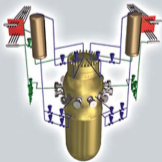


Μ. Αντωνόπουλος - Ντόμης

# Πυρηνική Τεχνολογία

## ασκήσεις +



---

*Κάθε γνήσιο αντίτυπο φέρει την υπογραφή του συγγραφέα*

ISBN 978-960-456-206-0

© Copyright, 2010, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Μ. Αντωνόπουλος-Ντόμης

---

*Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.*

---

**Φωτοστοιχειοθεσία**

**Εκτύπωση**

**Βιβλιοδεσία**

**Π. ΖΗΤΗ & Σια ΟΕ**

18ο χλμ Θεσ/νίκης-Περαίας

Τ.Θ. 4171 • Περαία Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19

Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229 • e-mail: info@ziti.gr



[www.ziti.gr](http://www.ziti.gr)

**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ - ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΘΕΣΗ:**

Αρμενοπούλου 27, 546 35 Θεσσαλονίκη

Τηλ.: 2310.203.720, Fax: 2310.211.305 • e-mail: sales@ziti.gr

**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ - ΕΝΩΣΗ ΕΚΔΟΤΩΝ ΒΙΒΛΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:**

Στοά του Βιβλίου (Πεσμαζόγλου 5), 105 64 Αθήνα • Τηλ.-Fax: 210.3211.097

**ΑΠΟΘΗΚΗ ΑΘΗΝΩΝ - ΠΩΛΗΣΗ ΧΟΝΔΡΙΚΗ:**

Ασκληπιού 60, 114 71 Αθήνα

Τηλ.-Fax: 210.3816.650 • e-mail: athina@ziti.gr

**ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ:** [www.ziti.gr](http://www.ziti.gr)

## Πρόλογος

Το παρόν βιβλίο αποτελεί συμπλήρωμα, στη θεωρία πυρηνικών αντιδραστήρων και στη θωράκιση των ακτινοβολιών, του βιβλίου του γράφοντος “Εισαγωγή στην Πυρηνική Τεχνολογία”, εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2005.

Περιλαμβάνει ασκήσεις στη θεωρία των πυρηνικών αντιδραστήρων. Δεδομένου ότι επιβάλλεται ο σπουδαστής να επιχειρεί μόνος του τη λύση των ασκήσεων, οι λύσεις παρέχονται, ως βοήθημα, στο τέλος του βιβλίου.

Επί πλέον των ασκήσεων (ασκήσεις +), διατυπώνονται θεωρητικά θέματα, που ενδιαφέρουν στην πράξη (συντελεστές  $f$ ,  $p$ ,  $\varepsilon$  σε ετερογενείς διατάξεις, εξαρτήσεις του μήκους διάχυσης  $L$  και του μήκους επιβράδυνσης  $LS$  από τη θερμοκρασία και την πυκνότητα) και γίνονται νέες, απλούστερες, διατυπώσεις θεμάτων (συνθήκη κρισιμότητας, δυναμική των αντιδραστήρων), για παιδαγωγικούς λόγους. Τέλος αναπτύσσεται το θέμα της θωράκισης των ακτινοβολιών, σε γεωμετρίες που εμφανίζονται στην πράξη, καθώς επίσης το θέμα της θωράκισης της καρδιάς αντιδραστήρα. Συγκεκριμένα:

Στο κεφάλαιο I εξετάζονται οι συντελεστές  $f$ ,  $p$ ,  $\varepsilon$  του συντελεστή πολλαπλασιασμού  $k_{\infty}$ , σε ετερογενείς διατάξεις.

Στο κεφάλαιο II περιγράφεται η εξάρτηση του συντελεστή διάχυσης  $D$ , του μήκους διάχυσης  $L$  και του μήκους επιβράδυνσης  $LS$  από την θερμοκρασία και την πυκνότητα. Ακολουθούν ασκήσεις σε ρεύματα νετρονίων, στην εξίσωση και στο μήκος διάχυσης.

