



ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

**NÖTRON MODERASYON
MEKANİZMASI**

İLERİ NÖTRON VE REAKTÖR FİZİĞİ
PROF. DR. HALUK YÜCEL

3. Nötron Moderasyonu

3.1. Letarji: Ortalama Logaritmik Enerji Azalması:

Fisyon nötronlarının ortalama 2 MeV enerjilerinden termal nötron (0.025 eV) enerji aralığına kadar tamamıyla kapsayacak logaritmik skala, lineer enerji akması yerine kullanmak reaktör fiziğinde daha uygun olduğundan; U harfi ile temsil edilebilecek "letarji" değişkeni kullanılır ve tanım olarak,

$$u = \ln \left(\frac{E^*}{E} \right) \dots\dots\dots (1)$$

Burada, E^* referans enerji değeri, 10 MeV civarında kabul edilir ve bu değerin üstünde enerjiye sahip nötron mevcut değildir. (1) eşitliğine göre, nötronların enerjisi azaldıkça letarjileri artar.

Çarpışma başına letarji değişimi : Δu

$$\begin{aligned}\Delta u &= \ln \left(\frac{E^*}{E'} \text{ çarpışmadan sonra} \right) - \ln \left(\frac{E^*}{E} \text{ çarpışmadan önce} \right) \\ &= \ln \left(\frac{E_0 \text{ çarpışmadan önce}}{E' \text{ çarpışmadan sonra}} \right) = \ln \left(\frac{E_0}{E'} \right) \\ &= \ln \left(\frac{1}{2} (1 + \alpha) + (1 - \alpha) \cdot \text{Cos}\theta \right)^{-1} \\ &= \text{Fonksiyon (A, } \theta) \dots\dots\dots (2)\end{aligned}$$

Δu , çarpışma başına letarji; nötronun ilk enerjisinden bağımsız ve sadece ortamdaki atomun kütle numarasının ve kütle merkezi saçılma açısının bir fonksiyonudur.

Ortalama Logaritmik Enerji Azalması : ξ

Etkileşmeye giren nötronların $E_0 \rightarrow E'$ ve $E' + dE$ enerji aralığında; bütün mümkün saçılma açıları üzerinden ortalama alınarak,

$$\xi = \int_{E_0}^{E'} \ln \left(\frac{E_0}{E'} \right) \cdot P(E_0 \rightarrow E') \cdot dE' \dots\dots\dots (3)$$

Ortalama logaritmik enerji azalması tarif edilir. Bu ifade de $P(E_0 \rightarrow E') \cdot dE'$ saçılan nötronların enerji dağılım fonksiyonu ve $P(E_0 \rightarrow E') \cdot dE' = \frac{dE'}{E_0(1-\alpha)}$ dir.

Ortalama Logaritmik Enerji Azalması : ξ

$$\xi = \int_{E_0}^{\alpha E_0} \ln \left(\frac{E_0}{E'} \right) \cdot \frac{dE'}{E_0(1-\alpha)} = \frac{1}{(1-\alpha)} \cdot \int_1^{\alpha} \ln x \cdot dx$$

Burada $x = \frac{E'}{E_0}$, $\alpha = \left(\frac{(A-1)}{(A+1)} \right)^2$ ve integralin sonucu ortalama logaritmik enerji azalmasını verir:

Ortalama Logaritmik Enerji Azalması : ξ

$$\xi = 1 + \frac{\alpha \cdot \ln \alpha}{1 - \alpha} \cdot \ln \alpha \dots\dots\dots (4)$$

$$\xi \cong 2 \left(\frac{A + 2}{3} \right) \quad A > 10 \text{ için } \dots\dots\dots (5)$$

$$\xi = 1 - \left(\frac{(A - 1)^2}{2A \cdot \ln \left(\frac{A + 1}{A - 1} \right)} \right) \quad A < 10 \text{ için } \dots (6)$$

Ortalama Logaritmik Enerji Azalması : $\bar{\xi}$

Soğurulmanın olmadığı çekirdekler moleküler halde (D_2O gibi) kullanılır, bu durumda, $\bar{\xi}$ nin ortalama değeri için;

$$\bar{\xi} = \frac{(\xi_1 \cdot \sigma_{s_1} + \xi_2 \cdot \sigma_{s_2} + \dots + \xi_i \cdot \sigma_{s_i})}{(\sigma_{s_1} + \sigma_{s_2} + \dots + \sigma_{s_i})} \dots \dots \dots (7) \text{ifadesi}$$

elde edilir.

