποιείται, αμέσως μετά την διάσπαση-β του  ${}^{87}\text{Br}$  και επομένως εμφανίζεται με καθυστέρηση <<της τάξεως>> των 54,5 sec που είναι ο χρόνος υποδιπλασιασμού του ισότοπου  ${}^{87}\text{Br}$  (μέση διάρκεια ζωής  $\bar{t} = T_{1/2}/0,693 = 78,64 \text{ sec}$ ).

Οι πυρήνες-θραύσματα, όπως το  ${}^{87}\text{Br}$  που μπορούν να οδηγήσουν σε εκπομπή καθυστερημένου νετρονίου ονομάζονται πρόδρομοι πυρήνες.



**Σχήμα 2.4** Έκλυση καθυστερημένου νετρονίου από τον πυρήνα-θραύσμα  $^{87}\text{Br}$ . Η σημειούμενη στάθμη  $\Delta\Sigma$  είναι το κάτω όριο των δυνητικών σταθμών ενέργειας του θυγατρικού πυρήνα  $^{87}\text{Kr}$  για απόσπαση νετρονίου.

Στον Πίνακα 2.5 αναφέρονται πρόδρομοι πυρήνες-θραύσματα σχάσεως με τους χρόνους υποδιπλασιασμού τους. Όπως αναφέρεται στον πίνακα αυτόν, ανάλογα με την τάξη μεγέθους του χρόνου υποδιπλασιασμού, οι πρόδρομοι πυρήνες ομαδοποιούνται σε έξι ομάδες. Αντιστοίχως, τα καθυστερημένα νετρόνια που προκύπτουν από τους πυρήνες αυτούς διακρίνονται και αυτά σε έξι ομάδες.

**Πίνακας 2.5** Πρόδρομοι πυρήνες, χρόνοι υποδιπλασιασμού και ομαδοποίησή τους.

Πρόδρομος πυρήνας*	Χρόνος υποδιπλασιασμού και Ομαδοποίηση	
$^{87}\text{Br}$	54,5	Ομάδα-1
$^{137}\text{I}$	24,4	} Ομάδα-2
$^{88}\text{Br}$	16,3	
$^{138}\text{I}$	6,3	} Ομάδα-3
$^{(89)}\text{Br}$	4,4	
$^{(93,94)}\text{Rb}$	~ 6	
$^{139}\text{I}$	2,0	} Ομάδα-4
$\text{Cs, Sb ή Te}$	(1,6 ÷ 2,4)	
$^{(90,92)}\text{Br}$	1,6	
$^{(93)}\text{Kr}$	~ 1,5	
$(^{140}\text{I} + \text{Kr};)$	0,5	Ομάδα-5
$(\text{Br, Rb, As} + ;)$	0,2	Ομάδα-6 -

\* Οι παρενθέσεις δηλούν αβέβαια μεγέθη.

Αν  $\nu$  είναι το πλήθος των νετρονίων που εκλύονται κατά μέσον όρο ανά σχάση, συνολικά, και  $\beta$  είναι το ποσοστό αυτών που εκλύονται ως καθυστερημένα, τότε το ποσοστό του συνόλου που

εκλύονται ως καθυστερημένα συμβολίζεται με  $\nu \cdot \beta$ , οπότε το ποσοστό του συνόλου που εκλύονται ακαριαία, με  $\nu \cdot (1-\beta)$ . Τέλος, αν με  $\beta_i$  συμβολιστεί το ποσοστό των  $\nu$  νετρονίων ανά σχάση που εμφανίζονται ως καθυστερημένα της ομάδας- $i$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ ), τότε θα ισχύει η σχέση:

$$\beta = \sum_i \beta_i \quad (2.7)$$

Στον Πίνακα 2.6 δίδονται στοιχεία για τα καθυστερημένα νετρόνια που προκύπτουν κατά τις σχάσεις με θερμικά νετρόνια των βαρέων πυρήνων  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ , και  $^{239}\text{Pu}$ . Εν αντιθέσει προς τα ακαριαία νετρόνια τα οποία εκπέμπονται με συνεχές ενεργειακό φάσμα, τα καθυστερημένα νετρόνια εκπέμπονται με κατά το μάλλον ή ήττον, καθορισμένες ενέργειες αρκετά μικρότερες από εκείνες της πλειονότητας των ακαριαίων νετρονίων.

**Πίνακας 2.6** Χρόνοι υποδιπλασιασμού, σταθερές διασπάσεως, μέσες καθυστερήσεις εμφανίσεως, παροχές και ποσοστά των έξι ομάδων καθυστερημένων νετρονίων που προκύπτουν κατά τις σχάσεις με θερμικά νετρόνια των πυρήνων  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ , και  $^{239}\text{Pu}$ .

Ουράνιο-233						
Ομάδα (i)	$T_{1/2,i}$ (s)	$\lambda_i$ ( $s^{-1}$ )	$\tau_i$ (s)	Νετρόνια/σχάση ομάδας-i	$\beta_i$	$\beta_i/\beta$
1	55,00	0,0126	79,365	0,00057	0,000224	0,086
2	20,57	0,0337	29,674	0,00197	0,000777	0,299
3	5,00	0,139	7,194	0,00166	0,000655	0,252
4	2,13	0,325	3,077	0,00184	0,000723	0,278
5	0,615	1,13	0,885	0,00034	0,000133	0,051
6	0,277	2,50	0,400	0,00022	0,000088	0,034

$$\beta = 0,0026$$

Ουράνιο-235						
Ομάδα (i)	$T_{1/2,i}$ (s)	$\lambda_i$ ( $s^{-1}$ )	$\tau_i$ (s)	Νετρόνια/σχάση ομάδας-i	$\beta_i$	$\beta_i/\beta$
1	55,72	0,0124	80,645	0,00052	0,000215	0,033
2	22,72	0,0305	32,787	0,00346	0,001424	0,219
3	6,22	0,111	9,009	0,00310	0,001274	0,196
4	2,30	0,301	3,322	0,00624	0,002568	0,395
5	0,610	1,14	0,877	0,00182	0,000748	0,115
6	0,230	3,01	0,332	0,00066	0,000273	0,042

$$\beta = 0,0065$$

Πλουτώνιο-239						
Ομάδα (i)	$T_{1/2,i}$ (s)	$\lambda_i$ ( $s^{-1}$ )	$\tau_i$ (s)	Νετρόνια/σχάση ομάδας-i	$\beta_i$	$\beta_i/\beta$
1	54,28	0,0128	78,125	0,00021	0,000073	0,035
2	23,04	0,0301	33,223	0,00182	0,000626	0,298
3	5,60	0,124	8,065	0,00129	0,000443	0,211
4	2,13	0,325	3,077	0,00199	0,000685	0,326
5	0,618	1,12	0,893	0,00052	0,000181	0,086
6	0,257	2,69	0,372	0,00027	0,000092	0,043

$$\beta = 0,0021$$

Στον Πίνακα 2.7 δίδονται οι μέσες ενέργειες των καθυστερημένων νετρονίων των πρώτων τεσσάρων από τις έξι ομάδες καθυστερημένων νετρονίων, που προκύπτουν από τις σχάσεις του  $^{235}\text{U}$  με θερμικά και ταχέα νετρόνια (14 MeV).

**Πίνακας 2.7** Μέσες ενέργειες καθυστερημένων νετρονίων (ομάδες 1÷4) που προκύπτουν κατά τις σχάσεις πυρήνων  $^{235}\text{U}$  με θερμικά και ταχέα νετρόνια.

Ομάδα	$E_i$ (keV)	
	Θερμικά	14 MeV
1	277	286
2	484	458
3	447	432
4	432	480

**(γ) Ακαριαία φωτόνια.**

Οι ακτίνες-γ εκλύονται τόσο κατά τη σχάση (ακαριαία φωτόνια) όσο και αργότερα από τα διεγερμένα θραύσματα της σχάσεως (καθυστερημένα φωτόνια). Τα ακαριαία φωτόνια έχουν ενέργειες από 10 keV μέχρι 10 MeV. Περίπου 8 φωτόνια εκλύονται κατά μέσον όρο ανά σχάση. Το ενεργειακό φάσμα των φωτονίων αυτών προσεγγίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$X_{Y,p}(E) = \begin{cases} 6,6 & 0,1 < E < 0,6 \text{ MeV} \\ 20,2 \cdot e^{-1,78 \cdot E} & 0,6 < E < 1,5 \text{ MeV} \\ 7,2 \cdot e^{-1,09 \cdot E} & 1,5 < E < 10,5 \text{ MeV} \end{cases} \quad (2.8)$$

όπου η ενέργεια E εκφράζεται σε MeV και το μέγεθος  $X_{Y,p}$  σε φωτόνια ανά σχάση και ανά MeV.

**(δ) Καθυστερημένα φωτόνια.**

Τα καθυστερημένα φωτόνια εκλύονται ως επί το πλείστον μετά από διάσπαση-β των ραδιενεργών θραυσμάτων της σχάσεως. Περίπου 6,65 MeV εκπέμπονται κατά μέσον όρο ανά σχάση υπό μορφή καθυστερημένων φωτονίων. Το ενεργειακό φάσμα αυτών προσεγγίζεται από την σχέση:

$$X_{Y,d}(E) = 7,4 \cdot e^{-1,10 \cdot E} \quad (\text{φωτόνια/σχάση} \cdot \text{MeV}) \quad (2.9)$$

**2.4 ΑΛΥΣΩΤΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΣΧΑΣΕΩΝ ΚΑΙ Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΚΡΙΣΙΜΟΤΗΤΑΣ**

Τα συμπεράσματα των προηγούμενων παραγράφων, ότι οι σχάσιμοι πυρήνες σχάζονται με νετρόνια οποιασδήποτε ενεργείας, ακόμη και μηδενικής, και ότι οι σχάσεις αυτές συνοδεύονται από έκλυση νετρονίων, που κατά μέσο όρο είναι περισσότερα από ένα, αποτελούν τις πρώτες βασικές προϋποθέσεις για τη δυνατότητα πρακτικής εκμεταλλεύσεως του τεραστίου ποσού ενεργείας που εκλύεται ανά σχάση σχάσιμου πυρήνα.

Πράγματι, οι σχάσεις των σχάσιμων πυρήνων <<παράγουν>> τους φορείς που τις προκαλούν, τα νετρόνια, και μάλιστα από ένα νετρόνιο που προκαλεί μια σχάση παράγονται κατά μέσο όρο περισσότερα από ένα νέα νετρόνια. Επομένως, ένα ποσοστό τουλάχιστο των νέων νετρονίων, παραγόμενα σε περιβάλλον που περιέχει σχάσιμους πυρήνες, θα προκαλέσει νέες σχάσεις και μάλιστα ανεξάρτητα της ενεργείας με την οποία εκλύονται τα νετρόνια της σχάσεως. Στη συνέχεια, από τις νέες σχάσεις θα προκύψει νέα γενεά νετρονίων, μερικά από τα νετρόνια αυτής της γενεάς θα

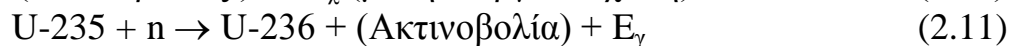
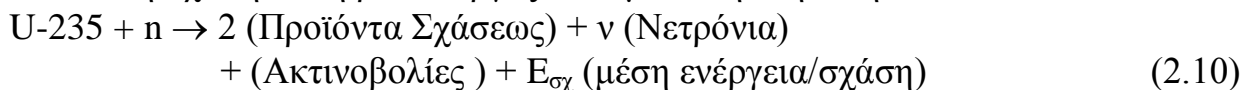


προκαλέσουν και πάλι σχάσεις κ.ο.κ. Αυτή η αλληλουχία γεγονότων, δηλαδή σχάσεις - νετρόνια σχάσεων - σχάσεις - νετρόνια σχάσεων κλπ. Ονομάζεται αλυσωτή αντίδραση σχάσεων. Έτσι, λοιπόν, οι πυρηνικές σχάσεις σχάσιμων πυρήνων με νετρόνια έχουν την ικανότητα της αυτοσυντηρήσεως.

Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινισθεί ότι η αποκατάσταση αλυσωτής αντιδράσεως σχάσεων με νετρόνια στην περίπτωση των μη σχάσιμων πυρήνων είναι δυνατή τότε μόνο, όταν μερικά τουλάχιστο από τα νετρόνια της σχάσεως έχουν ενέργεια μεγαλύτερη του κατωφλίου σχάσεως αυτών των πυρήνων.

Διατάξεις στις οποίες αποκαθίσταται αλυσωτή αντίδραση σχάσεων με νετρόνια, που συνοδεύεται από έκλυση ενεργείας, ονομάζονται πυρηνικοί αντιδραστήρες. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες που χρησιμοποιούνται για την πρακτική αξιοποίηση της πυρηνικής ενεργείας δεν έχουν μόνο το χαρακτηριστικό του υπόψη γενικού ορισμού, αλλά ικανοποιούν και ορισμένες πρόσθετες προϋποθέσεις που θα αναφερθούν στη συνέχεια.

Θεωρούμε μια σφαίρα συγκροτημένη μόνο από σχάσιμους πυρήνες, π.χ. U-235, και υποθέτουμε ότι μέσα στη σφαίρα υπάρχουν νετρόνια, χωρίς προς το παρόν να μας ενδιαφέρει η προέλευσή τους. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στις παραγράφους 1.6 και 1.8, οι μόνες πυρηνικές αντιδράσεις μέσα στη σφαίρα, που οδηγούν σε εξαφάνιση νετρονίου είναι η σχάση και η ραδιενεργός ενσωμάτωση. Δηλαδή:



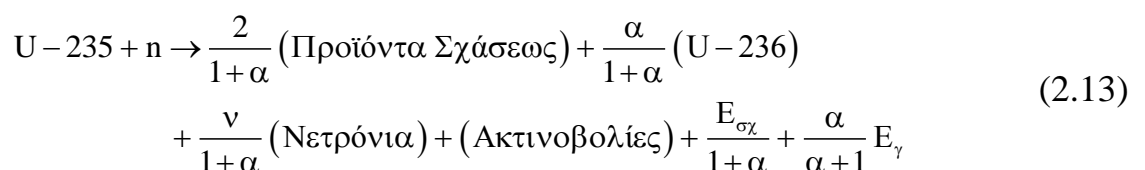
Στις πιο πάνω πυρηνικές αντιδράσεις σημειώνεται η παρουσία των διαφόρων ακτινοβολιών, ενώ η συνολική ενέργεια της κάθε αντιδράσεως εκφράζεται με ξεχωριστό όρο.

Η σχάση του U-235, όπως είναι γνωστό, πραγματοποιείται ανεξάρτητα της ενεργείας των νετρονίων. Όμως, από την ενέργεια των νετρονίων εξαρτάται η πιθανότητα πραγματοποίησεως κάθε μιας από τις πιο πάνω αντιδράσεις. Αν ληφθούν υπόψη όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.7 σχετικά με την έννοια των μικροσκοπικών ενεργών διατομών, τότε εύκολα καταλήγουμε στο ακόλουθο συμπέρασμα: Η σχέση ενσωματώσεων -σχάσεων  $\alpha$ , (παράγραφος 2.3):

$$\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_f} \quad (2.12)$$

εκφράζει το λόγο της συχνότητας εμφανίσεως της αντιδράσεως ενσωματώσεως (2.11) προς τη συχνότητα εμφανίσεως της αντιδράσεως σχάσεως (2.10). Στην έκφραση (2.12) είναι βεβαίως αυτονόητο, ότι οι μικροσκοπικές ενεργοί διατομές αναφέρονται στην ενέργεια των νετρονίων που προκαλούν τις δύο πυρηνικές αντιδράσεις.

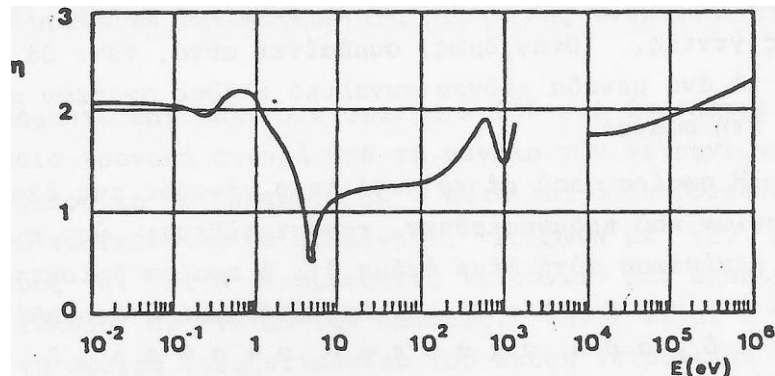
Σύμφωνα με τα πιο πάνω, οι πυρηνικές αντιδράσεις (2.10), (2.11) μπορούν να αντικατασταθούν με την επόμενη κατά μέσο όρο πυρηνική αντίδραση απορροφήσεως νετρονίου:



Ο όρος  $v/(1+\alpha)$  που εμφανίζεται στην (2.13) συμβολίζεται με το η:

$$\eta = \frac{\nu}{1+\alpha} \quad (2.14)$$

και εκφράζει το πλήθος των νετρονίων που εκλύονται κατά μέσο όρο από τις σχάσεις ανά νετρόνιο απορροφούμενο από σχάσιμο πυρήνα. Το φυσικό μέγεθος  $\eta$  εξαρτάται από την ενέργεια των νετρονίων και έχει ιδιαίτερη σημασία για τους πυρηνικούς αντιδραστήρες, όπως θα γίνει αντιληπτό στη συνέχεια. Τιμές του  $\eta$  διαφόρων σχάσιμων πυρήνων, για νετρόνια ενεργείας  $E = 0,0253$  eV, παρέχει ο Πίνακας 2.4. Το διάγραμμα του Σχήματος 2.5 δείχνει την εξάρτηση του μεγέθους  $\eta$  του U-235 από την ενέργεια  $E$  των νετρονίων.



**Σχήμα 2.5** Εξάρτηση του μεγέθους  $\eta$  του U-235 από την ενέργεια  $E$  των νετρονίων.

Η ανάλυση που προηγήθηκε δείχνει ότι από τα νετρόνια των σχάσεων μόνο ένα ποσοστό μπορεί να προκαλέσει νέες σχάσεις σχάσιμων πυρήνων λόγω και των αναπόφευκτων ενσωματώσεων νετρονίων στους πυρήνες αυτούς. Οι ενσωματώσεις, δηλαδή, νετρονίων στους σχάσιμους πυρήνες σημαίνουν απώλεια νετρονίων για την αλυσωτή αντίδραση σχάσεων.

Οι ενσωματώσεις σε σχάσιμους πυρήνες της σφαίρας που θεωρήσαμε δεν είναι οι μόνες απώλειες νετρονίων για την πυρηνική αντίδραση. Πράγματι, ορισμένα νετρόνια είναι αναπόφευκτο να φθάσουν μέχρι την επιφάνεια της σφαίρας και να την εγκαταλείψουν οριστικά. Αυτά ακριβώς τα νετρόνια αποτελούν το δεύτερο σκέλος απωλειών νετρονίων για την αλυσωτή αντίδραση σχάσεων μέσα στη σφαίρα. Αν η ακτίνα της σφαίρας είναι μικρή ως προς τη μέση ελεύθερη διαδρομή των νετρονίων στο U-235, τότε είναι εύλογο να περιμένει κανείς ότι ένα μεγάλο ποσοστό των νετρονίων των σχάσεων θα διαφύγουν από τη σφαίρα. Αν, αντιθέτως, η ακτίνα της σφαίρας είναι πολύ μεγάλη ως προς τη μέση ελεύθερη διαδρομή των νετρονίων, τότε τα διαφεύγοντα νετρόνια προέρχονται κυρίως από θέσεις που βρίσκονται σε περιοχή κοντά στην επιφάνεια της σφαίρας, ενώ τα νετρόνια των σχάσεων που εκλύονται μακριά από την επιφάνεια έχουν πρακτικώς αμελητέα πιθανότητα διαφυγής. Έτσι, λοιπόν, αυξανόμενης της ακτίνας  $R$  της σφαίρας το ποσοστό των νετρονίων των σχάσεων που διαφεύγουν της σφαίρας ελαττούται μονότονα. Είναι φανερό ότι όλα τα νετρόνια που δεν διαφεύγουν αλλά παραμένουν μέσα στη σφαίρα, τελικά θα απορροφηθούν από πυρήνες.

Η πιο πάνω διερεύνηση οδηγεί εύλογα στον ακόλουθο συλλογισμό: Όταν για κάθε νετρόνιο που απορροφάται από πυρήνα U-235 εκλύονται κατά μέσο όρο περισσότερα από ένα νετρόνια, τότε θα υπάρχει ένα κατάλληλο μέγεθος της σφαίρας που θα εξασφαλίζει σ' αυτή πλήρες ισοζύγιο νετρονίων. Δηλαδή, σ' ολόκληρη τη σφαίρα αυτή, από το σύνολο των νετρονίων μιας γενεάς της αλυσωτής αντίδρασης σχάσεων θα

διαφεύγουν τόσα νετρόνια, ώστε τα υπόλοιπα που θα παραμένουν στη σφαίρα και θα απορροφούνται από πυρήνες U-235 θα δημιουργούν νέα γενεά νετρονίων με συνολικό πλήθος ίσο με εκείνο της προηγούμενης γενεάς. Όταν, όμως, συμβαίνει αυτό, τότε θα παραμένει χρονικώς σταθερό το ανά μονάδα χρόνου συνολικό πλήθος σχάσεων που πραγματοποιούνται μέσα στη σφαίρα.

Η σφαίρα, που με το κατάλληλο μέγεθός της εξασφαλίζει το ισοζύγιο νετρονίων που προαναφέρθηκε, χαρακτηρίζεται ως κρίσιμη σφαίρα. Στην περίπτωση αυτή λέμε ακόμη ότι η σφαίρα βρίσκεται σε κατάσταση κρισιμότητας και ότι στη σφαίρα αποκαθίσταται αλυσωτή αντίδραση σχάσεων σταθερού ρυθμού. Η ακτίνα  $R_c$  της κρίσιμης σφαίρας ονομάζεται κρίσιμη ακτίνα, ενώ η μάζα των σχάσιμων πυρήνων που περιέχονται στην κρίσιμη σφαίρα ονομάζεται κρίσιμη μάζα.

Ανάλογοι συλλογισμοί οδηγούν στο συμπέρασμα ότι, αν η ακτίνα  $R$  της σφαίρας είναι μικρότερη από την κρίσιμη ακτίνα  $R_c$ , τότε το ισοζύγιο νετρονίων στη σφαίρα θα είναι <<παθητικό>> και επομένως ο ρυθμός των σχάσεων που πραγματοποιούνται στη σφαίρα θα φθίνει με το χρόνο, ή, αλλιώς, στη σφαίρα θα αποκατασταθεί αλυσωτή αντίδραση σχάσεων με ρυθμό που θα φθίνει. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι πρόκειται για κατάσταση υποκρισιμότητας ή για σφαίρα υποκρίσιμη. Αν, όμως, η ακτίνα  $R$  της σφαίρας είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη ακτίνα  $R_c$ , τότε το ισοζύγιο νετρονίων στη σφαίρα θα είναι <<θετικό>> και επομένως ο ρυθμός των σχάσεων που πραγματοποιούνται στη σφαίρα θα αυξάνει με το χρόνο, ή, αλλιώς, στη σφαίρα θα αποκατασταθεί αλυσωτή αντίδραση σχάσεων με ρυθμό αυξανόμενο. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι πρόκειται για κατάσταση υπερκρισιμότητας ή για σφαίρα υπερκρίσιμη.

Οι έννοιες κρισιμότητα, υποκρισιμότητα και υπερκρισιμότητα είναι έννοιες γενικές και χαρακτηρίζουν τη δυνατότητα να αποκατασταθεί σε δεδομένο σύστημα αλυσωτή αντίδραση σχάσεων με ρυθμό που είναι σταθερός, φθίνει ή αυξάνει αντίστοιχα. Η χρησιμοποίηση σφαιρικού συστήματος και καθαρού U-235 ως υλικού του συστήματος κατά την ανάπτυξη των εννοιών αυτών, έγινε μόνο για λόγους απλότητας.

Όταν ένα σύστημα είναι κρίσιμο, λόγω του σταθερού ρυθμού σχάσεων, η έκλυση σ' αυτό θερμότητας από τις σχάσεις πραγματοποιείται με σταθερό ρυθμό, δηλαδή το κρίσιμο σύστημα εμφανίζει σταθερή θερμική ισχύ. Όταν το σύστημα είναι υποκρίσιμο ή υπερκρίσιμο τότε, ο ρυθμός εκλύσεως της θερμότητας από τις σχάσεις, δηλαδή η θερμική ισχύς του συστήματος, με την πάροδο του χρόνου φθίνει ή αυξάνει αντίστοιχα. Από άποψη τρόπου εκλύσεως της ενεργείας των σχάσεων, το σύστημα που προσφέρεται για την πρακτική αξιοποίηση της πυρηνικής ενεργείας είναι το κρίσιμο.

Επανερχόμαστε και πάλι στη σφαίρα U-235 που θεωρήσαμε. Ας υποθέσουμε ότι κάποια χρονική στιγμή από το σύνολο των νετρονίων που υπάρχουν στη σφαίρα  $N$  νετρόνια θα παραμείνουν σ' αυτή και θ' απορροφηθούν από πυρήνες U-235, ενώ τα υπόλοιπα θα διαφύγουν. Σύμφωνα με τον ορισμό του φυσικού μεγέθους  $\eta$ , οι  $N$  απορροφήσεις νετρονίων από σχάσιμους πυρήνες θα οδηγήσουν σε έκλυση  $\eta N$  νετρονίων σχάσεως. Αν  $P$  είναι η πιθανότητα μη διαφυγής από τη σφαίρα ενός νετρονίου του υπόψη νετρονικού <<πληθυσμού>>, τότε από τα  $\eta N$  νετρόνια  $\eta NP$  νετρόνια δεν θα διαφύγουν, αλλά θα παραμείνουν στη σφαίρα και θα απορροφηθούν από πυρήνες. Έτσι, λοιπόν, αν στη σφαίρα απορροφηθούν συνολικά  $N$  νετρόνια, τότε από την επόμενη γενεά νετρονίων της αλυσωτής αντιδράσεως σχάσεων θα απορροφηθούν συνολικά στη σφαίρα  $\eta NP$  νετρόνια. Αυτό σημαίνει το έξης για το ρυθμό πραγματοποιήσεως της αλυσωτής

αντιδράσεως σχάσεων στη σφαίρα:

αν  $\eta NP < N$  ο ρυθμός είναι φθίνων

αν  $\eta NP > N$  ο ρυθμός είναι αυξανόμενος

αν  $\eta NP = N$  ο ρυθμός είναι σταθερός

Δηλαδή, η τιμή της αδιάστατης σταθεράς:

$$k_e = \eta P \tag{2.15}$$

καθορίζει αν η αλυσωτή αντίδραση σχάσεων στη σφαίρα εξελίσσεται με ρυθμό που φθίνει, αυξάνει ή είναι σταθερός, καθορίζει δηλαδή αν η σφαίρα είναι υποκρίσιμη, υπερκρίσιμη ή κρίσιμη. Σύμφωνα με τα παραπάνω θα είναι:

$$\text{σφαίρα κρίσιμη αν } k_e = \eta P = 1 \tag{2.16}$$

$$\text{σφαίρα υπερκρίσιμη αν } k_e > 1 \tag{2.17}$$

$$\text{σφαίρα υποκρίσιμη αν } k_e < 1$$

Η σχέση (2.16) εκφράζει τη συνθήκη για να είναι η σφαίρα κρίσιμη και χαρακτηρίζεται ως συνθήκη ή εξίσωση κρισιμότητας του συστήματος. Ανάλογη συνθήκη είναι δυνατό να διατυπωθεί, γενικώς, σε οποιαδήποτε περίπτωση συστήματος και το θέμα αυτό θα μας απασχολήσει λεπτομερέστερα στη συνέχεια. Η σταθερά  $k_e$ , τέλος, ονομάζεται συντελεστής ή σταθερά κρισιμότητας του συστήματος, εξαρτάται δε τόσο από τη γεωμετρία (μέγεθος και σχήμα), όσο και από τη σύσταση (υλικό) του συστήματος. Η σταθερά  $k_e$ , όπως είναι φανερό, εκφράζει το συντελεστή πολλαπλασιασμού των νετρονίων του συστήματος από γενεά σε γενεά της αλυσωτής αντιδράσεως.

Απλή εξέταση της συνθήκης κρισιμότητας (2.16) οδηγεί εύκολα στα ακόλουθα ενδιαφέροντα συμπεράσματα:

α) Επειδή είναι  $P < 1$ , η συγκρότηση κρίσιμης σφαίρας από U-235 είναι δυνατή τότε μόνο, όταν η σταθερά  $\eta$  αυτών των πυρήνων έχει τιμή μεγαλύτερη της μονάδος. Για να συμβαίνει αυτό, αναγκαία, αλλά όχι και ικανή προϋπόθεση είναι ανά σχάση πυρήνα U-235 να εκλύονται κατά μέσο όρο περισσότερα του ενός νετρόνια, δηλαδή  $\nu > 1$ . Αυτό αληθεύει, πράγματι, στην περίπτωση του U-235, γεγονός που για προφανή λόγο έχει ιδιαίτερη σημασία για την πυρηνική τεχνολογία.

β) Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της σταθεράς  $\eta$ , τόσο μικρότερη είναι η τιμή της πιθανότητας  $P$  που εξασφαλίζει την κρισιμότητα του συστήματος, δηλαδή τόσο μεγαλύτερο ποσοστό διαφυγών νετρονίων είναι ανεκτό για κρίσιμη σφαίρα. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν σ' αυτή την παράγραφο για τη σχέση του ποσοστού των διαφυγών με το μέγεθος της σφαίρας, αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της σταθεράς  $\eta$ , τόσο μικρότερη θα είναι η κρίσιμη ακτίνα της σφαίρας και επομένως, τόσο μικρότερη θα είναι η απαιτούμενη κρίσιμη μάζα U-235.

Τα προαναφερθέντα συμπεράσματα δικαιολογούν την άποψη που διατυπώθηκε ότι το φυσικό μέγεθος  $\eta$  έχει ιδιαίτερη σημασία για τους πυρηνικούς αντιδραστήρες.

## 2.5 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Με τον όρο πυρηνικά καύσιμα χαρακτηρίζονται τα υλικά τα οποία περιλαμβάνουν σε ορισμένα ποσοστά τόσο τους σχάσιμους πυρήνες (όπως:  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  και  $^{241}\text{Pu}$ ), όσο και τους πυρήνες οι οποίοι σχάζονται με κατάλληλης ενέργειας νετρόνια (όπως:  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  και  $^{240}\text{Pu}$ ).

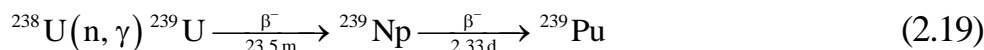
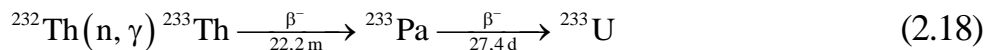
Στους νεότερους τύπους αντιδραστήρων τα πυρηνικά καύσιμα χρησιμοποιούνται σε κεραμική

μορφή οξειδίων (π.χ.  $\text{UO}_2$ ,  $\text{PuO}_2$ ), καρβιδίων (π.χ.  $\text{UC}$ ,  $\text{PuC}$ ), ή νιτριδίων (π.χ.  $\text{UN}$ ).

Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά σε ορισμένες έννοιες που σχετίζονται με τα πυρηνικά καύσιμα.

## 2.6 ΕΠΩΑΣΗ - ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗ

Κατά την ραδιενεργό ενσωμάτωση νετρονίων στους πυρήνες  $^{232}\text{Th}$  και  $^{238}\text{U}$  πραγματοποιούνται οι ακόλουθες πυρηνικές αντιδράσεις:



Κατ' αυτόν τον τρόπο οι πυρήνες  $^{232}\text{Th}$  και  $^{238}\text{U}$  οι οποίοι σχάζονται μόνο με κατάλληλης ενέργειας νετρόνια (βλ. Πίνακα 2.3), μετατρέπονται με ενσωμάτωση νετρονίων και δύο διαδοχικών  $\beta^-$  διασπάσεων σε σχάσιμους πυρήνες, τους  $^{233}\text{U}$  και  $^{239}\text{Pu}$  αντιστοίχως. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως επώαση ή αναπαραγωγή και οι πυρήνες  $^{232}\text{Th}$  και  $^{238}\text{U}$  χαρακτηρίζονται ως επώασιμοι πυρήνες.

Η μετατροπή αυτή περιγράφεται ποσοτικά με το μέγεθος σχέση μετατροπής (CR) (Conversion Rate), το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$(\text{CR}) = \frac{\left\{ \begin{array}{l} \text{Μέσο πλήθος σχασίμων πυρήνων} \\ \text{που παράγονται ανά μονάδα} \\ \text{χρόνου στο σύστημα από μετατροπή} \end{array} \right\}}{\left\{ \begin{array}{l} \text{Μέσο πλήθος σχασίμων πυρήνων} \\ \text{που καταναλίσκονται ανά μονάδα} \\ \text{χρόνου στο σύστημα} \end{array} \right\}} \quad (2.20)$$

Το μέγεθος αυτό, όταν είναι μεγαλύτερο από την μονάδα χαρακτηρίζεται ως σχέση αναπαραγωγής (BR) (Breeding Ratio). Στην περίπτωση αυτή ( $\text{CR} > 1$ ) που ο ρυθμός παραγωγής σχασίμων πυρήνων είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό καταναλώσεως αυτών, το φαινόμενο είναι γνωστό ως αναπαραγωγή, τα συστήματα στα οποία πραγματοποιείται μετατροπή με τον εν λόγω ρυθμό ονομάζονται αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες, και η διαφορά:

$$(\text{CR}) - 1 = (\text{BG}) \quad (2.21)$$

που παριστάνει την καθαρή παραγωγή σχασίμων πυρήνων ανά καταστρεφόμενο σχάσιμο πυρήνα, χαρακτηρίζεται ως κέρδος αναπαραγωγής (BG) (Breeding Gain).

Για να γίνει κατανοητό το πως η σχέση μετατροπής μπορεί να αποκτήσει τιμή  $> 1$ , θα γίνει αναφορά στην απλή περίπτωση αντιδραστήρα μετατροπής στον οποίο οι παραγόμενοι νέοι σχάσιμοι πυρήνες είναι ίδιοι με τους αρχικούς σχάσιμους πυρήνες (π.χ.  $^{239}\text{Pu}/^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ , ή  $^{233}\text{U}/^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$ ). Στην περίπτωση αυτή η σχέση μετατροπής μπορεί να εκφρασθεί ως εξής:

$$(\text{CR}) = (\eta_{\sigma,\pi} - 1) \cdot F \quad (2.22)$$

όπου:  $\eta_{\sigma,\pi}$  είναι το πλήθος των νετρονίων τα οποία εκλύονται κατά μέσον όρο από σχάσεις, ανά νετρόνιο που απορροφάται από σχάσιμο πυρήνα, και

$F$  το ποσοστό του πλεονάσματος των νετρονίων ( $\eta_{\sigma,\pi} - 1$ ) που απορροφούνται από επώασιμους πυρήνες και τους μετατρέπουν σε σχάσιμους πυρήνες.

Αν λοιπόν η τιμή του πλεονάσματος είναι επαρκώς μεγαλύτερη της μονάδας ( $\eta_{\sigma,\pi} - 1 > 0$ ) και η τιμή του συντελεστού  $F$  με κατάλληλη σύνθεση και γεωμετρία του αντιδραστήρα είναι παραπλήσια της μονάδας ( $F \cong 1$ ), τότε σύμφωνα με την σχέση (2.22) θα είναι:

$$(\text{CR}) > 1 \quad (2.23)$$

Για έναν αντιδραστήρα, επί παραδείγματι, που είναι φορτισμένος με  $^{239}\text{Pu}$  και  $^{238}\text{U}$ , και η μέση ενέργεια των νετρονίων που επάγουν τις σχάσεις είναι  $100\text{ keV}$ , είναι  $\eta_{\sigma,\pi} \cong 2,5$ , οπότε αν  $F=0,9$ :

$$(\text{CR}) = (\text{BR}) \cong 1,35 \quad (2.24)$$

Ωστε λοιπόν, είναι δυνατή η κατασκευή δύο κυρίως τύπων αντιδραστήρων οι οποίοι μπορούν να καταναλίσκουν τα τεράστια αποθέματα επωάσιμων πυρήνων  $^{232}\text{Th}$  και  $^{238}\text{U}$ , που υπάρχουν στον φλοιό της Γης, και θα παράγουν κατά την λειτουργία τους, τους σχάσιμους πυρήνες  $^{233}\text{U}$  και  $^{239}\text{Pu}$  αντιστοίχως. Ο πρώτος τύπος  $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$  μπορεί να λειτουργεί και με θερμικά νετρόνια, ενώ ο δεύτερος  $^{238}\text{U}/^{239}\text{Pu}$  θα λειτουργεί με ταχέα νετρόνια. Στην δεύτερη αυτή περίπτωση μάλιστα μπορεί το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων που επάγουν τις σχάσεις να διατηρείται όσο το δυνατό σκληρότερο, οπότε επιτυγχάνονται μεγάλες τιμές του συντελεστού αναπαραγωγής. Ο λόγος αυτός αποτελεί και το κίνητρο για την προτεραιότητα που έχει δοθεί στην κατασκευή του αναπαραγωγικού αντιδραστήρα ταχέων νετρονίων που είναι γνωστός ως LMFBR: Liquid Metal Fast Breeder Reactor (αναπαραγωγικός αντιδραστήρας ταχέων νετρονίων, ψυχόμενος με τετηγμένο μέταλλο) (βλ. παράγραφο 3.10.1).

## 2.7 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΥΚΛΟΥ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

### 2.7.1 Τύποι κύκλου καυσίμου

Ο κύκλος πυρηνικού καυσίμου είναι η προοδευτική διαδικασία σταδίων στη χρησιμοποίηση σχάσιμων υλικών, από την αρχική εξόρυξη του ουρανίου (ή θορίου) μέχρι την τελική εναπόθεση του υλικού που απομακρύνεται από τον αντιδραστήρα. Καλείται κύκλος γιατί στη γενική περίπτωση, ένα μέρος του υλικού που απομακρύνεται από τον αντιδραστήρα μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί, ή να ανακυκλωθεί.

Οι κύκλοι καυσίμου διαφέρουν στη φύση ανάλογα με το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιείται, στην ιστορία του καυσίμου στον αντιδραστήρα, και του τρόπου διεύθησης του καυσίμου που απομακρύνεται από τον αντιδραστήρα στο τέλος της ζωής του (γνωστό ως αναλωθέν καύσιμο). Για τους αντιδραστήρες καύσιμου-ουράνιου, που σημαίνει ουσιαστικά όλους τους εμπορικούς αντιδραστήρες, η κύρια διαφορά είναι η διάσπαση του πλουτωνίου και άλλων ακτινίδων\* που παράγονται αλυσιδωτά από συλλήψεις νετρονίου και ακτίνων βήτα αρχίζοντας με τη σύλληψη νετρονίου στο  $^{238}\text{U}$  ώστε να παραχθεί  $^{239}\text{Pu}$ . Οι ακτινίδες είναι σημαντικές γιατί (1) μερικές, ειδικά όπως το  $^{239}\text{Pu}$ , είναι σχάσιμες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν πυρηνικό καύσιμο σε άλλους αντιδραστήρες ή σε βόμβες, και (2) πολλές από τις ακτινίδες έχουν μεγάλους χρόνους ημίσειας ζωής, περιπλέκοντας τα προβλήματα διάθεσης πυρηνικών αποβλήτων. Οι τρεις μεγαλύτερες κατηγορίες κύκλου πυρηνικού καυσίμου είναι οι ακόλουθες:

#### **-Κύκλος καυσίμου μιας φοράς-διαγραφής (Once-through fuel cycle)**

Αυτός μερικές φορές καλείται ως ανοικτός κύκλος καυσίμου ή ως κύκλος <<απόρριψης>>. Στην πραγματικότητα δεν είναι κύκλος, αφού το αναλωθέν καύσιμο

---

\*Οι ακτινίδες είναι στοιχεία με ατομικούς αριθμούς  $Z$  μεγαλύτερους από ή ίσους με αυτόν του ακτινίου αριθμούς ( $Z = 89$ ) (Η ορολογία δεν είναι ενιαία και, μερικές φορές, το ακτίνιο δεν συμπεριλαμβάνεται ανάμεσα στις <<ακτινίδες>>). Το ποσειδώνιο ( $Z = 93$ ), το αμερίκιο ( $Z = 95$ ), και το κιούριο ( $Z = 96$ ) αναφέρονται ως δευτερεύουσες ακτινίδες λαμβάνοντας υπόψη τη χαμηλή περιεκτικότητά τους στο αναλωθέν καύσιμο, συγκρινόμενες με το ουράνιο ( $Z = 92$ ) και το πλουτώνιο ( $Z = 94$ ). Τα στοιχεία με ατομικούς αριθμούς μεγαλύτερους από το 92 καλούνται υπερουράνια στοιχεία.

αντιμετωπίζεται ως απόβλητο το οποίο απομακρύνεται από τον αντιδραστήρα και δεν χρησιμοποιείται περαιτέρω. Το  $^{239}\text{Pu}$  και άλλες ακτινίδες αποτελούν μέρος αυτών των αποβλήτων.

#### **-Κύκλος επανεπεξεργαζόμενου καυσίμου (Reprocessing fuel cycle)**

Στον παρόντα τυποποιημένο κύκλο επανεπεξεργαζόμενου καυσίμου, το πλουτόνιο και το ουράνιο εξάγονται χημικά από το αναλωθέν καύσιμο. Το πλουτόνιο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία πρόσθετου καυσίμου, συχνά αναμειγνυόμενο με τα οξειδία ουρανίου για να παραχθεί το καύσιμο αναμειγμένων-οξειδίων (MOX) για χρήση στους θερμικούς αντιδραστήρες. Αυτό παρέχει πρόσθετη ενέργεια και αλλάζει τη φύση των αποβλήτων. Στις πιθανές παραλλαγές του κύκλου επανεπεξεργαζόμενου καυσίμου, οι δευτερεύουσες ακτινίδες θα εξάγονταν επίσης, και στη συνέχεια αυτές και το πλουτόνιο θα ενσωματώνονταν σε φρέσκο καύσιμο για τους αντιδραστήρες ταχείας αντίδρασης.

#### **-Αναπαραγωγικός κύκλος (Breeding cycle)**

Για αυτόν τον κύκλο, ο αντιδραστήρας σχεδιάζεται έτσι ώστε να υπάρχει περισσότερο σχάσιμο υλικό (κυρίως  $^{239}\text{Pu}$ ) στο αναλωθέν καύσιμο από ότι υπήρχε στο καύσιμο που είχε εισαχθεί στον αντιδραστήρα. Όπως και στον κύκλο επανεπεξεργαζόμενου καυσίμου, το πλουτόνιο μπορεί να απομακρυνθεί και να χρησιμοποιηθεί σε έναν άλλο αντιδραστήρα. Με την ακολουθία τέτοιων σταδίων, η ενέργεια σχάσεων εξάγεται ουσιαστικά από ένα πλούσιο κομμάτι μίγματος ουρανίου σε  $^{238}\text{U}$ , και όχι μόνο από μία μικρή ποσότητα του συστατικού  $^{235}\text{U}$ , αυξάνοντας την εκλυόμενη ενέργεια από δοθείσα ποσότητα ουρανίου κατά ένα παράγοντα που θα μπορούσε, προσεγγιστικά, να φτάσει το 100.

Μπορεί να διαπιστωθεί ότι το ουράνιο αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της μάζας των πυρηνικών αποβλήτων στον κύκλο μιας φοράς διαγραφής. Το οποίο διαχωρίζεται στους κύκλους επανεπεξεργασίας και αναπαραγωγής για πιθανή επαναχρησιμοποίηση ως καύσιμο αντιδραστήρων.

Στην παρούσα φάση, όλοι οι αμερικανικοί εμπορικοί αντιδραστήρες και η πλειοψηφία των αντιδραστήρων παγκοσμίως λειτουργούν με κύκλο μιας φοράς διαγραφής, παρόλο που μερικές χώρες, κυρίως η Γαλλία, έχουν μεγάλης κλίμακας επανεπεξεργασίας προγράμματα με τη χρήση πλουτωνίου σε μορφή καυσίμου MOX. Πρέπει να σημειωθεί, φυσικά, ότι ακόμη και στον κύκλο καυσίμου μιας φοράς διαγραφής, η δυνατότητα τελικά το καύσιμο να χρησιμοποιηθεί σε ένα κύκλο επανεπεξεργασίας παραμένει έως ότου διασπαστεί τελείως το καύσιμο. Καμία χώρα δεν χρησιμοποιεί τον αναπαραγωγικό κύκλο αυτή τη στιγμή, αν και η Γαλλία εμφανίστηκε στην αρχή μιας προσπάθειας τέτοιου προγράμματος με τους αντιδραστήρες της Phenix και Superphenix, αλλά αυτή η προσπάθεια εγκαταλείφθηκε, τουλάχιστον προς το παρόν.

Αν και ουσιαστικά όλοι οι παγκόσμια εμπορικοί αντιδραστήρες χρησιμοποιούν καύσιμο ουρανίου, υπάρχει συνεχόμενο ενδιαφέρον στη χρήση καυσίμου θορίου\*. Σε ένα κύκλο καυσίμου θορίου, το θόριο (στη φύση  $^{232}\text{Th}$ ) χρησιμεύει ως το κύριο καύσιμο. Η σύλληψη νετρονίου και η διάσπαση βήτα έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή  $^{233}\text{U}$ , το οποίο έχει ευνοϊκές ιδιότητες ως σχάσιμο καύσιμο. Για να αρχίσει ο κύκλος θορίου, ένα σχάσιμο υλικό όπως το  $^{235}\text{U}$  ή το  $^{239}\text{Pu}$  χρειάζεται, αλλά μόλις αρχίσει η λειτουργία του

---

\*Ο υψηλής θερμοκρασίας, αερόψυκτος, αντιδραστήρας γραφίτη Fort St. Vrain στο Colorado, ο οποίος έκλεισε το 1989, είναι μία από τις διάφορες εξαιρέσεις σχετικά με τη μη αποκλειστική χρήση του ουρανίου, χρησιμοποιώντας θόριο σαν μέρος του καυσίμου του.

κύκλου, μπορεί να γίνει βιώσιμος μόνο εάν παράγεται αρκετό  $^{233}\text{U}$  ή τουλάχιστον ικανό να αντικαταστήσει το αρχικό σχάσιμο υλικό. Συχνά υποστηρίζεται ότι ένας κύκλος θορίου είναι προτιμητέος από έναν κύκλο ουρανίου, επειδή αν το  $^{233}\text{U}$  εξαχθεί από το αναλωθέν καύσιμο, μπορεί να <<μετουσιωθεί>> με την ανάμιξή του με το φυσικό ουράνιο σχηματίζοντας καύσιμο που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βόμβα. Υλικό για το σχηματισμό βόμβας μπορεί να παραχθεί μόνο μετά τον ισοτοπικό διαχωρισμό του  $^{233}\text{U}$ . Αντίθετα, υλικό για το σχηματισμό βόμβας μπορεί να παραχθεί από αντιδραστήρα τροφοδοτούμενο με καύσιμο ουρανίου με χημικό διαχωρισμό του πλουτωνίου. Ισοτοπικός διαχωρισμός είναι τεχνικά πιο δύσκολος από τον χημικό διαχωρισμό. Γι' αυτό ο κύκλος καυσίμου θορίου μπορεί να είναι πολλαπλά πιο ασφαλής από τον κύκλο καυσίμου ουρανίου, εκτός, για την τελευταία περίπτωση, το πλουτώνιο είναι καλά προστατευμένο από κάποια κακόβουλη ενέργεια ή κλοπή.

### **2.7.2 Στάδια κύκλου καυσίμου**

Μια σχηματική απεικόνιση του κύκλου καυσίμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6, ο οποίος δείχνει εναλλακτικές διαδρομές, με ή χωρίς επανεπεξεργασία. Τα στάδια στον κύκλο καυσίμου που προηγούνται, της εισαγωγής του καυσίμου στον αντιδραστήρα αναφέρονται σαν αρχική φάση του κύκλου καυσίμου. Τα στάδια που ακολουθούν και περιλαμβάνουν την αφαίρεση του καυσίμου από τον αντιδραστήρα αναφέρονται σαν τελική φάση του κύκλου καυσίμου. Στην παρούσα κατάσταση, υπάρχει μόνο μία εντοπισμένη τελική φάση στο κύκλο καυσίμου στις Η.Π.Α., δεδομένου ότι ουσιαστικά όλα τα εμπορικά αναλωθέντα καύσιμα συσσωρεύονται σε δεξαμενές ψύξης ή σε βαρέλια αποθήκευσης στις περιοχές γύρω από τους αντιδραστήρες.

Η εφαρμογή ενός σχεδίου εναπόθεσης αναλωθέντος καυσίμου, ή σχεδίου επανεπεξεργασίας και εναπόθεσης αποβλήτου, αντιπροσωπεύει το «κλείσιμο» του κύκλου καυσίμου. Αυτό το κλείσιμο θεωρείται από πολλούς μία βασική συνθήκη για την αυξανόμενη χρήση της πυρηνικής ενέργειας στις Η.Π.Α. και ίσως και για τη συνεχιζόμενη χρήση της για τις επόμενες δεκαετίες.

## **2.8 ΑΡΧΙΚΗ ΦΑΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

### **2.8.1 Εξόρυξη και άλεση ουρανίου**

Η συγκέντρωση του ουρανίου ποικίλει σημαντικά ανάμεσα στους γεωλογικούς σχηματισμούς. Η μέση συγκέντρωση στη γήινη επιφάνεια είναι περίπου 3 μέρη ανά εκατομμύριο (PPM) κατά βάρος, αλλά επεκτείνεται από κάτι λιγότερο από 1 ppm μέχρι τη γειτονιά των 500000 ppm\*.

Το ουράνιο στα ορυκτά είναι κυρίως υπό μορφή οξειδίου του ουρανίου,  $\text{U}_3\text{O}_8$ . Στη «συμβατική» εξόρυξη, το ορυκτό εξάγεται από ανοικτά κοιλάματα ή από υπόγεια ορυχεία, το  $\text{U}_3\text{O}_8$  υποβάλλεται έπειτα στη διαδικασία άλεσης με τη σύνθλιψη του ορυκτού και στο ξέπλυμα με οξύ, και το  $\text{U}_3\text{O}_8$  ανακτάται από το υγρό μείγμα και

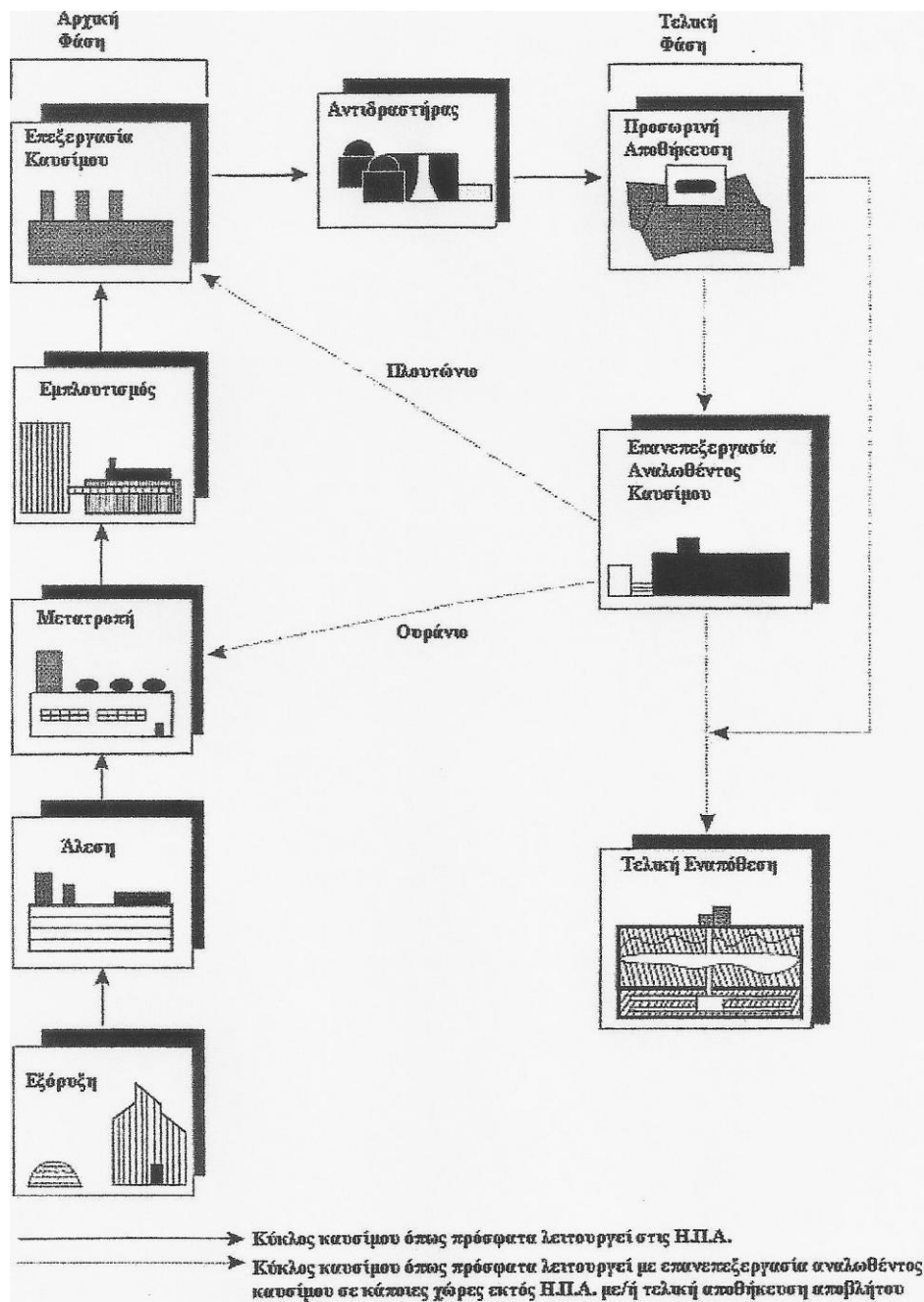
---

\*Για παράδειγμα, μια εναπόθεση στον Καναδά προσδιορίζεται ότι έχει ζώνες άνω του 50%  $\text{U}_3\text{O}_8$ , το οποίο σημαίνει πάνω από 42% ουράνιο.



ξεραίνεται. Το συγκεντρωμένο  $U_3O_8$  είναι γνωστό ως yellowcake\*. Σε μία <<μη συμβατική>> μέθοδο, κατάλληλη μόνο για συγκεκριμένους τύπους αποθέσεων ουρανίου, το  $U_3O_8$  εξάγεται από κατευθείαν ξέπλυμα (π.χ. με τη διοχέτευση κάποιου χημικού παράγοντα μέσα στο μετάλλευμα χωρίς φυσική εξαγωγή του πετρώματος).

Στις χαμηλές συγκεντρώσεις, η περιεκτικότητα σε ουράνιο εκφράζεται σε όρους του βαθμού ουρανίου, ως επί τοις εκατό κατά βάρος ουρανίου ή  $U_3O_8$ . Έτσι, μετάλλευμα το οποίο περιέχει 1000 ppm ουρανίου αντιστοιχεί σε βαθμούς 0,100% U ή 0,118%  $U_3O_8$ .



Σχήμα 2.6 Απεικόνιση του κύκλου πυρηνικού καυσίμου.

Τα υπολείμματα του σταδίου της άλεσης, αντιπροσωπεύουν το υπόλοιπο του μεταλλεύματος μετά την εξαγωγή του  $U_3O_8$ , είναι τα λεγόμενα κατάλοιπα άλεσης. Όλοι

\*Το  $U_3O_8$  δεν είναι κίτρινο στην καθαρή μορφή του. Το yellowcake περιέχει περίπου 85%  $U_3O_8$ , και το κίτρινο χρώμα του προκύπτει από ένα άλλο συστατικό του ουρανίου στο μετάλλευμα.

οι απόγονοι ουράνιου, αρχίζοντας από το  $^{230}\text{Th}$  βρίσκονται στα κατάλοιπα της άλεσης. Το ραδιονουκλίδιο  $^{230}\text{Th}$  έχει χρόνο ημίσειας ζωής 75400 χρόνια και γι' αυτό παραμένει το κύριο κατάλοιπο της σειράς ουρανίου για μεγάλη χρονική περίοδο. Αυτό οδηγεί στη συνεχή παραγωγή του ραδονίου, το οποίο απορρέει μερικώς στην ατμόσφαιρα. Φυσικά, αυτή η διαδικασία δεν αυξάνει το ρυθμό παραγωγής ραδονίου στη φύση, αλλά το ραδόνιο στα κατάλοιπα μπορεί πιο εύκολα να φτάσει στην ατμόσφαιρα από ότι το ραδόνιο του υπόγειου μεταλλεύματος. Μία περίοδο, αυτό θεωρήθηκε από μερικούς σαν συγκρότηση ενός σημαντικού περιβαλλοντικού κινδύνου, και ακόμη θεωρήθηκε σημαντικό για να ληφθούν επανορθωτικά μέτρα για να περιοριστούν οι εκπομπές ραδονίου από τα κατάλοιπα (χρησιμοποίηση στρωμάτων κάλυψης υλικού για την παρεμπόδιση διαφυγής του ραδονίου). Ωστόσο, το ενδιαφέρον για το ζήτημα έχει μειωθεί δεδομένου ότι έχει γίνει προφανές ότι οι εκθέσεις στο <<κανονικό>> ραδόνιο εσωτερικών χώρων δημιουργούν ένα πιο σοβαρό πρόβλημα, σε επίπεδο αριθμού ανθρώπων που έχουν επηρεαστεί και μεγεθών συγκεντρώσεων ραδονίου στις οποίες εκτίθενται.

## **2.8.2 Εμπλουτισμός του ουράνιου**

### **Προετοιμασία για τον εμπλουτισμό: Μετατροπή**

Υπάρχουν ποικίλες προσεγγίσεις στον εμπλουτισμό του ουράνιου, κάθε μία εκμεταλλεύεται τη μικρή διαφορά μάζας μεταξύ  $^{235}\text{U}$  και  $^{238}\text{U}$ . Στην πιο χρησιμοποιημένη αυτών των διαδικασιών, είναι απαραίτητη η ύπαρξη του ουρανίου σε αέρια μορφή. Για αυτό τον σκοπό, το  $\text{U}_3\text{O}_8$  μετατρέπεται χημικά σε αέριο εξαφθοριούχο ουράνιο,  $\text{UF}_6$ . Αυτή είναι η ένωση που επιλέχτηκε, επειδή το  $\text{UF}_6$  βρίσκεται σε αέρια μορφή σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από οποιαδήποτε άλλη ένωση ουρανίου σε αέρια κατάσταση.

### **Βαθμοί εμπλουτισμού**

Το φυσικό ουράνιο βρίσκεται σε μια ισοτοπική αφθονία με αριθμό ατόμων 0,0055%  $^{234}\text{U}$ , 0,720%  $^{235}\text{U}$  και 99,275%  $^{238}\text{U}$ . Στη συνέχεια της αναφοράς του ισοτοπικού εμπλουτισμού του ουράνιου, θα ακολουθηθεί η τυποποιημένη πρακτική της περιγραφής της ποσότητας του  $^{235}\text{U}$  σε όρους μάζας από ότι σε, όπως είναι κοινό σε πολλές άλλες επιστημονικές εφαρμογές, αριθμού ατόμων. Για το φυσικό ουράνιο, η κατά βάρος σύσταση του  $^{235}\text{U}$  είναι 0,711%. Η παρουσία μικρού ποσού σε  $^{234}\text{U}$  συχνά αγνοείται, γιατί διορθώσεις της τάξης του  $10^{-4}$  ή λιγότερο είναι αμελητέες.

Το σχάσιμο νουκλίδιο στους θερμικούς αντιδραστήρες είναι το  $^{235}\text{U}$ . Για τους αντιδραστήρες που απαιτούν ουράνιο με υψηλότερο ποσοστό  $^{235}\text{U}$  όπου βρίσκεται στο φυσικό ουράνιο, ο εμπλουτισμός είναι απαραίτητος. Αυτό βέβαια αφορά την περίπτωση των αντιδραστήρων ελαφρού ύδατος (Light Water Reactors LWRs). Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε στους LWRs στο παρελθόν είχε εμπλουτιστεί με συγκεντρώσεις  $^{235}\text{U}$  που κυμαίνονται μεταξύ λιγότερο από 2% μέχρι περισσότερο από 4%. Ο προσδοκώμενος μέσος όρος για τις Η.Π.Α., για συσσωρευτική παραγωγή μέχρι το 2010, ήταν 3,0% για καύσιμο αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος (BWR: Boiling Water Reactor) και 3,75% για καύσιμο αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος (PWR: Pressurized Water Reactor).

Το υλικό που χρησιμοποιείται στους LWRs είναι γνωστό ως ελαφρώς εμπλουτισμένο

ουράνιο, σε αντίθεση με το υψηλά εμπλουτισμένο ουράνιο που χρησιμοποιείται για πυρηνικά όπλα και για αντιδραστήρες υποβρυχίων. Εντός του πυρήνα ενός δοθέντος αντιδραστήρα, οι εμπλουτισμοί ποικίλουν με την τοποθεσία συγκεντρώσεων καυσίμου. Γενικά, υπάρχει μια γενική τάση προς τη χρησιμοποίηση καυσίμων με υψηλότερους αρχικούς εμπλουτισμούς.

Τα προϊόντα της διαδικασίας εμπλουτισμού είναι το εμπλουτισμένο υλικό και το απεμπλουτισμένο ουράνιο, το οποίο μερικές φορές καλείται κατάλοιπο εμπλουτισμού. Τυπικά, τα κατάλοιπα εμπλουτισμού περιέχουν υπόλειμμα  $^{235}\text{U}$  μεταξύ 0,2% έως 0,35%. Καθώς πηγαίνουμε σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις  $^{235}\text{U}$  στα κατάλοιπα, η κατανάλωση του μεταλλεύματος ουρανίου μειώνεται, αλλά το κόστος εμπλουτισμού αυξάνεται. Έτσι, υπάρχει ένα ισοζύγιο.

Το απεμπλουτισμένο ουράνιο μερικές φορές χρησιμοποιείται για ειδικές εφαρμογές. Η χρήση του σε οβίδες διάτρησης τεθωρακισμένων, όπου η υψηλή πυκνότητα του ουρανίου είναι συμφέρουσα ( $\rho \approx 19 \text{ g/cm}^3$ ), οδήγησε στη δημόσια ανησυχία σχετικά με τους περιβαλλοντικούς κινδύνους. Ωστόσο, το απεμπλουτισμένο ουράνιο έχει χαμηλότερη ειδική δραστηριότητα από ότι το φυσικό ουράνιο, και δεν υπάρχει κανένα στοιχείο αξιολογού κινδύνου ακτινοβολίας εκτός από τους επιβάτες ενός κλειστού οχήματος που χτυπήθηκε από μια οβίδα και η οποία ατμοποιείται μερικώς μέσα σε αυτό.

### Μέθοδοι για τον εμπλουτισμό

Οι κύριες μέθοδοι εμπλουτισμού από άποψη παρελθοντικής ή προσδοκώμενης μελλοντικής χρήσης είναι οι εξής:

**-Αερίωδης διάχυση.** Η μέση κινητική ενέργεια των μορίων σε ένα αέριο είναι ανεξάρτητη του μοριακού βάρους  $M$  του αερίου και εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του. Στην ίδια θερμοκρασία, οι μέσες ταχύτητες είναι επομένως αντιστρόφως ανάλογες με το  $\sqrt{M}$ . Για το ουράνιο υπό μορφή  $\text{UF}_6$ , η αναλογία από τις ταχύτητες των δύο ισοτοπικών ειδών είναι 1,0043. Εάν ένα δείγμα αερίου ρεύματος περάσει μέσα από ένα φράγμα με μικρά ανοίγματα, τότε λίγο περισσότερα μόρια  $^{235}\text{U}$  από ότι μόρια  $^{238}\text{U}$  περνούν μέσα από το φράγμα, αυξάνοντας ελάχιστα τη συγκέντρωση  $^{235}\text{U}$ , μέσα στο αέριο. Ο λόγος του  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  πριν και μετά το πέρασμα από το φράγμα είναι ο λόγος εμπλουτισμού  $\alpha$ . Η ιδανική ή μέγιστη τιμή του δίνεται από το λόγο ταχυτήτων  $\alpha = 1,0043$ . Ωστόσο, δεν μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός των σταδίων διάχυσης που χρειάζεται ώστε να επιτευχθεί ένας δεδομένος εμπλουτισμός εκφραζόμενος σε όρους δυνάμεων του  $\alpha$ , γιατί η ιδανική τιμή δεν επιτυγχάνεται στην πράξη και γιατί είναι απαραίτητη η συνεχής ανακύκλωση του λιγότερου εμπλουτισμένου μέρους του ρεύματος. Τυπικά, εάν αρχίσουμε με φυσικό ουράνιο (0,71%) και με απεμπλουτισμένα κατάλοιπα στο 0,3%, βρίσκεται ότι χρειάζονται γύρω στα 1200 στάδια εμπλουτισμού για να επιτευχθεί εμπλουτισμός στο 4%.

**-Φυγοκεντρικός διαχωρισμός.** Κάθε ρευστό - υγρό ή αέριο - μπορεί να διαχωριστεί με υψηλής ταχύτητας φυγοκέντριση. Η φυγοκεντρική δράση προκαλεί στα βαρύτερα συστατικά υψηλότερες συγκεντρώσεις σε μεγάλες ακτίνες. Όπως συμβαίνει και στην αερίωδη διάχυση, μόνο ένα μικρό κέρδος επιτυγχάνεται σε κάθε στάδιο, και υψηλοί εμπλουτισμοί του  $\text{UF}_6$  επιτυγχάνονται σε πολλαπλά φυγοκεντρικά στάδια, με ένα ελάχιστο αποτέλεσμα εμπλουτισμού για κάθε στάδιο που αποτελεί την είσοδο για το επόμενο. Οι φυγοκεντρίσεις που χρησιμοποιούνται για τον εμπλουτισμό του ουρανίου

είναι περιστροφικοί κύλινδροι. Το ουράνιο που είναι ελάχιστα εμπλουτισμένο σε  $^{238}\text{U}$  (και απεμπλουτισμένο σε  $^{235}\text{U}$ ) μπορεί να εξαχθεί από την εξωτερική περιοχή του κυλίνδρου και να επανέλθει σε ένα πρώιμο στάδιο της φυγοκεντρικής διάταξης. Το ουράνιο ελάχιστα εμπλουτισμένο σε  $^{235}\text{U}$  μπορεί να εξαχθεί από τις περιοχές κοντά στο κέντρο και να χρησιμοποιηθεί σαν είσοδος στο επόμενο υψηλότερο στάδιο στη γραμμή των φυγοκεντρικών μονάδων. Υψηλοί εμπλουτισμοί του  $\text{UF}_6$  επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας πολλαπλά φυγοκεντρικά στάδια. Η απαιτούμενη ενέργεια για δεδομένο βαθμό εμπλουτισμού είναι πολύ λιγότερη στο φυγοκεντρικό διαχωρισμό από ότι στο διαχωρισμό διάχυσης.

**-Αεροδυναμικές διαδικασίες.** Αυτές οι διαδικασίες εκμεταλλεύονται τα αποτελέσματα των φυγοκεντρικών δυνάμεων, χωρίς όμως τον περιστροφικό φυγοκεντρισμό. Το αέριο - τυπικά το  $\text{UF}_6$  ανακατεμένο με το υδρογόνο - εκτείνεται μέσω ενός ανοίγματος, και η ροή του ρεύματος του αερίου εκτρέπεται από ένα φράγμα, προκαλώντας το να κινηθεί σε ένα κυρτό μονοπάτι. Τα πιο ογκώδη μόρια χρειάζονται κατά μέσον όρο μια υψηλότερη ακτίνα κυρτότητας από ότι τα ελαφρύτερα μόρια, και τα κομματίδια εμπλουτισμένα σε  $^{235}\text{U}$  επιλέγονται κατά προτίμηση με αυτό τον φυσικό διαχωρισμό. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται επιτυγχάνοντας μεγαλύτερους εμπλουτισμούς. Η διαδικασία ακροφυσίου αναπτύχθηκε στη Γερμανία ονομαζόμενη ως διαδικασία Becker ή ως διαδικασία ακροφυσίου jet. Μία παραλλαγή διαφορετικής γεωμετρίας για την κίνηση του αερίου ρεύματος, ονομαζόμενη διαδικασία Helikon έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί στη Νότια Αφρική.

