

T.C.  
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

112669

(D,T) FÜZYON NÖTRONLARINA MARUZ BIRAKILAN  
ÇEŞİTLİ NÜKLEER YAKIT VE MALZEMELERİN  
NÖTRONİK ANALİZİ

MURAT GÖKÇEK

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

112669

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN: Prof. Dr. Hüseyin YAPICI

Temmuz 2001

Fen Bilimleri Enstitüsüne;

Bu çalışma jürimiz tarafından MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan

: Prof. Dr. Hüseyin YAPICI

Üye

: Doç. Dr. Selim KOSAK

Üye

: Yrd. Doç. Dr. Mustafa Bayrak

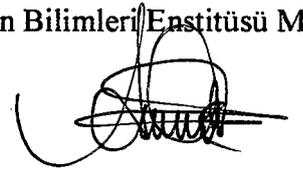
ONAY:

Bu tez, 27.07.2001 tarihinde, Enstitü Yönetim Kurulu'nca belirlenmiş olan jüri üyeleri tarafından uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulunun kararıyla kabul edilmiştir.

07.08/2001

Doç. Dr. Aydın TOPÇU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



## ÖZET

# (D,T) FÜZYON NÖTRONLARINA MARUZ BIRAKILAN ÇEŞİTLİ NÜKLEER YAKIT VE MALZEMELERİN NÖTRONİK ANALİZİ

GÖKÇEK, Murat

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin YAPICI

Temmuz 2001, 80 sayfa

Bu çalışmada, füzyon sürücülü hibrid reaktör modeli ele alınarak, nükleer reaktörlerde kullanılan çeşitli moderatör, yakıt, yapı ve diğer malzemelerin (D,T) füzyon nötronları karşısındaki nötronik analizi araştırılmıştır. Bu amaçla, Au, Al, Pb, B, C, K, Mg, Na, Be, BeF<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O, tabii lityum, Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>, LiH, LiF, Th, tabii uranyum, ThO<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub>, UC, UF<sub>4</sub>, U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> gibi malzemeler seçilmiştir. Nötronik analiz için, 1.3 cm kalınlığında SS-304 çeliği, 20 cm kalınlığında incelenen malzemenin oluşturduğu katman ve yine 1.3 cm kalınlığında SS-304 çeliğinden oluşturulan silindirik blanket, füzyon plazma bölgesini çevrelemektedir. Malzemeler iki çelik duvar arasına yerleştirilerek, yüksek enerjili (14.1 MeV) füzyon nötronları ile etkileşime maruz bırakılmıştır. Nötronik hesaplamalar, XSDRN ve ANISN nötron transport kod programları kullanılarak yapılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Füzyon, hibrid reaktör, nötronik analiz.

## SUMMARY

# THE NEUTRONIC ANALYSIS OF SOME NUCLEAR FUELS AND MATERIALS EXPOSED TO (D,T) FUSION NEUTRONS

GÖKÇEK, Murat

Niğde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hüseyin YAPICI

July 2001, 80 pages

In this study, by using fusion driven hybrid reactor model, the analysis of a moderator, fuel, structure and etc. which are employed in the nuclear reactors against the fusion neutrons have been investigated. For this purpose, Au, Al, Pb, B, C, K, Mg, Na, Be, BeF<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O, natural lithium, Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>, LiH, LiF, Th, natural uranium, ThO<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub>, UC, UF<sub>4</sub>, U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> have been employed. For neutronic analysis, the fusion plasma region which has a 20 cm thickness is surrounded by a cylindrical blanket of SS-304 steel which has thickness of 1.3 cm. In this way, the materials were exposed to a high energy 14.1 MeV fusion neutrons. The neutronic calculations have been carried out by using XSDRN and ANISN neutron transport codes.

Key Words: Fusion, hybrid reactor, neutronic analysis.

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım sayın Prof.Dr. Hüseyin YAPICI'ya, her türlü yardımını esirgemeyen Yrd.Doç.Dr. Mustafa BAYRAK'a, Yrd.Doç.Dr. Nurettin AKÇAKOYUN'a ve hayatım boyunca maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen her zaman bana destek olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET .....	iii
SUMMARY .....	iv
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
BÖLÜM I. GİRİŞ .....	1
BÖLÜM II. TEMEL KAVRAMLAR .....	6
2.1. Nükleer Enerji .....	6
2.2. Hibrid Reaktörler .....	6
2.3. Füzyon ve Füzyon Reaksiyonları .....	7
2.3.1. Füzyonun tanımı .....	7
2.3.2. Temel füzyon reaksiyonları .....	9
2.3.3. Hidrojen füzyonu .....	12
2.3.4. Manyetik çevrelemeli füzyon .....	15
2.3.5. Atalet çevrelemeli füzyon .....	15
2.3.6. Füzyon yakıtları .....	16
2.4. Filyon ve Filyon Reaksiyonları .....	17
2.4.1. Filyon reaksiyonu .....	17
2.4.2. Filyon yakıtları .....	23
2.5. Nötronların Moderasyonu .....	24
2.5.1. Nükleer tesir kesitleri .....	26
2.5.2. Çekirdek etkileşme çeşitleri .....	27
2.5.3. Nötron üretilme reaksiyonları .....	28
2.5.4. Elastik saçılma ile enerji kaybı .....	28
2.5.5. Ortalama logaritmik enerji kaybı .....	31
2.6. Nükleer Reaktör Malzemeleri .....	32

2.6.1. Uranyum.....	32
2.6.2. Toryum.....	33
2.6.3. Hafif su.....	34
2.6.4. Ağır su.....	35
2.6.5. Karbon.....	35
2.6.6. Berilyum.....	36
2.6.7. Bor .....	36
2.6.8. Flibe .....	36
2.6.9. Alüminyum.....	36
2.6.10. Magnezyum .....	37
2.6.11. Tabii lityum .....	37
2.6.12. Sodyum .....	37
2.6.13. Kurşun.....	37
2.6.14. Altın .....	38
<b>BÖLÜM III. MATERYAL ve METOT.....</b>	<b>39</b>
<b>BÖLÜM IV. NÜMERİK SONUÇLAR.....</b>	<b>42</b>
<b>BÖLÜM V. SONUÇLAR.....</b>	<b>75</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>76</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>78</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Dünyada nükleer güç santrali kullanan ülkeler .....	5
Çizelge 2.1. Uygun füzyon reaksiyonları .....	12
Çizelge 2.2. Uranyumun doğal izotopları .....	33
Çizelge 3.1. Kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları .....	41



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Dünyanın enerji tüketimi .....	1
Şekil 2.1. Maddenin gaz ve plazma hali.....	8
Şekil 2.2. Döteryum-trityum füzyonunun temsili resmi .....	13
Şekil 2.3. Döteryum-döteryum füzyonunun temsili resmi.....	14
Şekil 2.4. Atalet çevrelemeli füzyonun aşamaları .....	16
Şekil 2.5. Tanecik başına bağ enerjisinin kütle numarası ile değişimi .....	19
Şekil 2.6. Fisyon reaksiyonu .....	20
Şekil 2.7. Fisyon aşamaları.....	20
Şekil 2.8. Fisyon uğramış çekirdeklerin potansiyel enerjisinin mesafeye bağlı olarak değişimi.....	22
Şekil 2.9. $^{235}\text{U}$ 'in nötron absorpsiyonu ile fisyonu .....	22
Şekil 2.10. Hedef alan üzerine gelen nötronlar .....	26
Şekil 2.11. a) Laboratuvar sistemi b) Kütle merkezi sistemi.....	29
Şekil 2.12. Olasılık yoğunluk fonksiyonu.....	31
Şekil 3.1. Nötronik hesaplarda kullanılan blanketin kesit görünüşü .....	40
Şekil 4.1. Blankette kullanılan farklı malzemelerin füzyon nötronu için (n,2n) nötron çoğalımının blanket yarıçapına göre değişimi .....	46
Şekil 4.2. Blankette kullanılan farklı malzemelerin füzyon nötronu için (n,3n) nötron çoğalımının blanket yarıçapına göre değişimi .....	47
Şekil 4.3. Blankette kullanılan çeşitli malzemelerin füzyon nötronu için blanket yarıçapına bağlı olarak trityum üretimi.....	48
Şekil 4.4. Çeşitli malzemelerde füzyon nötronu için (n, $\gamma$ ) reaksiyonunun blanket yarıçapına göre değişimi .....	49
Şekil 4.5. Blankette kullanılan çeşitli malzemelerin füzyon nötronu için inelastik tesir kesitlerinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	50
Şekil 4.6. Blankette kullanılan farklı malzemelerde füzyon nötronu için oluşan fisyonun blanket yarıçapına göre değişimi.....	51
Şekil 4.7. Au'nun füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	52

Şekil 4.8. Al'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	53
Şekil 4.9. BeF <sub>2</sub> 'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	54
Şekil 4.10. Be'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi.....	55
Şekil 4.11. Bor'un füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	56
Şekil 4.12. D <sub>2</sub> O'nun füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi.....	57
Şekil 4.13. Flibe'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	58
Şekil 4.14. H <sub>2</sub> O'nun füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	59
Şekil 4.15. C'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	60
Şekil 4.16. Pb'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	61
Şekil 4.17. LiF'in füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	62
Şekil 4.18. LiH'in füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	63
Şekil 4.19. Tabii lityumun füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi.....	64
Şekil 4.20. Mg'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	65
Şekil 4.21. K'nın füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	66
Şekil 4.22. Na'nın füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	67
Şekil 4.23. ThO <sub>2</sub> 'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	68
Şekil 4.24. Th'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	69

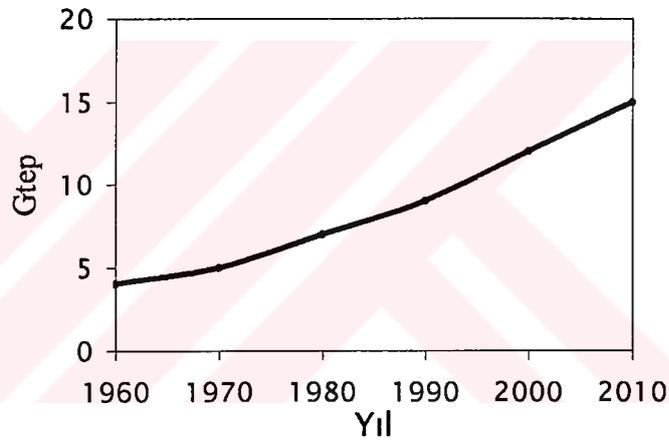
Şekil 4.25. $U_3O_8$ 'in füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	70
Şekil 4.26. UC'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	71
Şekil 4.27. $UF_4$ 'ün füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	72
Şekil 4.28. $UO_2$ 'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi .....	73
Şekil 4.29. Tabii uranyumun füzyon nötronu için toplam tesir kesitinin ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi.....	74



## BÖLÜM I

### GİRİŞ

Enerjinin, ülkelerin endüstrileşerek kalkınma sürecinin en dinamik ögesi olduğu bilinmektedir. Ülkeler arasındaki gelişmişlik düzeyi kıyaslamalarında, yılda kişi başına tüketilen birincil enerji ve elektrik enerjisi miktarlarının önemli bir parametre olduğu kabul edilmektedir (Demirağ, 1996). Dünyadaki teknolojik, siyasi, ekonomik gelişmeler ve hızla artan nüfus sebebi ile enerji talebi giderek artmaktadır.



Şekil 1.1. Dünyanın enerji tüketimi (Aybers ve Bayülken, 1990)

Günümüzde teknolojinin gelişmesine paralel olarak dünya enerji ihtiyacı sürekli olarak artmakta, sanayi ülkelerinde uygulanan enerji ekonomisi stratejileri bu artışı yumuşatmakla birlikte, gelişmekte olan ülkelerin çağdaş teknolojiyi yakalama çabaları bu geçiş evresinde büyük engellerle karşılaşmaktadır. Orta ve uzun vadeli düşünülecek olursa ileriki yıllarda tüm dünyanın yeni enerji kaynaklarına ihtiyaç duyacağı muhakkaktır (Sahin, 1996). Günümüzde ise enerji kaynağı olarak büyük çoğunlukla petrol ve kömür kullanılmaktadır. Günümüzde gelişmiş ülkelerin dışında çok yaygın olarak kullanılmasa bile ileriki yıllarda insanoğlunun kullandığı en önemli enerji kaynağı nükleer enerji olacaktır. Yakın gelecekte ülkelerin enerji ihtiyaçları, bu ülkelerin tahmini nüfus artışı ve enerji tüketimi analizlerinin göz önüne alınmasıyla hesaplanabilir. Günümüzde çoğu kullanılan mevcut enerji

kaynakları; fosil yakıtlar, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, jeotermal enerji, akarsular, fisyon yapabilen çekirdeklerdir. Son zamanlarda fosil yakıtların rezerv durumlarının incelenmesi ve bu yakıtların dünya enerji ihtiyacının artması ile yetersiz kalma durumunun ortaya çıkması, yeni enerji kaynaklarının araştırılması gereğini ortaya çıkarmıştır. Rüzgar, güneş, jeotermal enerji ve akarsu katkıları çok sınırlıdır ve fiyat olarak yakın gelecekte üretilen diğer enerjilere göre daha pahalı olacaktır. Fisyon ve füzyon reaktörleri açısından ise diğerlerine göre büyük bir yakıt kaynağı mevcuttur. Fisyon yapabilen cevher miktarı hakkında yer alan çeşitli tahminler yaklaşık 16 milyon ton rezerv olduğunu göstermiştir. Dünya katmanında uranyum toryum bileşiklerinin yaklaşık  $40 \times 10^7$  milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Bu durum dolayısıyla gelecekte nükleer enerji önemini ve gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Görünüşte kısa vadeli en iyi optimum çözüm tüm enerji kaynaklarının en iyi bir şekilde kullanmak ve gelecekte dünya için en mantıklı netice enerji üretimine nükleer enerjide dahil edilmesinin gerektiğidir.

Enerji politikalarının hazırlanmasında göz önünde bulundurulması gereken önemli bir nokta ise yeni ve temiz enerji kaynakları olup, bu noktanın, yeni kaynakların ülkenin ekonomik, siyasi ve sosyal yapısına uygun olması konusu ile birlikte düşünülmesi gerekmektedir. Adı geçen bu kaynaklar ve bu kaynakların avantaj ve dezavantajları şöyle sıralanabilir.

Hidrolik enerjinin başlıca özellikleri, yenilenebilir bir enerji olması ve işletme giderlerinin makul düzeylerde bulunmasıdır. Buna karşılık bazı koşullarda yatırımları yüksek olabilmekte ve bazen çevre üzerinde belirli bir etki yaratmaktadır. Ormanların, ekili ya da sürülmüş tarım alanlarının su altında kalması, kırsal bölgelerde çok defa hidroelektrik santrallerin büyük su barajlarının meydana getirdiği zararlı sonuçlardır. Ancak barajların yüksek yerlerde veya dağlık bölgelerde kurulmuş olması durumunda bu sakıncalar azalmaktadır.

Güneş enerjisi, halen bir çok uygulaması petrolden daha pahalı olmasına rağmen, gelişmiş bir çok dünya ülkesinin üzerinde önemle durduğu bir enerji kaynağıdır. Üçüncü dünya ülkelerinin büyük bir kısmı bina ısıtılmasına gereksinim göstermemesine rağmen, buralarda bina soğutulması amacıyla da kullanılabilceği hiçbir zaman unutulmamalıdır.

Rüzgar enerjisi, üzerindeki çalışmalar oldukça ilerlemiş olup, gelişmekte olan ülkelerde 100 kW'dan 5MW'a kadar pilot tesisler rüzgar enerjisini kullanarak elektrik üretimine başlamıştır. Bazı gelişmekte olan ülkeler ise kırsal kesimlerinde daha küçük çapta

uygulamalar yapmaktadırlar. Fakat özellikle bu konu üzerindeki araştırma faaliyetlerinin harcamaları çok yüksek değere çıkmaktadır. Buna rağmen rüzgar enerjisi tesislerinin kuruluş maliyetleri yavaş yavaş pahalı termik santrallerle yarışabilecek seviyelere gelmektedir. Bu hem kırsal kesimlerde, hem de düşük nüfuslu şehirlerde kullanılabilir enerji kaynağıdır. Rüzgar enerjisinin güneş enerjisi ile birlikte dönüşümlü olarak kullanılabilme özelliği de son yıllarda sürekli olarak vurgulanmaktadır. Bu durumu genel olarak yaz aylarında güneş enerjisinin kullanılması, kış aylarında ise rüzgar enerjisinin kullanılması şeklinde açıklanabilir. Rüzgar enerjisi özellikle ulusal elektrik şebekelerinin ulaşamadığı yörelerde, paket güç biçiminde kullanımı oldukça önem taşımakla birlikte günümüzde ulusal elektrik şebekesini besleyebilecek güçte geliştirilen büyük sistemlerin kullanımı da giderek önem kazanmaktadır. Rüzgar enerjisinin potansiyeline bağlı olarak bu kaynaktan gerek mekanik enerji ve gerekse elektrik enerjisinin üretimini mümkün olmaktadır. Rüzgardan mekanik enerji, bu enerjiye ihtiyaç duyulan tüketim yerlerinde kullanılabilir.

Jeotermal enerji, yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş basınç altındaki sıcak su, buhar, gaz veya sıcak kuru kayaların içerisindeki ısı enerjisidir. Bir başka yaklaşımla jeotermal enerji yerkürenin bir ısısıdır. Yerkürenin merkezi çok sıcak olduğundan ısı yüzeye doğru akmakta ve dolayısıyla yüzeyden derine doğru indikçe sıcaklık artmaktadır. Yer altındaki değişik termal rejimler sonucu jeotermal kaynak tipleri oluşmuştur. Bu enerji türünün en önemli avantajlarından birisi yenilenebilir oluşu ve diğer enerji kaynaklarına göre daha ucuz ve gerekli yüksek teknoloji düzeyinin olmaması ve aynı zamanda rüzgar enerjisinin kullanımında olduğu gibi hiç bir çevre kirliliği meydana getirmemesidir.

Biyogaz, Hindistan ve Çin gibi ülkeler bu gazı kırsal alanlarının enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanmaktadır. Doğadaki canlıların artıklarından üretilen bu gazın elde edilmesi için özel ortamlar ve şartların sağlanması gerekmektedir. Kenya bu gazın üretimi için tesisler kurmuş, ancak %25 oranında başarı sağlayabilmiştir. Dünya ülkeleri içerisinde Hindistan ve Çin bu konuda daha olumlu gelişmeler göstermektedir. Gazın üretim maliyeti çok düşüktür ve hammadde sıkıntısı yoktur ve çevreye kötü etkileri yok denecek kadar az olmaktadır (Akınoğlu, 1991).

Yukarıda anlatılan yeni ve temiz enerji kaynaklarının yanı sıra okyanuslardaki dalga enerjisi, med ve cezir olaylarından kaynaklanan enerji potansiyelinin kullanılması, denizlerin yüzeyi ve derinlikleri arasındaki sıcaklık farkından elde edilebilecek enerji v.b. gibi bir çok başka kaynaklar vardır.

Günümüzde bu konularda yapılan araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bütün enerji kaynakları çevre açısından zararsız ve hepsi yenilenebilir türdendir. Bu nedenle kısa vadede çevre kirliliğini ve bu yüzden olabilecek felaketleri düşünerek, uzun vadede ise fosil yakıtların biteceğini hesaba katarak, bu kaynakların dikkatle değerlendirilmesi gereklidir.