Στο κεφάλαιο III διατυπώνεται, με απλό τρόπο, η συνθήκη κρισιμότητας γυμνού, ομογενούς αντιδραστήρα, με μοντέλο μιας ομάδας, και δύο ομάδων νετρονίων. Συμπληρώνεται ο Πίνακας 5.1.1 του βιβλίου, με τον Πίνακα III.1.1, στον οποίο δίνονται οι σχέσεις ισχύος-ροής νετρονίων, για διάφορες γεωμετρίες γυμνού ομογενούς αντιδραστήρα. Δίνονται παραδείγματα υπολογισμού κρισιμότητας. Ακολουθούν ασκήσεις. Εξετάζεται η συνθήκη κρισιμότητας ομογενούς, σφαιρικού, αντιδραστήρα, με άπειρη θωράκιση. Ακολουθούν ασκήσεις.

Στο κεφάλαιο IV διατυπώνονται με απλό, παραστατικό, τρόπο οι χαρακτηριστικές παράμετροι της δυναμικής. Διατυπώνονται, συνοπτικά, τα χαρακτηριστικά του σημειακού μοντέλου. Η επίλυση του βήματος αντιδραστικότητας γίνεται χωρίς τη χρή-

ση του μετασχηματισμού Laplace. Διατυπώνεται η μεταβολή του νετρονικού πληθυσμού μέσα στο ακαριαίο άλμα. Ακολουθούν ασκήσεις.

Συχνά στους υπολογισμούς ακτινοπροστασίας χρειάζεται να υπολογισθεί η ροή φωτονίων  $\gamma$ . Στο κεφάλαιο V.1 εξετάζεται ο υπολογισμός: (α) για ορισμένες απλές πηγές, περιβαλλόμενες από κενό και (β) για απλές πηγές περιβαλλόμενες από υλικό. Στο κεφάλαιο V.2 εξετάζεται η θωράκιση από  $\gamma$ , σε γεωμετρίες που εμφανίζονται στην πράξη και στο κεφάλαιο V.3 εξετάζεται η θωράκιση της καρδιάς αντιδραστήρα. Ακολουθούν ασκήσεις.

Στο κεφάλαιο VI δίνονται οι λύσεις των ασκήσεων.

## Περιεχόμενα

I. Συντελεστής πολλαπλασιασμού $k_{\infty}$ .....	7
I.1 Οι συντελεστές $f, p, \epsilon$ του $k_{\infty}$ σε ετερογενείς διατάξεις .....	7
I.2 Ασκήσεις $f, p, \epsilon$ .....	12
II. Διάχυση και επιβράδυνση νετρονίων .....	15
II.1 Εξάρτηση των $D, L, L_s$ από θερμοκρασία και πυκνότητα .....	15
II.2 Ασκήσεις: ρεύματα .....	17
II.3 Ασκήσεις: Εξίσωση και Μήκος Διάχυσης .....	19
III. Κρισιμότητα .....	23
III.1 Κρισιμότητα γυμνού ομογενούς αντιδραστήρα .....	23
III.2 Ασκήσεις: Κρισιμότητα γυμνού ομογενούς αντιδραστήρα .....	33
III.3 Σφαιρικός-αντιδραστήρας με άπειρο ανακλαστή .....	36
III.4 Ασκήσεις ανακλαστή .....	41
IV. Δυναμική των αντιδραστήρων .....	43
IV.1 Χαρακτηριστικές παράμετροι .....	43
IV.2 Σημειακό μοντέλο αντιδραστήρα. Βήμα αντιδραστικότητας .....	48
IV.3 Ακαριαίο άλμα και συνέχεια .....	56
IV.4 Ασκήσεις: Βήμα αντιδραστικότητας .....	61
V. Θωράκιση .....	63
V.1 Ροή φωτονίων από πηγές $\gamma$ .....	63
V.2 Θωράκιση για ακτινοβολία $\gamma$ .....	67
V.3 Ασκήσεις: θωράκιση για ακτινοβολία $\gamma$ .....	102
V.4 Θωράκιση καρδιάς αντιδραστήρα .....	104
V.5 Ασκήσεις θωράκισης καρδιάς .....	118