**-Ηλεκτρομαγνητικός διαχωρισμός.** Όταν τα ιόντα της ίδιας κατάστασης φόρτισης επιταχύνονται από την ίδια διαφορά δυναμικού, η ενέργεια είναι η ίδια και η ακτίνα καμπυλότητας στο μαγνητικό πεδίο είναι ανάλογη του  $\sqrt{M}$ . Έτσι, είναι πιθανό να διαχωριστούν σε διαφορετικά είδη με μαγνητικό τρόπο. Αυτός ο διαχωρισμός μπορεί να γίνει με ιόντα ουρανίου και για αυτό δεν χρειάζεται πρωταρχικά μετατροπή σε  $\text{UF}_6$ . Συνολικά, αυτή η προσέγγιση, δίνει χαμηλή παραγωγή με υψηλό κόστος ενέργειας, αλλά έχει το πλεονέκτημα της υιοθέτησης μίας σχετικά άμεσης τεχνολογίας.

**-Εμπλουτισμός με λέιζερ.** Τα επίπεδα ατομικής ενέργειας διαφορετικών ισοτόπων διαφέρουν ελάχιστα. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαχωρίσει το  $^{235}\text{U}$  από το  $^{238}\text{U}$ , αρχίζοντας με το ουράνιο είτε σε ατομική ή μοριακή μορφή. Για παράδειγμα, στη μέθοδο διαχωρισμού ισοτόπων ατμού με λέιζερ (atomic vapor laser isotope separation, AVLIS, method), το ουράνιο βρίσκεται στη μορφή καυτού ατμού. Το λέιζερ που συντονίζεται ακριβώς στο κατάλληλο μήκος κύματος χρησιμοποιείται για να διεγείρει άτομα  $^{235}\text{U}$ , αλλά όχι άτομα  $^{238}\text{U}$ , σε επίπεδα ενέργειας διαφόρων ηλεκτρονιοβολτ άνω του γειωμένου επιπέδου. Ένα επιπρόσθετο λέιζερ χρησιμοποιείται για να ιονίσει τα διεγερμένα άτομα  $^{235}\text{U}$ . Τα ιονισμένα άτομα  $^{235}\text{U}$  μπορούν να διαχωριστούν από τα μη-ιονισμένα άτομα  $^{238}\text{U}$  από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Μία εναλλακτική μέθοδο της AVLIS είναι η μέθοδος διαχωρισμού ισοτόπων με διέγερση από λέιζερ (separation of isotopes by laser excitation, SILEX, method). Είναι βασισμένο στον εκλεκτικό διαχωρισμό του  $\text{UF}_6$  (αέριο) στο  $\text{UF}_5$  (στερεό). Τα κόστη στην ενέργεια του εμπλουτισμού με λέιζερ είναι χαμηλότερα από αυτά άλλων μεθόδων εμπλουτισμού, αλλά μια πολύπλοκη τεχνολογία λέιζερ απαιτείται, και, μέχρι σήμερα, δεν υπάρχουν εμπορικές εγκαταστάσεις για εμπλουτισμό ουρανίου με λέιζερ. Μόλις κυριαρχήσει, η τεχνική λέιζερ αναμένεται να είναι σχετικά φτηνή. Στην αρνητική πλευρά, έχουν υπάρξει φόβοι

ότι εάν η τεχνική διαχωρισμού με λέιζερ αναπτυχθεί ικανοποιητικά, τότε μπορεί να καταστήσει εύκολο σε μικρές χώρες ή σε καλά οργανωμένες τρομοκρατικές ομάδες τον εμπλουτισμό ουρανίου για πυρηνικά όπλα.

### **2.8.3 Επεξεργασία καυσίμου**

Τα περισσότερα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος βρίσκονται με τη μορφή διοξειδίου του ουρανίου ( $UO_2$ ), το οποίο μερικές φορές καλείται <<οξείδιο του ουρανίου>>. Αυτό δεν είναι ένα μοναδικό συστατικό, αλλά ένα μίγμα οξειδίων ( $UO_n$ ), όπου  $n$  τυπικά εκτείνεται από 1,9 έως 2,1. Το  $UO_2$  παράγεται από τη χημική μετατροπή του εμπλουτισμένου  $UF_6$ . Στη συνέχεια επεξεργάζεται μαζί με καθαρή πυρίτιδα συμπιεζόμενο και συμπυκνούμενο προκειμένου να μορφοποιηθεί σε τραχιά σφαιρίδια. Κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης, η περιεκτικότητα σε οξυγόνο των καυσίμων μπορεί να ρυθμιστεί. Τα σφαιρίδια διορθώνονται σε μέγεθος, μειώνοντας τις ανοχές με τη λείανση. Τα σφαιρίδια φορτώνονται πάνω στους ράβδους καυσίμου από ζιρκόνιο όπου είναι τακτοποιημένα σε πίνακα σχηματίζοντας το συγκρότημα καυσίμου. Ο πυρήνας του καυσίμου αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό τέτοιων συγκροτημάτων.

### **2.8.4 Άλλοι τύποι καυσίμων**

Η εστίαση εδώ ήταν στο  $UO_2$ , το οποίο είναι συνήθως το καύσιμο για τους LWRs. Άλλοι τύποι καυσίμων που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, αν και, δεν χρησιμοποιούνται ευρέως προς το παρόν, είναι οι εξής:

**-Μείγμα οξειδίων καυσίμου (Mixed-oxide fuel, MOX).** Το καύσιμο MOX, είναι ένα μείγμα οξειδίων ουρανίου και πλουτωνίου, χρησιμοποιεί πλουτώνιο προκειμένου να εκμεταλλευτεί το ενεργειακό περιεχόμενο, μειώνοντας τα αποθέματα για πιθανά οπλικά υλικά ή και τα δύο.

**-Καύσιμα μεταλλικών κραμάτων (Metal alloy fuels).** Μεταλλικό καύσιμο, στη μορφή κραμάτων ουρανίου, παρέχουν μία εναλλακτική λύση προς τα καύσιμα οξειδίων όπου είναι ευκολότερη η επανεπεξεργασία.

**-Μικροσφαιρικά σωματίδια καυσίμου (Microsphere fuel particles).** Η υψηλής θερμοκρασίας ψυχόμενοι με αέριο αντιδραστήρες χρησιμοποιούν οξείδιο ουρανίου ή θορίου σε μορφή πολύ μικρών σφαιρών, με πολλαπλά στρώματα εξωτερικής προστασίας. Αυτά είναι τα λεγόμενα σωματίδια καυσίμου TRISO.

**-Καύσιμα θορίου (Thorium fuels).** Ένας κύκλος καυσίμου βασιζόμενος στο Th-232 το επώασιμο καύσιμο και στο U-233 το σχάσιμο καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συμπληρώσει τα αποθέματα ουρανίου. Έχει το πλεονέκτημα παραγωγής λίγου πλουτωνίου και με αυτό τον τρόπο ελαττώνει την ποσότητα αποβλήτων περιορίζοντας τα προβλήματα πολλαπλασιασμού τους.

**-Τηγμένο άλας (Molten salt).** Παρόλο, που προς το παρόν όλοι οι εμπορικοί εν λειτουργία αντιδραστήρες χρησιμοποιούν καύσιμο σε στερεά μορφή, είναι επίσης πιθανή η ύπαρξη καυσίμου σε υγρή μορφή όπως το υγρό φθορίδιο ουρανίου, αναμεμιγμένο με άλλα υγρά φθορίδια, χρησιμοποιούμενο σε αντιδραστήρες τετηγμένου άλατος.

## 2.9 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

### 2.9.1 Παραχθείσα ενέργεια ως μέτρο χρησιμότητας καυσίμου

#### **Θερμική απόδοση αντιδραστήρων των ΗΠΑ**

Η θερμική απόδοση ενός αντιδραστήρα είναι ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς την ολική παραγόμενη θερμική ενέργεια. Από το 1973, η μέση θερμική απόδοση των αντιδραστήρων των ΗΠΑ κυμαίνεται μεταξύ 30,6% και 32,1% σύμφωνα με τις αναφορές του υπουργείου ενέργειας. Έχει υπάρξει μια βαθμιαία βελτίωση με το χρόνο, και από το 1985 ήταν πάνω από 31,5%, φθάνοντας το 32,1% για τα έτη 1996–2002. Θα χρησιμοποιήσουμε το κατά προσέγγιση μέγεθος του 32% ως ονομαστική μέση απόδοση των LWR.

#### **Βασική μονάδα μέτρησης της παραχθείσας ενέργειας: GWDT ανά MTHM**

Ένα χρήσιμο μέτρο της επίδοσης του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου είναι η αποκτηθείσα ενέργεια ανά μονάδα μάζας καυσίμου, γνωστή ως παραχθείσα ενέργεια του καυσίμου. Η παραχθείσα ενέργεια είναι κοινώς καθορισμένη σε megawatt-days ή gigawatt-days θερμικής παραγωγής ανά μετρικό τόνο βαρέως μετάλλου (metric tonne of heavy metal) ή διαφορετικά MWDT/MTHM ή GWDT/MTHM. Αυτή η έκφραση είναι δύσχρηστη για επαναλαμβανόμενη χρήση, και για αυτό αναπαριστούμε GWDT/MTHM σε μία πιο συμπαγή μορφή ως GWd/t (gigawatt-days per tonne). Σε τυποποιημένες ενεργειακές μονάδες,  $1 \text{ GWd} = 8,64 \times 10^{13} \text{ joules (J)}$ .

Για τους αντιδραστήρες των Η.Π.Α. όπως και στους περισσότερους αντιδραστήρες οπουδήποτε αλλού, το <<βαρύ μέταλλο>> στο συνηθισμένο καύσιμο είναι το ουράνιο. Το καύσιμο είναι στη μορφή του οξειδίου του ουρανίου ( $\text{UO}_2$ ). Περίπου 12% της μάζας του καυσίμου είναι οξυγόνο και, για αυτό, υπάρχει μια διάκριση μεταξύ της μάζας του βαρέως μετάλλου και της μάζας του καυσίμου. Το βαρύ μέταλλο στο αναλωθέν καύσιμο που απομακρύνεται από τον αντιδραστήρα είναι ακόμη πρωταρχικά ουράνιο, αλλά επίσης περιλαμβάνει ισότοπα πλουτωνίου και – σε μικρή έκταση – άλλα υπερουράνια στοιχεία. Τυπικά, η μάζα του βαρέως μετάλλου είναι περίπου 3% ή 4% λιγότερη στο αναλωθέν καύσιμο από ότι στο αρχικό καύσιμο εξαιτίας της σχάσης (συμπεριλαμβανομένου της σχάσης των ισοτόπων του πλουτωνίου).

Ένας αντιδραστήρας 1000-MWe, που λειτουργεί σε μία τυπική θερμική απόδοση του 32%, παράγει ενέργεια με ρυθμό 3125 MWt (όπου ρητά υποδηλώνεται ότι αυτή είναι η θερμική παραγωγή). Για αυτό ένα gigawatt-year ηλεκτρικής ισχύος αντιστοιχεί σε μία θερμική παραγωγή 1141 GWd(t). Εάν, για παράδειγμα, η μέση παραχθείσα ενέργεια ενός αντιδραστήρα είναι 40 GWd/t, η κατανάλωση καυσίμου είναι 28,5 τόνους εμπλουτισμένου ουρανίου ανά gigawatt-year.

### 2.9.2 Ενέργεια από την κατανάλωση καυσίμου

#### **Ενέργεια ανά μονάδα μάζας από τη σχάση του $^{235}\text{U}$**

Η σχάση ενός πυρήνα  $^{235}\text{U}$  αντιστοιχεί κατά μέσο όρο στην απελευθέρωση 200 MeV ( $3,20 \times 10^{-11} \text{ J}$ ), συμπεριλαμβανομένου των σχετικών συνεισφορών από τη σύλληψη νετρονίου και την ακτινοβολία των θραυσμάτων της σχάσης. Ο αριθμός των ατόμων  $^{235}\text{U}$

ανά γραμμάριο του ουρανίου είναι  $wN_A/M$ , όπου  $w$  είναι η αναλογία του  $^{235}\text{U}$  στο ουράνιο (κατά βάρος),  $N_A$  είναι ο αριθμός Avogadro, και  $M$  είναι το ατομικό βάρος του  $^{235}\text{U}$ . Κατά συνέπεια, 1 kg του φυσικού ουρανίου ( $w = 0,00711$ ) έχει  $1,822 \times 10^{22}$  πυρήνες του  $^{235}\text{U}$  και η πλήρης σχάση του θα απελευθερώσει  $5,8 \times 10^{11}$  J. Η διαθέσιμη ενέργεια σχάσης ανά χιλιόγραμμο ουράνιο, για διάφορους βαθμούς εμπλουτισμού, δίνεται στον Πίνακα 2.8 για λίγες ενδεικτικές περιπτώσεις, υποθέτοντας τη σχάση όλων των πυρήνων  $^{235}\text{U}$  και αγνοώντας τις απώλειες που οφείλονται σε συλλήψεις ατόμων  $^{235}\text{U}$  και την επιπρόσθετη ενέργεια λόγω σχάσης  $^{239}\text{Pu}$  και άλλων πυρήνων.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, 1 GWyr ηλεκτρικής ενέργειας αντιστοιχεί σε μια θερμική παραγωγή 1141 GWd(t) ή  $9,86 \times 10^{16}$  J. Υποθέτοντας πλήρη σχάση όλων των πυρήνων  $^{235}\text{U}$  και παραλείποντας τη σχάση του πλουτωνίου, αυτό αντιστοιχεί σε μια απαίτηση καυσίμου 1,20 τόνους του  $^{235}\text{U}$  ανά GWyr(e). Για την περίπτωση εμπλουτισμού 3,75% σε  $^{235}\text{U}$ , η απαίτηση μεταφράζεται σε 32 τόνους ουρανίου. Η αντίστοιχη θερμική παραχθείσα ενέργεια είναι 35,6 GWd/t, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.8.

**Πίνακας 2.8** Ενέργεια ανά μονάδα μάζας από τη σχάση του ουρανίου, σε διαφορετικούς βαθμούς εμπλουτισμού.

Κατηγορία	Εμπλουτισμός, w (%)	Ενέργεια ανά μονάδα μάζας <sup>a</sup>		Tonne/GWyr(e) <sup>b</sup>
		J/kg	GWd/t	
Φυσικό U	0,711	$5,84 \times 10^{11}$	6,8	169
Εμπλουτισμένο U	3,2	$2,63 \times 10^{12}$	30,4	38
Εμπλουτισμένο U	3,5	$2,87 \times 10^{12}$	33,3	34
Εμπλουτισμένο U	3,75	$3,08 \times 10^{12}$	35,6	32
Εμπλουτισμένο U	5,0	$4,10 \times 10^{12}$	47,5	24
Καθαρό U	100	$8,21 \times 10^{13}$	950	1,2

<sup>a</sup>Θερμική ενέργεια, θεωρώντας σχάση όλου του  $^{235}\text{U}$ , μια απελευθέρωση 200 MeV ανά σχάση  $^{235}\text{U}$  και όχι σχάση άλλων νουκλειδίων

<sup>b</sup>Θεωρώντας απόδοση θερμικής μετατροπής της τάξης του 32%

### Ενέργεια ανά μονάδα μάζας καυσίμου

Η ανάπτυξη στην προηγούμενη παράγραφο είναι ελλιπής, γιατί παραλείπει πολλούς κρίσιμους παράγοντες, οι οποίοι σημαντικά τροποποιούνε την ποσότητα του  $^{235}\text{U}$  που απαιτείται από τον αντιδραστήρα. Αυτοί περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

1. Δεν καταναλώνεται όλο το  $^{235}\text{U}$  στον αντιδραστήρα.
2. Γύρω στο 14% των αντιδράσεων θερμικής απορρόφησης νετρονίων στο  $^{235}\text{U}$  οδηγούν στη σύλληψη παρά στη σχάση.
3. Σχάση του  $^{239}\text{Pu}$  (και, σε μικρότερο βαθμό, του  $^{241}\text{Pu}$ ) παρέχει μία ουσιαστική πρόσθετη πηγή ενέργειας. Αυτό μειώνει το  $^{235}\text{U}$  που απαιτείται για μια δεδομένη παραγωγή ενέργειας.
4. Υπάρχει μια μικρή συμβολή από τη σχάση του  $^{238}\text{U}$  από ταχεία-νετρονία.

Όλες αυτές οι επιδράσεις αλλάζουν τον αριθμό των συμβάντων σχάσης, μειώνοντας τον αριθμό των σχάσεων του  $^{235}\text{U}$  και αυξάνοντας τον αριθμό των σχάσεων των ισοτόπων πλουτωνίου και ακόμη του  $^{238}\text{U}$ . Η συνολική επίπτωση μπορεί απερίφραστα να υπολογιστεί συγκρίνοντας τη μείωση της συνολικής μάζας βαρέως μετάλλου – η οποία είναι αποτέλεσμα σχεδόν εξολοκλήρου της σχάσης του ουρανίου και των ισοτόπων πλουτωνίου – προς την αρχική μάζα  $^{235}\text{U}$ . Ο λόγος αυτών των ποσοτήτων είναι 1,081, ο

οποίος δηλώνει ότι υπάρχουν γύρω στο 8,1% περισσότερων συμβάντων σχάσεων από ότι θα γίνονταν από την πλήρη σχάση του  $^{235}\text{U}$ . Εφαρμόζοντας αυτή τη <<διόρθωση>> του 8,1% αυξάνει την παραχθείσα ενέργεια του 35,6 GWd/t σε μια αναθεωρημένη τιμή του 38,5 GWd/t. Ακόμη αυτός ο υπολογισμός αγνοεί τις διαφορές των παραγόμενων ενεργειών σχάσης και των ατομικών μαζών μεταξύ των  $^{235}\text{U}$  και των βαρύτερων ακτινίδων. Κατά προσέγγιση το 40% των σχάσεων οφείλεται στο  $^{239}\text{Pu}$  και στο  $^{241}\text{Pu}$ , και όχι στο  $^{235}\text{U}$ . Λαμβάνοντας αυτό υπόψη προσθέτει κατά προσέγγιση στην παραχθείσα ενέργεια 0,6 GWd/t. Η εκπομπή ακτίνων-γάμα που ακολουθεί μετά τη σύλληψη των νετρονίων στις ακτινίδες προσθέτει παραπέρα ενέργεια. Μαζί, αυτές οι κατά προσέγγιση διορθώσεις επιφέρουν το συνολικό αποτέλεσμα στην παραγόμενη θερμική ενέργεια των 40 GWd/t.

Μία τιμή του 40 GWd/t είναι μία καλή αντιπροσώπευση μίας σύγχρονης απόδοσης του LWR, παρόλο που οι μέσες παραχθείσες ενέργειες των PWR είναι τώρα υψηλότερες και οι μελλοντικές αναμένεται να είναι ακόμη υψηλότερες. Η παραχθείσα ενέργεια σε GWd/t μπορεί να μεταφραστεί σε απαίτηση καυσίμων ανά χρόνο. Για παράδειγμα, για παραχθείσα ενέργεια των 40 GWd/t η ολική απαίτηση ουρανίου είναι 28,5 τόνους ανά GWyr, ή 1,07 τόνους  $^{235}\text{U}$  για εμπλουτισμό 3,75%.

Οι ακριβείς απαιτήσεις ουρανίου για μια δεδομένη ενεργειακή παραγωγή εξαρτώνται από λεπτομέρειες του κύκλου καυσίμου και της λειτουργίας του αντιδραστήρα. Παρόλα αυτά, η ακόλουθη ισοδυναμία, όπως βρέθηκε στο παραπάνω παράδειγμα, είναι χρήσιμη για κατά προσέγγιση υπολογισμούς γενικών μεγεθών για μίας φορές διαγραφής κύκλου καυσίμου ενός LWR:

1 τόνος  $^{235}\text{U} \rightarrow 1 \text{ GWyr}(e)$  (κατά προσέγγιση)

### **2.9.3 Απαίτηση μεταλλεύματος ουρανίου**

Το ποσό μεταλλεύματος ουρανίου που απαιτείται για να λειτουργήσει ένας αντιδραστήρας εξαρτάται από την επιτυγχανόμενη παραχθείσα ενέργεια, τον αρχικό εμπλουτισμό, και την ποσότητα του  $^{235}\text{U}$  που χάνεται στη διαδικασία εμπλουτισμού. Η μάζα  $M_F$  του φυσικού ουρανίου η οποία χρησιμοποιείται ως εισαγόμενη τροφοδοσία στην εγκατάσταση εμπλουτισμού η οποία σχετίζεται με τη μάζα  $M_P$  του εμπλουτισμένου ουρανίου που παράγεται μέσα στο καύσιμο σύμφωνα με την έκφραση  $M_F/M_P = (w_P - w_T)/(w_F - w_T)$ , όπου  $w_P$ ,  $w_T$ , και  $w_F$  είναι οι εμπλουτισμοί του καυσίμου, των καταλοίπων, και του φυσικού ουρανίου αντιστοίχως. Για  $w_P = 3,75\%$ ,  $w_T = 0,2\%$ ,  $w_F = 0,711\%$ , και  $w_P = 28,5 \text{ tonnes/GWyr}$ , η απαίτηση φυσικού ουρανίου είναι 198 tonnes/GWyr. Έτσι, σε στρογγυλά νούμερα, ένας κύκλος καυσίμου LWR μιας φορές διαγραφής χρειάζεται γύρω στους 200 τόνους φυσικού ουρανίου ανά gigawatt-year. Η παρούσα παγκόσμια ζήτηση για ουράνιο είναι 60.000 tonnes/yr, που αντιστοιχεί στις απαιτήσεις για παρούσα ετήσια παραγωγή από πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής γύρω των 300 GWyr.

Οι μέσες παραχθείσες ενέργειες είναι συστηματικά λιγότερες στους BWR από ότι στους PWR επειδή η παραχθείσα ενέργεια του πρώτου είναι λιγότερο ομοιόμορφη κατά μήκος των ράβδων καυσίμου. Το νερό στο κατώτατο σημείο της δεξαμενής του BWR έχει υψηλή πυκνότητα και είναι ο καλύτερος επιβραδυντής νετρονίων από ότι το μείγμα νερού-ατμού στο ανώτατο σημείο. Αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη παραχθείσα ενέργεια



επιτυγχάνεται στο κατώτατο σημείο της ράβδου, με μικρότερη παραχθείσα ενέργεια ψηλότερα στη ράβδο. Οι μέγιστες επιτρεπόμενες παραχθείσες ενέργειες είναι περίπου οι ίδιες για τους PWR και BWR, αλλά ο PWR έχει ένα πιο ομοιόμορφο προφίλ κατά μήκος της ράβδου καυσίμου και για αυτό μία μεγαλύτερη μέση παραχθείσα ενέργεια.

## **2.10 ΤΕΛΙΚΗ ΦΑΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

### **2.10.1 Διαχείριση αναλωθέντος καυσίμου**

#### **Αρχική διαχείριση καυσίμου αντιδραστήρα**

Περιοδικά, μια μερίδα των καυσίμων στον αντιδραστήρα απομακρύνεται και αντικαθίσταται από φρέσκο καύσιμο. Σε μία τυπική προηγούμενη πρακτική, ένα μέσο δείγμα καυσίμου παραμένει στον αντιδραστήρα για 3 χρόνια, και περίπου ένα τρίτο του καυσίμου απομακρύνεται κάθε χρόνο, με χρόνο κλεισίματος για τον ανεφοδιασμό και τη συντήρηση μέχρι περίπου 2 μήνες. Η τάση τώρα είναι να επεκταθεί το ενδιάμεσο διάστημα μεταξύ χειρισμών ανεφοδιασμού και η μείωση του χρόνου ανεφοδιασμού. Αυτήν την περίοδο, χρονικά διαστήματα 18 μηνών και κλείσιμο του αντιδραστήρα για 1 μήνα αποτελούν τυπική διαδικασία.

Όταν πρώτα το αναλωθέν καύσιμο απομακρύνεται από τον αντιδραστήρα, το επίπεδο ραδιενέργειας είναι πολύ υψηλό, λόγω της συσσώρευσης προϊόντων σχάσης και των ραδιενεργών πυρήνων διαμορφωμένων από τη σύλληψη νετρονίων. Κάθε ραδιενεργή ακτινοβολία περιλαμβάνει την απελευθέρωση ενέργειας, η οποία εμφανίζεται άμεσα ως θερμότητα, έτσι το καύσιμο είναι θερμικά καυτό καθώς επίσης και ραδιενεργά <<καυτό>>. Ανεξάρτητα του θέματος επανεπεξεργασίας, το πρώτο στάδιο είναι το ίδιο, δηλαδή αφήνοντας το καύσιμο να ψυχθεί θερμικά και ραδιενεργά. Η ψύξη του καυσίμου συνήθως πραγματοποιείται σε δεξαμενές γεμάτες νερό στην περιοχή του αντιδραστήρα.

Αρχικά, σχεδιάστηκε να κρατηθεί το αναλωθέν καύσιμο στην περιοχή του αντιδραστήρα για περίπου 150 ημέρες και μετά να μεταφερθεί σε εγκαταστάσεις διαχείρισης και σε άλλες τοποθεσίες. Η φύση του επόμενου σταδίου, σε γενικές γραμμές, εξαρτάται εάν το καύσιμο πρόκειται να διατεθεί ως απόβλητο ή προς επανεπεξεργασία. Ωστόσο, μέχρι τώρα, αυτό <<το επόμενο στάδιο>> έχει καθυστερήσει πολύ στις Ηνωμένες Πολιτείες επειδή δεν έχουν αναπτυχθεί εγκαταστάσεις εκτός αντιδραστήρα. Αντί αυτού, σχεδόν όλο το καύσιμο έχει παραμείνει στις περιοχές του αντιδραστήρα – σε πολλές περιπτώσεις για περισσότερο από 20 χρόνια.

Ελλείπει εναλλακτικών λύσεων, μερικά αμερικάνικα βοηθητικά συστήματα μεταφέρουν παλιές ράβδους καυσίμου από δεξαμενές ψύξης σε αερόψυκτα (ξηρά αποθήκευση) βαρέλια στην περιοχή του αντιδραστήρα. Αυτό μπορεί να παρέχει μία εφαρμόσιμη προσωρινή λύση στη μακροχρόνια καθυστέρηση της εκτέλεσης ενός εθνικού προγράμματος διάθεσης αποβλήτων. Ωστόσο, αυτή η λύση είναι ένα υποκατάστατο επειδή η περιοχή λειτουργίας αντιδραστήρα δεν μπορεί να συνυπολογιστεί ως περιοχή διαθέσιμη και ικανή να εποπτεύσει το αναλωθέν καύσιμο για παρατεταμένες χρονικές περιόδους.

### **Εναπόθεση ή αποθήκευση αναλωθέντος καυσίμου**

Για πολλά χρόνια, είχε υποτεθεί ότι όλα τα πολιτικά πυρηνικά απόβλητα θα επανεπεξεργάζονταν, αλλά τα αμερικάνικα σχέδια επανεπεξεργασίας εγκαταλείφθηκαν. Αντί αυτού, επίσημα σχέδια τώρα απαιτούν απευθείας εναπόθεση του αναλωθέντος καυσίμου, καθώς διατηρώντας για πολλές δεκαετίες την επιλογή επαναφοράς του. Το καύσιμο πρόκειται να παραμείνει σε στερεά μορφή και οι συγκεντρώσεις καυσίμου τελικά τοποθετούνται σε προστατευμένα κιβώτια και σε τελική ανάλυση μεταφέρονται σε ασφαλή βαρέλια είτε σε μόνιμη είτε σε ενδιάμεση περιοχή αποθήκευσης. Στην τελευταία περίπτωση, τα απόβλητα θα μετακινηθούν σε μόνιμο αποθηκευτικό χώρο σε σύντομο χρόνο.

Μια διάκριση γίνεται μερικές φορές μεταξύ <<εναπόθεσης>> και <<αποθήκευσης>>. Το πρώτο συνιστά μόνιμότητα, αντίθετα το τελευταίο συνιστά την πιθανότητα ότι το αναλωθέν καύσιμο μπορεί αργότερα να ανακτηθεί. Η πιθανότητα αυτή γίνεται πράξη στα αποθηκευτικά συστήματα ανάκτησης, όπου το μόνιμο σφράγισμα του αποθηκευτικού χώρου διαφέρει, επιτρέποντας το αναλωθέν καύσιμο να ανακτάται εάν αυτό απαιτείται σε σύντομο χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση, δεν αποκλείεται η επιλογή επανεπεξεργασίας, και το αναλωθέν καύσιμο μπορεί τελικά να μην είναι <<απόβλητο>>.

Υπάρχουν διάφορα κίνητρα για τη διατήρηση της ανακτησιμότητας: (α) Επιτρέπει διορθωτικά μέτρα στην περίπτωση αντιμετώπισης εκπλήξεων στην αποθήκευση αποβλήτων κατά τις πρώτες δεκαετίες, όπου απαιτείται τροποποίηση της συσκευασίας καυσίμου ή του αποθηκευτικού χώρου, (β) κρατά ανοικτή την επιλογή ανάκτησης του πλουτωνίου από το καύσιμο, και (γ) επιτρέπει την ανάκτηση άλλων υλικών θεωρούμενων χρήσιμων – για παράδειγμα, προϊόντα σχάσης για χρήση σε ιατρική διάγνωση και θεραπεία ή στην ακτινοβολήση των τροφών ή των λημμάτων αποχέτευσης. Όταν ο χώρος τοποθέτησης γίνει αμετάκλητος, με καμία προοπτική ανάκτησης του καυσίμου, τότε ο χώρος αυτός γίνεται και χώρος εναπόθεσης.

### **2.10.2 Επανεπεξεργασία**

#### **Εξαγωγή πλουτωνίου και ουράνιου**

Η εναλλακτική λύση της εναπόθεσης του αναλωθέντος καυσίμου είναι να επανεπεξεργαστεί και να εξαχθεί τουλάχιστον το ουράνιο και το πλουτόνιο. Κατά την επανεπεξεργασία, το αναλωθέν καύσιμο διαλύεται σε οξύ και το πλουτόνιο και το ουράνιο εξάγονται χημικά σε ξεχωριστά ρεύματα, για χρήση σε καινούριο καύσιμο. Η πιο ευρεία χρησιμοποιημένη μέθοδος για αυτή την εργασία είναι η υποβλητικά ονομαζόμενη διαδικασία PUREX.

Τα πρώτα αμερικάνικα σχέδια για επανεπεξεργασία υπέθεταν ότι 99,5% του ουρανίου και πλουτωνίου θα μπορούσαν να απομακρυνθούν. Το υπόλειμμα αποτελεί απόβλητο υψηλού επιπέδου ραδιενέργειας. Στα συνηθισμένα σχέδια, τα απόβλητα αποτελούνται σχεδόν από όλα τα αμετάβλητα προϊόντα σχάσης, 0,5% του ουρανίου και του πλουτωνίου, και σχεδόν όλες τις δευτερεύουσες ακτινίδες [δηλαδή το ποσειδώνιο ( $Z = 93$ ), το αμερίκιο ( $Z = 95$ ), και το κιούριο ( $Z = 96$ )]. Το ουράνιο αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο μέρος της μάζας του αναλωθέντος καυσίμου, αλλά τα προϊόντα σχάσης περιλαμβάνουν την περισσότερη ραδιενέργεια.

Η εξαγωγή μπορεί να γίνει πιο ολοκληρωμένη από ότι αναμενόταν στο αρχικό αμερικάνικο σκεπτικό. Το γαλλικό πρόγραμμα υπερέβηκε το 99,5% του στόχου, διαχωρίζοντας περισσότερο από 99,9% του ουρανίου και 99,8% του πλουτωνίου. Δεν υπάρχει σημαντικός λόγος για τον περιορισμό της εξαγωγής πλουτωνίου και ουρανίου, παρόλο που το πρώτο αντιστοιχεί στο πολύτιμο καύσιμο και το τελευταίο αντιστοιχεί στον κύριο όγκο της μάζας. Είναι πιθανό να εξαχθούν επίσης άλλα ραδιοϊσότοπα, είτε επειδή θεωρούνται επικίνδυνα ως συστατικά του αποβλήτου ή επειδή είναι χρήσιμα σε άλλες εφαρμογές. Οι δευτερεύουσες ακτινίδες αποτελούν ειδικού ενδιαφέροντος. Περιλαμβάνουν προϊόντα μεγάλης διάρκειας ζωής όπου η απομάκρυνσή τους θα μειώσει την μακροπρόθεσμη δραστηριότητα του αποβλήτου. Μία επιλογή είναι να διαχωριστούν και να επιστραφούν στον αντιδραστήρα όπου θα μεταστοιχειωθούν με τις αντιδράσεις νετρονίων.

Φυσικά, εάν ο κύριος στόχος είναι η ασφάλεια, είναι αναγκαίο να ισορροπηθούν τα πλεονεκτήματα από τη μείωση της δραστηριότητας στα απόβλητα έναντι των αυξημένων κινδύνων διαχείρισης και επεξεργασίας τους όταν είναι ακόμη πολύ θερμά. Στην παρούσα κατάσταση, αυτή η επιπλέον επιλογή διαχωρισμού δεν έχει υιοθετηθεί στα κύρια προγράμματα επανεπεξεργασίας στη Γαλλία και στο Ηνωμένο Βασίλειο, και οι δευτερεύουσες ακτινίδες παραμένουν με τα προϊόντα σχάσης.

Το κατάλοιπο επανεπεξεργασίας αποτελεί τα απόβλητα. Πρόκειται να αποθηκευτούν σε στερεά κατάσταση για ενδεχόμενη εναπόθεση. Η τυπική μέθοδος είναι να αναμειχθεί το υψηλής ραδιενέργειας απόβλητο με λιωμένο βοριοπυριτικό γυαλί και να περιληφθεί το στερεοποιημένο γυαλί σε μεταλλικά κουτιά. Παρόλο ότι άλλες στερεές καταστάσεις αποβλήτων έχουν προταθεί, το βοριοπυριτικό γυαλί χρησιμοποιήθηκε στο γαλλικό πυρηνικό πρόγραμμα και συμπεριλήφθηκε κυρίως στα αρχικά αμερικάνικα σχέδια για την επανεπεξεργασία αποβλήτων από εμπορικές χρήσεις. Έχει χρησιμοποιηθεί για τον διαχωρισμό των ήδη επανεπεξεργαζόμενων αμερικανικών στρατιωτικών αποβλήτων στην περιοχή Savannah River στη νότια Καρολίνα και σχεδιάζεται για τα απόβλητα στην περιοχή εναπόθεσης Hanford της πολιτείας Washington.

### **2.10.3 Εναπόθεση αποβλήτων**

Όλες οι χώρες οι οποίες έχουν αναγγείλει σχέδια για εναπόθεση υψηλού ραδιενεργού επιπέδου αποβλήτων σχεδιάζουν την ενδεχόμενη εναπόθεση σε βαθείς γεωλογικούς σχηματισμούς αποθήκευσης, συνήθως σκαμμένα σπήλαια ή τρύπες σε ευνοϊκά περιβάλλοντα. Πολλά από τα σχέδια για αυτές τις μόνιμες εγκαταστάσεις εναπόθεσης περιλαμβάνουν μία περίοδο κατά την οποία το απόβλητο μπορεί να ανακτηθεί.

Βαθιοί γεωλογικοί σχηματισμοί εναπόθεσης αποτελούν το αγαπημένο αντικείμενο έρευνας της αμερικάνικης διάνοησης από τις πρώτες προσπάθειες διατύπωσης σχεδίων. Έχουν υπάρξει συνεχιζόμενες προσπάθειες εντοπισμού και σχεδιασμού κατάλληλων εγκαταστάσεων.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ

#### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες είναι διατάξεις στις όποιες αποκαθίσταται αλυσωτή αντίδραση σχάσεων με νετρόνια και έκλυση ενεργείας. Ο ορισμός αυτός είναι πολύ γενικός και περιλαμβάνει όχι μόνο τις διατάξεις που έχουν πλήρη ικανότητα αυτοσυντηρήσεως της αλυσωτής αντιδράσεως, δηλαδή κρίσιμες διατάξεις, άλλα ακόμη και υποκρίσιμες διατάξεις στις οποίες η αλυσωτή αντίδραση μπορεί να συντηρηθεί με τροφοδότηση νετρονίων από πηγές.

Ο πρώτος στον κόσμο πυρηνικός αντιδραστήρας τέθηκε για πρώτη φορά σε λειτουργία στις 2.12.1942 στο πανεπιστήμιο του Σικάγου των Η.Π.Α. Πρόκειται για την ημερομηνία που για πρώτη φορά αποκαταστάθηκε σ' ένα σύστημα συνθήκη κρισιμότητας. Το σύστημα αυτό ήταν ετερογενής διάταξη γραφίτη - φυσικού ουρανίου. Από τότε έχουν κατασκευασθεί πάρα πολλοί πυρηνικοί αντιδραστήρες που χρησιμοποιούνται για διάφορους σκοπούς, όπως είναι η ηλεκτροπαραγωγή, η παραγωγή ραδιοϊσοτόπων κλπ.

#### 3.2 ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ

Ως κανονική λειτουργία πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος νοείται η λειτουργία του σε κατάσταση κρισιμότητας, και τούτο διότι, στην κατάσταση αυτή εξασφαλίζεται σταθερός ρυθμός σχάσεων (σχάσεις/sec) και επομένως παραγωγή θερμότητας από τις σχάσεις με σταθερή ισχύ.

Αν  $F$  (σχάσεις/sec) είναι ο ρυθμός σχάσεων στον αντιδραστήρα και  $E$  (MeV/σχάση) η μέση ανά σχάση εκμεταλλεύσιμη ενέργεια, τότε η παραγόμενη ισχύς δίδεται από την σχέση:

$$P(\text{MW}) = F (\text{sec}^{-1}) \cdot E (\text{MeV}) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} (\text{MW} \cdot \text{sec}/\text{MeV}) \quad (3.1)$$

δεδομένου ότι:  $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-19} (\text{MW} \cdot \text{sec})$ .

Αν θεωρηθεί ότι η μέση ανά σχάση εκμεταλλεύσιμη ενέργεια είναι 200 MeV και ότι σε αντιδραστήρα ισχύος, ολικής αποδόσεως [βλ. σχέση (5.1)]  $e = 33\%$ , πραγματοποιούνται  $5,7 \cdot 10^{19}$  σχάσεις ανά sec, τότε η μεν θερμική ισχύς θα είναι:  $P_t = 1824 \text{ MW}$ , ενώ η ηλεκτρική ισχύς:  $P_e = 602 \text{ MW}_e$ .

Ο ρυθμός καταστροφής των σχάσιμων πυρήνων στον αντιδραστήρα εκτιμάται σύμφωνα με την σχέση (1.35) ως εξής:

$$\frac{\text{Ρυθμός σχάσεων}}{\text{Ρυθμός καταστροφής}} = \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_c} \quad (3.2)$$

οπότε:  $\text{Ρυθμός καταστροφής} = F \cdot (1 + \alpha) \quad (3.3)$

όπου:  $\alpha = \sigma_c / \sigma_f$ , η σχέση ενσωματώσεων-σχάσεων.

#### 3.3 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ

Σε έναν αντιδραστήρα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα πραγματοποιήσεως ορισμένων μεταβολών της θερμικής του ισχύος, όπως:

- Δυνατότητα εκκινήσεως (από μηδενική ισχύ).
- Δυνατότητα κρατήσεως του αντιδραστήρα σε σταθερή τιμή ισχύος (κατάσταση κρισιμότητας).

- Δυνατότητα αυξομειώσεως της ισχύος.
- Δυνατότητα διακοπής της λειτουργίας του.

Οι λειτουργίες αυτές πραγματοποιούνται με την βοήθεια (ως επί το πλείστον) ράβδων κατασκευασμένων από υλικά μεγάλης ικανότητας απορροφήσεως νετρονίων, οι οποίες βυθίζονται ή αποσύρονται από τον αντιδραστήρα κατά βούληση, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμούμενη κατάσταση. Πρόκειται για τις γνωστές ως ράβδους ελέγχου και ρυθμίσεως, και τις ράβδους διακοπής της λειτουργίας του αντιδραστήρα.

#### **(α) Εκκίνηση του αντιδραστήρα**

Αντιδραστήρας εκτός λειτουργίας, σημαίνει ότι ο αντιδραστήρας βρίσκεται σε κατάσταση υποκρισιμότητας και χωρίς να υπάρχουν σ' αυτόν νετρόνια. Για να τεθεί σε λειτουργία, θα πρέπει ο αντιδραστήρας να καταστεί υπερκρίσιμος με απόσυρση των ράβδων του και να τροφοδοτηθεί παροδικά με νετρόνια, ώστε να αρχίσει η αλυσωτή αντίδραση σχάσεων με αύξοντα ρυθμό. Η παροδική τροφοδοσία του αντιδραστήρα με νετρόνια επιτυγχάνεται με χρήση εξωτερικής πηγής νετρονίων, η οποία στη συνέχεια, αφού δηλαδή τεθεί σε λειτουργία ο αντιδραστήρας, αποσύρεται.

#### **(β) Κράτηση της ισχύος σε σταθερό επίπεδο**

Κατά την εκκίνηση του αντιδραστήρα, η θερμική του ισχύς θα αυξάνει από την τιμή μηδέν, με την πάροδο του χρόνου, και όταν φθάσει στα επιθυμητά επίπεδα, με ορισμένου μεγέθους εισαγωγή των ράβδων ελέγχου και ρυθμίσεως, αποκαθίσταται ισοζύγιο παραγωγής-απωλειών, δηλαδή κατάσταση κρισιμότητας στο σύστημα.

#### **(γ) Αυξομείωση της ισχύος**

Η πραγματοποίηση αύξησης ή μείωσης της ισχύος του αντιδραστήρα, από την προηγούμενη κατάσταση της σταθεράς ισχύος, σε ένα άλλο επίπεδο ισχύος, επιτυγχάνεται με ελαφρά απόσυρση (αύξηση της ισχύος) ή ελαφρά βύθιση (μείωση της ισχύος) των ράβδων ελέγχου και ρυθμίσεως.

Πράγματι, αν αποσύρει κανείς κατά τι, ράβδο ή ράβδους ελέγχου και ρυθμίσεως από την καρδιά του αντιδραστήρα, ο ρυθμός σχάσεων αυξάνει και όταν η αντίστοιχη ισχύς φθάσει το νέο επιθυμούμενο επίπεδο, εισάγονται οι ράβδοι μέχρι εκείνου του βάθους, που αποκαθίσταται εκ νέου κατάσταση κρισιμότητας στο σύστημα. Ανάλογοι χειρισμοί πραγματοποιούνται και στην περίπτωση που είναι επιθυμητή η μείωση της ισχύος του αντιδραστήρα.

#### **(δ) Διακοπή της λειτουργίας του αντιδραστήρα**

Για να διακοπεί η λειτουργία του αντιδραστήρα που βρίσκεται σε σταθερό επίπεδο ισχύος, αρκεί να βυθισθούν πλήρως σ' αυτόν οι ράβδοι ελέγχου και ρυθμίσεως.

Για μια ταχύτερη διακοπή της λειτουργίας του, όπως π.χ. σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης, χρησιμοποιούνται οι ράβδοι διακοπής της λειτουργίας του. Οι ράβδοι αυτοί διατηρούνται κατά την ομαλή λειτουργία του αντιδραστήρα έξω από την <<καρδιά>> του.

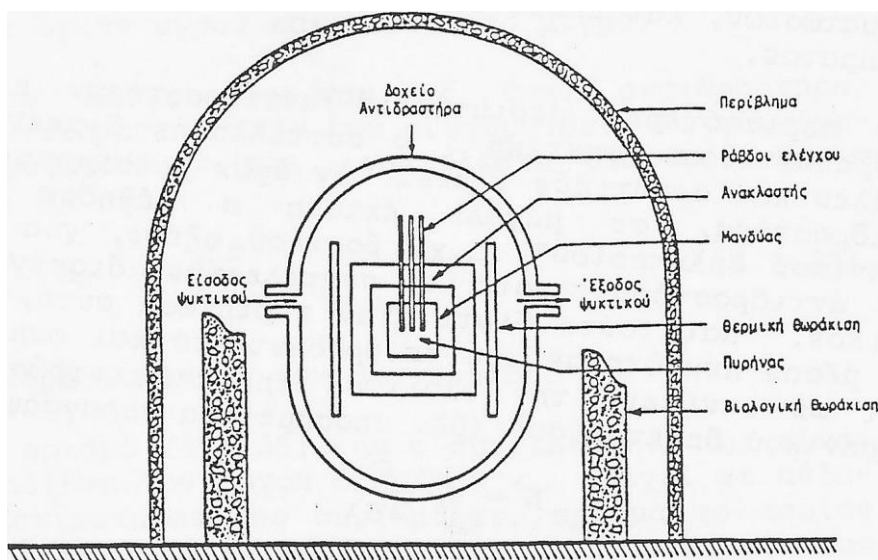
Είναι ευνόητο ότι για να πραγματοποιηθούν οι ως άνω χειρισμοί, θα πρέπει η συγκρότηση του αντιδραστήρα να είναι χωρίς τις ράβδους ελέγχου υπερκρίσιμη.

### 3.4 ΚΥΡΙΕΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ

Ως κύριες συνιστώσες ενός πυρηνικού αντιδραστήρα χαρακτηρίζονται τα τμήματα εκείνα του αντιδραστήρα, που το καθένα επιτελεί ορισμένη βασική λειτουργία. Τα τμήματα αυτά (βλ. Σχήμα 3.1) για ένα τυπικό αντιδραστήρα (δεν αναφερόμαστε σε συγκεκριμένο τύπο αντιδραστήρα), είναι τα εξής:

#### (α) Ο πυρήνας ή η καρδιά του αντιδραστήρα

Πρόκειται για την κεντρική περιοχή του συστήματος, όπου υπάρχει το πυρηνικό καύσιμο, μέρος του ψυκτικού μέσου και στους αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων, ο επιβραδυντής. Το πυρηνικό καύσιμο περιλαμβάνει τους σχάσιμους πυρήνες και συχνά μεγάλα ποσά πυρήνων δυναμένων να σχασθούν, οι οποίοι με επώαση μπορούν να μετατραπούν σε σχάσιμους πυρήνες (βλ. παράγραφο 2.6). Στους αντιδραστήρες π.χ. τύπου Magnox (αερίψυκτοι γραφίτη/φυσικού ουρανίου) το πυρηνικό καύσιμο είναι φυσικό ουράνιο ( $^{235}\text{U}$  : 0,72%,  $^{238}\text{U}$  : 99,27% και ίχνη  $^{234}\text{U}$ ) και ένα σημαντικό ποσοστό πυρήνων  $^{238}\text{U}$  μετατρέπεται με ενσωμάτωση νετρονίων και δύο διαδοχικών β<sup>-</sup> διασπάσεων, σε  $^{239}\text{Pu}$ .



Σχήμα 3.1 Οι κύριες συνιστώσες πυρηνικού αντιδραστήρα, με την βιολογική θωράκιση και το περίβλημα.

Το ψυκτικό μέσο είναι το μέσο δια του οποίου απάγεται έξω από τον αντιδραστήρα η θερμότητα που παράγεται στον πυρήνα, σε άλλα τμήματα του αντιδραστήρα (μανδύα, θερμική θωράκιση). Το ύδωρ, το βαρύ ύδωρ και διάφορα αέρια ( $\text{CO}_2$ , He) έχουν χρησιμοποιηθεί ως επί το πλείστον ως ψυκτικά μέσα στους αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων. Στους αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων το ύδωρ ή το βαρύ ύδωρ (τουλάχιστον σε υγρά φάση) δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ψυκτικά μέσα, γιατί τα μέσα αυτά προκαλούν επιβράδυνση των ταχέων νετρονίων, πράγμα το οποίο δεν είναι επιθυμητό στους αντιδραστήρες αυτούς. Στους περισσότερους αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων (από αυτούς που έχουν μέχρι σήμερα τεθεί σε λειτουργία) έχει χρησιμοποιηθεί ως ψυκτικό μέσο τετηγμένο μέταλλο και συγκεκριμένα τετηγμένο νάτριο.

Ο επιβραδυντής είναι το υλικό το οποίο τοποθετείται στους αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων για να επιβραδύνονται μέσω μη ελαστικών ή ελαστικών σκεδάσεων, τα νετρόνια από

την ενέργεια με την οποία εκλύονται κατά τις σχάσεις, μέχρις ότου καταστούν θερμικά. Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται ως επιβραδυντές πρέπει να παρουσιάζουν:

- μεγάλη ικανότητα μείωσης της ενέργειας των νετρονίων ανά σκέδαση,
- μεγάλη πιθανότητα πραγματοποίησης ελαστικής σκέδασης κατά τις συγκρούσεις νετρονίων με πυρήνες του μέσου,
- ασθενή ικανότητα απορρόφησης νετρονίων.

Τις ιδιότητες αυτές παρουσιάζουν πυρήνες με μικρούς μαζικούς αριθμούς. Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται σήμερα ως επιβραδυντές στους εξελιγμένους αντιδραστήρες των πυρηνοληκτρικών σταθμών, είναι το φυσικό ύδωρ, το βαρύ ύδωρ, ο γραφίτης, και σε σπανιότερες περιπτώσεις, το βηρύλλιο (Be) και το οξειδίο του βηρυλλίου (BeO).

### **(β) Ο μανδύας**

Σε ορισμένους τύπους αντιδραστήρων (τους αναπαραγωγικούς), τον πυρήνα περιβάλλει μια περιοχή με επώασιμο υλικό, ο μανδύας. Στην περιοχή αυτή πραγματοποιείται η επώαση ή η αναπαραγωγή, δηλαδή η δημιουργία νέων σχάσιμων πυρήνων, βάσει πυρηνικών αντιδράσεων όπως αυτές που περιγράφονται από τις σχέσεις (2.18) και (2.19) της παραγράφου 2.6.

### **(γ) Ο ανακλαστής**

Πρόκειται για την κατασκευή η οποία περιβάλλει τον πυρήνα (ή τον μανδύα, εάν πρόκειται για αναπαραγωγικό αντιδραστήρα). Ο ανακλαστής χρησιμοποιείται για την μείωση των απωλειών νετρονίων από την ελεύθερη επιφάνεια του πυρήνα (ή του μανδύα) με οπισθοσκέδασή τους (ανάκλαση) προς την κεντρική περιοχή του αντιδραστήρα (τον πυρήνα). Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται κρισιμότητα του δεδομένης συστάσεως συστήματος υπό μικρότερο όγκο από τον όγκο του <<γυμνού>> (χωρίς ανακλαστή) συστήματος.

### **(δ) Οι ράβδοι ελέγχου**

Πρόκειται για κινητές μάζες υλικών τα οποία απορροφούν εντόνως νετρόνια. Με τις ράβδους ελέγχου επιτυγχάνεται ο έλεγχος του αντιδραστήρα (βλ. παράγραφο 3.3), όπως π.χ. η θέση σε λειτουργία, η διακοπή λειτουργίας, η μεταβολή της ισχύος, ή ακόμα, και η διατήρηση της ισχύος του αντιδραστήρα σε σταθερή τιμή, δεδομένου ότι σε μακροχρόνια κλίμακα ελαττώνονται οι σχάσιμοι πυρήνες στον <<πυρήνα>> του αντιδραστήρα και μεταβάλλονται οι πληθυσμοί των διαφόρων <<πυρηνικών δηλητηρίων>>\*. Ως υλικά των ράβδων ελέγχου έχουν χρησιμοποιηθεί, ο βοριομένος χάλυβας, το βόριο, το άφνιο, το κάδμιο, διάφορα μεταλλικά στοιχεία τα οποία παρουσιάζουν μεγάλες τιμές μικροσκοπικών ενεργών διατομών απορροφήσεως νετρονίων, όπως ο άργυρος, ή και διάφορα κράματά τους.

Οι ράβδοι ελέγχου, από γεωμετρικής απόψεως, μπορεί να είναι κυλινδρικής μορφής, ή να έχουν μορφή πρισματικών ράβδων, επιπέδων ελασμάτων, ή επιπέδων ελασμάτων σταυροειδώς τοποθετημένων.

### **(ε) Το <<δοχείο>> του αντιδραστήρα**

Πρόκειται για το δοχείο μέσα στο οποίο βρίσκονται: ο πυρήνας, ο ανακλαστής, οι ράβδοι ελέγχου και η θερμική θωράκιση. Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες τα περιεχόμενα του δοχείου

---

\* Πρόκειται για τους πυρήνες οι οποίοι προκύπτουν κατά τις σχάσεις, ή κατά τις ραδιενεργές μετατροπές των προϊόντων των σχάσεων, που έχουν την ιδιότητα να απορροφούν νετρόνια, ελαττώνοντας έτσι τον πληθυσμό τους στον πυρήνα του αντιδραστήρα.



πρέπει να βρίσκονται υπό πίεση, το δοχείο αυτό χαρακτηρίζεται και ως <<δοχείο πίεσεως>>.

#### **(στ) Η θερμική θωράκιση**

Ως θερμική θωράκιση χαρακτηρίζεται το μέρος της θωρακίσεως του αντιδραστήρα, το οποίο προορίζεται να προκαλέσει επαρκή εξασθένηση των ακτίνων-γ και των νετρονίων που προέρχονται από τον πυρήνα του αντιδραστήρα, προς ανακούφιση της βιολογικής θωρακίσεως από θερμική καταπόνηση.

#### **(ζ) Η βιολογική θωράκιση**

Το μέρος αυτό της θωρακίσεως, αποτελείται από κατάλληλο υλικό, το οποίο κατάλληλα τοποθετημένο γύρω από το δοχείο του αντιδραστήρα προκαλεί εξασθένηση της ακτινοβολίας που προέρχεται από το δοχείο του αντιδραστήρα (ακτίνες-γ και νετρόνια), στον εκτός αυτής χώρο, σε ανεκτά επίπεδα, ώστε να εξασφαλίζεται η ακίνδυνη κυκλοφορία και παραμονή του προσωπικού στους χώρους γύρω από τον αντιδραστήρα.

#### **(η) Το περίβλημα**

Ως περίβλημα χαρακτηρίζεται η στεγανή κτιριακή κατασκευή η οποία στεγάζει το συγκρότημα <<αντιδραστήρα-θωράκισης>>, και σε ορισμένες περιπτώσεις, και το σύστημα παραγωγής ατμού. Το περίβλημα είναι μελετημένο κατά τρόπο ώστε να είναι σε θέση να συγκρατήσει τα ραδιενεργά προϊόντα της σχάσεως, σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος, προς αποφυγή ραδιενεργού ρύπανσης του φυσικού περιβάλλοντος.

Εκτός από τα αναφερθέντα τμήματα του αντιδραστήρα, υπάρχει και ένα μεγάλο πλήθος άλλων συνιστωσών, όπως τα συστήματα ασφάλειας, οι διατάξεις και οι χώροι για τον χειρισμό, την μεταφορά ή την αποθήκευση των χρησιμοποιημένων στοιχείων πυρηνικού καυσίμου, οι διατάξεις για τον έλεγχο της λειτουργίας του όλου συστήματος, οι διατάξεις για την συνεχή παρακολούθηση των επιπέδων ραδιενέργειας, κ.τ.λ.

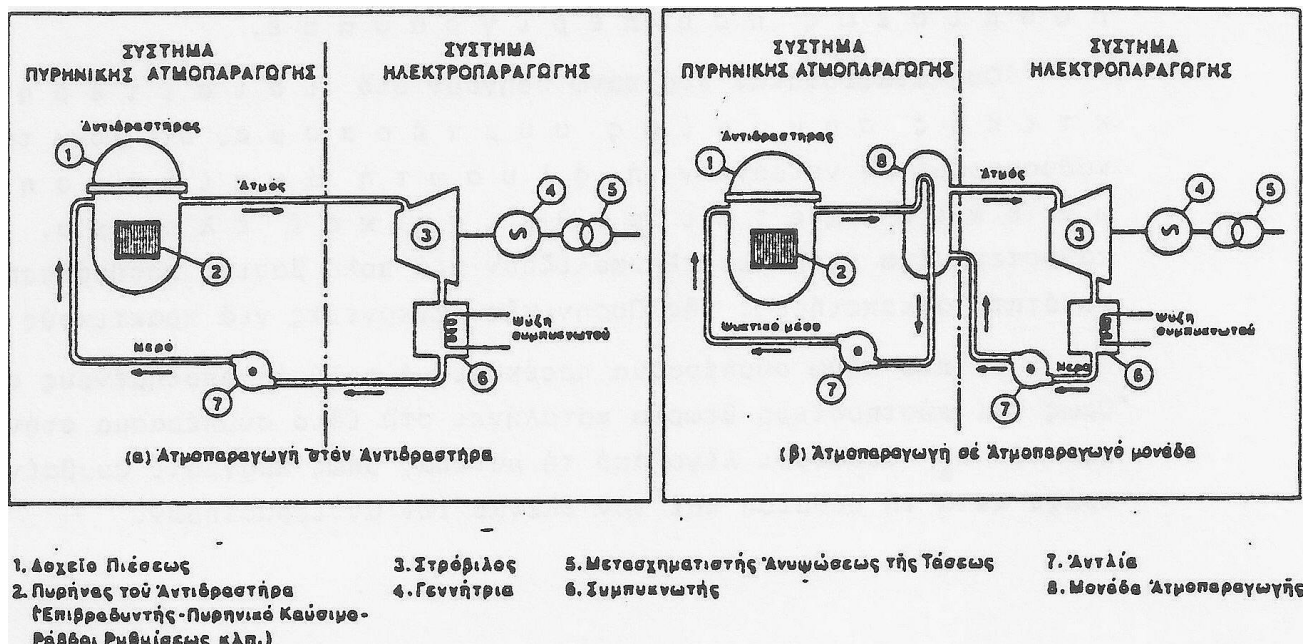
Σε γενικές γραμμές, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες αποτελούν πολύπλοκα συστήματα, τα οποία λόγω της φύσης τους απαιτούν μεγάλη προσοχή κατά τον σχεδιασμό, το στάδιο της κατασκευής και κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους.

### **3.5 ΒΑΣΙΚΗ ΣΥΓΚΡΟΤΗΣΗ ΠΥΡΗΝΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ**

Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι χρησιμοποιούν πυρηνικούς αντιδραστήρες ως πηγή ενέργειας, χαρακτηρίζονται ως πυρηνοηλεκτρικοί σταθμοί. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενεργείας σ' όλους τους πυρηνοηλεκτρικούς σταθμούς γίνεται σήμερα με ατμό, όπως και στους συμβατικούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Ο ατμός παράγεται με τη θερμότητα που εκλύεται από τις σχάσεις στον αντιδραστήρα του σταθμού και χρησιμοποιείται για την κίνηση στροβιλογεννητριάς.

Η ατμοπαραγωγή μπορεί να γίνει είτε στον ίδιο τον αντιδραστήρα, είτε έξω από τον αντιδραστήρα σε μία ή περισσότερες μονάδες ατμοπαραγωγής, στις όποιες μεταφέρεται η θερμότητα του αντιδραστήρα με κατάλληλο ψυκτικό μέσο. Και στις δύο περιπτώσεις, το κύκλωμα κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου, στο οποίο περιλαμβάνεται και ο αντιδραστήρας, διατηρείται σε υψηλή πίεση για ευνόητους θερμοδυναμικούς λόγους. Έτσι το ογκώδες δοχείο του αντιδραστήρα, που έχει κατάλληλη κατασκευή για τις μεγάλες πιέσεις και θερμοκρασίες λειτουργίας, χαρακτηρίζεται ως δοχείο πίεσεως.

Το Σχήμα 3.2 παρέχει σε πολύ απλοποιημένη μορφή, τη βασική συγκρότηση ενός πυρηνοληκτρικού σταθμού παραγωγής για κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις ατμοπαραγωγής.



Σχήμα 3.2 Βασική συγκρότηση πυρηνοληκτρικού σταθμού παραγωγής.

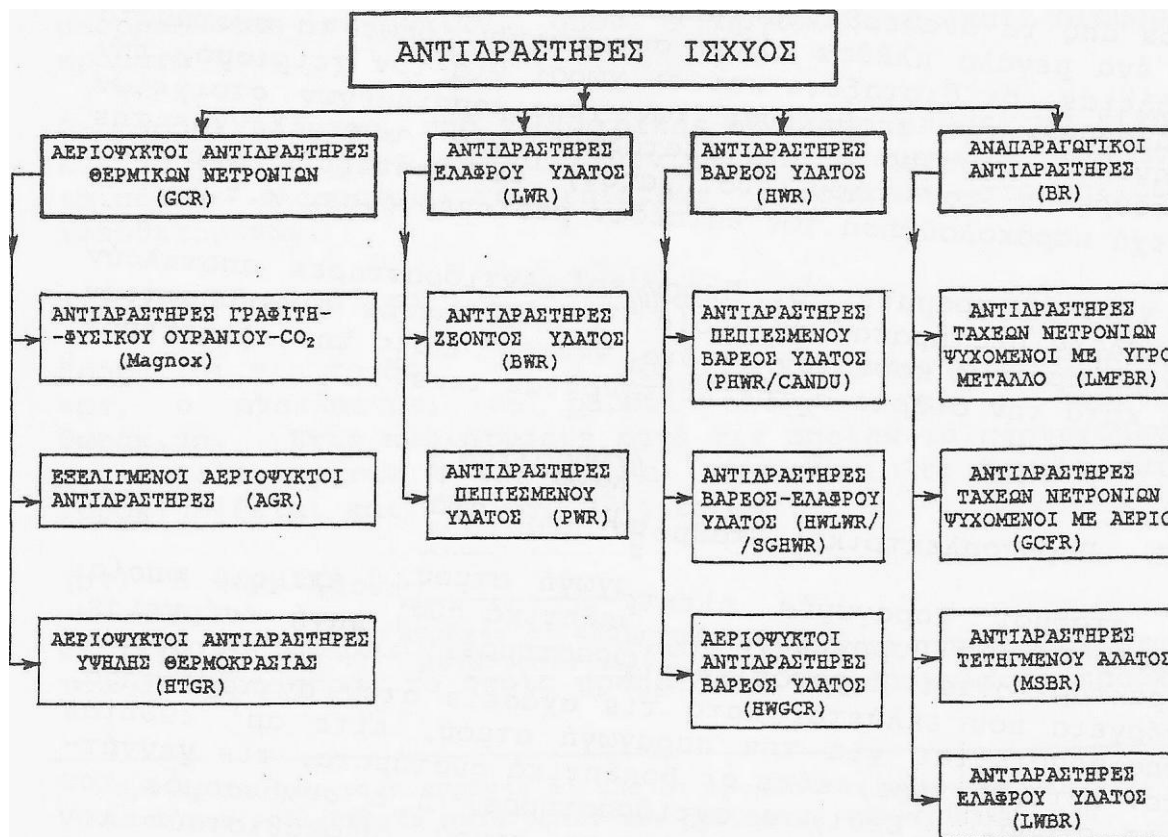
Το <<σύστημα πυρηνικής ατμοπαραγωγής>> (Nuclear Steam Supply System, NSSS) περιλαμβάνει στη μεν περίπτωση (α) τον αντιδραστήρα και την αντλία κυκλοφορίας στη δε περίπτωση (β) τον αντιδραστήρα, την ή τις μονάδες ατμοπαραγωγής και την ή τις σχετικές αντλίες κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου.

Η συγκρότηση του πυρηνοληκτρικού σταθμού συμπληρώνεται με το <<σύστημα ηλεκτροπαραγωγής>> που, όπως και στους συμβατικούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, αποτελείται από το στρόβιλο, τη γεννήτρια, το συμπυκνωτή (ψυγείο) με το σύστημα ψύξεώς του, την αντλία κυκλοφορίας για την επιστροφή του συμπυκνώματος και τέλος το μετασχηματιστή ανυψώσεως της τάσεως από την τάση της γεννήτριας στην τάση του συστήματος μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

Όπως είναι σαφές από την πιο πάνω περιγραφή, το σύστημα πυρηνικής ατμοπαραγωγής κατέχει στον πυρηνοληκτρικό σταθμό τη θέση που κατέχει ο λέβητας σ' ένα συμβατικό θερμοηλεκτρικό σταθμό καύσεως πετρελαίου, άνθρακος ή λιγνίτη.

### 3.6 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Κατά την διάρκεια της σχετικά βραχύχρονης ατομικής εποχής μας, πολλοί τύποι αντιδραστήρων έχουν προταθεί για την παραγωγή ατμού. Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 3.3) αναφέρονται οι τύποι των αντιδραστήρων που είναι σήμερα σε χρήση και εκείνοι που προβλέπεται ότι θα χρησιμοποιηθούν στο μέλλον. Διακρίνουμε τρεις κατηγορίες αντιδραστήρων, που χαρακτηρίζονται από το ίδιο είδος ψυκτικού μέσου ή επιβραδυντικού μέσου και, μια τέταρτη κατηγορία, τους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες.



Σχήμα 3.3 Τύποι αντιδραστήρων ισχύος.

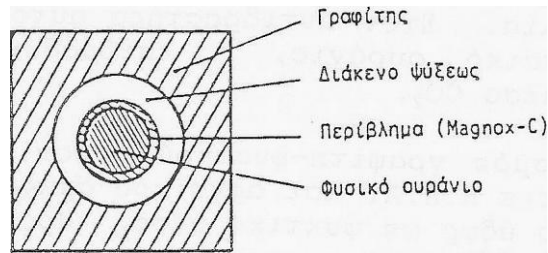
### 3.7 ΑΕΡΙΟΨΥΚΤΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ

#### 3.7.1 Αεριοψυκτος αντιδραστήρας γραφίτη - φυσικού ουρανίου

Ο αντιδραστήρας αυτός αναπτύχθηκε στην Αγγλία και Γαλλία όπου και χρησιμοποιήθηκε σε περιορισμένο αριθμό πυρηνοληκτρικών σταθμών για να αντικατασταθεί αργότερα με άλλο τύπο αντιδραστήρα. Χρησιμοποιεί γραφίτη ως επιβραδυντή, μεταλλικό φυσικό ουράνιο ως πυρηνικό καύσιμο και CO<sub>2</sub> ως ψυκτικό μέσο. Η ατμοπαραγωγή γίνεται, βεβαίως, έξω από τον αντιδραστήρα σε μονάδες ατμοπαραγωγής. Η συγκρότηση επομένως ενός πυρηνοληκτρικού σταθμού μ' αυτό τον τύπο αντιδραστήρα αποδίδεται, σε πολύ απλοποιημένη μορφή, από το Σχήμα 3.2β.

Πλίνθοι γραφίτη, κατάλληλης διατομής, με διαμήκεις κυλινδρικές οπές χρησιμοποιούνται για τη συγκρότηση της περιοχής όπου θα τοποθετηθεί το πυρηνικό καύσιμο. Το πυρηνικό καύσιμο έχει τη μορφή ράβδων που κάθε μια τοποθετείται κατά τον άξονα οπής στο γραφίτη. Μεταξύ ράβδου και γραφίτη σχηματίζεται το κανάλι ψύξεως κατά μήκος του οποίου κυκλοφορεί το ψυκτικό μέσο (CO<sub>2</sub>) (Σχήμα 3.4).

Οι ράβδοι του ουρανίου φέρουν μανδύα (περίβλημα) από κράμα Μαγνησίου με διαμόρφωση πτερυγίων. Ο μανδύας αποτελεί φραγμό στην είσοδο ραδιενεργών υλικών (αέρια προϊόντα σχάσεως, προϊόντα διαβρώσεως με ραδιενεργούς πυρήνες) στο ψυκτικό μέσο που θα τα μετέφερε και θα τα απέθετε έξω από τον αντιδραστήρα, π.χ. στις μονάδες ατμοπαραγωγής και τις αντλίες κυκλοφορίας. Έξάλλου, τα πτερύγια του μανδύα βελτιώνουν τις συνθήκες μεταφοράς της θερμότητας από το πυρηνικό καύσιμο στο ψυκτικό μέσο.



**Σχήμα 3.4** Στοιχείο πλέγματος αερίοψυκτου αντιδραστήρα γραφίτη – φυσικού ουρανίου (Magnox-C είναι ένα κράμα μαγνησίου που περιέχει Al σε ποσοστό μικρότερο του 1%).