Dünya elektrik enerjisi üretiminde nükleer enerjinin payı giderek artmaktadır. Bilindiğı gibi nükleer elektrik enerji üretimi, başta Fransa olmak üzere Belçika, Kore, Macaristan ve Tayvan gibi ülkelerde toplam elektrik üretiminin yarısına erişmiş veya geçmiştir. Almanya, Bulgaristan, Finlandiya, İspanya, İsveç, İsviçre gibi ülkelerde ise nükleer pay 1/3 oranının üzerindedir. Diğer taraftan gelişmekte olan ülkeler, birkaç istisna dışında nükleer teknolojiye genellikle ilgisiz kalarak, bu zengin enerji kaynağından yararlanabilme şansını kaçırmaktadır. Gelişmiş ülkelerde ise nükleer enerji yatırımı hızla artmaktadır (Sahin, 1996). Çizelge 1.1 1998 yılı itibarıyla dünyada nükleer güç santrali kullanan ülkeleri toplam elektrik üretimindeki paylarına göre sıralı olarak göstermektedir (IAEA, 1999).

Nükleer enerji, atom çekirdeğinden kaynaklanan bir enerji türü olup bazı ağır radyoaktif elementlerin atom çekirdekleri düzeyindeki parçalanma reaksiyonlarından meydana gelir. Günümüzde bu enerji, uranyum atomlarının parçalanmasıyla üretilir. Parçalanmanın açığa çıkardığı ısı enerjisi genellikle doğrudan mekanik enerjiye ve ardından da elektrik enerjisine dönüştürülür. Bir nükleer güç reaktörü esas olarak, nükleer yakıttaki fisyon sürecinden gelen ısıyı yayan bir su ısıtıcısıdır. Yakıtı saran suyu ısıtır ve sıcak suda buhar elde etmek için kullanılır. Elde edilen buhar ise termik santraller veya petrol yakan güç istasyonlarında olduğu gibi, elektrik gücü üreten jeneratörü döndüren bir türbini çalıştırmak üzere kullanılır (Demirağ, 1996). Nükleer enerji günümüzde çoğunlukla LWR (hafif su reaktörleri) ile sağlanmaktadır. Ancak, 2000'li yıllarda, bu reaktörlerin kullanıldığı hafif zenginleştirilmiş yakıt yönünden bir darboğaz beklenmektedir. Bu sebeple, enerji açığının füzyon reaktörüne göre daha basit teknolojiye dayanan Füzyon-Fisyon enerji üretim prensibini bünyesinde bulunduran hibrid reaktörler ile aşılabilmesi mümkün görülmektedir (Sahin, 1996).

Bu çalışmada, füzyon reaktörlerinin ve klasik fisyon reaktörlerinin birleştirildiğı bir model ele alınacaktır. Yani fisyon reaktörünün hacim merkezine füzyon reaktörünün kalbinin yerleştirildiğı kabul edilecektir. Bu amaçla; (D,T) füzyon reaksiyonundan çıkan 14,1 MeV'luk enerjiye sahip olan nötronlar ile Çizelge 3.1' de verilen çeşitli nükleer yakıt ve malzemeler, Şekil 3.1'de gösterilen geometriye sahip ve literatürde blanket (Sahin, 1996)

olarak nitelendirilen katmanlarda nötronik analize tabii tutulacaktır. Bu şekilde nükleer yakıt ve malzemelerin (D,T) füzyon nötronları karşısında nötronik davranışları incelenecektir.

Çizelge 1.1. Dünyada nükleer güç santrali kullanan ülkeler [IAEA, 1999]

Ülkeler	İşletme halinde reaktör sayısı	Toplam Kapasite MWe	İnşaa halinde veya işletme öncesi tamamlanan reaktör sayısı	Toplam kapasite MWe	Toplam elektrik üretimindeki payı %	
					1995	1998
Litvanya	2	2370			85.6	77.2
Fransa	58	61653	1	1450	76.1	75.8
Belçika	7	5712			55.5	55.2
İsveç	12	10040			46.5	45.8
Ukrayna	16	13765	4	3800	37.8	45.4
Slovakya	5	2020	3	1164	44.1	43.8
Bulgaristan	6	3538			46.4	41.5
KoreCum.	14	12340	3	2550	36.1	41.4
İsviçre	5	3127			39.9	41.1
Slovenya	1	623			39.5	38.3
Japonya	52	43691	2	1863	33.4	35.9
İspanya	9	7350			34.1	35.7
Macaristan	4	1729			42.3	35.6
Almanya	20	22282			29.6	28.3
Finlandiya	4	2656			29.9	27.4
İngiltere	35	12968			24.9	27.1
Tayvan	6	4884	1	1300	28.8	24.8
Ermenistan	1	376			-	24.7
ÇekCum.	4	1648	2	1824	20.1	20.5
ABD	104	96423			22.5	18.7
Rusya	26	19843	4	3375	11.8	13.1
Kanada	14	9998			17.3	12.4
Romanya	1	650	1	650	-	10.3
Arjantin	2	935	1	692	11.8	10.0
Güney Afrika	2	1842			6.5	7.3
Meksika	2	1308			6.0	5.4
Hollanda	1	449			4.9	4.1
Hindistan	10	1695	4	808	1.9	2.5
Çin	3	2167	6	4420	1.2	1.2
Brezilya	1	626	1	1229	1.0	1.1
Pakistan	1	125	1	300	0.9	0.7
Kazakistan	1	70			0.1	0.2
İran	-	-	2	2111	-	-
<b>TOPLAM</b>	<b>434</b>	<b>348855</b>	<b>36</b>	<b>27536</b>	<b>17.0</b>	<b>15.9</b>

## BÖLÜM II

### TEMEL KAVRAMLAR

#### 2.1. Nükleer Enerji

Normal olarak bir atomun çekirdeği kararlı bir yapıya sahiptir ve dışarıdan müdahale ile periyodik cetveldeki istenen herhangi bir atoma dönüştürülemez. Bununla beraber bazı elementlerin atomları kararlı değildir ve dışarıdan müdahale ile kütle radyasyon yayılımı şeklinde başka bir forma dönüşebilmektedir. Dönüşüm sonunda bir miktar kütle azalmaktadır. Bu azalan kütle ise ışıınım enerjisi ve elde kalan kütlelerin kinetik enerjisi olarak açığa çıkar. Bu enerji nükleer enerji olarak isimlendirilir. Kütle kaybına bağlı olarak enerji (E), kütle kaybı " $\Delta m$ " ve ışık hızı "c" olmak üzere Einstein (Bonilla, 1957) tarafından;

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

şeklinde açıklanmıştır. Kararlı yapıya sahip olmayan çekirdeğin bölünmesi ve nükleer enerjinin açığa çıkması ile daha kararlı çekirdek elde edilmektedir. Çekirdek reaksiyonlarından enerji açığa çıkaran farklı iki yol bulunmaktadır. Bunlardan birincisi kararsız yapıya sahip ağır çekirdeklerin nötron bombardımanı ile farklı kütlelerde iki yeni çekirdeğe ayrılması esasına dayanan fisyon reaksiyonudur. Bu reaksiyonlar şimdiye kadar ağır atomlarda görülebilmiş ve özellikle uranyumda dikkate değer bir hal almıştır. Diğer ikinci yol ise fisyonda kullanılan ağır çekirdeklere nazaran daha hafif ağırlığa sahip iki çekirdeğin yüksek sıcaklığa sahip bir ortamda birleşmesi esasına dayanan füzyon reaksiyonudur.

#### 2.2. Hibrid Reaktörler

Füzyon ve fisyon reaktör özelliklerini bünyesinde birleştiren reaktörler hibrid reaktörler olarak isimlendirilirler. Bu reaktörlerde füzyon odasının çevresi düşük vasıflı nükleer malzeme ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) ile kaplanmıştır. Bu izotoplar mevcut fisyon nükleer reaktörlerinin içinde hakim olan düşük nötron enerjili ortamda çekirdek parçalanmasına maruz kalmadıklarından mevcut reaktörlerde yakıt olarak kullanılamazlar. Halbuki ağır hidrojen

yanmasına dayanan füzyon olayında 14.1 MeV gibi çok yüksek enerjiye sahip nötronlar ortaya çıkarlar. Bu yüksek enerjili nötronlar  $^{238}\text{U}$  veya  $^{232}\text{Th}$  izotoplarında önemli miktarlarda çekirdek parçalanmasına, dolayısıyla o anda fisyon nükleer enerjisi açığa çıkmasına yol açarlar. Bu olay yeni fisyon nötronları üretir. Bu zengin nötron ortamında pasif nükleer malzeme olan  $^{238}\text{U}$  veya  $^{232}\text{Th}$  izotopları  $^{239}\text{Pu}$  veya  $^{233}\text{U}$  gibi çok kıymetli nükleer yakıt dönüşürler. Böylece hibrid reaktör bünyesinde aynı anda hem enerji, hem de yeni nükleer yakıt üretmek mümkün olur (Bayrak, 1999).

Bir hibrid reaktör, açığa çıkardığı birim nükleer enerji miktarı başına hızlı reaktörlere nazaran, 30 misli daha fazla nükleer yakıt üretir [Sahin ve diğ., 1999]. Bu kadar zengin bir nükleer yakıt üretim kaynağının önemini anlayabilmek için, bu tip reaktörlerin temel fizik prensiplerini teşkil eden füzyon, fisyon ve nükleer yakıt üretim reaksiyonlarını gözden geçirmek gereklidir.

## 2.3. Füzyon ve Füzyon Reaksiyonları

### 2.3.1. Füzyonun tanımı

Klasik yakıtların yeryüzündeki kaynakları sınırlıdır, bu gerçek bugün daha kolay anlaşılmaktadır. Bilim adamları yeni enerji kaynakları için dikkatlerini yıldızlara yönelttiler. Nükleer füzyon reaksiyonların yıldızların başlıca enerji kaynağı olduğu uzun yıllar öncesinden biliniyordu. Bu yöntemde, hafif elementlerin çekirdekleri, daha ağır çekirdek üretmek için oldukça yüksek sıcaklıkta birbirleriyle kaynaşır. Döteryum (D) ve trityum (T) birleşmesinden nötron ile helyum çekirdekleri ortaya çıkar bu bir füzyon reaksiyon örneğidir. Bu füzyon reaksiyonundan 17.6 MeV enerji, reaksiyon sonu ürünlerinin kinetik enerjisi olarak açığa çıkar. Füzyon yakıtlarının enerjileri ölçüsüzdür; 20 ton kömürün yanmasından açığa çıkan enerji döteryumun füzyon enerjisi kadardır. Bir litre su içerisindeki doğal döteryumun füzyon enerjisi 300 litre benzine eşittir. Çok büyük enerji miktarının meydana gelmesi için füzyon reaksiyonların potansiyeli ortadadır. Füzyon enerjisini görmek için birkaç yıldız bakmak yeterlidir. Bu doğrultuda, nükleer füzyonun en ilkel bir güneş enerjisi olduğunu ve bizim güneşimizin enerji kaynağının da nükleer füzyon olduğunu görürüz (Bayrak, 1999).

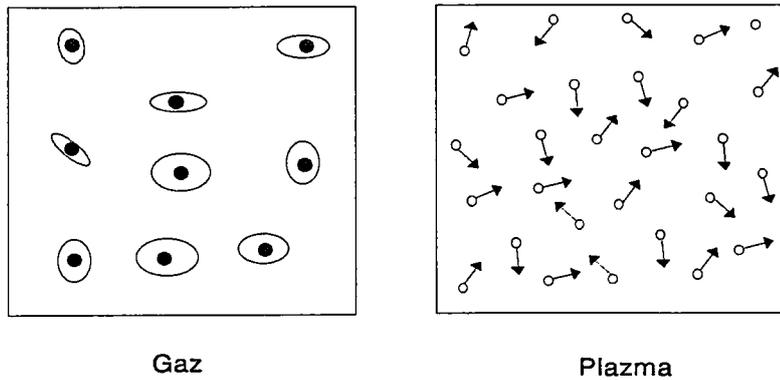
1950' ler de bu konuda yapılan araştırmaların neticesinde, nükleer füzyondan hidrojen bombası yapılması ve sergilenmesi ile füzyon enerjisinin ne kadar büyük bir potansiyele sahip olduğu kanıtlanmıştır. O yıllardan sonra nükleer füzyon yöntemlerinin gelişmesiyle,

bu konuda bize bazı temiz ve emin enerji kaynağı üretebileceği fikrini vermiştir (Bayrak, 1999).

Füzyon'da yapılmak istenen, hidrojen bombasından bir anda açığa çıkan tahripkar enerjisini yavaş yavaş alan bir sistem geliştirmektir. Yani hidrojen bombasını evcilleştirmektir.

Bir termonükleer füzyon olayını başarıya ulaştırabilmemiz şu iki probleme bağlıdır. Birincisi aşırı yüksek sıcaklıklara erişerek füzyon yakıtını plazma haline getirmek, ikincisi de Lawson Kriteri (Lawson, 1957) yani plazma yoğunluğu ile sıcak tutma süresinin sağlanmasıdır. Aşırı yüksek sıcaklık füzyonun ilk şartıdır. İki atomu, yani atom çekirdeklerini, birbirine kaynatabilmek için her şeyden önce onları birbirine yaklaştırabilmek, birbirine değmelerini sağlamak gerekir. Halbuki cinsi ne olursa olsun bütün atomların çekirdekleri pozitif elektrik yüklü olduklarından birbirlerini daha uzaktan iterek saptırırlar. Çekirdekleri birbirlerine dokundurabilmek için tek çare aşırı yüksek sıcaklıklara kadar ısıtarak elektrostatik itme kuvvetini yenecek kinetik enerjiler kazandırmaktır.

Isıtılan maddenin sıvı ile katı, sıvı ve gaz hallerine geçtiği ve yüksek sıcaklıklarda bütün maddelerin gaz halinde buldukları bilinmektedir. Madde daha da ısıtılırsa atomlar sıcaklığın etkisi ile, dış yörünge elektronlarını kaybederek iyonlaşırlar, madde aşırı yüksek sıcaklıklarda artık nötr atomlar halinde değil, fakat pozitif iyonlar ile negatif elektronların karışımı halindeki plazma şeklindedir. İyonlarla elektronların ayrı ayrı buldukları böyle bir karışıma plazma denir ve Şekil 2.1' de gaz ve plazma halleri şematik olarak gösterilmiştir. Füzyon, maddenin plazma halinde oluşabilen bir nükleer reaksiyondur.



Şekil 2. 1. Maddenin gaz ve plazma hali

Füzyon sıcaklıkları, yüz milyon derecelerle ölçülür, bu nedenle büyük rakamlarla uğraşmaktansa sıcaklıkları keV birimi ile ifade edilmesi kolaylıklar sağlar.

$$1 \text{ keV} = 11600000 \text{ }^\circ\text{C}$$

Kiloelektron volt aslında bir enerji birimidir. Ancak, plazmayı oluşturan iyonların kinetik enerjileri sıcaklıkla doğru orantılı olup, orantı katsayısının değeri yukarıda yazıldığı gibidir.

Aralarındaki elektrostatik itme kuvvetini yenecek kinetik enerjiler kazanmış atom çekirdeklerinin birbiri ile karşılaşmalarında mutlaka füzyon yapacakları hata olur, atom çekirdeklerinin karşılaşmaları füzyonla sonuçlanmayabilir, ancak çarpışan çekirdeklerin çok azı füzyon yapar. Füzyon, olasılığı çok düşük olan bir nükleer reaksiyondur. Plazma, füzyon sıcaklığına erişse dahi mevcut atom çekirdeklerinin pek azı füzyon yapar. Yeterli sayıda füzyon yapabilmek için ilave şartlar lazımdır. Plazmanın yoğunluğu füzyonun ikinci temel şartıdır. Birim hacimde ne kadar çok iyon bulunursa çarpışmaları o kadar fazla olur, füzyon olasılığının düşüklüğüne rağmen harcanan emeği kurtaracak sayıda iyonun reaksiyon yapmaları böylece sağlanır. Plazma yoğunluğu (iyon/cm<sup>3</sup>) veya kısaltılmış birimiyle sadece (cm<sup>-3</sup>) ile ifade olunur ve n harfi ile gösterilir.

Sıcak tutma süresi plazmanın tutuşması için üçüncü şarttır. Füzyon reaksiyonun kendi kendine devamı için, plazmanın füzyon sıcaklığında belirli bir süre tutulması şarttır. Bu süre t ile gösterilecek ve s saniye birimi ile ifade olunacaktır. Bir odun yığını tutuşturmak için de şartlara göre değişen süre kadar ısıtmak gerekir. Plazmanın tutuşması için gerekli sıcak tutma süresi de plazmanın yoğunluğuna bağlıdır. Yoğunluk yükselirse süre kısalır, yoğunluk düşerse süre uzar, fakat bunların çarpımları sabittir. Onun için yukarıda anılan son iki şart aslında birbirine bağlı ve tek şarttır. 1950 sonlarında onları ilk kez hesap eden İngiliz fizikçinin ismiyle Lawson Kriteri (Lawson, 1957) diye anılır.

### 2.3.2. Temel füzyon reaksiyonları

Füzyon reaksiyonları aşağıda tanımlanan şekillerde gerçekleşirler. Atomların en hafifi olan hidrojenin <sup>2</sup>H izotopu arasındaki füzyon reaksiyonu;



şeklinindedir. Buradaki  $\gamma$ , <sup>4</sup>He uyarılmış hale sahip olmayana kadar enerji dengesi için esastır. <sup>4</sup>He'ün nötron ve proton bölünme enerjilerinin ikisinden büyük olan 23.8 MeV' luk

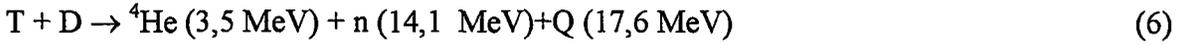
enerji açığa çıkar. Olması en muhtemel reaksiyon şunlardır,



D-D reaksiyonuna benzeyen başka bir reaksiyon hafif helyum ile döteryum etkileşmesinde meydana gelir. Fakat böyle bir reaksiyon ihtimali çok düşüktür.



Füzyon reaksiyonu sonucunda daha kararlı atıklar meydana gelir ve daha büyük enerji açığa çıkar. Tritiyum diğer yandan döteryum ile daha hızlı olarak reaksiyona girer ve ilk reaksiyon gibi yüksek enerji çıktısı meydana getirilebilir.