Burada,

σ_s : Karışımdaki herhangi bir çekirdeğin mikroskobik saçılma tesir kesitini gösterir.

Örnek Hesap

Ağır su (D₂O) moderator içerisinde nötronların ortalama logaritmik enerji kaybı.

Döteryum:

$$\alpha_D = [(A - 1)/(A + 1)]^2 = 1/9$$

$$\xi_D = 1 + \left(\frac{\alpha \cdot \ln \alpha}{(1 - \alpha)} \right) \ln \alpha = 0,1209$$

Oksijen:

$$\xi_{O_2} = 2/(A + 2/3) = 2/16,66 = 0,1209$$

Ağır su:

$$\xi_{D_2O} = \left(\frac{\xi_D \sigma_S^D + \xi_{O_2} \sigma_S^{O_2}}{\sigma_S^D + \sigma_S^{O_2}} \right)$$

$$\xi_{D_2O} = 0,58$$

(veri σ_S (döteryum) = 7 barn, σ_S (oksijen) = 4,2 barn)

3.2. Moderatör Karakteristikleri

Nötronun değişik moderator ortamlarında termalize olması için yapacağı çarpışma sayısı, ξ ortalama logaritmik enerji azalım değeri kullanılarak hesaplanabilir. Bunun için; Fisyondan çıkan $E_0=2$ MeV enerjili bir nötron $E_0 = 0.025$ eV termal enerjiye ulaşması için yapması gereken çarpışma sayısı: Ortalama çarpışma sayısı = $\ln (E_0/E) / \xi = \ln (2 \times 10^6 / 0.025) / \xi = 18,2 / \xi$

3.2. Moderatör Karakteristikleri

Hidrojenli bir ortamda ($\langle v \rangle = 0$ ve 1) ortalama 18 çarpışma sonrası bir fisyon nötronu termalize olur. Ağır elementler için bu sayı çok büyüktür. Örnek olarak U-238 çekirdeğine çarpan bir nötron 2000 civarında çarpışma yapması gerekmektedir. Hafif elementlerin, nötron moderasyonunda tercihli olarak kullanılmasının ana sebeplerinden birisi yukarıda açıklanan husustur.

3.2. Moderatör Karakteristikleri

Yavaşlatıcı Malzemelerin Moderasyon Oranı ve Yavaşlatma Gücü: Moderator malzemelerinin, reaktör fiziği açısından en belirleyici özelliğinin "yüksek saçılma tesir kesitine ve düşük soğurma tesir kesitine" sahip olmasıdır. Bu özelliğe göre, moderator malzemelerinin belirlenmesinde faydalı iki nicelik tanımlanır. Bunlar;

$$\text{Moderatörün Yavaşlatma Gücü} = \xi \Sigma_s$$

$$\text{Moderasyon Oranı} = \xi \Sigma_s / \Sigma_a$$

Burada Σ_s : Makroskobik saçılma tesir kesiti

Σ_a : Makroskobik absorpsiyon tesir kesiti

3.2. Moderatör Karakteristikleri

Sonuç olarak, iyi bir moderatör, yüksek moderasyon oranına sahip olmalıdır. Çeşitli moderatör malzemeleri için tipik değerler Tablo-1 de görüldüğü şekildedir.

Tablo 1- Bazı Moderatör Malzemeleri İçin Karakteristik Değerler

Moderatör	ξ	Yavaşlatm a Gücü $\xi\Sigma_s$	Yavaşlatm a Oranı $\xi\Sigma_s/\Sigma_a$	Termalize Olmak için Çarpışma Sayısı
Hafif Su	0.95	1.28	58	19
Ağır Su	0.51	0.18	21000	36
Grafit	0.1589	0.065	200	114
Berilyum	0.2078	0.16	130	86

Yukarıdaki tablo, ağır suyun diğer malzemelerden daha iyi moderatör olduğunu göstermektedir. Ancak 1 kg ağır su fiyatı, yaklaşık 120 \$ dır.