Ορισμένοι αντιδραστήρες αυτού του τύπου, από τους πρώτους που κατασκευάστηκαν στη Γαλλία και Αγγλία, είχαν χρησιμοποιηθεί με βελτιστοποιημένη τη λειτουργία τους για την παραγωγή πλουτωνίου και όχι την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι αντιδραστήρες γραφίτη - φυσικού ουρανίου είναι ογκώδεις τόσο λόγω του είδους του πυρηνικού καυσίμου, όσο και λόγω του είδους του επιβραδυντού. Το μέγιστο μέγεθος που έχει κατασκευασθεί είναι για ηλεκτρική ισχύ περίπου 600 MWe και περιέχει, κατά προσέγγιση, 600 t φυσικού ουρανίου και 3700 t γραφίτη.

Οι υπόψη αντιδραστήρες λειτουργούν ακόμη, αλλά δεν κατασκευάζονται πλέον. Το πυρηνικό πρόγραμμα της Γαλλίας και της Αγγλίας έχει πλέον στραφεί σε άλλους τύπους αντιδραστήρων που χρησιμοποιούν εμπλουτισμένο ουράνιο. Η αρχική προτίμηση τους στον εγκαταλειφθέντα τύπο αντιδραστήρα ήταν συνέπεια του γεγονότος ότι, εκείνη την εποχή οι δύο χώρες δεν διέθεταν εγκαταστάσεις παραγωγής εμπλουτισμένου ουρανίου.

### **3.7.2. Εξελιγμένος αερίοψυκτος αντιδραστήρας (AGR)**

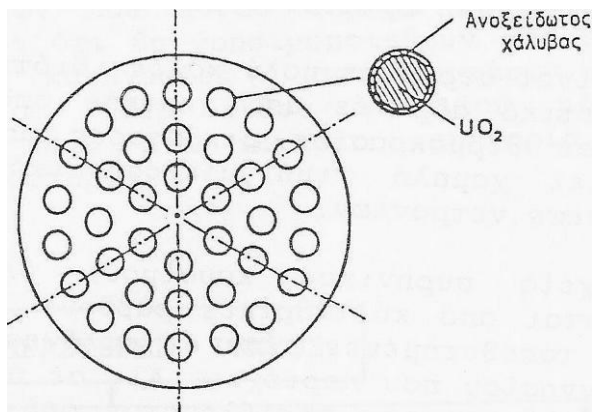
Ο τύπος αυτός, γνωστός ως AGR από τα αρχικά των λέξεων Advanced Gas-cooled Reactor, είναι η δεύτερη γενεά αντιδραστήρων που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην Αγγλία, μπορεί δε να θεωρηθεί εξέλιξη του προηγούμενου τύπου αντιδραστήρα.

Στον υπόψη αντιδραστήρα ως επιβραδυντής χρησιμοποιείται γραφίτης, ως ψυκτικό μέσο CO<sub>2</sub> και ως πυρηνικό καύσιμο εμπλουτισμένο ουράνιο με τη μορφή UO<sub>2</sub>.

Η περιοχή τοποθέτησής του πυρηνικού καυσίμου διαμορφώνεται και πάλι με διάτρητους πλίνθους γραφίτη. Το πυρηνικό καύσιμο που τοποθετείται σε κάθε μια οπή έχει τη μορφή δέσμης ραβδίων μεταξύ των οποίων και δια της οπής κυκλοφορεί το ψυκτικό μέσο (CO<sub>2</sub>). Ο μανδύας των ραβδίων είναι από ανοξείδωτο χάλυβα και περικλείει το πυρηνικό καύσιμο (UO<sub>2</sub>) που έχει τη μορφή δισκίων (Σχήμα 3.5). Ο μανδύας τώρα δεν φέρει πτερύγια, αλλά είναι λείος.

Το μέγεθος των αντιδραστήρων του υπόψη τύπου, που κατασκευάστηκαν ή κατασκευάζονται, είναι για ηλεκτροπαραγωγή περίπου 600 MWe. Ένας αντιδραστήρας αυτού του μεγέθους περιέχει ενδεικτικά περίπου 120 t εμπλουτισμένου ουρανίου και περίπου 1250 t γραφίτη.

Ο τύπος αντιδραστήρα AGR που, όπως αναφέρθηκε, υπάρχει μόνο στην Αγγλία, έχει αποφασισθεί να μη κατασκευασθεί πλέον στο μέλλον. Έτσι η δεύτερη γενεά αντιδραστήρων του αγγλικού πυρηνικού προγράμματος ηλεκτροπαραγωγής θα κλείσει με την ολοκλήρωση των ήδη κατασκευαζομένων.

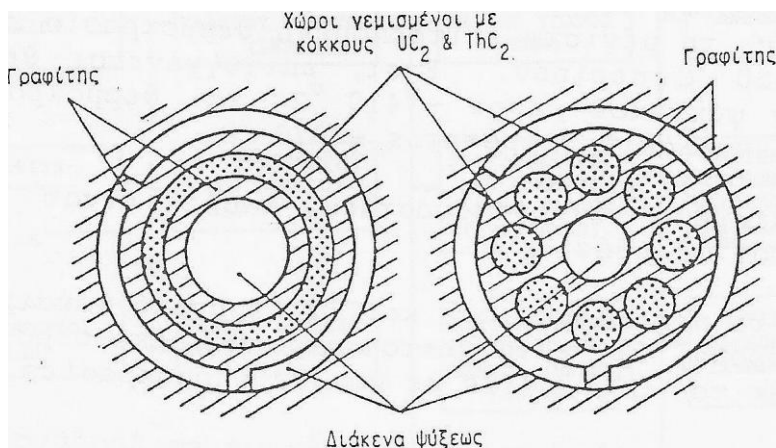


Σχήμα 3.5 Τομή στοιχείου πυρηνικού καυσίμου του αντιδραστήρα AGR.

### 3.7.3 Αερίψυκτος αντιδραστήρας υψηλής θερμοκρασίας (HTGR)

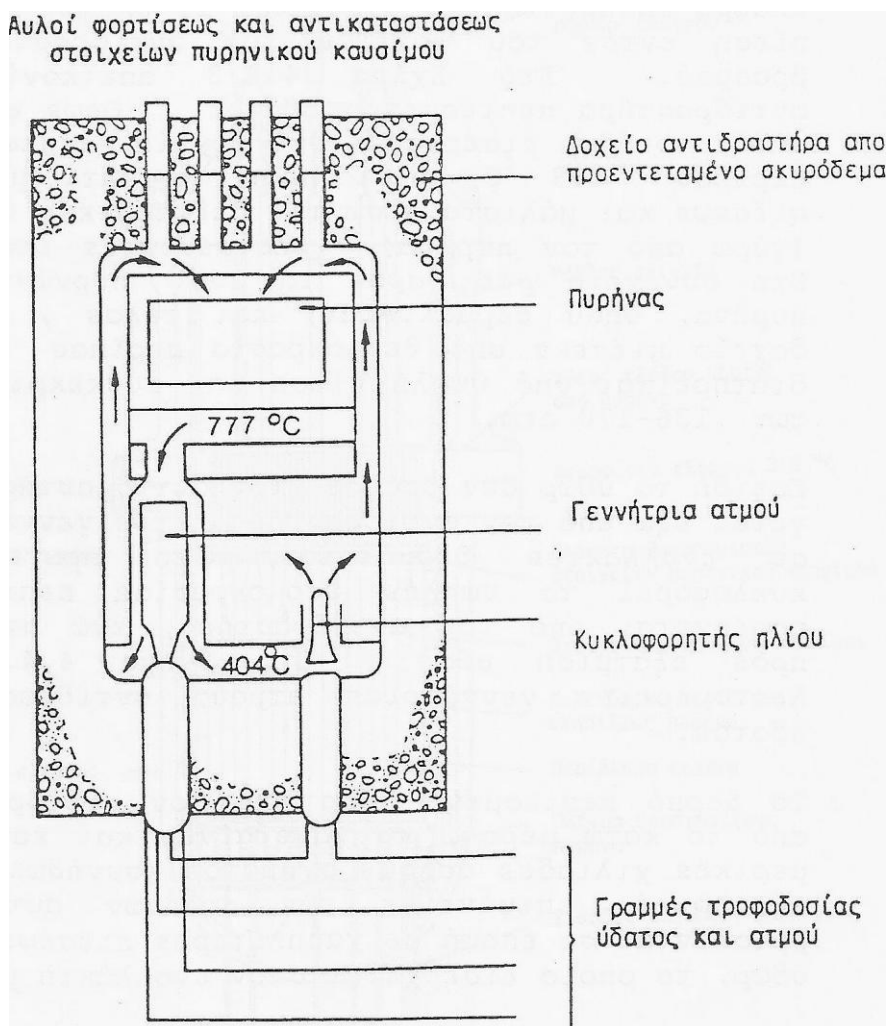
Η πλέον θεαματική πρόοδος στην τεχνολογία των αερίψυκτων αντιδραστήρων θερμικών νετρονίων υπήρξε ο HTGR από τα αρχικά των λέξεων High Temperature Gas-cooled Reactor (Gulf General Atomic Company, Η.Π.Α.). Και στον αντιδραστήρα αυτόν χρησιμοποιείται γραφίτης ως επιβραδυντής, αλλά ως ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται He αντί του CO<sub>2</sub>. Το ήλιο ως ψυκτικό μέσο έχει πολύ καλλίτερες ιδιότητες από το CO<sub>2</sub>. Είναι πιο αδρανές (δεν αντιδρά με τον γραφίτη ή το πυρηνικό καύσιμο) και δεν απορροφά νετρόνια (άρα δεν καθίσταται ραδιενεργό). Η θερμοκρασία εξόδου του ηλίου μπορεί να φθάσει τους 800 °C (Dragon/Μεγάλη Βρετανία) και ίσως τους 900 ή 950 °C. Ο HTGR της Gulf General Atomic Co. δίνει ατμό θερμοκρασίας 540 °C, πίεσεως 160 atm και λειτουργεί υπό ολική απόδοση 40%.

Το πυρηνικό καύσιμο του HTGR κατά την εκκίνηση του αποτελείται από μίγμα θορίου και ουρανίου υψηλού εμπλουτισμού. Το <sup>233</sup>U που παράγεται από το θόριο κατά την διάρκεια της λειτουργίας του αντιδραστήρα αντικαθιστά εν μέρει το καταναλισκόμενο ισότοπο <sup>235</sup>U. Το πυρηνικό καύσιμο έχει τη μορφή κόκκων δικαρβιδίων του ουρανίου και του θορίου, (U,Th)C<sub>2</sub>, καλυμμένων από αλληπάλληλα στρώματα γραφίτη προς παρεμπόδιση της διαφυγής των προϊόντων της σχάσεως, βλ. Σχήμα 3.6. Οι κόκκοι αυτοί τοποθετούνται συνήθως μέσα σε κυλινδρικούς αυλούς που υπάρχουν σε εξαγωνικά πρίσματα από γραφίτη, τα <<στοιχεία πυρηνικού καυσίμου>>. Τα πρίσματα αυτά φέρουν και παράλληλους αυλούς για την διέλευση του He.



Σχήμα 3.6 Λεπτομέρεια κυλινδρικών αυλών του αντιδραστήρα HTGR (Dragon/Μεγάλη Βρετανία).

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται σχηματικά η δομή του αερίψυκτου αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας. Ο πυρήνας του αντιδραστήρα, οι εναλλάκτες θερμότητας και οι κυκλοφορητές βρίσκονται μέσα στο δοχείο του αντιδραστήρα, το οποίο είναι κατασκευασμένο από προεντεταμένο σκυρόδεμα.



**Σχήμα 3.7** Σχηματικό διάγραμμα αερίψυκτου αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας (HTGR).

### 3.8 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΕΛΑΦΡΟΥ ΥΔΑΤΟΣ (LWR)

Το φυσικό νερό αφ' ενός μεν είναι πολύ καλό μέσο για την επιβράδυνση των νετρονίων, αφ' ετέρου δεν έχει πολύ καλές και γνωστές ιδιότητες μεταφοράς της θερμότητας. Επίσης, πολύ γνωστή και ανεπτυγμένη είναι η τεχνολογία των μετάλλων που χρησιμοποιούνται κατά τη μεταφορά θερμότητας με νερό (π.χ. λέβητες, εναλλάκτες θερμότητας κλπ.). Έτσι, λοιπόν, ήταν εύλογο το φυσικό νερό να συγκεντρώσει την προσοχή της πυρηνικής τεχνολογίας προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα, ως επιβραδυντής και ως ψυκτικό μέσο των πυρηνικών αντιδραστήρων.

Το υδρογόνο εμφανίζεται στη φύση ως μίγμα των δύο ισοτόπων του  $^1\text{H}$  (ελαφρό υδρογόνο) και  $^2\text{H}$  ( $^2\text{D}$ , βαρύ υδρογόνο), με επικρατέστερο σε αναλογία το ελαφρό υδρογόνο (βλ. Πίνακα 1.1). Συνεπώς, το φυσικό νερό είναι μίγμα από ελαφρό νερό ( $\text{H}_2\text{O}$ ) και βαρύ νερό ( $\text{D}_2\text{O}$ ) σε πολύ μικρή αναλογία. Έτσι λοιπόν το φυσικό νερό

χαρακτηρίζεται και ως ελαφρό νερό, ενώ οι αντιδραστήρες που το χρησιμοποιούν για την επιβράδυνση των νετρονίων και για την ψύξη τους ονομάζονται και αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος, είναι δε γνωστοί ως LWR από τα αρχικά των λέξεων Light Water Reactors.

Επειδή το ελαφρύ υδρογόνο (H-1) έχει σχετικώς μεγάλη ικανότητα απορροφήσεως θερμικών νετρονίων, κρίσιμο σύστημα με φυσικό νερό ως επιβραδυντή μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη χρησιμοποίηση επαρκώς εμπλουτισμένου ουρανίου. Γι' αυτό το λόγο, οι χώρες που πρώτες ανέπτυξαν και χρησιμοποίησαν αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος ήταν οι Η.Π.Α. και η Σοβιετική Ένωση που διέθεταν εγκαταστάσεις ισοτοπικού εμπλουτισμού του ουρανίου. Αντιδραστήρες αυτού του τύπου κατασκευάζονται σήμερα και σε άλλες χώρες (Γαλλία, Γερμανία, Ελβετία, Σουηδία κλπ.), ενώ, εξ άλλου, εγκαταστάσεις παραγωγής εμπλουτισμένου ουρανίου διαθέτουν σήμερα τόσο η Γαλλία, όσο και η Αγγλία.

Οι αντιδραστήρες ισχύος ελαφρού ύδατος (LWR) είναι σήμερα οι πιο διαδεδομένοι. Σε τέτοιο τύπο στράφηκαν τόσο η Γαλλία, όσο και η Αγγλία, που και οι δύο είναι από τις πρωτοπόρες χώρες στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος και στη χρησιμοποίηση της πυρηνικής ενεργείας για ηλεκτροπαραγωγή. Το πυρηνοληλεκτρικό πρόγραμμα της Γαλλίας, από το 1970 περίπου, βασίζεται σε αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος, ενώ στην Αγγλία αυτό θα συμβεί μετά την αποπεράτωση της κατασκευής των προγραμματισμένων αντιδραστήρων ισχύος τύπου AGR (βλ. παράγραφο 3.7.2).

Υπάρχουν δύο δυνατότητες χρησιμοποίησης του ελαφρού νερού ως ψυκτικού μέσου πυρηνικού αντιδραστήρα. Η πρώτη δυνατότητα είναι να επιτραπεί βρασμός του νερού μέσα στον ίδιο τον αντιδραστήρα, οπότε ο παραγόμενος ατμός οδηγείται από κει κατ' ευθεία στο στρόβιλο. Η δεύτερη δυνατότητα είναι να μην επιτραπεί βρασμός, αλλά θερμό νερό, εξερχόμενο από τον αντιδραστήρα, να οδηγηθεί σε ατμοπαραγωγό μονάδα, όπου πλέον ατμός παράγεται στο δευτερεύον κύκλωμα της. Και οι δύο δυνατότητες αναπτύχθηκαν τεχνολογικά, έτσι ώστε σήμερα να υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι αντιδραστήρων ελαφρού ύδατος.

Ο τύπος αντιδραστήρα ισχύος ελαφρού ύδατος που επιτρέπει το βρασμό ονομάζεται <<αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος>> και είναι γνωστός ως BWR, αρχικά των λέξεων Boiling Water Reactor. Ο τύπος αντιδραστήρα ισχύος ελαφρού ύδατος που δεν επιτρέπει βρασμό μέσα σ' αυτόν, ονομάζεται <<αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος>> και είναι γνωστός ως PWR, αρχικά των λέξεων Pressurized Water Reactor.

### **3.8.1 Αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος (BWR)**

Η βασική συγκρότηση ενός πυρηνοληλεκτρικού σταθμού παραγωγής με αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος αποδίδεται από το Σχήμα 3.2α. Εδώ ο αντιδραστήρας κατέχει τη θέση του λέβητα ενός συμβατικού θερμοηλεκτρικού σταθμού, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.5.

Για πολύ καιρό, στην πορεία αναπτύξεως της τεχνολογίας των αντιδραστήρων ζέοντος ύδατος, επιστεύετο ότι ο βρασμός μέσα στον αντιδραστήρα είχε τον κίνδυνο δημιουργίας επικίνδυνης αστάθειας στη λειτουργία του λόγω ανομοιογένειας τόσο στο σχηματισμό, όσο και στην κίνηση των φυσαλίδων του ατμού. Όμως εντατική έρευνα στο θέμα

απέδειξε ότι τέτοιος κίνδυνος δεν υπάρχει, όταν ο αντιδραστήρας λειτουργεί σε αρκετά μεγάλη πίεση. Η πίεση λειτουργίας των αντιδραστήρων ζέοντος ύδατος είναι σήμερα περίπου 1.000 p.s.i.a (~70 bar).

Ένας αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος έχει δύο βασικά προτερήματα: Το πρώτο είναι ότι με την ατμοπαραγωγή μέσα στον αντιδραστήρα αποφεύγεται η παρεμβολή ατμοπαραγωγού μονάδος μεταξύ του αντιδραστήρα και του στρόβιλου, με αποτέλεσμα τη σημαντική απλούστευση της συγκροτήσεως του πυρηνοληλεκτρικού σταθμού και τη μείωση του κόστους κατασκευής του. Το δεύτερο προτέρημα οφείλεται στο γεγονός ότι για την ίδια ποσότητα νερού, περισσότερη θερμότητα παραλαμβάνεται ως λανθάνουσα θερμότητα (βρασμός), παρά ως αισθητή θερμότητα (απλή ανύψωση της θερμοκρασίας του νερού). Αυτό σημαίνει ότι, για την <<ανάληψη>> από ένα αντιδραστήρα ορισμένης θερμικής ισχύος, η ποσότητα του νερού που πρέπει να κυκλοφορήσει ανά μονάδα χρόνου μέσα από τον αντιδραστήρα είναι μικρότερη στην περίπτωση που γίνεται βρασμός, παρά όταν δεν γίνεται.

Τα πιο πάνω τεχνικά προτερήματα ενός αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος αντισταθμίζονται κατά ένα μεγάλο μέρος από ένα μειονέκτημα που παρουσιάζει ο τύπος αυτός. Κατά τη διάρκεια της παραμονής του νερού μέσα στο λειτουργούντα αντιδραστήρα τα νετρόνια πραγματοποιούν με το  $^{16}\text{O}$ , δηλαδή με την πλουσιότερη ισοτοπική συνιστώσα του φυσικού οξυγόνου (βλ. Πίνακα 1.1), την πυρηνική αντίδραση  $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ . Η αντίδραση αυτή δίνει τον β-ραδιενεργό πυρήνα  $^{16}\text{N}$ , του οποίου η β-διάσπαση ακολουθείται από εκπομπή γ-ακτινοβολίας με ενέργεια φωτονίων  $6\div 7$  MeV. Έτσι, λοιπόν, ο παραγόμενος στον αντιδραστήρα ατμός είναι, όπως λέμε, ραδιενεργός, αφού αναπόφευκτα περιέχει ραδιενεργούς πυρήνες  $^{16}\text{N}$ , που είναι και η κύρια αίτια της ραδιενέργειας του. Η γ-ακτινοβολία που εκπέμπεται κατά την πορεία του ραδιενεργού ατμού από τις εγκαταστάσεις του συμβατικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής (βλ. Σχήμα 3.2α), δηλαδή σωληνώσεις, στρόβιλος, συμπυκνωτής, αντλία κυκλοφορίας κλπ., επιβάλλει τη <<θωράκιση>> των εγκαταστάσεων αυτών για την προστασία των εργαζομένων από την ακτινοβολία αυτή. Έτσι, λοιπόν, η όλη συγκρότηση δεν έχει την απλότητα που θα είχε αν δεν υπήρχε ανάγκη θωρακίσεως, λόγω της οποίας επιβαρύνεται και το κόστος κατασκευής.

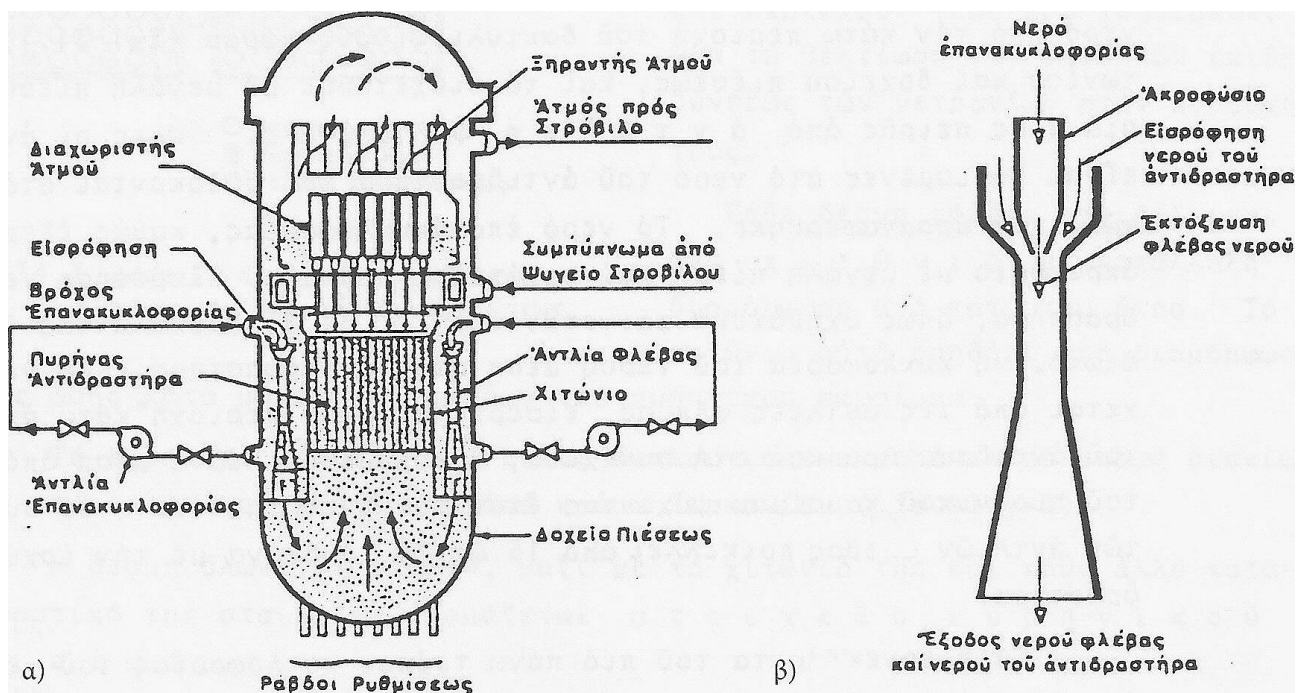
Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο ραδιενεργός πυρήνας  $^{16}\text{N}$  είναι σχετικά βραχύβιος, αφού έχει χρόνο υποδιπλασιασμού περίπου 7 sec. Αυτό έχει ως συνέπεια, το νερό και ο ατμός να αποκτούν και να διατηρούν τη ραδιενέργειά τους, για την οποία γίνεται λόγος, πρακτικά όσο διαρκεί η λειτουργία του αντιδραστήρα. Όταν διακοπεί η λειτουργία του αντιδραστήρα η ραδιενέργεια αυτή αποσβένεται πολύ γρήγορα, λόγω ακριβώς του μικρού χρόνου υποδιπλασιασμού των ραδιενεργών πυρήνων  $^{16}\text{N}$ .

Θα πρέπει, τέλος, να αναφερθεί και το εξής γεγονός που μπορεί να θεωρηθεί ως <<εγγενής αδυναμία>> του αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος. Ο ατμός που παράγεται στον αντιδραστήρα και κυκλοφορεί μέσα από το στρόβιλο, περνάει από το συμπυκνωτή (ψυγείο) και μετά ως συμπύκνωμα επιστρέφει μέσω αντλίας στον αντιδραστήρα, έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει και να αποθέσει σ' αυτά τα τμήματα της εγκαταστάσεως προϊόντα διαβρώσεως υλικών του αντιδραστήρα που περιέχουν μακρόβιους ραδιενεργούς πυρήνες. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να δημιουργήσει προβλήματα, π.χ. κατά τη συντήρηση των προαναφερθέντων μηχανημάτων. Όμως, η μέχρι σήμερα μακροχρόνια πείρα λειτουργίας αντιδραστήρων ισχύος ζέοντος ύδατος απέδειξε ότι τέτοια



προβλήματα μπορούν να θεωρηθούν ανύπαρκτα.

Το Σχήμα 3.8α παρουσιάζει, σε απλοποιημένη μορφή, τη βασική συγκρότηση ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος και επιτρέπει την παρακολούθηση της ατμοποίησης.



Σχήμα 3.8 (α) Βασική συγκρότηση αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος (β) Αντλία φλέβας.

Ο πυρήνας του αντιδραστήρα, δηλαδή η περιοχή με τις δέσμες των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου και τον επιβραδυντή, βρίσκεται στο εσωτερικό ενός χιτωνίου, που σχηματίζει με το δοχείο πίεσεως δακτυλοειδή χώρο. Στο πάνω τμήμα αυτού του χώρου εισέρχεται, διανεμόμενο, το συμπύκνωμα του ατμού προερχόμενο από το ψυγείο (συμπυκνωτή) του στροβίλου και με θερμοκρασία μικρότερη εκείνης του βρασμού του νερού στην πίεση λειτουργίας. Π.χ. για πίεση λειτουργίας 1.040 p.s.i.a η θερμοκρασία βρασμού είναι περίπου 288 °C, ενώ η θερμοκρασία του συμπυκνώματος στην είσοδο του δοχείου πίεσεως είναι περίπου 216 °C.

Το νερό εισέρχεται στην περιοχή του πυρήνα του αντιδραστήρα από το κάτω μέρος και καθώς τη διατρέχει θερμαίνεται και κατά ένα ποσοστό ατμοποιείται. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι, κατά βάρος, ποσοστό 13% περίπου του ρευστού που εξέρχεται της περιοχής του πυρήνα του αντιδραστήρα είναι ατμός. Το υπόλοιπο κυκλοφορεί πάλι στον αντιδραστήρα περνώντας από το δακτυλοειδή χώρο, μεταξύ χιτωνίου και δοχείου πίεσεως που προαναφέρθηκε, στον οποίο και αναμιγνύεται με το συμπύκνωμα από το ψυγείο του στροβίλου. Έτσι το νερό που εισέρχεται στον πυρήνα του αντιδραστήρα έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη της θερμοκρασίας του συμπυκνώματος, αλλά μικρότερη της θερμοκρασίας βρασμού του νερού για την πίεση λειτουργίας του αντιδραστήρα. Π.χ. για την τυπική περίπτωση, στην οποία αναφέρονται τα πιο πάνω αριθμητικά δεδομένα, το νερό εισέρχεται στην περιοχή του πυρήνα του αντιδραστήρα με θερμοκρασία μεταξύ 216 °C και 288 °C.

Το μίγμα υγρού και ατμού που εξέρχεται της περιοχής του πυρήνα του αντιδραστήρα περνά από διάταξη διαχωριστών ατμού, που αφαιρούν κατά το μεγαλύτερο ποσοστό την

υγρή φάση. Στη συνέχεια ο ατμός περνά από διάταξη ξηραντών ατμού που του αφαιρούν την υπόλοιπη υγρασία του. Ο ατμός μετά τους ξηραντές οδηγείται πλέον στο στρόβιλο.

Η αναγκαία κυκλοφορία του νερού μέσα στον αντιδραστήρα προκαλείται από το σύστημα επανακυκλοφορίας που αποτελείται από δύο βρόχους εξωτερικά του δοχείου πίεσεως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8α. Ο κάθε βρόχος, με την αντλία επανακυκλοφορίας που διαθέτει, παραλαμβάνει νερό από την κάτω περιοχή του δακτυλιοειδούς χώρου (Σχήμα 3.8α), μεταξύ χιτωνίου και δοχείου πίεσεως, και το διοχετεύει με μεγάλη πίεση στα ακροφύσια μιας σειράς από αντλίες φλέβας. Όλες οι αντλίες φλέβας είναι βυθισμένες στο νερό του αντιδραστήρα και βρίσκονται στο δακτυλιοειδή χώρο που προαναφέρθηκε. Το νερό επανακυκλοφορίας, καθώς εξέρχεται από το ακροφύσιο με μεγάλη πίεση και ταχύτητα, προκαλεί εισρόφηση νερού του αντιδραστήρα, όπως σχηματικά φαίνεται στο Σχήμα 3.8β, προκαλώντας έτσι την επιδιωκόμενη κυκλοφορία του νερού μέσα στον αντιδραστήρα. Το νερό, που εξέρχεται από τις αντλίες φλέβας, εισέρχεται στην περιοχή κάτω από τον πυρήνα του αντιδραστήρα και στη συνέχεια, ανερχόμενο, περνά μέσα από την περιοχή του πυρηνικού καυσίμου ψύχοντας έτσι τον αντιδραστήρα. Το συνολικό πλήθος των αντλιών φλέβας ποικίλλει από 16 ως 24, ανάλογα με την ισχύ του αντιδραστήρα.

Τα πλεονεκτήματα του πιο πάνω τρόπου κυκλοφορίας του νερού στον αντιδραστήρα για την ψύξη του είναι τα έξης: α) ο κύριος όγκος του νερού ψύξεως κυκλοφορεί μέσα στον πυρήνα του αντιδραστήρα, β) οι αντλίες φλέβας για την κυκλοφορία του νερού ψύξεως δεν έχουν κινούμενα μέρη και βρίσκονται μέσα στο δοχείο πίεσεως, γ) το σύστημα επανακυκλοφορίας, με ρύθμιση της παροχής του, επιτρέπει ρύθμιση της ισχύος του αντιδραστήρα μέσα σε ορισμένα όρια και δ) το σύστημα επανακυκλοφορίας συμβάλλει θετικά στην ασφάλεια του αντιδραστήρα σε περίπτωση αστοχίας που οδηγεί σε απώλεια νερού από τον αντιδραστήρα. Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινισθεί ότι η χρησιμοποίηση εξωτερικών βρόχων για την επανακυκλοφορία του νερού μέσα στον αντιδραστήρα δεν είναι λύση που εφαρμόζεται σε όλες τις κατασκευές. Υπάρχουν πράγματι κατασκευές, όπου αντί αντλιών φλέβας χρησιμοποιούνται στη θέση τους αξονικές αντλίες, των οποίων οι κινητήριες άξονες διαπερνούν, από το κάτω μέρος, το δοχείο πίεσεως και συνδέονται με τους κινητήρες των αντλιών. Η επανακυκλοφορία του νερού με αντλίες από τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα έχει τα α), γ) και δ), το δε μειονέκτημα της υπάρξεως περιστρεφόμενων μερών θα πρέπει να αξιολογηθεί σε συνδυασμό με το πλεονέκτημα μη υπάρξεως εξωτερικών βρόχων.

Το πυρηνικό καύσιμο τοποθετείται στον αντιδραστήρα με τη μορφή δεσμών π.χ.  $8 \times 8$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9 που αναφέρεται σε συγκεκριμένη κατασκευή. Από τις 64 ράβδους μιας δέσμης του Σχήματος 3.9, οι 54 περιέχουν πυρηνικό καύσιμο ενώ 8 ράβδοι είναι συμπαγείς από ανοξείδωτο χάλυβα και χρησιμεύουν για τη συγκρότηση της δέσμης και άλλες 2 είναι κοίλες και περιέχουν νερό που χρησιμεύει για τη βελτίωση των συνθηκών επιβραδύνσεως των νετρονίων στην περιοχή τους.

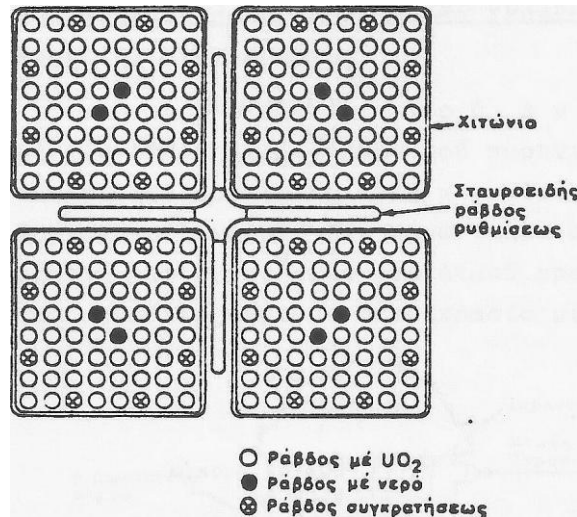
Κάθε δέσμη ράβδων περιβάλλεται από χιτώνιο με κατάλληλη διαμόρφωση στο κάτω του άκρο. Το χιτώνιο αυτό βοηθάει στη διαμόρφωση καλής ροής κατά μήκος των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου.

Το πυρηνικό καύσιμο που είναι εμπλουτισμένο ουράνιο σε μορφή δισκίων  $UO_2$ , περιέχεται σε περίβλημα από κράμα ζirkονίου (Zircaloy-2).

Η δέσμη όλων των ράβδων, μαζί με το χιτώνιό της και κάθε άλλο κατασκευαστικό της

στοιχείο, ονομάζεται στοιχείο πυρηνικού καυσίμου.

Οι ράβδοι ρυθμίσεως των αντιδραστήρων ζέοντος ύδατος έχουν σταυροειδή μορφή και κινούνται μεταξύ στοιχείων πυρηνικού καυσίμου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9. Οι ράβδοι ρυθμίσεως εισέρχονται στον αντιδραστήρα από το κάτω μέρος του δοχείου πίεσεως, Σχήμα 3.8α για δύο λόγους: Ο πρώτος είναι ότι πάνω από τον πυρήνα του πυρηνικού αντιδραστήρα υπάρχουν οι διατάξεις των διαχωριστών και των ξηραντών του ατμού. Ο δεύτερος λόγος είναι, ότι η μεταβολή της βυθίσεως των ράβδων ρυθμίσεως σ' εκείνη την περιοχή του πυρήνα του αντιδραστήρα που δεν έχει ή έχει λίγες φυσαλίδες ατμού, καθιστά τη ρύθμιση πιο αποτελεσματική.



**Σχήμα 3.9** Διάταξη στοιχείων πυρηνικού καυσίμου και ράβδου ρυθμίσεως.

Το δοχείο πίεσεως των αντιδραστήρων ζέοντος ύδατος είναι αρκετά ογκώδες λόγω των διατάξεων διαχωριστών - ξηραντών ατμών που περιέχει.

Αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος κατασκευάζονται σε μεγέθη κατάλληλα για ηλεκτρική ισχύ σταθμού της τάξεως των 600 MW, 900 MW και 1200 MW, με επικρατέστερα τα δύο τελευταία μεγέθη.

Ο Πίνακας 3.1 που ακολουθεί παρέχει ορισμένα στοιχεία ενός <<τυπικού>> αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος.

**Πίνακας 3.1** Στοιχεία ενός τυπικού αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος.

Θερμική Ισχύς του αντιδραστήρα	3.579 MWth
Βαθμός απόδοσης του Σταθμού	34%
Ηλεκτρική Ισχύς του Σταθμού	1.220 MWe
Πυρήνας του Αντιδραστήρα	
Διάμετρος	4,9 m
Ύψος	3,8 m
Στοιχεία Πυρηνικού Καυσίμου	
Δέσμη	8 × 8 ράβδων
Πλήθος	748
Σύνολο ράβδων	46.376
Συνολικό βάρος	238 t
Πυρηνικό καύσιμο	
Υλικό	UO <sub>2</sub> σε δισκία
Διάμετρος δισκίου	1,04 cm
Ύψος δισκίου	1,04 cm
Συνολικό βάρος του UO <sub>2</sub>	155 t
Εμπλουτισμός	
Αρχικό φορτίο	1,7 - 2,1% <sup>235</sup> U
Για αντικατάσταση (μέσος όρος)	2,8% <sup>235</sup> U
Αντικατάσταση Πυρηνικού Καυσίμου	1/4 του φορτίου κάθε 12 μήνες μέχρι 1/3 του φορτίου κάθε 18 μήνες, με διακοπή της λειτουργίας του αντιδραστήρα
Δοχείο Πίεσης	
Διάμετρος	6 m
Ύψος	22 m
Βάρος	884,5 t

### 3.8.2 Αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος (PWR)

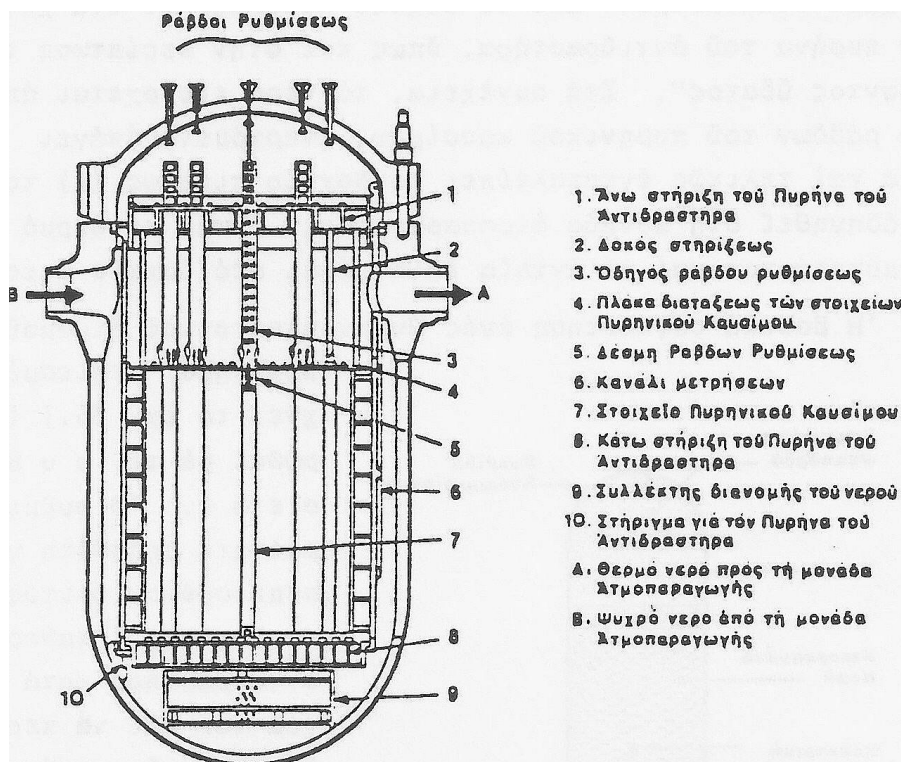
Η βασική συγκρότηση ενός πυρηνοληλεκτρικού σταθμού παραγωγής με αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος αποδίδεται από το Σχήμα 3.2β. Η τεχνολογία αυτού του τύπου αντιδραστήρα αναπτύχθηκε παράλληλα με την τεχνολογία του αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος, όταν ακόμη υπήρχαν αμφισβητήσεις σχετικά με την ευσταθή λειτουργία του τελευταίου και ανησυχίες για τα άλλα μειονεκτήματα του που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο 3.8.1. Άλλωστε, ο υπόψη τύπος είχε κριθεί ότι ήταν ο πιο κατάλληλος για την πυρηνική πρόωση πλοίων.

Η παραγωγή, στη μονάδα ατμοπαραγωγής, ατμού της ίδιας περίπου ποιότητας με τον ατμό ενός αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος απαιτεί τέτοια θερμοκρασία νερού από τον αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος που για να παραχθεί χωρίς βρασμό, πρέπει η πίεση στον αντιδραστήρα να είναι αρκετά μεγάλη. Έτσι, λοιπόν, η πίεση λειτουργίας των αντιδραστήρων πεπιεσμένου ύδατος είναι πολύ μεγαλύτερη εκείνης των αντιδραστήρων ζέοντος ύδατος. Στους υπόψη αντιδραστήρες είναι της τάξεως των 2.500 p.s.i.a. (~ 170 bar), έναντι περίπου 1.000 p.s.i.a. (~ 70 bar) όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.8.1 για τους αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος.

Το πάχος των τοιχωμάτων του δοχείου πίεσεως των αντιδραστήρων πεπιεσμένου ύδατος είναι πολύ μεγαλύτερο εκείνου των αντιδραστήρων ζέοντος ύδατος, λόγω ακριβώς της πολύ μεγαλύτερης πίεσεως λειτουργίας των πρώτων. Από την άλλη μεριά, όμως, επειδή το δοχείο πίεσεως ενός αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος περιλαμβάνει και τις διατάξεις διαχωριστών-ξηραντών ατμού (βλ. Σχήμα 3.8α) έχει όγκο πολύ μεγαλύτερο του όγκου του δοχείου πίεσεως ενός αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος της ίδιας ισχύος. Τελικά, το κόστος του δοχείου πίεσεως δεν διαφέρει πολύ στους δύο τύπους αντιδραστήρων.

Το θερμό νερό, μετά την έξοδο του από το δοχείο πίεσεως, αποδίδει τη θερμότητα που παρέλαβε στον αντιδραστήρα σε ορισμένο αριθμό μονάδων ατμοπαραγωγής. Το πλήθος των μονάδων αυτών εξαρτάται από την ισχύ του αντιδραστήρα. Μια μονάδα ατμοπαραγωγής, με την αντλία επαναφοράς του νερού στον αντιδραστήρα και τις σχετικές σωληνώσεις, συγκροτούν, όπως λέμε, ένα βρόχο ψύξεως. Οι υπόψη αντιδραστήρες που κατασκευάζονται για πυρηνοληλεκτρικούς σταθμούς με ονομαστική ισχύ περίπου 600 MW, 900 MW και 1.200 MW, διαθέτουν αντιστοίχως 2, 3 και 4 βρόχους ψύξεως.

Το Σχήμα 3.10 δείχνει τη συγκρότηση του δοχείου πίεσεως ενός αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος. Το νερό που επιστρέφει στον αντιδραστήρα (B) από τη μονάδα ατμοπαραγωγής κατευθύνεται προς τα κάτω μέσα από ένα δακτυλιοειδή χώρο διαμορφωμένο από το δοχείο πίεσεως και ένα χιτώνιο που περιβάλλει τον πυρήνα του αντιδραστήρα, όπως και στην περίπτωση του αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος. Στη συνέχεια, το νερό εισέρχεται από κάτω στην περιοχή των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου, ανερχόμενο απάγει την παραγόμενη θερμότητα και τελικώς εγκαταλείπει το δοχείο πίεσεως (A) του αντιδραστήρα για να οδηγηθεί στη μονάδα ατμοπαραγωγής. Εκεί το θερμό νερό αποδίδει τη θερμότητά του και με αντλία επιστρέφει στο δοχείο πίεσεως.

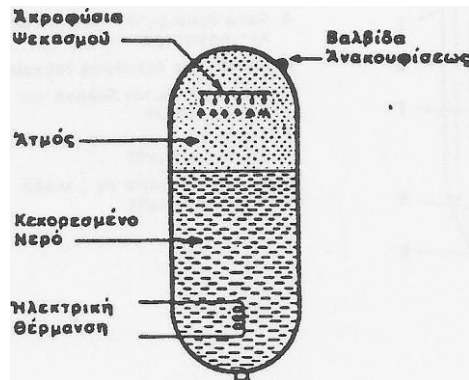


**Σχήμα 3.10** Δοχείο πίεσεως ενός αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος (πυρηνοληλεκτρικού σταθμού Trillo, Ισπανία, 1000 MW, Κατασκ. KWU).

Η βασική συγκρότηση ενός πυρηνοληλεκτρικού σταθμού παραγωγής με αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος που δείχνει το Σχήμα 3.2β πρέπει να συμπληρωθεί με το ρυθμιστή πίεσεως. Ο ρυθμιστής πίεσεως, απαραίτητη προσθήκη για ένα αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος, έχει ως προορισμό να διατηρεί σταθερή την πίεση στον αντιδραστήρα κατά την <<ομαλή>> λειτουργία του και να περιορίζει σε ανεκτά όρια τις διακυμάνσεις της κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων. Χωρίς το ρυθμιστή πίεσεως, μια διαστολή του νερού του συστήματος θα οδηγούσε σε καταστρεπτικά

αποτελέσματα, αφού το νερό είναι πρακτικώς ασυμπίεστο.

Ο ρυθμιστής πίεσεως είναι ένα δοχείο που περιέχει νερό κατά τα 2/3 του όγκου του και ατμό κατά το 1/3 (βλ. Σχήμα 3.11). Ο όγκος του δοχείου αυτού είναι το 7 ως 10% του συνολικού όγκου του πρωτεύοντος κυκλώματος νερού, δηλαδή του συστήματος κυκλοφορίας του νερού του αντιδραστήρα που περιλαμβάνει και τον ίδιο τον αντιδραστήρα.



Σχήμα 3.11 Ρυθμιστής Πίεσεως.

Ο ρυθμιστής πίεσεως παρεμβάλλεται στη διαδρομή του θερμού νερού από τον αντιδραστήρα προς τη μονάδα ατμοπαραγωγής, τοποθετούμενος κατακόρυφα.

Στο κάτω μέρος του ρυθμιστή πίεσεως, και βυθισμένες στο νερό, είναι τοποθετημένες ηλεκτρικές αντιστάσεις θερμάνσεως, ενώ στο πάνω μέρος με τον ατμό υπάρχουν ακροφύσια ψεκασμού νερού.

Η ηλεκτρική θέρμανση διατηρεί το νερό του ρυθμιστή πίεσεως στη θερμοκρασία κορεσμού που αντιστοιχεί στην πίεση του αντιδραστήρα. Αν, για κάποιο λόγο, διασταλεί το νερό στο κύκλωμα ψύξεως του αντιδραστήρα, η στάθμη του νερού στο ρυθμιστή πίεσεως ανεβαίνει και τότε το σύστημα έλεγχου της λειτουργίας του ρυθμιστή πίεσεως δίνει εντολή ψεκασμού κρύου νερού από τα ακροφύσια. Το νερό αυτό προκαλεί συμπύκνωση μέρους του ατμού στο ρυθμιστή πίεσεως και έτσι μειώνεται η αύξηση της πίεσεως που είχε προκληθεί από τη διαστολή του νερού. Αν η αύξηση αυτή της πίεσεως είναι τόσο μεγάλη, ώστε να είναι ανεπαρκής η δράση του ψεκασμού, τότε παίρνει εντολή και ανοίγει η ανακουφιστική βαλβίδα του ρυθμιστή πίεσεως (βλ. Σχήμα 3.11).

Αν, τώρα, για κάποιο λόγο, συσταλεί το νερό στο κύκλωμα ψύξεως του αντιδραστήρα, τότε το σύστημα έλεγχου του ρυθμιστή πίεσεως δίνει εντολή λειτουργίας στην ηλεκτρική θέρμανση του ρυθμιστή (Σχήμα 3.11) που ατμοποιεί μία ποσότητα του κεκορεσμένου νερού και αποκαθιστά την πίεση στον αντιδραστήρα που έτεινε να μειωθεί.

Τα στοιχεία πυρηνικού καυσίμου των αντιδραστήρων πεπιεσμένου ύδατος είναι δέσμες από ράβδους σε διάταξη παρόμοια με εκείνη της περιπτώσεως των αντιδραστήρων ζέοντος ύδατος (βλ. Σχήμα 3.9), χωρίς όμως χιτώνιο και με διαφορετικό τρόπο συγκρατήσεως των ράβδων στη δέσμη. Κάθε δέσμη, στις πρόσφατες κατασκευές, αποτελείται από  $17 \times 17$  ράβδους πυρηνικού καυσίμου. Το πυρηνικό καύσιμο είναι εμπλουτισμένο ουράνιο σε μορφή δισκίων και περιέχεται σε περίβλημα από κράμα ζirkονίου (Zircaloy-4).

Οι ράβδοι ρυθμίσεως των αντιδραστήρων πεπιεσμένου ύδατος εισέρχονται στον αντιδραστήρα από το πάνω μέρος του δοχείου πίεσεως (βλ. Σχήμα 3.10) και

διατάσσονται σε δέσμες που κάθε μια έχει το δικό της μηχανισμό κινήσεως. Το Σχήμα 3.12 δείχνει μια τέτοια δέσμη με 4 ράβδους ρυθμίσεως. Η διάταξη, η μορφή και οι διαστάσεις των ράβδων ρυθμίσεως επιλέγονται έτσι ώστε η διακίνησή τους στον αντιδραστήρα να γίνεται σε θέσεις ράβδων πυρηνικού καυσίμου που έχουν αφαιρεθεί από τα αντίστοιχα στοιχεία πυρηνικού καυσίμου.



Σχήμα 3.12 Δέσμη με 4 ράβδους ρυθμίσεως.

Οι αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος κατασκευάζονται σε μεγέθη κατάλληλα για ηλεκτρική ισχύ σταθμού της τάξεως των 600 MW, 900 MW και 1200 MW, με επικρατέστερα τα δύο τελευταία μεγέθη.

Ο Πίνακας 3.2 που ακολουθεί παρέχει ορισμένα στοιχεία ενός <<τυπικού>> αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος.

Τα στοιχεία του δοχείου πίεσεως αναφέρονται σε κατασκευασμένο αντιδραστήρα της ίδιας περίπου ισχύος.

Πίνακας 3.2 Στοιχεία ενός τυπικού αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος.

Θερμική Ισχύς του αντιδραστήρα	3.411 MWth
Βαθμός απόδοσης του Σταθμού	32%
Ηλεκτρική Ισχύς του Σταθμού	1.100 MWe
Πυρήνας του Αντιδραστήρα	
Διάμετρος	3,4 m
Ύψος	3,7 m
Στοιχεία Πυρηνικού Καυσίμου	
Δέσμη	15 × 15 ράβδων
Πλήθος	193
Σύνολο ράβδων	39.372
Πυρηνικό Καύσιμο	
Υλικό	UO <sub>2</sub> σε δισκία
Διάμετρος δισκίου	0,9 cm
Ύψος δισκίου	1,5 cm
Συνολικό βάρος του UO <sub>2</sub>	98 τ
Εμπλουτισμός	
Για αντικατάσταση	3,2% <sup>235</sup> U
Αρχικό φορτίο	μικρότερο του 3,2% <sup>235</sup> U
Αντικατάσταση Πυρηνικού Καυσίμου	
	1/3 του φορτίου κάθε 12 μήνες με διακοπή της λειτουργίας του αντιδραστήρα
Δοχείο Πίεσεως	
Διάμετρος (έσωτ.)	4,4 m
Πάχος τοιχώματος (συνολ.)	~ 22 cm
Ύψος	12,9 m

### 3.9 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΒΑΡΕΩΣ ΥΔΑΤΟΣ (HWR)

#### 3.9.1 Αντιδραστήρες πεπιεσμένου βαρέως ύδατος (PHWR/CANDU)

Το ελαφρύ υδρογόνο (H-1), όπως αναφέρθηκε στην αρχή της παραγράφου 3.8, έχει σχετικώς μεγάλη ικανότητα απορροφήσεως και γι' αυτό οι αντιδραστήρες ελαφρού νερού χρειάζονται εμπλουτισμένο ουράνιο.

Το βαρύ νερό (D<sub>2</sub>O), δηλαδή νερό με βαρύ υδρογόνο στο μόριο του, παρουσιάζει πολύ μικρότερη ικανότητα απορροφήσεως των θερμικών νετρονίων από ό,τι το ελαφρύ νερό, και αρκετά καλές ιδιότητες επιβραδύνσεως των νετρονίων. Έτσι, λοιπόν, κρίσιμο σύστημα, με επιβραδυντή βαρύ νερό, μπορεί να συγκροτηθεί με χρησιμοποίηση ακόμη και φυσικού ουρανίου. Το βαρύ νερό προσφέρεται επίσης και για την ψύξη του αντιδραστήρα.

Οι αντιδραστήρες με βαρύ νερό (HWR: Heavy Water Reactor) και φυσικό ουράνιο που έχουν αναπτυχθεί είναι του τύπου πεπιεσμένου ύδατος. Δηλαδή, η θερμική ισχύς που παράγεται στον αντιδραστήρα μεταφέρεται με το βαρύ νερό σε υγρή φάση σε μονάδες ατμοπαραγωγής, όπου στο δευτερεύον της γίνεται ατμοποίηση ελαφρού νερού για την τροφοδότηση του στροβίλου του πυρηνοληλεκτρικού σταθμού. Έτσι, λοιπόν, η βασική συγκρότηση ενός πυρηνοληλεκτρικού σταθμού παραγωγής με αντιδραστήρα βαρέως ύδατος είναι όμοια με εκείνη σταθμού που διαθέτει αντιδραστήρα ελαφρού πεπιεσμένου ύδατος. Ισχύει, δηλαδή, και στην υπόψη περίπτωση το διάγραμμα του Σχήματος 3.2β, με την προσθήκη του ρυθμιστή πίεσεως που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο 3.8.2.

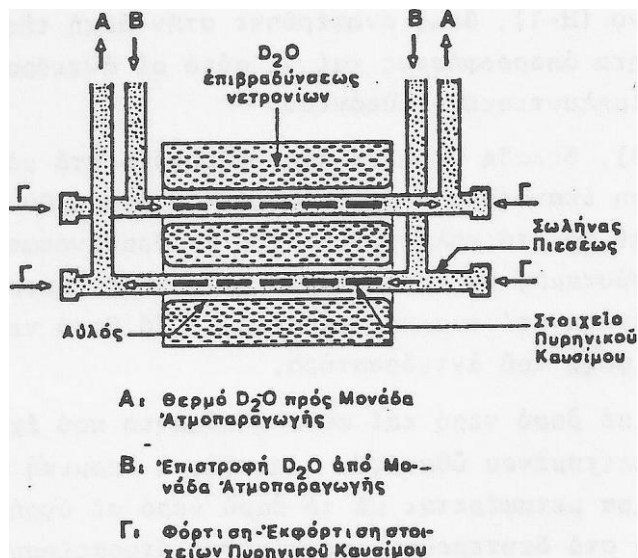
Οι αντιδραστήρες ισχύος με βαρύ νερό και φυσικό ουράνιο αναπτύχθηκαν κυρίως στον Καναδά και είναι γνωστοί με την ονομασία CANDU, από τα αρχικά των λέξεων Canadian Deuterium-Uranium (PHWR: Pressurized Heavy Water Reactor).

Το βαρύ νερό παράγεται, με κατάλληλη διαδικασία, από το φυσικό νερό στο οποίο περιέχεται σε πολύ μικρή αναλογία. Το βαρύ νερό του <<εμπορίου>> που χρησιμοποιείται στους αντιδραστήρες αυτούς δεν είναι τελείως <<καθαρό>>, αλλά περιέχει και ελαφρύ νερό (H<sub>2</sub>O) σε πολύ μικρή αναλογία (0,25% αναλογία μορίων).

Η χρησιμοποίηση φυσικού αντί εμπλουτισμένου ουρανίου και βαρέως ύδατος αντί ελαφρού ύδατος που έχει καλύτερες ιδιότητες επιβραδύνσεως των νετρονίων, οδηγούν σε διαστάσεις του πυρήνα του αντιδραστήρα πολύ μεγαλύτερες από ό,τι στην περίπτωση αντιδραστήρα ελαφρού πεπιεσμένου ύδατος. Έτσι, λοιπόν, το δοχείο πίεσεως του υπόψη αντιδραστήρα θα πρέπει να έχει πολύ μεγάλες διαστάσεις και ταυτόχρονα μεγάλο πάχος, λόγω της μεγάλης πίεσεως λειτουργίας που είναι αναγκαία για την αποφυγή του βρασμού. Ένα τέτοιο, δοχείο πίεσεως θα ήταν πολύ δαπανηρό.

Η τεχνολογία που αναπτύχθηκε στον Καναδά, αντί <<κοινού>> δοχείου πίεσεως, όπως π.χ. εκείνο των αντιδραστήρων ελαφρού πεπιεσμένου ύδατος, χρησιμοποιεί δοχείο με σωλήνες πίεσεως του οποίου η συγκρότηση φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 3.13. Πρόκειται για ένα κυλινδρικό δοχείο με οριζόντιο τον άξονά του, το οποίο φέρει διαμήκεις αυλούς. Ομόκεντρα με τους αυλούς υπάρχουν σωλήνες, όπως δείχνει το σχήμα, στους οποίους τοποθετούνται τα στοιχεία του πυρηνικού καυσίμου (δέσμες ράβδων).





**Σχήμα 3.13** Σχηματική συγκρότηση δοχείου με σωλήνες πίεσεως για αντιδραστήρα τύπου CANDU.

Το κυλινδρικό δοχείο πληρούται με βαρύ νερό, που είναι ο κύριος όγκος του επιβραδυντή των νετρονίων και <<περιβάλλει>> τους αυλούς. Μέσα από τις σωληνώσεις κυκλοφορεί βαρύ νερό για την απαγωγή της θερμότητας από τον αντιδραστήρα.

Η υπόψη συγκρότηση έχει το πλεονέκτημα ότι ο κύριος όγκος του  $D_2O$  στο κυλινδρικό δοχείο διατηρείται σε χαμηλή σχετικώς θερμοκρασία και επομένως δεν απαιτείται η διατήρησή του σε μεγάλη πίεση. Σε μεγάλη πίεση όμως, πρέπει να διατηρείται το βαρύ νερό των σωλήνων που ψύχει τον αντιδραστήρα, προκειμένου να αποφευχθεί ο βρασμός κατά τη λειτουργία. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι σωλήνες αυτοί ονομάζονται σωλήνες πίεσεως. Τα πλεονεκτήματα δοχείου με σωλήνες πίεσεως έναντι δοχείου πίεσεως είναι προφανή.

Τα στοιχεία πυρηνικού καυσίμου των αντιδραστήρων CANDU είναι δέσμες ράβδων. Σε κάθε σωλήνα πίεσεως τοποθετούνται περισσότερα του ενός στοιχεία πυρηνικού καυσίμου. Το πυρηνικό καύσιμο είναι φυσικό ουράνιο σε μορφή δισκίων  $UO_2$  και περιέχεται σε περίβλημα από κράμα ζirkονίου. Η φόρτιση-εκφόρτιση των στοιχείων πυρηνικού καυσίμου γίνεται από τα άκρα των σωλήνων πίεσεως (βλ. Σχήμα 3.13), χωρίς διακοπή της λειτουργίας του αντιδραστήρα, με τη χρησιμοποίηση κατάλληλων μηχανών.

Οι αντιδραστήρες τύπου CANDU κατασκευάζονται σε μέγεθος κατάλληλο για ηλεκτρική ισχύ σταθμού μέχρι και 750 MW περίπου.

Θα πρέπει τέλος να αναφερθεί ότι αντιδραστήρες με βαρύ νερό τύπου πεπιεσμένου ύδατος κατασκευάζονται και με δοχείο πίεσεως, όπως εκείνο των αντιδραστήρων ελαφρού πεπιεσμένου ύδατος.

Ο Πίνακας 3.3 παρέχει ορισμένα στοιχεία ενός <<τυπικού>> αντιδραστήρα τύπου CANDU.

### Πίνακας 3.3 Στοιχεία τυπικού αντιδραστήρα τύπου CANDU.

Θερμική Ισχύς του αντιδραστήρα	2.140 MW <sub>th</sub>
Βαθμός απόδοσης του Σταθμού	28%
Ηλεκτρική Ισχύς του Σταθμού	600 MWe
Πυρήνας του Αντιδραστήρα	
Διάμετρος	6,3 m
Ύψος	5,9 m
Στοιχεία Πυρηνικού Καυσίμου	
Δέσμη	37 ράβδων
Πλήθος	4.560 δέσμες
Σύνολο ράβδων	168.720
Πυρηνικό Καύσιμο	
Υλικό	Φυσικό Ουράνιο, UO <sub>2</sub> σε δισκία
Διάμετρος δισκίου	1,21 cm
Συνολικό βάρος UO <sub>2</sub>	95 t
Συνολικό βάρος D <sub>2</sub> O	463 t
Αντικατάσταση Πυρηνικού Καυσίμου	Πρακτικώς συνεχής, χωρίς διακοπή της λειτουργίας του αντιδραστήρα.

### 3.9.2 Αντιδραστήρες βαρέως-ελαφρού ύδατος (HWLWR)

Στους αντιδραστήρες του τύπου βαρέως-ελαφρού ύδατος (HWLWR: Heavy Water Light Water Reactor) χρησιμοποιείται φυσικό ουράνιο ως πυρηνικό καύσιμο, βαρύ ύδωρ ως επιβραδυντής και ελαφρύ ύδωρ ως ψυκτικό μέσο. Ο ατμός ο οποίος κινεί τον ατμοστρόβιλο παράγεται απευθείας στον <<πυρήνα>> του αντιδραστήρα, όπου επιτρέπεται ο βρασμός του ψυκτικού μέσου.

Ο αγγλικός τύπος HWLWR χαρακτηρίζεται ως <<αντιδραστήρας βαρέως ύδατος για την παραγωγή ατμού>> (SGHWR: Steam Generating Heavy Water Reactor). Στην πρωτότυπη μονάδα των 100 MW, η οποία κατασκευάστηκε από την UKAEA (United Kingdom Atomic Energy Authority) στο Winfrith και λειτούργησε περί τα τέλη του 1967, χρησιμοποιήθηκε ελαφρά εμπλουτισμένο ουράνιο. Υπήρξαν μερικά προβλήματα κατά τα πρώτα στάδια της λειτουργίας του συστήματος, που οφείλονται σε αστοχίες των στοιχείων πυρηνικού καυσίμου. Τα προβλήματα αντιμετωπίστηκαν και η μονάδα λειτούργησε ικανοποιητικά με διαθεσιμότητα της τάξεως του 90%. Η Μεγάλη Βρετανία έχει σχεδιάσει SGHWR των 450 MW και 600 MW, με την πρόθεση να διαθέσει σε εμπορική κλίμακα τον τύπο αυτόν του αντιδραστήρα, αλλά τουλάχιστον μέχρι σήμερα δεν έχουν γίνει παραγγελίες.

Η Καναδική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας κατασκεύασε στο Gentilly έναν αντιδραστήρα HWLWR των 250 MW. Ο αντιδραστήρας που λειτούργησε το 1970, βασίζει τη λειτουργία του αφ' ενός μεν στην πείρα που αποκτήθηκε από τους σταθμούς CANDU και αφ' ετέρου στην πείρα από το αγγλικό πρότυπο.

Στην Ιαπωνία κατασκευάστηκε ένας αντιδραστήρας HWLWR γνωστός με το όνομα Fugen. Στον Fugen, το ψυκτικό μέσο, δηλαδή το ελαφρύ ύδωρ βράζει μέσα στους αυλούς πίεσεως. Ο αντιδραστήρας χρησιμοποιεί ως πυρηνικό καύσιμο μίγμα οξειδίων του φυσικού ουρανίου και του πλουτωνίου, αντί του φυσικού ουρανίου μόνον. Για τον λόγο αυτόν μάλιστα, ο αντιδραστήρας Fugen είναι αρκετά μικρότερος σε διαστάσεις από τον CANDU.

### 3.9.3 Αερίψυκτος αντιδραστήρας βαρέως ύδατος (HWGCR)

Ο αερίψυκτος αντιδραστήρας βαρέως ύδατος (HWGCR: Heavy Water Gas Cooled Reactor) είναι ένας αερίψυκτος αντιδραστήρας (CO<sub>2</sub>) στον οποίο ο επιβραδυντής είναι βαρύ

ύδωρ. Το χρησιμοποιούμενο πυρηνικό καύσιμο είναι φυσικό ή ελαφρά εμπλουτισμένο ουράνιο. Αντιδραστήρες του τύπου αυτού λειτούργησαν στην Γαλλία (80 MW) το 1966, στην Τσεχοσλοβακία (140 MW) και την Δυτική Γερμανία (100 MW) το 1972. Οι αντιδραστήρες αυτοί δεν μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτοί σε μεγαλύτερα μεγέθη και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν προοπτικές κατασκευής και άλλων τέτοιων μονάδων.

### 3.10 ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ

Ως αναπαραγωγικοί χαρακτηρίζονται οι αντιδραστήρες (βλ. παράγραφο 2.6) στους οποίους πραγματοποιείται αναπαραγωγή δηλαδή σε εκείνους στους οποίους <<ο ρυθμός παραγωγής νέων σχάσιμων πυρήνων λόγω του φαινομένου της επώασης, είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό καταναλώσεως σχάσιμων πυρήνων>>. Το πλήθος των σχάσιμων πυρήνων οι οποίοι παράγονται κατά μέσον όρο ανά καταστρεφόμενο σχάσιμο πυρήνα (λόγω ραδιενεργού ενσωματώσεως ή σχάσεως), είναι γνωστό ως σχέση επώασης και ορίζεται ως εξής (βλ. παράγραφο 2.6):

$$(CR) = (\eta_{σχ\cdot\pi} - 1) \cdot F \quad (3.4)$$

όπου:  $\eta_{σχ\cdot\pi}$  είναι το πλήθος των νετρονίων τα οποία εκλύονται κατά μέσον όρο από σχάσεις ανά νετρόνιο που απορροφάται από σχάσιμο πυρήνα,  
και

$F$  είναι το ποσοστό του πλεονάσματος νετρονίων ( $\eta_{σχ\cdot\pi} - 1$ ) που απορροφώνται από επώασιμους πυρήνες.

Όταν  $(CR) > 1$ , έχουμε το φαινόμενο της αναπαραγωγής. Στην περίπτωση αυτή το μέγεθος,

$$(BG) = (CR) - 1 \quad (3.5)$$

δηλαδή, <<η καθαρή παραγωγή σχάσιμων ανά καταστρεφόμενο σχάσιμο πυρήνα>> είναι γνωστό ως κέρδος αναπαραγωγής.

Το μέγεθος που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό του <<μακροσκοπικού ρυθμού αναπαραγωγής>> ενός αναπαραγωγικού αντιδραστήρα είναι ο χρόνος διπλασιασμού. Το μέγεθος αυτό ορίζεται ως <<ο απαιτούμενος χρόνος για να παραγάγει ο αντιδραστήρας σχάσιμο υλικό τόσο όσο ήταν η αρχική του φόρτιση>>.

Για να εκτιμηθεί ο χρόνος διπλασιασμού ενός αναπαραγωγικού αντιδραστήρα, θεωρούμε ότι αυτός λειτουργεί υπό σταθερή μέση θερμική ισχύ  $P_0$ (MW), ότι η αρχική ποσότητα σχάσιμου υλικού είναι  $M_0$ (g) και ότι καταναλίσκει κατά μέσον όρο  $w \cdot P_0$ (g) σχάσιμου υλικού ανά ημέρα, όπου  $w$  παριστάνει την κατανάλωση σχάσιμου υλικού ανά ημέρα και ανά μονάδα ισχύος (g/MW·d) (για αντιδραστήρα π.χ. που χρησιμοποιεί  $^{235}\text{U}$  είναι:  $w \cong 1,23$  g/MW<sub>th</sub>·d).

Η καθαρή ημερήσια παραγωγή σχάσιμου υλικού θα είναι:

$$(BG) \cdot w \cdot P_0 \quad (\text{g/d})$$

και αν το επιπλέον σχάσιμο υλικό δεν εξάγεται αλλά παραμένει στον αντιδραστήρα, η ποσότητά του θα αυξάνεται γραμμικά με τον χρόνο, οπότε μετά πάροδο ενός χρόνου διπλασιασμού  $t_Y$ , θα έχουμε:

$$(BG) \cdot w \cdot P_0 \cdot t_Y = M_0 \quad (3.6)$$

ή,

$$t_Y = \frac{M_0}{(BG) \cdot w \cdot P_0} \quad (\text{d}) \quad (3.7)$$

Ο χρόνος αυτός  $t_Y$  είναι γνωστός ως γραμμικός χρόνος διπλασιασμού.