Eğer gelen parçacıklar ihmal edilebilir küçüklükte kinetik enerjilere sahiplerse,  ${}^4\text{He}$  ve  $n$  lineer momentum korunumu ile tutarlı olarak  $17.6 \text{ MeV}$ ' u paylaşırlar ve bu reaksiyon sonucunda  $14.1 \text{ MeV}$ ' lik, tek enerjili bir nötron meydana çıkar. Bu reaksiyon hızlı nötronların bir kaynağı olarak işe yarar. Çünkü büyük bir enerji açığa çıkar (Lawson, 1957). (D,T) reaksiyonları kontrol edilmiş füzyon reaktörlerinde kullanmak için seçilmiştir. Bunun bir dezavantajı nötronların sahip olduğu enerjinin büyük bir kısmının teknolojik olarak kullanılabilir bir formda olmamasıdır. Fisyon' da ise nötronlara enerjinin az bir kısmı verilir ve enerjinin büyük kısmını alan fisyon ürünlerinin kinetik enerjisi kolayca termal enerjiye dönüştürülür.  ${}^4\text{He}$  formunu oluşturmak için (birçok adımda) dört protonun füzyonu, yıldızlarda ve güneşte benzer şekilde açığa çıkan termonükleer enerji için birer kaynaktır. Bir sonraki basamak, bir kez hidrojen yakıtının kullanıldığı helyum füzyonudur. En basit reaksiyon,



şeklinde. Fakat bu reaksiyon gözlenmez. Çünkü  ${}^8\text{Be}$  olabildiğince hızlı bir şekilde ( $10^{-16}$  sn) tekrar  ${}^4\text{He}$  formunu alır. Bunun yerine daha karmaşık bir işlem olan,



reaksiyonu göz önüne alınsın. Üç parçacığı bir araya getirme ihtimali, ihmal edilir derecede küçüktür. Bunun yerine, bu işlem için (yıldızlarda) ilk önce iki helyum çekirdeği

$^8\text{Be}$  i meydana getirir ve 3. helyum çekirdeği bozunmadan  $^8\text{Be}$  tarafından yakalanması ile tesir kesitinin yeterince büyük olduğu  $^{12}\text{C}$  'yi meydana getirebilir. Hidrojen reaksiyonlarına bağlı olan helyum reaksiyonları sadece sıcak ve yaşlı yıldızlarda olur. Yüksek sıcaklıklarda  $^{12}\text{C}$  'den başlayarak  $^{56}\text{Fe}$  'ya kadar yeni çekirdek üreten diğer reaksiyonlar meydana gelebilir.

Plazmayı çevrelemek büyük bir problem teşkil eder. Sıcak yakıtın, enerjisini kabının duvarları ile temas durumunda yakıtı soğutacak ve kabı eritecektir. Şimdi termonükleer yakıtın çevrenmesi için araştırmaya bağlı iki taslak vardır: Manyetik çevreleme ve Atalet kuvvetleri ile çevreleme. Manyetik çevrelemede, plazma dikkatlice düzenlenmiş bir manyetik alanla çevrenmiştir. Atalet çevrelemede ise, katı bir pelet aniden ısıtılır ve foton veya parçacıkların ışınlarının şiddeti ile bir çok değişik doğrultudan eşzamanlı olarak çarpması ile sıkıştırılır. Çizelge 2.1' de uygun füzyon reaksiyonları gösterilmektedir (Sahin 1997).

Çizelge 2.1. Uygun füzyon reaksiyonları (Sahin,1997)

Klasik Füzyon Yakıtı	E [MeV]
$D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$	17.586
Zenginleştirilmiş Konvansiyonel Füzyon Yakıtları	E [MeV]
$D + D \rightarrow T + p$	4.032
$D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n$	3.267
$D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$	18.341
$D + {}^6\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He}$	22.374
$D + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Li} + p$	5.026
$D + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be} + n$	3.380
$D + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + T + p$	2.561
$D + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^4\text{He} + n$	1.796
Zenginleştirilmiş Exotik Füzyon Yakıtları	E [MeV]
${}^{11}\text{B} + p \rightarrow 3 {}^4\text{He}$	8.664
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2 p$	12.861
$p + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^4\text{He}$	4.022
$p + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^6\text{Li}$	2.125
$p + {}^9\text{B} \rightarrow D + 2 {}^4\text{He}$	0.652
İkincil Reaksiyonlar	E [MeV]
$D + {}^7\text{Be} \rightarrow 2 {}^4\text{He} + p$	16.5
${}^3\text{He} + {}^6\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He} + p$	16.680
${}^4\text{He} + {}^6\text{Li} \rightarrow D + {}^7\text{Be}$	0.113
${}^7\text{Be} + {}^6\text{Li} \rightarrow 3 {}^4\text{He} + p$	15.0
$p + T \rightarrow n + {}^3\text{He}$	0.765
$T + T \rightarrow {}^4\text{He} + 2 n$	11.327
$T + {}^3\text{He} \rightarrow p + {}^4\text{He} + n$	12.092
$T + {}^3\text{He} \rightarrow D + {}^4\text{He}$	14.319
${}^3\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow 3 {}^4\text{He}$	18.74
${}^4\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow 3 {}^{12}\text{C} + n$	5.702
${}^4\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow 3 {}^4\text{He} + n$	1.573
${}^4\text{He} + {}^{11}\text{Be} \rightarrow {}^{14}\text{C} + p$	0.784
${}^4\text{He} + {}^{11}\text{Be} \rightarrow {}^{14}\text{N} + n$	0.158
$p + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Be}$	1.147

### 2.3.3. Hidrojen füzyonu

Elementlerin en hafifi olan hidrojenin tek protondan ibaret olan çekirdekleri birbirleri ile en kolay çarpıştırılabilecek iyonlardır. Ancak, çekirdekte protona ilaveten nötronun da

bulunması çarpışmadan sonra kaynamayı (birleşmeyi) kolaylaştırır. Bu nedenle hidrojenin kendisi değil, fakat iki izotopu, döteryum ile trityum en kolay füzyon yapabilen iki malzemedir. Konvensiyonel füzyon reaksiyonu (6) nolu denklemde verilmişti. Şekil 2.2 konvensiyel füzyon reaksiyonu şematize etmektedir. Bu reaksiyonun kendiliğinden sürmesi için gerekli şartların sağlanması gereklidir.

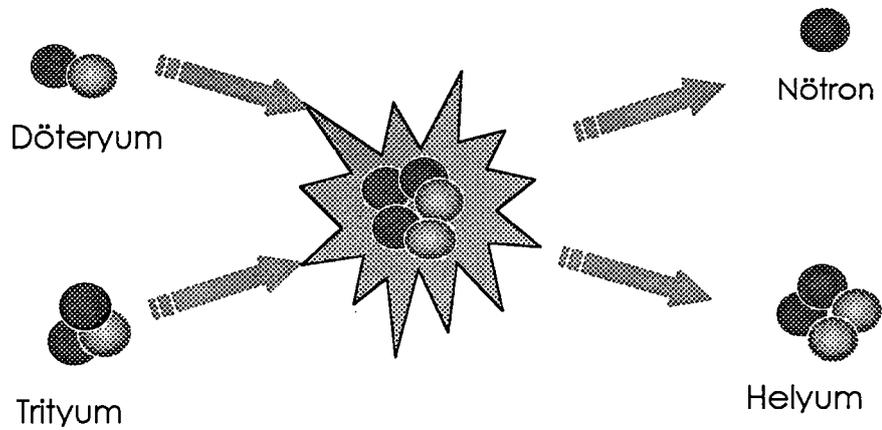
$$T = 10 \text{ keV (veya } 10^8 \text{ }^\circ\text{C)}$$

$$n.t = 10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$$

sıcaklığın bu mertebelerde olması ön koşuluyla, konuşmada kısaca bu iki şartın birbiriyle çarpımı tek bir şart gibi ifade olunur;

$$T.n.t = 10^{15} \text{ keV.cm}^{-3} \cdot \text{s}$$

100 milyon derecede başlayan reaksiyonu bu sıcaklıkta en az 1 saniye süreyle tutmak gerekir. Şayet yoğunluk on kat artırılsa, sıcak tutma süresi aynı oranda kısalır. Bu sıcaklıkta döteryum-trityum füzyon tesir kesiti henüz sadece 0.0015 barn' dır. Sıcaklık arttıkça füzyon olasılığı da yükselir ve 100 keV (bir milyar derece) sıcaklıkta en büyük değerini alır. Ancak bu sıcaklıkta dahi füzyon tesir kesiti 5 barn'a yükselir. Kısacası füzyon verimsiz bir reaksiyondur. Dolayısıyla döteryum-trityum karışımının hiçbir şart altında tamamının füzyon yapacağı beklenmemelidir. Şekil 2.2 Döteryum-trityum füzyonunun temsili resmini göstermektedir.



Şekil 2. 2. Döteryum-trityum füzyonunun temsili resmi

Denklem (6)' da görüldüğü gibi füzyondan helyum çekirdeği (alfa parçacığı) ve nötron doğar, ayrıca 17.6 MeV gibi büyük bir enerji açığa çıkar. Bu enerji yeni doğan iki yeni parçacığın kinetik enerjisi olarak paylaşılır. Alfa parçacığı 3.5 MeV, nötron 14.1 MeV alır.

Bu olay bomba olarak kullanıldığında, havada kısa mesafede durdurulan alfa parçacığı bombanın ısı etkisini, fevkalade yüksek enerjili nötron ise radyasyon etkisini doğurur. D-T reaksiyonundan açığa çıkan enerjinin çoğu (% 80), nötronun kinetik enerjisi formundadır. D-D reaksiyonundan açığa enerjinin % 75' i proton ve/veya nötronlara aittir. Şekil 2.3. döteryum-döteryum füzyonunu göstermektedir. Füzyon reaksiyonunda açığa çıkan enerji tek fisyon reaksiyonundan 10 kat daha azdır. Tritiyum tabii olarak meydana gelmez, fakat bir nötronla bombardıman edilerek lityumdan kolayca üretilebilir.

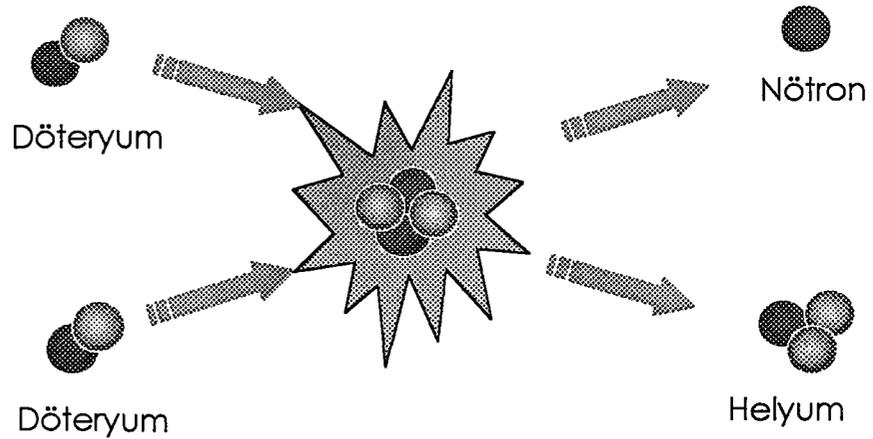
Sıcaklık 120 keV ve n.t çarpımı  $10^{16} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$  mertebesine çıkarılabilirse döteryum çekirdekleri doğrudan kendi aralarında füzyon yapabileceklerdir. Bu takdirde aşağıdaki nükleer reaksiyonlar dizisi gerçekleşecektir.



Döteryum çekirdeklerinin, anılan koşullar altında, kendi aralarında başlatacakları füzyon zinciri diğerlerine de ön ayak olacaktır. Öyleyse denklem (6)'den (10)'e kadar devam eden bütün zinciri, ara geçişleri hiç yazmayarak, tek bir denklemle ifade etmek mümkündür:



Bu hal döteryumun tek başına yanmasıdır. 43.1 MeV gibi korkunç büyüklükte enerji açığa çıkmaktadır. Ayrıca ikişer adet alfa ( ${}^4\text{He}$ ), proton (p) ve nötron (n) tanecikleri oluşmaktadır.



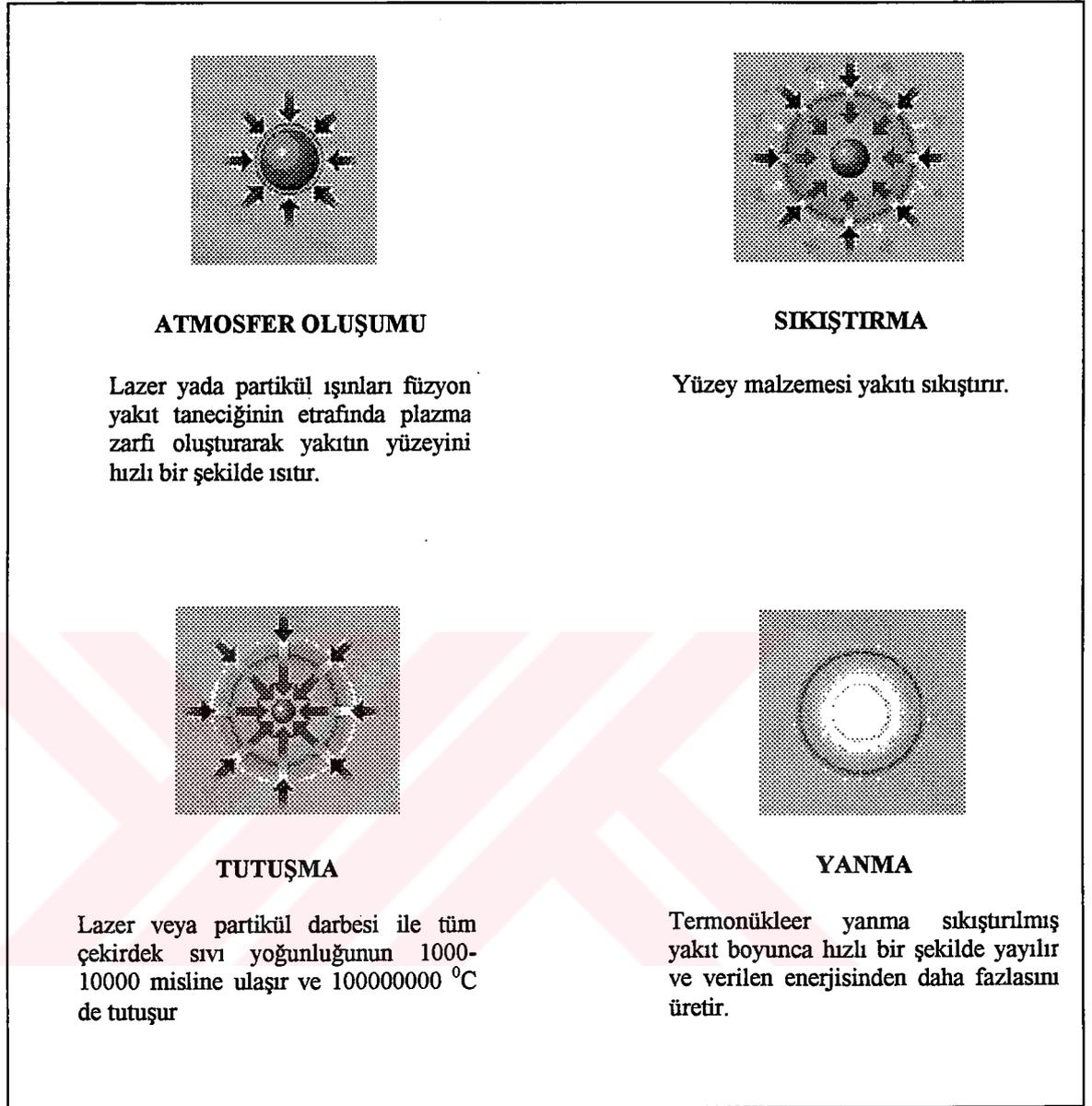
Şekil 2. 3. Döteryum - döteryum füzyonunun temsili resmi

#### 2.3.4. Manyetik çevrelemeli füzyon

Manyetik çevrelemeli füzyon'da iyonlar elektrik sargıyla oluşturulan bir manyetik alan içinde tutulurlar. Plazma bu sistemde dairesel kesitli halka şeklinde bir kap içerisinde tutulur; bu kap içinde ise karmaşık bir manyetik alan egemendir. Plazma kararsızdır, fakat aygıtın boyutu artıkça hapsedme süresi de artar. Plazmalar mükemmel elektrik iletkenleri olduğundan manyetik alanlarda çalıştırılabilir. Böylece manyetik alanlar şekillenmede kullanılabilir ve tutulan gaz karışımında cam duvarlara dokunmadan sabit bir durumda plazmayı çevreleyebilir. Plazma cam duvarlar ile iletme geçer ise enerji kaybederler ve yüksek bir hızla sıcaklıklarını düşürürler. Füzyon reaksiyonlarının kontrolü ABD, Rusya, Japonya ve Avrupa'da devam etmektedir. En yaygın manyetik sistem Tokamak konfigürasyonlarıdır. Toroide benzeyen bu cihaz ilk defa USSR de geliştirilmiştir. Tokamak manyetik alanı üç parçadan oluşur. Bunlardan ilki küçük çevre etrafında bulunan bir dizi bobin tarafından oluşturulur. Bu bobinler makinanın büyük eksenini çevresindeki toroidal manyetik alanı oluşturur. İkinci parça (poloidal alan) transformatörce plazma içinden geçmesi sağlanan büyük bir akım tarafından oluşturulur. Alanın son bölümü, plazmayı biçimlendirip kararlı halde tutan bir dizi çember bobin tarafından üretilir (Sinman, 2000).

#### 2.3.5. Atalet çevrelemeli füzyon

Manyetik çevrelemeye alternatif olarak bu çevrelemede yakıt karışımı ansızın sıkıştırılır ve ısıtılır. Bu amaçla yüklü parçacık demetleri veya çoğunlukla çok güçlü lazerler kullanılır. Bu küresel tanecik halindeki yakıt, tanecikte büyük enerji miktarını depolayan yüksek-güçlü lazerden gelen ışınlar tarafından tüm yönlerden bombardıman edilmektedir. Bu bombardıman çok kısa flaşlar halinde (saniyenin milyarda birinden kısa sürede) ve çok yoğun bir şekilde yöneltilir. Böylece yakıt küresel tanecikleri ansızın hem sıkıştırılır ve hem de ısıtılır. Şekil 2.4 atalet çevrelemeli füzyonun aşamalarını göstermektedir.



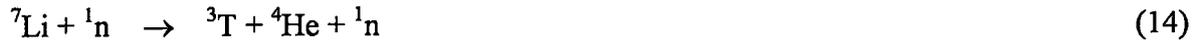
Şekil 2.4. Atalet çevrelemeli füzyonun oluşum aşamaları

### 2.3.6. Füzyon yakıtları

Döteryum, çekirdeğinde bir proton ve bir nötron bulunan bir hidrojen izotopudur. Atom çekirdeği yalnız bir protondan meydana gelen hidrojene oranla iki kat daha ağırdır. Bu nedenle ağır hidrojen ismiyle de bilinir. Hidrojen nükleer mühendisliğin en önemli bir elementidir. Tabiatta bulunan hidrojen elementi iki izotopun karışımı halindedir. Ancak bu karışım çok dengesizdir. Tabii olarak meydana gelen hidrojen % 99.985' lik  $^1\text{H}$  ve % 0.015'lik  $^2\text{H}$ 'den oluşur. Bu orana göre bir ton su sadece yaklaşık olarak 33 gr döteryum içerir. Her ne kadar hidrojen çerisindeki döteryum oranı gayet az ise de dünyanın 3/4'ünün

sularla kaplı olduğu düşünülürse, döteryum rezervinin oldukça büyük miktarlarda olduğu görülebilir.

Trityum hidrojenin en ağır ve radyoaktif bir izotopudur. Trityum izotopu bir proton ve iki nötrondan meydana gelir. Trityum izotopu tabiatta bulunmaz, yapay olarak üretilir. Genel olarak trityum izotopu lityumun termal nötronlarla reaksiyonu sonucunda üretilir. İleride füzyon reaktörlerinin yakıtı olarak kullanılacak olan trityumun üretilme reaksiyonu aşağıdaki şekildedir.



Burada plazma formundaki reaksiyon hacmi sınırlıdır. Buna rağmen elektriksel olarak yüksüz olan nötronlar bulunduğu kabın duvarlarına geçebilirler. Daha sonra bu nötronlar  ${}^6\text{Li}$  içeren moderatörle çevrelenmiş bir blanket içerisine girebilirler.  ${}^6\text{Li}$  tarafından absorpsiyonda ayrılan trityum ek bir kaynak olarak üretilirler ve füzyon odasını içerisinde geri beslerler.