VI. Λύσεις των Ασκήσεων .....	121
I.2 Λύσεις ασκήσεων: $f, p, \varepsilon$ .....	121
II.2 Λύσεις ασκήσεων: Ρεύματα .....	127
II.3 Λύσεις ασκήσεων: Εξίσωση και Μήκος Διάχυσης .....	130
III.2 Λύσεις ασκήσεων: Κρισιμότητα γυμνού ομογενούς αντιδραστήρα .....	142
III.4 Λύσεις ασκήσεων: Ασκήσεις ανακλαστή .....	153
IV.4 Λύσεις ασκήσεων: Βήμα αντιδραστικότητας .....	156
V.2 Λύσεις ασκήσεων: Θωράκιση για ακτινοβολία $\gamma$ .....	163
V.4 Λύσεις ασκήσεων: Θωράκιση καρδιάς .....	173

# I Συντελεστής πολλαπλασιασμού $k_\infty$

Εξετάζονται οι συντελεστές  $f$ ,  $p$ ,  $\varepsilon$  του συντελεστή πολλαπλασιασμού  $k_\infty$ .  
Ακολουθούν ασκήσεις.

## I.1 Οι συντελεστές $f$ , $p$ , $\varepsilon$ του $k_\infty$ σε ετερογενείς διατάξεις

### Συντελεστής χρησιμοποίησης $f$

Ο συντελεστής θερμικής χρησιμοποίησης  $f$  ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού θερμικών νετρονίων που απορροφούνται στο καύσιμο, προς τον αριθμό θερμικών νετρονίων που απορροφούνται στην καρδιά. Ισούται με την πιθανότητα απορρόφησης θερμικού νετρονίου στο καύσιμο, υπό την προϋπόθεση ότι απορροφάται στην καρδιά. Οι απορροφήσεις νετρονίων στο καύσιμο, ανά  $s$ , είναι.

$$R_{aF} = \int_{V_F} \Sigma_{aF} \Phi(r) dV = \Sigma_{aF} \bar{\Phi}_F V_F \quad (\text{I.1.1})$$

Όπου  $\Sigma_{aF}$  είναι η μακροσκοπική διατομή απορρόφησης στο καύσιμο,  $\Phi(r)$  η ροή θερμικών νετρονίων στη θέση  $r$ , Lot Like Love Soundtracko όγκος του καυσίμου και η μέση ροή θερμικών  $\bar{\Phi}_F$  στο καύσιμο ορίζεται από την (I.1.1). Οι απορροφήσεις νετρονίων στον επιβραδυντή, ανά  $s$ , είναι.

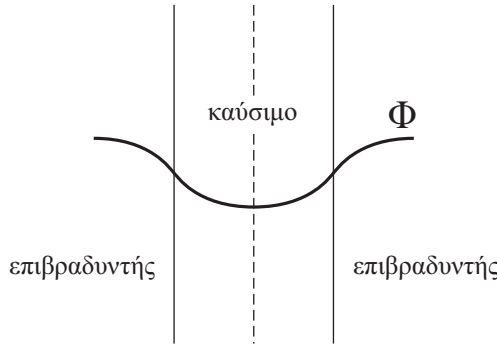
$$R_{aM} = \int_{V_M} \Sigma_{aM} \Phi(r) dV = \Sigma_{aM} \bar{\Phi}_M V_M \quad (\text{I.1.2})$$