Αν θεωρήσουμε τώρα ότι το επί πλέον παραγόμενο σχάσιμο υλικό αφαιρείται <<συνεχώς>> από τον αντιδραστήρα, τότε ο ρυθμός αυξήσεως του σχάσιμου υλικού θα είναι ταχύτερος εκείνου

του γραμμικού. Στην περίπτωση αυτή, αν  $M(t)$  είναι η μάζα του σχάσιμου υλικού κατά τη χρονική στιγμή  $t$  στον αντιδραστήρα, η καθαρή παραγωγή ανά μονάδα χρόνου σε σχάσιμο υλικό θα είναι:

$$\frac{dM}{dt} = (BG) \cdot w \cdot P(t) \quad (3.8)$$

όπου:  $P(t)$  είναι η ισχύς που μπορεί να αποδοθεί από την δεδομένη μάζα  $M(t)$  σχάσιμου υλικού.

Το μέγεθος  $P(t)$  είναι ανάλογο της μάζας  $M(t)$ , είναι δηλαδή:

$$P(t) = \beta \cdot M(t) \quad (3.9)$$

όπου  $\beta$  συντελεστής αναλογίας, οπότε η σχέση (3.5) γράφεται ως εξής:

$$\frac{dM}{dt} = (BG) \cdot w \cdot \beta \cdot M(t) \quad (3.10)$$

Δεδομένου ότι για  $t = 0$  είναι  $M(0) = M_0$ , όπου  $M_0$  η αρχική μάζα φορτίσεως του αντιδραστήρα, και  $P(0) = P_0 = \beta \cdot M_0$ , όπου  $P_0$  η αρχική ισχύς αυτού, η λύση της διαφορικής εξίσωσης (3.10) δίνει:

$$M(t) = M_0 \exp \left[ \frac{(BG) \cdot w \cdot P_0}{M_0} \cdot t \right] \quad (3.11)$$

Αν με  $t_\epsilon$  παραστήσουμε τον χρόνο μετά τον οποίο η μάζα  $M$  του σχάσιμου υλικού γίνεται διπλάσια της  $M_0$ , τότε η σχέση (3.11) δίνει:

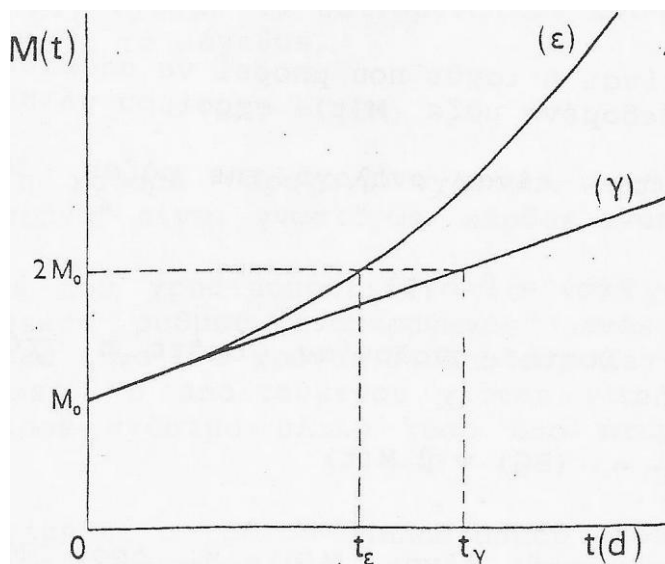
$$t_\epsilon = \frac{M_0 \cdot \ln 2}{(BG) \cdot w \cdot P_0} \quad (3.12)$$

Ο χρόνος αυτός  $t_\epsilon$  είναι γνωστός ως εκθετικός χρόνος διπλασιασμού.

Συγκρίνοντας τις σχέσεις (3.7) και (3.12) προκύπτει ότι:

$$t_\epsilon = t_\gamma \cdot \ln 2 = 0,693 \cdot t_\gamma \quad (3.13)$$

Ο ρυθμός αύξησης της μάζας του σχάσιμου υλικού στις δύο αυτές περιπτώσεις (της γραμμικής και της εκθετικής αναπαραγωγής) αποδίδεται γραφικά στο Σχήμα 3.14.



**Σχήμα 3.14** Η αύξηση της μάζας του σχάσιμου υλικού, συναρτήσει του χρόνου σε αναπαραγωγικό αντιδραστήρα στις περιπτώσεις της γραμμικής ( $\gamma$ ) και της εκθετικής ( $\epsilon$ ) αύξησης.

Κατά την ανάλυση που έγινε πιο πάνω, δεν λήφθηκε υπόψη η διαδικασία του <<κύκλου πυρηνικού καυσίμου>>, κατά την οποία δαπανάται χρόνος για την εξαγωγή των στοιχείων

πυρηνικού καυσίμου από τον αντιδραστήρα, τον χημικό διαχωρισμό των σχάσιμων πυρήνων, την κατασκευή των νέων στοιχείων πυρηνικού καυσίμου και την τοποθέτηση τους στον αντιδραστήρα. Όλη αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου διπλασιασμού πέραν των θεωρητικών τιμών που εκτιμούνται από τις σχέσεις (3.7) και (3.12).

Στη συνέχεια περιγράφονται οι υπό εξέλιξη τύποι αναπαραγωγικού αντιδραστήρα.

### **3.10.1 Ψυχόμενος με τετηγμένο μέταλλο αναπαραγωγικός αντιδραστήρας ταχέων νετρονίων (LMFBR)**

Η λειτουργία του LMFBR (Liquid Metal Fast Breeder Reactor) βασίζεται στον <<κύκλο ουρανίου / πλουτωνίου>>. Στην αρχή ο αντιδραστήρας τροφοδοτείται με φυσικό ουράνιο ( $^{235}\text{U}$ : 0,72%,  $^{238}\text{U}$ : 99,28%), οπότε τα νεοπαράγόμενα από επώαση ισότοπα  $^{239}\text{Pu}$  και  $^{241}\text{Pu}$  αντικαθιστούν σταδιακά τους αρχικούς σχάσιμους πυρήνες. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 2.5, το μέγεθος << $\eta$ >> αυξάνει όταν αυξάνει η ενέργεια των νετρονίων που επάγουν τις σχάσεις, στην περίπτωση που η ενέργεια αυτή είναι μεγαλύτερη από 100 keV. Τούτο σημαίνει ότι η σχέση επώασης (CR), όσο και το κέρδος αναπαραγωγής (BG), αυξάνουν όταν αυξάνει η εν λόγω ενέργεια και επομένως, θα πρέπει να αποκλεισθεί η χρησιμοποίηση ελαφρών πυρήνων στον αντιδραστήρα, για να παρεμποδιστεί η επιβράδυνση των ταχέων νετρονίων που προκύπτουν κατά τις σχάσεις. Ως εκ τούτου, ο <<πυρήνας>> του αντιδραστήρα και ο <<μανδύας>> περιέχουν μόνο το πυρηνικό καύσιμο και το ψυκτικό μέσο.

Ως ψυκτικό μέσο έχει επιλεγεί για τον LMFBR το νάτριο. Το ατομικό βάρος του νατρίου είναι 23 και γι' αυτό η μείωση της ενέργειας νετρονίου (E), σκεδαζομένου ελαστικά με πυρήνα νατρίου είναι μικρή ( $E_{\min} = 0,77 \cdot E$ ). Επίσης, μικρή είναι και η πιθανότητα πραγματοποίησης μη ελαστικών σκεδάσεων. Οι ιδιότητες του νατρίου ως μέσου απαγωγής θερμότητας είναι άριστες, γεγονός το οποίο επιτρέπει την λειτουργία του αντιδραστήρα υπό υψηλή πυκνότητα ισχύος και επομένως, μικρό σχετικά μέγεθος του πυρήνα του αντιδραστήρα.

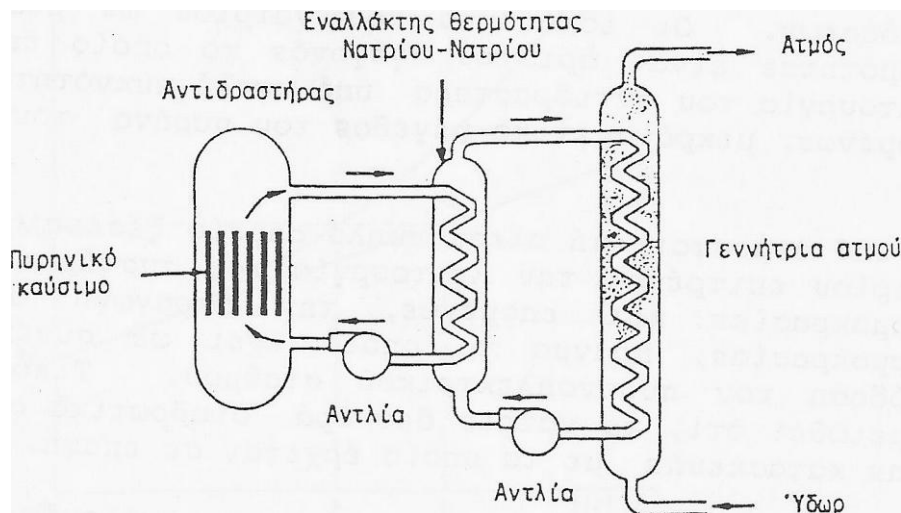
Το υπό ατμοσφαιρική πίεση υψηλό σημείο ζέσεως (881°C) του νατρίου επιτρέπει την λειτουργία του συστήματος σε υψηλές θερμοκρασίες και επομένως, την παραγωγή ατμού υψηλής θερμοκρασίας, πράγμα το οποίο έχει ως συνέπεια υψηλή απόδοση του πυρηνοληκτρικού σταθμού. Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι, το νάτριο δεν δρα διαβρωτικά στα υλικά της όλης κατασκευής με τα οποία έρχεται σε επαφή.

Τα μειονεκτήματα του νατρίου είναι τα ακόλουθα:

- Λόγω του υψηλού σημείου πήξεως (98°C υπό ατμοσφαιρική πίεση), το όλο κύκλωμα του ψυκτικού μέσου πρέπει να θερμαίνεται συνεχώς, ώστε να αποφεύγεται η στερεοποίηση. Το μειονέκτημα αυτό δεν φαίνεται να δημιουργεί ιδιαίτερα προβλήματα από τεχνολογικής απόψεως. Τα μέχρι σήμερα κατασκευασθέντα πρότυπα έχουν λειτουργήσει με επιτυχία.
- Αντιδρά έντονα με το ύδωρ. Ακόμα και σε στερεά κατάσταση η αντίδραση είναι σχεδόν εκρηκτική.
- Απορροφά νετρόνια, ακόμα και ταχέα σε μεγάλη έκταση, σχηματίζοντας το  $\beta$  και  $\gamma$  ραδιενεργό ισότοπο  $^{24}\text{Na}$ , χρόνου υποδιπλασιασμού 15 hr.

Για τους δύο τελευταίους λόγους αποφεύγεται η κυκλοφορία του ψυκτικού μέσου, μέσω της γεννήτριας ατμού, διότι, αν εξ αιτίας διαρροής ύδατος, έλθει σε επαφή το ύδωρ με το <<ραδιενεργό νάτριο>>, η βλάβη η οποία θα προκληθεί θα έχει ως επακόλουθο την διασπορά του σε μεγάλη έκταση. Ως εκ τούτου, η μετάδοση της θερμότητας στο προς εξάτμιση ύδωρ πραγματοποιείται στον LMFBR, σε δύο στάδια, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.15. Το κύκλωμα

του ψυκτικού του αντιδραστήρα χρησιμοποιείται ως πρωτεύον εναλλάκτη θερμότητας, του οποίου το δευτερεύον, πλήρες με νάτριο, αποτελεί το πρωτεύον άλλο εναλλάκτη θερμότητας, της γεννήτριας ατμού. Στο πρωτεύον του δεύτερου αυτού εναλλάκτη θερμότητας κυκλοφορεί μη ραδιενεργό νάτριο. Διαρροή στον εναλλάκτη θερμότητας νατρίου-νατρίου δεν είναι πιθανή, επειδή οι πιέσεις και στα δύο κυκλώματά τους είναι χαμηλές.

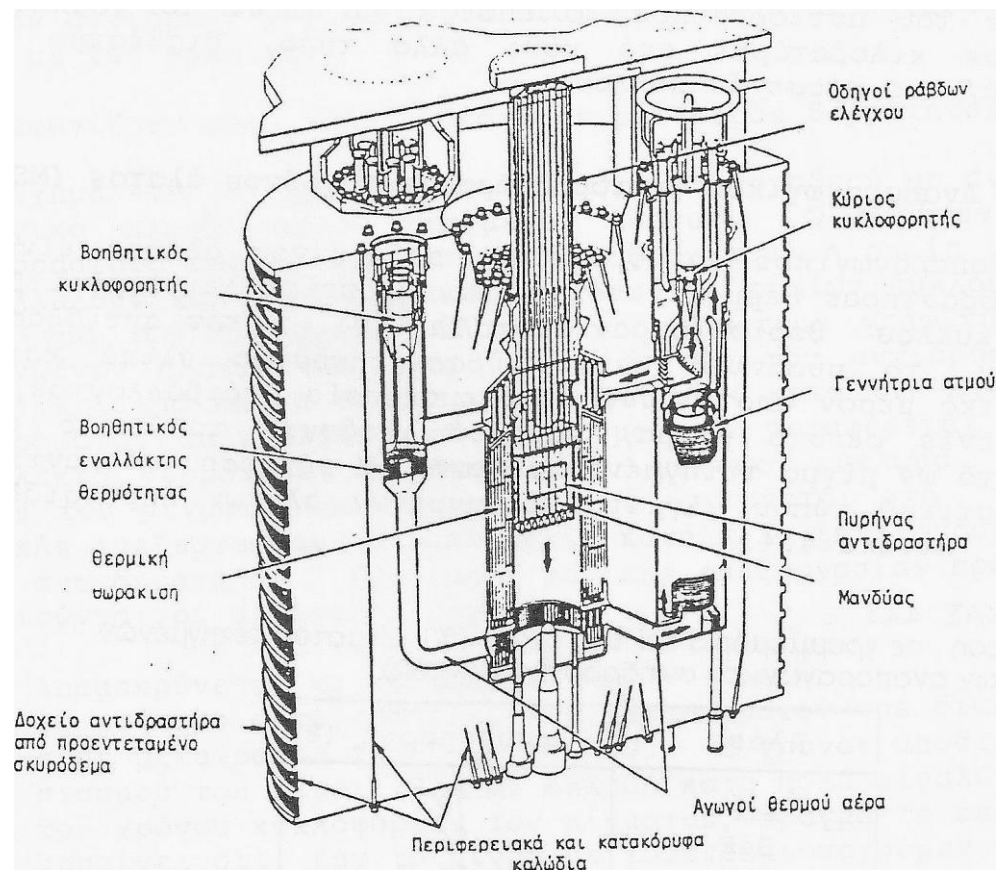


**Σχήμα 3.15** Το σύστημα παροχής ατμού, του ψυχόμενου με τετηγμένο μέταλλο αναπαραγωγικού αντιδραστήρα ταχέων νετρονίων (LMFBR).

### **3.10.2 Ψυχόμενος με αέριο αναπαραγωγικός αντιδραστήρας ταχέων νετρονίων (GCFR)**

Ο αντιδραστήρας GCFR (Gas Cooled Fast Breeder Reactor) αποτελεί λογική συνέχεια της τεχνολογίας του αεριοψυκτού αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας (HTGR). Ο πυρήνας του GCFR αποτελείται από μεγάλο αριθμό λεπτών ράβδων πυρηνικού καυσίμου. Οι ράβδοι αυτοί είναι σωλήνες ανοξειδωτού χάλυβα γεμάτοι με κυλινδρικούς  $UO_2$  και  $PuO_2$  όπως στον LMFBR. Ο μανδύας συγκροτείται από παρόμοιες ράβδους με κυλινδρικούς  $UO_2$ . Ως ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται ήλιο (He). Το ήλιο εισάγεται στον πυρήνα εκ των άνω (βλ. Σχήμα 3.16) σε θερμοκρασία  $338\text{ }^\circ\text{C}$  και πίεση 85 atm, ρέει προς τα κάτω μεταξύ των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου, θερμαίνεται μέχρι τους  $610\text{ }^\circ\text{C}$ , και εξέρχεται από το κάτω τύμπανο που βρίσκεται κοντά στην βάση του αντιδραστήρα. Από εκεί διακλαδώνεται προς τέσσερις γεννήτριες ατμού και στη συνέχεια επιστρέφει με την βοήθεια κυκλοφορητών ηλίου στον πυρήνα. Στις γεννήτριες ατμού παράγεται ατμός θερμοκρασίας  $524\text{ }^\circ\text{C}$  και πίεσεως 163 atm, ενώ η όλη απόδοση του σταθμού κυμαίνεται στην περιοχή 38 – 39%.

Το ήλιο δεν επιδρά σχεδόν καθόλου στην μορφή του φάσματος των νετρονίων σχάσεως, πράγμα το οποίον έχει ως αποτέλεσμα, το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων στον GCFR να είναι σκληρότερο από ότι στον LMFBR. Τούτο σημαίνει ότι η σχέση επώασης θα έχει μεγαλύτερη τιμή από εκείνη του LMFBR (διότι θα είναι μεγαλύτερη η μέση τιμή του μεγέθους  $\eta$ ) και ότι ο χρόνος διπλασιασμού θα είναι αντιστοίχως βραχύτερος.



**Σχήμα 3.16** Κατασκευαστικές λεπτομέρειες του ψυχόμενου με αέριο αναπαραγωγικού αντιδραστήρα ταχέων νετρονίων (GCFR).

Ένα ακόμα πλεονέκτημα του GCFR έναντι του LMFBR, είναι η μεγάλη διαθεσιμότητα του σταθμού, ένας σημαντικός οικονομικός παράγων. Το πλεονέκτημα αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η χρονική διάρκεια κρατήσεως του σταθμού για τακτική συντήρηση, ή για αποκατάσταση βλαβών είναι στην περίπτωση αυτή μικρότερη. Πράγματι, επειδή το ήλιο δεν καθίσταται ραδιενεργό μέσα στον πυρήνα του αντιδραστήρα, είναι δυνατή η επίσκεψη οποιουδήποτε τμήματος του κυκλώματος ψύξεως, αμέσως μετά την διακοπή της λειτουργίας του αντιδραστήρα. Επίσης είναι δυνατή η παρακολούθηση με τηλεοπτικά μέσα του εσωτερικού του αντιδραστήρα, διότι το ήλιο είναι αέριο διαφανές.

Πιστεύεται ότι ο αναπαραγωγικός αντιδραστήρας GCFR είναι ο τύπος του αντιδραστήρα, ο οποίος θα δώσει το χαμηλότερο κόστος κιλοβατώρας από κάθε άλλο τύπο, διαθέσιμο στην αγορά, στο προσεχές μέλλον.

### **3.10.3 Αναπαραγωγικός αντιδραστήρας τετηγμένου άλατος (MSBR)**

Ο αναπαραγωγικός αντιδραστήρας τετηγμένου άλατος (MSBR: Molten Salt Breeder Reactor) είναι ο αντιδραστήρας θερμικών νετρονίων, ο οποίος λειτουργεί βάσει του κύκλου θορίου / ουρανίου ( $\text{Th}^{233}\text{U}$ ). Στον αντιδραστήρα αυτόν, το πυρηνικό καύσιμο, το επωάσιμο υλικό και το ψυκτικό μέσον αποτελούν, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ένα ομογενές ρευστό μίγμα, χαμηλού ιξώδους, το οποίο είναι γνωστό ως μίγμα τετηγμένων αλάτων. Η σύνθεση ενός αντιπροσωπευτικού τύπου μίγματος τετηγμένων αλάτων παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.4.

**Πίνακας 3.4** Σύνθεση, σε γραμμομόρια επί τοις εκατό (%), μίγματος τετηγμένων αλάτων αναπαραγωγικού αντιδραστήρα (MSBR).

Άλας	Γραμμομόρια (%)
${}^7\text{LiF}$	72
$\text{BeF}_2$	16
$\text{ThF}_4$	11,7
${}^{233}\text{UF}_4$	0,3

Οι πυρήνες των ατόμων του μίγματος (εκτός εκείνων του θορίου και του ουρανίου) εμφανίζουν μικρές τιμές μικροσκοπικών ενεργών διατομών απορροφήσεως θερμικών νετρονίων (Για  $E = 0,0253 \text{ eV}$ , είναι,  $\sigma_a(\text{Be}) = 0,0092 \text{ b}$ ,  $\sigma_a(\text{Li}) = 0,037 \text{ b}$ , και  $\sigma_a(\text{F}) = 0,0095 \text{ b}$ ). Το γεγονός αυτό είναι ζωτικής σημασίας για τους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων, διότι για τα θερμικά νετρόνια η τιμή του μεγέθους  $\eta$ , είναι σχετικά χαμηλή (βλ. Σχήμα 2.5) και, επομένως, προς εξοικονόμηση νετρονίων θα πρέπει να αποφεύγονται κατά το δυνατόν απορροφήσεις νετρονίων από μη σχάσιμους πυρήνες.

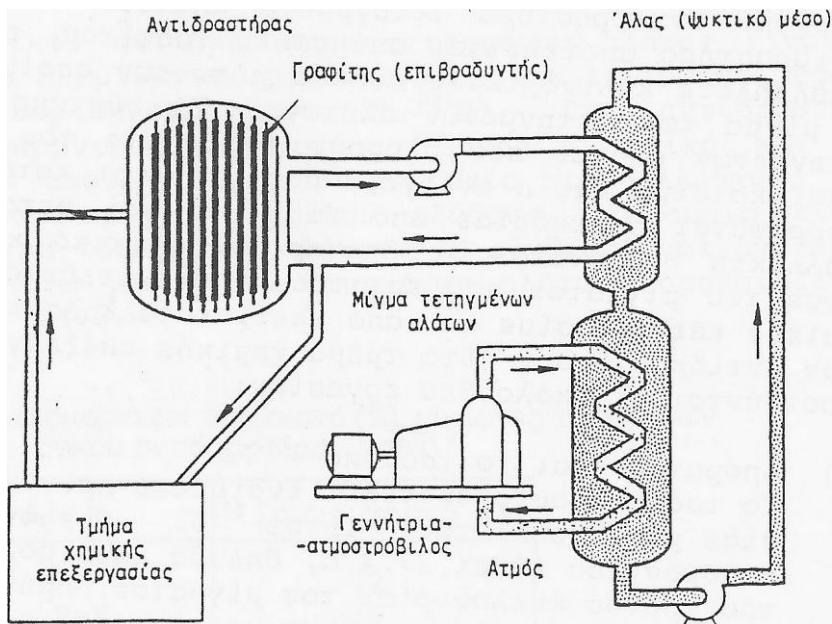
Τα άλατα του θορίου χαρακτηρίζονται και από τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Είναι από τις πιο σταθερές χημικές ενώσεις.
- Ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες η τάση των κεκορεσμένων ατμών τους είναι πολύ χαμηλή.
- Δεν καταστρέφονται από τις πυρηνικές ακτινοβολίες.
- Δεν αντιδρούν βίαια με τον αέρα ή το ύδωρ.
- Δεν αντιδρούν χημικά με τα διάφορα υλικά της κατασκευής, ή με τον γραφίτη.
- Εμφανίζουν πολύ καλές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας.

Στο Σχήμα 3.17 παρουσιάζεται διάγραμμα σταθμού με αναπαραγωγικό αντιδραστήρα τετηγμένου αλάτος. Ο πυρήνας του αντιδραστήρα αποτελείται από στήλη γραφίτη, η οποία φέρει παράλληλους κυλινδρικούς αυλούς μέσω των οποίων κυκλοφορεί το μίγμα των τετηγμένων αλάτων. Το σύστημα γραφίτη και τετηγμένων αλάτων που πληρούν το δοχείο του αντιδραστήρα είναι κρίσιμο και η ενέργεια που εκλύεται κατά τις σχάσεις απορροφάται απ' ευθείας από το μίγμα και μεταφέρεται μέσω εναλλάκτη θερμότητας σε δευτερεύον ψυκτικό κύκλωμα. Ένα μέρος του μίγματος που επιστρέφει διοχετεύεται στο τμήμα χημικής επεξεργασίας και από εκεί, κατάλληλα επεξεργασμένο, στον αντιδραστήρα. Στο τμήμα χημικής επεξεργασίας πραγματοποιούνται οι ακόλουθες εργασίες:

- (1) Απομακρύνεται το ισότοπο  ${}^{233}\text{Pa}$ . Το ισότοπο αυτό αποτελεί ενδιάμεσο προϊόν της διαδικασίας μετατροπής του  ${}^{232}\text{Th}$  σε  ${}^{233}\text{U}$ . Ο χρόνος υποδιπλασιασμού του είναι 27,4 d, δηλαδή κατά πολύ μεγαλύτερος του χρόνου κυκλοφορίας του μίγματος, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι, εάν το μίγμα με τους δημιουργούμενους πυρήνες  ${}^{233}\text{Pa}$  περάσει μερικές φορές μέσα από τον πυρήνα του αντιδραστήρα, ένα μεγάλο ποσοστό αυτών θα απορροφήσει θερμικά νετρόνια (ελάττωση του πληθυσμού των νετρονίων) και θα μετατραπεί σε  ${}^{234}\text{Pa}$  (ένα <<άχρηστο>> ισότοπο), πριν προλάβει να διασπαστεί σε  ${}^{233}\text{U}$ .
- (2) Διαχωρίζεται το θυγατρικό ισότοπο  ${}^{233}\text{U}$  από το μητρικό  ${}^{233}\text{Pa}$ . Ένα μέρος αυτού (του  ${}^{233}\text{U}$ ) επιστρέφεται στο μίγμα, ενώ το υπόλοιπο χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία άλλου MSBR.
- (3) Απομακρύνονται τα προϊόντα της σχάσεως. Η συνεχής απομάκρυνση των προϊόντων της σχάσεως αποτελεί ένα από τα σπουδαιότερα πλεονεκτήματα του MSBR, δεδομένου ότι στους περισσότερους τύπους αντιδραστήρων πρέπει να διακοπεί η λειτουργία τους προκειμένου να αντικατασταθούν τα χρησιμοποιημένα στοιχεία του πυρηνικού καυσίμου.





**Σχήμα 3.17** Σχηματικό διάγραμμα αναπαραγωγικού αντιδραστήρα τετηγμένου άλατος (MSBR).

Μερικά ακόμα πλεονεκτήματα του MSBR είναι τα ακόλουθα:

- Λόγω της μεγάλης οικονομίας στον πληθυσμό των νετρονίων, η οποία πραγματοποιείται από την αποφυγή παρασιτικών απορροφήσεων, η απαιτούμενη ποσότητα σχάσιμου υλικού είναι μικρή συγκριτικά με τους αντιδραστήρες LWR και LMFBR, όπως φαίνεται και από τα δεδομένα του Πίνακα 3.5.

**Πίνακας 3.5** Ποσότητα πυρηνικού καυσίμου που απαιτείται ανά  $MW_e$  για την φόρτιση τριών τύπων αντιδραστήρων.

Τύπος αντιδραστήρα	Ποσότητα σχάσιμου υλικού ( $kg/MW_e$ )
MSBR	1,0 - 1,2
LWR	~ 3
LMFBR	~ 5

- Λόγω της χαμηλής τάσεως των (κεκορεσμένων) ατμών των αλάτων του μίγματος, ο αντιδραστήρας MSBR λειτουργεί κάτω από πιέσεις που είναι λίγο μεγαλύτερες από την ατμοσφαιρική. Αυτό σημαίνει ότι δεν απαιτείται κατασκευή ακριβού δοχείου πίεσεως.
- Επειδή είναι δυνατή η λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες, ο MSBR μπορεί να δώσει ατμό θερμοκρασίας  $540\text{ }^\circ\text{C}$  και πίεσεως 240 atm, με ολικό βαθμό αποδόσεως του σταθμού περίπου 44%.

Τα μειονεκτήματα του MSBR είναι τα ακόλουθα:

- (1) Το μέρος του μίγματος που ρέει έξω από τον αντιδραστήρα στις σωληνώσεις και τον εναλλάκτη θερμότητας, φέρει τους <<προδρόμους>> πυρήνες [βλ. παράγραφο 2.3(β)], οι οποίοι αποδίδουν τα καθυστερημένα νετρόνια. Τα νετρόνια αυτά ενεργοποιούν την όλη κατασκευή του κυκλώματος ψύξεως, έτσι ώστε, να καθίσταται προβληματική η συντήρηση, ή η αποκατάσταση βλαβών στα διάφορα τμήματά της.
- (2) Η σχέση επώασης του MSBR έχει τιμή στην περιοχή 1,05 έως 1,07, δηλαδή κατά πολύ μικρότερη από ότι στους LMFBR και GCFR. Αυτό σημαίνει ότι ο χρόνος διπλασιασμού θα είναι

μεγάλος, της τάξεως των 13-20 ετών και δεδομένου ότι, ο χρόνος διπλασιασμού της καταναλισκομένης ηλεκτρικής ισχύος είναι της τάξεως των 10 ετών, γίνεται φανερό ότι, η ανάπτυξη της πυρηνικής βιομηχανίας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν μπορεί να βασισθεί μόνο σε αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες τετηγμένου άλατος (MSBR).

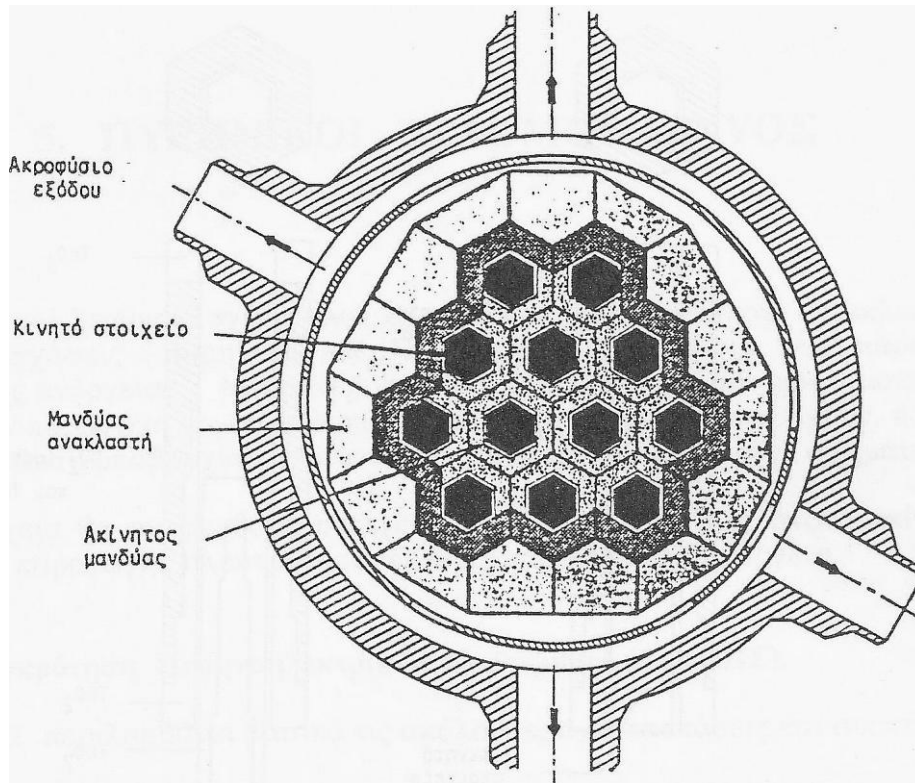
Συμπερασματικά, μπορεί κανείς να διατυπώσει την άποψη ότι οι αντιδραστήρες MSBR θα μπορέσουν να βρουν μία θέση στην πυρηνική βιομηχανία στο απώτερο μέλλον και μάλιστα, στην περίπτωση που οι ήδη εξελιγμένοι αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων αποδειχθούν ανασφαλείς, ή αντιοικονομικοί.

#### **3.10.4 Αναπαραγωγικός αντιδραστήρας ελαφρού ύδατος (LWBR)**

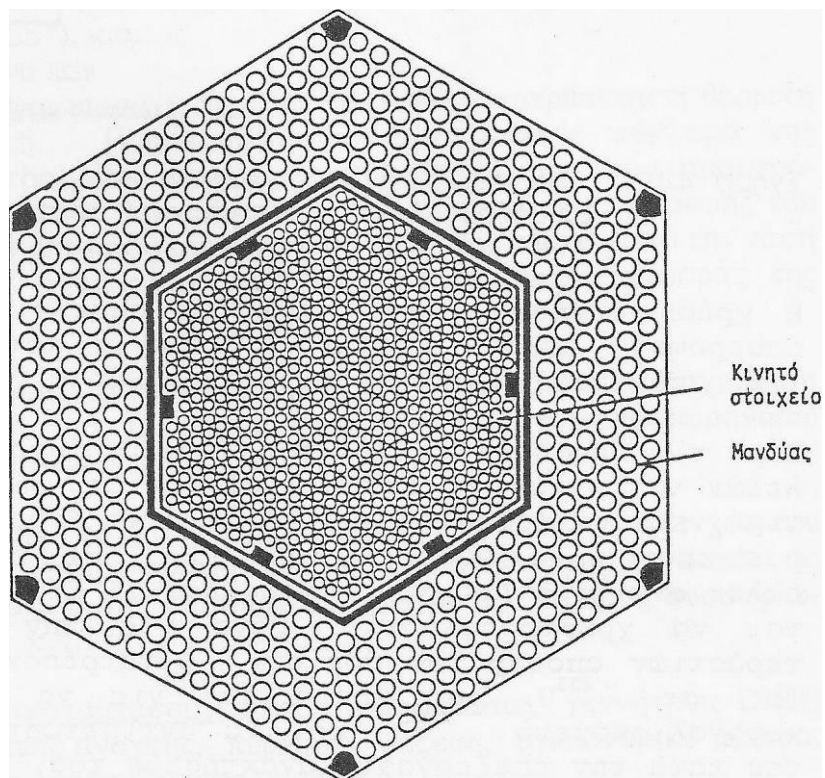
Για πολλά χρόνια επιστεύετο ότι δεν ήταν δυνατό να συγκροτηθεί αναπαραγωγικός αντιδραστήρας στον οποίο να χρησιμοποιείται το φυσικό ύδωρ ως επιβραδυντής και ψυκτικό μέσο, και να βασίζεται η λειτουργία του στην μετατροπή του  $^{232}\text{Th}$  σε  $^{233}\text{U}$ . Και αυτό, γιατί το ύδωρ απορροφά έντονα θερμικά νετρόνια. Θα ήταν βέβαια δυνατό, να ελαττώσει κανείς την αναλογία ύδατος / πυρηνικού καυσίμου, αλλά τούτο θα οδηγούσε σε εξασθένηση του μηχανισμού επιβραδύνσεως των νετρονίων, δηλαδή σε σκλήρυνση του ενεργειακού φάσματος των νετρονίων στον αντιδραστήρα, με αποτέλεσμα, ένα μεγάλο ποσοστό τους με ενέργεια στην ενδιάμεση περιοχή των 1-10 keV, να απορροφάται από πυρήνες  $^{233}\text{U}$ . Όμως, στην ενεργειακή αυτή περιοχή, το μέγεθος  $\langle\langle\eta\rangle\rangle$  έχει τιμή λίγο μεγαλύτερη του 2 και επομένως, το φαινόμενο της αναπαραγωγής θα ήταν αμελητέο.

Πειράματα που έγιναν περί το 1960 έδειξαν ότι, η τιμή του μεγέθους  $\langle\langle\eta\rangle\rangle$  στην ενδιάμεση αυτή ενεργειακή περιοχή είναι επαρκώς μεγαλύτερη του 2 για να έχουμε αναπαραγωγή, υπό την προϋπόθεση όμως ότι θα ήταν δυνατόν να ελεγχθούν οι απώλειες νετρονίων. Κατεβλήθησαν, λοιπόν, προσπάθειες να σχεδιασθεί ο αντιδραστήρας κατά τέτοιον τρόπο, ώστε να ελαττωθούν κατά το δυνατόν οι απώλειες νετρονίων.

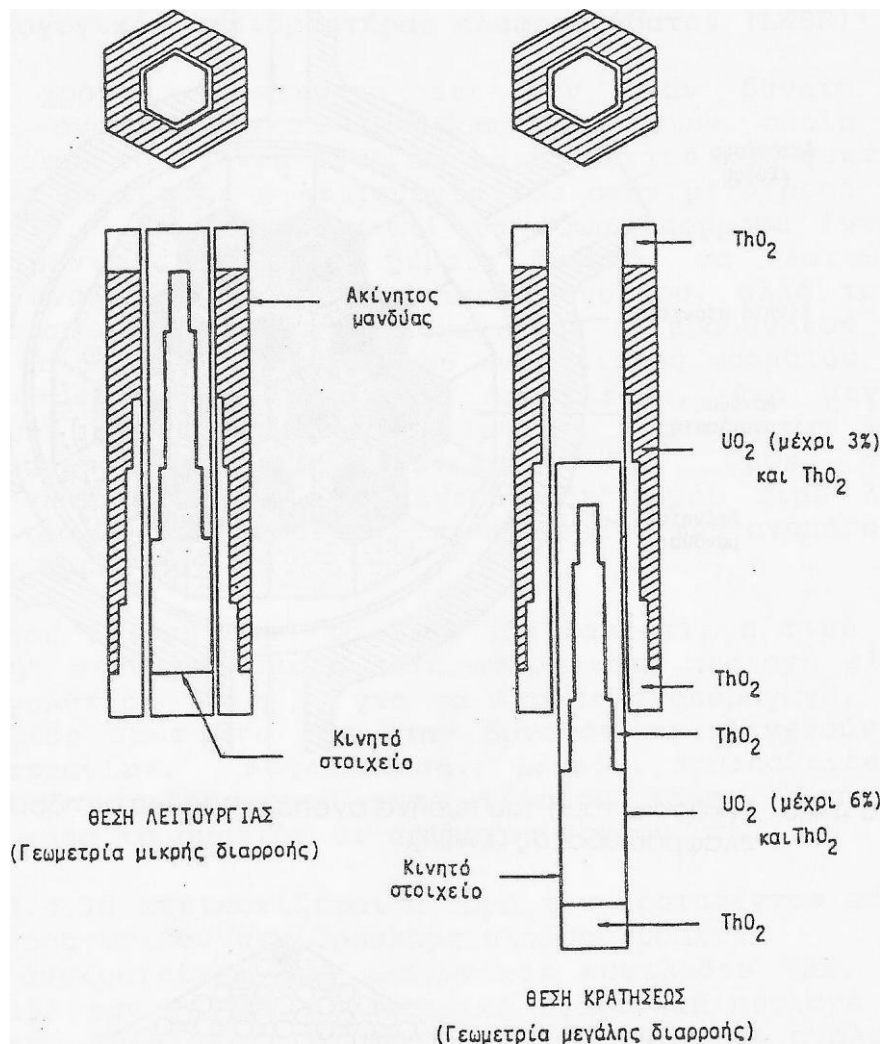
Στο Σχήμα 3.18 απεικονίζεται η τομή του προταθέντος πυρήνα του αναπαραγωγικού αντιδραστήρα ελαφρού ύδατος (LWBR: Light Water Breeder Reactor). Ο πυρήνας συγκροτείται από εξαγωνικές κυψελίδες (βλ. και Σχήμα 3.19) των οποίων η εσωτερική εξαγωνική περιοχή που περιλαμβάνει  $\text{ThO}_2$  και  $^{233}\text{UO}_2$  (το τελευταίο σε αναλογία από 0 έως 6% κατά βάρος), είναι κινητή, ενώ η εξωτερική σταθερή περιοχή αποτελεί τον μανδύα της κυψελίδας, ο οποίος περιλαμβάνει επίσης  $\text{ThO}_2$  και  $^{233}\text{UO}_2$  (το τελευταίο σε αναλογία από 0 έως 3% κατά βάρος). Τα διοξείδια του θορίου και του U-233 είναι τοποθετημένα στον πυρήνα, υπό μορφή κυλινδρικών μέσα σε σωλήνες, συγκροτώντας έτσι τις ράβδους του πυρηνικού καυσίμου. Οι ράβδοι αυτές είναι τοποθετημένες παράλληλα στις κινητές και σταθερές περιοχές του πυρήνα. Η γόμωσή τους με τα δύο διοξείδια φαίνεται στο Σχήμα 3.20.



**Σχήμα 3.18** Εγκάρσια τομή του πυρήνα αναπαραγωγικού αντιδραστήρα ελαφρού ύδατος (LWBR).



**Σχήμα 3.19** Εγκάρσια τομή εξαγωνικής κυψελίδας αναπαραγωγικού αντιδραστήρα ελαφρού ύδατος (LWBR).



**Σχήμα 3.20** Έλεγχος του αναπαραγωγικού αντιδραστήρα ελαφρού ύδατος με μεταβολή της γεωμετρίας του συστήματος.

Ο έλεγχος του αντιδραστήρα πραγματοποιείται με την μετακίνηση των κεντρικών περιοχών των κυψελίδων, μέσα ή έξω από τους σταθερούς μανδύες, οπότε μεταβάλλονται οι απώλειες νετρονίων από τον πυρήνα και επομένως, μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή κατάσταση στο σύστημα. Το ψυκτικό μέσο (το φυσικό ύδωρ) κυκλοφορεί μέσα στον πυρήνα μεταξύ των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου και του χώρου ο οποίος δημιουργείται μεταξύ των κινητών και των σταθερών τμημάτων των κυψελίδων.

Η χρήση συνήθων ράβδων ελέγχου αποκλείεται, διότι αυτές απορροφούν πολλά, σχετικά, νετρόνια και έτσι η παρουσία τους στον πυρήνα δεν θα άφηνε περιθώρια για αναπαραγωγή.

Παρά τις προσπάθειες για την κατά το δυνατό μείωση των απωλειών νετρονίων, η σχέση επώσεως δεν παύει να έχει μικρή τιμή, και μάλιστα πολύ μικρή, για να θεωρηθεί ο αντιδραστήρας ικανός να παράγει καύσιμο ( $^{233}\text{U}$ ) για την τροφοδοσία άλλου αντιδραστήρα του ίδιου τύπου. Έτσι, ο LWBR προορίζεται να χρησιμοποιηθεί μόνο για την εκμετάλλευση των τεράστιων αποθεμάτων θορίου, μετατρέποντας τόση ποσότητα Th σε  $^{233}\text{U}$ , όση χρειάζεται για να αντικατασταθεί το καταναλισκόμενο  $^{233}\text{U}$  και να αντιμετωπισθούν οι απώλειές του κατά την επεξεργασία ανακτήσεώς του, από τους χρησιμοποιημένους κυλινδρίσκους του πυρηνικού καυσίμου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ – ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

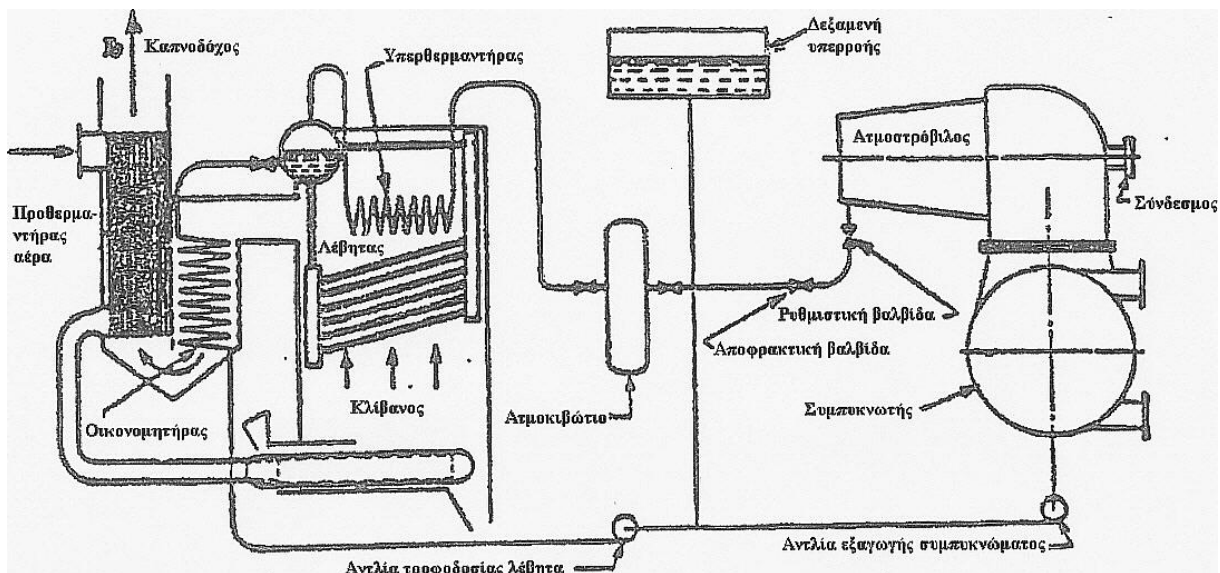
#### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ

Ο ατμοστρόβιλος αποτελεί μια μηχανή που παράγει μηχανικό έργο τροφοδοτούμενος με ατμό υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Ο ατμός παράγεται σε ένα άλλο τμήμα μιας εγκατάστασης, όπου προσδίδεται η θερμότητα. Έτσι ο ατμοστρόβιλος εκτελεί μια μεταβολή και μόνο, την αποτόνωση, που αποτελεί ένα μέρος μόνο του αντίστοιχου πλήρους θερμοδυναμικού κύκλου (το τμήμα εκείνο του κύκλου που παράγει τη μηχανική ενέργεια).

#### 4.2 Ο ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΩΣ ΤΜΗΜΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΟΥ ΥΛΟΠΟΙΕΙ ΤΟΝ ΚΥΚΛΟ ΑΤΜΟΥ

Η παραγωγή μηχανικού έργου με χρήση ατμοστρόβιλων γίνεται με υλοποίηση του γνωστού κύκλου Rankine. Μια τυπική διάταξη που υλοποιεί έναν τέτοιο κύκλο φαίνεται στο Σχήμα 4.1 σε διαγραμματική μορφή, ενώ η βασική μορφή του κύκλου φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Οι επί μέρους μεταβολές του κύκλου πραγματοποιούνται από διαφορετικά τμήματα της εγκατάστασης. Η όλη διάταξη περιλαμβάνει τις εξής κύριες συνιστώσες, κατ' αντιστοιχία των μεταβολών του κύκλου:

- **Αντλίες τροφοδοσίας.** Οι αντλίες ανυψώνουν την πίεση του κορεσμένου νερού που επιστρέφει από το συμπυκνωτή, για να τη φέρουν στην τιμή πίεσης τροφοδοσίας του ατμοπαραγωγού. Το νερό εισέρχεται στις αντλίες σε κατάσταση κορεσμού και κατά την έξοδο του είναι υπόψυκτο.



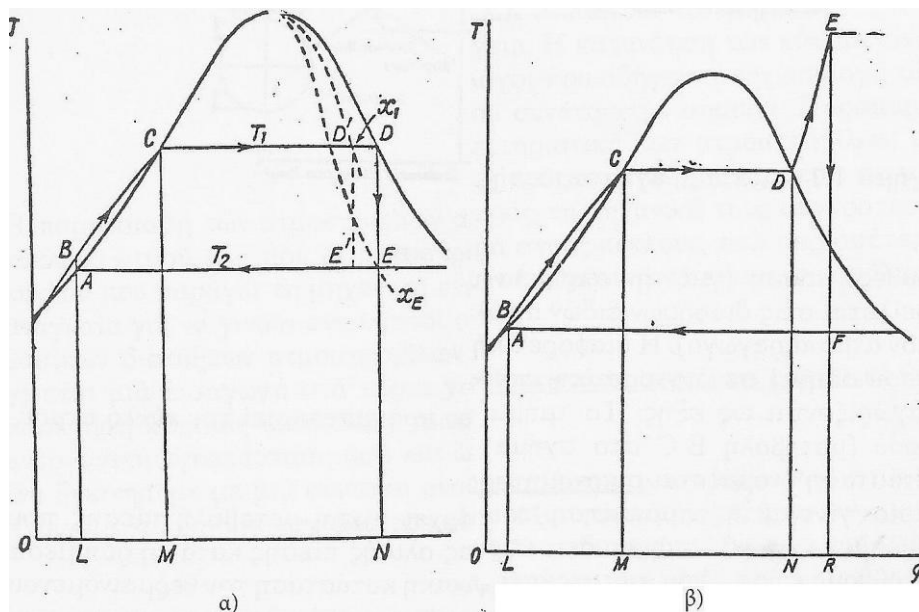
Σχήμα 4.1 Διάταξη εγκατάστασης που πραγματοποιεί τον κύκλο ατμού.

- **Ατμοπαραγωγός.** Παράγει τον ατμό που απαιτείται για τη λειτουργία του ατμοστρόβιλου, με καύση κάποιου καυσίμου. Η όλη διεργασία θέρμανσης του νερού, ατμοποίησης και πιθανά υπερθέρμανσης γίνεται υπό σταθερή πίεση (για την ακρίβεια υπάρχει μικρή μεταβολή πίεσης που οφείλεται στις διαφορών ειδών απώλειες ολικής

πίεσης κατά τη ροή μέσα στον ατμοπαραγωγό). Η διαφορετική φυσική κατάσταση του θερμαινόμενου μέσου οδηγεί σε διαφορετική κατασκευή των επί μέρους τμημάτων που διαχωρίζονται ως εξής: Το τμήμα στο οποίο γίνεται προθέρμανση του νερού (μεταβολή B-C στο Σχήμα 4.2) από υπόψυκτη σε κεκορεσμένη κατάσταση ονομάζεται οικονομητήρας. Ακολουθεί ο κυρίως λέβητας, στον οποίο γίνεται η ατμοποίηση του νερού, μεταβολή C-D, δηλαδή από κορεσμένο νερό πάμε σε κορεσμένο ατμό. Τέλος, έχουμε τον υπερθερμαντήρα, που μετατρέπει τον κορεσμένο ατμό σε υπέρθερμο, μεταβολή D-E (όταν έχουμε κύκλο υπέρθερμου ατμού).

- **Ατμοστρόβιλος.** Πραγματοποιεί την εκτόνωση του ατμού που έρχεται από τον ατμοπαραγωγό μετατρέποντας σε μηχανική ενέργεια την ενθαλπική πτώση του ατμού. Η μετατροπή γίνεται με χρήση διαδοχικών σειρών κινητών και σταθερών πτερυγίων, πρόκειται δηλαδή για τυπική περίπτωση θερμικής στροβιλομηχανής.

- **Συμπυκνωτής.** Συλλέγει και συμπυκνώνει τον ατμό εξόδου του στροβίλου, απορρίπτοντας την απαραίτητη θερμότητα στο περιβάλλον. Πρόκειται για εναλλάκτη θερμότητας, στον οποίο ανταλλάσσεται θερμότητα μεταξύ δύο ρευμάτων: (α) του ατμού εξόδου του στροβίλου, που συμπυκνώνεται και οδηγείται προς το σύστημα τροφοδοσίας του ατμοπαραγωγού, απορρίπτοντας θερμότητα (β) του νερού ψύξης, που παραλαμβάνει την απορριπτόμενη θερμότητα. Το νερό ψύξης είτε προέρχεται από το περιβάλλον (π.χ. νερό θαλάσσης ή ποταμών) είτε κυκλοφορεί σε εξωτερικό κύκλωμα, σε τμήμα του οποίου πραγματοποιείται η ψύξη (π.χ. σε πύργους ψύξης).



**Σχήμα 4.2** Ο κύκλος Rankine στο διάγραμμα T-S: (α) κύκλος κορεσμένου ατμού, (β) κύκλος υπέρθερμου ατμού.

Η μορφή του θερμοδυναμικού κύκλου στην ιδανική του μορφή δίνεται στο Σχήμα 4.2. Η μορφή μπορεί να διαφοροποιηθεί ανάλογα με τη θέση των ορίων της αποτόνωσης που πραγματοποιείται στο στρόβιλο και έτσι έχουμε τους ακόλουθους τύπους κύκλου:

- **κύκλο κορεσμένου ατμού**, Σχήμα 4.2α, στον οποίο ο στρόβιλος τροφοδοτείται με κορεσμένο ατμό που εξέρχεται από τον λέβητα.
- **κύκλο υπέρθερμου ατμού**, Σχήμα 4.2β, στον οποίο ο στρόβιλος τροφοδοτείται με υπέρθερμο ατμό. Ο δεύτερος αυτός κύκλος παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα ως

προς τον προηγούμενο: Έχει βελτιωμένη απόδοση, μια που η πρόσδοση θερμότητας γίνεται σε ψηλότερη μέση θερμοκρασία. Για την ίδια πίεση τροφοδοσίας έχει μικρότερη υγρότητα ατμού στην έξοδο του στροβίλου. Αυτό έχει σαν συνέπεια την καλλίτερη απόδοση λόγω μείωσης των απωλειών υγρότητας, καθώς και αύξηση του χρόνου ζωής των πτερυγίων των τελευταίων βαθμίδων του στροβίλου για τον ίδιο λόγο. Από την άλλη μεριά βέβαια, απαιτείται η εισαγωγή ενός επιπλέον τμήματος στον ατμοπαραγωγό, του υπερθερμαντή.

- **κύκλο υπέρθερμου ατμού με υπέρθερμη έξοδο.** Και οι δύο προηγούμενοι κύκλοι είχαν στην έξοδό τους κορεσμένο ατμό. Αν η εκτόνωση γίνεται σε αρκετά μεγάλη τελική πίεση, είναι δυνατόν ο ατμός εξόδου να βρίσκεται σε υπέρθερμη κατάσταση.

Σε όλες τις περιπτώσεις η παραγωγή του μηχανικού έργου γίνεται από τον ατμοστρόβιλο, ο οποίος όμως υλοποιεί μια μόνο μεταβολή του κύκλου. Οι υπόλοιπες μεταβολές πραγματοποιούνται από τμήματα της εγκατάστασης διαχωρισμένα από τον ατμοστρόβιλο. Από αυτή την άποψη, ο ατμοστρόβιλος δεν αποτελεί αυτόνομη θερμική μηχανή όπως ο αεριοστρόβιλος.

Επειδή ο κύκλος ατμού αποτελεί ένα οργανικό σύνολο, για να γίνει κατανοητή η αιτιολόγηση της δομής των σύγχρονων ατμοστροβίλων είναι απαραίτητο να γίνουν κατανοητά κάποια επιπλέον στοιχεία για τον κύκλο ατμού και τις διάφορες παραλλαγές του. Προχωρούμε λοιπόν στην παρουσίαση μερικών ακόμα στοιχείων για τους κύκλους ατμού.

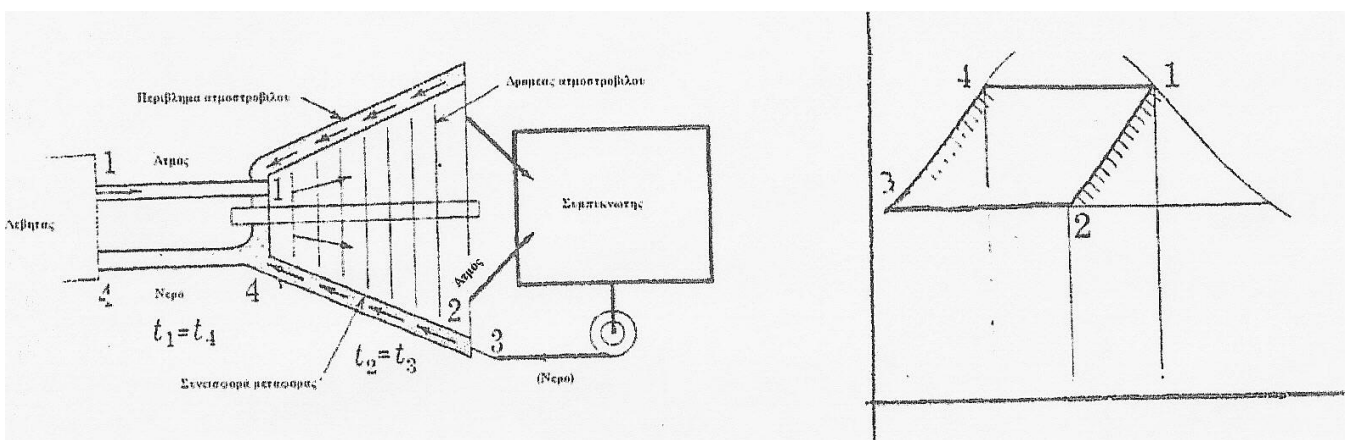
### 4.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

Η αναζήτηση διατάξεων που επιτρέπουν την αύξηση του βαθμού απόδοσης ατμοστροβίλων, μέσα στα πλαίσια των υπάρχουσων τεχνολογικών δυνατοτήτων, οδήγησε στην ανάπτυξη εγκαταστάσεων που υλοποιούν δύο βασικές παραλλαγές του απλού κύκλου που αναφέραμε παραπάνω, τον κύκλο απομάστευσης και προθέρμανσης και τον κύκλο αναθέρμανσης.

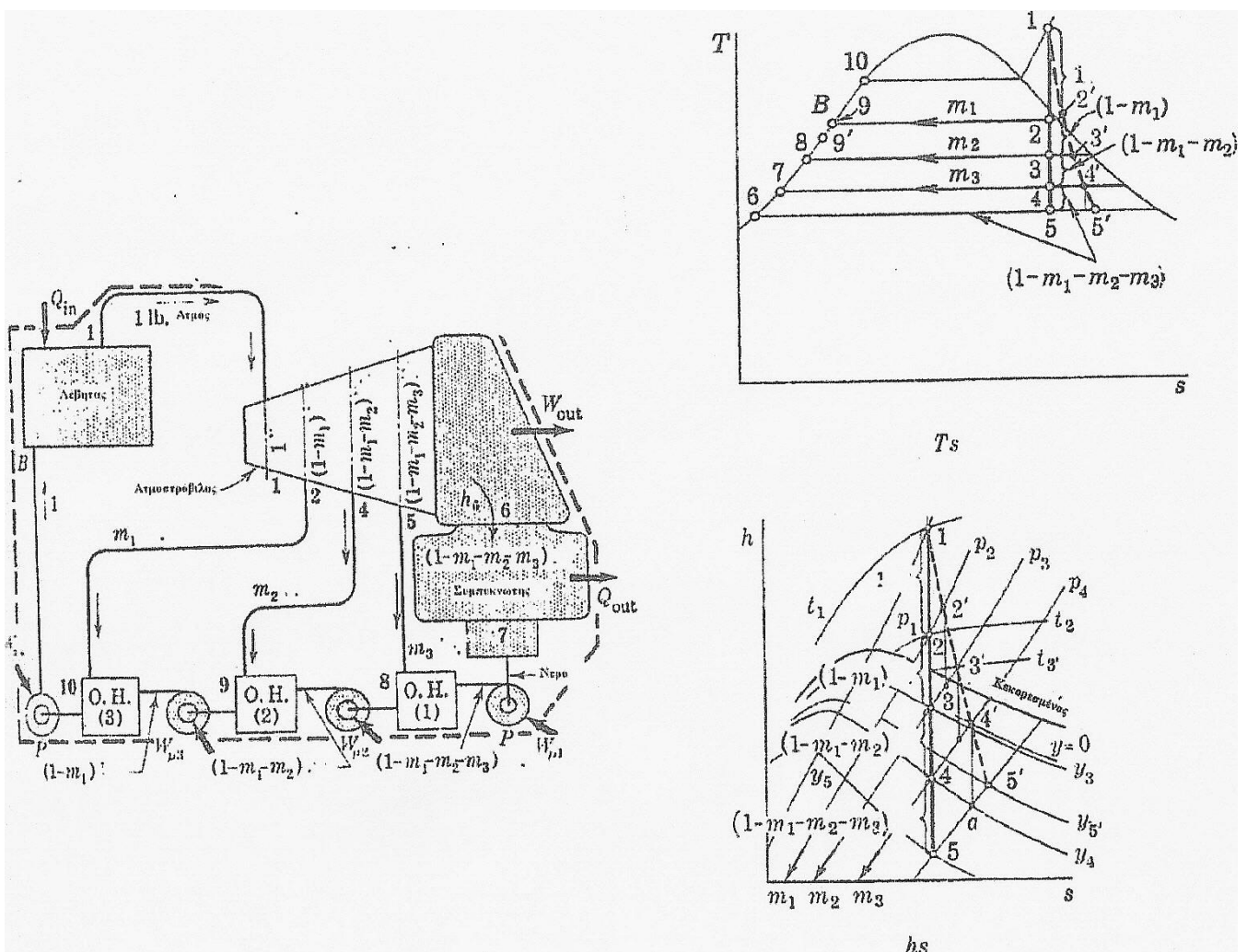
**Κύκλος απομάστευσης και προθέρμανσης:** Στον κύκλο αυτό ποσοστά της παροχής του ατμού αφαιρούνται από διάφορες θέσεις κατά μήκος του στροβίλου και χρησιμοποιούνται για προθέρμανση του τροφοδοτούμενου νερού. Η αρχή της αναγέννησης στην ιδανική της μορφή φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 4.3. Πρακτικά, ποσότητες ατμού απομαστεύονται από συγκεκριμένες θέσεις κατά μήκος του στροβίλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4.

Ο λόγος για τον οποίο ο κύκλος απομάστευσης μπορεί να δώσει μεγαλύτερη απόδοση από τον απλό κύκλο μπορεί να γίνει κατανοητός από τον εξής συλλογισμό: Αν ολόκληρη η ποσότητα ατμού εκτονωθεί μέσω του στροβίλου, τότε προκύπτει μηχανικό έργο, ίσο με τη διαθέσιμη ενθαλπική πτώση. Αν τώρα μέρος του ατμού εκτονωθεί μερικά και στη συνέχεια χρησιμοποιηθεί για προθέρμανση νερού τροφοδοσίας, είναι δυνατό η συνολική ωφέλιμη διαφορά ενθαλπίας που αποδίδεται από τον ατμό να είναι μεγαλύτερη. Έτσι μπορεί να προκύψει αύξηση του βαθμού απόδοσης. Από θερμοδυναμική άποψη, η αύξηση του βαθμού απόδοσης προκύπτει από το ότι η <<εσωτερική>> θέρμανση του νερού τροφοδοσίας έχει σαν αποτέλεσμα η <<εξωτερική>> θερμότητα να προσδίδεται μόνο για την ατμοποίηση. Έτσι έχουμε και πάλι πρόσδοση θερμότητας σε υψηλότερη μέση θερμοκρασία, με αποτέλεσμα την αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης.

Ο ιδανικός κύκλος αναγέννησης μπορεί να προσεγγιστεί με ένα αριθμό απομαστεύσεων - προθερμάνσεων, που μπορούν να υλοποιηθούν με διάφορους τρόπους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4. Οι προθερμαντήρες που χρησιμοποιούνται είναι δύο ειδών: ανοιχτού και κλειστού τύπου.



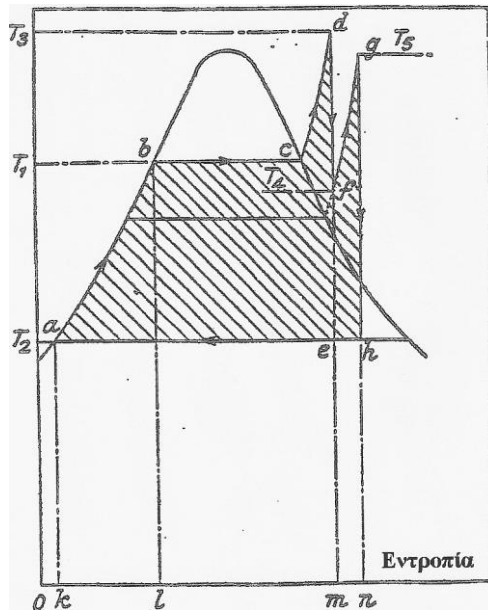
Σχήμα 4.3 Σχηματική παράσταση του ιδανικού κύκλου αναγέννησης και της αντίστοιχης διάταξης πραγματοποίησής του.



Σχήμα 4.4 Διάταξη με απομαστεύσεις και αντίστοιχος κύκλος.



**Κύκλος με αναθέρμανση:** Ένας άλλος τρόπος αύξησης του βαθμού απόδοσης είναι η εφαρμογή αναθέρμανσης. Αφού πραγματοποιηθεί μέρος της εκτόνωσης, ο ατμός διοχετεύεται σε αναθερμαντή όπου του προσδίδεται επί πλέον θερμότητα, αυξάνεται η θερμοκρασία του και στη συνέχεια εκτονώνεται. Ο κύκλος με αναθέρμανση φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Η αναθέρμανση μπορεί να γίνει σε μια ή περισσότερες βαθμίδες. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα που προκύπτει από την αναθέρμανση είναι ότι για συγκεκριμένη τελική πίεση εξόδου από το στρόβιλο, μειώνεται ο αριθμός βαθμίδων που λειτουργούν με υγρό ατμό. Έτσι μειώνονται οι απώλειες υγρότητας ενώ λιγοστεύουν τα προβλήματα διάβρωσης από την κρούση σταγονιδίων στα πτερύγια του αμοστροβίλου.



Σχήμα 4.5 Μορφή του κύκλου ατμού με αναθέρμανση.

#### 4.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Συνηθίζεται οι αμοστροβίλοι να χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με ορισμένα χαρακτηριστικά τους, που σχετίζονται με το είδος σχεδίασης, την διάταξη των επί μέρους τμημάτων τους και την κατάσταση του ατμού στη είσοδο ή την έξοδό τους. Είναι χρήσιμη η παρουσίαση των κατηγοριών αυτών, μια που από το χαρακτηρισμό μιας μηχανής μ' αυτό τον τρόπο δίνεται άμεσα μια εικόνα για βασικά χαρακτηριστικά της.

1. Ανάλογα με τον τύπο πτερυγώσεων που χρησιμοποιούνται:

(α) **Στρόβιλοι δράσεως** (Impulse Turbines): Με μηδενικό περίπου βαθμό αντίδρασης\*.

Έχουμε:

- Μονοβάθμιους στροβίλους δράσεως
- Βαθμίδες ταχύτητας (Curtis)
- Βαθμίδες πίεσης (Rateau)

---

\*Ο βαθμός αντίδρασης βαθμίδας ενός στροβίλου εκφράζει το ποσοστό της μείωσης της στατικής ενθαλπίας που πραγματοποιείται μέσα στην κινητή πτερυγώση σε σχέση με τη συνολική μείωση της στατικής ενθαλπίας σε ολόκληρη τη βαθμίδα.

(β) **Στρόβιλοι αντιδράσεως (Parsons)**: Με βαθμό αντίδρασης μεγαλύτερο του μηδενός.

Ο παραδοσιακός αυτός διαχωρισμός των στροβίλων προέρχεται από την ακόλουθη θεώρηση:

Όταν κατά τη δίοδο του ρευστού μέσω των πτερυγίων δεν έχουμε μεταβολή της στατικής του πίεσης μεταξύ της εισόδου και της εξόδου της περύγωσης, η δύναμη που ασκείται στα πτερύγια οφείλεται στη μεταβολή της ορμής του ρευστού και μόνο. Έτσι έχουμε εξάσκηση δύναμης που έχει την ίδια φύση με τη δύναμη που ασκεί ελεύθερη δέσμη που προσπίπτει σε τοίχωμα. Τότε μιλούμε για βαθμίδα δράσεως και η δύναμη στα πτερύγια οφείλεται στην αλλαγή κατεύθυνσης της ροής, χωρίς να μεταβάλλεται η ταχύτητα.

Στην περίπτωση που έχουμε μεταβολή του μεγέθους της ταχύτητας μεταξύ εισόδου και εξόδου, και συνεπώς της πίεσης, η δύναμη οφείλεται στην αλληλεπίδραση ρευστού - στερεού, μέσω της μεταβολής της πίεσης του ρευστού. Μιλάμε τότε για βαθμίδα αντιδράσεως. Στην πράξη, έχουμε σχεδόν πάντα συνδυασμό των δύο μηχανισμών και απλά έχουμε περιπτώσεις που ο ένας είναι ο προεξάρχων.

Οι δύο μηχανισμοί δεν έχουν καμιά φυσική διαφορά, μια που ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσονται οι δυνάμεις πάνω στα πτερύγια, δηλαδή η δημιουργία του πεδίου πιέσεων γύρω από τις αεροτομές, είναι ουσιαστικά ο ίδιος. Απλά ο διαχωρισμός αυτός έχει παραμείνει από τις μηχανές που πρωτοαναπτύχθηκαν, και λόγω του γεγονότος ότι ο τύπος βαθμίδας, σύμφωνα με το παραδοσιακό αυτό διαχωρισμό, συνδέεται με συγκεκριμένες ιδιότητες σχετικές με τη συγκρότηση μιας μηχανής, όπως θα δούμε στη συνέχεια.

2. Με κριτήριο τη γενική διάταξη της ροής:

- **Απλής ροής**: Ο ατμός κινείται προς μια κατεύθυνση, από την είσοδο υψηλής πίεσης μέχρι την έξοδο (Σχήμα 4.7).