Görülüyor ki fisyon reaktörlerinde olduğu gibi füzyon reaktörlerinde de nötron reaksiyonları ile yakıt üretimi sorunu vardır. Fisyon yakıtı olarak plütonyum, füzyon yakıtı olarak trityum yapay olarak üretilmektedir. Lityum genellikle az bilinen bir metaldir. Metallerin, hatta katıların en hafif olanıdır (Sinman, 2000).

Hafif çekirdeklerin kaynaşması olarak tarif edilen füzyon olaylarının çok çeşitli tipleri vardır. Füzyon yakıtı olarak kullanılan izotoplardan döteryum tabiattaki suda 1/5000 oranında ağır su halinde mevcuttur. Bir litre tabii suda bulunan döteryumdan elde edilebilecek füzyon enerjisi 300 litre benzinin enerjisine eşdeğerdir. Yani, füzyon gelecekte tükenmez bir enerji kaynağıdır.

## 2.4. Fisyon ve Fisyon Reaksiyonları

### 2.4.1. Fisyon reaksiyonu

Genel olarak kararsız bir yapıya sahip ağır çekirdeklerin parçalanarak daha kararlı bir yapıya sahip iki hafif çekirdeğe ayrılması olayına fisyon denir. Fisyon Hahn ve Strassman tarafından 1938'de Almanya'da bulunmuştur. Hahn ve Strassman'ın uranyum elementleri üzerindeki çalışmaları esnasında uranyumun nötronlar ile bombardımanı neticesinde

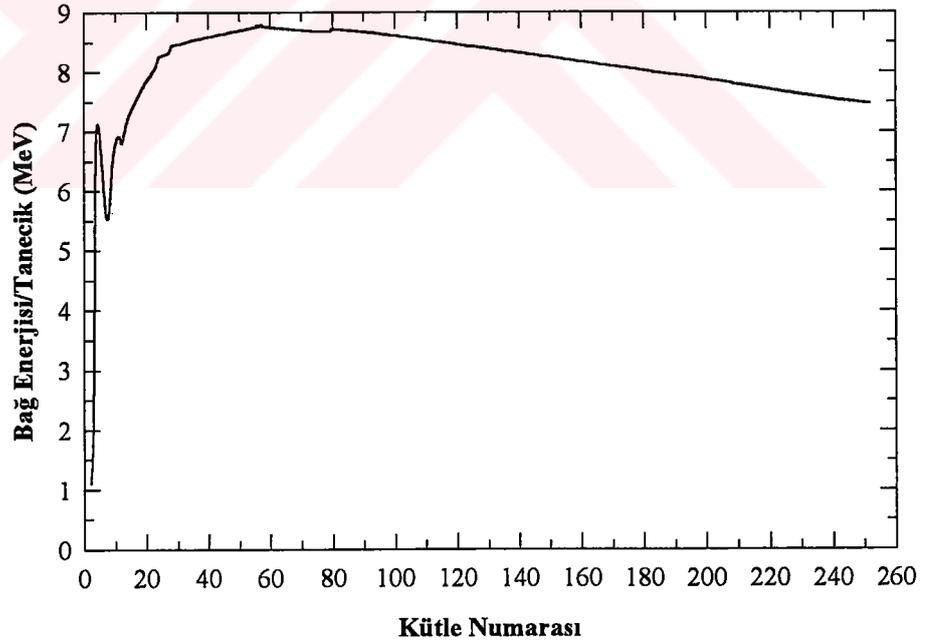
şekillenen izotoplar çekirdeğin parçalandığını ortaya koymuştur. Parçalanma esnasında çok büyük miktarda bir enerji açığa çıkar. Ağır çekirdeklerin fisyon yapabilmesi için eşik enerjisi olarak tarif edilen bir potansiyel enerji seviyesini aşabilecek kadar yeterli enerji verilmesi gereklidir. Bu seviye çoğu ağır çekirdeklerde tipik olarak 6-9 MeV' tur. Çekirdekler protonlar ve nötronlardan meydana geldiğine göre, çekirdeği oluşturan protonların ve nötronların kütleleri toplamının, çekirdeğin kütlesine eşit olması gerekir. Fakat çekirdeğin kütlesi daima proton ve nötronların kütleleri toplamından küçüktür. Proton ve nötronlar çekirdekte güçlü çekirdek kuvvetleri ile bir arada tutulurlar, protonlarla nötronları birbirinden ayırmak için oldukça büyük bir enerjiye ihtiyaç vardır ve çekirdeğin oluşması sırasında bu enerji dışarı atılır.

Denklem (1)' de belirtilen formül ile kütlenin enerjiye dönüşebileceği bilinmektedir. O halde çekirdek oluşması sırasında açığa çıkan enerjinin yukarıda anlatılan kütle farkından ileri geldiği anlaşılmaktadır. Bir başka ifadeyle çekirdeğin oluşması sırasında bir miktar kütle enerjiye dönüşmektedir. Çekirdeği parçalamak yani taneciklere ayırmak için bu enerjinin verilmesi gereklidir ve bu enerjiye bağ enerjisi veya eşik enerjisi denilmektedir. Tüm kararlı izotoplar için kütle numaralarına karşılık gelen bağ enerjisinin değişim grafiği (Bonilla,1957) Şekil 2.5' de gösterilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi kütle numarası arttıkça bağ enerjisi orta büyüklükteki (kütle numarası 56) çekirdeklere kadar hızla artmakta, daha sonra yavaşça azalmaktadır. Bu durum hafif çekirdeklerin bağ enerjilerinin ağır çekirdeklere nazaran daha küçük olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla bu durum bağ enerjisi küçük çekirdeklerde (kütle numarası 2-4) füzyon olayı, bağ enerjisi büyük çekirdeklerde de (kütle numarası 90'ın üzerinde) fisyon olayının meydana gelebileceğini gösterir. Bu eğrinin şekli enerji açığa çıkaran nükleer reaksiyonların ihtimali hakkında bazı fikirler vermektedir. Bu durum reaksiyon yönünün şeklinden anlaşılır. Burada iki çok hafif çekirdeğin birleşmesi işlemiyle veya daha ağır bir çekirdeğin parçalanması işlemiyle reaksiyon ürününün bağ enerjisinin arttığı görülmektedir. Başka bir deyişle reaksiyon ürünleri ilk çekirdeklerden daha büyük bir bağ enerjisine sahiptir.

Fisyon ilk olarak çekirdekteki nötron ve protonları bir arada tutan nükleer ve coulomb kuvvetlerinin etkileriyle oluşur. Toplam bağ enerjisi kabaca kütle numarasına (A) orantılı olarak artar. Bu sırada protonların coulomb itme kuvveti proton sayısının karesi ile hızlı bir şekilde artar. Eğer çekirdekten ağır bir parçanın yayılımı alfa ( $\alpha$ ) bozunmasına benzer bir durum gibi değerlendirilirse coulomb kuvvetinin artmasıyla fisyon kendiliğinden meydana gelebilecektir. Ayrıca eğer yeterli uyarılma enerjisi sağlanırsa herhangi bir çekirdek

parçalanabilmektedir. Bu olay pratik olarak sadece ağır çekirdekler için önemlidir. Bu uyarılma enerjisi reaktörlerde nötronlar tarafından sağlanmakta ve nötronun sebep olduğu fisyon olayının sonucu olarak iki ağır parçaya ek olarak meydana çıkan yeni nötronlarında fisyonu sebep olabilmesi önemli bir husustur.

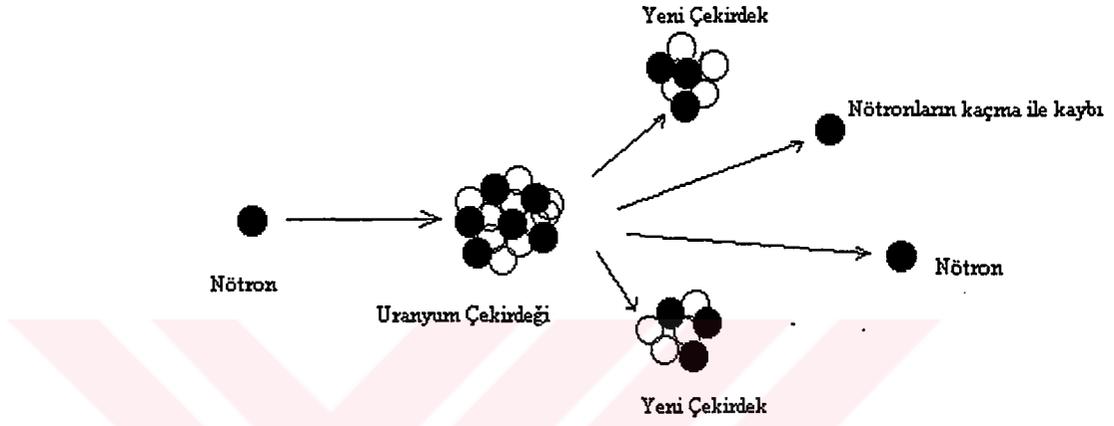
Fisyon enerjisinin büyüklüğü çekirdek için nükleon başına bağ enerjisinden anlaşılabilir. Çekirdek kütle numarası 50 civarında olan atomik çekirdekte nükleon başına bağ enerjisi 8.7 MeV' a erişir. Fisyon reaksiyonu genellikle bağ enerjisi grafiğinde görülen kütle numarası 50 akb'nin üzerindeki ağır çekirdekte meydana gelebilmektedir. Kendiliğinden parçalanmaya karşı ağır çekirdeklerin kararlılığının sebebi, çekirdeğin fisyonu uğramadan önce aşılması gerekli olan bir potansiyel enerji engeline sahip olmasıdır. Çekirdeğin sahip olduğu bu potansiyel enerji engeli çekirdek içerisindeki nükleer kuvvetlerdir. Bu fisyon engelini değeri yaklaşık olarak ağır çekirdekler için 6-9 MeV arasında değişir. Dolayısıyla fisyon olayını meydana getirebilmek için 6-9 MeV arasında bir enerji miktarını çekirdeğe vermek gereklidir.



Şekil 2.5. Tanecik başına bağ enerjisinin kütle numarası ile değişimi (Bonilla, 1957)

Bu durum değişik yollarla meydana gelebilir. Fisyon engelinden daha büyük enerjiye sahip bir enerji taneciği çekirdek içerisine nüfuz ettirilebilir. Bu olaya foto fisyon reaksiyonu denilir ki burada yüksek enerjili gama ışınları ağır çekirdeğe çarpar ve bu nedenle fisyon meydana gelir. Benzer bir diğer metot ise ağır çekirdeklerin nötron yakalamasıdır. Bazen

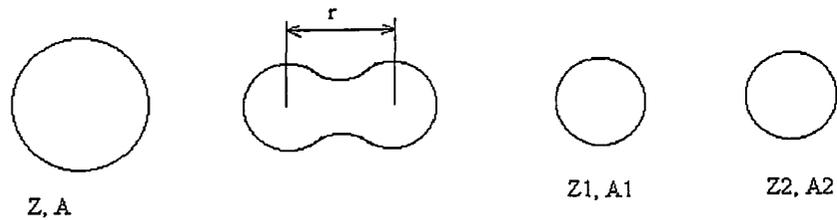
çekirdeğe ilave edilen nötronun enerjisi fisyon engelini aşmak ve fisyonu meydana getirmek için yeterli olmaktadır. Fisyon olayı pratikte düşük kinetik enerjili nötronlarla reaksiyona girebilen  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  ve  $^{241}\text{Pu}$  gibi ağır çekirdeklerde meydana gelir ve bu çekirdekler fisil çekirdek olarak isimlendirilir. Fisyon reaksiyonunun oluşması temsili olarak Şekil 2.6' da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Fisyon reaksiyonu

Bazı ağır çekirdeklerde nötron yakalaması ile elde edilen nötronun bağ enerjisi ağır çekirdeğin fisyon engelini aşmak için yeterli olmayabilir. Bunun için genellikle büyük miktarda kinetik enerji nötrona verilerek ağır çekirdeğin fisyon engelini aşması sağlanır.

Fisyona uğrayan "R" yarıçaplı küresel yapıya sahip, atom ağırlığı "A" ve proton sayısı "Z" olan ağır bir çekirdek göz önüne alınır ve bu ağır çekirdeğin fisyon olayı sonucunda "R<sub>1</sub>" ve "R<sub>2</sub>" yarıçaplı ve "Z<sub>1</sub>" ve "Z<sub>2</sub>" proton sayılarına sahip iki çekirdeğe ayrıldığı düşünülürse, yeni çekirdeklerin kütle numaraları da sırasıyla "A<sub>1</sub>" ve "A<sub>2</sub>" olacaktır. Şekil 2.7' de bu durum gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Fisyon aşamaları

Fisyona uğrayan çekirdeğin potansiyel enerjisinin, ayrılan iki parçanın arasındaki "r" mesafesinin bir fonksiyonu olduğu görülmektedir. Bu mesafe "r=0" olduğu zaman toplam enerji " $M_A \cdot c^2$ " dir. Burada " $M_A$ " ilk çekirdeğin kütlesi olup, kinetik enerjisi sıfırdır. Nükleonların birbirine enerji ilavesi çekirdeğin küresel konfigürasyonunun bozulmasına sebep olur. Çekirdeğin küresel şeklinin bozulması ile enerji artacağından aralarındaki ortalama "r" mesafesi de artar. Ara halde çekirdeğin sahip olduğu potansiyel enerji ilk haldeki potansiyel enerjisinden daha büyüktür. Ana çekirdeğin iki ayrı parçaya ayrıldığı noktaya kadar "r" mesafesi arttıkça Şekil 2.8' de görüldüğü gibi potansiyel enerji değeri de sürekli olarak artacaktır ve sonra ana çekirdek iki parçaya ayrılacaktır. Bu noktadan sonra iki parçanın kalan nükleer enerjisi sabit kalırken potansiyel enerjisi azalmaktadır. Bu esnada iki parçanın sahip olduğu coulomb itme enerjisi değeri de azalacaktır. Şekil 2.8' de görüldüğü gibi çekirdeğin fisyona uğraması için ek bir enerjinin temin edilmesi gerekmektedir. Çekirdeğin fisyona uğraması için gerekli olan bu ilave enerjiye kritik enerji veya eşik enerjisi denir ve " $E_{cr}$ " ile gösterilir. Fisyon reaksiyonunun "Q" enerji değeri, sistemin ilk ve son enerjileri arasındaki farka eşit olacaktır. Buradan kritik enerji değeri,

$$E_{cr} = E_q - Q \quad (15)$$

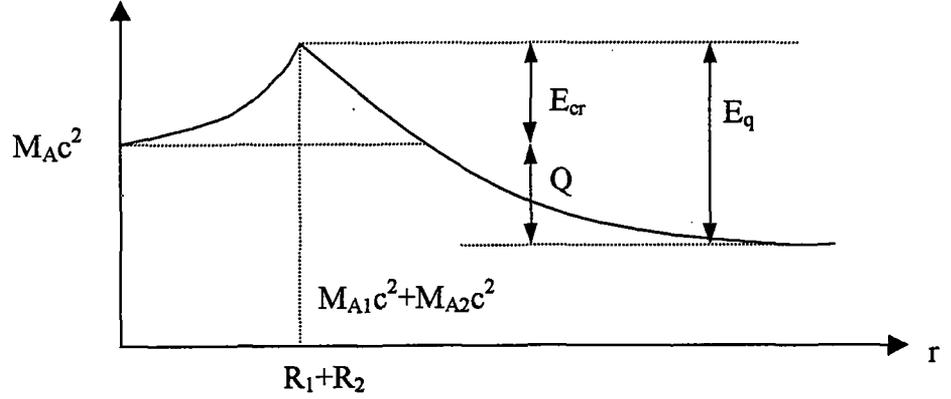
şeklinde hesaplanır. Fisyon sonucu meydana gelen parçaların düzgün küresel yapıda oldukları kabul edilerek coulomb enerjisi,

$$E_q = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_1 + R_2} \quad (16)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Uranyum için " $E_q$ " değeri yaklaşık olarak 218 MeV, ortalama "Q" değeri 212 MeV ve kritik enerji değeri 6 MeV'dur. Uranyumdan daha hafif çekirdeklerin kritik enerji değeri daha yüksektir. Örnek olarak  $^{208}\text{Pb}$  çekirdeğinin kritik enerjisi yaklaşık olarak 20 MeV civarındadır. Bu sebeple fisyon ağır çekirdekler için önem taşımaktadır.

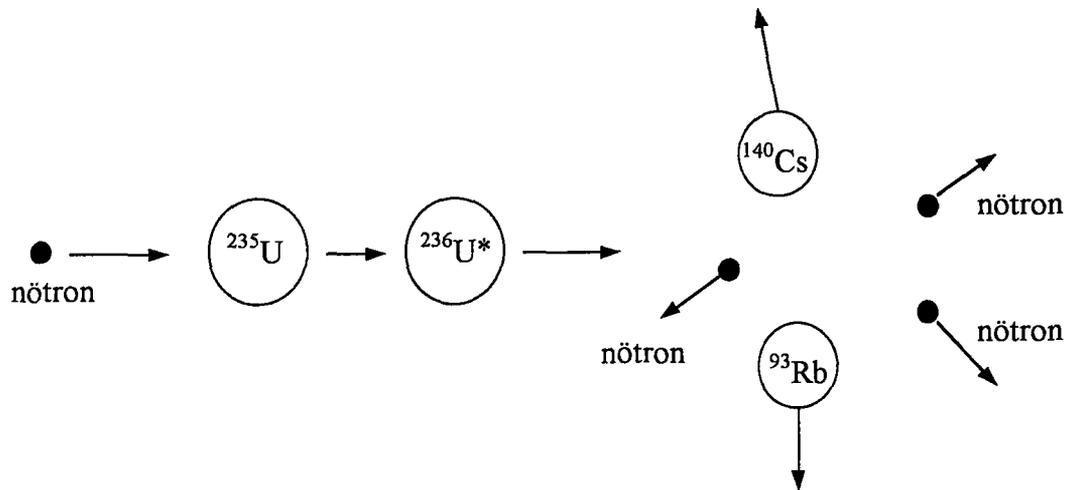
Fisyonda yayınan nötronların ortalama sayısı enerjiye bağlıdır. Bu sayı enerji ile doğrusal olarak artar. Şekil 2.9' da  $^{235}\text{U}$  çekirdeğinin bir nötron absorpsiyonu neticesinde yüksek derecede uyarılmış çekirdek olan  $^{236}\text{U}^*$ ' nın şekillenmesini göstermektedir.  $^{235}\text{U}$ 'in fisyonu neticesinde  $^{140}\text{Cs}$  ve  $^{93}\text{Rb}$  çekirdekleri ile birlikte üç nötron yayınır. Bazı durumlarda  $^{236}\text{U}(n,\gamma)$  reaksiyonu ile temel enerji seviyesine geçer. Fisyon ürünleri yaklaşık olarak 70 ve 160 arasında değişen kütle numaralarına sahip iki çekirdektir. Bu çekirdeklerden başka

fisyon reaksiyonu sonucu nötronlar, beta tanecikleri, gama ışınımı veya nötrinolar meydana gelebilir.