Με αυτούς τους ορισμούς ο  $f$  είναι

$$f = \frac{\Sigma_{aF} \bar{\Phi}_F V_F}{\Sigma_{aF} \bar{\Phi}_F V_F + \Sigma_{aM} \bar{\Phi}_M V_M} = \frac{\Sigma_{aF} V_F}{\Sigma_{aF} V_F + \Sigma_{aM} V_M \zeta} \quad (\text{I.1.3})$$

$$\zeta = \bar{\Phi}_M / \bar{\Phi}_F$$

Όπου ο  $\zeta$  ονομάζεται “συντελεστής θερμικού μειονεκτήματος” (*thermal disadvantage factor*). Η ροή των θερμικών στο καύσιμο είναι μικρότερη από την ροή των θερμικών στον επιβραδυντή, όπως παριστάνεται ποιοτικά στο σχήμα I.1.1, διότι η μακροσκοπική διατομή απορρόφησης θερμικών νετρονίων του καυσίμου είναι μεγαλύτερη από αυτήν του επιβραδυντή. Κατά συνέπεια ο  $\zeta$  είναι μεγαλύτερος τη μονάδα.



Σχήμα I.1.1

Στη σχέση (I.1.3) συμβάλλει μόνο ο επιβραδυντής. Στην πράξη συμπεριλαμβάνεται και η συμβολή και των άλλων υλικών της καρδιάς, όπως το μεταλλικό περίβλημα των ράβδων του καυσίμου. Οι ροές  $\bar{\Phi}_M$ ,  $\bar{\Phi}_F$  υπολογίζονται με ακρίβεια μόνο με αριθμητικές μεθόδους.

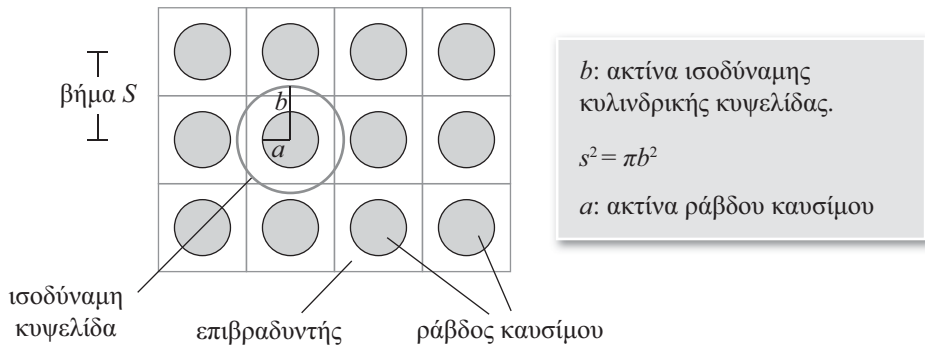
Σε ομογενή αντιδραστήρα είναι  $\bar{\Phi}_M = \bar{\Phi}_F$  και  $\zeta = 1$ , οπότε ο  $f$  είναι

$$f_{\text{ομογενούς}} = \frac{\Sigma_{aF} V_F}{\Sigma_{aF} V_F + \Sigma_{aM} V_M} > f_{\text{ετερογενούς}} \quad (\text{I.1.4})$$

διότι στον ετερογενή είναι  $\zeta > 1$ .

Προσεγγιστικοί υπολογισμοί έχουν ως εξής. Άπειρο δικτύωμα (lattice) ράβδων καυσίμου επιμερίζεται σε “κυψελίδες” καυσίμου-επιβραδυντή, όπως στο σχήμα I.1.2.





**Σχήμα I.1.2**

Οι υπολογισμοί γίνονται σε ισοδύναμες κυλινδρικές κυψελίδες που έχουν τον ίδιο όγκο με τις μη κυλινδρικές κυψελίδες καυσίμου-επιβραδυντή (μέθοδος Wigner-Seitz). Ο  $f$  συνήθως εκφράζεται ως

$$\frac{1}{f} = \frac{\sum_{aM} V_M}{\sum_{aF} V_F} F + E. \tag{I.1.5}$$

Όπου οι  $F, E$  ονομάζονται “συναρτήσεις δικτύωματος” (lattice functions). Στους απλούστερους υπολογισμούς γίνεται η υπόθεση ισχύος της θεωρίας διάχυσης, τόσο στον επιβραδυντή, όσο και στο καύσιμο, οπότε, αν  $a$  είναι η ακτίνα του καυσίμου και  $b$  η ακτίνα της ισοδύναμης κυλινδρικής κυψελίδας, οι παράμετροι  $x, y, z$  ορίζονται ως.