- **Διπλής ροής (αντιροής)**: Ο ατμός χωρίζεται σε δύο κλάδους περνώντας σε αντίθετες φορές από δυο διαφορετικές σειρές βαθμίδων πάνω στον ίδιο ρότορα (Σχήμα 4.8).

- **Σύνθετη διάταξη**: Ο ατμός περνά από μια σειρά διαφορετικές χωριστές μονάδες.

Στη σύνθετη διάταξη έχουμε ομάδες βαθμίδων τοποθετημένες σε δύο ή περισσότερα κελύφη (ονομαζόμενα και κύλινδροι), και συνδεδεμένα συνήθως στην ίδια άτρακτο. Η εκτόνωση γίνεται με πέρασμα του ατμού διαδοχικά από τα κελύφη αυτά, ο διαχωρισμός των κελυφών συνήθως συνδέεται με μεταβολές στον κύκλο λειτουργίας (π.χ. μια αναθέρμανση γίνεται στη διαδρομή του ατμού από την έξοδο του ενός κελύφους μέχρι την είσοδο στο επόμενο).

Οι λόγοι που υπαγορεύουν τις διαφορετικές αυτές διατάξεις θα γίνουν κατανοητοί με βάση τα όσα θα αναπτυχθούν στη συνέχεια.

3. Με κριτήριο τις συνθήκες τροφοδοσίας – εξόδου:

- **Ατμοστρόβιλοι συμπυκνώσεως (condensing turbines)**: Η έξοδος του ατμοστροβίλου γίνεται στον συμπυκνωτή, στον οποίο έχουμε την υγροποίηση του ατμού. Ο συμπυκνωτής βρίσκεται σε πολύ χαμηλή πίεση, αρκετά χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική.

- **Ατμοστρόβιλοι αντίθλιψης**: Ο ατμός στην έξοδο έχει σχετικά υψηλή πίεση και θερμοκρασία, για τροφοδοσία διεργασιών με ατμό ή ακόμα και ενός άλλου ατμοστροβίλου.

- **Ατμοστρόβιλοι με απομαστεύσεις για εξωτερική τροφοδοσία:** Μέρος του ατμού απομαστεύεται από κάποια ενδιάμεση θέση του στροβίλου και χρησιμοποιείται για άλλες χρήσεις π.χ. θέρμανση ή άλλες διεργασίες. Ο ατμός που απάγεται μπορεί να τροφοδοτείται στην κατανάλωση με σταθερή ή μεταβλητή πίεση. Όταν οι ανάγκες της τροφοδοσίας είναι για σταθερή, τότε το σύστημα ελέγχου φροντίζει να ικανοποιείται κατ' αρχήν αυτή η απαίτηση μεταβάλλοντας τις στροφές ή το φορτίο.

Οι κατηγορίες σύμφωνα με το είδος των συνθηκών εισόδου, εξόδου, σχετίζονται κυρίως με το κατά πόσον μέρος του στροβίλου λειτουργεί στην περιοχή του υγρού ατμού, με τις σχετικές συνέπειες ως προς την μορφολογία και τις επιδόσεις.

4. Τέλος μπορεί να έχουμε κατηγορίες ανάλογα με την πίεση τροφοδοσίας ή την ταχύτητα περιστροφής.

#### **Πίεση**

- Χαμηλής πίεσης ατμοστρόβιλος όταν η πίεση τροφοδοσίας είναι μέχρι 20 bar
- μέσης πίεσης για πίεση τροφοδοσίας μέχρι 40 bar
- υψηλής πίεσης, για πίεση τροφοδοσίας μέχρι 170 bar
- υπερ υψηλής πίεσης, για πίεση πάνω από 170 bar, που για πιέσεις πάνω από 225 bar έχουμε μηχανές υπεκρίσιμης πίεσης.

#### **Ταχύτητα**

- Σταθερής ταχύτητας, για μηχανές που λειτουργούν για παραγωγή ηλεκτρισμού και περιστρέφονται με σταθερή ταχύτητα περιστροφής.

Έχουμε παραπέρα μηχανές:

- κανονικής ταχύτητας, για ταχύτητα 3000 rpm
- χαμηλής ταχύτητας, για ταχύτητα μικρότερη των 3000 rpm (π.χ. 1500 rpm για κίνηση τετραπολικής γεννήτριας)
- υψηλής ταχύτητας, για ταχύτητα μεγαλύτερη των 3000 rpm (για να κινηθεί γεννήτρια χρησιμοποιείται μειωτήρας)
- μεταβλητής ταχύτητας, που χρησιμοποιούνται σαν κινητήριες μηχανές αντλιών, ανεμιστήρων, συμπιεστών, για πρόωση πλοίων κλπ

### **4.5 ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ**

Μια πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι το ότι περισσότεροι ατμοστρόβιλοι που συναντούνται στην πράξη, και μάλιστα όταν πρόκειται για μηχανές σημαντικής ισχύος, έχουν έναν μεγάλο αριθμό βαθμίδων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένας ατμοστρόβιλος καλείται συνήθως να λειτουργήσει σε θλιπτικά όρια που συνεπάγονται πολύ μεγάλους λόγους πίεσης. Έτσι, σε έναν ατμοστρόβιλο ένας λόγος πίεσης της τάξης του 2000 δεν είναι ασυνήθιστος, ενώ μπορεί να συναντήσει κανείς τιμές που να φτάνουν και 4000.

Στον κύκλο ατμού, η υψηλή πίεση δημιουργείται από τις αντλίες τροφοδοσίας, που χειριζόμενες ασυμπίεστο ρευστό έχουν μεγάλες δυνατότητες για αύξηση πίεσης. Η δυνατότητα να έχουμε το κύκλωμα του ατμού απομονωμένο από το περιβάλλον, επιτρέπει να δημιουργούνται στον συμπυκνωτή εξαιρετικά χαμηλές πιέσεις. Έτσι τα θλιπτικά όρια του ατμοστρόβιλου μπορεί να είναι σε πολύ διαφορετικές πιέσεις, πράγμα που επιδιώκεται, μια που αύξηση του λόγου πίεσης οδηγεί εν γένει σε αύξηση του βαθμού

απόδοσης του κύκλου.

Οι τεράστιες τιμές των λόγων πίεσης που καλούνται να αποτονώσουν οι αμοστρόβιλοι οδηγούν αφ' ενός σε μεγάλο αριθμό βαθμίδων, αφ' εταίρου σε ιδιόμορφες διατάξεις βαθμίδων.

Ένα δεύτερο στοιχείο, είναι ότι σχεδόν πάντα (εκτός των στροβίλων αντίθλιψης) ένα μέρος της αποτόνωσης γίνεται στην περιοχή του υγρού ατμού. Έτσι ένα τμήμα τουλάχιστο της μηχανής εργάζεται με ρευστό σε διφασικές συνθήκες. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη κατασκευαστικών ιδιομορφιών, ενώ έχει συνέπειες τόσο στην απόδοση της μηχανής όσο και στην διάρκεια ζωής των πτερυγίων του αντίστοιχου τμήματος.

Τέλος η επιλογή του κύκλου, οδηγεί σε διάφορες διατάξεις, στις οποίες έχουμε πάνω σε έναν άξονα περισσότερες της μιας μηχανές, που αποτελούν τα επί μέρους τμήματα του αμοστρόβιλου.

#### 4.6 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Στα Σχήματα 4.6 ως 4.12 παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικοί αεριοστρόβιλοι διαφόρων κατασκευαστών. Παρουσιάζονται τόσο μηχανές απλού κελύφους όσο και μηχανές πολλαπλών κελυφών. Σημειώνεται ότι οι σύγχρονοι αμοστρόβιλοι μεγάλης ισχύος αποτελούνται συνήθως από επί μέρους τμήματα (κελύφη), που προκύπτουν από απαιτήσεις τόσο σχεδιαστικές όσο και κατασκευαστικές. Χαρακτηρίζονται από την περιοχή πιέσεων στην οποία λειτουργούν και είναι:

- τμήμα υψηλής πίεσης (HP-high pressure)
- τμήμα μέσης πίεσης (IP-intermediate pressure)
- τμήμα χαμηλής πίεσης (LP-low pressure).

Κάθε τμήμα μπορεί να αποτελείται από περισσότερους από έναν στροβίλους, σε διάταξη απλής ροής ή αντιρροής. Στο Σχήμα 4.10 δίνονται διάφορες τυπικές διατάξεις με τους αντίστοιχους συμβολισμούς.

Το γεγονός ότι οι αμοστρόβιλοι λειτουργούν με πολύ μεγάλες διαφορές πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση τους. Ένα σημαντικό ζήτημα είναι η διαμόρφωση για την εξισορρόπηση των μεγάλων αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην άτρακτο.

Σε ένα στρόβιλο δράσεως, όπως είναι γνωστό η μεταβολή της στατικής πίεσης μέσα από τα κινητά πτερύγια είναι πολύ μικρή. Μικρή συνεπώς είναι και η αντίστοιχη αξονική συνιστώσα στα κινητά πτερύγια. Από την άλλη μεριά η μεταβολή της αξονικής ορμής είναι επίσης μικρή (μηδενική π.χ. για συμμετρικά τρίγωνα ταχυτήτων). Αυτό έχει σα συνέπεια η συνολική αξονική δύναμη στα πτερύγια να είναι σχετικά μικρή.

Στους στροβίλους αντίδρασης, παρόλο που η αξονική συνιστώσα της ορμής δεν μεταβάλλεται σημαντικά, λόγω σημαντικής μεταβολής της στατικής πίεσης, δημιουργείται αντίστοιχα σημαντική αξονική συνιστώσα δύναμης. Σε σχετικά μικρές μηχανές η αξονική αυτή δύναμη είτε παίρνεται από αξονικά έδρανα είτε από έμβολα εξισορρόπησης. Σε μεγάλες όμως εγκαταστάσεις η λύση που ακολουθείται είναι η διαίρεση της ροής σε δυο αντίρροπα ρεύματα, οδηγώντας στη διάταξη αντιρροής (π.χ. Σχήμα 4.9). Έχοντας δυο ταυτόσημους στροβίλους με αντίθετες φορές διέλευσης του ατμού οδηγεί σε εξισορρόπηση της αξονικής δύναμης. Παράλληλα, έχοντας διαιρέσει την παροχή του ατμού μέσα από κάθε μηχανή στο μισό, είναι δυνατό να ελαττωθούν τα ύψη

περυγίων καθώς και διάμετροι ή ταχύτητες περιστροφής.

### Συνδυασμός τύπων σχεδίασης

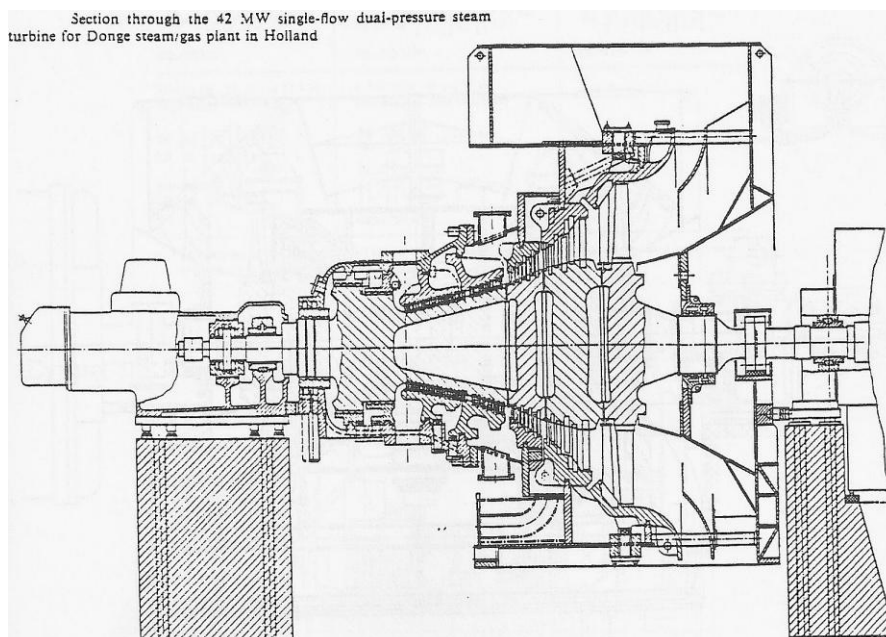
Ενώ στους πρώτους ατμοστρόβιλους που κατασκευάστηκαν ακολουθούνταν συνήθως ένας τύπος σχεδίασης, δράσης ή αντίδρασης, μεταγενέστερα άρχισε να γίνεται συνδυασμός των δύο τύπων για εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων που καθένας παρέχει.

Μια συνήθης διάταξη περιλαμβάνει μια βαθμίδα δράσης (π.χ. Τροχό Curtis) ακολουθούμενη από μια σειρά βαθμίδων αντίδρασης. Τα πλεονεκτήματα που παρέχει μια τέτοια διάταξη είναι τα ακόλουθα:

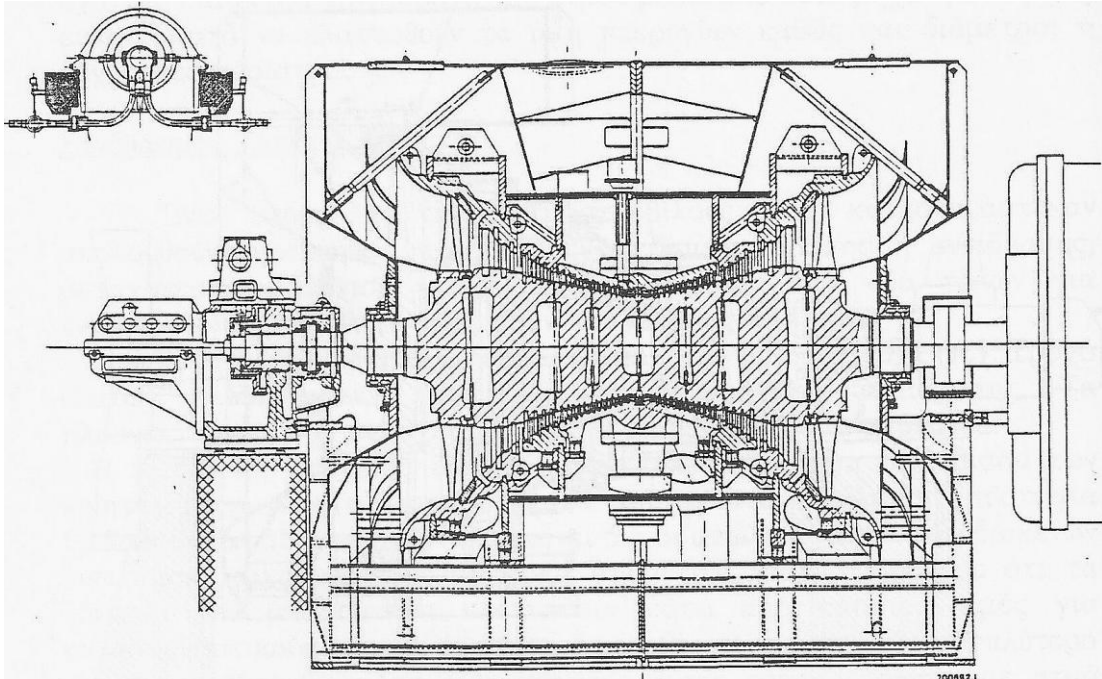
- Η μεταβολή στατικής πίεσης είναι πολύ μικρότερη διαμέσου των κινητών περυγίων (η ιδανική βαθμίδα δράσης είναι ισόθλιπτη) απ' ό τι για τη βαθμίδα αντίδρασης. Αυτό σημαίνει ότι οι απώλειες ακτινικών διακένων είναι πολύ μικρότερες. Αυτό είναι σημαντικό γιατί δεδομένου ότι τα διάκενα δεν μπορούν να ελαττωθούν κάτω από κάποιες τιμές για κατασκευαστικούς λόγους, το σχετικό μέγεθος τους είναι πολύ μεγαλύτερο για τις πρώτες βαθμίδες. (Οι βαθμίδες αυτές τροφοδοτούνται με ατμό υψηλής πίεσης και πολύ μεγάλης πυκνότητας, με αποτέλεσμα ότι το ύψος των περυγίων τους να είναι πολύ μικρότερο από αυτό των βαθμίδων που ακολουθούν.) Συνεπώς είναι ιδιαίτερα σημαντικό το να ελαττωθεί η διαφορά πίεσης που οδηγεί στις απώλειες ακτινικών διακένων. Έτσι, αφού πραγματοποιηθεί πτώση της πίεσης είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν οι αποδοτικότερες βαθμίδες αντίδρασης, στις οποίες τα ακτινικά διάκενα είναι ποσοστιαία μικρότερα, μια που έχει αυξηθεί το μήκος των περυγίων.

- Η βαθμίδα δράσης μπορεί με την ίδια περιφερειακή ταχύτητα να πραγματοποιήσει μεγαλύτερη ενθαλπική πτώση απ' ό τι μια βαθμίδα αντίδρασης.

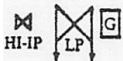



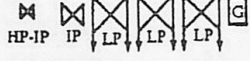


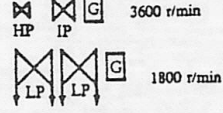
Η πρώτη αυτή βαθμίδα συνήθως είναι μερικής προσβολής και χρησιμοποιείται για ρύθμιση ισχύος του στρόβιλου (ρυθμιστική βαθμίδα - governing stage).



Σχήμα 4.6 Ατμοστρόβιλος απλής ροής (κατασκ. ABB, ισχύς 42 Mw).

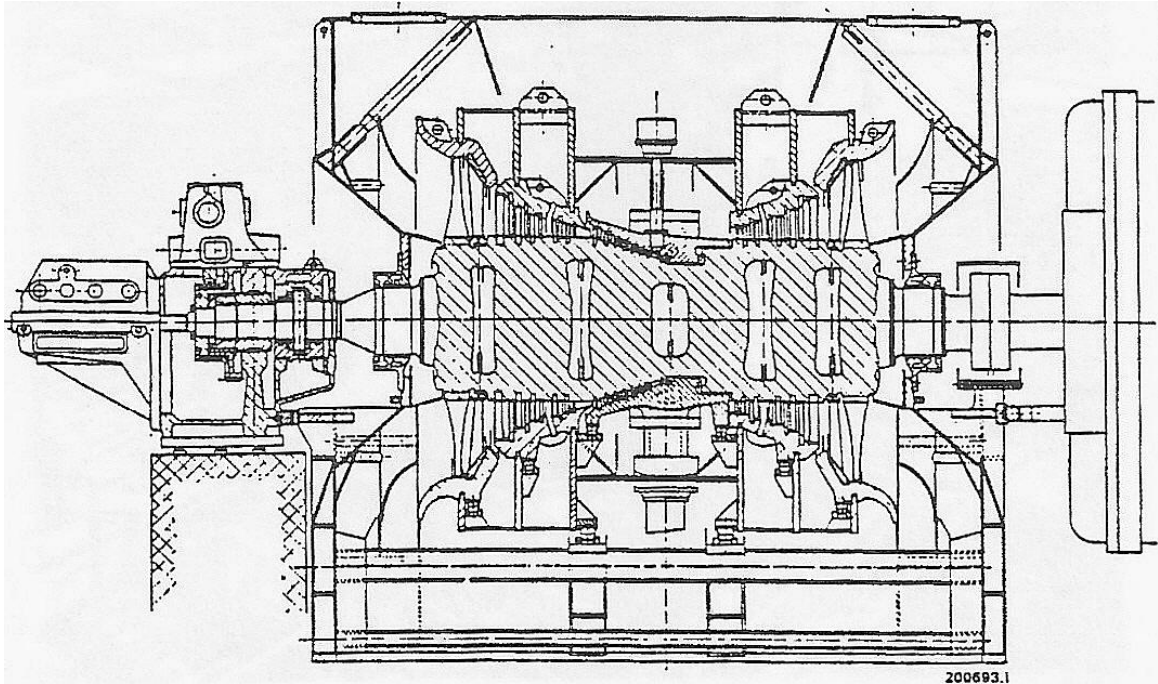


Σχήμα 4.7 Ατμοστρόβιλος διπλής ροής (αντιρροής). Ατμός τροφοδοσίας 80 bar/500 °C, ύψος πτερυγίων τελευταίας βαθμίδας 792 mm.

Fossil	Fossil	Nuclear
TC-2F LSB 26, 30 and 33.5 in Two casings 3600 r/min  125-400 MW	TC-6F LSB 26, 30 and 33.5 in Five casings 3600 r/min  550-1000 MW	TC-4F LSB 38 and 43 in Three casings 1800 r/min  450-1000 MW
TC-4F LSB 26, 30 and 33.5 in Three casings 3600 r/min  250-650 MW	TC-6F LSB 30 and 33.5 in Five casings 3600 r/min (double reheat)  450-725 MW	TC-6F LSB 38 and 43 in Four casings 1800 r/min  600-1100 MW
TC-4F LSB 26, 30 and 33.5 in Four casings 3600 r/min  550-850 MW LP LP G	CC-4F LSB 38 and 43 in Four casings 3600/1800 r/min  600-1250 MW	

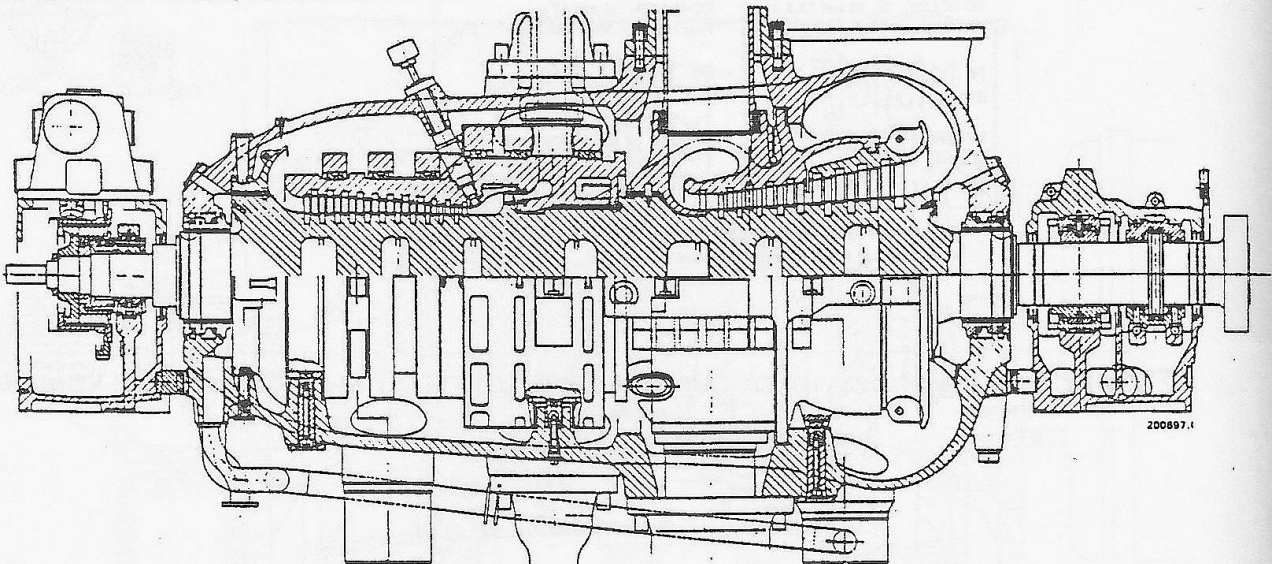
\* Data provided by the General Electric Company. TC = tandem compound, CC = cross compound, F = number of flow ducts to condenser, LSB = last-stage blade.

Σχήμα 4.8 Παραδείγματα διατάξεων ατμοστρόβιλων πολλαπλών κελυφών.

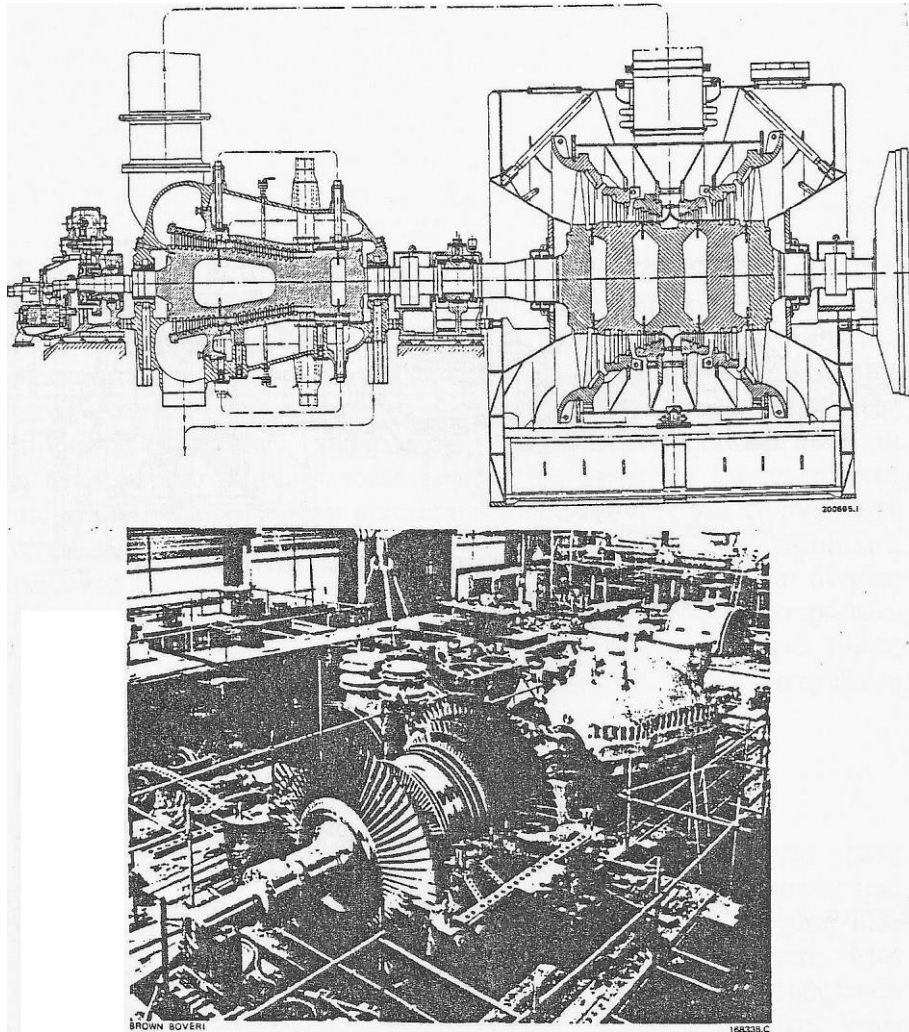


**Σχήμα 4.9** Ατμοστρόβιλος 125 MW, απλού κελύφους, στρόβιλο HP απλής ροής και τμήμα LP διπλής ροής.

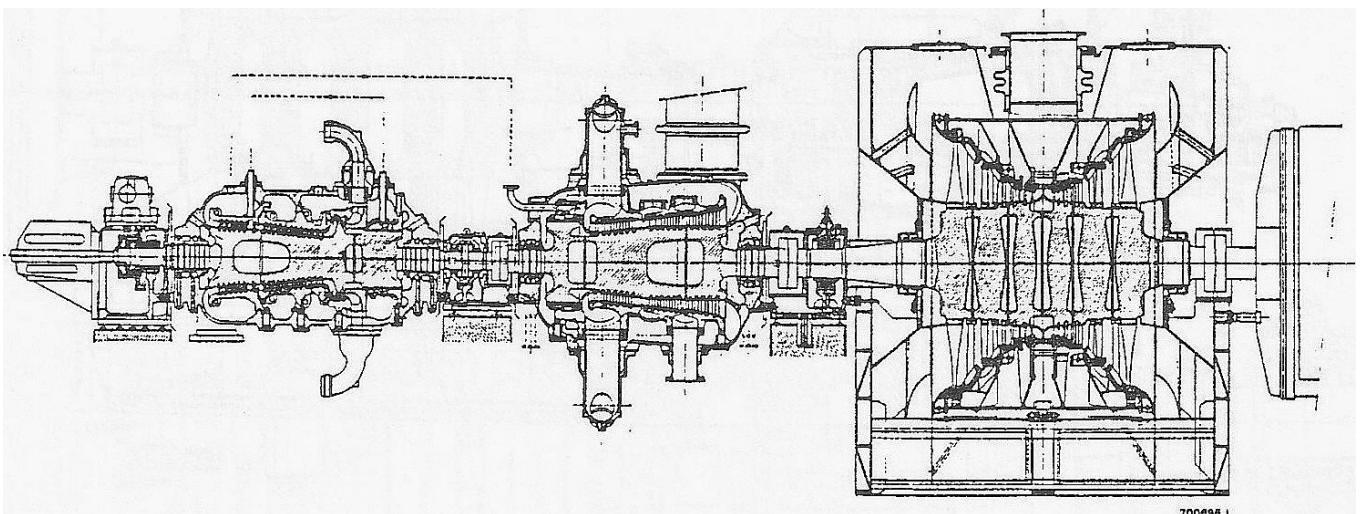
Section through the combined HP/IP section of a 600 MW steam turbine for Cardinal power station in the USA



**Σχήμα 4.10** Τμήμα ατμοστρόβιλου (συνδυασμένα τμήματα HP/IP) από εγκατάσταση ατμοστρόβιλου 600 Mw).



**Σχήμα 4.11** Ατμοστρόβιλος διπλού κελύφους (τροφοδοσία 108 bar, 535 °C) 260 Mw ισχύος. Τελικά πτερύγια ύψους 792 mm.



**Σχήμα 4.12** Διάταξη ατμοστρόβιλου με αναθέρμανση, τριών κελυφών, ισχύος 260 Mw.



## 4.7 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Οι μετατροπείς μηχανικής σε ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση του ηλεκτρικού δικτύου με ισχύ, είναι σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα, σύγχρονες γεννήτριες.

Οι σύγχρονες γεννήτριες έχουν μια κυλινδρική κατασκευή, τον δρομέα, (rotor, Laufer) που περιστρέφεται μέσα σ' ένα κυλινδρικό άνοιγμα μιας, με το έδαφος σταθερά συνδεδεμένης κατασκευής, τον στάτη (stator, Stander). Ο στάτης φέρει τα τυλίγματα εναλλασσόμενου ρεύματος που συνδέονται με το δίκτυο. Ο δρομέας έχει τυλίγματα συνεχούς ρεύματος, που επάγουν μαγνητικό πεδίο απολύτως στρεφόμενο, αλλά σχετικά σταθερό, για ένα παρατηρητή που βρίσκεται πάνω στο δρομέα. Μια μαγνητική γραμμή κλείνει μέσω του σιδήρου του στάτη, του διακένου στάτη-δρομέα και του σιδήρου του δρομέα.

Στη στάσιμη κατάσταση λειτουργίας ο στάτης φέρει εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο και ο δρομέας συνεχές πεδίο. Για το λόγο αυτό το μαγνητικό κύκλωμα του στάτη είναι από φύλλα σιδήρου, τα δυναμοελάσματα, ενώ ο δρομέας κατασκευάζεται τόσο από συμπαγή σίδηρο, όσο και από δυναμοελάσματα. Η συχνότητα περιστροφής του δρομέα είναι ένα υποπολλαπλάσιο των 50 Hz ή των 3000 min<sup>-1</sup> (ή rpm, στροφές ανά λεπτό). Τα ρεύματα του δικτύου παράγουν το μαγνητικό πεδίο τον στάτη που στρέφεται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα όπως ο δρομέας (γι' αυτό λέγεται και σύγχρονη μηχανή).

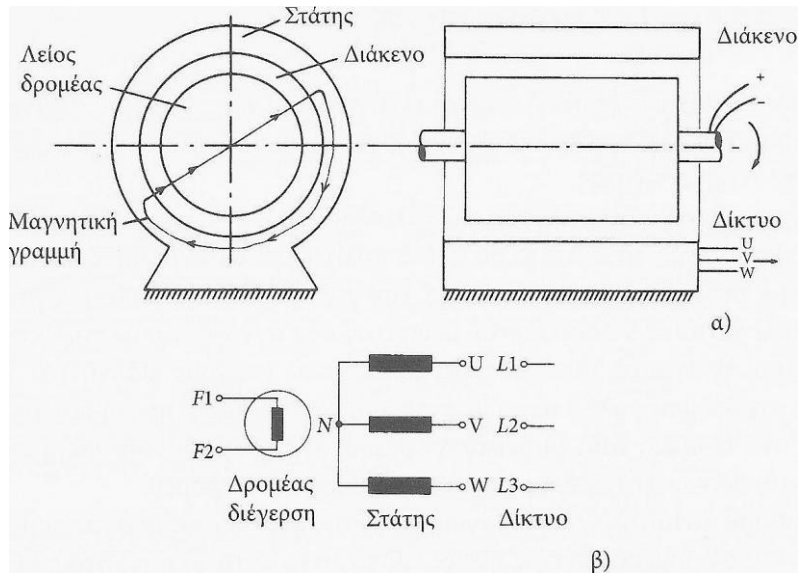
Μια σύγχρονη γεννήτρια, ανάλογα με τη μορφή κατασκευής των πόλων του δρομέα, ονομάζεται είτε στροβιλογεννήτρια (Turbo Generator, Turbogenerator) είτε γεννήτρια εκτύπων ή διακεκριμένων πόλων (Salient Pole Generators, Schenkelpolgenerator). Τα μαγνητικά πεδία του στάτη και του δρομέα έχουν βόρειους και νότιους πόλους. Οι πόλοι μπορεί να είναι 2, 4, 6 ..., είναι όμως ίσοι στο στάτη και δρομέα. Στους βόρειους πόλους η μαγνητική επαγωγή έχει διεύθυνση από τον δρομέα προς τον στάτη.

Η συχνότητα  $f$  του ρεύματος του δικτύου, στη στάσιμη κατάσταση λειτουργίας, συνδέεται με τον αριθμό των ζευγών των πόλων  $p$  της μηχανής και την περιστροφική συχνότητα  $n$  του δρομέα με τη σχέση:

$$f = pn \quad (4.1)$$

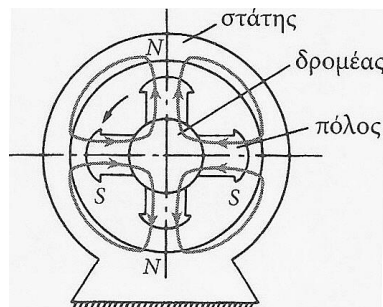
Οι στροβιλογεννήτριες μεγάλης ισχύος (από 1000 MVA έως 2000 MVA) έχουν συνήθως 1 ή σπανιότερα 2 ζεύγη πόλων και περιστροφικές ταχύτητες 3000 ή 1500 min<sup>-1</sup> αντίστοιχα. Κινούνται αποκλειστικά από ατμοστρόβιλους ή αεριοστρόβιλους και έχουν τον άξονα περιστροφής οριζόντιο. Στρόβιλος και γεννήτρια λέγονται ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος. Το μήκος του ζεύγους είναι μεγάλο (20-25 m) και έτσι δεν προσφέρεται η κάθετη διάταξη.

Γεννήτριες εκτύπων πόλων χρησιμοποιούνται, συνήθως, σε συνδυασμό με αργόστροφες κινητήριες μηχανές. Αυτές είναι ή ντήζελ ή υδροστρόβιλοι. Συνήθως έχουμε από 3 έως 32 ζεύγη πόλων, με ταχύτητες περιστροφής από 1000 έως 93,75 min<sup>-1</sup> αντίστοιχα. Η θέση του άξονα περιστροφής εξαρτάται από την διεύθυνση της κινητήριας μηχανής. Συχνά σε υδροστρόβιλους συμπλέκονται γεννήτριες διακεκριμένων πόλων με κάθετο άξονα.



**Σχήμα 4.13** (α) Σχηματική απλοποιημένη διάταξη στροβιλογεννήτριας. (β) Ηλεκτρολογικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας με χαρακτηρισμούς ακροδεκτών σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEC 60034-8 του 2002.

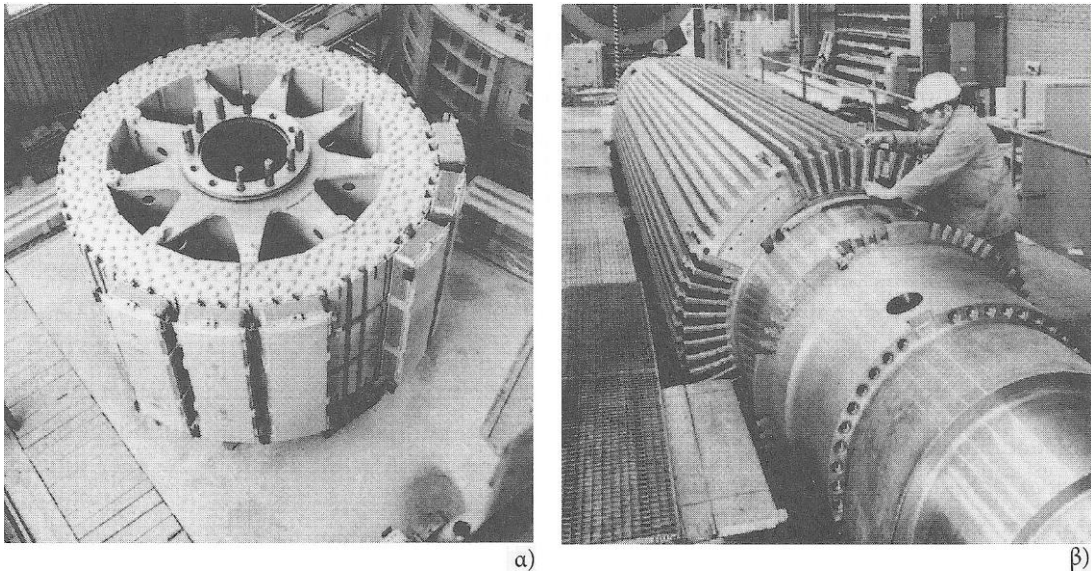
Το είδος της μηχανής που θα εφαρμοστεί σε κάθε περίπτωση εξαρτάται κυρίως από τις στροφές της κινητήριας μηχανής. Οι στροβιλογεννήτριες έχουν χαμηλή τιμή ανά kVA, συμφέρουν όμως κατασκευαστικά και οικονομικά για μεγάλες ταχύτητες περιστροφής του δρομέα ( $1500$  ή  $3000 \text{ min}^{-1}$ ). Μπορεί βέβαια κανείς, θεωρητικά, να προσαρμόσει μια αργόστροφη κινητήρια μηχανή σε μια στροβιλογεννήτρια μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων. Αυτή η λύση όμως εφαρμόζεται σπάνια γιατί είναι ασύμφορη.



**Σχήμα 4.14** Σχηματική απλοποιημένη διάταξη σύγχρονης γεννήτριας διακεκριμένων πόλων.

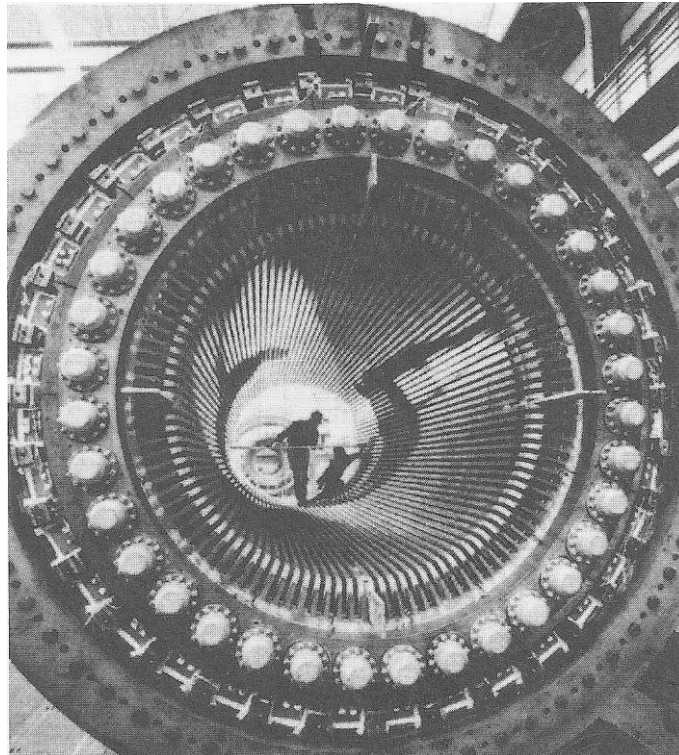
Μεταξύ των δύο ειδών γεννητριών υπάρχουν διαφορές στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μεγέθη, όπως θα φανεί αργότερα. Οι αυτεπαγωγές, τα όρια ευστάθειας και τα επαγόμενα δινορρεύματα στο δρομέα είναι διαφορετικά στις δύο κατηγορίες των μηχανών.

Στις μεγάλες στροβιλογεννήτριες με ένα ζεύγος πόλων, που έχουν δηλαδή ταχύτητα περιστροφής  $3000 \text{ min}^{-1}$  ( $\omega = 314 \text{ s}^{-1}$ ), εφαρμόζονται τεράστιες φυγόκεντρες δυνάμεις. Αν θεωρήσουμε μια διάμετρο δρομέα  $d = 1273 \text{ mm}$ , η ταχύτητα στην περιφέρεια σ' αυτές τις στροφές ανέρχεται στα  $v = \omega d/2 = 200 \text{ m/s}$  ( $= 720 \text{ km/h}$ ). Η αντίστοιχη επιτάχυνση είναι  $\gamma = \omega^2 d/2 = 6,28 \cdot 10^4 \text{ m/s}^2 = 6,40 \cdot 10^3 \text{ g}$  (όπου  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας). Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε κιλό υλικού ασκούνται  $6,40$  τόνοι φυγόκεντρης δύναμης. Έτσι, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στα τυλίγματα της διέγερσης του δρομέα, που πρέπει να στερεωθούν κατάλληλα.



**Σχήμα 4.15** Δρομείς συγχρόνων γεννητριών.

- (α) Δρομέας εκτύπων πόλων σύγχρονης γεννήτριας 230 MVA,  $333,3 \text{ min}^{-1}$ , στο στάδιο της κατασκευής του. Διακρίνονται οι έκτυποι πόλοι. Έχουν τοποθετηθεί έξι από τους συνολικά 18 πόλους. Διακρίνεται η ακτινωτή κατασκευή (με 9 ακτίνες) πάνω στην οποία συνδέεται πρώτα το μαγνητικό ζύγωμα και στη συνέχεια οι έκτυποι πόλοι.
- (β) Δρομέας στροβιλογεννήτριας 1630 MVA,  $1500 \text{ min}^{-1}$ , υπό κατασκευή. Διακρίνονται τα αυλάκια μέσα στα οποία θα τοποθετηθούν τα τυλίγματα της διέγερσης. (Φωτ. BBC).



**Σχήμα 4.16** Στάτης στροβιλογεννήτριας, 1630 MVA,  $1500 \text{ min}^{-1}$ , υπό κατασκευή. Φαίνονται τα αυλάκια μέσα στα οποία θα τοποθετηθούν οι αγωγοί του στάτη. Ο δρομέας που αντιστοιχεί εδώ είναι στο Σχήμα 4.15β (Φωτ. BBC).

Λόγω των απωλειών που δημιουργούνται στο χαλκό και στο σίδηρο μιας σύγχρονης γεννήτριας απαιτείται ψύξη φυσική ή βεβιασμένη με αέρα ή με άλλα ψυκτικά μέσα. Η

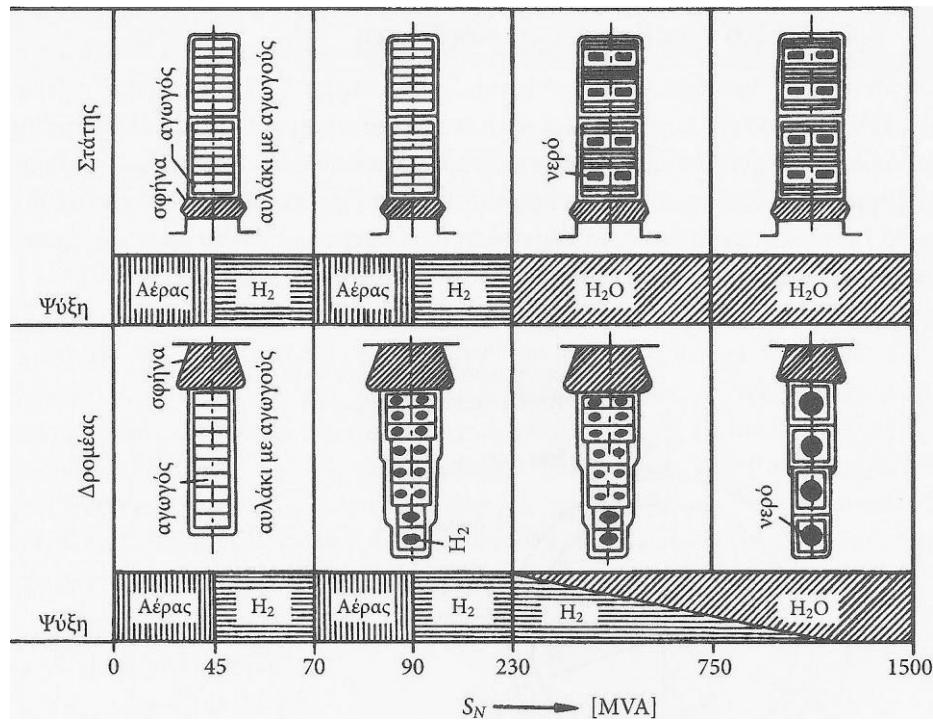
ισχύς που δίνει μια γεννήτρια προσδιορίζεται από τον τρόπο ψύξης της. Σε γεννήτριες εκτύπων πόλων το πρόβλημα της ψύξης λύνεται εύκολα χρησιμοποιώντας βεβιασμένη κυκλοφορία αέρα, γιατί η πυκνότητα παραγωγής θερμότητας ( $W/m^3$ ) είναι μικρή. Σε στροβιλογεννήτριες η αντίστοιχη πυκνότητα παραγωγής θερμότητας είναι μεγάλη και η προσφερόμενη επιφάνεια προς ψύξη μικρή. Έτσι, χρειάζεται να ληφθούν ιδιαίτερα μέτρα για την ψύξη τους. Σε στροβιλογεννήτριες ισχύος μέχρι 40 MVA αρκεί η ψύξη με αέρα. Αν δεν ενδιαφέρει τόσο ένας καλός βαθμός απόδοσης, μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει ψύξη με αέρα και σε γεννήτριες ισχύος μέχρι 170 MVA. Για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας όμως και οικονομικότητας της κατασκευής, σε στροβιλογεννήτριες ισχύος πάνω από 40 MVA χρησιμοποιείται υδρογόνο ( $H_2$ ) σαν ψυκτικό μέσο. Η αύξηση της πίεσης του υδρογόνου οδηγεί σε ακόμη καλύτερη ψύξη.

Σε στροβιλογεννήτριες μεγάλης ισχύος, π.χ. 300 MVA, γίνεται και χρήση νερού για την ψύξη του στάτη κυρίως. Το ψυκτικό μέσο οδηγείται μέσα στους αγωγούς των τυλιγμάτων, δηλαδή οι αγωγοί δεν ψύχονται επιφανειακά μόνο. Αυτή η μέθοδος λέγεται άμεση ψύξη του αγωγού. Οι αγωγοί έχουν, σ' αυτές τις περιπτώσεις, κανάλια μέσα από τα οποία ρέει το ψυκτικό μέσο. Προφανώς, η ψύξη του δρομέα με υγρό ψυκτικό είναι δύσκολη λόγω της περιστροφικής κίνησης, έχει όμως εφαρμοστεί σε μεγάλες γεννήτριες ισχύος 1600 MVA. Η μεταφορά της θερμότητας στα προαναφερθέντα ψυκτικά μέσα Αέρας, Υδρογόνο, Νερό συμπεριφέρεται με το λόγο 1:5:50 αντίστοιχα.

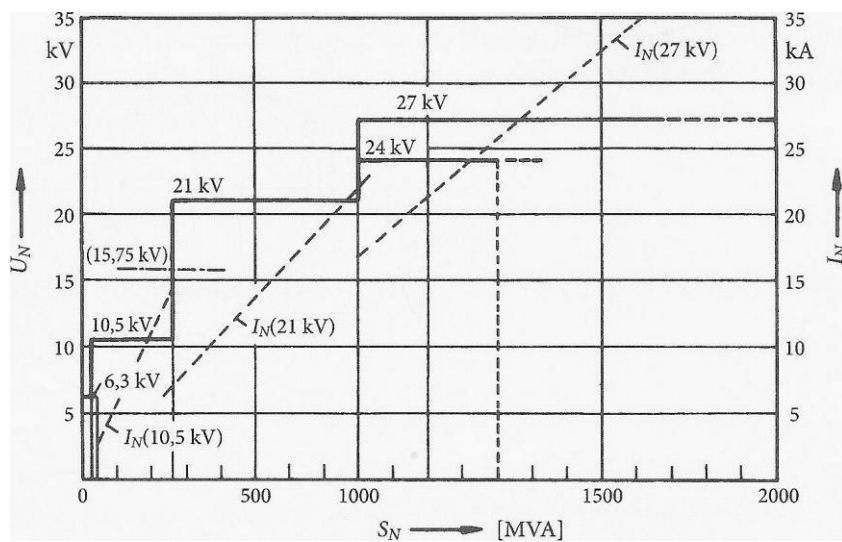
Η αναπτυσσόμενη θερμότητα Joule ( $RI^2$ ) στα τυλίγματα του στάτη μιας σύγχρονης γεννήτριας μπορεί να ελαττωθεί μειώνοντας την αντίσταση των αγωγών στο εναλλασσόμενο ρεύμα. Για το λόγο αυτό οι αγωγοί των τυλιγμάτων του στάτη μεγάλων συγχρόνων γεννητριών δεν είναι συμπαγείς αλλά αποτελούνται από πολλούς ελικοειδώς περιεστραμμένους αγωγούς που ονομάζονται αγωγοί Roebel (εφευρέθηκαν από τον μηχανικό της BBC Ludwig Roebel το 1912).

Το Σχήμα 4.17 δείχνει τους διάφορους τρόπους ψύξης σύγχρονων γεννητριών ανάλογα με την ισχύ τους. Ο τρόπος ψύξης μπορεί να είναι ο ίδιος στον στάτη και τον δρομέα αλλά μπορεί και να διαφέρει. Σε ισχύεις μεγαλύτερες των 1000 MVA εφαρμόζεται και άμεση ψύξη του μαγνητικού κυκλώματος του στάτη με χρήση μονωτικού λαδιού.

Η ονομαστική τάση των συγχρόνων γεννητριών ισχύος κυμαίνεται από 6,3 έως 27 kV, ανάλογα με την ονομαστική τους ισχύ  $S_N$ . Τα αντίστοιχα ονομαστικά ρεύματα κυμαίνονται από μερικά kA έως 30 kA, όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.18.



Σχήμα 4.17 Τρόποι ψύξης δρομέα και στάτη συγχρόνων γεννητριών.



Σχήμα 4.18 Εκλογή της ονομαστικής τάσης  $U_N$  συγχρόνων γεννητριών σαν συνάρτηση της ονομαστικής ισχύος  $S_N$ .

#### 4.8 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος, που εξετάζονται εδώ, ονομάζονται σύγχρονες, επειδή οι συχνότητες των τάσεων που παράγουν βρίσκονται σε συγχρονισμό με την ταχύτητα περιστροφής τους. Ο δρομέας των μηχανών αυτών είναι ένας ηλεκτρομαγνήτης, του οποίου το πεδίο περιστρέφεται με φορά ίδια μ' αυτή του δρομέα. Η σχέση της ηλεκτρικής συχνότητας του στάτη με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου δίνεται από την σχέση (4.2):

$$f_c = \frac{n_m P}{120} \quad (4.2)$$

όπου  $f_c$  = η ηλεκτρική συχνότητα σε Hz

$n_m$  = η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου σε r/min (= η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στις σύγχρονες μηχανές)

P = ο αριθμός των πόλων

Επειδή, λοιπόν, ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα που περιστρέφεται και το μαγνητικό πεδίο της, η παραπάνω εξίσωση δίνει τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής και της ηλεκτρικής συχνότητάς της. Όλες οι γεννήτριες όμως, παράγουν συχνότητες 50 Hz ή 60 Hz, οπότε η ταχύτητα περιστροφής τους για συγκεκριμένο αριθμό πόλων είναι προκαθορισμένη. Για παράδειγμα, κατά την παραγωγή συχνότητας 60 Hz, μια μηχανή δυο πόλων θα πρέπει να περιστρέφεται με ταχύτητα 3600 r/min, ενώ κατά την παραγωγή συχνότητας 50 Hz μια μηχανή τεσσάρων πόλων θα πρέπει να περιστρέφεται με ταχύτητα 1500 r/min. Δηλαδή, η σχέση (4.2) δίνει την ταχύτητα με την οποία θα πρέπει να περιστρέφεται η μηχανή, ώστε να παράγει τη συγκεκριμένη συχνότητα.

#### 4.9 ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΜΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Η τάση στα άκρα της κάθε φάσης μιας μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος είναι:

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_c \Phi f \quad (4.3)$$

Δηλαδή, η  $E_A$  εξαρτάται από τη μαγνητική ροή  $\Phi$ , από τη συχνότητα ή ταχύτητα περιστροφής της μηχανής και από κάποια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της (όπου  $N_c$  ο αριθμός αγωγών ενός πλαισίου του δρομέα της μηχανής). Συχνά, όμως, στα προβλήματα που έχουν να κάνουν με σύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιείται μια πιο απλή μορφή της σχέσης (4.3), που δίνει έμφαση μόνο στους παράγοντες που μεταβάλλονται κατά τη λειτουργία της μηχανής. Αυτή η απλή μορφή είναι η:

$$E_A = K \Phi \omega \quad (4.4)$$

όπου η σταθερά K εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής και είναι:

$$K = \frac{N_c}{\sqrt{2}} \quad (4.5)$$

αν η  $\omega$  δίνεται σε ηλεκτρικά rad/s.

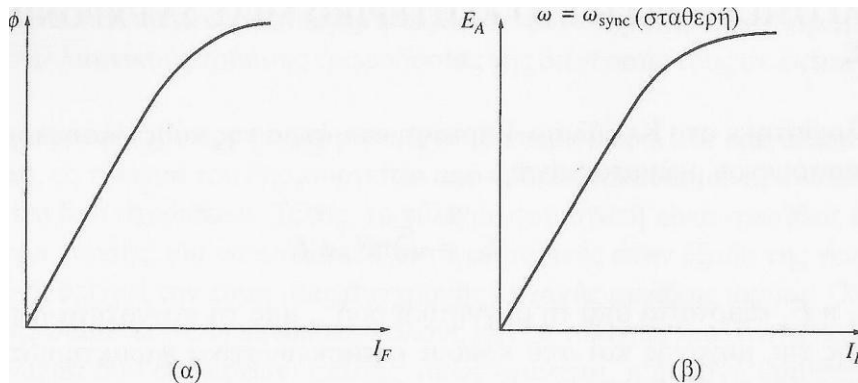
Αν, όμως, η  $\omega$  δίνεται σε μηχανικά rad/s, τότε ισχύει:

$$K = \frac{N_c P}{\sqrt{2}} \quad (4.6)$$

Η τάση  $E_A$  που παράγεται στο εσωτερικό της γεννήτριας είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής στη μηχανή και της ταχύτητας περιστροφής της. Όμως, η μαγνητική ροή εξαρτάται από το ρεύμα του δρομέα (ρεύμα διέγερσης)  $I_F$  σύμφωνα με την καμπύλη του Σχήματος 4.19α. Τελικά, αφού η  $E_A$  είναι ανάλογη της ροής, η σχέση της με το ρεύμα διέγερσης δίνεται από την καμπύλη του Σχήματος 4.19β. Αυτή η καμπύλη ονομάζεται, καμπύλη μαγνήτισης ή χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος (magnetization curve, open-circuit characteristic) της μηχανής.

#### 4.10 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Έστω  $E_A$  η τάση στα άκρα της μιας φάσης που παράγεται στο εσωτερικό της γεννήτριας. Αυτή η τάση σπάνια εμφανίζεται στα άκρα της μηχανής. Αντίθετα, είναι ίση με την αντίστοιχη τάση στα άκρα της μηχανής  $V_\phi$  μόνο όταν το ρεύμα οπλισμού της γεννήτριας είναι μηδέν. Η ανάλυση των αιτιών που διαφοροποιούν την  $E_A$  από τη  $V_\phi$  οδηγεί στην ανάπτυξη του μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας.



**Σχήμα 4.19** (α) Γραφική παράσταση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό μιας σύγχρονης γεννήτριας ως προς το ρεύμα διέγερσης. (β) Η καμπύλη μαγνήτισης της σύγχρονης γεννήτριας.

Οι λόγοι που διαφοροποιούν την  $E_A$  από τη  $V_\phi$  είναι οι εξής:

1. Η παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο της μηχανής που προκαλείται από το ρεύμα του στάτη. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αντίδραση οπλισμού (armature reaction)
2. Οι αυτεπαγωγές των αγωγών του στάτη
3. Οι αντιστάσεις των αγωγών του στάτη
4. Το σχήμα των εκτύπων πόλων του δρομέα

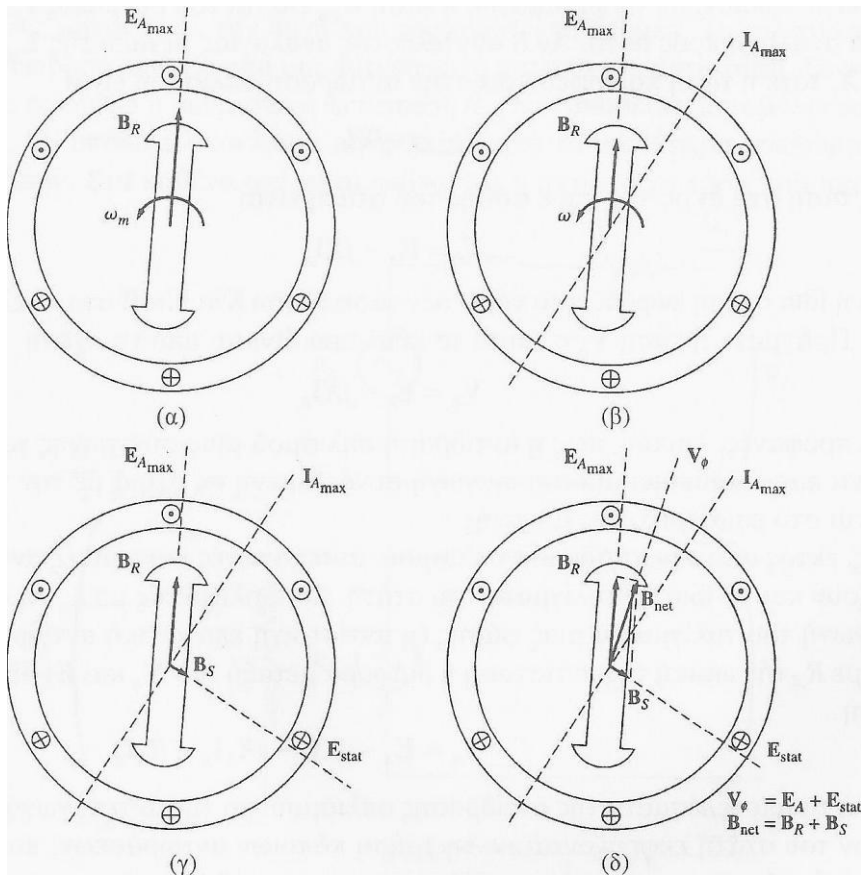
Το πρώτο και πιο σημαντικό από τα παραπάνω φαινόμενα είναι η αντίδραση οπλισμού. Η περιστροφή του δρομέα στο εσωτερικό της γεννήτριας παράγει τάση  $E_A$  σε κάθε φάση του στάτη. Όταν, όμως, στα άκρα της μηχανής συνδεθεί κάποιο φορτίο, εμφανίζεται ρεύμα στους αγωγούς του στάτη το οποίο παράγει ένα νέο πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής. Το πεδίο του στάτη με τη σειρά του επηρεάζει το μαγνητικό πεδίο που ήταν από πριν διαμορφωμένο στη μηχανή, αλλά και την τάση στα άκρα της κάθε φάσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αντίδραση οπλισμού, επειδή το τύλιγμα του οπλισμού (στάτη) είναι αυτό που παραμορφώνει την τάση στα άκρα της γεννήτριας.

Στο Σχήμα 4.20α, φαίνεται ο δρομέας της μηχανής που περιστρέφεται στο εσωτερικό του στάτη, όταν το φορτίο δεν είναι ακόμη συνδεδεμένο στη γεννήτρια. Το μαγνητικό πεδίο του δρομέα  $B_R$  παράγει την τάση  $E_A$ , της οποίας η μέγιστη τιμή συμπίπτει με τη διεύθυνση του  $B_R$ . Το δυναμικό στο έξω μέρος των επάνω αγωγών του τμήματος είναι θετικότερο από το δυναμικό στο έξω μέρος των κάτω αγωγών. Επειδή το φορτίο δεν έχει ακόμη συνδεθεί, το ρεύμα οπλισμού είναι μηδενικό και η  $E_A$  είναι ίση με τη  $V_\phi$  στα άκρα της αντίστοιχης φάσης.

Η γεννήτρια τώρα συνδέεται με κάποιο επαγωγικό φορτίο. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.20β, επειδή το φορτίο είναι επαγωγικό, η μέγιστη τιμή της τάσης προπορεύεται

της μέγιστης τιμής του ρεύματος.

Όμως, το ρεύμα του στάτη, παράγει κι αυτό κάποιο μαγνητικό πεδίο με επαγωγή  $\mathbf{B}_S$  στο εσωτερικό του και με φορά που δίνεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.20γ. Το νέο πεδίο παράγει στα άκρα της κάθε φάσης του στάτη την τάση  $\mathbf{E}_{stat}$ , που φαίνεται στο σχήμα.



**Σχήμα 4.20** Ανάπτυξη ενός μοντέλου της αντίδρασης οπλισμού στις σύγχρονες γεννήτριες: (α) Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει την τάση  $\mathbf{E}_A$  στο εσωτερικό της γεννήτριας. (β) Η τάση  $\mathbf{E}_A$  προκαλεί κάποιο επαγωγικό ρεύμα στο στάτη της γεννήτριας, όταν αυτή συνδεθεί με κάποιο επαγωγικό φορτίο. (γ) Το ρεύμα του στάτη παράγει το μαγνητικό πεδίο του στάτη της μηχανής  $\mathbf{B}_S$ , το οποίο με τη σειρά του προκαλεί την ανάπτυξη της τάσης  $\mathbf{E}_{stat}$  στα τυλίγματα οπλισμού. (δ) Η συνισταμένη μαγνητική επαγωγή των πεδίων του στάτη και του δρομέα είναι η  $\mathbf{B}_{net}$ , ενώ το άθροισμα των τάσεων  $\mathbf{E}_{stat}$  και  $\mathbf{E}_A$  δίνει τη φασική τάση  $\mathbf{V}_\phi$  της γεννήτριας.

Έτσι η συνολική τάση στα άκρα του τυλίγματος μιας φάσης του στάτη είναι το άθροισμα της τάσης  $\mathbf{E}_A$  και της  $\mathbf{E}_{stat}$ , που παράγεται λόγω της αντίδρασης οπλισμού:

$$\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A + \mathbf{E}_{stat} \quad (4.7)$$

Η μαγνητική επαγωγή  $\mathbf{B}_{net}$  του ολικού μαγνητικού πεδίου στο διάκενο είναι ίση με το άθροισμα των επαγωγών των πεδίων του στάτη και του δρομέα:

$$\mathbf{B}_{net} = \mathbf{B}_R + \mathbf{B}_S \quad (4.8)$$

Αφού οι φορές των  $\mathbf{E}_A$  και  $\mathbf{B}_R$  συμπίπτουν, όπως και οι φορές των  $\mathbf{E}_{stat}$  και  $\mathbf{B}_S$ , είναι φανερό πως οι  $\mathbf{V}_\phi$  και  $\mathbf{B}_{net}$  θα έχουν την ίδια φορά. Τέλος, στο Σχήμα 4.20δ, φαίνονται οι τάσεις και τα ρεύματα στην περίπτωση λειτουργίας με κάποιο φορτίο.



Σύμφωνα, λοιπόν, με τα παραπάνω, η τάση  $\mathbf{E}_{\text{stat}}$  έπεται του ρεύματος  $\mathbf{I}_A$  κατά  $90^\circ$  και είναι ανάλογη προς αυτό. Αν ο συντελεστής αναλογίας μεταξύ της  $\mathbf{E}_{\text{stat}}$  και του  $\mathbf{I}_A$  είναι  $X$ , τότε η τάση που οφείλεται στην αντίδραση οπλισμού είναι:

$$\mathbf{E}_{\text{stat}} = -jX\mathbf{I}_A \quad (4.9)$$

οπότε η τάση στα άκρα της κάθε φάσης του στάτη είναι:

$$\mathbf{V}_\Phi = \mathbf{E}_A - jX\mathbf{I}_A \quad (4.10)$$

Αλλά η ίδια σχέση εκφράζει το νόμο των τάσεων του Kirchhoff στο κύκλωμα του Σχήματος 4.21. Πράγματι, η τάση  $\mathbf{V}_\Phi$  σ' αυτό το κύκλωμα δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{V}_\Phi = \mathbf{E}_A - jX\mathbf{I}_A \quad (4.11)$$

Είναι προφανές, λοιπόν, πως η αντίδραση οπλισμού μιας σύγχρονης γεννήτριας μπορεί να παρασταθεί με μια αυτεπαγωγή συνδεδεμένη σε σειρά με την τάση που παράγεται στο εσωτερικό της μηχανής.

Όμως, εκτός από την αντίδραση οπλισμού, αυτεπαγωγές και ωμικές αντιστάσεις εμφανίζουν και τα ίδια τα τυλίγματα του στάτη. Συμβολίζοντας με  $L_A$  τη συνολική αυτεπαγωγή του τυλίγματος μιας φάσης (η αντίστοιχη επαγωγική αντίδραση είναι  $X_A$ ) και με  $R_A$  την ωμική της αντίσταση η διαφορά μεταξύ των  $\mathbf{V}_\Phi$  και  $\mathbf{E}_A$  δίνεται από τη σχέση:

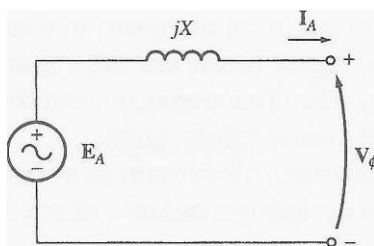
$$\mathbf{V}_\Phi = \mathbf{E}_A - jX\mathbf{I}_A - jX_A\mathbf{I}_A - R_A\mathbf{I}_A \quad (4.12)$$

Επειδή τα αποτελέσματα της αντίδρασης οπλισμού και της αυτεπαγωγής των τυλιγμάτων του στάτη εκφράζονται με τη χρήση κάποιων αντιδράσεων, πολύ συχνά αυτές συνδυάζονται σε μια μόνο αντίδραση που ονομάζεται σύγχρονη αντίδραση (synchronous reactance) της μηχανής. Δηλαδή, η σύγχρονη αντίδραση μιας γεννήτριας ορίζεται από τη σχέση:

$$X_S = X + X_A \quad (4.13)$$

Τελικά, η τάση  $\mathbf{V}_\Phi$  δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{V}_\Phi = \mathbf{E}_A - jX_S\mathbf{I}_A - R_A\mathbf{I}_A \quad (4.14)$$



Σχήμα 4.21 Απλό ηλεκτρικό κύκλωμα.