Şekil 2.8. Fisyon reaksiyonuna uğramış çekirdeğin potansiyel enerjisinin mesafeye bağlı olarak değişimi

Fisyon reaksiyonlarının en önemli ürünlerinden birisi işlem içerisinde yayımlanan nötronlardır. Bu nötronların çoğu ani olarak ortaya çıkmaktadır, bu süre yaklaşık olarak  $10^{-17}$  sn'dir. Bu nötronlara ani nötronlar denir. Nötronların bir kısmı da parçalanma meydana geldikten uzun bir müddet sonra ortaya çıkarlar, bu nötronlara ise gecikmiş nötronlar denir. Reaktör fiziğinde bu nötronlar çok önemlidir. Gecikmiş nötronlar, fisyon nötronlarının %1'inden daha az olmasına rağmen reaktör çalışmalarında çok önemli rol oynar.



Şekil 2.9.  $^{235}\text{U}$ 'ün nötron absorpsiyonu ile fisyonu

Termal nötronlar  $^{235}\text{U}$ 'te, hızlı nötronlar  $^{234}\text{U}$  ve  $^{238}\text{U}$ 'de fisyon meydana getirirler. Termal nötronlar halinde fisyon reaksiyon tesir kesiti, yüksek enerjili nötronlar halindeki fisyon tesir kesitine göre çok daha büyüktür. Hem termal ve hem de hızlı nötronlar  $^{239}\text{Pu}$ 'da fisyon meydana getirebilirler.



reaksiyonunda meydana gelen Np radyoaktif bir çekirdektir ve bir  $\beta$  neşrederek  $^{239}\text{Pu}$  haline dönüşür.



meydana gelen  $^{239}\text{Pu}^*$  çekirdeği de radyoaktiftir ve bir  $\alpha$  neşrederek  $^{235}\text{U}$  haline dönüşür.



Bir nötronun bir çekirdekle etkileşme ihtimaline reaksiyon tesir kesiti denir. Tesir kesitleri nükleer reaksiyon tipini karakterize etmede kullanılır. Fisil izotopların termal nötronlar halindeki fisyon tesir kesitleri, yine termal nötronlar halinde fertil izotopların fisyon tesir kesitinden daha büyüktür. Fertil izotopların ise yüksek enerjili nötronlar halinde fisyon tesir kesitleri daha yüksektir.

#### 2.4.2. Fisyon yakıtları

Fisyon yakıtları iki kısma ayrılmaktadır.

Çekirdekleri termal nötronlarla parçalanabilen yakıtlara ( $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ) genel olarak fisil yakıtlar denir.

Çekirdekleri hızlı nötronlarla parçalanabilen yakıtlara ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ) fertil yakıtlar denir.

Fisyon reaksiyonlarında çekirdekleri enerjisi MeV mertebesinde olan nötronlarla çarpıştıkları zaman fisyon yapabilen çekirdekler fertil çekirdeklerdir. Fisil çekirdekler ise termal nötronlarla çekirdek parçalanması yapabilen yakıtlardır.  $^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$  gibi izotoplar yüksek enerjili nötronlarla çekirdek parçalanması yapabildikleri için nükleer reaktörlerde tek başına kullanılmazlar.  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  ve  $^{239}\text{Pu}$  fisil izotoplar pratik olarak nükleer reaktör yakıtlarıdır.  $^{241}\text{Pu}$  ise bir reaktörde hiçbir zaman doğrudan doğruya kullanılmazlar, bu

bakımdan pratik bir yakıt değildir. Tabii uranyumun %99.3'ü  $^{238}\text{U}$  ve %0.7'si ise  $^{235}\text{U}$ 'tir. Günümüzde çalışan tabii uranyum reaktörlerinde kullanılan yakıtın  $^{235}\text{U}$  yüzdesi artırılmış veya zenginleştirilmiştir. Uranyum zenginleştirme işlemi oldukça karmaşık ve ekonomik olmayan bir işlemdir. Bununla beraber fisil izotopları elde etmek için bir başka yol fertil çekirdeklerin yüksek enerjili nötronlarla bombardımanı ile olmaktadır. Bu dönüşüme genel olarak fertil-fisil dönüşümü denir ve bu dönüşüm aşağıdaki şekilde verilebilir,



Burada  $^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$  gibi fertil yakıtlar nükleer reaksiyon sonucu  $^{239}\text{Pu}$  ve  $^{233}\text{U}$  gibi iki değerli fisil yakıtta dönüşmektedir. Zenginleştirme işlemi çok pahalı olduğu için bu yol en kullanışlı yol olmaktadır. Fertil izotoplar içerisinde en önemlileri  $^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$ 'dir. Bu izotoplar dünyada bol miktarda bulunmaktadır ve aynı zamanda bu izotopları fisil hale gelmesini sağlayan nötronları nükleer reaktörlerde bulmak mümkündür.

## 2.5. Nötronların Moderasyonu

Nötron çekirdeğin yüksüz elemanı olarak nükleer kuvvet çalışmalarında temel bir rol oynar. Coulomb engelinden etkilenmeden, çok düşük enerjili (eV yada daha düşük) nötronlar çekirdeğe girebilirler ve nükleer reaksiyonları başlatabilirler.

1932 yılında Chadwick tarafından yapılan deneylerle hemen hemen protonun kütlesine eşit ve yüksüz bir tanecik bulunmuştur. Bu taneciğe nötron ismi verilmiştir. Nötron sıfır nolu element olarak ta sayılabilir. Nötron yüksüz olduğundan bu parçacık için çekirdeğin Coulomb etki alanı gibi bir engel söz konusu değildir. Nötronun kütlesi,

$$m_n = 1.008665 \text{ akb dır.}$$

Nötronların ömürlerinin kısa oluşlarından dolayı serbest nötronlar doğada bulunmazlar. Nötronu elde etmeye yarayan bir çok reaksiyon vardır. Bu reaksiyonlarda hedef çekirdek alfa taneciği, proton ve gama ışınları ile bombardıman edilince uyarılmış halde bulunan bileşik çekirdek meydana gelir. Nötron elde etmede hedef çekirdekler en büyük rol oynar, çünkü kuvvetli potansiyel duvardan dolayı ağır çekirdeklerle yüklü taneciklerin reaksiyonları çok yüksek enerjilerde mümkündür. Nötronların ortalama ömrü 12 dakika civarındadır. Hafif çekirdeklerin ( $\alpha, n$ ) ve ( $\gamma, n$ ) reaksiyonlarına bağlı olarak bozunma

sonucunda nötronlar meydana gelir. Nötronları elde etmek için kullanılan bir çok reaksiyon vardır. Bunlardan bazıları aşağıdaki şekillerde açıklanabilir.  $\alpha$ -Berilyum kaynakları, nötronun keşfinde kullanılan bu reaksiyon laboratuvarlarında, kararlı yapıya sahip  $^9\text{Be}$  çekirdeğine alfa taneciği ile çarpıştırılırsa reaksiyon sonunda nötron serbest kalır. Bu reaksiyon için gerekli Q değeri 5.708 MeV'tur. Eğer  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^9\text{Be}$  gibi alfa yayan uzun ömürlü bir maddeler karıştırılırsa sabit oranda bir nötron üretimi elde edilir.  $^{226}\text{Ra}$  yaklaşık olarak 5-8 MeV civarında enerjilerde alfa parçacığı yayınlar ve böylece 13 MeV'a kadar enerji spektrumuna sahip nötronları elde edilir. Genel olarak nötronların kaynağı  $^9\text{Be}(\alpha,n)^{12}\text{C}$  reaksiyonunun kullanılmasıyla elde edilir. Burada reaksiyon için gerekli olan alfa taneciği  $^{226}\text{Ra}$  gibi doğal radyoaktif izotopların  $\alpha$  neşretmesiyle doğal olarak elde edilir. Böylece bir gram radyum ve birkaç gram berilyum karışımından dakikada  $10^7$  civarında nötron temin edilir.

$\gamma$ -Berilyum kaynakları, yukarıda  $(\alpha,n)$  kaynaklarına benzer bir yöntemle  $(\gamma,n)$  reaksiyonu ile de nötron elde edilebilir.  $^{24}\text{Na}$  yaklaşık olarak 2.76 MeV'lik gama-ışını yayımlar, yayımlanan bu  $\gamma$ -ışının  $^9\text{Be}$  ile reaksiyonundan 0.8 MeV civarında enerjiye sahip nötronlar elde edilir.

$\alpha$ -Bor kaynakları, bor çekirdeğinin  $(\alpha,n)$  reaksiyonu tabii Bor'u meydana getiren  $^{10}\text{B}$  ve  $^{11}\text{B}$  izotoplar ile meydana gelir. tabii Bor'un % 81.2'sini  $^{11}\text{B}$  oluşturur.

Nötronlar genel olarak kinetik enerji değişimlerine göre üç kategoride incelenir. Bu kategori hızlı, orta ve yavaş nötronlar şeklindedir. Bu sınıflandırma,

Hızlı nötronlar  $KE > 10^5 \text{ eV}$

Orta nötronlar  $1 < KE < 10^5 \text{ eV}$

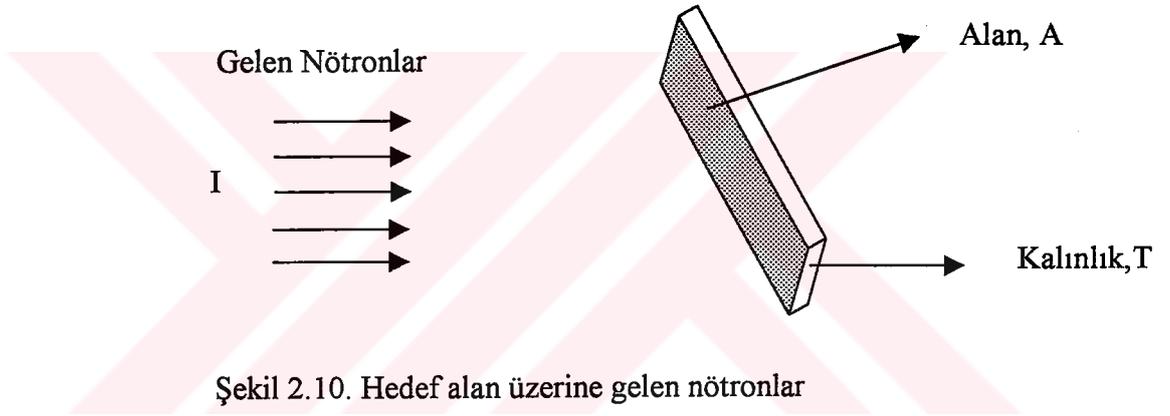
Yavaş nötronlar  $KE < 1 \text{ eV}$

Şeklinde verilebilir. Buradan hareketle reaktör sınıflandırılması yapılırken nötronların enerjileri göz önüne alınır. Örneğin hızlı reaktörlerde fisyon olayı için hızlı nötronlar ile termal reaktörler için çoğunlukla termal nötronlar ile gerçekleştirilir. Nötron kütle arasında ilerlerken nötronların akı şiddeti, nötronların çekirdek ile reaksiyonları sonucu kalınlıkla beraber azalır. Hızlı nötronlar için  $(n,p)$ ,  $(n,\alpha)$  veya  $(n,2n)$  gibi birçok reaksiyonlar mümkündür. Yavaş veya termal nötronların ise ortadan kaybolmasının başlıca sebebi  $(n,\gamma)$  reaksiyonudur. Sık sık bu yakalama reaksiyonlarının tesir kesiti, kesitin çok büyük olduğu

yerlerde bir veya daha fazla rezonansın etkisi altında kalmaktadır. Rezonans dışında tesir kesiti hızın  $1/v$  şeklinde artmasıyla azalır; Böylece nötronların yavaşlaması elastik ve inelastik saçılma olayları nedeniyle, absorpsiyon olması muhtemel olur. Nötronlar başlangıç enerjisiyle enerjileri rezonans olmayan absorpsiyonun olma ihtimalinin yüksek olduğu eV'a azalana kadar bir çok saçılma işlemine uğrayacaktır. Nötronların moderasyonu uygun çekirdekler ile elastik çarpışması sonucu mümkün olmaktadır.

### 2.5.1. Nükleer tesir kesitleri

Bir reaksiyon için tesir kesiti ( $\sigma$ ), bir çekirdek ile nötronun etkileşim ihtimalidir. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi yüzey alanı A, kalınlığı T ve birim hacimde N sayıda atoma sahip olan bir hedef göz önüne alınmaktadır.



A hedef alanı I şiddetinde bir nötron demetine maruz kaldığı varsayalım. Böylece nötron ışın demetinin hedef alanın ön yüzüne çarpmasıyla bir tesir kesiti meydana gelmektedir. Burada nötron ışın şiddeti birimi  $n/cm^2 \text{ sn}^{-1}$ 'dir, yani  $cm^2$ 'de saniyede geçen nötron sayısıdır. Tesir kesitinin hesaplanmasında aynı hız ve yönde hareket eden, normal olarak hedef malzemenin yüzeyine bağlı ve sürekli aynı tarzda hedef yüzeyden geçen ışın demeti göz önüne alınır. Bu durumda hedefteki nötron-çekirdek etkileşiminin oranı, hem hedef çekirdek üzerine düşen nötron ışın şiddeti ile birim hedef alanı başına hedef atomlarının sayısı ile orantılı olacaktır. Birim hedef alanı üzerinde meydana gelen etkileşim oranı,

$$\text{Etkileşim oranı} = \sigma \cdot I \cdot N \cdot A \cdot T \quad (23)$$

$$\sigma = \frac{\text{Etkileşim oranı}}{I \cdot N \cdot A \cdot T} \quad (24)$$

şeklinde hesaplanabilir. Bununla birlikte N.A.T çarpımı hedef alandaki atom sayısına eşittir ve tesir kesiti  $\sigma$ , hedef üzerine gelen birim nötron ışın demeti şiddeti için hedefin bir atomuna karşılık gelen etkileşim oranıdır.  $\sigma$  tesir kesiti genel olarak mikroskobik tesir kesiti olarak isimlendirilir. Tesir kesitleri nükleer reaksiyon tipini karakterize etmede kullanılır.  $\sigma$ , tesir kesiti birim alanı temsil etmektedir. Nükleer yarıçapın değerinin çok küçük olduğu düşünülürse çekirdeğin tesir kesiti santimetre karenin çok küçük ölçüsüne sahip olmaktadır. bu nedenle tesir kesiti ifade etmede barn denilen bir birim kullanılır. Bir barn yaklaşık olarak  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>'dir. N, cm<sup>3</sup> birim hacim içindeki tüm çekirdeklerin sayısını gösterdiğine göre, N. $\sigma$  büyüklüğü, söz konusu etkileşmenin makro yapısındaki olasılığını gösterir ve buna makroskopik tesir kesit ( $\Sigma$ ) adı verilir.

### 2.5.2. Çekirdek etkileşme çeşitleri

Elektrik yüklü ve nötron gibi yüksüz taneciklerin durgun hedef çekirdekleri ile yaptığı etkileşmeler, genel olarak saçılmalar ve yutulmalar olarak iki ana sınıfa ayrılabilir. Saçılmalar; elastik ve elastik olmayan saçılmalar diye sınıflandırılabilir. Yutulma reaksiyonları da; radyatif yakalama, tanecik yayınlanması ile bozunma, fisyon olarak sınıflandırılabilir.

Elastik saçılmada, nötron atom çekirdeğine çarpar ve kinetik enerjisinin bir kısmını atom çekirdeğine verdikten sonra geliş doğrultusundan farklı bir doğrultuya saparak çekirdekten uzaklaşır. Burada çekirdeğin fiziksel yapısı değişmez. Nötronların atom çekirdekleri ile elastik saçılmaya uğramaları olayında kinetik enerji ve momentumlarının korunması söz konusudur. Çekirdeğin kütlesi ne kadar küçük ise çekirdek tarafından alınacak kinetik enerjide o kadar büyük olur. Elastik saçılmada çekirdek ile nötron etkileşiminden sonra ayrılan nötron genellikle aynıdır. Bu etkileşim (n,n) şeklinde de gösterilebilir.

İnelastik saçılmada, nötron önce çarptığı çekirdeğin içerisine girer ve böylece çekirdeğin fiziksel yapısı değişmiş olur. Bu durum çok kısa bir süre meydana gelir. nötron kinetik enerjisinin bir kısmını çekirdeğe vererek, çekirdeği geliş doğrultusundan farklı bir doğrultuda ve başlangıçta sahip olduğu kinetik enerjisinden daha küçük bir enerji ile terk eder. Bu etkileşimden sonra çekirdekten aynı nötron ayrılabilmesi gibi farklı bir nötronda çekirdekten ayrılabilir. Nötronun çekirdeği terk etmesinden sonra çekirdek gama ışınları yayarak temel enerji haline döner. Bu etkileşim (n,n') şeklinde de gösterilebilir.

Nötronların atomik çekirdeklerle meydana getirdiği ikinci etkileşim şekli yutulma reaksiyonlarıdır. Genel olarak bu reaksiyonlarda nötronlar kaybolmaktadırlar.

Radyatif yakalama ( $n,\gamma$ ) reaksiyonunda, çekirdek bir nötronu absorbe ederek uyarılmış enerji seviyesine yükselir. Daha sonra oluşan yeni izotop bir gama yayımı ile temel enerji haline döner.

Tanecik yayınması ile bozunma, bir nötron yakalanması ve sonra çekirdek içerisinde yüklü taneciğin çıkarılması ile bileşik çekirdek bozunması meydana gelir. Yüklü tanecikler yayınmadan önce Colulomb potansiyel duvarını aşması gerektiği için bu tip reaksiyonlar en çok hafif çekirdekler ile hızlı nötronlar için mümkündür.

Fisyon ise,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  veya  $^{241}\text{Pu}$  gibi radyoaktif çekirdeklerin bir nötron yakalayarak parçalanmasıyla oluşabilir. Ağır kütleli ve kararsız bir yapıya sahip çekirdeklerin parçalanması ile daha hafif iki çekirdek ve enerji elde etmek mümkündür.