$$x = a / L_F, \quad y = a / L_M, \quad z = b / L_M \tag{I.1.6}$$

Όπου  $L_F, L_M$  είναι τα μήκη διάχυσης καυσίμου, επιβραδυντή αντίστοιχα. Οι  $F, E$  υπολογίζονται από τις σχέσεις.

$$F(x) = \frac{x I_0(x)}{2 I_1(x)} \tag{I.1.7}$$

$$E(y, z) = \frac{z^2 - y^2}{2y} \left[ \frac{I_0(y) K_1(z) + K_0(y) I_1(z)}{I_1(z) K_1(y) - K_1(z) I_1(y)} \right] \tag{I.1.8}$$

Όπου  $I_n, K_n$  είναι οι μετασχηματισμένες συναρτήσεις Bessel. Οι σχέσεις (I.1.7), (I.1.8) δίνουν ικανοποιητική ακρίβεια αν  $a \ll b$ , όπως συμβαίνει στους αερίωψυκτους αντιδραστήρες με επιβραδυντή γραφίτη, όπου ο επιβραδυντής έχει πολύ μεγαλύτερο όγκο από το καύσιμο. Για αντιδραστήρες με επιβραδυντή νερό, όπου ο όγκος

του νερού είναι του ίδιου περίπου μεγέθους με τον όγκο του καυσίμου, οι σχέσεις αυτές δίνουν χονδρικές εκτιμήσεις. Για τιμές των  $x, y, z$  μικρότερες από 0,75, δίνουν καλή προσέγγιση οι σχέσεις,

$$F(x) = 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{x}{2} \right)^2 - \frac{1}{12} \left( \frac{x}{2} \right)^4 + \frac{1}{48} \left( \frac{x}{2} \right)^6 - \dots \quad (\text{I.1.9})$$

$$E(y, z) = 1 + \frac{z^2}{2} \left[ \frac{z^2}{z^2 - y^2} \ln \left( \frac{z}{y} \right) - \frac{3}{4} + \frac{y^2}{4z^2} \right] \quad (\text{I.1.10})$$

**Παράδειγμα I.1.1:** Η καρδιά αντιδραστήρα γραφίτη-φυσικού ουρανίου έχει τετραγωνικό δικτύωμα με βήμα 25 cm και διάμετρο ράβδου καυσίμου  $a=1$  cm. Να βρεθεί ο  $f$  γραφίτης:  $\Sigma_{aM} = 0,0002728 \text{ cm}^{-1}$ , φυσικό ουράνιο:  $\Sigma_{aF} = 0,3668 \text{ cm}^{-1}$ .

Η ακτίνα  $b$  της ισοδύναμης κυψελίδας είναι

$$\pi b^2 = 25^2 \rightarrow b = 14,1 \text{ cm}$$

$$x = 1/1,55 = 0,645, \quad y = 1/59 = 0,017, \quad z = 14,1/59 = 0,239.$$

Είναι  $x, y, z < 0,75$ , οπότε οι συναρτήσεις δικτυώματος  $F, E$  υπολογίζονται από τις (I.1.9) και (I.1.10).

$$F(0,645) = 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{0,645}{2} \right)^2 - \frac{1}{12} \left( \frac{0,645}{2} \right)^4 = 1,0529$$

$$E(0,017, 0,239) = 1 + \frac{0,239^2}{2} \left[ \frac{0,239^2}{0,239^2 - 0,017^2} \ln \left( \frac{0,239}{0,017} \right) - \frac{3}{4} + \frac{0,017^2}{4 \cdot 0,239^2} \right] \\ = 0,9924.$$

$$\text{Είναι } \frac{V_M}{V_F} = \frac{b^2 - a^2}{a^2} = \frac{14,1^2 - 1^2}{1^2} = 198,8.$$