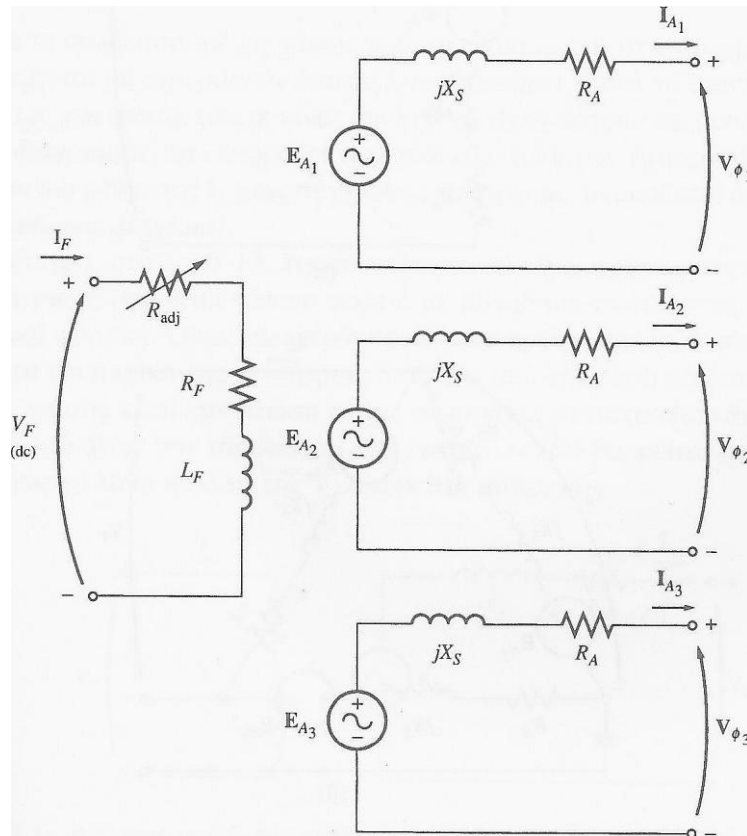
Τώρα πια είναι εύκολη η παράσταση του ισοδύναμου κυκλώματος μιας σύγχρονης γεννήτριας. Αυτό γίνεται στο Σχήμα 4.22, όπου φαίνεται το κύκλωμα διέγερσης (δρομέα) της μηχανής με την πηγή που τροφοδοτεί το δρομέα. Το τυλίγμα της διέγερσης αντιπροσωπεύεται από μια αυτεπαγωγή και από μια αντίσταση. Σε σειρά με την  $R_F$  έχει συνδεθεί η ρυθμιστική αντίσταση  $R_{\text{adj}}$  που μπορεί να μεταβάλλει το ρεύμα διέγερσης. Το υπόλοιπο κύκλωμα αποτελείται από τα ισοδύναμα κυκλώματα των τριών φάσεων. Στο καθένα απ' αυτά φαίνονται η αντίστοιχη τάση που παράγεται στο εσωτερικό της μηχανής, σε σειρά με τη σύγχρονη αντίδραση  $X_S$  και την αντίδραση του τυλίγματος της φάσης  $R_A$ . Οι τάσεις και τα ρεύματα των τριών φάσεων διαφέρουν μεταξύ τους μόνο στη φάση (παρουσιάζουν διαφορά φάσης  $120^\circ$  η μια από την άλλη), ενώ κατά τα άλλα είναι εντελώς όμοιες.

Στο Σχήμα 4.23, οι τρεις φάσεις του στάτη συνδέονται σε αστέρα ή σε τρίγωνο. Όταν είναι συνδεδεμένες σε αστέρα, οι αντίστοιχες πολικές τάσεις  $V_T$  είναι:

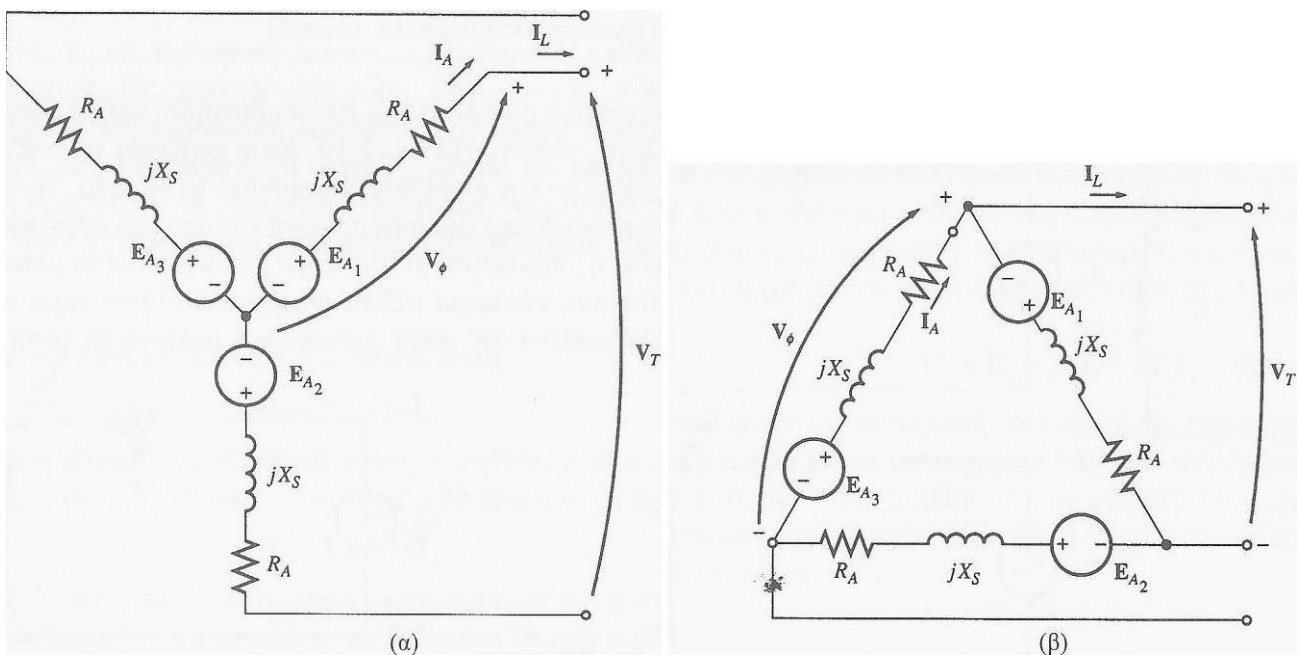
$$V_T = \sqrt{3} V_\phi \quad (4.15)$$

Ενώ, όταν συνδέονται σε τρίγωνο ισχύει:

$$V_T = V_\phi \quad (4.16)$$



Σχήμα 4.22 Το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα μιας τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας.



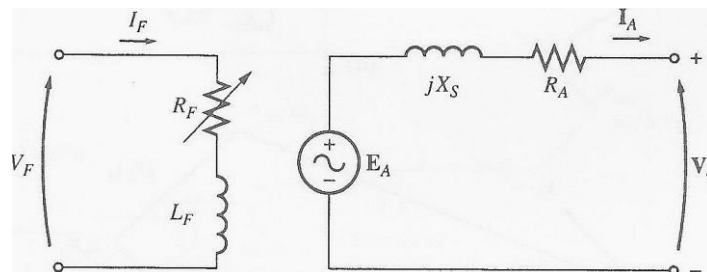
Σχήμα 4.23 Ισοδύναμα κυκλώματα σύγχρονης γεννήτριας συνδεδεμένης (α) σε αστέρα, (β) σε τρίγωνο.

Το γεγονός ότι η μόνη διαφοροποίηση ανάμεσα στις τρεις φάσεις είναι η διαφορά φάσης που εμφανίζεται μεταξύ τους, οδηγεί στην εισαγωγή του ισοδύναμου κυκλώματος ανά φάση. Στο Σχήμα 4.24, φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση της παραπάνω μηχανής. Εδώ πρέπει να τονιστεί πως οι τάσεις και τα ρεύματα όλων των φάσεων είναι ίσα μόνο στην περίπτωση που το φορτίο της γεννήτριας είναι συμμετρικό. Όταν το φορτίο της μηχανής δεν είναι συμμετρικό, απαιτούνται πιο πολύπλοκες τεχνικές ανάλυσης που βρίσκονται πέρα από τους στόχους αυτής της εργασίας.

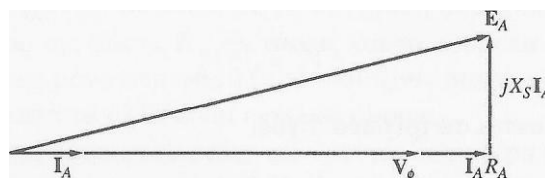
#### 4.11 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ

Πολύ συχνά οι εναλλασσόμενες τάσεις που αναπτύσσονται στις σύγχρονες γεννήτριες εκφράζονται με στρεφόμενα διανύσματα (phasors). Αυτά τα διανύσματα διαθέτουν πλάτος και φάση, οπότε είναι δυνατό να σχεδιαστούν σε δύο διαστάσεις. Ένα τέτοιο διάγραμμα, που εκφράζει τις σχέσεις μεταξύ των τάσεων ( $E_A$ ,  $V_\phi$ ,  $jX_A I_A$  και  $R_A I_A$ ) και του ρεύματος  $I_A$  μιας σύγχρονης γεννήτριας, ονομάζεται διανυσματικό διάγραμμα (phasor diagram).

Για παράδειγμα, στο Σχήμα 4.25, παρουσιάζονται αυτές οι σχέσεις στην περίπτωση που η γεννήτρια τροφοδοτεί κάποιο φορτίο με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος (ένα καθαρά ωμικό φορτίο). Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, η τάση της κάθε φάσης  $E_A$  στο εσωτερικό της γεννήτριας διαφέρει από την τάση εξόδου  $V_\phi$  της συγκεκριμένης φάσης κατά την πτώση τάσης σε κάποιες αντιστάσεις και αυτεπαγωγές. Ως αναφορά όλων των τάσεων και των ρευμάτων εδώ θεωρείται η τάση  $V_\phi$ . Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο η φάση της  $V_\phi$  θεωρείται μηδενική.



**Σχήμα 4.24** Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα μιας σύγχρονης γεννήτριας. Η αντίσταση  $R_F$  συμβολίζει το συνδυασμό της εσωτερικής αντίστασης διέγερσης και της ρυθμιστικής αντίστασης της διέγερσης.



**Σχήμα 4.25** Διανυσματικό διάγραμμα μιας σύγχρονης γεννήτριας που λειτουργεί με συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα.

Το διανυσματικό διάγραμμα της γεννήτριας μετατρέπεται αναλόγως, όταν το φορτίο της γεννήτριας είναι επαγωγικό ή χωρητικό (Σχήμα 4.26). Εδώ φαίνεται ότι με δεδομένη τη φασική τάση και το ρεύμα οπλισμού της γεννήτριας απαιτείται παραγωγή

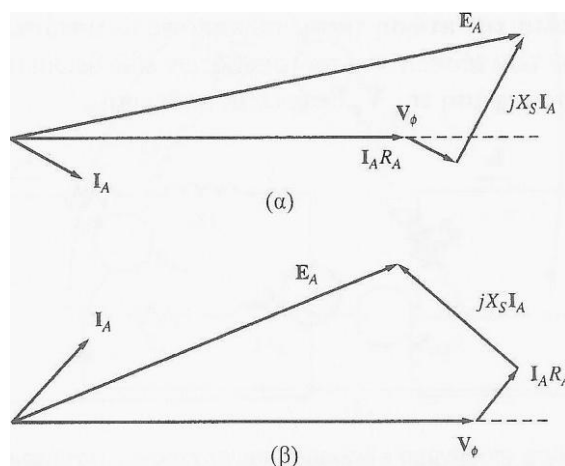
μεγαλύτερης τάσης  $E_A$  για την τροφοδοσία επαγωγικού φορτίου απ' αυτή που απαιτείται για την τροφοδοσία χωρητικού φορτίου. Δηλαδή, απαιτείται μεγαλύτερο ρεύμα διέγερσης για την τροφοδοσία του επαγωγικού φορτίου με την ίδια τάση. Αυτό συμβαίνει, επειδή:

$$E_A = K\Phi\omega \quad (4.17)$$

και η  $\omega$  πρέπει να παραμείνει σταθερή, ώστε η συχνότητα τροφοδοσίας να μη μεταβληθεί.

Η παραπάνω παρατήρηση εκφράζεται και ως εξής: Για δεδομένο ρεύμα διέγερσης και ρεύμα φορτίου η φασική τάση στα άκρα της γεννήτριας είναι μικρότερη στα επαγωγικά φορτία και μεγαλύτερη στα χωρητικά.

Τέλος, στις πραγματικές σύγχρονες γεννήτριες η σύγχρονη αντίδραση είναι πολύ μεγαλύτερη σε μέτρο από την αντίσταση οπλισμού τους  $R_A$ . Έτσι η  $R_A$  αγνοείται στην περίπτωση της ποιοτικής μελέτης των μεταβολών της τάσης. Όταν όμως απαιτούνται ακριβείς ποσοτικοί υπολογισμοί, η  $R_A$  πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπόψη.



**Σχήμα 4.26** Διανυσματικό διάγραμμα μιας σύγχρονης γεννήτριας που λειτουργεί με (α) επαγωγικό, (β) χωρητικό συντελεστή ισχύος.

#### 4.12 ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΡΟΠΗ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι μια σύγχρονη μηχανή που λειτουργεί ως γεννήτρια μετατρέποντας μηχανική ισχύ σε τριφασική ηλεκτρική ισχύ στην έξοδο της. Η κινητήρια μηχανή μιας τέτοιας γεννήτριας μπορεί να είναι κάποιος κινητήρας ντίζελ, ένας ατμοστρόβιλος, ένας υδροστρόβιλος ή κάθε άλλη παρόμοια μηχανή. Ανεξάρτητα όμως από τη φύση της, αυτή η μηχανή πρέπει οπωσδήποτε να λειτουργεί σε κάποια σταθερή συχνότητα χωρίς να εξαρτάται από την ισχύ που απαιτεί κάθε φορά το φορτίο της γεννήτριας. Χωρίς αυτή την προϋπόθεση η προσφερόμενη από τη γεννήτρια ηλεκτρική ισχύς δε θα έχει σταθερή συχνότητα.

Φυσικά, μια σύγχρονη γεννήτρια παρουσιάζει απώλειες κατά τη μετατροπή της μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική, γι' αυτό και ποτέ η ισχύς εισόδου της δεν είναι ίση με την ισχύ εξόδου. Στο διάγραμμα ροής ισχύος μιας σύγχρονης γεννήτριας του Σχήματος 4.27, φαίνεται ότι η ισχύς εισόδου στη γεννήτρια είναι η μηχανική ισχύς που εφαρμόζεται στον άξονά της ( $P_{in} = \tau_{app}\omega_m$ ), ενώ η ισχύς που μετατρέπεται σε ηλεκτρική στο εσωτερικό της μηχανής είναι ίση με:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m \quad (4.18)$$

$$= 3E_A I_A \cos \gamma \quad (4.19)$$

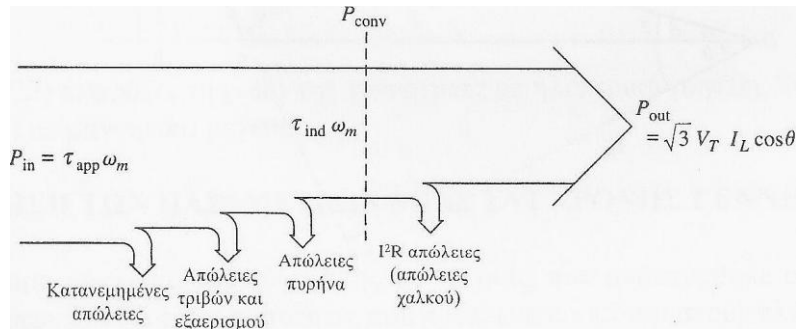
όπου  $\gamma$  είναι η γωνία μεταξύ των  $E_A$  και  $I_A$ . Η διαφορά μεταξύ της ισχύος εισόδου στη γεννήτρια και της ισχύος που μετατρέπεται τελικά σε ηλεκτρική οφείλεται στις απώλειες πυρήνα, στις μηχανικές απώλειες και στις κατανεμημένες απώλειες της γεννήτριας.

Η ενεργός ισχύς εξόδου της γεννήτριας  $P_{out}$ , δίνεται (σε πολικά μεγέθη) από την:

$$P_{out} = \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta \quad (4.20)$$

και σε φασικά μεγέθη από την:

$$P_{out} = 3V_\phi I_A \cos \theta \quad (4.21)$$



Σχήμα 4.27 Διάγραμμα ροής ισχύος μιας σύγχρονης γεννήτριας.

Η άεργος ισχύς στην έξοδο της μηχανής είναι (σε πολικά μεγέθη) ίση με:

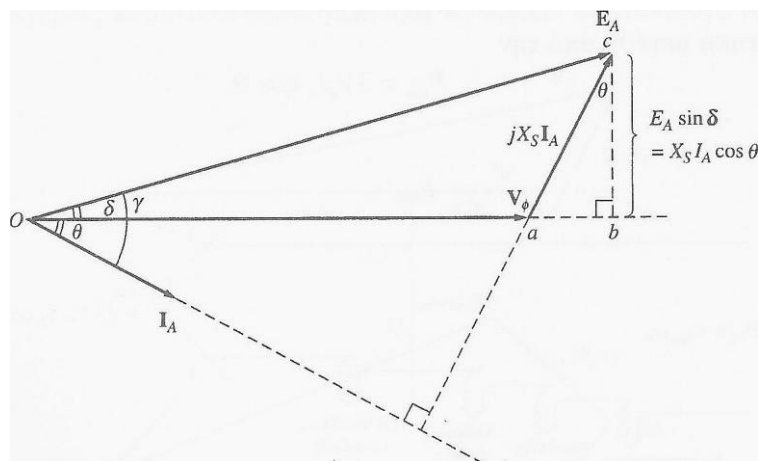
$$Q_{out} = \sqrt{3} V_T I_L \sin \theta \quad (4.22)$$

και σε φασικά μεγέθη:

$$Q_{out} = 3V_\phi I_A \sin \theta \quad (4.23)$$

Μια πολύ χρήσιμη προσεγγιστική σχέση για τον υπολογισμό της ισχύος εξόδου της γεννήτριας εξάγεται, αν αγνοηθεί η αντίσταση οπλισμού  $R_A$ . Αυτή η προσέγγιση γίνεται επειδή  $X_S \gg R_A$ . Τότε, το διανυσματικό διάγραμμα της γεννήτριας μετατρέπεται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.28. Σ' αυτό το σχήμα το τμήμα  $bc$  μπορεί να εκφραστεί ως  $E_A \sin \delta$  ή ως  $X_S I_A \cos \theta$ , οπότε:

$$I_A \cos \theta = \frac{E_A \sin \delta}{X_S}$$



Σχήμα 4.28 Απλοποιημένο διανυσματικό διάγραμμα στο οποίο αγνοείται η αντίσταση οπλισμού.

και με αντικατάσταση στην σχέση (4.21):

$$P = \frac{3V_{\phi}E_A \sin \delta}{X_s} \quad (4.24)$$

Επειδή οι ωμικές αντιστάσεις στην σχέση (4.24) αγνοούνται, αυτή εκφράζει τόσο την ισχύ που μετατρέπεται από μηχανική σε ηλεκτρική  $P_{conv}$  όσο και την ισχύ εξόδου  $P_{out}$ .

Όπως δείχνει η σχέση (4.24), η ισχύς εξόδου της μηχανής εξαρτάται από τη γωνία  $\delta$  μεταξύ των  $V_{\phi}$  και  $E_A$ . Αυτή η γωνία ονομάζεται γωνία ροπής (torque angle) της μηχανής και προσδιορίζει τη μέγιστη ισχύ που είναι ικανή να προσφέρει η γεννήτρια.

Όταν  $\delta = 90^\circ$  και  $\sin \delta = 1$ , είναι:

$$P_{max} = \frac{3V_{\phi}E_A}{X_s} \quad (4.25)$$

Αυτή η μέγιστη ισχύς ονομάζεται στατικό όριο ευστάθειας της γεννήτριας. Οι πραγματικές μηχανές δεν πλησιάζουν ποτέ αυτό το όριο. Συνήθως στην κανονική λειτουργία με πλήρες φορτίο η τιμή της  $\delta$  κυμαίνεται μεταξύ  $15^\circ$  και  $20^\circ$ .

Από τις σχέσεις (4.21), (4.23) και (4.24), εξάγεται ακόμη ένα σημαντικό συμπέρασμα που βοηθά στη σχεδίαση διανυσματικών διαγραμμάτων κατά τη μεταβολή του φορτίου μιας γεννήτριας. Όπως φαίνεται, αν η  $V_{\phi}$  θεωρηθεί σταθερή, η ενεργός ισχύς εξόδου της γεννήτριας είναι ανάλογη των ποσοτήτων  $E_A \sin \delta$  και  $I_A \sin \theta$ , ενώ η άεργος ισχύς εξόδου της είναι ανάλογη της  $I_A \sin \theta$ .

Η ροπή μιας μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{ind} = \kappa \mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_S \quad (4.26)$$

ή από τη σχέση:

$$\tau_{ind} = \kappa \mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_{net} \quad (4.27)$$

Η σχέση των μέτρων των διανυσμάτων της σχέσης (4.27) είναι:

$$\tau_{ind} = \kappa B_R B_{net} \sin \delta \quad (4.28)$$

όπου  $\delta$  είναι η γωνία μεταξύ του πεδίου του δρομέα και του συνολικού μαγνητικού πεδίου στο διάκενο (η αποκαλούμενη γωνία ροπής). Όμως, επειδή η  $\mathbf{B}_R$  παράγει την  $E_A$  και η  $\mathbf{B}_{net}$  την  $V_{\phi}$  η γωνία  $\delta$  μεταξύ των  $E_A$  και  $V_{\phi}$  είναι ίση με τη γωνία μεταξύ των  $\mathbf{B}_R$  και  $\mathbf{B}_{net}$ .

Άλλη μια σχέση για τη ροπή της σύγχρονης γεννήτριας εξάγεται από την σχέση (4.24). Επειδή ισχύει η  $P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m$ , η επαγόμενη ροπή δίνεται από την:

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{\phi}E_A \sin \delta}{\omega_m X_s} \quad (4.29)$$

Η σχέση (4.29) εκφράζει τη ροπή της γεννήτριας με ηλεκτρικά μεγέθη, ενώ η σχέση (4.27) με μαγνητικά μεγέθη.

#### 4.13 ΠΑΡΑΛΛΗΛΙΣΜΟΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Στις μέρες μας η αυτόνομη λειτουργία σύγχρονων γεννητριών είναι πολύ σπάνια. Μόνο σε εξαιρετικές ή έκτακτες περιπτώσεις είναι δυνατό να συναντηθεί φορτίο που να τροφοδοτείται από μια μόνο σύγχρονη γεννήτρια. Σχεδόν πάντα εμφανίζονται πάνω από μία γεννήτριες που συνδέονται παράλληλα για την ικανοποίηση των απαιτήσεων του φορτίου. Ακραίο παράδειγμα αυτής της κατάστασης αποτελεί το δίκτυο ισχύος των ΗΠΑ, όπου χωρίς υπερβολή χιλιάδες γεννήτριες μοιράζονται τις ανάγκες του συνολικού φορτίου της χώρας.

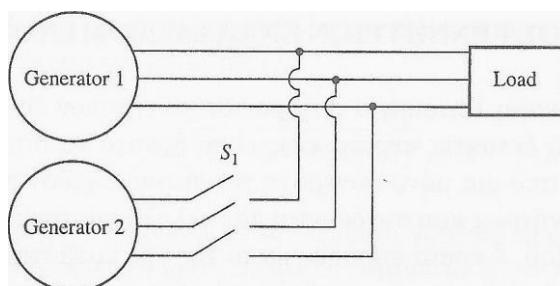
Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του παραλληλισμού σύγχρονων γεννητριών είναι τα παρακάτω:

1. Το μέγεθος του φορτίου που μπορούν να τροφοδοτήσουν περισσότερες από μια γεννήτριες είναι πολύ μεγαλύτερο απ' αυτό που είναι ικανή να τροφοδοτήσει μόνο μια γεννήτρια.
2. Η αξιοπιστία ενός τέτοιου συστήματος είναι πολύ μεγαλύτερη, καθώς τυχόν βλάβη σε μια από τις γεννήτριες δεν αφήνει το φορτίο χωρίς τροφοδοσία.
3. Όταν πολλές σύγχρονες γεννήτριες λειτουργούν παράλληλα, είναι δυνατή η απομάκρυνση και η διακοπή της λειτουργίας της μιας απ' αυτές χωρίς να υπάρχουν επιπτώσεις στο δίκτυο, ώστε σε τακτά χρονικά διαστήματα να υποβάλλεται σε προληπτική συντήρηση.
4. Μια γεννήτρια που λειτουργεί αυτόνομα θα πρέπει να εργάζεται σε συνθήκες πλήρους φόρτισης για να έχει ικανοποιητική απόδοση. Όμως, στην περίπτωση του παραλληλισμού περισσότερων γεννητριών είναι δυνατή η λειτουργία μερικών μόνο απ' αυτές. Έτσι, οι γεννήτριες που είναι ενεργοποιημένες κάθε φορά λειτουργούν σε πλήρη φόρτιση και με τη μέγιστη απόδοση.

Αυτή η ενότητα αναφέρεται στις προϋποθέσεις παραλληλισμού σύγχρονων γεννητριών και κατόπιν στην ανάλυση της λειτουργίας του συστήματος των παραλληλισμένων γεννητριών.

### Προϋποθέσεις για τον παραλληλισμό σύγχρονων γεννητριών

Στο Σχήμα 4.29, φαίνεται η γεννήτρια  $G_1$  που τροφοδοτεί το φορτίο και η γεννήτρια  $G_2$  που πρόκειται να παραλληλιστεί με την πρώτη κλείνοντας το διακόπτη  $S_1$ .



**Σχήμα 4.29** Παραλληλισμός μιας γεννήτριας σ' ένα σύστημα ισχύος.

Αν ο διακόπτης κλείσει κάποια αυθαίρετη χρονική στιγμή, το πιο σίγουρο είναι ότι οι γεννήτριες θα υποστούν σοβαρή βλάβη και το φορτίο θα πάψει να τροφοδοτείται με ισχύ. Αυτό θα συμβεί, επειδή οι τάσεις στους αγωγούς που πρόκειται να συνδεθούν μεταξύ τους δεν είναι γενικά ίσες μεταξύ τους κι έτσι τα ρεύματα που θα αναπτυχθούν με το κλείσιμο του διακόπτη θα είναι τεράστια. Για να μη συμβεί αυτό, πρέπει οι τάσεις και των τριών φάσεων της γεννήτριας  $G_2$  να είναι ακριβώς ίσες σε μέτρο και σε φάση μ' αυτές των αγωγών στους οποίους πρόκειται να συνδεθούν. Με άλλα λόγια, οι τάσεις μεταξύ των φάσεων  $a$  και  $a'$  θα πρέπει να είναι ακριβώς ίσες, όπως και οι τάσεις μεταξύ των  $b$  και  $b'$  και μεταξύ των  $c$  και  $c'$ . Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις παραλληλισμού σύγχρονων γεννητριών:

1. Οι ενεργές τιμές των πολικών τάσεων στα άκρα των δυο γεννητριών να είναι ίσες.
2. Η σειρά διαδοχής των φάσεων στις δυο γεννήτριες να είναι η ίδια.
3. Οι φάσεις των τάσεων στις φάσεις  $a$  και  $a'$  να είναι ίσες.

4. Η συχνότητα της γεννήτριας που πρόκειται να εισαχθεί στο σύστημα και που ονομάζεται γεννήτρια προς παραλληλισμό (oncoming generator), να είναι ελαφρά μεγαλύτερη από τη συχνότητα λειτουργίας του υπάρχοντος συστήματος.

Οι παραπάνω συνθήκες απαιτούν κάποια εξήγηση. Η πρώτη απ' αυτές είναι προφανής, αφού για να είναι όμοιες οι τάσεις των φάσεων που πρόκειται να συνδεθούν μεταξύ τους, θα πρέπει να έχουν ίσες ενεργές τιμές. Ακόμη, για να είναι οι τάσεις των φάσεων  $\alpha$  και  $\alpha'$  εντελώς όμοιες, θα πρέπει να έχουν την ίδια φάση, όπως απαιτεί η τρίτη προϋπόθεση.

Με τη δεύτερη προϋπόθεση εξασφαλίζεται ότι οι τάσεις των φάσεων που πρόκειται να συνδεθούν μεταξύ τους θα παρουσιάζουν μέγιστο την ίδια χρονική στιγμή. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.30α, αν δε συμβαίνει αυτό, οι τάσεις στο ένα ζεύγος των φάσεων (στο σχήμα των  $\alpha$  και  $\alpha'$ ) θα είναι σε φάση, ενώ οι τάσεις των δυο άλλων ζευγών θα διαφέρουν κατά  $120^\circ$ . Σ' αυτή την περίπτωση, αν και δε θα υπήρχε πρόβλημα με τη φάση  $\alpha$ , στις άλλες δυο φάσεις θα αναπτύσσονταν ρεύματα ικανά να καταστρέψουν τις δυο γεννήτριες. Φυσικά, η διόρθωση της σειράς διαδοχής των φάσεων μπορεί να γίνει με την αντιμετάθεση στις συνδέσεις των δυο φάσεων στη μια από τις δυο γεννήτριες.

Στην περίπτωση, τώρα, που οι συχνότητες των δυο γεννητριών δεν είναι σχεδόν ίσες, ο παραλληλισμός τους θα προκαλούσε ισχυρά μεταβατικά φαινόμενα, ώσπου το σύστημα να σταθεροποιηθεί σε μια κοινή συχνότητα. Οι συχνότητες των δυο γεννητριών δεν είναι δυνατό, ούτε πρέπει να είναι ακριβώς ίσες. Η διαφορά τους θα πρέπει να είναι πολύ μικρή, ώστε οι φάσεις των τάσεων της γεννήτριας προς παραλληλισμό να μεταβάλλονται πολύ αργά σε σχέση με τις φάσεις των τάσεων της υπάρχουσας γεννήτριας. Μ' αυτόν τον τρόπο είναι εύκολο να παρατηρηθούν οι φάσεις μεταξύ όλων των τάσεων και ο διακόπτης  $S_1$  να κλείσει ακριβώς τη στιγμή που οι αντίστοιχες τάσεις βρίσκονται σε φάση.

#### **Διαδικασία παραλληλισμού σύγχρονων γεννητριών**

Έστω ότι η γεννήτρια  $G_2$  πρόκειται να συνδεθεί στο σύστημα του Σχήματος 4.30. Τα βήματα που ακολουθούνται για την επίτευξη του παραλληλισμού είναι τα εξής:

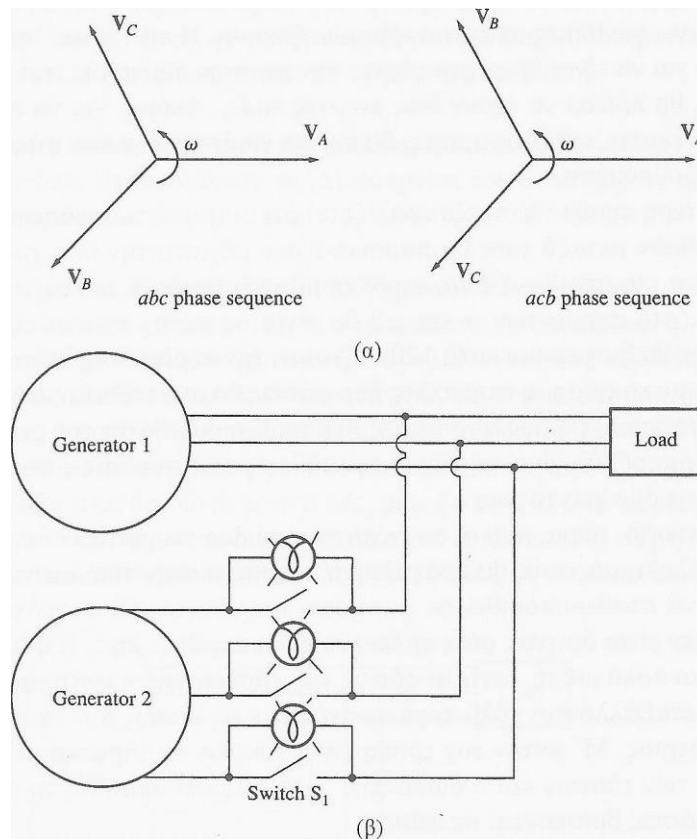
Πρώτο Βήμα: Ρυθμίζεται το ρεύμα διέγερσης της γεννήτριας προς παραλληλισμό  $G_2$ , ενώ ταυτόχρονα μετριοούνται οι πολικές τάσεις στην έξοδό της, ώστε να είναι ίσες με τις αντίστοιχες πολικές τάσεις της γεννήτριας  $G_1$ .

Δεύτερο Βήμα: Συγκρίνεται η σειρά διαδοχής των φάσεων των δυο γεννητριών χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους. Μια απ' αυτές είναι η σύνδεση ενός επαγωγικού κινητήρα διαδοχικά στα άκρα των δυο γεννητριών. Αν ο κινητήρας περιστρέφεται και στις δυο δοκιμές με την ίδια φορά, τότε η σειρά διαδοχής των φάσεων είναι η ίδια. Στην αντίθετη περίπτωση αντιστρέφεται η σύνδεση των δυο από τις τρεις φάσεις της γεννήτριας προς παραλληλισμό και επιτυγχάνεται η σωστή σειρά διαδοχής των φάσεων.

Ένας άλλος τρόπος για τον έλεγχο της σειράς διαδοχής των φάσεων είναι ο εξής: Στα άκρα του ανοιχτού διακόπτη συνδέονται τρεις λάμπες φωτισμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.30β. Καθώς η διαφορά φάσης μεταξύ των δυο άκρων της κάθε λάμπας μεταβάλλεται η αντίστοιχη λάμπα αποκτά μεγάλη φωτεινότητα (μεγάλη διαφορά φάσης) και κατόπιν παρουσιάζει μικρή φωτεινότητα (μικρή διαφορά φάσης). Αν όλες οι λάμπες αποκτούν ταυτόχρονα τη μέγιστη και την ελάχιστη φωτεινότητα, τότε οι δυο γεννήτριες παρουσιάζουν την ίδια σειρά διαδοχής των φάσεων. Στην περίπτωση που οι λάμπες



αποκτούν τη μέγιστη φωτεινότητά τους σε διαδοχικές χρονικές στιγμές, η σειρά διαδοχής των φάσεων στη γεννήτρια προς παραλληλισμό θα πρέπει να διορθωθεί.



**Σχήμα 4.30** (α) Οι δυο δυνατές σειρές διαδοχής των φάσεων ενός τριφασικού συστήματος. (β) Η τεχνική ελέγχου της σειράς διαδοχής των φάσεων με τη χρήση τριών λαμπτήρων φωτισμού.

Η διαδικασία παραλληλισμού συνεχίζεται με τη ρύθμιση της συχνότητας της νέας γεννήτριας σε τιμή λίγο μεγαλύτερη από τη συχνότητα της υπάρχουσας γεννήτριας. Αυτό γίνεται αρχικά με μέτρηση της συχνότητας με ένα συχνόμετρο και κατόπιν με τον έλεγχο της διαφοράς φάσης που παρουσιάζουν τα δυο συστήματα. Η γεννήτρια προς παραλληλισμό θα πρέπει να διαθέτει λίγο μεγαλύτερη συχνότητα, ώστε να εισαχθεί στο σύστημα σαν γεννήτρια προσφέροντας ενέργεια στο σύστημα κι όχι σαν κινητήρας (αυτό το σημείο αναλύεται στα επόμενα).

Επειδή οι δυο συχνότητες είναι περίπου ίσες, η διαφορά φάσης στα δυο συστήματα μεταβάλλεται πολύ αργά. Έτσι, αυτή η διαφορά φάσης μπορεί να παρατηρηθεί με ακρίβεια, ώστε τη στιγμή που μηδενίζεται να κλείσει ο διακόπτης και να πραγματοποιηθεί ο παραλληλισμός.

Ένας απλός τρόπος για την πραγματοποίηση του παραλληλισμού ακριβώς την κατάλληλη χρονική στιγμή είναι η παρατήρηση του συστήματος με τις τρεις λάμπες που παρουσιάστηκε παραπάνω. Όταν τα δυο συστήματα βρίσκονται σε φάση, οι λάμπες δεν εμφανίζουν στα άκρα τους διαφορά δυναμικού και είναι συνεχώς σβηστές. Εκείνη τη στιγμή μπορεί να γίνει ο παραλληλισμός. Αυτός ο τρόπος είναι αρκετά απλός, αλλά σχετικά ανακριβής. Μια άλλη μέθοδος προσδιορισμού της χρονικής στιγμής που τα δυο συστήματα δεν παρουσιάζουν διαφορά φάσης μεταξύ τους είναι η χρήση ενός οργάνου που ονομάζεται συγχρονοσκόπιο (synchronoscope). Αυτό το όργανο μπορεί να μετρήσει

τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο φάσεων που πρόκειται να συνδεθούν (π.χ. μεταξύ της  $\alpha$  και της  $\alpha'$ ) και η πρόσοψή του φαίνεται στο Σχήμα 4.31. Η ένδειξη ενός συγχρονοσκοπίου είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των σημείων στα οποία συνδέεται και οι ενδείξεις  $0^\circ$  και  $180^\circ$  βρίσκονται στο πάνω μέρος και στη βάση του αντίστοιχα. Στην περίπτωση που εξετάζεται εδώ, οι δυο συχνότητες έχουν μικρή διαφορά κι έτσι η βελόνα του οργάνου περιστρέφεται αργά. Ακόμη, επειδή η συχνότητα της γεννήτριας προς παραλληλισμό είναι μεγαλύτερη, η βελόνα περιστρέφεται ωρολογιακά. Στην αντίθετη περίπτωση θα περιστρεφόταν ανθρωρολογιακά. Μόνο όταν η βελόνα του συγχρονοσκοπίου δείχνει κατακόρυφα προς τα πάνω, είναι επιτρεπτή η σύνδεση των δυο γεννητριών.

Ας σημειωθεί το γεγονός πως, επειδή το συγχρονοσκόπιο συνδέεται μόνο σε μια από τις τρεις φάσεις, δεν εξασφαλίζει την προϋπόθεση για σωστή σειρά διαδοχής φάσεων που πρέπει να εξασφαλιστεί με μια από τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Τέλος, σε μεγάλα συστήματα ισχύος που διαθέτουν και μεγάλης ισχύος γεννήτριες η παραπάνω διαδικασία είναι πια αυτοματοποιημένη και γίνεται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Όμως, σε μικρά συστήματα η παραπάνω διαδικασία πρέπει να ακολουθείται ακριβώς.

### **Χαρακτηριστικές συχνότητας - ισχύος και τάσης - άεργης ισχύος στις σύγχρονες γεννήτριες**

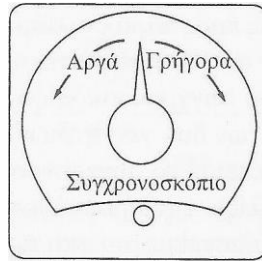
Όπως είναι γνωστό, η πηγή της μηχανικής ενέργειας μιας γεννήτριας είναι η κινητήρια μηχανή της που συνήθως είναι ένας ατμοστρόβιλος, χωρίς αυτό να αποκλείει άλλου είδους κινητήριες μηχανές, όπως οι κινητήριες εσωτερικής καύσεως, οι αεριοστρόβιλοι, οι υδροστρόβιλοι και οι ανεμοστρόβιλοι.

Ανεξάρτητα όμως από το είδος τους, αυτές οι μηχανές παρουσιάζουν παρόμοιο τρόπο συμπεριφοράς. Η αύξηση της ισχύος που προσφέρουν στη γεννήτρια προκαλεί μείωση της ταχύτητας περιστροφής τους. Αυτή η μείωση της ταχύτητάς τους δεν είναι γενικά γραμμική, αλλά συνήθως εισάγεται στο σύστημα ένα είδος μηχανισμού ελέγχου που κάνει τη μείωση της ταχύτητας της κινητήριας μηχανής γραμμική κατά την αύξηση της ισχύος που αυτή προσφέρει στη γεννήτρια.

Ο μηχανισμός ελέγχου έχει συνήθως τη δυνατότητα να δίνει στην ταχύτητα της κινητήριας μηχανής κάποια φθίνουσα χαρακτηριστική με μικρή κλίση, καθώς το φορτίο της γεννήτριας αυξάνεται. Αυτή η <<πτώση της ταχύτητας>> (speed droop - SD) της κινητήριας μηχανής περιγράφεται από την εξίσωση:

$$SD = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100\% \quad (4.30)$$

όπου  $n_{nl}$  και  $n_{fl}$  είναι οι ταχύτητες της κινητήριας μηχανής στις περιπτώσεις λειτουργίας χωρίς φορτίο και υπό πλήρες φορτίο, αντίστοιχα. Οι πιο συνηθισμένες τιμές της πτώσης της ταχύτητας των κινητήριων μηχανών, όπως αυτή ορίζεται στην παραπάνω εξίσωση, είναι 2 με 4%. Ακόμη, οι περισσότερες κινητήριες μηχανές που δίνουν μηχανική ισχύ στις γεννήτριες διαθέτουν κάποιο ρυθμιστή κλίμακας (set point adjustment) για τη μεταβολή της ταχύτητάς τους στη λειτουργία χωρίς φορτίο. Στο Σχήμα 4.32, φαίνεται μια τυπική γραφική παράσταση της ταχύτητας σε συνάρτηση με την ισχύ.



**Σχήμα 4.31** Το συγχρονοσκόπιο.

Επειδή η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας συνδέεται με την ηλεκτρική της συχνότητα μέσω της σχέσης:

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (4.31)$$

συνεπάγεται ότι και η ισχύς εξόδου της γεννήτριας θα συνδέεται με την ηλεκτρική συχνότητά της. Αυτή ακριβώς η σχέση φαίνεται στο Σχήμα 4.32β και είναι πολύ σημαντική κατά την παράλληλη λειτουργία σύγχρονων γεννητριών.

Η σχέση μεταξύ ισχύος και ηλεκτρικής συχνότητας εκφράζεται ποσοτικά με την εξίσωση:

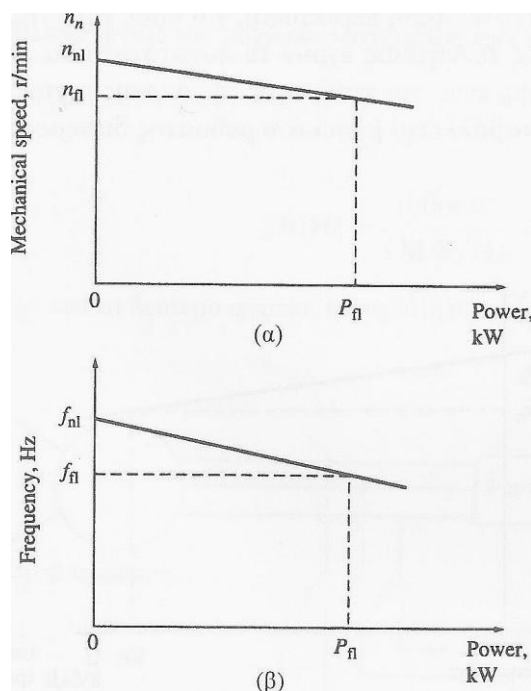
$$P = s_p(f_{nl} - f_{sys}) \quad (4.32)$$

όπου  $P$  = η ισχύς εξόδου της γεννήτριας

$f_{nl}$  = η συχνότητα της γεννήτριας που αντιστοιχεί στη λειτουργία χωρίς φορτίο

$f_{sys}$  = η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος

$s_p$  = η κλίση της παραπάνω καμπύλης σε kW/Hz ή MW/Hz



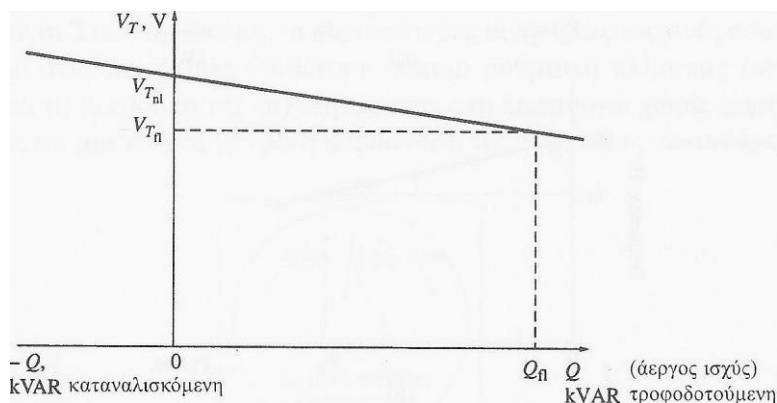
**Σχήμα 4.32** (α) Η χαρακτηριστική ταχύτητας-ισχύος μιας τυπικής κινητήριας μηχανής.  
(β) Η χαρακτηριστική συχνότητας-ισχύος μιας σύγχρονης γεννήτριας.

Μια παρόμοια εξίσωση είναι δυνατό να περιγράψει τη σχέση της άεργης ισχύος με την τάση  $V_T$  στα άκρα της γεννήτριας. Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, η εισαγωγή επαγωγικού φορτίου στα άκρα της γεννήτριας προκαλεί μείωση της τάσης  $V_T$  ενώ η

εισαγωγή χωρητικού φορτίου αυξάνει την τάση  $V_T$ . Είναι δυνατή, λοιπόν, η σχεδίαση της γραφικής παράστασης της άεργης ισχύος συναρτήσει της τάσης  $V_T$  η οποία θα είναι φθίνουσα, όπως ακριβώς αυτή μεταξύ της ισχύος και της συχνότητας. Κάτι τέτοιο φαίνεται και στο Σχήμα 4.33. Αυτή η χαρακτηριστική δεν είναι απαραίτητα γραμμική αλλά συνήθως οι σταθεροποιητές τάσης που συνεργάζονται με τις γεννήτριες μπορούν να προσφέρουν αυτή τη δυνατότητα. Η μετακίνηση της παραπάνω καμπύλης προς τα πάνω ή προς τα κάτω γίνεται με τη μεταβολή της τάσης της γεννήτριας στην αφόρτιστη λειτουργία που πραγματοποιείται με τη μετακίνηση του ρυθμιστή κλίμακας ενός σταθεροποιητή τάσης. Όπως η χαρακτηριστική πραγματικής ισχύος-συχνότητας, έτσι και η χαρακτηριστική άεργης ισχύος-πολικής τάσης είναι πολύ σημαντική κατά την παράλληλη λειτουργία σύγχρονων γεννητριών.

Η σχέση μεταξύ της τάσης εξόδου και της άεργης ισχύος είναι παρόμοια με την σχέση (4.32) μεταξύ της συχνότητας και της πραγματικής ισχύος της γεννήτριας. Αυτό φυσικά συμβαίνει μόνο όταν το σύστημα διαθέτει τον απαραίτητο σταθεροποιητή τάσης που κάνει γραμμική τη σχέση μεταξύ της τάσης εξόδου και της άεργης ισχύος.

Εδώ, πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι στην περίπτωση που μια γεννήτρια τροφοδοτεί αυτόνομα το φορτίο της, τόσο η ενεργός όσο και η άεργος ισχύς εξόδου της προσδιορίζονται αποκλειστικά από το ίδιο το φορτίο. Όταν, όμως, περισσότερες από μια γεννήτριες τροφοδοτούν κάποιο φορτίο, είναι δυνατή η μεταβολή της συνολικής ισχύος που παρέχει η κάθε γεννήτρια, μέσω κυκλωμάτων που ελέγχουν τη λειτουργία της. Έτσι, στη δεύτερη περίπτωση, για κάθε τιμή της ενεργού ισχύος τα κυκλώματα ελέγχου της γεννήτριας έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν τη συχνότητα λειτουργίας της, ενώ, για κάθε τιμή της άεργης ισχύος, η τάση στα άκρα της είναι δυνατό να μεταβάλλεται μέσω του ρεύματος διέγερσης.



**Σχήμα 4.33** Η χαρακτηριστική πολικής τάσης-άεργης ισχύος μιας σύγχρονης γεννήτριας.

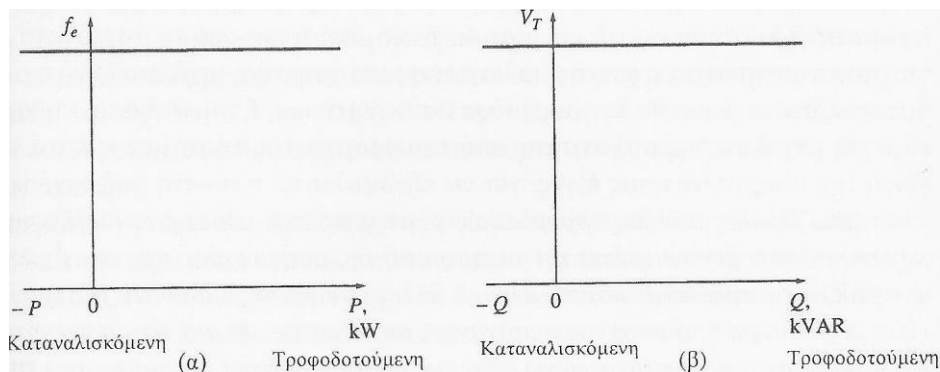
### **Ανάλυση των γεννητριών που λειτουργούν παράλληλα με μεγάλα συστήματα ισχύος**

Πολύ συχνά, όταν μια σύγχρονη γεννήτρια συνδέεται σε κάποιο σύστημα ισχύος, το σύστημα αυτό είναι τόσο μεγάλο που δεν επηρεάζεται καθόλου από την εισαγωγή της γεννήτριας. Κάτι τέτοιο συμβαίνει αν μια γεννήτρια συνδεθεί στο δίκτυο διανομής ισχύος των ΗΠΑ. Επειδή αυτό το δίκτυο είναι πάρα πολύ μεγάλο, καμιά μεταβολή στα χαρακτηριστικά της γεννήτριας δεν μπορεί να προκαλέσει εμφανή αλλαγή στη συχνότητα λειτουργίας του δικτύου.

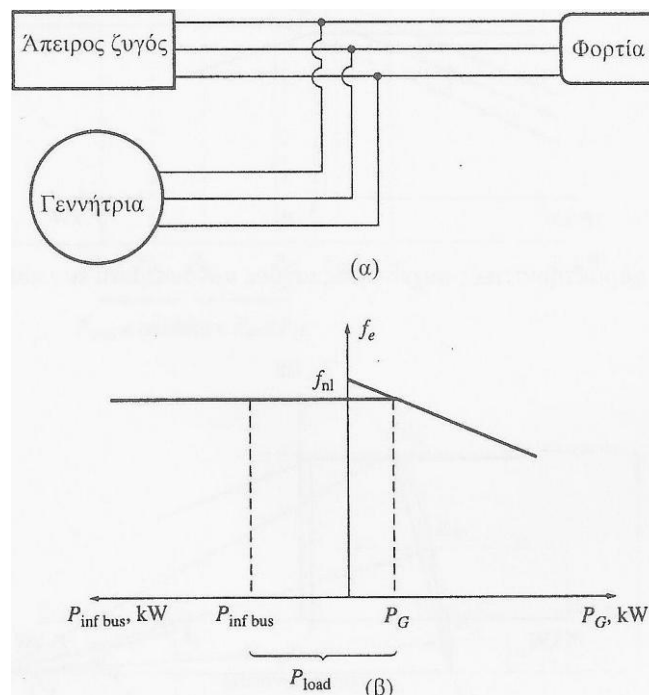
Η παραπάνω παρατήρηση εκφράζει την έννοια του άπειρου ζυγού (infinite bus). Ο άπειρος ζυγός είναι ένα πολύ μεγάλο σύστημα ισχύος, του οποίου η τάση και η

συχνότητα παραμένουν αμετάβλητες, ανεξάρτητα από το ποσό της ενεργού ή άεργης ισχύος με την οποία τροφοδοτείται ή την οποία παράγει. Η χαρακτηριστική ενεργού ισχύος-συχνότητας του άπειρου ζυγού φαίνεται στο Σχήμα 4.34α, ενώ η χαρακτηριστική άεργης ισχύος-πολικής τάσης του, φαίνεται στο Σχήμα 4.34β.

Πιο κάτω εξετάζεται ένα σύστημα όπου μια σύγχρονη γεννήτρια συνδέεται παράλληλα μ' έναν άπειρο ζυγό και τροφοδοτούν μαζί κάποιο φορτίο. Ακόμη, υποτίθεται ότι η κινητήρια μηχανή της γεννήτριας διαθέτει κάποιο μηχανισμό ελέγχου που μπορεί να μεταβάλλει την ταχύτητά της, ενώ το ρεύμα διέγερσης της γεννήτριας μεταβάλλεται απλά με τη ρύθμιση της αντίστασης διέγερσης. Γενικά, η περιγραφή ενός συστήματος που δε διαθέτει κύκλωμα ελέγχου του ρεύματος διέγερσης είναι πιο εύκολη, ενώ οι διαφορές του με το σύστημα που περιγράφηκε παραπάνω είναι πολύ μικρές. Το σύστημα, που αναλύεται εδώ, φαίνεται στο Σχήμα 4.35α.



**Σχήμα 4.34** Οι χαρακτηριστικές (α) συχνότητας-ισχύος και (β) πολικής τάσης-άεργης ισχύος του άπειρου ζυγού.

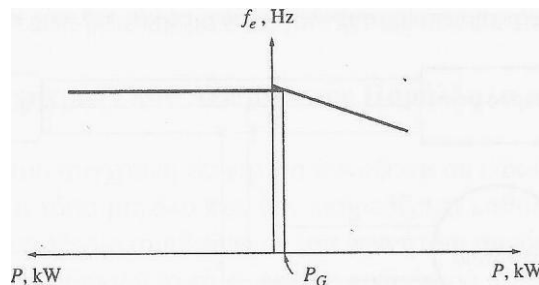


**Σχήμα 4.35** (α) Μια σύγχρονη γεννήτρια παραλληλισμένη με άπειρο ζυγό. (β) Τα διαγράμματα συχνότητας ισχύος της γεννήτριας και του άπειρου ζυγού σχεδιασμένα στον ίδιο κατακόρυφο άξονα.

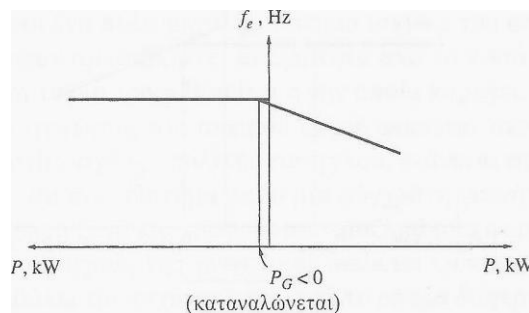
Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, η παράλληλη σύνδεση μιας γεννήτριας με κάποια άλλη γεννήτρια ή με ένα μεγάλο σύστημα ισχύος προϋποθέτει ισότητα συχνοτήτων των δυο συστημάτων. Έτσι, οι χαρακτηριστικές ενεργού ισχύος-συχνότητας και οι χαρακτηριστικές άεργης ισχύος-πολικής τάσης των δυο συστημάτων είναι δυνατό να περιλαμβάνονται στο ίδιο διάγραμμα με κοινό τον κατακόρυφο άξονα (Σχήμα 4.35β).

Ας υποθεθεί τώρα ότι η γεννήτρια του Σχήματος 4.35α έχει συνδεθεί στον άπειρο ζυγό με τη διαδικασία που περιγράφηκε στα προηγούμενα. Σ' αυτή την περίπτωση η γεννήτρια <<στηρίζεται>> πάνω στον άπειρο ζυγό προσφέροντας στο φορτίο κάποιο πολύ μικρό ποσοστό της ενεργού ισχύος που αυτό καταναλώνει και ελάχιστη ή μηδενική άεργο ισχύ (Σχήμα 4.36).

Αν η συχνότητα της γεννήτριας, αντί να είναι ελαφρά μεγαλύτερη από αυτή του άπειρου ζυγού, ήταν ελαφρά χαμηλότερη, τότε οι χαρακτηριστικές ενεργού ισχύος - συχνότητας του συστήματος θα ήταν όπως στο Σχήμα 4.37. Δηλαδή, αν η συχνότητα αφόρτιστης λειτουργίας της γεννήτριας ήταν μικρότερη από τη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος, η γεννήτρια θα πρόσφερε αρνητική ισχύ στο ζυγό ή αλλιώς θα κατανάλωνε ισχύ και θα λειτουργούσε σαν κινητήρας. Έτσι, φαίνεται καθαρά πως η επιλογή μεγαλύτερης συχνότητας από του υπάρχοντος συστήματος κατά την εισαγωγή της νέας γεννήτριας έγινε, για να εξασφαλιστεί η σωστή ροή ισχύος στο νέο σύστημα. Πολλές από τις πραγματικές γεννήτριες στις μέρες μας διαθέτουν κάποιο μηχανισμό που δεν επιτρέπει την αντιστροφή της ροής ισχύος στη γεννήτρια και την αναγκάζει να συνδέεται παράλληλα με άλλες γεννήτριες, μόνο αν η συχνότητά της είναι μεγαλύτερη από αυτή του υπάρχοντος συστήματος. Αν μια τέτοια γεννήτρια αρχίσει κάποια στιγμή να καταναλώνει ενέργεια, θα αποσυνδεθεί αυτόματα από τη γραμμή.



**Σχήμα 4.36** Οι χαρακτηριστικές συχνότητας ισχύος αμέσως μετά τον παραλληλισμό.



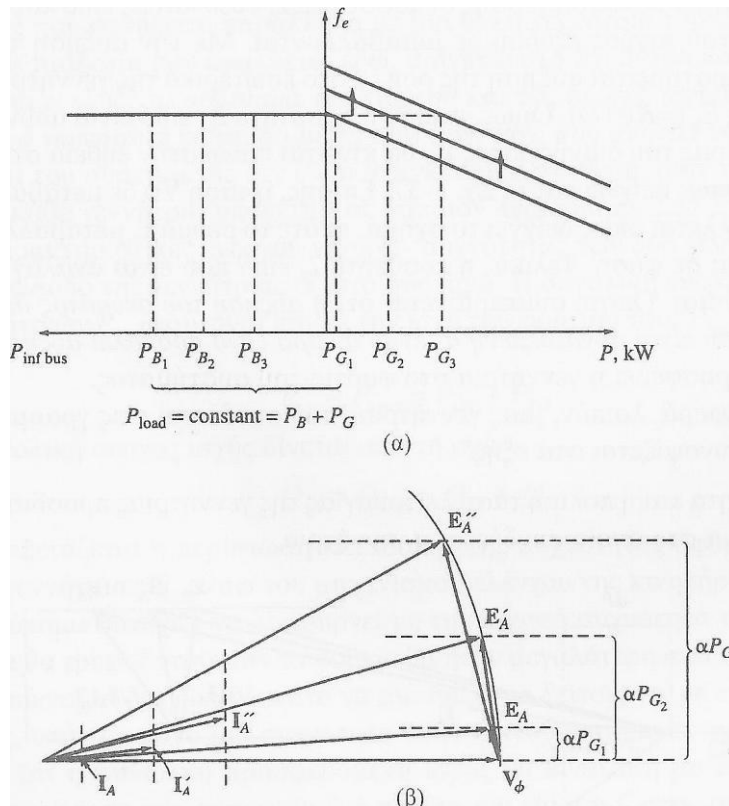
**Σχήμα 4.37** Οι χαρακτηριστικές συχνότητας ισχύος στην περίπτωση που η συχνότητα της γεννήτριας στην αφόρτιστη λειτουργία είναι ελαφρά μικρότερη απ' αυτή του συστήματος πριν από τον παραλληλισμό.

Ας υποθεθεί, τώρα, ότι μετά τη σύνδεση της γεννήτριας και μέσω του μηχανισμού ελέγχου της κινητήριας μηχανής αυξάνεται η συχνότητα αφόρτιστης λειτουργίας της

γεννήτριας. Όμως, αφού είναι αδύνατη η μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας του άπειρου ζυγού, αυτό που μεταβάλλεται είναι η ενεργός ισχύς που προσφέρει η γεννήτρια στο κοινό φορτίο. Αυτό φαίνεται πιο παραστατικά στις καμπύλες του Σχήματος 4.38α αλλά και στο διανυσματικό διάγραμμα του Σχήματος 4.38β. Στο τελευταίο σχήμα μάλιστα, φαίνεται η αύξηση της ποσότητας  $E_A \sin \delta$  που είναι ανάλογη της πραγματικής ισχύος της γεννήτριας, καθώς η  $V_T$  παραμένει σταθερή. Ακόμη, παρατηρείται ότι η  $E_A$  ( $=K_\phi \omega$ ) παραμένει σταθερή, αφού τόσο το  $I_F$  όσο και η ταχύτητα περιστροφής παραμένουν αμετάβλητα. Η παραπέρα αύξηση της συχνότητας περιστροφής αυξάνει τη συχνότητα αφόρτιστης λειτουργίας της γεννήτριας, και την ενεργό ισχύ εξόδου. Αυτή με τη σειρά της αυξάνει την ποσότητα  $E_A \sin \delta$ , ενώ η  $E_A$  παραμένει πάντα σταθερή.

Στην περίπτωση τώρα που η αύξηση της ενεργού ισχύος εξόδου συνεχίζεται, ώστε να ξεπεράσει την ισχύ που καταναλώνει το φορτίο, η επιπλέον ισχύς καταναλώνεται από τον άπειρο ζυγό που εξ ορισμού έχει τη δυνατότητα να προσφέρει ή να καταναλώνει ισχύ, χωρίς να μεταβάλει τη συχνότητα του συστήματος.

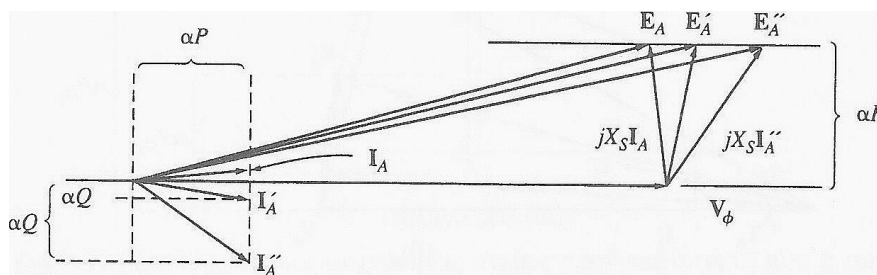
Στο διανυσματικό διάγραμμα του Σχήματος 4.38β, η ενεργός ισχύς που προσφέρεται στο φορτίο έχει ρυθμιστεί στην απαιτούμενη τιμή και παρατηρείται ότι η γεννήτρια λειτουργεί με συντελεστή ισχύος ελαφρά χωρητικό. Η συμπεριφορά της δηλαδή, είναι όμοια μ' αυτή ενός πυκνωτή που παράγει αρνητική άεργο ισχύ ή αλλιώς που καταναλώνει άεργο ισχύ. Με ποιον τρόπο η γεννήτρια μπορεί να τροφοδοτήσει το σύστημα με άεργο ισχύ; Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη ρύθμιση του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας και με την τήρηση κάποιων κανόνων που παρουσιάζονται παρακάτω.



**Σχήμα 4.38** Η μεταβολή της συχνότητας αφόρτιστης λειτουργίας σε (α) διάγραμμα με τον ίδιο κατακόρυφο άξονα, (β) διανυσματικά διαγράμματα.

Ο πρώτος κανόνας είναι πως το ρεύμα διέγερσης θα πρέπει να μεταβάλλεται διατηρώντας σταθερή την ενεργό ισχύ εξόδου της γεννήτριας. Η ισχύς εισόδου στη γεννήτρια δίνεται από τη σχέση  $P_{in} = \tau_{ind}\omega_m$ . Η χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας της κινητήριας μηχανής μεταβάλλεται μόνο μέσω του μηχανισμού ελέγχου που αυτή διαθέτει, ενώ το ότι η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό σημαίνει πως η ταχύτητά της είναι αδύνατο να μεταβληθεί. Έτσι, αφού η ταχύτητα της μηχανής δεν αλλάζει και δε χρησιμοποιείται ο μηχανισμός ελέγχου της κινητήριας μηχανής, η ενεργός ισχύς εξόδου θα πρέπει να παραμένει σταθερή.

Στο διανυσματικό διάγραμμα το παραπάνω συμπέρασμα σημαίνει ότι κατά τη μεταβολή του ρεύματος διέγερσης οι ποσότητες  $I_A \cos \theta$  και  $E_A \sin \delta$  που είναι ανάλογες της ενεργού ισχύος εξόδου δε μεταβάλλονται. Με την αύξηση του ρεύματος διέγερσης παρατηρείται αύξηση της ροής  $\Phi$  στο εσωτερικό της γεννήτριας και αύξηση της τάσης  $E_A (=K\Phi\uparrow\omega)$ . Όμως, επειδή η ποσότητα  $E_A \sin \delta$  είναι αδύνατο να μεταβληθεί, το πέρασ του διανύσματος  $E_A$  θα κινείται πάνω στην ευθεία σταθερής ενεργού ισχύος, όπως δείχνει και το Σχήμα 4.39. Επίσης, η τάση  $V_\phi$  δε μεταβάλλεται και το  $jX_S I_A$  μεταβάλλεται όπως δείχνει το σχήμα, οπότε το ρεύμα  $I_A$  μεταβάλλεται τόσο σε μέτρο όσο και σε φάση. Τελικά, η ποσότητα  $I_A \sin \theta$  που είναι ανάλογη της άεργης ισχύος αυξάνεται. Οπότε συμπεραίνεται ότι η αύξηση του ρεύματος διέγερσης μιας γεννήτριας που είναι συνδεδεμένη σ' έναν άπειρο ζυγό προκαλεί αύξηση της άεργης ισχύος που προσφέρει η γεννήτρια στο φορτίο του συστήματος.



**Σχήμα 4.39** Η επίδραση της μεταβολής του ρεύματος διέγερσης μιας σύγχρονης γεννήτριας στο διανυσματικό διάγραμμά της.

### Παραλληλισμός μιας γεννήτριας με άλλες γεννήτριες του ίδιου μεγέθους

Όταν μια γεννήτρια λειτουργεί αυτόνομα, είναι αδύνατη η μεταβολή της ενεργού και της άεργης ισχύος εξόδου της, αφού αυτές προσδιορίζονται από τις ανάγκες του φορτίου. Τόσο, όμως, η συχνότητά της, όσο και η πολική τάση στην έξοδό της είναι δυνατό να μεταβάλλονται μέσω του μηχανισμού ελέγχου της κινητήριας μηχανής και του ρεύματος διέγερσης αντίστοιχα. Αντίθετα, όταν η γεννήτρια συνδέεται σε άπειρο ζυγό, τόσο η πολική τάση όσο και η συχνότητά της δεν είναι δυνατό να μεταβάλλονται. Όμως, η ενεργός και η άεργος ισχύς που αυτή προσφέρει στο φορτίο μπορούν να μεταβάλλονται μέσω του μηχανισμού ελέγχου της κινητήριας μηχανής και του ρεύματος διέγερσης αντίστοιχα. Εδώ θα αναλυθεί η συμπεριφορά μιας γεννήτριας που συνδέεται παράλληλα με μια άλλη γεννήτρια του ίδιου μεγέθους.

Η συνδεσμολογία που αναλύεται εδώ, φαίνεται στο Σχήμα 4.40α και ο κανόνας που ισχύει είναι ο εξής: το άθροισμα της ενεργού και της άεργης ισχύος που παράγεται από τις δυο γεννήτριες είναι ίσο με τη συνολική ισχύ που απαιτεί το φορτίο τους. Η συχνότητα του συστήματος δεν είναι αναγκαστικά σταθερή, ούτε η ισχύς που προσφέρει

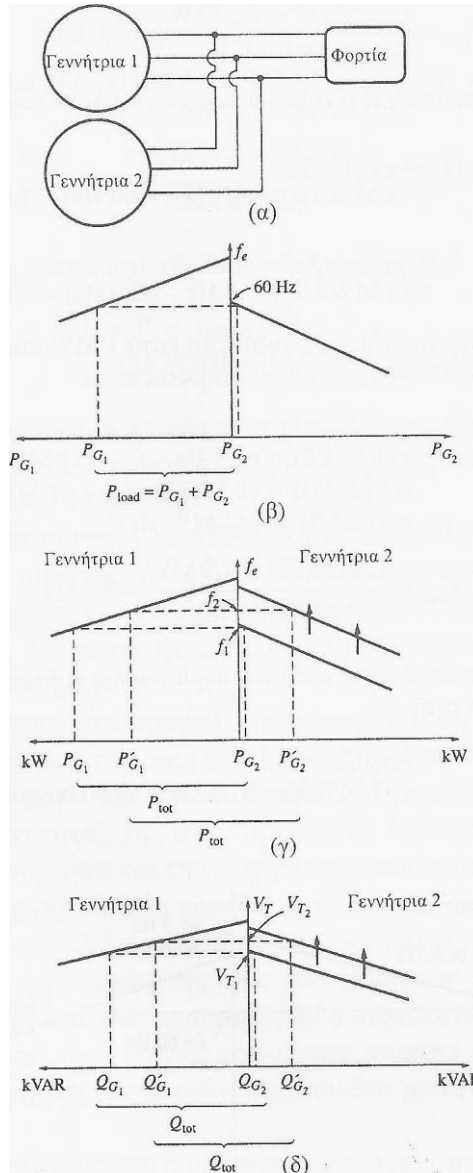


η κάθε γεννήτρια υπόκειται σε κάποιον περιορισμό. Στο Σχήμα 4.40β, φαίνονται οι χαρακτηριστικές ενεργός ισχύος - συχνότητας των δυο γεννητριών αμέσως μετά την είσοδο της γεννήτριας  $G_2$  στο σύστημα. Η συνολική ενεργός ισχύς εξόδου των γεννητριών  $P_{tot}$  (που είναι ίση με την ισχύ του φορτίου τους  $P_{load}$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$P_{tot} = P_{load} = P_{G1} + P_{G2} \quad (4.33)$$

και η συνολική άεργος ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{tot} = Q_{load} = Q_{G1} + Q_{G2} \quad (4.34)$$



**Σχήμα 4.40** (α) Παράλληλη λειτουργία δυο σύγχρονων γεννητριών του ίδιου μεγέθους. (β) Το αντίστοιχο διάγραμμα συχνότητας ισχύος κατά τη σύνδεση της γεννήτριας 2 στο σύστημα. (γ) Αύξηση της συχνότητας αφόρτιστης λειτουργίας της γεννήτριας 2. (δ) Αύξηση του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας 2.