### 2.5.3. Nötron üretilme reaksiyonları

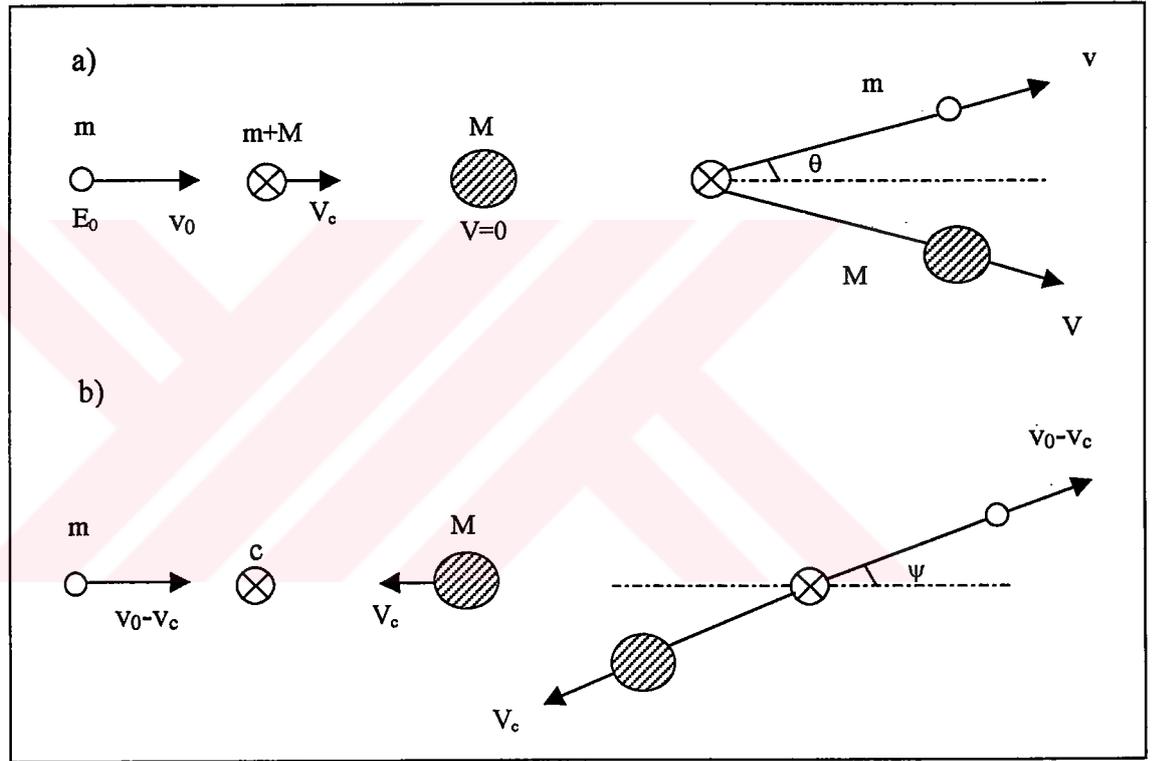
( $n,2n$ ) ve ( $n,3n$ ) reaksiyonları; ( $n,2n$ ) reaksiyonları genellikle iki kademede meydana gelir. İlk kademede gelen nötron hedef çekirdek tarafından inelastik olarak saçılır, sonra eğer kalan çekirdek nötronu bağlayan bağ enerjisinden daha büyük bir enerji ile uyarılmış ise bu nötron sistemden serbestçe kaçar. İnelastik olarak saçılan nötronlar artık çekirdek içerisinde ilk enerjilerinin çoğunu bırakırlar. Bu demektir ki eğer gelen nötron ( $n,2n$ ) reaksiyonu için gerekli olan eşik enerjisinden daha büyük bir enerjiye sahip olarak bir nötron meydana gelecektir. Sonuç olarak ( $n,2n$ ) tesir kesiti inelastik tesir kesitinin aleyhine hızlıca büyüyecektir. Çünkü inelastik reaksiyonlar ( $n,2n$ ) reaksiyonlarını kısmen içine almaktadır. Çekirdeklerin bir çoğunun ( $n,2n$ ) eşik enerjileri 7-10 MeV arasındadır. Böylece üçüncü bir nötron ( $n,2n$ ) reaksiyonu içinde ikinci bir nötronun neşredilmesinden sonra yeterli uyarılma enerjisine sahip çekirdeğin sağladığı üçüncü bir nötronda neşredilmiş olacaktır. Bu sebeple ( $n,3n$ ) tesir kesitinde ( $n,3n$ ) eşik enerjisi reaksiyonu tesir kesitindeki eşik enerjisinin aleyhine yükselecektir. Örneğin, Be-9'un ( $n,2n$ ) eşik enerjisi 1.8 MeV olduğu halde ( $n,3n$ ) eşik enerjisi 21 MeV'dur.

### 2.5.4. Elastik saçılma ile enerji kaybı

Nötronların elastik çarpışmalar ile enerji kaybetmeleri iki referans sistemine göre incelenmektedir. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi laboratuvar sistemi denilen referans

sisteminde eksen sistemi sabittir; nötron  $v_0$  hızı ile giderek hareketsiz olduğu kabul edilen hedef çekirdeğe çarpmaktadır. Her iki çekirdeğin ortak kütle merkezi de, bu durumda  $v_c$  hızı ile duran hedefe yaklaşacaktır. Çarpışmadan sonra nötron  $v$  hızı ile,  $\theta$  açısı ile belirlenen bir istikamette yollarına devam edeceklerdir.

Kütle merkezi sistemi adı verilen sistemde ise eksen sistemi kütle merkezi üzerine konulmuştur. Burada nötron  $v_0 - v_c$  hızı ile, hedef çekirdekte  $v_c$  hızı ile çarpışma noktasına gelir. çarpışmadan sonra her iki çekirdekte  $\psi$  açısı ile belirlenen yeni bir istikamette aynı hızlarla, çarpışma noktasından uzaklaşırlar.



Şekil. 2.11. (a) Laboratuvar sistemi (b) Kütle merkezi sistemi (Aybers ve Bayülken, 1990)

Laboratuvar sisteminde ağırlık merkezinin hızı aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$V_c = v_0 \frac{m}{m + M} \quad (25)$$

kütle merkezi sisteminde ise nötronun hızı,

$$v_0 - v_c = v_0 \frac{M}{m + M} \quad (26)$$

olarak belirlenir.

C noktasından bakıldığında toplam momentum,

$$m\left(\frac{MV_0}{m+M}\right) - M\left(\frac{mV_0}{m+M}\right) = 0 \quad (27)$$

olur. Çarpışmadan sonra da toplam momentum sıfır olacağından, nötron  $\psi$ , hedef çekirdek ise  $180^\circ$  istikametinde yollarına devam ederler.

$M=m$  olduğu zaman  $v=0$  olur, yani nötron, kütlesi kendisinininkine eşit olan bir çekirdek ile tam ortadan çarpıştığı zaman, tüm enerjisini bir çarpışmada kaybeder. Bu nedenle hidrojen çekirdeği en uygun bir moderatör (yavaşlatıcı) malzemesidir.

$M$  kütlesi nötrona kıyasla çok büyük olduğu zaman ise, nötron hemen hemen hiç enerji kaybetmeden geri sıçrar ve yaklaşık aynı hızda yoluna devam eder.

Kinetik enerji kaybındaki oran,

$$\frac{E}{E_0} = \frac{\frac{mv^2}{2}}{\frac{mv_0^2}{2}} = \frac{v^2}{v_0^2} = \left(\frac{M-m}{M+m}\right)^2 \quad (28)$$

olarak belirlenir.

$$\frac{M}{m} = A$$

$A$  kütle sayısı olarak göz önüne alınacak olursa;

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2 = \alpha \quad (29)$$

eşitliği yazılabilir. Bu şekilde tarif edilmiş olan  $\alpha$  sayısına Enerji Kaybı Sayısı adı verilir. Bağlı enerji kaybı ise aşağıdaki gibi tarif edilmektedir.

$$\frac{E_0 - E}{E_0} = \frac{\Delta E}{E_0} = 1 - \alpha = \frac{4A}{(A+1)^2} \quad (30)$$

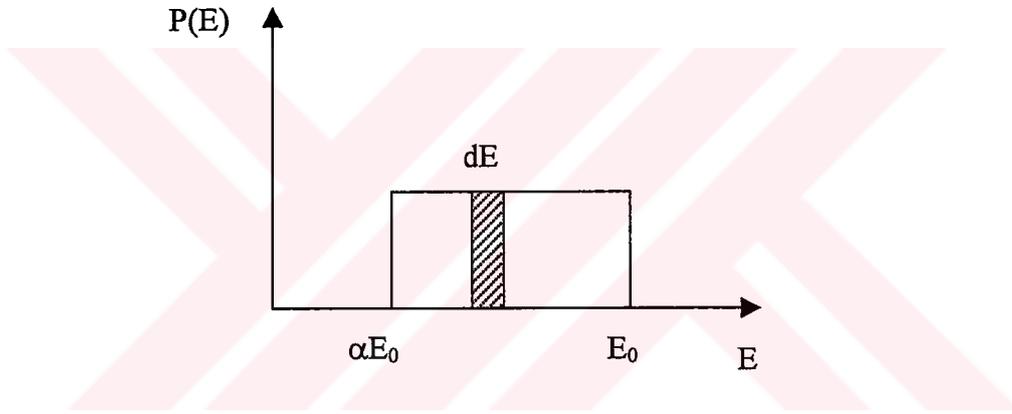
### 2.5.5. Ortalama logaritmik enerji kaybı

Nötronlar her çarpışma başına ortalama enerji kayıplarının bilinmesi faydalıdır. Başlangıç enerjisi  $E_0$  olan nötronlar, çarpışma açısına bağlı olarak,  $E_0$  ( $\psi=0^\circ$ ) ile  $\alpha E_0$  ( $\psi=180^\circ$ ) arasında değişen bir enerji seviyesine ineceklerdir (Aybers ve Bayülken, 1990).

Bilindiği gibi (a,b) aralığında üniform dağılım gösteren bir x rastlantı değişkeninin olasılık yoğunluğu dağılım fonksiyonu,

$$P(x)dx = \frac{dx}{b-a} \quad (31)$$

şeklindedir. Şekil 2.13. olasılık yoğunluk fonksiyonu'nu göstermektedir.



Şekil 2.12. Olasılık yoğunluk fonksiyonu

Benzer şekilde nötronların ( $E_0, \alpha E_0$ ) aralığındaki çarpışmadan sonraki olasılık yoğunluk fonksiyonu,

$$P(E)dE = \frac{dE}{E_0 - E_0\alpha} \quad (32)$$

şeklindedir.

Ortalama logaritmik enerji kaybı aşağıdaki gibi tarif edilmiştir.

$$\xi = \ln E_0 - \ln E = \ln\left(\frac{E_0}{E}\right) \quad (33)$$

nötron enerji kaybını, olasılık yoğunluk fonksiyonu ile çarpılarak ve bu çarpımın  $\alpha \cdot E_0$  ile  $E_0$  aralığında integrali alınmak suretiyle ortalama logaritmik enerji kaybı bulunabilir.

$$\xi = \int_{\alpha E_0}^{E_0} \ln(E_0/E) P(E) dE = \int_{\alpha E_0}^{E_0} \ln(E_0/E) \frac{dE}{E_0(1-\alpha)} \quad (34)$$

(E/E<sub>0</sub>)= x değişken dönüşümü yapılsa ve denklem düzenlenirse,

$$\xi = 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A+1}{A-1} = 1 + \frac{\alpha}{1-\alpha} \ln \alpha \quad (35)$$

denklemini elde edilir. A>10 değeri için, yaklaşık bir değer olarak

$$\xi = \frac{2}{A + (2/3)} \quad (36)$$

eşitliği kullanılabilir.

n çarpışma yapan bir nötron E<sub>1</sub> enerjisinden E<sub>2</sub> enerjisine inerse;

$$n\xi = \ln E_1 - \ln E_2 \quad (37)$$

eşitliği yazılabilir.

## 2.6. Nükleer Reaktör Malzemeleri

Bu çalışmanın amacı doğrultusunda incelenen, nükleer reaktörlerde gerek yakıt, gerek moderatör, gerekse yapı malzemesi olarak kullanılan çeşitli yakıt ve malzemeler ile bu malzemelerin belli başlı özellikleri şu şekildedir.

### 2.6.1. Uranyum

Uranyumun atom ağırlığı 238,03'tür. Doğal uranyum 3 izotopun çok zengin karışımıdır. Çizelge 2.2'de görüldüğü gibi uranyumun % 99,28 gibi tamamına yakın bir kısmını <sup>238</sup>U oluşturur. Geriye kalan % 0.78 oranı <sup>235</sup>U izotopudur. Üçüncü izotop <sup>234</sup>U'nun varlığı ise ancak eser miktardadır. Uranyum bir metaldir. Yeni parlatılmış yüzeyi donuk gümüşüdür. 19,050 gr/cm<sup>3</sup> olan yoğunluğu ile kurşundan % 70 daha yoğundur. 1132 °C sıcaklıkta erir ve 3818 °C sıcaklıkta buharlaşır. Uranyum çeşitli sıcaklıklarda değişik özellikler gösterir. Bu değişiklik kristal yapısındaki değişmeden ileri gelir, yani allotropik bir metaldir. Uranyum mühendislik açısından dayanıksız bir metaldir. Mekanik mukavemeti de korozyon direncide düşüktür. Isı ve elektrik iletkenliği demirin yarısı kadardır. Düşük

özellikleri ve allotropik davranışları nükleer reaktörlerde uranyumun saf metal olarak kullanılmasını önler. Ayrıca saf metal halinde elde edilemesi güç ve pahalıdır. Nükleer reaktör yakıtı uranyum oksitten yapılır. Alaşımlandırma suretiyle mukavemeti ve korozyon direncini artırma yöntemi uranyumda da denenmiş fakat başarılı olamamıştır. Onun içinde reaktörde uranyumun oksit halinde kullanılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 2.2. Uranyumun doğal izotopları

İzotop	Varlığı (%)	Yarı ömrü (yıl)
U-238	99,28	$4,5 \cdot 10^9$
U-235	0,78	$0,7 \cdot 10^9$
U-234	0,005	$2,4 \cdot 10^9$

$UO_2$ ,  $U_3O_8$  ve  $UO_3$  uranyum oksitleri arasında en önemli olan üçüdür. Reaktör yakıtı (LWR)  $UO_2$  yapılıdır. Kahverengi renklidir ve  $2800\text{ }^\circ\text{C}$  'da ergir. Saf uranyumun 2,5 misli yüksek sıcaklıkta ergimesi reaktör yakıtının bundan yapılması halinde kazalara çok güvenlidir.

$UO_2$  havada  $100\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığın üzerinde tekrar oksitlenmeye başlar ve sıcaklık  $750\text{ }^\circ\text{C}$  'ye geldiğinde tutuşur; yeşilimsi siyah renkte  $U_3O_8$  oluşur. Oksitlerin en kararlı olan sarı renkli  $UO_3$ 'ün uranyum teknolojisinde önemli bir yeri vardır. Zira cevherden saf uranyuma geçerken bir ara kademesi olarak elde olunur ve renginden dolayı sarı pasta adı verilir. Sarı pastanın, reaktör yakıtı olarak kullanılacak uranyum dioksite dönüştürülmesi  $400\text{-}700\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkları arasında hidrojen veya karbon monoksit ile indirgenmesi ile olur.  $UF_6$ ,  $UF_4$  nükleer yakıt teknolojisinin iki önemli ara malzemesidir.  $UF_6$  uranyumun tek gaz halidir;  $56,5\text{ }^\circ\text{C}$  'de buharlaşır.  $UF_4$  katıdır; renginden dolayı yeşil tuz diye adlandırılır.  $UC$  ve  $UC_2$  ergimiş uranyum ile karbonun veya karbon monoksitin reaksiyonundan elde olunurlar. Uranyum karbüre geleceğin reaktör yakıtı olarak bakılmaktadır. Gerek iletkenliği ve gerekse ergime noktası uranyum dioksitten daha yüksektir. İletkenliği daha iyi olması yakıt içinde sıcaklık dağılımını yumuşatacak, o da yakıt ömrünü (reaktör içinde kalış süresini) uzatacaktır. Ergime noktasının yüksekliği ve reaktör güvenliğini artıracaktır.

### 2.6.2. Toryum

Toryum metalinin teorik yoğunluğu  $\rho=11.72\text{ gr/cm}^3$ 'dür. Toryum' un ergime noktası, imalat prosesine göre,  $1725$  ila  $1775\text{ }^\circ\text{C}$  dolaylarındadır. Toryum da uranyum gibi doğada

serbest halde bulunmaz, fakat 60 civarında mineralin içinde rastlanır. Bunlardan sadece monazit ve thorite, toryum üretiminde kullanılır. Bu mineraller de genellikle nadir toprak elementleri ile birlikte bulunmaktadır. Toryum atomu doğada  $^{232}\text{Th}$  izotopu ile  $\text{ThO}_2$  formunda bulunmaktadır.  $^{232}\text{Th}$  atom çekirdeği 90 adet proton ve 142 adet nötron bulundurmaktadır. Toryum atomu 232 kütle numaralı izotopu düşük enerji nötronlar ile bombardıman edildiğinde fisyon reaksiyonunu gerçekleştirmez ve  $^{233}\text{Th}$ 'e dönüşür.  $\beta$  aktivitesine sahip olan  $^{233}\text{Th}$  izotopu bir elektron atarak yarı ömrü 27 gün olan  $^{233}\text{Pa}$ 'e dönüşmektedir.  $^{233}\text{Pa}$  yine bir elektron atarak  $^{233}\text{U}$  kütle numaralı bölünebilir özelliklere sahip izotopuna dönüşür. Bölünebilir çekirdeklerin üretilmesine neden olduğu için  $^{232}\text{Th}$  izotopu fertil (doğurgan) madde şeklinde tanımlanır. Nükleer teknolojiye Toryum' un önemi, nötron bombardımanı altında, çok iyi bir fisyon çekirdeği olan  $^{233}\text{U}$ 'e dönüşmesidir.

### 2.6.3. Hafif su ( $\text{H}_2\text{O}$ )

Su, moderatör malzeme olarak önemli bir malzemedir. Hafif su diğer moderatörlere göre daha büyük yavaşlatma gücüne sahiptir. Hafif su ucuz ve daha kolay bulunur. Buna paralel olarak hafif suyun nötron absorpsiyon tesir kesiti çok büyüktür. Dolayısıyla yavaşlatma oranı küçüktür ve bu nedenle doğal uranyum yakıtlı reaktörlerde kullanılmaz. Aksine zengin uranyum reaktörlerinde  $\text{H}_2\text{O}$  çok kullanılan bir moderatördür. Hafif suyun aynı zamanda soğutucu olarak da kullanılabilmesi, reaktör tasarımında kolaylık sağlar. Geçmişte zengin uranyumlu araştırma reaktörlerinde moderatör, reflektör, soğutucu ve zırh gibi çeşitli görevlerde çok kullanılmıştır. Hafif suyun buharlaşma sıcaklığının düşük olması güç reaktörlerinde kullanılmasının nispeten zorlaştırmıştır. Örneğin PWR tipi basınçlı su reaktörlerinde kullanılan moderatör ve soğutucu olarak kullanılmasında  $280\text{ }^\circ\text{C}$  ile  $320\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıklarında buharlaşmaması için reaktör kabının yüksek basınç altında bulundurulması gerekmektedir. Soğutucuya radyoaktivite bulaşmasını önlemek amacı ile reaktörlerde demineralize su kullanılmaktadır. Bu durumda su içinde diğer yabancı maddeler yok denecek kadar azdır ve içerde sadece havadan alınan ergimiş azot bulunur. Soğutma suyu içinde bazı oksijen reaksiyonları, radyoaktif izotoplar oluşmasına neden olur. Bunlardan biri  $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$  reaksiyonudur. Reaksiyon ürünü olan  $^{16}\text{N}$  izotopunun yarı ömrü 7.4 saniye olup 6-7 MeV enerjili gama ışınları yayınlamaktadır. Diğer bir oksijen reaksiyonu da  $^{17}\text{O}(n,p)^{17}\text{N}$  reaksiyonudur.  $^{17}\text{N}$  radyoizotopunun yarı ömrü 4.14 saniye olup 3.7 MeV  $\beta$  ile 1 MeV enerjili gecikmiş nötron yayınlar. Bu nedenle soğutma sistemine nötron zırhı yapmak gerekmektedir. Daha önemsiz olmakla beraber, diğer bir oksijen reaksiyonu da  $^{18}\text{O}(n,p)^{18}\text{O}$  reaksiyonudur. Termal nötron reaksiyonu olan bu

ışınımlı yakalama reaksiyonunun tesir kesiti 0.21 mbarn'dır. <sup>19</sup>O izotopunun yarı ömrü ise 29 saniyedir. Bütün bu radyo izotopların yarı ömürleri çok kısa olduğu için, bunlar sadece reaktör çalışırken etkili olmaktadır.