Οπότε, από την (I.1.5) προκύπτει

$$\frac{1}{f} = \frac{\Sigma_{aM}}{\Sigma_{aF}} \frac{V_M}{V_F} F + E = \frac{0,0002728}{0,3668} \cdot 198,8 \cdot 1,0529 + 0,9924 = 1,148$$

$$f = 0,87.$$

## Πιθανότητα διαφυγής εκλεκτικής απορρόφησης $p$

Υπάρχουν αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της  $p$ . Από πειραματικές μετρήσεις προκύπτει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προσεγγιστική σχέση.

$$p = \exp\left(-\frac{N_F I}{\xi_M \Sigma_{SM}} \cdot \frac{V_F}{V_M}\right). \quad (I.1.11)$$

Όπου η παράμετρος  $I$  ονομάζεται “ολοκλήρωμα συντονισμού” (*resonance integral*),  $\xi_M \Sigma_{SM}$  είναι η ικανότητα επιβράδυνσης (κεφάλαιο 2.8),  $N_F$  είναι η πυκνότητα ατόμων καυσίμου σε μονάδες  $10^{24}$ ,  $V_F$  και  $V_M$  είναι οι όγκοι καυσίμου και επιβραδυντή, αντίστοιχα. Καλή προσέγγιση για την τιμή του  $I$ , για κυλινδρικές ράβδους καυσίμου, δίνει η εμπειρική σχέση

$$I = A + C / \sqrt{a\rho} \quad (I.1.12)$$

όπου  $a$  είναι η ακτίνα της ράβδου καυσίμου σε cm,  $\rho$  η πυκνότητα του καυσίμου  $\text{g/cm}^3$  και οι μετρημένες τιμές των σταθερών  $A$  και  $C$  του πίνακα I.1.1 δίνουν το  $I$  σε barns. Μολονότι οι τιμές του πίνακα είναι για U-238 και Th-232 μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για ελαφρώς εμπλουτισμένο ουράνιο και για θόριο που περιέχει μικρή ποσότητα U-233, αφού το μέγιστο ποσοστό ατόμων θα είναι U-238 στο ουράνιο και Th-232 στο θόριο με U-233.

**Πίνακας I.1.1**

καύσιμο	A	C
$^{238}\text{U}$ (μέταλλο)	2,8	38,3
$^{238}\text{UO}_2$	3,0	39,6
$^{232}\text{Th}$ (μέταλλο)	3,9	20,9
$^{232}\text{ThO}_2$	3,4	24,5

W. G. Pettus and M. N. Baldwin, Babcock and Wilcox Company reports BAW-1244, 1962 and BAW-1286, 1963.

**Παράδειγμα I.1.2:** Για τον αντιδραστήρα γραφίτη-φυσικού ουρανίου, με ακτίνα ράβδου καυσίμου  $a=1$  cm και  $V_M/V_F=198,8$ , να υπολογισθεί η  $p$  (φυσικό ουράνιο: πυκνότητα  $\rho=19,1$   $\text{g/cm}^3$ ,  $N_F=0,0483 \cdot 10^{24}$   $\text{cm}^{-3}$ , γραφίτης:  $\xi \Sigma_{aM}=0,0608$   $\text{cm}^{-1}$ ).

Από τον πίνακα I.1.1, για φυσικό ουράνιο  $A=2,8$  και  $C=38,3$ .

$$I = 2,8 + \frac{38,3}{\sqrt{1 \cdot 19,1}} = 11,56 b$$

$$p = \exp\left(-\frac{0,0483 \cdot 11,56}{0,0608 \cdot 198,8}\right) = 0,9548.$$

## Συντελεστής $\varepsilon$

Από πειραματικές μετρήσεις προκύπτει ότι:

- α) όταν αυξάνεται ο λόγος  $V_F/V_M$  του όγκου καυσίμου προς τον όγκο του επιβραδυντή, αυξάνεται το  $\varepsilon$ , διότι αυξάνεται η πιθανότητα σύγκρουσης ταχέως νετρονίου με πυρήνα ουρανίου, πριν πέσει η ενέργεια του νετρονίου, λόγω σκέδασης με πυρήνα του επιβραδυντή, κάτω από το ενεργειακό κατώφλι σχάσης. Για αύξηση του λόγου  $V_F/V_M$  από 0,5 σε 1,5, το  $\varepsilon$  αυξάνεται από 1,05 σε 1.12 περίπου.
- β) το  $\varepsilon$  δεν είναι ευαίσθητο σε μεταβολές της ακτίνας της ράβδου καυσίμου.