Τώρα εξετάζεται η περίπτωση μεταβολής της συχνότητας αφόρτιστης λειτουργίας της γεννήτριας  $G_2$  μέσω του μηχανισμού ελέγχου της κινητήριας μηχανής της. Αν το σύστημα συνέχιζε να λειτουργεί με την αρχική συχνότητα του  $f_1$ , η ισχύς με την οποία θα τροφοδοτούνταν το φορτίο θα ήταν μεγαλύτερη από την απαιτούμενη. Έτσι, το σύστημα δεν είναι δυνατό να συνεχίζει να λειτουργεί με την ίδια συχνότητα. Όμως, υπάρχει μόνο

μια συχνότητα στην καινούργια χαρακτηριστική που εξασφαλίζει ότι η συνολική προσφερόμενη ισχύς θα είναι ίση με την απαιτούμενη. Αυτή η συχνότητα στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η  $f_2$  στην οποία η γεννήτρια  $G_1$  προσφέρει λιγότερη ισχύ από αυτή που πρόσφερε αρχικά, ενώ η γεννήτρια  $G_2$  προσφέρει περισσότερη ισχύ από πριν.

Όταν, λοιπόν, σ' ένα σύστημα δύο γεννητριών που λειτουργούν παράλληλα αυξηθεί η συχνότητα αφόρτιστης λειτουργίας της μιας από τις δυο, μέσω του μηχανισμού ελέγχου της κινητήριας μηχανής, συμβαίνουν τα εξής:

1. Η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος αυξάνεται.
2. Η γεννήτρια στην οποία γίνεται η μεταβολή αρχίζει να προσφέρει περισσότερο ενεργό ισχύ στο κοινό φορτίο, ενώ η ενεργός ισχύς που προσφέρει η δεύτερη γεννήτρια μειώνεται.

Αν τώρα αυξηθεί το ρεύμα διέγερσης της μιας από τις δυο γεννήτριες (π.χ. της γεννήτριας  $G_2$ ) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.40δ, το αποτέλεσμα θα είναι παρόμοιο με της προηγούμενης περίπτωσης. Πιο συγκεκριμένα θα συμβούν τα εξής:

1. Η τάση εξόδου του συστήματος αυξάνεται.
2. Η γεννήτρια της οποίας αυξάνεται το ρεύμα διέγερσης, αρχίζει να προσφέρει περισσότερη άεργο ισχύ στο κοινό φορτίο, ενώ η άεργος ισχύς που προσφέρει η δεύτερη γεννήτρια μειώνεται.

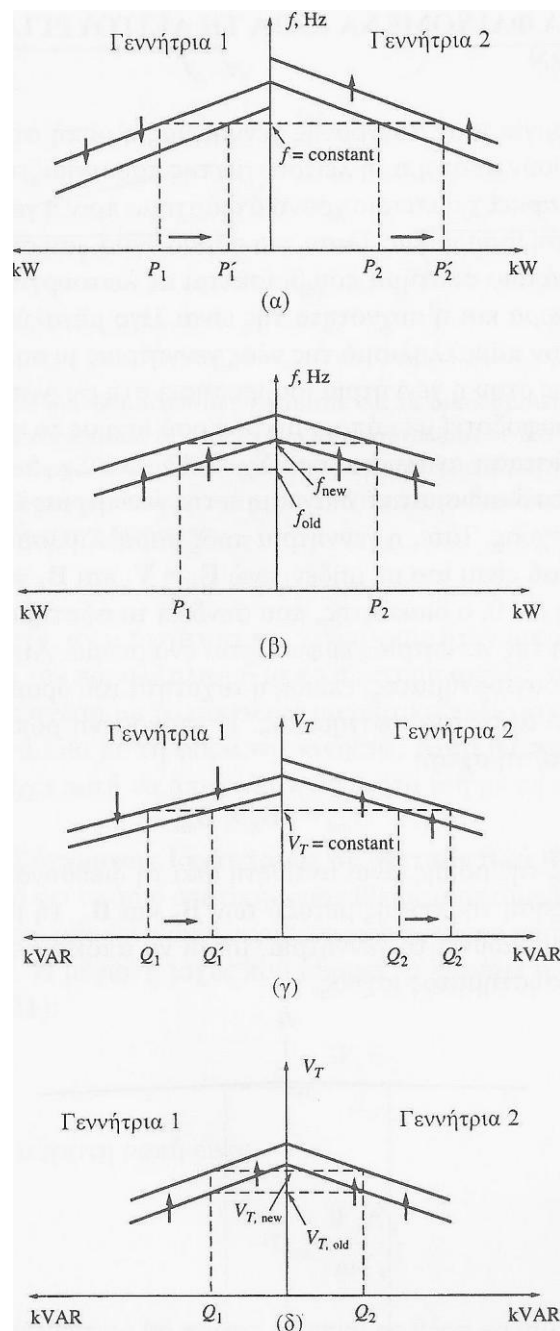
Αν είναι γνωστές οι κλίσεις και οι συχνότητες αφόρτιστης λειτουργίας των χαρακτηριστικών ενεργού ισχύος - συχνότητας δυο γεννητριών, τότε είναι δυνατός ο υπολογισμός της ενεργού ισχύος που προσφέρει η καθεμιά γεννήτρια στο κοινό φορτίο.

Όταν δυο γεννήτριες λειτουργούν παράλληλα, μια μεταβολή στο μηχανισμό ελέγχου της μιας κινητήριας μηχανής μεταβάλλει τόσο τη συχνότητα του συστήματος, όσο και την κατανομή της ισχύος μεταξύ των γεννητριών. Όμως, θα ήταν πιο βολικό, αν μόνο μια από τις δυο ποσότητες άλλαζε με την παραπάνω μεταβολή των χαρακτηριστικών του συστήματος.

Αυτό είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της συχνότητας αφόρτιστης λειτουργίας της μιας γεννήτριας, αυξάνει τη συχνότητα του συστήματος, αλλά και την ενεργό ισχύ που προσφέρει η συγκεκριμένη γεννήτρια. Αντίθετα, η μείωση της συχνότητάς της στην αφόρτιστη λειτουργία μειώνει τόσο τη συχνότητα του συστήματος, όσο και την ενεργό ισχύ που προσφέρει η συγκεκριμένη γεννήτρια. Έτσι, για να ρυθμιστεί η ενεργός ισχύς που προσφέρει η κάθε γεννήτρια στο φορτίο, χωρίς να μεταβληθεί η συχνότητα του συστήματος, θα πρέπει να αυξηθεί η συχνότητα αφόρτιστης λειτουργίας της μιας γεννήτριας και να μειωθεί της άλλης (Σχήμα 4.41α). Εντελώς ανάλογα, για να μεταβληθεί η συχνότητα του συστήματος, χωρίς να αλλάξει το ποσοστό της ενεργού ισχύος που παράγει η κάθε γεννήτρια, θα πρέπει η συχνότητα αφόρτιστης λειτουργίας και των δυο γεννητριών να αυξηθεί ή να μειωθεί (Σχήμα 4.41β).

Η ρύθμιση της άεργης ισχύος που παράγουν οι δυο γεννήτριες, όπως και η ρύθμιση της πολικής τάσης στην έξοδό τους γίνονται με παρόμοιο τρόπο: Η μεταβολή της άεργης ισχύος που προσφέρει στο κοινό φορτίο η κάθε γεννήτρια μπορεί να πραγματοποιηθεί, χωρίς να μεταβληθεί η πολική τάση  $V_T$  του συστήματος, με την αύξηση του ρεύματος διέγερσης της μιας γεννήτριας και την ταυτόχρονη μείωση του ρεύματος διέγερσης της άλλης γεννήτριας (Σχήμα 4.41γ). Αντίστοιχα, η πολική τάση του συστήματος ρυθμίζεται, χωρίς να μεταβάλλεται ταυτόχρονα και η άεργος ισχύς που προσφέρει η κάθε γεννήτρια,

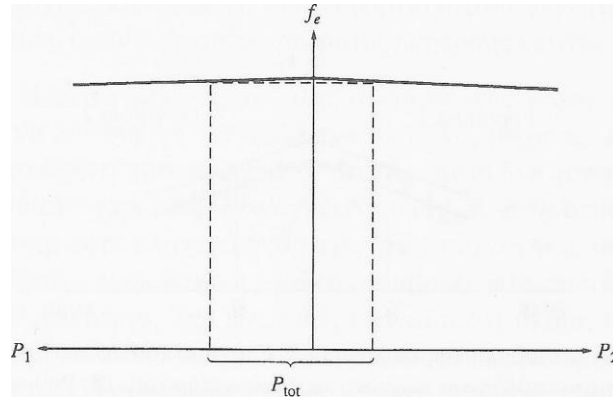
με την ταυτόχρονη μείωση ή με την ταυτόχρονη αύξηση των δυο ρευμάτων διέγερσης (Σχήμα 4.41δ).



**Σχήμα 4.41** (α) Μεταβολή της κατανομής της ισχύος που προσφέρει η κάθε γεννήτρια στο κοινό φορτίο χωρίς μεταβολή της συχνότητας του συστήματος. (β) Ρύθμιση της συχνότητας του συστήματος χωρίς μεταβολή της ισχύος που προσφέρει η κάθε γεννήτρια στο κοινό φορτίο. (γ) Ρύθμιση της άεργης ισχύος που προσφέρει η κάθε γεννήτρια στο κοινό φορτίο χωρίς μεταβολή της πολικής τάσης του συστήματος. (δ) Μεταβολή της πολικής τάσης του συστήματος χωρίς αλλαγή στην άεργο ισχύ που παράγει η καθεμιά γεννήτρια.

Πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι όλες οι σύγχρονες γεννήτριες που κατασκευάζονται, ώστε να λειτουργούν παράλληλα με άλλες μηχανές, διαθέτουν φθίνουσες χαρακτηριστικές ενεργού ισχύος - συχνότητας. Αν οι δυο γεννήτριες, που

παραλληλίζονται, διαθέτουν χαρακτηριστικές ενεργού ισχύος - συχνότητας με πολύ μικρή ή μηδενική κλίση, τότε ελάχιστες αλλαγές στις συχνότητες αφόρτιστης λειτουργίας των γεννητριών προκαλούν μεγάλες μεταβολές στο ποσοστό της ισχύος που παράγει η κάθε γεννήτρια. Στο Σχήμα 4.42, φαίνεται ότι ακόμη και η ελάχιστη μεταβολή της  $f_{n1}$  θα προκαλούσε τεράστια μεταβολή στην κατανομή της ισχύος μεταξύ των δυο γεννητριών. Γενικά, για να είναι δυνατή η σωστή ρύθμιση της ισχύος που προσφέρει η κάθε γεννήτρια, θα πρέπει η κλίση της χαρακτηριστικής της είναι 2 έως 5%.



**Σχήμα 4.42** Οι γεννήτριες που πρόκειται να παραλληλισθούν διαθέτουν χαρακτηριστικές συχνότητας ισχύος με σχεδόν μηδενική κλίση. Κάποιες πολύ μικρές αλλαγές στις συχνότητες αφόρτιστης λειτουργίας θα προκαλούσαν τεράστιες μεταβολές στην κατανομή της ενεργού ισχύος μεταξύ των γεννητριών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΙΣΧΥΟΣ

#### 5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι πυρηνικοί σταθμοί ισχύος είναι τα συγκροτήματα στα οποία η εκλυόμενη κατά τις σχάσεις πυρηνική ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μικρότερης κλίμακας συγκροτήματα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατμού ή θερμού ύδατος για τη θέρμανση κτιρίων, ή τέλος για την πρόωση υποβρυχίων, πλοίων επιφανείας και διαστημικών οχημάτων.

Στη συνέχεια θα αναφερθούν στοιχεία που αφορούν κυρίως στους επίγειους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνική ενέργεια.

#### 5.2 ΣΥΓΚΡΟΤΗΣΗ ΠΥΡΗΝΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΙΣΧΥΟΣ (ΠΗΣ)

Ένας ΠΗΣ περιλαμβάνει βασικά τις ακόλουθες εγκαταστάσεις και συστήματα:

**(α) Το κτίριο του αντιδραστήρα**, με τον αντιδραστήρα, τα πρωτογενή κυκλώματα ψύξεως, τις αντλίες κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου, τους εναλλάκτες θερμότητας, τις μηχανές φορτίσεως-εκφορτίσεως των στοιχείων πυρηνικού καυσίμου, το σύστημα δημιουργίας υποπίεσεως στον υπό το περίβλημα χώρο, το σύστημα ψύξεως του αντιδραστήρα σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης (ECCS: Emergency Core Cooling System), κ.ά.

**(β) Το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής**, με το οποίο μετατρέπεται η θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική. Περιλαμβάνει το δευτερογενές κύκλωμα της γεννήτριας ατμού με τις βαλβίδες ανακουφίσεως και ασφάλειας, τον ατμοστρόβιλο, την ηλεκτρογεννήτρια, τον συμπυκνωτή, τις αντλίες επιστροφής του συμπυκνώματος, και τον μετασχηματιστή ανυψώσεως της τάσεως από την τάση της γεννήτριας στην ονομαστική τάση του συστήματος μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

**(γ) Τα βοηθητικά κτίρια**, τα οποία στεγάζουν το σύστημα για τη διαχείριση των ραδιενεργών υλικών, τους χώρους αποθηκείσεως των στοιχείων πυρηνικού καυσίμου, το σύστημα μεταφοράς τους, κ.ά.

**(δ) Το κτίριο ελέγχου**, το οποίο περιλαμβάνει την αίθουσα ελέγχου του συγκροτήματος αντιδραστήρα-συστήματος ηλεκτροπαραγωγής (γνωστό ως Control Room), τα γραφεία της διοικήσεως, εφεδρικές διατάξεις συσσωρευτών, μετασχηματιστών, κ.ά.

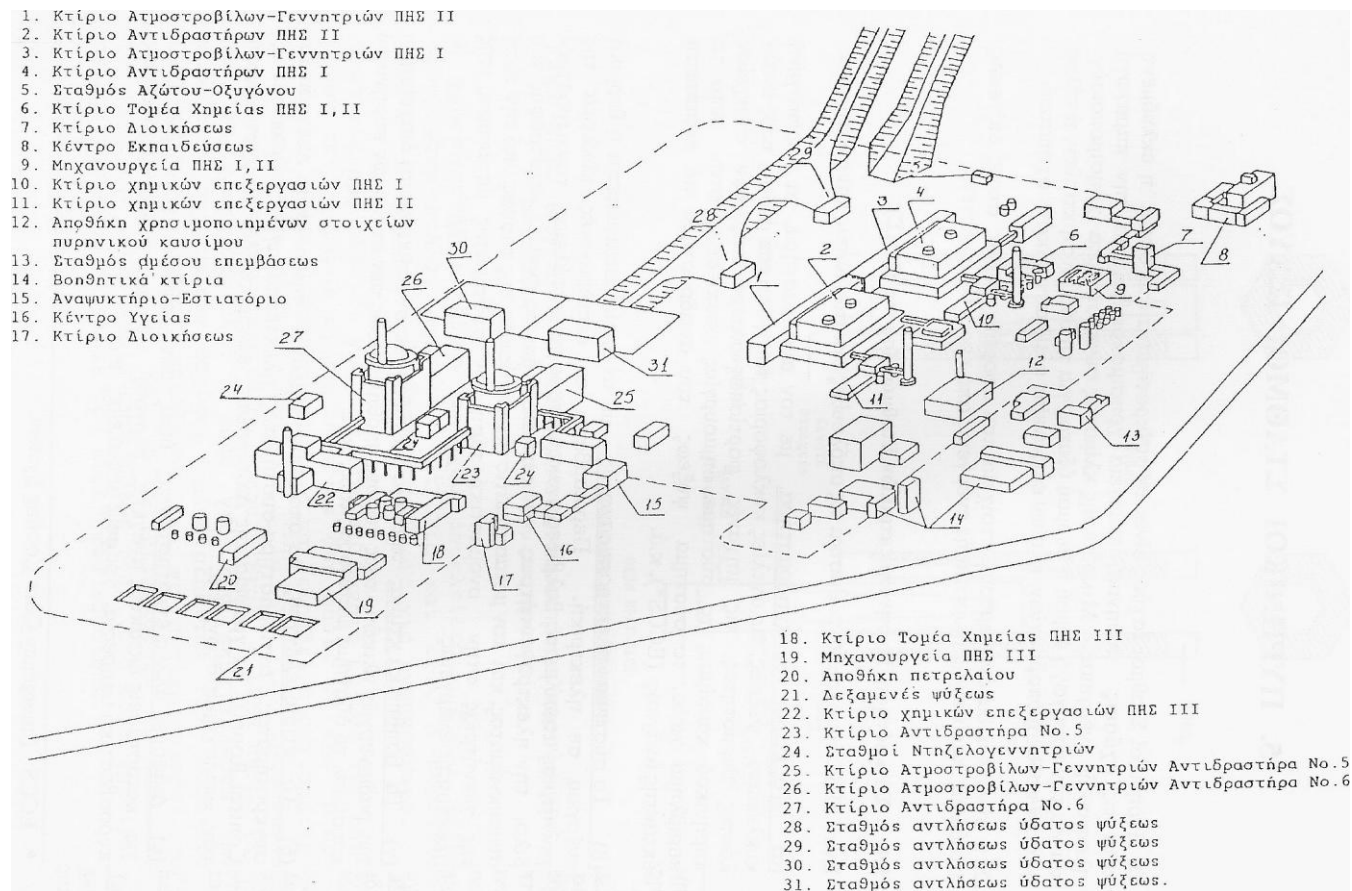
**(ε) Διάφορες άλλες εγκαταστάσεις**, όπως αντλιοστάσια, γεννήτριες Diesel για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, πύργους ψύξεως, υγειονομικό κέντρο, πυροσβεστική υπηρεσία, γραφεία ασφαλείας, κ.ά.

Στο Σχήμα 5.1 δίνεται το σχεδιάγραμμα των κτιριακών εγκαταστάσεων του πυρηνοηλεκτρικού σταθμού του Kozloduy. Στο υπόμνημα του σχήματος αυτού αναφέρονται οι διάφορες εγκαταστάσεις του σταθμού.

Ο ΠΗΣ του Kozloduy διέθετε το 2000 εν λειτουργία, έξι αντιδραστήρες τύπου VVER και παρείχε το 40% της ολικά παραγόμενης ισχύος της Βουλγαρίας. Ο σταθμός βρίσκεται στις όχθες του Δούναβη, στα σύνορα με την Ρουμανία.

Οι αντιδραστήρες υπ' αριθ. 1 και 2 είναι της σειράς VVER-440 και πρωτολειτούργησαν το 1975 (κτίριο υπ' αριθ. 4). Οι αντιδραστήρες υπ' αριθ. 3 και 4

είναι της σειράς VVER-440 και πρωτολειτούργησαν το 1982 (κτίριο υπ' αριθ. 2). Τέλος, οι αντιδραστήρες υπ' αριθ. 5 και 6 είναι της σειράς VVER-1000 και πρωτολειτούργησαν το 1992 (κτίρια υπ' αριθ. 23 και 27).



Σχήμα 5.1 Ο πυρηνοληκτρικός σταθμός του Kozloduy.

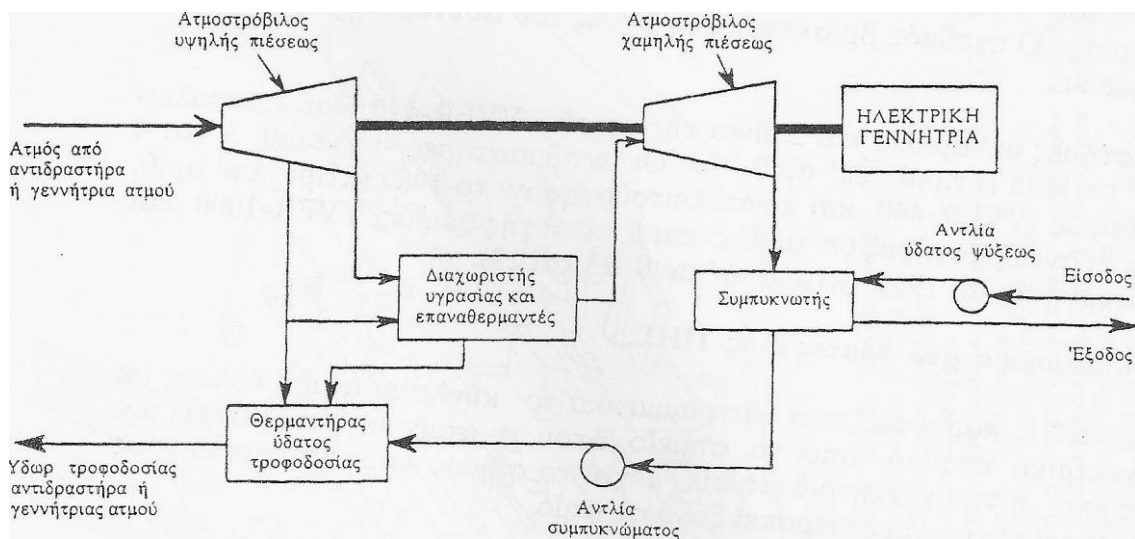
### 5.3 ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΤΜΟΥ ΥΔΑΤΟΣ ΠΗΣ

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται διαγραμματικά το κύκλωμα ατμού ύδατος σε πυρηνοληκτρικό σταθμό, από το σημείο όπου ο ατμός εγκαταλείπει τον αντιδραστήρα ή την γεννήτρια ατμού, μέχρι το σημείο όπου επιστρέφει ως ύδωρ τροφοδοσίας για να μετατραπεί ξανά σε ατμό.

Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, ο ατμός κινεί τους ατμοστροβίλους, οι οποίοι είναι συζευγμένοι με την ηλεκτρική γεννήτρια. Καθώς ο ατμός διέρχεται από τα διάφορα τμήματα του ατμοστροβίλου, η πίεσή του και η θερμοκρασία του ελαττώνονται, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σταγονίδια ύδατος. Έχει βρεθεί ότι, όταν τα σταγονίδια αυτά συγκρούονται με τα πτερύγια του ατμοστροβίλου, προκαλούν έντονη διάβρωσή τους και επομένως, ελαττώνουν τον χρόνο ζωής του ατμοστροβίλου. Επίσης, η σχετικά μεγάλη αδράνεια των σταγονιδίων του ύδατος έχει ως συνέπεια την ελάττωση της αποδόσεως του ατμοστροβίλου. Για τους λόγους αυτούς, ο ατμός ο οποίος κινεί τους ατμοστροβίλους θα πρέπει να είναι ξηρός, πράγμα το οποίον επιτυγχάνεται αν αυτός υπερθερμανθεί πάνω από την θερμοκρασία εκλύσεώς του από το ζέον ύδωρ. Η υπερθέρμανση μπορεί να γίνει σε μία ιδιαίτερη μονάδα, σε τμήμα της γεννήτριας ατμού ή στον ίδιο τον αντιδραστήρα.

Μια άλλη μέθοδος για να μειωθεί η περιεκτικότητα σε υδροσταγονίδια του ατμού που κυκλοφορεί στον αμοστροβίλο είναι η απομάκρυνσή τους σε διαχωριστή υγρασίας, όταν η υγρασία φθάσει ορισμένη τιμή. Στην περίπτωση αυτή, ο υγρός ατμός, δηλαδή ο ατμός που περιέχει σταγονίδια σε ανεπιθύμητο ποσοστό, απομακρύνεται από το αντίστοιχο τμήμα του αμοστροβίλου, περνά μέσα από τον διαχωριστή υγρασίας, υπερθερμαίνεται, και στη συνέχεια οδηγείται σε τμήμα του αμοστροβίλου πιο προχωρημένο από εκείνο από το οποίο βγήκε, ή στον επόμενο αμοστροβίλο, όπως στην περίπτωση του Σχήματος 5.2. Η διαδικασία αυτή της επαναθερμάνσεως και υπερθερμάνσεως χρησιμοποιείται ευρέως στους πυρηνοληκτρικούς σταθμούς, όπως άλλωστε συμβαίνει και στους συμβατικούς σταθμούς.

Ο χρησιμοποιημένος ατμός οδηγείται μετά τους αμοστροβίλους στον συμπυκνωτή, όπου ψύχεται για να υγροποιηθεί. Η θερμότητα που αποβάλλεται σ' αυτό το στάδιο αποτελεί βασική προϋπόθεση της λειτουργίας του σταθμού από θερμοδυναμική άποψη (δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα).



**Σχήμα 5.2** Διάγραμμα του τμήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πυρηνοληκτρικού σταθμού.

Το ύδωρ που παράγεται κατά την συμπύκνωση οδηγείται στη συνέχεια στο σύστημα παραγωγής ατμού. Βρίσκεται ότι η απόδοση του όλου συστήματος αυξάνει εάν το ύδωρ τροφοδοσίας θερμανθεί με ατμό ο οποίος εξάγεται από κάποιο ενδιάμεσο τμήμα του αμοστροβίλου. Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται ως αναγέννηση και πραγματοποιείται στους θερμαντήρες ύδατος τροφοδοσίας (βλ. Σχήμα 5.2). Οι θερμαντήρες είναι εναλλάκτες θερμότητας, στο πρωτεύον των οποίων κυκλοφορεί ατμός από τους αμοστροβίλους. Κατ' αυτόν τον τρόπο, με την θέρμανση του ύδατος τροφοδοσίας και την επιστροφή του στον αντιδραστήρα ή την γεννήτρια ατμού, συμπληρώνεται ο κύκλος ατμού στο τμήμα παραγωγής ισχύος του σταθμού.

## 5.4 ΑΠΟΔΟΣΗ ΠΥΡΗΝΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΙΣΧΥΟΣ

Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος, η ολική απόδοση πυρηνοληκτρικού σταθμού, ορίζεται ως ο λόγος:

$$e = W/Q_R \quad (5.1)$$

όπου:  $W$ , ο ρυθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε MW (που σημειώνονται συνήθως ως  $MW_e$ ),

$Q_R$ , ο ρυθμός παραγωγής θερμικής ενέργειας στον αντιδραστήρα σε MW (που σημειώνονται συνήθως ως  $MW_t$ ).

Η απόδοση  $e$  ενός σταθμού αποτελεί βέβαια ένα χαρακτηριστικό μέγεθος αξιολόγησης του σταθμού, είτε πυρηνικός είναι αυτός είτε συμβατικός, αλλά για τελείως διαφορετικούς λόγους για τους δύο σταθμούς, όπως αναφέρεται στη συνέχεια.

**(α) Οι συμβατικοί σταθμοί** είναι σχετικά φθηνοί στην κατασκευή τους (όταν τους συγκρίνουμε με τους πυρηνικούς) και το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται κυρίως από το κόστος του συμβατικού καυσίμου. Σε έναν τέτοιο σταθμό, όπου η θερμότητα ανά μονάδα χρόνου  $Q_R$  λαμβάνεται από την καύση ενός από τα συμβατικά καύσιμα, η κατανάλωση καυσίμου για λειτουργία υπό δεδομένη ισχύ  $W$  είναι σύμφωνα με την σχέση (5.1) τόσο μικρότερη, όσο η απόδοση του σταθμού είναι μεγαλύτερη.

Η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς  $W$  είναι μικρότερη από την θερμική ισχύ  $Q_R$  που αποδίδει ο αντιδραστήρας, κατά ποσόν ίσο προς το άθροισμα των ρυθμών απώλειας θερμότητας στο όλο σύστημα, δηλαδή στους διάφορους εναλλάκτες θερμότητας, τους ατμοστροβίλους, τις αντλίες, τις σωληνώσεις, την ηλεκτρογεννήτρια και το ποσόν  $Q_C$  που αποδίδεται στο ψυκτικό μέσο του συμπυκνωτή. Πρακτικά, όλη η ενέργεια που εκλύεται κατά τις σχάσεις χρησιμοποιείται για την εξάτμιση του ύδατος που τροφοδοτεί τον ατμοστρόβιλο. Οι απώλειες θερμότητας στον ατμοστρόβιλο, τις σωληνώσεις και τις αντλίες είναι αμελητέες, η ηλεκτρογεννήτρια λειτουργεί με υψηλή απόδοση και επομένως, μπορούμε να διατυπώσουμε την ακόλουθη προσεγγιστική σχέση:

$$W \cong Q_R - Q_C \quad (5.2)$$

οπότε η σχέση (5.1) γράφεται ως εξής:

$$e \cong 1 - Q_C / Q_R \quad (5.3)$$

Από την σχέση (5.3) προκύπτει το συμπέρασμα ότι όσο μικρότερες είναι οι απώλειες στον συμπυκνωτή, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόδοση του συστήματος, ή αντίστροφα, όσο μεγαλύτερη είναι η απόδοση του συστήματος, τόσο μικρότερο είναι το ποσό της θερμότητας που ανά μονάδα χρόνου αποδίδεται στο ψυκτικό μέσο του συμπυκνωτή.

Στην πραγματικότητα, η απόδοση κυκλώματος ατμού (του τύπου που περιγράφηκε) εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, μεταξύ των οποίων η θερμοκρασία  $T_S$  του ατμού που τροφοδοτεί τον ατμοστρόβιλο και η θερμοκρασία  $T_C$  του ψυκτικού στον συμπυκνωτή. Η απόδοση του κυκλώματος αυξάνει όσο αυξάνεται η  $T_S$  και όσο ελαττώνεται η  $T_C$ .

Σε έναν σταθμό, η τιμή της  $T_C$  καθορίζεται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος (π.χ. την τοπική θερμοκρασία του αέρα, ή την θερμοκρασία του ύδατος ψύξεως στον συμπυκνωτή) και μόνο η τιμή της  $T_S$  μπορεί να ρυθμιστεί κατά την σχεδίαση του σταθμού. Έτσι, για την επίτευξη υψηλής αποδόσεως, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί ατμός (για την τροφοδοσία του ατμοστροβίλου) με όσο το δυνατόν υψηλότερη θερμοκρασία. Γι' αυτό στους συμβατικούς σταθμούς επιδιώκεται η παραγωγή ατμού υψηλής θερμοκρασίας και οι ατμοστρόβιλοι στους εν λόγω σταθμούς λειτουργούν κάτω από τις μέγιστες θερμοκρασίες που επιτρέπουν οι μεταλλουργικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής τους.

**(β) Οι πυρηνικοί σταθμοί** από την άλλη πλευρά, είναι ακριβοί στην κατασκευή τους και



το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται κυρίως από το κόστος επενδεδυμένου κεφαλαίου, και όχι από το κόστος του πυρηνικού καυσίμου. Έτσι, στους πυρηνικούς σταθμούς είναι δυνατόν να παραχθεί οικονομικά ηλεκτρική ενέργεια, ακόμα και αν η απόδοση είναι χαμηλή, οπότε η κατανάλωση είναι μεγάλη, επειδή το κόστος παραγωγής δεν επηρεάζεται εκ πρώτης όψης από το κόστος του πυρηνικού καυσίμου.

Το γεγονός αυτό αποτελεί ευτυχή συγκυρία για την πυρηνική βιομηχανία γιατί κατά κανόνα στους πυρηνικούς σταθμούς δεν μπορούμε να επιτύχουμε τις υψηλές θερμοκρασίες ατμού τις οποίες επιτυγχάνουμε στους συμβατικούς σταθμούς. Και τούτο γιατί οι επιτρεπόμενες θερμοκρασίες λειτουργίας των πυρηνικών καυσίμων είναι μικρότερες από εκείνες που αναπτύσσονται στους θαλάμους καύσεως των συμβατικών ατμοπαραγωγών μονάδων. Οι σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες είναι αναγκαίες για την εξασφάλιση της στεγανότητας των στοιχείων του πυρηνικού καυσίμου.

Η σχετικά χαμηλή απόδοση των περισσοτέρων πυρηνοληκτρικών σταθμών που λειτουργούν σήμερα έχει ως συνέπεια την θερμική ρύπανση του περιβάλλοντος, και τούτο για τον ακόλουθο λόγο:

Σύμφωνα με την σχέση (5.3), μικρή τιμή του συντελεστή  $e$  σημαίνει για δεδομένο  $Q_R$  μεγάλη τιμή του  $Q_C$ , δηλαδή ότι ο ρυθμός απορρίψεως θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο του συμπυκνωτή είναι μεγάλος συγκριτικά με εκείνον των συμβατικών σταθμών. Αν θεωρήσουμε π.χ., δύο σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την ίδια ισχύ, έναν με συμβατικό καύσιμο, αποδόσεως  $e_\sigma$ , και έναν με πυρηνικό καύσιμο, αποδόσεως  $e_\pi$ , αποδεικνύεται ότι ο λόγος των ρυθμών αποβολής θερμικής ενέργειας  $Q_{C,\pi} / Q_{C,\sigma}$  από τους δύο σταθμούς δίνεται από την σχέση:

$$\frac{Q_{C,\pi}}{Q_{C,\sigma}} = \frac{1-e_\pi}{1-e_\sigma} \frac{e_\sigma}{e_\pi} \quad (5.4)$$

Θεωρώντας ότι:  $e_\sigma = 38\%$  και  $e_\pi = 33\%$ , βρίσκουμε ότι:

$$Q_{C,\pi} / Q_{C,\sigma} \cong 1,24 \quad (5.5)$$

ή ότι, ο πυρηνικός σταθμός αποβάλλει περίπου 24% περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα χρόνου στο ψυκτικό μέσο, από ότι ο συμβατικός σταθμός.

Αν το ψυκτικό μέσο είναι το ύδωρ λίμνης ή ποταμού, είναι φανερό ότι τα μεγαλύτερα, σχετικά, ποσά θερμότητας που θα αποβάλλονται σ' αυτό ανά μονάδα χρόνου, είναι δυνατόν να προκαλέσουν αύξηση της θερμοκρασίας του σε τέτοιο σημείο, ώστε αυτή να οδηγήσει στη διατάραξη των βιολογικών πληθυσμών. Πρόκειται για το φαινόμενο που είναι γνωστό ως θερμική ρύπανση, το οποίο λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά την επιλογή της τοποθεσίας θερμικού σταθμού, και πολύ περισσότερο κατά την επιλογή της τοποθεσίας πυρηνοληκτρικού σταθμού.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι, για την ελάττωση της θερμικής ρυπάνσεως του περιβάλλοντος, σε πολλούς πυρηνικούς σταθμούς χρησιμοποιούνται πύργοι ψύξεως, όπου επιτυγχάνεται συνδυασμένη απόρριψη θερμικής ενέργειας στο ύδωρ ψύξεως του συμπυκνωτή και στον ατμοσφαιρικό αέρα.

## 5.5 ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 5.5.1 Εισαγωγή στο κόστος

Η κερδοφορία είναι ο αρχικός οδηγός για την εμπορευματοποίηση. Οι εκθέσεις της

κερδοφορίας παρείχαν το κίνητρο για την επέκταση της αμερικάνικης πυρηνικής βιομηχανίας στη δεκαετία του '70, και ο αρνητικός αντίκτυπος στην κερδοφορία των υψηλών δαπανών που αντιστοιχεί στους νέους κανονισμούς οδήγησε στο τέλος της επέκτασης της στη δεκαετία του '80. Η παράγραφος 5.5 παρουσιάζει τα κόστη καυσίμου (fuel costs), τα κόστη κεφαλαίου (capital costs), και τα λειτουργικά / συντήρησης κόστη (operating / maintenance costs) που επηρεάζουν τις εκθέσεις κερδοφορίας των μελλοντικών πυρηνικών σταθμών ενέργειας. Οι κοινωνικοί παράγοντες και οι παράγοντες κερδοφορίας για τις πολιτειακές κυβερνήσεις θα θεωρηθούν σαν προσεγγίσεις, που επιδρούν στις εταιρικές αποφάσεις για τις επιλογές ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

### 5.5.2 Εξισώνοντας το ισοδύναμο κόστος

Προκειμένου να επιτραπούν συγκρίσεις κόστους κεφαλαίου, καυσίμου και λειτουργίας / συντήρησης ένας ισοδύναμος τύπος κόστους παρέχει μία βάση για τη σύγκριση ετήσιων συνεισφορών κάθε συνιστώσας σύμφωνα με τη σχέση (5.6).

$$LC_{total} = LC_{capital} + LC_{fuel} + LC_{O\&M} \quad (5.6)$$

όπου LC είναι το ισοδύναμο κόστος σε \$/kWh της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, συχνά αναφερόμενο ως κόστος ζυγού διανομής (bushbar cost).

Σε μία σύγκριση ισοδύναμου κόστους, το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς το δίκτυο επιτρέπει στο κόστος κεφαλαίου να πληρωθεί πριν το ξεκίνημα να συγκριθεί απευθείας με το πληρωθέν κόστος του καυσίμου, της λειτουργίας, και της συντήρησης κατά τη διάρκεια της παραγωγής ενέργειας.

**Πίνακας 5.1** Σύνοψη αμερικανικών κοστών ζυγών διανομής. Όλα τα κόστη είναι σε ¢/kWh για φορτίο βάσης παραγωγής ενέργειας του 2003. Οι τιμές είναι συγκρίσιμες με τις τιμές από την αναφορά του Ipten εκτός της τιμής του φυσικού αερίου προσαρμόστηκαν να αντικατοπτρίζουν τις τάσεις μέχρι το 2003. Υποτίθεται μία 25-χρόνων ζωής λειτουργίας σταθμού ενέργειας και 10% επιτόκιο.

Περίπτωση	Τύπος Σταθμού	Συντελεστής Εκμετάλλευσης	Κεφάλαιο *	Λειτουργία & Συντήρηση	Καύσιμο **	Σύνολο
Πυρηνικό	Ανοιχτού Κύκλου	80%	3,55	1,03	0,68	5,26
Φυσικό Αέριο	Συνδυασμένου Κύκλου	80%	0,93	0,32	3,94	5,19
Άνθρακας	Κονιοποίησης	80%	2,53	0,60	1,05	4,18

\* Ο συντελεστής εκμετάλλευσης είναι της τάξης του 80%.

\*\* Για το φυσικό αέριο, έχει υποτεθεί βαθμός απόδοσης σταθμού συνδυασμένου κύκλου της τάξης του 50%. Για τη δεύτερη περίπτωση, αυτό αντιστοιχεί σε 3,94¢/kWh για βάση (όχι ζυγού διανομής) φυσικού αερίου. Εδώ,  $\$0,0394/\text{kWh-e} \times 0,53\text{kWh-e}/\text{kWh-f} \times 2,778 \text{ kWh}/0,009486\text{MBtu}$  οδηγεί σε κόστος καυσίμου \$6,12/MBtu για φυσικό αέριο.

Η παρούσα σύγκριση των ηλεκτρικών κοστών από τον Ipten παρέχει μία βάση προς συζήτηση και προς ανάλυση ευαισθησίας. Ο Πίνακας 5.1 συγκρίνει την περίπτωση πυρηνικής βάσης με τις περιπτώσεις βάσης για άνθρακα και φυσικό αέριο. Τα κόστη ζυγού διανομής είναι παρόμοια με αυτά που αναφέρθηκαν από τον Ipten. Τα κόστη καυσίμων για κάθε επιλογή δίνονται στον Πίνακα 5.2.

Ο Πίνακας 5.1 δείχνει τους συντελεστές που κατά μέσο όρο, δίνουν στο πυρηνικό καύσιμο, στο φυσικό αέριο, και στον άνθρακα τα μοναδικά, ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα στις Η.Π.Α.. Το φυσικό αέριο έχει ένα πλεονέκτημα εξαιτίας των μειωμένων κοστών κεφαλαίου. Όταν οι τιμές φυσικού αερίου είναι περισσότερο από \$4/MBtu, ο άνθρακας είναι η καλύτερη επιλογή για τη παραγωγή ενέργειας φορτίου βάσης. Για εποχικούς σταθμούς ενέργειας, το φυσικό αέριο μπορεί να είναι καλύτερη επιλογή από τον άνθρακα ακόμη και για τιμές αερίου υψηλότερες από \$4/MBtu εξαιτίας των χαμηλών συντελεστών εκμετάλλευσης αυτών των εγκαταστάσεων. Ένας χαμηλός συντελεστής εκμετάλλευσης συμβαίνει όταν ο σταθμός λειτουργεί ένα μέρος της ημέρας ή όταν λειτουργεί αρκετά χαμηλότερα από την ονομαστική ισχύ εξόδου του.

**Πίνακας 5.2 Βάση κόστους καυσίμου για τον Πίνακα 5.1.**

Περίπτωση	Κόστος Καυσίμου (\$/MBtu)	Απόδοση (Καύσιμο αναγόμενο στο Ζυγό Διανομής)	Κόστος Καυσίμου αναγόμενο στο Ζυγό Διανομής (¢/kWh)
Πυρηνικό	0,62	31%	0,68
Φυσικό Αέριο	6,11	53%	3,94
Άνθρακας	1,29	42%	1,05

Ο άνθρακας έχει χαμηλότερο κόστος από ότι το φυσικό αέριο και χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου από το πυρηνικό καύσιμο. Αυτός ο συνδυασμός κάνει τον άνθρακα καλλίτερη μακροπρόθεσμη επένδυση από ότι το φυσικό αέριο με χαμηλότερο κίνδυνο κεφαλαίου από ότι το πυρηνικό καύσιμο. Τα τελευταία χρόνια, η δυνατότητα του άνθρακα να ανταγωνιστεί με το φυσικό αέριο για την κατασκευή νέων σταθμών ενέργειας άλλαξε με την αύξηση των τιμών του φυσικού αερίου. Οι τιμές του φυσικού αερίου τείνουν να κυμαίνονται υπερβολικά, αλλά οι τιμές του άνθρακα είναι περισσότερο σταθερές κοντά στα \$1,29/MBtu. Με τις πρόσφατες αυξήσεις των τιμών του φυσικού αερίου (από \$3 σε \$6 και ακόμα \$12 ανά MBtu), ο άνθρακας συχνά προτιμάται σε σχέση με το φυσικό αέριο για την κατασκευή νέων σταθμών ενέργειας.

Τα πλεονεκτήματα της πυρηνικής ενέργειας είναι η αφθονία και το χαμηλό κόστος του ουρανίου ως καυσίμου. Το πλεονέκτημα του κοντά στο μηδέν αέριων ρύπων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου ενδυναμώνει την επιλογή της πυρηνικής ενέργειας. Για να γίνουν αντιληπτές οι δυνατότητες της πυρηνικής ενέργειας, το ισοδύναμο κόστος κεφαλαίου θα χρειαστεί να μειωθεί από \$5,26 ανά kWh σε τιμές συγκρίσιμες με του άνθρακα στα \$4,18 ανά kWh. Πρόσθετες μειώσεις κόστους μπορούν να πραγματοποιηθούν με την αύξηση της απόδοσης του κύκλου ισχύος, που μπορεί να μειώσει τα κόστη κεφαλαίου και καυσίμου.

### **5.5.3 Κόστη κεφαλαίου**

#### **Κύριες προϋποθέσεις**

Τα ισοδύναμα κόστη κεφαλαίου της σχέσης (5.6) και του Πίνακα 5.1 λαμβάνουν υπόψη τα πραγματικά δολάρια που ξοδεύονται για να κτιστούν οι εγκαταστάσεις του σταθμού ενέργειας (Κ σε δολάρια, κεφάλαιο επένδυσης), το επιτόκιο (r επί τοις εκατό, που χρησιμοποιείται στο κομμάτι του δανεισμού) χρησιμοποιείται ώστε να αντιπροσωπεύει τα κόστη σε όρους του χρόνου αναφοράς, και του χρόνου κατασκευής

(T σε έτη). Οι μειώσεις σε κάθε ένα από αυτούς τους συντελεστές μπορούν να μειώσουν τα κόστη κεφαλαίου.

Επιλέγοντας το χρόνο αναφοράς ως το πρώτο έτος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (έτος 1), το ισοδύναμο κόστος κεφαλαίου υπολογίζεται με τη μετατροπή του κεφαλαίου επένδυσης σε κόστος κεφαλαίου αναγόμενο στο έτος 1 (I σε δολάρια) και διαιρώντας το με το χρόνο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του σταθμού αναγόμενου στο έτος 1.

Η σχέση (5.7) παρέχει τη μέθοδο υπολογισμού του I, υποθέτοντας μία ακόμη δαπάνη του κεφαλαίου επένδυσης για κάθε χρόνο κατασκευής του σταθμού.

$$I = \sum_{t=1} S_t \cdot K \cdot (1+r)^{T-t+1} \approx \frac{K \cdot \sum_{t=1} (1+r)^{T-t+1}}{T} \quad (5.7)$$

Το άθροισμα είναι από 1 έως T, όπου T είναι η κατασκευαστική χρονική περίοδος σε έτη, και  $S_t$  είναι το ποσοστό του κεφαλαίου επένδυσης που ξοδεύεται κάθε χρόνο. Αυτή η προσέγγιση υποθέτει ότι το κεφάλαιο επένδυσης που δαπανάται είναι το ίδιο για κάθε χρόνο.

Η σχέση (5.8) σχετίζει το ισοδύναμο κόστος κεφαλαίου ( $LC_{\text{capital}}$  σε \$/kWh) με όλο το κόστος επένδυσης (K σε δολάρια).

$$LC_{\text{capital}} = \frac{I}{[F \cdot E \cdot \sum_{t=1} (1+r)^{t-1}]} \quad (5.8)$$

Το άθροισμα αναφέρεται στον αριθμό ετών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, F είναι ο συντελεστής εκμετάλλευσης, και E είναι η θεωρητική μέγιστη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από το σταθμό. Για 1GW εγκατεστημένη ισχύ, E είναι 8,76E9kWh ( $E = 1\text{GW} \times 365\text{day} \times 24\text{hours}$ ).

Ο υπολογισμός του Iπεν για το  $LC_{\text{capital}}$  για κύκλο πυρηνικού καυσίμου μιας φοράς διαγραφής δίνει 3,55€/kWh (βλ. Πίνακα 5.1). Αυτή η τιμή είναι σύμφωνη με  $F = 80\%$  (συντελεστής εκμετάλλευσης),  $r = 10\%$ , 25-έτη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, και χρόνος κατασκευής 7 έτη. Σε μορφή εξίσωσης, αυτή γράφεται  $\$0,0355/\text{kWh} = 1,491 \times K / (9,89 \times 0,80 \times 8,76\text{E}9)$  ή  $K = \$1,65$  δισεκατομμύρια για 1GW εγκατεστημένη ισχύ. Με αυτές τις προϋποθέσεις το  $LC_{\text{capital}}$  του 3,55€/kWh αντιστοιχεί στο κόστος κεφαλαίου επένδυσης \$1,650/kW.

Ο Πίνακας 5.3 παρέχει τα κόστη κεφαλαίου επένδυσης και τις προϋποθέσεις για τα ισοδύναμα κόστη κεφαλαίου που παρέχονται στον Πίνακα 5.1. Οι τιμές των συνολικών κοστών επένδυσης προερχόμενες από άλλες πηγές συμπεριλαμβάνονται στον Πίνακα 5.3 και δείχνουν ότι οι τιμές αυτές είναι λογικές και συνεπείς.

**Πίνακας 5.3** Σύνοψη των κοστών κεφαλαίου επένδυσης (K) με προϋποθέσεις που τα συνδέουν με τα ισοδύναμα κόστη κεφαλαίου ( $LC_{\text{capital}}$ ). Υποθέτει 25-ετών χρόνο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και 10% επιτόκιο.

Περίπτωση	$LC_{\text{capital}}$ (/kWh)	T(Ετη)	F	K(/kW)	Συγκριτικό K(/kW)
Πυρηνικό-ΑΚ	3,55€	7	80%	\$1,650	\$1,600
Φυσικό Αέριο-ΚΚ	0,93€	3	80%	\$531	\$590
Άνθρακας-Κ	2,53€	4	80%	\$1,374	\$1,350

Όπου ΑΚ: Ανοικτού Κύκλου, ΚΚ: Κλειστού Κύκλου και Κ: Κονιοποιημένος.

Οι προϋποθέσεις και οι τιμές απαριθμούνται στον Πίνακα 5.3 παρέχεται η βασική περίπτωση και οι βάσεις για συζητήσεις των παραγόντων που επιδρούν στο μέρος  $LC_{\text{capital}}$  των προγραμματιζόμενων κοστών ζυγού διανομής για πυρηνικούς σταθμούς.

### Παράμετροι που επιδρούν στο κόστος κεφαλαίου

Στον ανταγωνισμό για την παραγωγή ενέργειας ως προς το φορτίο βάσης, το φυσικό αέριο έχει ένα μειονέκτημα τιμών συγκρινόμενο με τον άνθρακα και δεν είναι μία καλή επιλογή καυσίμου. Εξαιτίας της χρησιμότητας των χαμηλών συντελεστών εκμετάλλευσης (80% παρά 90%) και της χαμηλής τιμής του φυσικού αερίου (\$6/MBtu παρά αυτή της τρέχουσας αγοράς \$12/MBtu), το κόστος του φυσικού αερίου στον Πίνακα 5.1 είναι χαμηλό.

Συγκρίνοντας τον άνθρακα με το πυρηνικό καύσιμο, προκύπτει ότι οι μεταβολές στα χρόνια της παραγωγής, το επιτόκιο, και οι συντελεστές εκμετάλλευσης, είναι παρόμοιες επιλογές. Γι' αυτό, η πυρηνική ενέργεια θα κερδίσει μόνο ένα επαυξητικό πλεονέκτημα ως προς τον άνθρακα – πολύ μικρό να ανιχνευτεί με αυτό τον υπολογισμό. Η σημαντικότερη επίδραση στην ανάλυση ευαισθησίας είναι αυτοί οι παράμετροι που μοναδικά επιδρούν στην πυρηνική ενέργεια. Ο Πίνακας 5.4 συνοψίζει τους μοναδικούς συντελεστές του πυρηνικού καυσίμου έναντι του άνθρακα που χρησιμοποιούνται στην οικονομική ανάλυση ευαισθησίας.

**Πίνακας 5.4** Η σύνοψη των παραμέτρων που ποικίλουν σε μία ανάλυση ευαισθησίας.

Παράμετρος	Βασική Περίπτωση	Παραμετρική Μελέτη
Μειώσεις στο Χρόνο Κατασκευής (έτη)	7	4
Μειώσεις στα Κόστη Επένδυσης Κεφαλαίου (\$/kW)	\$1,650	\$1,365
Επιλεκτικές Εγγυήσεις (% επιτόκιο)	10%	5%
Αυξήσεις στην Απόδοση Καυσίμου	31%	47%
Βελτιωμένη Τεχνολογία Επανεπεξεργασίας (\$/kWh)	0,68	0,40
Πολιτειακές Επιχορηγήσεις (\$/kWh)	0	Ουδέτερος φόρος

### Τυποποιημένα σχέδια

Τυποποιημένα και προεγκεκριμένα σχέδια πυρηνικών σταθμών ενέργειας μπορούν να μειώσουν τους χρόνους κατασκευής από τα 7 στα 4 έτη. Η τιμή των 4 ετών συγκρινόμενη με αυτή των 3,4 ετών, ο ελάχιστος χρόνος κατασκευής για υπάρχουσες εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας στις Η.Π.Α., και των 5,3 ετών για τους μέσους χρόνους κατασκευής των εγκαταστάσεων από το 1993. Ο αθροιστικός όρος προσέγγισης της σχέσης (5.7) δίνει την επίδραση αυτής της αλλαγής άμεσα. Για ένα 10% επιτόκιο, αυτός ο όρος αλλάζει από 1,491 σε 1,276, μία 14,4% μείωση στα ισοδύναμα κόστη κεφαλαίου, ή μία μείωση 0,51¢/kWh.

### **Βελτιωμένα σχέδια αντιδραστήρων**

Ο Iiten συνοψίζει τα εκτιμώμενα κόστη κεφαλαίου για τρία εναλλακτικά σχέδια πυρηνικών αντιδραστήρων όπως υπολογίζονται από τη SAIC (Science Applications International Corporation), τη Scully, και την EIA (U.S. Energy Information Administration). Κάθε περίπτωση με μία τουλάχιστον σχεδιαστική επιλογή (στρώμα χαλκιού, προηγμένη τεχνολογία, διαμορφωμένος αντιδραστήρας ηλίου) έδωσε ένα κόστος κεφαλαίου στα ή χαμηλότερα από \$1,365/kW όταν διατηρείται το κόστος πυρηνικού καυσίμου. Μία μείωση από \$1,650 σε \$1,365 τιμή επένδυσης ενός σχεδίου καινούριου αντιδραστήρα αντιπροσωπεύει μία μείωση 17,3% στο ισοδύναμο κόστος κεφαλαίου, ή μία μείωση 0,614¢/kWh.

### **Εγγυημένα δάνεια**

Παρέχοντας εγγυημένα δάνεια μπορεί να είναι μία καλή επιλογή για μία ομοσπονδιακή κυβέρνηση να διεγείρει την ανάπτυξη για κάθε πρώτη του είδους πυρηνική εγκατάσταση. Είναι ο στόχος της ομοσπονδιακής κυβέρνησης να προωθεί δράσεις προς όφελος του κοινού συμφέροντος. Για την εταιρία κατασκευής η εγκατάσταση, οι εγγυήσεις δανείων θα αντισταθμίσουν τον κίνδυνο σχετιζόμενο με τη νέα τεχνολογία και τον αυξανόμενο χρόνο κατασκευής χτίζοντας βάσει ενός νέου σχεδίου. Μία εγγύηση δανείου αντιστοιχεί στην εταιρική καταλληλότητα για ένα χαμηλό επιτόκιο. Μειώνοντας το επιτόκιο από 10% σε 5% κατά τη διάρκεια κατασκευής, το άθροισμα της σχέσης (5.7) αλλάζει από 1,491 σε 1,221 για μία μείωση 18,1% στο ισοδύναμο κόστος κεφαλαίου, ή μείωση 0,64¢/kWh.

### **Απόδοση**

Η χαμηλή απόδοση της παραγωγής πυρηνικής ενέργειας είναι μόλις πάνω από αυτή των αεριοστροβίλων που λειτουργούν στη μέγιστη παραγωγή στις συνδυασμένες τεχνολογίες ηλεκτρικής ενέργειας. Η πηγή της ανεπάρκειας είναι οι χαμηλές μέγιστες θερμοκρασίες λειτουργίας των αντιδραστήρων πεπιεσμένου ύδατος (γύρω στους 340<sup>0</sup>C) αυτό περιορίζει την απόδοση γύρω στο 33%. Μία αύξηση σε αυτή την απόδοση στο 48% είναι πιθανή με μία αντίστοιχη μείωση 33,3% στην κατανάλωση καυσίμου. Αυτό θα μειώσει το κόστος καυσίμου από 0,68¢/kWh σε 0,46¢/kWh ή μία μείωση του 0,22¢/kWh.

Βελτιωμένα σχέδια αντιδραστήρων με υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας παράγουν αποδοτικότερα ενέργεια. Οι καινούργιοι αντιδραστήρες είναι μικρότεροι αλλά παρέχουν την ίδια ενεργειακή έξοδο. Η μείωση κατά 0,614¢/kWh στο κόστος οφείλεται περισσότερο στο βελτιωμένο σχεδιασμό μικρότερου πυρήνα αντιδραστήρα κάνοντας δυνατή την αυξημένη θερμική απόδοση.

### **Επανεπεξεργασία**

Η επανεπεξεργασία του αναλωθέντος πυρηνικού καυσίμου είναι επιθυμητή επειδή μειώνει τη μάζα των υλικών υψηλής ραδιενέργειας για μακροπρόθεσμη αποθήκευση γύρω στο 96%. Υποτίθεται ότι όλα τα προϊόντα σχάσης πρέπει να αντιμετωπιστούν σαν ραδιενεργά απόβλητα και άλλα «μολυσμένα» υλικά μπορούν είτε να επαναχρησιμοποιηθούν ή να εναποθετούν ως χαμηλής ραδιενέργειας απόβλητα με χαμηλότερα κόστη εναπόθεσης. Η επανεπεξεργασία αποτελείται από διάφορα φυσικοχημικά στάδια επεξεργασίας. Οι Γάλλοι κάνουν επανεπεξεργασία καυσίμου στις

πυρηνικές διεργασίες κλειστού κύκλου όπου τα κόστη καυσίμου είναι 0,90¢/kWh συγκρινόμενο με την τεχνολογία κύκλου μιας φοράς διαγραφής στις Η.Π.Α. στα 0,68¢/kWh. Αυτή η τεχνολογία κύκλου μιας φοράς διαγραφής δεν περιλαμβάνει το παρόν ακαθόριστο κόστος της εναπόθεσης αναλωθέντος καυσίμου.

Παρόλα τα χρόνια εμπειρίας στη Γαλλία σχετικά με την επανεπεξεργασία, το κόστος δεν βρίσκεται κοντά στο κατώτατο σημείο στην καμπύλη κόστους. Μία περίπτωση που δεν διερευνήθηκε είναι η εξισορρόπηση της καθαρότητας του μετάλλου του επανεπεξεργαζόμενου καυσίμου. Από την ουσιαστική απομάκρυνση όλων των προϊόντων σχάσης και των ακτινίδων, το καύσιμο μπορεί να επεξεργαστεί ώστε να απομακρυνθούν μόνο τα προϊόντα σχάσης και να συγκεντρωθούν τα σχάσιμα υλικά. Οι αντιδραστήρες IV γενιάς σχεδιάζονται να χρησιμοποιούν επανεπεξεργαζόμενο καύσιμο που περιέχει μερικά προϊόντα σχάσης. Αυτή η προσέγγιση θα μειώσει τα κόστη καυσίμου γύρω στα 0,28¢/kWh, αλλά χρειάζεται νέους ταχείας-ροής αντιδραστήρες.

Η επανεπεξεργασία που εκτελείται στην περιοχή του πυρηνικού σταθμού παραγωγής ωφελεί την πολιτεία. Το ποσό 0,68¢/kWh, για την παροχή νέου καυσίμου ουρανίου, θα ξοδευόταν για τη μεταφορά καυσίμου από άλλη πολιτεία.

### **Κρατικά κίνητρα**

Οι πολιτείες συχνά παρέχουν κίνητρα για τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να παραχθούν έσοδα από κρατικούς φόρους και να δημιουργηθούν ποιοτικές θέσεις εργασίας. Σαν επιχείρημα μπορεί να τεθεί ότι κατασκευάζοντας και λειτουργώντας ένα σταθμό πυρηνικής ενέργειας εναλλακτικά από ένα σταθμό φυσικού αερίου μπορεί να αποτελέσει ισοδύναμο ως προς τη δημιουργία θέσεων εργασίας προσελκύοντας στην πολιτεία μία αυτοβιομηχανία. Σταθμός εγκατεστημένης ισχύος 1-GW παράγει περίπου 7,9E9kWh ηλεκτρική ενέργεια ανά έτος (90% συντελεστής εκμετάλλευσης). Στο φυσικό αέριο το κόστος καυσίμου στο ζυγό διανομής \$0,0394/kWh, αντιστοιχεί \$310 εκατομμύρια ανά έτος ως χρηματική επιβάρυνση στην πολιτεία από τον σταθμό συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου που παράγει ενέργεια για φορτίο βάσης.

Ένας σταθμός πυρηνικής ενέργειας της ίδιας ισχύος θα πληρώσει \$54 εκατομμύρια ανά έτος για το καύσιμο ουρανίου. Η μείωση \$256 (= 310–54) εκατομμυρίων στο κόστος καυσίμου αντιστοιχεί στις αποταμιεύσεις στην οικονομία της πολιτείας επιλέγοντας τον πυρηνικό σταθμό παρά τον σταθμό του φυσικού αερίου.

Κύριες επενδύσεις στην πολιτεία ωφελούν την ίδια την πολιτεία. Η επένδυση στην κατασκευή ενός νέου σταθμού προέρχεται από εταιρικά κεφάλαια που μπορούν να επενδυθούν οπουδήποτε. Όταν αυτά χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή εντός της πολιτείας, γύρω στο ένα τρίτο των κοστών κεφαλαίου είναι για οικοδομικές εργασίες και οικοδομικά υλικά. Η χρηματοροή από τη νέα κατασκευή και τα χρήματα που πληρώνονται για το καύσιμο έχουν μία επίδραση στην οικονομία της πολιτείας.

Ο Πίνακας 5.6 συγκρίνει τις διαφορετικές επιλογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δείχνοντας τα cents ανά kilowatt-ώρα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που εγκαταλείπει την πολιτεία.

Εξετάζοντας την ολική επίδραση, ενός σταθμού άνθρακα εγκατεστημένης ισχύος 1-GW παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θέτει γύρω στα 1,87¢/kWh (= 4,56–2,69) περισσότερα χρήματα στην οικονομία της πολιτείας από ένα σταθμό φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου εγκατεστημένης ισχύος 1-GW παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας,

το φυσικό αέριο θεωρείται ότι έχει τιμή \$6,11/MBtu. Αυτό αντιπροσωπεύει μείωση \$148 εκατομμυρίων ανά έτος στο κόστος καυσίμου. Αν χρησιμοποιούνταν οι τιμές φυσικού αερίου του 2005 των \$12,22/MBtu, η διαφορά αυξάνεται στα \$458 εκατομμύρια ανά έτος. Το κόστος του ηλεκτρισμού από ένα σταθμό φυσικού αερίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ ευαίσθητο με την τιμή του φυσικού αερίου.

Αυτοί οι υπολογισμοί δείχνουν ότι χτίζοντας ένα σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ένα χαμηλότερο κόστος καυσίμου ως συνιστώσα στο συνολικό κόστος του ζυγού διανομής ανά kWh είναι περίπου το ισοδύναμο με την προσέλκυση από την πολιτεία ενός μεγάλου κατασκευαστή-επενδυτή. Το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αντιστοιχεί σε ένα σημαντικό οικονομικό παράγοντα για την κοινωνία και την πολιτεία.

**Πίνακας 5.5** Οι επιδράσεις των επιλογών των σταθμών ενέργειας όσον αφορά τη χρηματοροή από την πολιτεία που εισάγει φυσικό αέριο, άνθρακα, και ουράνιο. Όλα ανάγονται στο ζυγό διανομής σε ¢/kWh. Οι πολιτειακοί δείκτες επίδρασης θεωρούν ότι 40% των κύριων δαπανών και 80% των δαπανών λειτουργίας και συντήρησης (O&M) μένουν στην πολιτεία κατά τη διάρκεια κατασκευής του σταθμού.

Περίπτωση	Σύνολο & (Εισαγόμενο) Κεφάλαιο	Σύνολο & (Εισαγόμενο) Λειτουργία & Συντήρηση	Σύνολο & (Εισαγόμενο) Καύσιμο*	Συνολική Εισαγωγή στην Πολιτεία σε ¢/kWh
Πυρηνικό	3,55 (-2,13)	1,03 (-0,206)	0,68 (-0,68)	-3,02
Φυσικό Αέριο	0,93 (-0,558)	0,32 (-0,064)	3,94 (-3,94)	-4,56
Άνθρακας	2,53 (-1,518)	0,60 (-0,12)	1,05 (-1,05)	-2,69
Επανεπεξεργασμένο Πυρηνικό	4,05 (-2,43)	1,43 (-0,286)	0 0	-2,72

\*Για το φυσικό αέριο η απόδοση του σταθμού συνδυασμένου κύκλου θεωρείται ίση με 50%. Για την περίπτωση 1, αυτό μεταφράζεται σε 3,94¢/kWh ως προς τη βάση του φυσικού αερίου (όχι ζυγού διανομής). Εδώ,  $\$0,0394/\text{kWh-e} \times 0,53\text{kWh-e/kWh-f} \times 2,778\text{kWh}/0,009486\text{MBtu}$  προκύπτει σε κόστος καυσίμου \$6,12/MBtu για το φυσικό αέριο.

Τα δεδομένα του Πίνακα 5.5 περιλαμβάνουν την περίπτωση της πυρηνικής εγκατάστασης με και χωρίς περιοχή επανεπεξεργασίας καυσίμου. Η επιτόπια επανεπεξεργασία μειώνει την εξαγωγή πολιτειακού κεφαλαίου γύρω στα 0,3¢/kWh (= 3,02–2,72) που αντιστοιχεί σε \$24 εκατομμύρια ανά έτος για εγκατεστημένη ισχύ 1-GW.

Επειδή τα κόστη ζυγού διανομής της πυρηνικής ενέργειας στον Πίνακα 5.5 είναι μεγαλύτερα από ότι του άνθρακα, η πυρηνική ενέργεια τείνει να κοστίζει περισσότερα δολάρια από τον άνθρακα παρόλο ότι το κόστος πυρηνικού καυσίμου είναι μικρότερο. Ο Πίνακας 5.6 δείχνει μία ανάλυση για προτεινόμενες πυρηνικές τεχνολογίες με την ισότητα του κόστους ζυγού διανομής με τον άνθρακα. Σε αυτή τη σύγκριση, η πυρηνική ενέργεια μειώνει την εξαγόμενη χρηματοροή σχετικά με τον άνθρακα – μια άμεση ετήσια επίδραση των \$25 με \$59 εκατομμυρίων στις πολιτειακές χρηματοροές.

Οι πολλαπλασιαστικοί συντελεστές από 4 έως 6 συχνά χρησιμοποιούνται για να αντιπροσωπεύουν την πραγματική οικονομική επίδραση των αποφυγόντων εμπορικών



ελλειμμάτων στην τοπική οικονομία. Οι πολλαπλασιαστικοί συντελεστές και τα μειωμένα εμπορικά ελλείμματα τυπικά δεν παράγουν εταιρικά κίνητρα έτσι ώστε να γίνουν επενδύσεις προς το συμφέρον της πολιτείας. Μία προσέγγιση που ενισχύει τα εταιρικά κίνητρα είναι οι πολιτείες να περάσουν τα προσαυξημένα έσοδα από φόρους στις εταιρείες με τη μορφή επιχορηγήσεων. Μια εκτίμηση της προσαυξημένης διαφοράς επί των φόρων των ατομικών εισοδημάτων, από την πολιτεία, προερχόμενη από την επιλογή του είδους των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας είναι 10% των διαφόρων χρηματοροών εξαγόμενων από τις πολιτείες. Είναι αμφότερα λογικό και μέσα στη νομοθετική δύναμη των πολιτειών να περάσουν φορολογικά κίνητρα στις εταιρείες. Για κύκλο μιας φοράς διαγραφής πυρηνικού καυσίμου σε αντιδιαστολή με αυτό του άνθρακα, αντιστοιχούν γύρω στα 0,025 με 0,059¢/kWh.

**Πίνακας 5.6** Επιδράσεις επιλογών ενεργειακών σταθμών στην πολιτειακή χρηματοροή για στοχευόμενες πυρηνικές διεργασίες. Όλα είναι κόστος ζυγού διανομής σε ¢/kWh. Οι πολιτειακοί δείκτες επίδρασης υποθέτουν 40% των κεφαλαιακών εξόδων και 80% των εξόδων λειτουργίας και συντήρησης (O&M) παραμένουν στην πολιτεία.