#### 2.6.4. Ağır Su (D<sub>2</sub>O)

Yavaşlatma gücü yeterli sayılan, absorpsiyon tesir kesitinin çok düşük olması nedeniyle de moderasyon oranı çok büyük olan ağır su, çok iyi moderatör malzemesidir. Bu özellikleri ile doğal uranyum yakıtlı reaktörlerde aranan bir yavaşlatıcı olmuştur. Heterojen yapıllı doğal uranyum reaktörlerinde moderatör olarak grafit yerine ağır su kullanıldığı zaman reaktör boyutları daha küçük olmaktadır. Ağır suyun saf haldeki yoğunluğu 1.105 gr/cm<sup>3</sup>, ergime noktası 3.82 °C, buharlaşma sıcaklığı ise 101.42 °C'dir. Bu nedenle ağır su aynı H<sub>2</sub>O gibidir. Ağır suyun en önemli dezavantajı pahalı olmasıdır, zira anormal su içinde 1/6500 oranında (% 0.015) oranında bulunur ve H<sub>2</sub>O'dan ayrılması zordur. Aşağıdaki üç yöntem, bu ayrıştırma işleminde kullanılmaktadır.

- a. Katalitik değişme
- b. Damıtma ve elektroliz ile sudan ayırma
- c. Sıvı hidrojen damıtılması

#### 2.6.5. Karbon ( C )

Karbonun yavaşlatma gücü nispeten yavaş olmakla beraber, moderasyon oranı yeterince büyüktür ve heterojen reaktörlerde doğal uranyum ile kullanılmaya uygundur. Karbonun allotropik bir şekli olan, nispeten yumuşak ve siyah görümlü bir malzemedir. Bu madde doğada doğal olarak bulunmakla beraber içindeki yabancı maddeler nedeni ile reaktörlerde kullanılmaz. Karbonlu malzemelerin yüksek sıcaklıkta kısmen kristalizasyonu ile yapay grafit imal edilmektedir. Reaktör kalitesinde, grafit petrol koku veya baca kazıntılarından yapılmaktadır. Dolgu malzemesi 1200 °C sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra öğütülür ve asfalt, zift, şeker veya kola gibi bir yapıştırıcı malzeme ile karıştırılarak ekstrüzyon ile şekillendirilir. Yeşil çubuklar ismini taşıyan bu malzeme atmosfer içinde 20 gün 1100 °C sıcaklığında karbonizasyon işlemine tabi tutulur. Bir kere fırınlanmış grafit elektrik fırınlarında 25-35 gün 2600-2800 °C sıcaklığında grafitizasyon işlemine tabi tutulur. Safılık derecesini arttırmak için klorlu gazlar ile 2500 °C sıcaklığında tekrar fırınlanır. Bu şekilde elde edilen yapay grafit reaktör kalitesinde yoğunluğu 1.65 gr/cm<sup>3</sup>'dir grafitin içinde yabancı maddelerin özellikle Bor'un bulunması onun özelliklerini önemli ölçüde engeller.

### 2.6.6. Berilyum (Be)

Yavaşlatma gücü grafitin yavaşlatma gücüne yakın olan berilyum, iyi bir moderatördür. Ayrıca berilyumun ısı iletken katsayısı iyi olup, korozyona karşı çok dayanıklıdır ve radyasyon altında çalışmaya çok elverişlidir. Bu gibi çok iyi avantajlarına rağmen berilyumun nükleer reaktörlerde şimdiye kadar kullanılmamış olmasının bazı önemli nedenleri vardır. Berilyumun bu dezavantajları çok pahalı olması ve ayrıca toz halinde sağlığa zararlı özellikler içermesidir. Dünyada çeşitli şekilde berilyumun ticari üretimde hammadde olarak Berly ( $3\text{BeO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $6\text{SiO}_2$ ) kullanılmaktadır. Bugün Brezilya, Arjantin ve Hindistan'da %8-14%14 kadar BeO ihtiva eden mineraller işleme tabii tutularak, berilyum, alüminyum ve diğer alkali metaller eriyebilen sülfatlara dönüştürülür. Bu yolla çöktürülen  $\text{Be}(\text{OH})_2$ ,  $\text{NF}_4\text{HF}_2$  içinde eritilerek  $\text{BeF}_4$  elde edilir. Bu  $\text{BeF}_4$   $800^\circ\text{C}$  sıcaklıkta ısıtılarak  $\text{BeF}_2$  haline getirilir ve Mg ile indirgenerek berilyum elde edilir. Elde edilen berilyumun yoğunluğu  $1.85 \text{ gr/cm}^3$ 'dür.

### 2.6.7. Bor (B)

Doğal bor iki izotoptan oluşmaktadır. %19.8 oranında  $^{10}\text{B}$  ve % 80.2 oranında  $^{11}\text{B}$ 'dir.  $^{10}\text{B}$ 'un absorpsiyon tesir kesiti 3900 barn,  $^{11}\text{B}$ 'inki ise 0.5 barn civarındadır. Bu suretle ortalama absorpsiyon tesir kesiti 755 barn olmaktadır. Bor'un erime noktası  $2000-3000^\circ\text{C}$  arasındadır. Yoğunluğu ise  $2.37 \text{ gr/cm}^3$ 'dür. Bor metalik bir malzeme olmadığı için, mekanik özellikleri iyi değildir. Bu nedenle ya mekanik özelliklerini iyileştirici bir bileşik halinde, yada uygun bir zarf içinde kullanılır. Bor nükleer mühendislikte genellikle moderatör malzemesinden ziyade reaktör kontrol malzemesi olarak kullanılmaktadır.

### 2.6.8 Flibe ( $\text{Li}_2\text{BeF}_4$ )

Eriyik tuz lityum flor  $\text{LiF}$ , berilyum flor ( $\text{BeF}_2$ ), toryum Flor ( $\text{ThF}_4$ ), uranyum flor ( $\text{UF}_4$ ),  $\text{LiPb}$  ( $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ ),  $\text{LiH}$ , saf lityum ve bunların bileşimlerinden meydana gelebilir.  $\text{BeF}_2$  ve  $\text{LiF}$  bileşimi literatürde flibe ( $\text{Li}_2\text{BeF}_4$ ) olarak bilinmektedir. Flibenin erime sıcaklığı  $363^\circ\text{C}$  olan bir eriyiktir. Bir gr-mol'u  $37.13 \text{ gr}$ 'dir.

### 2.6.9. Alüminyum (Al)

Alüminyumun atomik kütle değeri 26.9815 akb, yoğunluğu  $2.70 \text{ gr/cm}^3$ , absorpsiyon tesir kesit  $0.230 \text{ barn}$ , termal ve epitermal saçılma tesir kesitleri  $1.4 \text{ barn}$ 'dır. Alüminyum termal

nötron absorpsiyon tesir kesiti yeterince düşüktür, mekanik özellikleri iyidir ve radyasyon altında çalışmaya oldukça elverişlidir. Yeterince saf olduğu zaman pH derecesi iyi kontrol edilen demineralize su içinde 100 °C sıcaklığa kadar korozyona dayanıklıdır. Bu nedenle alüminyum güç reaktörleri için uygun bir yapı malzemesi değildir.

#### 2.6.10. Magnezyum (Mg)

Magnezyum doğada % 78.60 <sup>24</sup>Mg, % 10.11 <sup>25</sup>Mg, %11.29 <sup>26</sup>Mg ve <sup>27</sup>Mg olmak üzere 4 izotoptan oluşur. Magnezyumun atomik kütle değeri 24.312 akb, yoğunluğu 1.74 gr/cm<sup>3</sup>, absorpsiyon tesir kesiti 0.063 barn, termal ve epitermal saçılma tesir kesitleri sırasıyla 3.6 ve 3.4 barn'dır magnezyum saf halde kullanılmamış olmakla beraber, içine % 1'den daha az Al ve Be katılmış bir alaşım halinde nükleer reaktörlerde yakıt zarfı olarak kullanılmaktadır. Bu zarf malzemesinin en büyük dezavantajı ergime derecesinin düşük olmasıdır. Magnezyum'un en iyi özelliği düşük absorpsiyon tesir kesitinin çok küçük mertebelerde olması nedeniyle nükleer reaktörlerde kullanılan en iyi moderatör olmasıdır.

#### 2.6.11. Tabii lityum (Li)

Tabii lityum doğada % 7.52 <sup>6</sup>Li ve % 92.48 <sup>7</sup>Li olmak üzere 2 izotop halinde bulunur. Tabii lityumun atomik kütle değeri 6.939 akb, yoğunluğu 0.534 gr/cm<sup>3</sup>, absorpsiyon tesir kesiti 70 barn, termal ve epitermal saçılma tesir kesitleri ise sırasıyla 1.4 ve 0.98 bar'dır.

#### 2.6.12. Sodyum (Na)

Sodyumun atomik kütle değeri 22.98 akb, yoğunluğu 0.97 gr/cm<sup>3</sup>, absorpsiyon tesir kesiti 0.53 barn, termal ve epitermal saçılma tesir kesitleri sırasıyla 4.0 ve 3.1 barn'dır.

#### 2.6.13. Kurşun (Pb)

Kurşun doğada % 1.48 <sup>204</sup>Pb, % 23.6 <sup>206</sup>Pb ve % 22.6 <sup>207</sup>Pb ve % 52.3 <sup>208</sup>Pb olmak üzere 4 izotoptan oluşur. Kurşunun atomik kütle değeri 207.19 akb, yoğunluğu 11.342 gr/cm<sup>3</sup>, absorpsiyon tesir kesiti 0.170 barn, termal ve epitermal saçılma tesir kesitleri sırasıyla 11 ve 11.3 barn'dır. Kurşun izotopları doğal olarak meydana gelen her bir radyoaktif serinin son ürünleridir. Kurşun izotoplarının hepsi de kararlı bir yapıya sahiptir. Düşük absorpsiyon tesir kesitine sahip olması nedeniyle iyi bir moderatör özelliğine sahiptir.

#### 2.6.14. Altın (Au)

Altın'ın atomik kütle değeri 196.966 akb, yoğunluğu  $19.282 \text{ gr/cm}^3$ , termal saçılma tesir kesiti 9.3 barn, absorpsiyon tesir kesiti 98.8 barn'dır.

Ayrıca, nükleer reaktörlerde kullanılan diğer moderatör malzemelerden olan lityum florid'in atomik kütle değeri 25.940 akb, yoğunluğu  $2.620 \text{ gr/cm}^3$ , lityum hidrid'in atomik kütle değeri 7.65 akb, yoğunluğu  $0.780 \text{ gr/cm}^3$ , berilyum florid'in atomik kütle değeri 47.01 akb ve yoğunluğu  $1.986 \text{ gr/cm}^3$ 'dür.

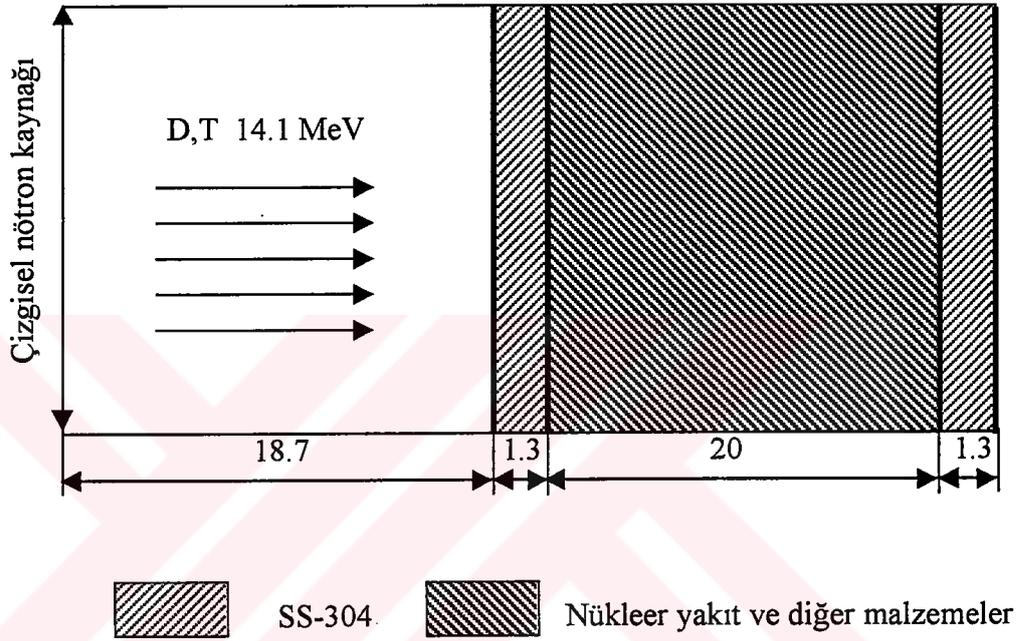
## BÖLÜM III

### MATERYAL VE METOT

İncelenen blankette nötronik hesapların yapılabilmesi için, nötron akısını, geometri, nötron enerjisi ve hareket doğrultusuna göre tarif eden Boltzman Transport Denklemine (Bonilla, 1957) çözülmesi gerekmektedir. Nötron akı dağılımını etkileyen faktörler nötron ve çekirdek arasındaki reaksiyonlar ile ortam malzemesinin atomik yoğunluğu ve ortam geometrisidir. Malzemelerin nötron karşısında nötronun kinetik enerjisine göre davranışı farklıdır. Genellikle nötron enerjisine bağlı olarak malzeme-nötron ilişkisini fonksiyonel olarak tarif etmek mümkün değildir. Dolayısıyla da Boltzman Transport Denklemine analitik çözümü mümkün değildir. Bu nedenle tesir kesit değerleri kullanılarak Boltzman Transport Denklemi nümerik olarak çözülebilir. Tesir kesit değerleri nötron enerjisine göre düzenlenmiş olarak data kütüphaneleri şeklinde kullanıma sunulmuştur. Nümerik çözüm için füzyon odasının yapısı gereği silindirik koordinatlar seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan yapının kesiti Şekil 3.1’de verilmiştir.

Boltzman Transport Denklemine çözümü için XSDRN (Greene ve diğ., 1969) nötron transport bilgisayar kodu ve ANISN (Engle ve diğ., 1970) nötron transport bilgisayar kodu kullanılmıştır. XSDRN nötron transport kodunda malzeme nötron ilişkisini nötron enerjisine bağlı olarak veren tesir-kesit kütüphanesi olarak 238-grup ENDF/B-V (Greene ve diğ., 1995) tesir kesit kütüphanesi kullanılmıştır. ENDF/B-V tesir kesit kütüphanesi kritik analizlerde temel kütüphanedir. Ayrıca bu kütüphane LAW olarakta bilinir. XSDRN nötron transport kodunda bir çok kütüphane kullanılabilir. AMPX-77 tarafından işlenen ENDF/B-V tesir kesit kütüphanesinde 300’den fazla nükleid için bilgiler bulunur. Nötron enerjisi 148 hızlı, 90 termal (3 eV’un altında) gruba ayrılmıştır. ANISN nötron transport kodunda, malzeme nötron ilişkisini nötron enerjisine bağlı olarak veren tesir-kesit kütüphanesi olarak CLAW-IV (Al-Kusayer ve diğ., 1998) tesir kesit kütüphanesi kullanılmıştır. Bu iki bilgisayar kodu ile yapılan çalışmalarda % 99 yaklaşıklı değerler elde edildiğinden XSDRN nötron transport kodunun verdiği sonuçlar dikkate alınmıştır. Nötron akısının açığa göre değişimi, Gaussian quadrature metodu kullanılarak  $S_8$ - $P_3$  yaklaşımıyla hesaplanmıştır. Füzyon odası 1.3 cm kalınlığında SS-304 paslanmaz çeliği ile

çevrelenmiştir. Bundan sonra 20 cm kalınlığa sahip nötronik analizi yapılacak olan çeşitli nükleer yakıt ve malzemelerin oluşturduğu katman gelmektedir. Bu katmanı ise yine 1.3 cm kalınlığında SS-304 çeliği takip etmektedir. Hesaplamalarda kullanılan nükleer yakıt ve malzemeler ile bunların yoğunlukları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Füzyon reaksiyon odasının gücü  $2.25 \text{ MW/m}^2$  olacak şekilde nötron akısı alınmıştır. Bu değerler literatürde geçmekte olup, bu güçteki bir reaksiyon  $10^{14}$  tane MeV’lik füzyon nötronu üretecektir.



Şekil 3.1. Nötronik hesaplarda kullanılan blanketin kesit görünüşü  
(Boyutlar cm cinsinden verilmiştir)

Bölge	Malzeme	Yoğunluk gr/cm <sup>3</sup>	İçerdiği izotop ve elementler	Atomik yoğunluk*10 <sup>24</sup> Atom/cm <sup>3</sup>
Çelik Bölgesi	SS-304	7.81	C	7.87287.10 <sup>-4</sup>
			Si	6.73380.10 <sup>-4</sup>
			Cr	1.72770.10 <sup>-2</sup>
			Fe	5.92626.10 <sup>-2</sup>
			Ni	8.05460.10 <sup>-3</sup>
Malzeme Bölgesi	Au	19.282	<sup>197</sup> Au	5.89473.10 <sup>-2</sup>
	Al	2.70	<sup>27</sup> Al	6.02252.10 <sup>-2</sup>
	Pb	11.342	<sup>207</sup> Pb	3.29944.10 <sup>-2</sup>
	B	2.37	<sup>11</sup> B	1.29757.10 <sup>-1</sup>
	C	2.2670	<sup>12</sup> C	1.13775.10 <sup>-1</sup>
	K	0.89	<sup>39</sup> K	1.37436.10 <sup>-2</sup>
	Mg	1.74	<sup>24</sup> Mg	4.36632.10 <sup>-2</sup>
	Na	0.97	<sup>23</sup> Na	2.53993.10 <sup>-2</sup>
	Be	1.85	<sup>9</sup> Be	1.23796.10 <sup>-1</sup>
	BeF <sub>2</sub>	1.986	<sup>9</sup> Be <sup>19</sup> F	2.54483.10 <sup>-2</sup> 5.08967.10 <sup>-2</sup>
	D <sub>2</sub> O	1.105	<sup>2</sup> H <sup>16</sup> O	7.39431.10 <sup>-2</sup> 3.69715.10 <sup>-2</sup>
	H <sub>2</sub> O	1.0	<sup>1</sup> H <sup>16</sup> O	6.69168.10 <sup>-2</sup> 4.24974.10 <sup>-2</sup>
	Tabii Lityum	0.534	<sup>6</sup> Li <sup>7</sup> Li	3.44574.10 <sup>-3</sup> 4.24974.10 <sup>-2</sup>
	Li <sub>2</sub> BeF <sub>4</sub>	1.98	<sup>6</sup> Li <sup>7</sup> Li <sup>9</sup> Be <sup>19</sup> F	1.80675.10 <sup>-3</sup> 2.22833.10 <sup>-2</sup> 1.20450.10 <sup>-2</sup> 4.81801.10 <sup>-2</sup>
	LiH	0.780	<sup>6</sup> Li <sup>7</sup> Li <sup>1</sup> H	4.40396.10 <sup>-3</sup> 5.43156.10 <sup>-2</sup> 5.87195.10 <sup>-2</sup>
	LiF	2.620	<sup>6</sup> Li <sup>7</sup> Li <sup>19</sup> F	4.55163.10 <sup>-3</sup> 5.61368.10 <sup>-2</sup> 6.06884.10 <sup>-2</sup>
	Th	11.7	<sup>232</sup> Th	3.03721.10 <sup>-2</sup>
	U	19.050	<sup>235</sup> U <sup>238</sup> U	3.42740.10 <sup>-4</sup> 4.78603.10 <sup>-2</sup>
	ThO <sub>2</sub>	9.86	<sup>232</sup> Th <sup>16</sup> O	2.24931.10 <sup>-2</sup> 4.49863.10 <sup>-2</sup>
	UO <sub>2</sub>	10.97	<sup>235</sup> U <sup>238</sup> U <sup>16</sup> O	1.74710.10 <sup>-4</sup> 2.42930.10 <sup>-2</sup> 4.89385.10 <sup>-2</sup>
	UC	13.63	<sup>235</sup> U <sup>238</sup> U <sup>12</sup> C	2.34434.10 <sup>-4</sup> 3.25983.10 <sup>-2</sup> 3.28347.10 <sup>-2</sup>
	UF <sub>4</sub>	6.70	<sup>235</sup> U <sup>238</sup> U <sup>19</sup> F	9.17532.10 <sup>-5</sup> 1.27580.10 <sup>-2</sup> 5.14024.10 <sup>-2</sup>
	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	8.3	<sup>235</sup> U <sup>238</sup> U <sup>16</sup> O	1.27163.10 <sup>-4</sup> 1.78100.10 <sup>-2</sup> 4.74930.10 <sup>-2</sup>

Çizelge 3.1. Kullanılan malzemeler ve atomik yoğunlukları

## BÖLÜM IV

### NÜMERİK SONUÇLAR

Füzyon reaksiyonlarında çok miktarda enerjisi MeV mertebesinde olan nötron meydana gelecektir. Bu nötronlar yakıt ve moderatör malzemelerin atom çekirdekleri tarafından absorbe edilerek ya yeni füzyon yakıtı yada  $(n,2n)$ ,  $(n,3n)$  reaksiyonları ile nötron çoğalması meydana gelecektir bununla birlikte eğer nötron herhangi bir malzeme tarafından yutulmaz ise çarpışmalar meydana gelecektir. Bu çarpışma sonunda nötron yavaşlayacak ve kaybettiği kinetik enerji termal enerji seviyesine inecektir. Genelde düşük enerjili nötronlar ile malzemeler daha iyi nükleer reaksiyon gerçekleştirebilir.