## I.2 Ασκήσεις

**1.** Σε ομογενές μείγμα φυσικού ουρανίου και γραφίτη, με αναλογία ατόμων γραφίτη  $N_m$  προς φυσικό ουράνιο  $N_u$ ,  $N_m / N_u = 400$ , να βρεθεί ο συντελεστής θερμικής χρησιμοποίησης  $f$ . Για θερμικά νετρόνια οι μικροσκοπικές διατομές απορρόφησης φυσικού ουρανίου και γραφίτη είναι  $7,42 b$  και  $0.0045 b$ , αντίστοιχα.

**2.** Να υπολογιστεί ο συντελεστής “ $\eta$ ” για φυσικό ουράνιο σε θερμοκρασία δωματίου, στην οποία είναι

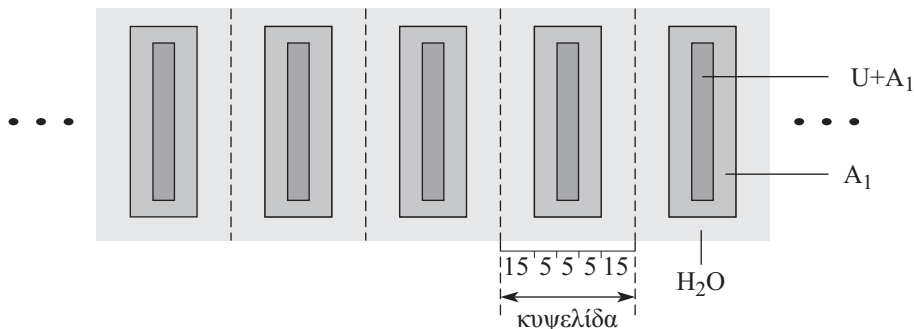
$$\text{U-235: } \sigma_{f235} = 568 b, \quad \sigma_{a235} = 666 b$$

$$\text{U-238: } \sigma_{a238} = 2.70 b$$

Λόγος ατόμων  $N_{238}/N_{235} = 138$ .

**3.** Σε πειραματικό αντιδραστήρα τα στοιχεία καυσίμου είναι λεπτά φύλλα (“meat”) μείγματος ουρανίου και αλουμινίου σε αναλογία 150 άτομα αλουμινίου για κάθε άτομο ουρανίου. Ο εμπλουτισμός του ουρανίου είναι  $e=0,90$ . Κάθε φύλλο καυσίμου περιβάλλεται με περίβλημα (clad) κράματος αλουμινίου, όπως στο σχήμα. Το πάχος του περιβλήματος είναι 5 mm, το πάχος του μείγματος ουρανίου-αλουμινίου είναι 5 mm και το εύρος του καναλιού του νερού είναι 15 mm. Να υπολογισθούν:

- α) οι πυκνότητες ατόμων στην ισοδύναμη ομογενοποιημένη κυψελίδα και  
 β) το  $k_{\infty}$ , υποθέτοντας  $\epsilon = \rho = 1$ .



4. Αντιδραστήρας ταχέων νετρονίων συγκροτείται από ράβδους ουρανίου και υγρού νατρίου. Το ουράνιο καταλαμβάνει το 40% του όγκου της καρδιάς και έχει εμπλουτισμό  $e = 25\%$ . Να υπολογισθούν:

α) ο συντελεστής χρησιμοποίησης  $f$ , β) το  $\eta$  και γ) το  $k_{\infty}$ .