Στοχευόμενη Διαδικασία	Σύνολο & (Εισαγόμενο) Κεφάλαιο	Σύνολο & (Εισαγόμενο) Λειτουργία & Συντήρηση	Σύνολο & (Εισαγόμενο) Καύσιμο*	Συνολική Εισαγωγή στην Πολιτεία σε ¢/kWh
Στοχευόμενο Πυρηνικό	2,47 (-1,482)	1,03 (-0,206)	0,68 (-0,68)	-2,37
Στοχευόμενο επανεπεξεργασμένο Πυρηνικό	2,75 (-1,65)	1,43 (-0,286)	0 0	-1,94

\*Για το φυσικό αέριο, υποτίθεται απόδοση σταθμού συνδυασμένου κύκλου 50%. Για την περίπτωση 1, αυτό μεταφράζεται σε 3,94¢/kWh σε βάση φυσικού αερίου (όχι ζυγού διανομής). Εδώ,  $\$0,0394/\text{kWh-e} \times 0,53\text{kWh-e}/\text{kWh-f} \times 2,778\text{kWh}/0,009486\text{Mbtu}$  προκύπτει κόστος καυσίμου  $\$6,12/\text{Mbtu}$  για το φυσικό αέριο.

Για όλες τις εκτιμήσεις της χρηματοροής που εξάγεται από τις πολιτείες, έχει υποτεθεί ότι 60% των κοστών κεφαλαίου φεύγουν από την πολιτεία. Αυτά περιλαμβάνουν ένα μέσο όρο 37,3% για κόστη εξοπλισμού του εργοστασίου. Μεγαλύτερο μέρος του υπολοίπου 22,7% αφορά το κόστος διοίκησης από τον πρωταρχικό εργολάβο κατασκευών και από τους εργάτες εκτός πολιτείας. Για τις πολιτείες με εμπορική κατασκευή ενεργειακών σταθμών, επανεπεξεργασία πυρηνικού καυσίμου, ή εξοπλισμού του σταθμού, το 60% των κοστών κεφαλαίου που υποτίθεται ότι φεύγει από την πολιτεία μπορεί να μειωθεί. Επιπρόσθετο 1¢/kWh ή περισσότερο μπορεί να παραμείνει στην πολιτεία για την επανεπεξεργασία καυσίμου ή για την κατασκευή του ενεργειακού σταθμού αν οι αντίστοιχες εταιρείες βρίσκονται εντός της πολιτείας.

### Ανάλυση ευαισθησίας

Ενώ ο άνθρακας έχει πλεονεκτήματα ως προς το κόστος σχετικά με την παραδοσιακή πυρηνική ενέργεια, υπάρχει δυνατότητα με την τεχνολογία και με τις ρυθμιστικές αλλαγές να μειωθούν τα κόστη για τους πυρηνικούς σταθμούς ενέργειας. Ο Πίνακας 5.7 συνοψίζει διάφορες παραμέτρους στο ισοδύναμο κόστος παραγωγής για την πυρηνική

ενέργεια. Οι παράμετροι εφαρμόζονται στην πυρηνική ενέργεια σε σχέση με τον άνθρακα.

Η μεγαλύτερη μείωση στα κόστη ζυγού διανομής θα προέλθει από τη νέα τεχνολογία που μειώνει το κόστος του πυρηνικού σταθμού ενέργειας με την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης της εγκατάστασης. Η αυξημένη απόδοση μειώνει τα κόστη κεφαλαίου (σε αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας) και τα ισοδύναμα κόστη καυσίμου. Συνδυάζοντας αυτά μπορεί να μειωθεί το κόστος της πυρηνικής ενέργειας περίπου στα 0,83€/kWh. Αυτές οι αποταμιεύσεις είναι συσσωρευτικές και προσθέτονται στις αποταμιεύσεις κόστους από τη μείωση του χρόνου κατασκευής του σταθμού.

**Πίνακας 5.7** Σύνοψη των παραμέτρων που ποικίλουν στη μελέτη ευαισθησίας του πυρηνικού καυσίμου σε σύγκριση με τον άνθρακα.

Παράμετροι	Μείωση σε LC <sub>total</sub> (€/kWh)
Βελτιωμένη Θερμική Απόδοση με Βελτιωμένο Σχεδιασμό που Επίσης Μειώνει τα Κόστη Κεφαλαίου	0,61 + 0,22
Εγγυήσεις Δανείων (Μείωση Ετών Κατασκευής)	0,64 (0,51)
Μειώσεις Κοστών Κεφαλαίων Επένδυσης	0,61
Αυξήσεις στις Αποδόσεις Καυσίμου (Επίδραση στα Κόστη Καυσίμων)	0,22
Βελτιωμένη Τεχνολογία Επανεπεξεργασίας	0,28
Πολιτειακές Επιχορηγήσεις (Ανώτερη Τιμή)	0,10

Η δεύτερη μεγαλύτερη μείωση μπορεί να επιτευχθεί με τη μείωση των κοστών κατασκευής με προπιστοποιημένα σχέδια. Οι πρώτες του κάθε είδους εγκαταστάσεις με μεγαλύτερους χρόνους κατασκευής μπορούν να καλυφθούν με εγγυημένα δάνεια. Οι εκτιμώμενες αποταμιεύσεις είναι από 0,51 μέχρι 0,64€/kWh. Αυτά τα κόστη κατασκευής θα μειωθούν χτίζοντας περισσότερους προπιστοποιημένους σταθμούς ενέργειας.

Υπάρχουν επιπρόσθετα προσαυξημένα κέρδη για την πυρηνική ενέργεια από 0,10 σε 0,28€/kWh μέσω των πολιτειών επιστρέφοντας προσαυξημένα έσοδα φόρων στις εταιρείες με βελτιωμένη επανεπεξεργασία τεχνολογία καυσίμου.

## 5.6 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΠΥΡΗΝΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΙΣΧΥΟΣ

Η επιλογή της θέσεως ενός ΠΗΣ εξαρτάται από τους ακόλουθους, ως επί το πλείστον, παράγοντες:

### 5.6.1 Όρια κατοικημένων περιοχών

Λόγω του υφισταμένου κινδύνου πυρηνικού ατυχήματος, και λόγω των περιορισμών που επιβάλλουν οι κανονισμοί ακτινοπροστασίας έναντι των εκπομπών ραδιενεργών ρύπων για το ευρύ κοινό, θα πρέπει η επιλογή της θέσεως να γίνεται έτσι ώστε να μπορεί να υπάρξει:

- (i) Μια **περιοχή ή ζώνη αποκλεισμού** γύρω από τον σταθμό, στην οποία δεν θα επιτρέπεται η κατοίκηση, και
- (ii) Μια **ζώνη χαμηλής πυκνότητας πληθυσμού**, η οποία να μπορεί εύκολα να εκκενωθεί σε περίπτωση σοβαρού πυρηνικού ατυχήματος.

Οι κατοικημένες περιοχές θα πρέπει να απέχουν από τον σταθμό όχι λιγότερο από 1,33  $R_{χ.π.}$ , όπου  $R_{χ.π.}$  η ακτίνα της ζώνης χαμηλής πυκνότητας. Παράλληλα, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η τοποθεσία του ΠΗΣ δεν θα πρέπει να απέχει πολύ από τις πυκνοκατοικημένες περιοχές, γιατί έτσι αυξάνει το κόστος μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα όρια της περιοχής ή ζώνης αποκλεισμού καθορίζονται από την απαίτηση όπως, σε περίπτωση σοβαρού πυρηνικού ατυχήματος κατά το οποίο εκλύονται προϊόντα σχάσεως, άτομο το οποίο βρίσκεται σε οποιοδήποτε σημείο της περιοχής αυτής, να μη λαμβάνει μέσα στις δύο πρώτες ώρες ολόσωμη δόση μεγαλύτερη από 0,25 Sv, ή 3 Sv από ραδιο-ιώδιο στον θυροειδή του.

Τα όρια της ζώνης χαμηλής πυκνότητας πληθυσμού καθορίζονται από παρόμοια απαίτηση, όπως άτομο, σε οποιαδήποτε θέση της περιοχής αυτής, να μην λάβει καθ' όλη την περίοδο εκθέσεώς του στο ραδιενεργό νέφος που θα προκύψει κατά το ατύχημα, ολόσωμη δόση μεγαλύτερη από 0,25 Sv ή 3 Sv από ραδιο-ιώδιο στον θυροειδή του.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα αναφερθέντα όρια των δόσεων, 0,25 Sv και 3 Sv, δεν σημαίνει ότι είναι τα αποδεκτά όρια εκθέσεως για το ευρύ κοινό σε περιπτώσεις πυρηνικών ατυχημάτων, αλλά ότι αυτά απλώς χρησιμοποιούνται ως αφετηρίες για την αξιολόγηση της υπό επιλογήν τοποθεσίας εγκαταστάσεως ΠΗΣ.

Οι αρχές, οι εξουσιοδοτημένες για την χορήγηση άδειας εγκαταστάσεως ΠΗΣ, λαμβάνουν υπόψη ορισμένες προϋποθέσεις-προδιαγραφές και την αρχή της ALARA (As Low As Reasonable Achievable = τόσο χαμηλά όσο λογικά εφικτό), για την όσο το δυνατόν χαμηλότερη ραδιολογική επιβάρυνση του κοινού κατά τον καθορισμό των ορίων των δύο αυτών ζωνών. Μεταξύ των προϋποθέσεων-προδιαγραφών για τον προσδιορισμό των ακτινών των εν λόγω ζωνών, είναι και οι ακόλουθες:

(α) Ο αντιδραστήρας να έχει λειτουργήσει υπό πλήρη ισχύ επί αρκετό χρονικό διάστημα προ του ατυχήματος, ώστε να έχει αποκατασταθεί ισορροπία στη ραδιενέργεια των σχετικά βραχύβιων προϊόντων σχάσεως.

(β) Κατά το ατύχημα, να εκλύονται αμέσως υπό το περίβλημα το 25% του παραχθέντος ιωδίου και το σύνολο των ευγενών αερίων.

(γ) Η διαρροή των αερίων από το περίβλημα να γίνεται με ρυθμό χαρακτηριστικό της κατασκευής.

(δ) Τα αέρια ραδιενεργά προϊόντα να εκλύονται παρά το έδαφος και να διαχέονται στην ατμόσφαιρα υπό συνθήκες ατμοσφαιρικής σταθερότητας κατά Pasquill τύπου F για τις πρώτες 8 ώρες, με ταχύτητα ανέμου 1 m/sec. Μετά τις πρώτες 8 ώρες, τα αέρια μπορούν να διαχέονται υπό ποικιλία συνθηκών και ταχύτητας ανέμου.

(ε) Δεν λαμβάνεται υπόψη η απόθεση των αερίων ραδιενεργών αποβλήτων για τον υπολογισμό της συγκεντρώσεώς τους στην ατμόσφαιρα.

(στ) Δεν λαμβάνεται υπόψη η ραδιενεργός διάσπαση των ισοτόπων κατά τη διάχυσή τους μέσα στην ατμόσφαιρα.

Εννοείται ότι οι αναφερθείσες προϋποθέσεις-προδιαγραφές λαμβάνονται υπόψη κατά τους υπολογισμούς των εξωτερικών και εσωτερικών δόσεων που μπορούν να προκύψουν από την έκθεση ατόμων στο ραδιενεργό νέφος που θα δημιουργηθεί κατά το ατύχημα.

Στον Πίνακα 5.8 δίδονται οι ραδιενέργειες, σε Ci, των κυριοτέρων ευγενών αερίων και του ιωδίου, προϊόντων των σχάσεων, που αποκαθίστανται σε έναν τυπικό αντιδραστήρα ισχύος 1000 MW<sub>e</sub> περί το τέλος ενός κύκλου πυρηνικού καυσίμου.

Γνωρίζοντας τις <<παροχές των πηγών>>, δηλαδή τις εκλυόμενες ανά μονάδα χρόνου ποσότητες των ραδιοϊσοτόπων-προϊόντων της σχάσεως στην ατμόσφαιρα, είναι δυνατόν να εκτιμηθούν οι δόσεις για το ευρύ κοινό και, βάσει αυτών, οι ακτίνες των δύο περιοχών.

**Πίνακας 5.8** Τυπικές τιμές ραδιενέργειας ορισμένων προϊόντων σχάσεως σε αντιδραστήρα PWR ισχύος 1000 MWe, περί το τέλος ενός κύκλου πυρηνικού καυσίμου.

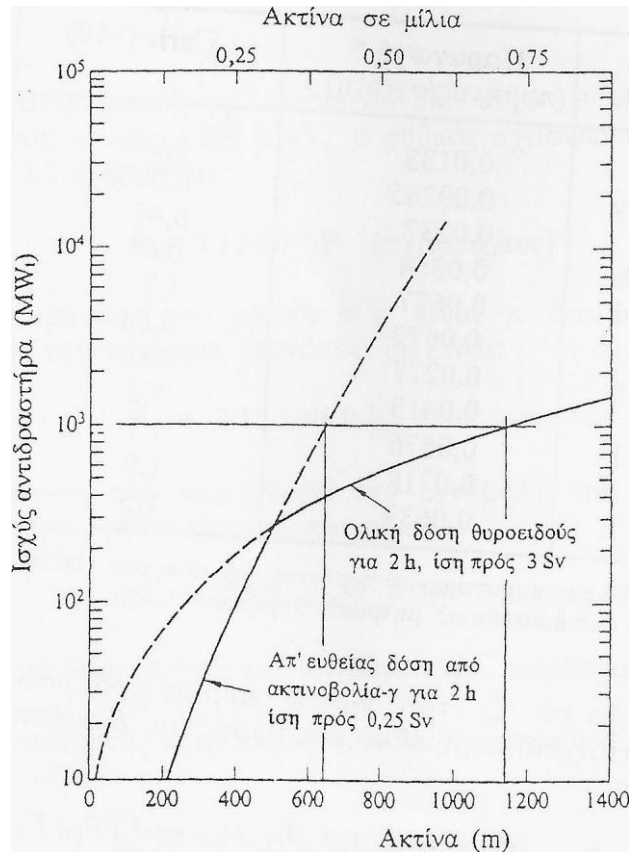
Ισότοπο	T <sub>1/2</sub>	Παραγωγή * (πυρήνες/σχάση)	Curie (×10)
<sup>85m</sup> Kr	4,4 h	0,0133	0,24
<sup>85</sup> Kr	10,76 y	0,00285	0,0056
<sup>87</sup> Kr	76 m	0,0237	0,47
<sup>88</sup> Kr	2,79 h	0,0364	0,68
<sup>133</sup> Xe	5,27 d	0,0677	1,7
<sup>135</sup> Xe	9,2 h	0,0672	0,34
<sup>131</sup> I	8,04 d	0,0277	0,85
<sup>132</sup> I	2,28 h	0,0413	1,2
<sup>133</sup> I	20,8 h	0,0676	1,7
<sup>134</sup> I	52,3 m	0,0718	1,9
<sup>135</sup> I	6,7 h	0,0639	1,5

\* Πρόκειται για το σύνολο των παραγομένων πυρήνων, αφ' ενός μεν από τις σχάσεις, αφ' ετέρου δε από διασπάσεις μητρικών πυρήνων.

Κατ' αρχήν υπολογίζεται η δόση που λαμβάνεται για 2 h στον θυροειδή συναρτήσει της αποστάσεως από σταθμό ο οποίος λειτουργεί υπό ισχύ 1 MW<sub>t</sub> από όλα τα ισότοπα του ιωδίου (<sup>131</sup>I έως και <sup>135</sup>I). Διαιρώντας την δόση ορισμού (τα 3 Sv) με την υπολογισθείσα δόση, βρίσκεται η ισχύς του αντιδραστήρα για την οποία η δόση που λαμβάνεται από τον θυροειδή σε 2 h είναι σε ορισμένη απόσταση ίση προς 3 Sv. Αν π.χ., ισχύς 1 MW<sub>t</sub> δίνει δόση 0,005 Sv σε απόσταση 1000 m, τότε τα 3 Sv στην ίδια θέση θα οφείλονται σε ισχύ του αντιδραστήρα: 3/0,005 = 600 MW<sub>t</sub>.

Αν ο υπολογισμός αυτός επαναληφθεί για διάφορες αποστάσεις από τον σταθμό, προκύπτει καμπύλη παρόμοια με την καμπύλη-(1) του Σχήματος 5.3. Η καμπύλη αυτή δίνει την ισχύ του αντιδραστήρα που μπορεί να προκαλέσει σε 2 h δόση 3 Sv στον θυροειδή συναρτήσει της αποστάσεως από τον σταθμό.

Ανάλογοι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται για το όριο των 0,25 Sv ολόσωμης δόσεως, οπότε προκύπτει, η παρόμοια προς την καμπύλη-(1) καμπύλη-(2) του Σχήματος 5.3. Για τον καθορισμό της ακτίνας της περιοχής αποκλεισμού, λαμβάνεται το μεγαλύτερο από τα δύο αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δύο καμπύλες (1) και (2) του Σχήματος 5.3 για τη δεδομένη ισχύ λειτουργίας του αντιδραστήρα. Π.χ. για το παράδειγμα του Σχήματος 5.3, αν η ισχύς είναι 1000 MW<sub>t</sub>, η καμπύλη-(2) ορίζει την απόσταση των ~ 700 m, ενώ η καμπύλη-(1) ορίζει την απόσταση των ~ 1200 m. Στην περίπτωση αυτή, ως ακτίνα της περιοχής ή ζώνης αποκλεισμού θα ληφθεί η r = 1200 m. Παρόμοιοι υπολογισμοί πραγματοποιούνται για τον καθορισμό της ακτίνας της <<ζώνης χαμηλής πυκνότητας πληθυσμού>>.



**Σχήμα 5.3** Αποτελέσματα υπολογισμών για τον καθορισμό της ακτίνας της <<περιοχής ή ζώνης αποκλεισμού>>.

### 5.6.2 Φυσικά χαρακτηριστικά της περιοχής

Οι πυρηνοληκτρικοί σταθμοί θα πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε όλες οι επί μέρους κατασκευές και τα συστήματα που ενδιαφέρουν από απόψεως ασφάλειας, να μπορούν να ανθίστανται σε καταστρεπτικά φυσικά φαινόμενα όπως οι σεισμοί, οι ανεμοστρόβιλοι, οι πλημμύρες κ.ά. Θα πρέπει λοιπόν η επιλογή της τοποθεσίας να λαμβάνει υπόψη και τα φαινόμενα αυτά. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να μελετώνται η γεωλογία, η σεισμικότητα, η υδρολογία και οι μετεωρολογικές και κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής.

#### (α) Γεωλογία

Για την θεμελίωση ορισμένων, κρίσιμων από απόψεως πυρηνικής ασφάλειας, κτιρίων και εγκαταστάσεων (όπως π.χ. η δεξαμενή αποθηκεύσεως χρησιμοποιημένων στοιχείων πυρηνικού καυσίμου, το πρωτεύον σύστημα ψύξεως, ο αντιδραστήρας, το περίβλημα κλπ), απαιτείται η ύπαρξη βραχώδους υποστρώματος στην περιοχή του σταθμού.

#### (β) Σεισμολογία

Όλα τα συστήματα ασφαλείας, πολλά κτίρια, όπως το περίβλημα του αντιδραστήρα, το κτίριο ελέγχου, το κτίριο των νηζελογεννητριών, ο σταθμός αντλήσεως ύδατος κ.ά., πρέπει να σχεδιάζονται βάσει των προδιαγραφών του καλουμένου σεισμού διακοπής της λειτουργίας του αντιδραστήρα για λόγους ασφαλείας (SSE: Safe Shutdown Earthquake). Γι' αυτό, θα πρέπει να είναι γνωστή η μέγιστη επιτάχυνση ( $\gamma$ ,  $\text{cm/sec}^2$ ) του εδάφους της περιοχής σε περίπτωση σεισμού. Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της εντάσεως του σεισμού ( $I$ ) που δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$I = 1 + 3 \cdot \log_{10} \gamma \quad (5.9)$$

Στον Πίνακα 5.9 δίνεται η <<τροποποιημένη κλίμακα του Mercalli>>, σύμφωνα με την οποία διακρίνονται 12 κατηγορίες εντάσεως σεισμών, ανάλογα με τα αποτελέσματα που παρατηρούνται μετά από κάθε σεισμό.

**Πίνακας 5.9** Η τροποποιημένη κλίμακα Mercalli. Οι δώδεκα κατηγορίες εντάσεως σεισμού και η συσχέτισή τους με την επιτάχυνση του εδάφους.

Κατηγορία εντάσεως	Συνέπειες σεισμού	Επιτάχυνση $\gamma$ (cm/sec <sup>2</sup> )	$\gamma / g$ (g=981 cm/sec <sup>2</sup> )
I	Ανιχνεύσιμος μόνο από ευαίσθητα όργανα	1	0,001
II	Αισθητός από μερικά άτομα που ησυχάζουν, ειδικά στους ανώτερους ορόφους. Ταλάντωση αντικειμένων με μικρή βάση στηρίξεως.	2 3	0,002
III	Αισθητός κυρίως σε εσωτερικούς χώρους. Δόνηση ανάλογη με αυτήν που προκαλούν διερχόμενα φορτηγά.	4 5 6	0,005
IV	Αισθητός σε εσωτερικούς χώρους από πολλά άτομα, σε εξωτερικούς από ολίγα. Αφύπνιση ατόμων. Δονήσεις πιάτων, παραθύρων, θυρών.	8 9 10	0,01
V	Αισθητός από πολλά άτομα. Θραύσεις πιάτων, υαλοπινάκων, επιφανειών από σοβά. Ταλάντωση υψηλών αντικειμένων.	20	0,02
VI	Αισθητός από όλα τα άτομα. Πτώση σοβάδων, καπνοδόχων. Μικρές ζημιές.	50	0,05
VII	Κάτοικοι εξέρχονται τρέχοντας από τα σπίτια. Οι ζημιές στα κτίρια ποικίλλουν, ανάλογα με ποιότητα κατασκευής. Αισθητός από οδηγούς.	100	0,1
VIII	Πτώση τοίχων, καπνοδόχων, διακοσμητικών στοιχείων οικιών. Εκπομπή σκόνης. Ενόχληση οδηγών αυτοκινήτων.	200	0,2
IX	Θραύση κολωνών πάνω από τη θεμελίωση. Ρωγμές σε τοίχους, δάπεδα, έδαφος. Θραύση υπογείων σωληνώσεων.	500	0,5
X	Καταστροφή ξύλινων κατασκευών (κάσες κουφωμάτων, δάπεδα κλπ). Ρωγμές στο έδαφος. Παραμόρφωση σιδηροτροχιών.	1000	1
XI	Εκτεταμένη καταστροφή κτιρίων και γεφυρών. Εντονες ρηγματώσεις εδάφους. Παραμόρφωση σιδηροτροχιών. Ολισθήσεις εδαφών.	2000	2 3
XII	Ολική καταστροφή κτιρίων. Ορατές κυματώσεις εδάφους. Παραμόρφωση ευθυγράμμων αντικειμένων. Εκτίναξη βαρέων αντικειμένων.	5000	4 5 6 7

Βάσει της <<σεισμικής ιστορίας>> της υπό έλεγχο περιοχής, των γεωλογικών σχηματισμών και των αποστάσεων της τοποθεσίας του σταθμού από τα τεκτονικά ρήγματα της ευρύτερης περιοχής, συμπεραίνεται η μεγίστη ένταση και η πιθανότητα πραγματοποίησης ενός τέτοιου σεισμού. Η κατηγορία αυτού του σεισμού, σύμφωνα με την <<τροποποιημένη κλίμακα Mercalli>>, καθορίζει τον SSE (τον σεισμό διακοπής της λειτουργίας του σταθμού για λόγους ασφαλείας). Τα συστήματα ασφαλείας και οι ευαίσθητες από απόψεως ασφαλείας κτιριακές κατασκευές, θα πρέπει να σχεδιάζονται κατά τρόπο ώστε να αντέχουν σε ένα τέτοιο σεισμό. Μάλιστα, για λόγους συντηρητικούς, σχεδιάζονται να αντέχουν σε σεισμό της αμέσως επόμενης κατηγορίας.

#### **(γ) Μετεωρολογία**

Ο κυριότερος μετεωρολογικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή της θέσεως ενός ΠΗΣ είναι <<τα χαρακτηριστικά της ατμοσφαιρικής διαχύσεως>> της περιοχής. Δηλαδή, οι συνθήκες ατμοσφαιρικής σταθερότητας κατά Pasquill, οι ταχύτητες και οι διευθύνσεις των ανέμων που πνέουν συνήθως στην περιοχή, και οι συχνότητες εμφάνισης θερμοκρασιακών αναστροφών. Ενδιαφέρει ακόμα, η εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης καταιγίδων και ανεμοστρόβιλων.

Κατά τις καταιγίδες επηρεάζονται περιοχές ακτίνας ~ 480 km, και κατ' αυτές εμφανίζονται άνεμοι ταχύτητας 120 έως 320 km/h. Κατά τους ανεμοστρόβιλους επηρεάζονται περιοχές μικρότερης εκτάσεως (ακτίνας μερικών μέτρων έως 2000 m). Κατ' αυτούς εμφανίζονται στρόβιλοι άνεμοι οριζόντιας γραμμικής ταχύτητας 160 έως 480 km/h, και κατακόρυφοι ανοδικοί άνεμοι ταχύτητας μέχρι 320 km/h. Οι ανεμοστρόβιλοι μετατοπίζονται με ταχύτητες 20 έως 110 km/h, σαρώνοντας έτσι μεγαλύτερες εκτάσεις.

Οι επιμέρους κατασκευές στον ΠΗΣ θα πρέπει να είναι ανθεκτικές, όχι μόνο στις μεγάλες πιέσεις που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια αυτών των φαινομένων, αλλά και κατά <<βλημάτων>> τα οποία δημιουργούνται κατά τους ανεμοστρόβιλους. Κατά τη μελέτη λοιπόν των κατασκευών σε ένα ΠΗΣ λαμβάνεται υπόψη και η πιθανή εμφάνιση των ακολούθων <<τυπικών βλημάτων>>:

- Εύλινα δοκάρια διαστάσεων 6 cm × 12 cm × 360 cm, ειδικού βάρους 0,65 g/cm<sup>3</sup>, κινούμενα με ταχύτητα 480 km/h.
- Χαλύβδινοι σωλήνες διαμέτρου 6 cm και μήκους 2 m, κινούμενοι με ταχύτητα 160 km/h.
- Αυτοκίνητα βάρους 1800 kg, κινούμενα με ταχύτητα 80 km/h σε ύψος 7,5 m από το έδαφος.
- Στύλοι βάρους 700 kg, κινούμενοι με ταχύτητες 200 km/h.

#### **(δ) Υδρολογία**

Η μελέτη των υδρολογικών χαρακτηριστικών της τοποθεσίας είναι απαραίτητη προκειμένου να αποκλεισθεί η περίπτωση πλημμύρας στη θέση του ΠΗΣ, διότι κάτι τέτοιο θα είχε ως συνέπεια την έκθεση μερικών συστημάτων ασφαλείας του σταθμού (όπως π.χ. οι νηζελογεννήτριες εκτάκτου ανάγκης) στα ύδατα, με όλα τα βλαβερά επακόλουθα.

Τοποθεσίες που βρίσκονται στην ενδοχώρα είναι δυνατόν να κινδυνεύουν από πλημμύρες, π.χ. λόγω αστοχίας υδατοφράγματος ή υπερεκχειλίσεως ποταμών και λιμνών, ενώ τοποθεσίες παραθαλάσσιες από μεγάλα θαλάσσια κύματα σε θυελλώδεις καταστάσεις ή από καταστροφικά ωκεάνια κύματα που προκαλούνται από

υποθαλάσσιους σεισμούς (τσουνάμι).

Ενδιαφέρει ακόμα η μελέτη υπάρξεως υπογείων υδάτων και της ρυπάνσεως που μπορεί να προκληθεί σ' αυτά ή σε παραπλήσια επιφανειακά ύδατα σε περίπτωση ατυχήματος.

## **5.7 ΤΕΧΝΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ, ΤΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΗΣ ΣΧΑΣΕΩΣ ΚΑΙ ΑΠΟ ΤΑ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ**

Οι διάφορες ακτινοβολίες ( $n, \beta^-, \gamma$ ) που παράγονται σ' ένα αντιδραστήρα και οι ραδιενεργοί πυρήνες (θραύσματα σχάσεως και οι θυγατρικοί τους πυρήνες) που συγκεντρώνονται στο πυρηνικό τους καύσιμο δημιουργούν ποικιλία προβλημάτων, τόσο τεχνικών, όσο και προστασίας των εργαζομένων σ' ένα πυρηνικό σταθμό, καθώς και του περιβάλλοντος γενικότερα. Τα προβλήματα αυτά - τουλάχιστον τα πιο σημαντικά - θα επισημανθούν στη συνέχεια, αναφέροντας παράλληλα με συντομία τρόπους αντιμετώπισεώς τους.

Τα νετρόνια παράγονται στον αντιδραστήρα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του (τα νετρόνια των αυτομάτων σχάσεων μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα) και εμφανίζουν εκτεταμένη περιπλάνηση, σε σχέση με τις θέσεις εμφανίσεώς τους. Κατά την περιπλάνησή τους αυτή στα διάφορα υλικά του αντιδραστήρα τα νετρόνια πραγματοποιούν ενσωματώσεις σε πυρήνες, με αποτέλεσμα τα υλικά αυτά να καθίστανται ραδιενεργά. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια ορισμένα τμήματα του αντιδραστήρα - όπως είναι το δοχείο πίεσεως - να μην είναι προσιτά και επιβάλλει τη λήψη μέτρων προστασίας έναντι των ακτινοβολιών που εκπέμπονται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η περίπτωση του αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος, όπου, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.8.1, ο παραγόμενος ατμός στον αντιδραστήρα είναι ραδιενεργός και δημιουργεί την ανάγκη τοποθέτησεως στον αντιδραστήρα θωρακίσεως στον αμοστρόβιλο. Ακόμη, η επιθεώρηση ή η συντήρηση ορισμένων τμημάτων της εγκαταστάσεως του αντιδραστήρα επιβάλλει, επίσης τη λήψη ειδικών μέτρων προστασίας του προσωπικού από τις ακτινοβολίες.

Τα νετρόνια επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των κρυσταλλικών υλικών, όπως είναι τα μέταλλα. Το γεγονός αυτό, καθώς και γενικότερα οποιαδήποτε επίδραση των ακτινοβολιών σ' αυτή και σε άλλες ιδιότητες των υλικών, πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη μελέτη και σχεδίαση του αντιδραστήρα, ώστε να εξασφαλισθεί η αρτιότητα του σε όλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής.

Τα νετρόνια που δεν έχουν γίνει θερμικά, κατά την περιπλάνησή τους στα διάφορα υλικά, αποδίδουν σ' αυτά ενέργεια που εμφανίζεται ως θερμότητα. Εξ άλλου, θερμότητα παράγεται στα υλικά αυτά και από τις ακτινοβολίες  $\beta^-$  ή  $\gamma$  που εκπέμπουν οι ραδιενεργοί πυρήνες τους, οι δημιουργούμενοι από τις ενσωματώσεις (ενσωματώσεις πραγματοποιούνται με νετρόνια οποιασδήποτε ενέργειας, ιδίως όμως με νετρόνια χαμηλής ενέργειας) νετρονίων. Έτσι, λοιπόν τα νετρόνια δημιουργούν στα διάφορα υλικά, άμεσα ή έμμεσα, διάσπαρτες πηγές θερμότητας που έχουν ως συνέπεια την ανάπτυξη θερμικών τάσεων. Διάσπαρτες πηγές θερμότητας και θερμικές τάσεις, πολύ πιο αξιόλογες από τις προηγούμενες, αναπτύσσονται στα διάφορα υλικά και από την αξιόλογη ακτινοβολία  $\gamma$  που εκπέμπεται από τον πυρήνα του αντιδραστήρα.



Οι πιο πάνω θερμικές τάσεις είναι φανερό ότι προκαλούν πρόσθετη μηχανική καταπόνηση των υλικών που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Η καταπόνηση αυτή, σ' ορισμένες περιπτώσεις, είναι τόσο αξιόλογη, ώστε να επιβάλλεται η λήψη μέτρων περιορισμού της. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας περιπτώσεως είναι το δοχείο πίεσεως των αντιδραστήρων ελαφρού ύδατος με τα μεγάλα πάχους τοιχώματα. Περιορισμός της υπόψη καταπόνησεως επιτυγχάνεται με την παρεμβολή στην πορεία των νετρονίων και της ακτινοβολίας  $\gamma$  <<πετάσματος>> από κατάλληλο υλικό, που έχει ως προορισμό την εξασθένηση των ακτινοβολιών αυτών πριν προσβάλλουν τα υλικά που πρέπει να ανακουφισθούν. Στην περίπτωση του δοχείου πίεσεως του αντιδραστήρα, το προστατευτικό <<πέτασμα>> τοποθετείται μεταξύ των πλευρικών τοιχωμάτων του και του πυρήνα του αντιδραστήρα. Το πέτασμα αυτό, επειδή μετριάξει τις αναπτυσσόμενες πηγές θερμότητας όπως προαναφέρθηκε, ονομάζεται θερμική θωράκιση.

Η επιβλαβής βιολογική δράση των διαφόρων ακτινοβολιών επιβάλλει τη λήψη μέτρων, ώστε οι εργαζόμενοι σ' ένα πυρηνικό σταθμό να εκτίθενται σε <<δόσεις>> αυτών των ακτινοβολιών που είναι μέσα στα όρια, τα προβλεπόμενα από τους σχετικούς κανονισμούς. Για το σκοπό αυτό είναι αναγκαία η εξασθένηση των νετρονίων και της  $\gamma$ -ακτινοβολίας που διαφεύγουν από τον αντιδραστήρα, και πριν από την είσοδό τους σε χώρους εργασίας. Η εξασθένηση αυτή επιτυγχάνεται με παρεμβολή στην πορεία των ακτινοβολιών τοιχωμάτων από κατάλληλα υλικά και με το απαραίτητο πάχος. Το σκυρόδεμα και το φυσικό νερό προσφέρονται για το σκοπό αυτό. Έτσι, λοιπόν, το δοχείο πίεσεως του αντιδραστήρα περιβάλλεται από τοιχώματα πάχους λίγων μέτρων, κατασκευασμένων από σκυρόδεμα με κατάλληλες προσμίξεις για επαύξηση της ικανότητας εξασθενίσεως των ακτινοβολιών. Τα τοιχώματα αυτά, λόγω της φύσεως της προστασίας που προσφέρουν, ονομάζονται βιολογική θωράκιση. Βεβαίως, βιολογική θωράκιση είναι αναγκαία και σε άλλα τμήματα της εγκαταστάσεως, εκτός από το δοχείο πίεσεως, όπως είναι οι μονάδες αμοπαγωγής των αντιδραστήρων πεπιεσμένου ύδατος.

Η ασφαλής απασχόληση του προσωπικού ενός πυρηνικού σταθμού ολοκληρώνεται με τη συστηματική παρακολούθηση τόσο του επιπέδου των ακτινοβολιών στους διαφόρους χώρους του σταθμού, όσο και της εκθέσεως σε ακτινοβολίες καθενός εργαζομένου. Για το σκοπό αυτό υπάρχουν εγκατεστημένα στους διαφόρους χώρους κατάλληλα όργανα μετρήσεως των ακτινοβολιών σε συνδυασμό και με σύστημα συναγερμού για την περίπτωση υπερβάσεως ορισμένων ορίων, ενώ ο κάθε εργαζόμενος είναι εφοδιασμένος με κατάλληλο <<όργανο>> για την παρακολούθηση της εκθέσεώς του σε ακτινοβολίες και την τήρηση αρχείου με το ιστορικό αυτής της εκθέσεως.

Μια άλλη κατηγορία τεχνικών προβλημάτων έχει σχέση με τα ραδιενεργά απόβλητα (αέρια, υγρά ή στερεά) ενός πυρηνικού σταθμού. Η απόρριψη ορισμένων από τα απόβλητα αυτά στο περιβάλλον του σταθμού διέπεται από πολύ αυστηρούς κανονισμούς, έτσι ώστε να μη δημιουργείται ανεπίτρεπτη ραδιενεργός ρύπανση στη γύρω περιοχή. Η ελεγχόμενη ελευθέρωσή τους, η αποθήκευσή τους πριν από την ελευθέρωση και η μελέτη της διασκορπίσεώς τους στο περιβάλλον είναι μεταξύ των μέτρων που λαμβάνονται. Εξ άλλου, ορισμένα απόβλητα, που η απόρριψή τους στο περιβάλλον δεν είναι επιτρεπτή, συγκεντρώνονται για αποθήκευση ανάλογη με εκείνη που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 για τα κατάλοιπα της επεξεργασίας του πυρηνικού καυσίμου μετά την εξαγωγή του από τον αντιδραστήρα.

Θα πρέπει, τέλος, να αναφερθεί ότι ή επιβάρυνση του περιβάλλοντος από την απόρριψη ραδιενεργών αποβλήτων παρακολουθείται και ελέγχεται συστηματικά με λήψη διαφόρων δειγμάτων από την ευρύτερη περιοχή του σταθμού, όπως είναι: γεωργικά προϊόντα, χώμα, νερό ποταμού σε διάφορες αποστάσεις από το σταθμό, γάλα, ψάρια, αν ο σταθμός είναι κοντά σε θάλασσα, λίμνη κλπ., βροχή κ.ά. Όλες οι λεπτομέρειες της δειγματοληψίας και η έκταση της περιοχής απ' όπου λαμβάνονται τα δείγματα είναι σχολαστικά καθορισμένα από κανονισμούς.

Τα ραδιενεργά προϊόντα της σχάσεως (θραύσματα της σχάσεως και οι θυγατρικοί τους πυρήνες) εκπέμπουν με τη διάσπασή τους ακτινοβολίες, όχι μόνο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του αντιδραστήρα, αλλά και μετά τη διακοπή της λειτουργίας του. Αυτό, όμως, σημαίνει, ότι θερμότητα παράγεται στον αντιδραστήρα ακόμη και όταν αυτός έχει τεθεί έκτος λειτουργίας. Η θερμική ισχύς που παράγεται κατά την περίοδο αυτή είναι μικρό σχετικά ποσοστό της θερμικής ισχύος λειτουργίας του αντιδραστήρα και μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Παρ' όλα αυτά, σε ορισμένους τύπους αντιδραστήρων (ελαφρού ή βαρέως ύδατος) είναι απαραίτητο να εξασφαλισθεί επαρκής ψύξη και μετά τη διακοπή της λειτουργίας τους, προκειμένου να αποφευχθεί επικίνδυνη υπερθέρμανση που μπορεί να οδηγήσει σε ρήξη του περιβλήματος του πυρηνικού καυσίμου, ακόμη δε και σε τήξη του περιβλήματος και του πυρηνικού καυσίμου.

Επικίνδυνη υπερθέρμανση των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου, που μπορεί να οδηγήσει ακόμη και στην τήξη τους, μπορεί να δημιουργηθεί στους αντιδραστήρες ύδατος ( $H_2O$  ή  $D_2O$ ), όταν συμβεί αστοχία και διαρροή του ψυκτικού μέσου σε κάποια θέση του κυκλώματος που κυκλοφορεί, π.χ. ρήξη σωληνώσεως. Σε μία τέτοια περίπτωση, παρά το γεγονός ότι θα διακοπεί η λειτουργία του αντιδραστήρα, όμως η συνεχιζόμενη έκλυση θερμότητας στο πυρηνικό καύσιμο από τις διασπάσεις των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσεως, αλλά και η μειωμένη ή ανύπαρκτη ικανότητα του ψυκτικού μέσου για την απαγωγή της είναι δυνατόν να δημιουργήσουν τις προϋποθέσεις για την τήξη του πυρηνικού καυσίμου.

Το πιο πάνω ενδεχόμενο μπορεί να αποφευχθεί με την έγκαιρη ενεργοποίηση <<εφεδρικού>> συστήματος εκτάκτου ψύξεως του αντιδραστήρα, ικανού να προσφέρει ικανοποιητική ψύξη του πυρηνικού καυσίμου, ώστε να αποφευχθεί η επικίνδυνη υπερθέρμανσή του.

Η αστοχία που προαναφέρθηκε ονομάζεται ατύχημα απώλειας ψυκτικού. Η μελέτη και σχεδίαση της εγκατάστασεως ενός αντιδραστήρα ισχύος γίνεται κατά τρόπο ώστε: α) να αντιμετωπίζεται επιτυχώς το ατύχημα απώλειας ψυκτικού, στη σοβαρότητα που μπορεί να εμφανισθεί, β) να αποφεύγεται η επικίνδυνη ρύπανση του περιβάλλοντος με ραδιενεργά υλικά ακόμη και στη δυσμενέστερη περίπτωση αποτυχίας του συστήματος στην αντιμετώπιση του ατυχήματος.

Όσα αναφέρθηκαν μέχρι τώρα δείχνουν τη σημασία που έχει η γνώση της ενεργείας που εκλύεται στο πυρηνικό καύσιμο όταν διακοπεί η λειτουργία του αντιδραστήρα και η όποια ενέργεια οφείλεται στις  $\beta^-$ , και  $\gamma$  διασπάσεις των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσεως. Είναι φανερό ότι ο ρυθμός εκλύσεως της ενεργείας αυτής φθίνει με την πάροδο του χρόνου, λόγω απομειώσεως των ραδιενεργών πυρήνων.

## 5.8 ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ

Όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο 5.7 κατέδειξαν πόσο μεγάλες ποσότητες ραδιενεργών πυρήνων περιέχονται σ' ένα αντιδραστήρα, και ακόμη ότι ορισμένοι απ' αυτούς είναι ιδιαίτερα μακρόβιοι. Το γεγονός αυτό προδιαγράφει τον απώτερο αντικειμενικό στόχο του όλου συστήματος ασφαλείας ενός πυρηνικού αντιδραστήρα, που είναι η αποτροπή της διασκορπίσεως στο περιβάλλον σε επικίνδυνο βαθμό των υπόψη ραδιενεργών υλικών και στην <<ακρότατη περίπτωση>> που θα συμβεί σοβαρή αστοχία στην εγκατάσταση. Η χρησιμοποίηση του όρου <<ακρότατη περίπτωση>> θα επεξηγηθεί στη συνέχεια.

Η παρουσία των πιο πάνω ραδιενεργών υλικών στο πυρηνικό καύσιμο δημιουργεί προβλήματα όχι μόνο σε περίπτωση αστοχίας, αλλά και κατά την ομαλή λειτουργία του αντιδραστήρα (προστασία από τις ακτινοβολίες, ιδιότητες υλικών), τα όποια όμως αντιμετωπίζονται εύκολα, όπως σκιαγραφήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο 5.7. Στην ίδια παράγραφο, εξ άλλου, έγινε σύντομη αναφορά στα μέτρα που λαμβάνονται για την ασφαλή προστασία του περιβάλλοντος από τα ραδιενεργά απόβλητα ενός πυρηνικού αντιδραστήρα.

Ως <<σύστημα ασφαλείας>> ενός πυρηνικού αντιδραστήρα, ή πληρέστερα ενός πυρηνοληλεκτρικού σταθμού παραγωγής, χαρακτηρίζουμε το σύνολο των μέτρων τα όποια λαμβάνονται, ώστε το ενδεχόμενο επικίνδυνης διασκορπίσεως που προαναφέρθηκε να έχει τόσο μικρή πιθανότητα πραγματοποίησεως, ώστε η όλη εγκατάσταση να θεωρείται ασφαλής. Η πιθανότητα αυτή καθορίζεται με ανάλυση σε βάθος της αλληλουχίας των γεγονότων που οδηγούν την εγκατάσταση στην ακρότατη μορφή αστοχίας η οποία ενέχει τον κίνδυνο της ανεπίτρεπτης διασκορπίσεως.

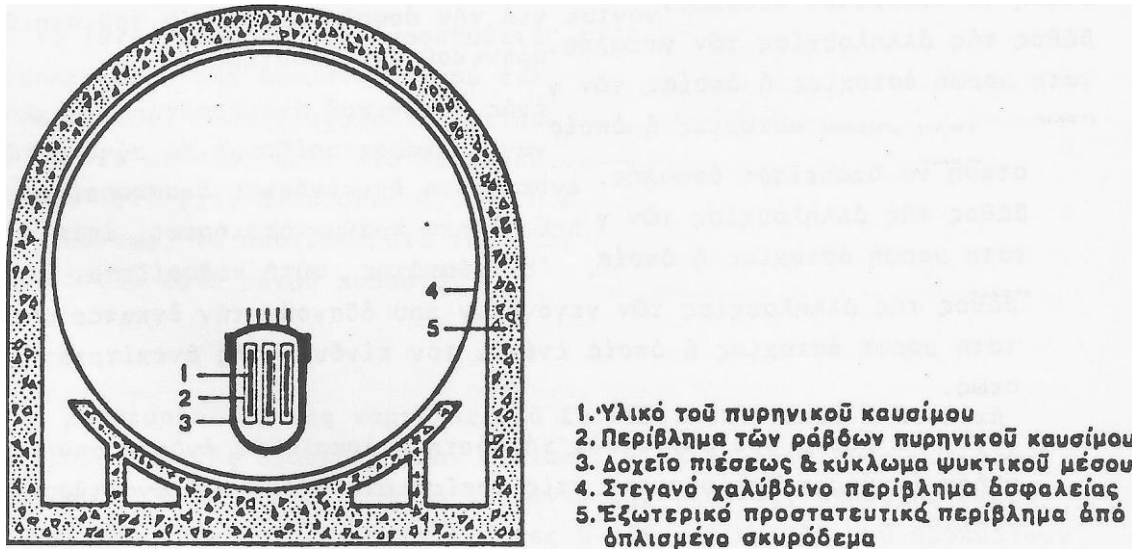
Τα μέτρα που συνιστούν το σύστημα ασφαλείας ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος κατατάσσονται στις τρεις κατηγορίες που αναπτύσσονται στη συνέχεια.

**1. Μελέτη και σχεδίαση.** Εξασφαλίζουν μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας της εγκαταστάσεως και περιορίζουν σημαντικά το ενδεχόμενο αστοχίας ή κακής λειτουργίας. Αλληλένδετα με τη μελέτη και σχεδίαση είναι ο τηρούμενος αυστηρός έλεγχος ποιότητας των υλικών και των κατασκευών, καθώς και η πρόβλεψη από τη σχεδίαση της δυνατότητας για συνεχή ή περιοδικό έλεγχο των συνιστωσών της εγκαταστάσεως, ώστε έγκαιρα να επισημανθεί οποιαδήποτε φθορά ή η έναρξη αστοχίας.

Εξ άλλου, η σχεδίαση της εγκαταστάσεως ενός πυρηνικού αντιδραστήρα προβλέπει την παρεμβολή διαδοχικών <<φραγμών συγκρατήσεως>> των ραδιενεργών υλικών του πυρηνικού καυσίμου, έτσι ώστε η διασκόρπιση τους στο περιβάλλον να είναι δυνατή μόνο όταν αστοχήσουν διαδοχικά όλοι αυτοί οι φραγμοί. Οι υπόψη φραγμοί συγκρατήσεως φαίνονται, σε απλουστευμένη μορφή, στο Σχήμα 5.4 και είναι διαδοχικά: (1) το υλικό του πυρηνικού καυσίμου, (2) το περίβλημα των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου, (3) το δοχείο πίεσεως του αντιδραστήρα με το κύκλωμα κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου του αντιδραστήρα, (4) το στεγανό χαλύβδινο περίβλημα ασφαλείας και (5) το εξωτερικό προστατευτικό περίβλημα από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Το χαλύβδινο περίβλημα ασφαλείας (4) εξασφαλίζει στεγανότητα με τις συνθήκες που θα επικρατήσουν στο εσωτερικό του στη δυσμενέστερη περίπτωση αστοχίας των προηγούμενων φραγμών προστασίας (1,2,3). Το εξωτερικό προστατευτικό περίβλημα από οπλισμένο σκυρόδεμα έχει μικρή συμβολή στο θέμα της στεγανότητας, προσφέρει

όμως τη δυνατότητα για αναρρόφηση διαρροών από το χαλύβδινο περίβλημα ασφαλείας (4) και προφυλάσσει την εγκατάσταση από εξωτερικούς κινδύνους ζημιών, όπως είναι π.χ. η πτώση αεροπλάνου πάνω στην εγκατάσταση.



**Σχήμα 5.4** Φράγματα συγκρατήσεως των ραδιενεργών υλικών του πυρηνικού καυσίμου.

Στην εξεταζόμενη κατηγορία των μέτρων ασφαλείας θα πρέπει να συμπεριληφθούν ακόμη: α) η συνεκτίμηση πολλών παραγόντων (π.χ. σεισμικότητα, γεωλογία, υδρολογία, πυκνότητα πληθυσμού κλπ.) και η εφαρμογή αυστηρών κριτηρίων για την επιλογή της θέσεως εγκαταστάσεως ενός πυρηνοηλεκτρικού σταθμού, β) ο ουσιαστικός έλεγχος από αρμόδιο κρατικό φορέα της εγκαταστάσεως από τη σχεδίαση και επιλογή της θέσεως εγκαταστάσεως μέχρι και της κατασκευής και λειτουργίας.

**2. Συστήματα προστασίας της εγκαταστάσεως.** Αποβλέπουν στην έγκαιρη ανίχνευση των ανωμαλιών της λειτουργίας και επενεργούν ώστε να περιορίσουν την εξέλιξή τους και να αποτρέψουν τη <<διάδοση>> της ανωμαλίας. Στα μέτρα αυτά περιλαμβάνεται π.χ. το σύστημα αυτομάτου έλεγχου και ρυθμίσεως της λειτουργίας του αντιδραστήρα, το αυτόματο σύστημα έκτακτου διακοπής της λειτουργίας.

Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι χρησιμοποιούνται παράλληλα δύο ή και περισσότερα συστήματα προστασίας με τον ίδιο προορισμό, ανεξάρτητα μεταξύ τους και βασιζόμενα σε διαφορετικές μεθόδους για την επίτευξη του ίδιου αποτελέσματος.

**3. Ειδικά συστήματα προστασίας του πληθυσμού.** Πρόκειται για τα μέτρα που λαμβάνονται για την προστασία του πληθυσμού στην περίπτωση πραγματοποιήσεως σοβαρού και μικρής πιθανότητας ατυχήματος. Τα μέτρα αυτά καθορίζονται μετά από θεώρηση διαφόρων υποθετικών σοβαρών ατυχημάτων. Η συντηρητική ανάλυση των ενδεχομένων συνεπειών των υποθετικών ατυχημάτων, επιτρέπει τον προσδιορισμό της επάρκειας των μέτρων να περιορίσουν την έκταση αυτών των συνεπειών.

Στην υπόψη κατηγορία περιλαμβάνεται το σύστημα εκτάκτου ψύξεως του αντιδραστήρα που έχει ως προορισμό να εξασφαλίσει ικανοποιητική ψύξη στην περίπτωση απώλειας του ψυκτικού μέσου. Οι απαιτήσεις από το σύστημα αυτό καθορίζονται από το υποθετικό ατύχημα που οδηγεί στην απώλεια του ψυκτικού μέσου του αντιδραστήρα. Περιλαμβάνεται επίσης το περίβλημα ασφαλείας και το εξωτερικό προστατευτικό περίβλημα του Σχήματος 5.4 που προσφέρουν, υπό συνθήκες σοβαρού

υποθετικού ατυχήματος, ασφαλή φραγμό στη διασκόρπιση στο περιβάλλον ραδιενεργών υλικών του πυρηνικού καυσίμου.

Τα θέματα ασφαλείας λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων είναι ιδιαίτερος πολύπλοκα και πολυσύνθετα, τα δε μέτρα που λαμβάνονται έχουν ως προορισμό να αποτρέψουν πολύ σοβαρές συνέπειες. Είναι γεγονός ότι η τεχνολογία, στην εξελικτική της πορεία, βελτιώνεται από τα λάθη της. Το ίδιο έχει συμβεί και με την πυρηνική τεχνολογία χωρίς όμως - και αυτό τη ξεχωρίζει - μέχρι σήμερα τα λάθη της αυτά να έχουν οδηγήσει στα καταστρεπτικά αποτελέσματα που θα είχαν τα υποθετικά ατυχήματα, τα χρησιμοποιούμενα για το σχεδιασμό του συστήματος ασφαλείας ενός πυρηνοληλεκτρικού σταθμού. Ως χαρακτηριστικά παραδείγματα μπορούν να θεωρηθούν το ατύχημα στο Three Mile Island (Η.Π.Α.) και στο Chernobyl (πρώην Σοβιετική Ένωση). Το πολύ σοβαρό ατύχημα που έγινε στις 29.3.1979 στον πυρηνοληλεκτρικό σταθμό Three Mile Island (Αντιδραστήρας No.2), όπου με απώλεια του ψυκτικού μέσου και σειρά σφαλμάτων, υπήρξε τήξη του πυρηνικού καυσίμου, αλλά το στεγανό περίβλημα προστασίας και το εξωτερικό προστατευτικό περίβλημα ανταποκρίθηκαν με επιτυχία στον προορισμό τους, δηλαδή στην αποτροπή επικίνδυνης διασκορπίσεως ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον. Το ατύχημα στο Chernobyl στις 29.04.1986 ήταν το χειρότερο πυρηνικό ατύχημα στην ιστορία. Το ιστορικό του ατυχήματος έχει ως εξής:

1. Το πρωί της Παρασκευής 25.04.86 γίνεται πείραμα ελέγχου της αδιάλειπτης παροχής ισχύος στις αντλίες κυκλοφορίας νερού στον ΠΑΙ-4 (ΠΑΙ: Πυρηνικός Αντιδραστήρας Ισχύος) από μηχανές Diesel, σε περίπτωση βλάβης της στροβιλογεννήτριας, ώστε να αποφευχθεί ατύχημα απώλειας ψυκτικού μέσου (LOCA: Loss Of Coolant Accident) (Η ειρωνεία : ελέγχετο αυτό που τελικά έγινε ...).

2. Προκειμένου να γίνουν οι δοκιμές αρχίζουν να μειώνουν τη θερμική ισχύ ( $3,2 \text{ GW}_{\text{th}}$ ) στις 01:00 φθάνοντας τα  $1,6 \text{ GW}_{\text{th}}$  στις 13:00, οπότε αποσυνδέεται η μία από τις δύο στροβιλογεννήτριες του ΠΑΙ-4. Στις 14:00 ειδοποιούνται από το κέντρο κατανομής φορτίου ότι η πόλη του Κιέβου θα χρειασθεί περισσότερη ισχύ το Σαββατοκύριακο (Πάσχα) οπότε δεν θα πρέπει να αποσυνδεθεί ο ΠΑΙ από το δίκτυο. Στις 23:10 τελικά επιτρέπεται η αποσύνδεση. Προφανώς αυτά τα πισωγυρίσματα είχαν δημιουργήσει εκνευρισμό στο προσωπικό, το οποίο λόγω Πάσχα ήταν μειωμένο.

3. Φαίνεται ότι οι χειριστές δεν είχαν ενημερωθεί για το φαινόμενο Wigner, κατά το οποίο παρατεταμένη λειτουργία σε χαμηλή ισχύ δημιουργεί υπερβολική πυρηνική δηλητηρίαση Xe-135 και προχωρούν σε ατυχείς χειρισμούς με τις ράβδους ελέγχου οι οποίες λόγω κακής σχεδίασης στα άκρα τους περιέχουν γραφίτη. Έτσι, μολονότι τις βύθισαν για να σβήσουν τον ΠΑΙ η ισχύς ανέβηκε. Πέραν αυτού είχαν βγάλει εκτός τον αυτόματο χειρισμό του ΠΑΙ από τους H/Y για να κάνουν τα πειράματά τους.

4. Στις 00:28 της 26.04.86 επιχειρούν να κατεβάσουν την ισχύ σε  $0,7 \text{ GW}_{\text{th}}$ , η οποία λόγω της πυρηνικής δηλητηρίασης πέφτει τελικά απότομα στα  $0,03 \text{ GW}_{\text{th}}$ , παρά τον κανονισμό. Στις 01:07 καταφέρουν να σταθεροποιήσουν την ισχύ στα  $0,2 \text{ GW}_{\text{th}}$ . (decay heat  $7\% \times 3,2 = 0,2 \text{ GW}$ ).

5. Στις 01:23 αρχίζει το πείραμα, βγαίνει εκτός και η 2η στροβιλογεννήτρια. Στις 01:23:20 αυξάνει η θερμοκρασία του ψυκτικού, πέφτουν οι ράβδοι ελέγχου, αλλά λόγω της προβληματικής αύξησης αντιδραστικότητας (γραφίτης στις ράβδους ελέγχου αντί νερού) αυξάνει η ισχύς. Στις 01:23:40 η ισχύς ανεβαίνει στα  $0,32 \text{ GW}$  και 3s αργότερα στα  $1,4 \text{ GW}$ . Μολονότι επιχειρείται να βυθιστούν εντελώς οι ράβδοι λόγω θερμικών

τάσεων διαστέλλονται και φρακάρουν.

6. Στις 01:23:45 η ισχύς ανεβαίνει στα 3 GW, 2s αργότερα διαρρέει το περίβλημα του πυρηνικού καυσίμου και αμέσως μετά φρακάρουν τα κανάλια ψύξης. Στις 01:24:00 η θερμοκρασία ξεπερνά τους 1100°C, οπότε παράγεται υδρογόνο από την αντίδραση του ζirkονίου του περιβλήματος με το νερό. Επί πλέον λόγω διαρροών ο ατμός φτάνει και αντιδρά με το γραφίτη με αποτέλεσμα την παραγωγή CO. Προφανώς ακολουθεί πυρκαγιά. Από την έκρηξη πέφτει η οροφή του κτιρίου. Καίγεται και ο γραφίτης και διαρρέει στην ατμόσφαιρα ισχυρό ανοδικό ισχυρότατα ραδιενεργό ρεύμα. Πεθαίνουν ακαριαία δύο εργαζόμενοι. Η θερμοκρασία στον ΠΑΙ φθάνει τους 3000°C.

7. Διαρρέουν ευγενή αέρια Kr-85, Xe-135, το 20% του Cs-137 του πυρήνα και το 5% του Sr-89, Sr-90 και Pu-239. Ο γραφίτης καίγεται για 10 μέρες. Συνολική διαρροή ραδιενέργειας  $4 \times 10^{18}$  Bq (400 φορές πάνω από τη βόμβα στη Χιροσίμα).

8. Τη Δευτέρα 28.4 το πρωί στο Σουηδικό ΠΑΙ Fosmark, 1600 km μακριά, διαπιστώνουν διαρροή ραδιενέργειας. Την εντοπίζουν προερχόμενη νότια και υποπτεύονται τον εγγύς Λιθουανικό ΠΗΣ Ignalina. Ζητούν πληροφορίες μέσω της διπλωματικής οδού. Το πρακτορείο ειδήσεων TASS κάνει την πρώτη ανακοίνωση τύπου στις 09:00. Ακολουθεί επίσημη ενημέρωση του ΔΟΑΕ (Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας) στη Βιέννη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κάθε χώρα επιθυμεί να έχει επαρκή και ασφαλή κάλυψη των αναγκών της σε ηλεκτρική ενέργεια με ανταγωνιστικές τιμές και αποδεκτές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επιβάλλεται, επομένως, διερεύνηση όλων των προσφερόμενων πρωτογενών πηγών ηλεκτροπαραγωγής και συγκριτική μελέτη των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που παρουσιάζει η κάθε μία.

Οι ανάγκες των χωρών σε ηλεκτρική ενέργεια αναμένεται να συνεχίσουν να αυξάνονται επί αρκετό χρονικό διάστημα, δημιουργώντας ακόμη και ενεργειακό έλλειμμα σε κάποιες από αυτές. Η κατάσταση αυτή δεν είναι δυνατόν να αποτραπεί ακόμη και μετά την πλήρη αξιοποίηση όλων των συμβατικών και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που ήδη χρησιμοποιούνται. Ειδικά για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ανώτατα όρια χρησιμοποιήσεώς των επιβάλλονται και από την ανελαστικότητα των ωρών λειτουργίας των θερμοηλεκτρικών σταθμών.

Το παραπάνω πρόβλημα καθιστά αναγκαία την αναζήτηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, και ως τέτοιες αναγνωρίζονται (α) οι εισαγωγές μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας, (β) τα εισαγόμενα συμβατικά καύσιμα, και (γ) η πυρηνική ενέργεια. Η πρώτη επιλογή συνεπάγεται εξάρτηση και ανταγωνιστικότητα με τις γειτονικές χώρες, η δεύτερη είναι ενδεχομένως αναπόφευκτη μεσοπρόθεσμη αλλά ρυπογόνος λύση, και η τρίτη, ακόμη και αν γίνει αποδεκτή, απαιτεί 10-15 χρόνια μεταξύ λήψης απόφασης και υλοποίησής της. Σε αντίθεση με την οριακή ενεργειακή επάρκεια, επιθυμητή θα ήταν η ύπαρξη υπερεπάρκειας εγχώριας ηλεκτρικής ενέργειας για ταχύτερη τεχνολογική ανάπτυξη και εξαγωγή. Οι παραπάνω παράγοντες καθιστούν επιβεβλημένη τη σοβαρή εξέταση της πυρηνικής επιλογής και υπεύθυνη αξιολόγηση όλων των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της.

Η πυρηνική ενέργεια μπορεί να προσφέρει ηλεκτρική ενεργειακή επάρκεια, ενεργειακή ασφάλεια καθώς οι πυρηνοληλεκτρικοί σταθμοί ισχύος (ΠΗΣ) μπορούν να αποθηκεύσουν καύσιμο έως 5 έτη, ευελιξία στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αφού η πυρηνική ενέργεια μπορεί εύκολα να αναβαθμιστεί, διαφοροποίηση καυσίμου για ηλεκτροπαραγωγή, μείωση των αερίων θερμοκηπίου αντικαθιστώντας τα ορυκτά καύσιμα, μεγαλύτερες ποσότητες και χαμηλότερο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι ΠΗΣ έχουν υψηλό κόστος κατασκευής (2.500-4.500 ευρώ ανά KW) και χαμηλό κόστος λειτουργίας σε σύγκριση με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ως εκ τούτου, το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικά καύσιμα είναι, περίπου, σταθερό διαχρονικά και ανταγωνιστικό σε σχέση με τις άλλες πρωτογενείς πηγές. Η σχάση ενός U-235 παράγει τόση ενέργεια, όση δύο τόνοι κάρβουνο σε ένα συμβατικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η κοινή γνώμη ανησυχεί για την ασφαλή λειτουργία των ΠΗΣ και, κυρίως, για τον ενδεχόμενο κίνδυνο ατυχημάτων, έστω και αν η πιθανότητα να συμβούν τέτοια ατυχήματα είναι πολύ μικρή. Αντικειμενικός στόχος είναι η μείωση των πιθανών ατυχημάτων τα οποία μπορεί να μολύνουν το εργατικό δυναμικό, το περιβάλλον, ακόμα και τον πληθυσμό. Η ασφαλής λειτουργία ενός ΠΗΣ, μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την

παρεμβολή διαδοχικών <<φραγμών συγκρατήσεως>> των ραδιενεργών υλικών του πυρηνικού καυσίμου ανάμεσα στον πυρηνικό αντιδραστήρα και το περιβάλλον, έτσι ώστε η διασκόρπισή τους στο περιβάλλον να είναι δυνατή μόνο όταν αστοχήσουν διαδοχικά όλοι αυτοί οι φραγμοί. Υπάρχει επίσης σύστημα τηλεχειρισμού για διάφορες λειτουργίες μέσα στην επικίνδυνη περιοχή και γενικά υπάρχει ένα σύστημα ελέγχου υψηλής τεχνολογίας για την πρόληψη ατυχημάτων και αποτροπής τρομοκρατικών ενεργειών. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη σχάση του ουρανίου είναι σχετικά ασφαλής και η σχετική τεχνολογία είναι ώριμη και επαρκώς τεκμηριωμένη. Το ρεκόρ ασφάλειάς της είναι υψηλό και προβλέπεται ότι στο μέλλον θα είναι υψηλότερο λόγω της σημαντικής προόδου που έχει επιτευχθεί τόσο από τεχνολογικής όσο και από θεσμικής πλευράς στα θέματα ασφάλειας, καθώς και της συσσωρευμένης εμπειρίας από τη λειτουργία επί πολλά έτη των ΠΗΣ. Σημειώνεται, εν προκειμένω, ότι σημαντικό ποσοστό του κόστους της πυρηνικής ενέργειας οφείλεται στα επιπρόσθετα μέτρα πρόληψης πιθανών κινδύνων, στην ελαχιστοποίηση της πιθανότητας ατυχήματος, και στην ετοιμότητα αντιμετώπισης των συνεπειών σε περίπτωση ατυχήματος. Επισημαίνεται, ότι το ατύχημα στο Three Mile Island (Η.Π.Α.) είχε μόνο σοβαρές οικονομικές επιπτώσεις (η διαρροή ραδιενέργειας στο περιβάλλον ήταν ελάχιστη) και ότι το ατύχημα στο Chernobyl (πρώην Σοβιετική Ένωση) είναι αδύνατον να συμβεί σε αντιδραστήρες δυτικού τύπου.

Σήμερα κάθε χώρα που έχει αναπτύξει πυρηνική βιομηχανία, αντιμετωπίζει ένα πολύ λεπτό πρόβλημα την ασφαλή διαχείριση των ραδιενεργών πυρηνικών αποβλήτων. Αν και τα ραδιενεργά πυρηνικά απόβλητα είναι επικίνδυνα, η ποσότητα και ο όγκος τους είναι πολύ μικρός. Οι ειδικοί επιστήμονες θεωρούν τα ραδιενεργά πυρηνικά απόβλητα επιστημονικά και τεχνικά καλώς κατανοητά και πρόσφορα για την ασφαλή τους διαχείριση, ενώ τονίζουν την άριστη επιστημονική βάση της τεχνολογίας ανίχνευσης, των μηχανισμών επίδρασης επί των οργανισμών και των συνεπειών της, καθώς και των τρόπων παρακολούθησης των σχετικών ακτινοβολιών. Επισημαίνεται, επίσης, ότι υπάρχουν αρκετές μέθοδοι μείωσης της τοξικότητας των αποβλήτων και απομόνωσής τους από τη βιόσφαιρα και ότι η ραδιενέργειά τους μειώνεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου. Τα πυρηνικά απόβλητα είτε ανακυκλώνονται είτε ενταφιάζονται χωρίς ανακύκλωση. Η πρώτη περίπτωση έχει οικονομικά οφέλη και μειώνει σημαντικά τον όγκο των αποβλήτων, ενέχει όμως τον κίνδυνο χρήσης του παραγόμενου πλουτωνίου για τρομοκρατικές ενέργειες. Σχετικά με τη δεύτερη περίπτωση, οριστικοί χώροι εναπόθεσης πυρηνικών αποβλήτων βρίσκονται σε προχωρημένο στάδιο κατασκευής σε πολλές χώρες. Ουδεμία όμως χώρα διαθέτει σήμερα οριστικούς χώρους εναπόθεσης των πυρηνικών αποβλήτων.

Η χρήση πυρηνικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή από μία χώρα προϋποθέτει τη θέσπιση ενός εθνικού προγράμματος διαχείρισης για την προσωρινή και μόνιμη αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων που θα προέλθουν από τις προτεινόμενες πυρηνικές μονάδες. Η διεθνής αποδοχή αυτού του προγράμματος κρίνεται απαραίτητη. Τονίζεται, εν προκειμένω, ότι η λύση των αποβλήτων να μην επιβάλλεται να είναι εθνική, αλλά είναι θέμα συμφωνίας με τους προμηθευτές του πυρηνικού καυσίμου.

Η πυρηνική ενέργεια ανακαλύφθηκε πριν από λίγες δεκαετίες μόνο και ήδη οι χρήσεις της είναι αμέτρητες. Σήμερα είναι από τις καλύτερες πηγές ελεγχόμενης ενέργειας.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Μ. Γ. Αγγελόπουλου, *Πυρηνική Τεχνολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1984.
2. Δημητρίου Ι. Λεωνίδου, *Εισαγωγή στην Πυρηνική Τεχνολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2000.
3. R. E. Morcom, *Ανόργανη Χημεία*, Εγκυκλοπαίδεια Teach Yourself, Πανεπιστημιακός Τύπος, Αθήνα 1977.
4. David Bodansky, *Nuclear Energy: Principles, Practices, and Prospects*, Second Edition, Springer-Verlag, New York, LLC. 2004.
5. Κ. Μαθιουδάκη, *Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1997.
6. Δ. Λαμπρίδη, Π. Ντοκόπουλου, Γ. Παπαγιάννη, *Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Τόμος Α, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 2006.
7. Stephen J. Charman, *Ηλεκτρικές Μηχανές AC – DC*, 3η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2003.
8. Galen J. Suppes, Truman S. Storvick, *Sustainable Nuclear Power*, Elsevier Inc., U.S.A. 2007.
9. <http://nuclear.ntua.gr/arcas/info/chernobyl.el.html>