Να ληφθούν: για U-235  $\sigma_{a5} = 1,65 b$   $\sigma_{f5} = 1,4 b$   $\nu_5 = 2,6 = \nu$   
 για U-238  $\sigma_{a8} = 0,255 b$   $\sigma_{f8} = 0,095 b$   $\nu_8 = 2,6 = \nu$   
 για Na  $\sigma_{aNa} = 0,008 b$

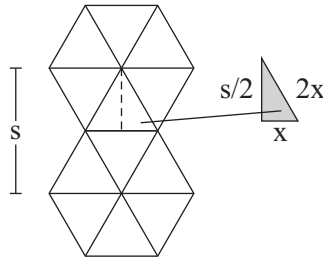
5. Αντιδραστήρας ταχέων νετρονίων συγκροτείται από μείγμα πλουτωνίου, 3% κατά βάρος, και υγρού νατρίου. Να βρεθεί ο συντελεστής χρησιμοποίησης καυσίμου και το  $k_{\infty}$ .

Ονομαστικές σταθερές μιας ομάδας νετρονίων για αντιδραστήρα ταχέων νετρονίων

Στοιχείο ή ισότοπο	$\sigma_{\gamma}$	$\sigma_f$	$\sigma_a$	$\sigma_{tr}$	$\nu$	$\eta$
Na	0,0008	0	0,0008	3,3	—	—
Al	0,002	0	0,002	3,1	—	—
Fe	0,006	0	0,006	2,7	—	—
$^{235}\text{U}$	0,25	1,4	1,64	6,8	2,6	2,2
$^{238}\text{U}$	0,16	0,095	0,255	6,9	2,6	0,97
$^{239}\text{Pu}$	0,26	1,85	2,11	6,8	2,98	2,61

\* From Reactor Physics Constants, U.S. Atomic Energy Commission Report ANL-5800, 2ND Ed., 1963.

- 6.** Η καρδιά αντιδραστήρα φυσικού ουρανίου-νερού συγκροτείται από δικτύωμα ράβδων καυσίμου ακτίνας  $R=0,75$  cm, σε δικτύωμα τετραγωνικών κυψελίδων βήματος 2.8 cm. Να υπολογισθούν:
- ο συντελεστής θερμικής χρησιμοποίησης  $f$
  - η πιθανότητα διαφυγής της εκλεκτικής απορρόφησης  $p$ ,
  - το  $k_{\infty}$  με  $\varepsilon=1.05$  και  $\eta=1,32$ .  
(φυσικό ουράνιο:  $L_F = 1,55$  cm,  $\Sigma_{aF} = 0,3668$  cm<sup>-1</sup>,  $N_F = 0,0483 \cdot 10^{24}$  cm<sup>-3</sup>, νερό:  $L_M = 2,85$  cm  $\Sigma_{aM} = 0,0222$  cm<sup>-1</sup>,  $\rho = 19,1$  g / cm<sup>3</sup>,  $\xi_M \Sigma_M = 1,46$ )
  - το  $k_{\infty}$  για εμπλουτισμό  $e=3\%$  (από πίνακες  $\nu_5 = 2,42$ ,  $\sigma_{f5} = 582b$ ,  $\sigma_{a5} = 681b$ ,  $\sigma_{a8} = 2,7b$ ).
- 7.** Η καρδιά συγκροτείται από εξαγωνικό δικτύωμα κυψελίδων όπως στο σχήμα με βήμα  $s=20$  cm. Οι ράβδοι, ακτίνας  $R=1,4$  cm, φυσικού ουρανίου είναι στο κέντρο κάθε κυψελίδας και ο επιβραδυντής είναι γραφίτης.



- να βρεθεί η ακτίνα της ισοδύναμης κυλινδρικής κυψελίδας
- να βρεθεί το  $k_{\infty}$  (με  $\varepsilon=1.03$ ,  $\eta=1.32$ ). Για γραφίτη:  $\Sigma_{aM} = 0.0002728$  cm<sup>-1</sup>, για φυσικό ουράνιο:  $\Sigma_{aF} = 0.3668$  cm<sup>-1</sup>.