Bir çok reaksiyonlar nötronlar ile sağlandığından, nükleer teknolojiye nötron çok büyük öneme sahiptir. Nötron nükleer teknolojiye sermaye olarak nitelendirildiğinden en iyi şekilde değerlendirilmesi arzulanır. Bu nedenle ne reaktör dışına kaçmasına nede absorpsiyon reaksiyonları meydana getirmesine izin verilmemelidir. Bu bilgilere paralel olarak bu çalışmada seçilen blankette, kullanılan malzemelerin füzyon nötronları karşısında göstermiş olduğu nötronik davranışlar incelenmiştir.

Seçilen blankette,  $(n,2n)$  nötron çoğalımı incelendiğinde, en iyi sonucu Şekil 4.1'de görüldüğü gibi blanket yarıçapına bağlı olarak 0.027 maksimum değeri ile 35. cm'de Au vermiştir. Diğer malzemeler Pb, Th, Tabii uranyum,  $ThO_2$ , UC,  $UO_2$ ,  $D_2O$ ,  $U_3O_8$ ,  $UF_4$  sırasıyla incelendiğinde maksimum değerlere yine 35. cm'de erişmişlerdir. Blankette incelenen diğer malzemelerin verdiği sonuçlar yani  $(n,2n)$  tesir kesitleri çok küçük olduğu için dikkate alınmamıştır.

$(n,3n)$  nötron çoğalımında ise en iyi sonuç Şekil 4.2 incelendiğinde blankette 35. cm'de 0.0059 değeri ile Th'da elde edilmiştir. Toryumu ise sırasıyla tabii uranyum,  $ThO_2$ , UC,  $U_3O_8$ ,  $UF_4$  takip etmektedir.

Şekil 4.3 füzyon nötronu için blanket yarıçapına bağlı olarak üretilen trityum miktarını göstermektedir. Yapay olarak üretilen trityum çok kıymetli füzyon yakıtıdır. Bu yakıt lityum izotoplarının nötron absorbe etmesiyle meydana gelir. Blankette incelenen

malzemelerden  $\text{Li}_2\text{BeF}_4$  33. cm'de ve  $\text{LiF}$ 'de 29. cm'de 0.29 maksimum trityum üretim oranına erişmişlerdir. Kullanılan diğer malzemelerden  $\text{BeF}_2$ ,  $\text{LiH}$ ,  $\text{Be}$  trityum üretimi açısından çok küçük neticeler verdiğiinden dikkate alınmamıştır. (Sahin ve diğ., 1986), (Yapıcı ve diğ. 1998), (Yapıcı ve diğ, 2000), (Yapıcı ve Özceyhan, 2000), (Ünalın ve diğ., 1998) Literatürde geçen bu çalışmalarda farklı blanket kompozisyonlarında ve geometrilerinde füzyon reaktörünün kendisinin çalışmasına yetecek trityum yakıtı üretim değerlerine erişilmiştir. Bu çalışmada ise kullanılan blanket yapısı değiştirildiğinde ve kullanılan malzeme bölgesi büyütüldüğünde trityum üretimin arttığı görülmüştür.

(n, $\gamma$ ) yani radyatif yakalama reaksiyonunda nötron absorbe eden malzeme yeni bir izotop haline gelir ve uyarılmış halde iken  $\gamma$  yayımı yaparak temel enerji haline döner. Bu bilgilere paralel olarak Şekil 4.4 incelendiğinde blankette 29. cm'de 0.098 değeri ile  $\gamma$  yayımı açısından maksimum değeri tabii uranyumun verdiği görülmüştür. Tabii uranyumu 29. cm'deki maksimum değerleri ile UC,  $\text{UO}_2$ , Th,  $\text{U}_3\text{O}_8$ ,  $\text{UF}_4$  ve  $\text{ThO}_2$  izlemektedir. Bu gibi reaksiyonlar sonucunda tabii uranyumdan çok kıymetli fisyon yakıtı olan  $^{239}\text{Pu}$  ve toryumdan ise  $^{233}\text{U}$  meydana gelir.

Şekil 4.5 malzemelerin, füzyon nötronu için blanket yarıçapına bağlı olarak, inelastik tesir kesitlerini göstermektedir. Şekil 4.5'de görüldüğü gibi blankette tabii uranyum 31. cm'de, UC 31. cm'de,  $\text{UF}_4$  32. cm'de, Th 31. cm'de,  $\text{UO}_2$  32. cm'de, Au 34. cm'de,  $\text{U}_3\text{O}_8$  31.cm'de,  $\text{BeF}_2$  31. cm'de, Th'de 33. cm'de en yüksek inelastik tesir kesiti değerlerine ulaşmışlardır. Eğer nötron çoğalımları incelenecek olursa aynı malzemeler için (n,2n) tesir kesitleri büyük olan malzemelerin inelastik tesir kesitlerinin küçük olduğu görülebilir. Ayrıca inelastik saçılmaya uğrayan izotop temel enerji haline dönerken  $\gamma$  yayımı yapar. Bu durumda Şekil 4.4 incelenirse aynı malzemeler için orantılı değişimin söz konusu olduğu görülür.

Şekil 4.6 blanketin malzeme bölgesinde tabii uranyum, UC,  $\text{UO}_2$ ,  $\text{U}_3\text{O}_8$ ,  $\text{UF}_4$ , Th,  $\text{ThO}_2$  kullanıldığında, füzyon nötronları için, blanket yarıçapına bağlı olarak malzemelerin fisyon tesir kesitlerini göstermektedir. Bu bölgede maksimum değer tabii uranyumda 35. cm'de görülmektedir. Tabiki bu reaksiyon (n,f) sonucunda enerji meydana gelir. Bu sonuç blankette oluşan fisyon reaksiyonundan kaynaklanır. Bu çalışmada blanket geometrisi değiştirilerek malzeme bölgesinden önce, moderatör malzemeler olarak nitelendirilen malzemeler içeren katman yerleştirilir ve (D,T) füzyon reaksiyonundan oluşan yüksek enerjili nötronlar termalize edilerek inceleme yapılacak olursa, fisyon yapan malzemeler

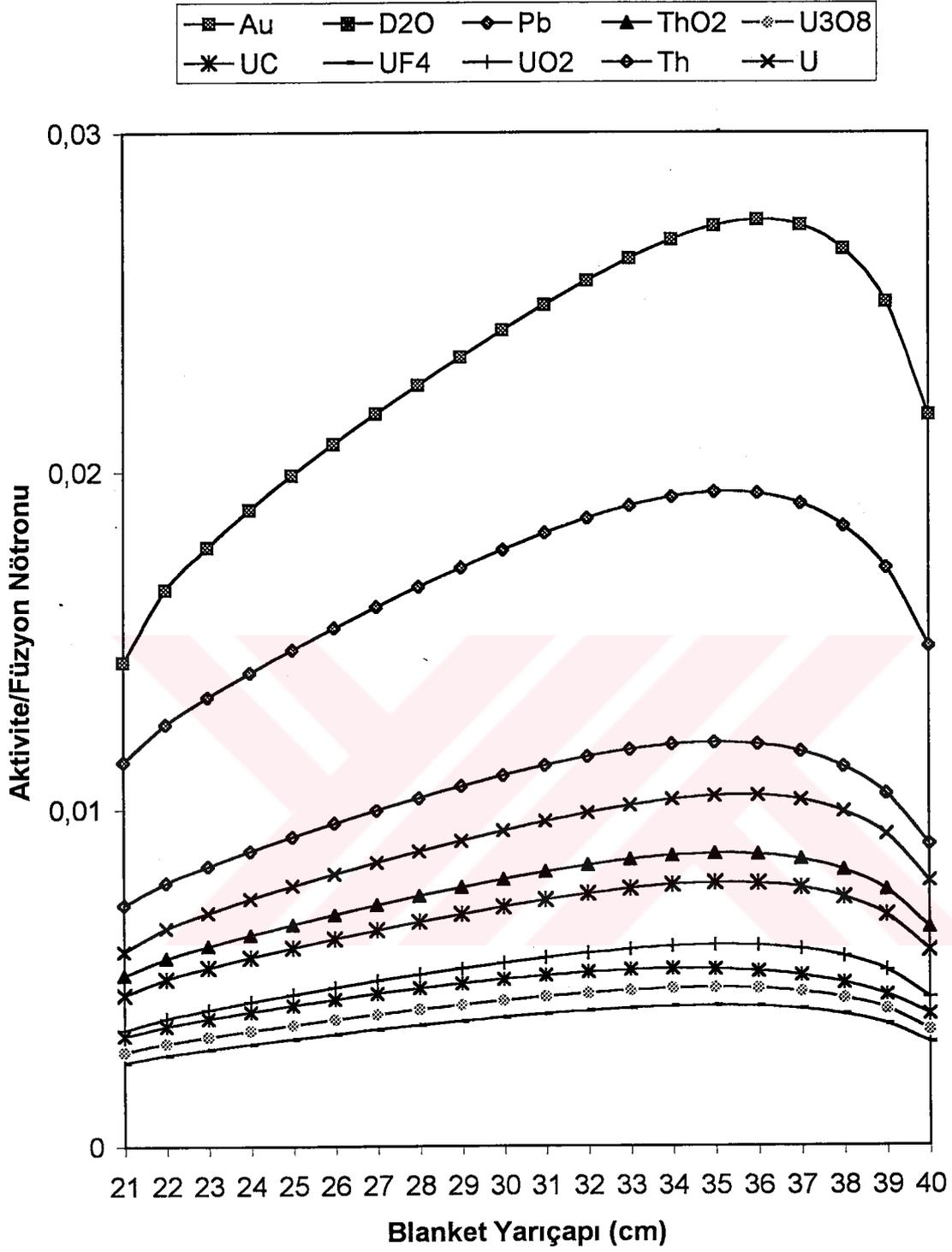
düşük enerjili nötronlarla daha iyi reaksiyon verdiğiinden daha çok enerji artışı meydana getirilebilir.

Şekil 4.7'den Şekil 4.29'a kadar olan şekiller araştırılan blankette kullanılan malzemelerin füzyon nötronu için toplam tesir kesitlerinin ve elastik saçılma tesir kesitlerinin blanket yarıçapına bağlı olarak değişimini göstermektedir. Araştırılan kritere göre bütün şekiller tek tek incelenecek olursa, Şekil 4.7'de Au'nun blanketin 31. cm'sinde maksimum değerleri verdiği nötron absorpsiyonun çok olduğu buna mukabil elastik saçılmanın az olduğu, Şekil 4.8'de Al'nin blanketin 28. cm'sinde en yüksek değerlere ulaştığı ve alüminyum'da elastik saçılmanın çok olduğu, Şekil 4.9'da BeF<sub>2</sub>'nin 29. cm'de maksimum değere ulaştığı elastik saçılmanın yine çok olduğu, Şekil 4.10'da Be'nin 25. cm'de en yüksek değere ulaştığı ve neredeyse toplam tesir kesitinin tamamının elastik saçılma doğrultusunda olduğu, Şekil 4.11'de Bor'un 29. cm'de en yüksek değerlere ulaştığı ve elastik saçılma tavrının çok olduğu, Şekil 4.12'de D<sub>2</sub>O'nun 28. cm'de maksimum değere sahip olduğu ve nötron absorpsiyonun çok düşük olduğu, Şekil 4.13'de Flibe'nin 34. cm'de en yüksek değere ulaştığı elastik saçılma tavrının düşük olduğu dolayısıyla burada flibenin trityum üretimi gibi diğer reaksiyonlar gösterdiği, Şekil 4.14'de H<sub>2</sub>O'nun 30. cm'de tepe yaptığı ve füzyon nötronları karşısında tavrının elastik saçılma doğrultusunda olduğu, Şekil 4.15'de karbonun 30. cm'de maksimum değerlere eriştiği ve nötron absorpsiyonun az buna karşın elastik saçılma tesir kesitinin büyük olduğu, Şekil 4.16'da kurşunun 27. cm'de maksimum değerleri verdiği ve nötron absorpsiyonunun az olduğu, Şekil 4.17'de LiF'in 29. cm'de en yüksek değerlere ulaştığı nötron absorpsiyonunun çok buna karşın elastik saçılmanın az olduğu, Şekil 4.18'de LiH'in 29. cm'de maksimum değerlere ulaştığı ve elastik saçılmanın az olduğu, Şekil 4.19'da tabii lityum'un 29. cm'de yüksek değerlere ulaştığı nötron absorpsiyonunun çok olduğu, Şekil 4.20'de Mg'nin 27. cm'de maksimum değerlere ulaştığı elastik saçılma tesir kesitinin küçük olduğu, Şekil 4.21'de K'nin 27. cm'de en yüksek değerlere sahip olduğu ve yine elastik saçılmanın çok olduğu, Şekil 4.22'de Na'nın 27. cm'de maksimum değerlere sahip olduğu elastik saçılmanın çok olduğu, Şekil 4.23'de ThO<sub>2</sub>'nin 29. cm'de en yüksek değere ulaştığı ve bu malzemede (n,γ) gibi reaksiyonların olduğu bu yüzden nötron absorpsiyonunun çok olduğu, Şekil 4.24'de Th'nin 29. cm'de tepe yaptığı ve nötron absorpsiyonunun olduğu, Şekil 4.25'de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>'in 29. cm'de maksimum değere ulaştığı elastik saçılmanın az buna mukabil nötron absorpsiyonunun çok olduğu, Şekil 4.26'da UC'nin 30. cm'de maksimum sonucu verdiği ve absorpsiyonun çok dolayısıyla elastik saçılmanın az olduğu, Şekil

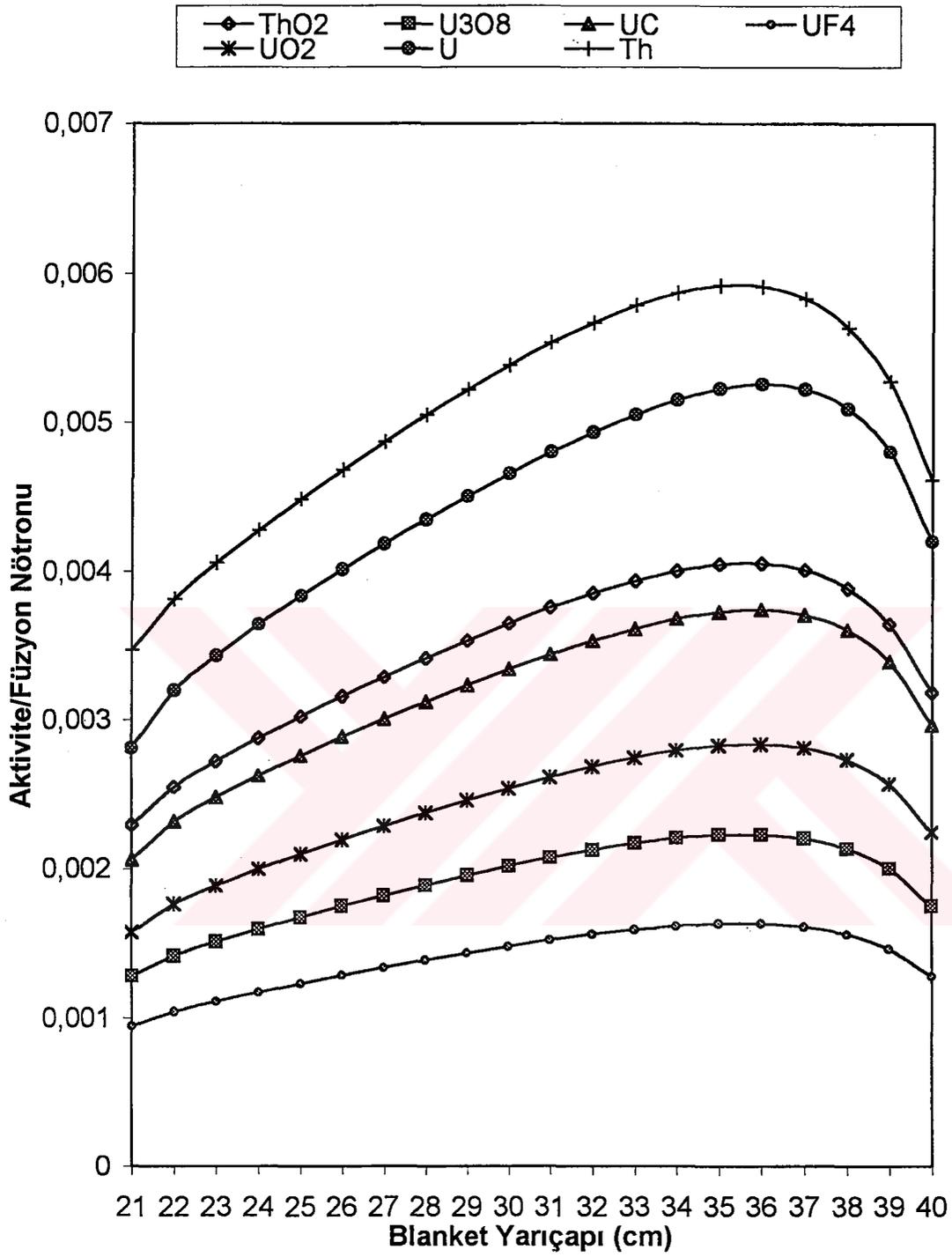
4.27'de  $UF_4$ 'ün 30. cm'de en yüksek değere ulaştığı yine absorpsiyonun büyük olduğu, Şekil 4.28'de  $UO_2$ 'nin 30. cm'de maksimum değere sahip olduğu elastik saçılmanın az olduğu, Şekil 4.29'da tabii uranyumun 30. cm'de en yüksek neticelere ulaştığı ve nötron absorpsiyonunun çok olduğu görülebilir.

Bu sonuçlar, incelenen malzemelerin nükleer çalışmalar açısından hangi amaçla kullanılacakları konusunda fikir verir.

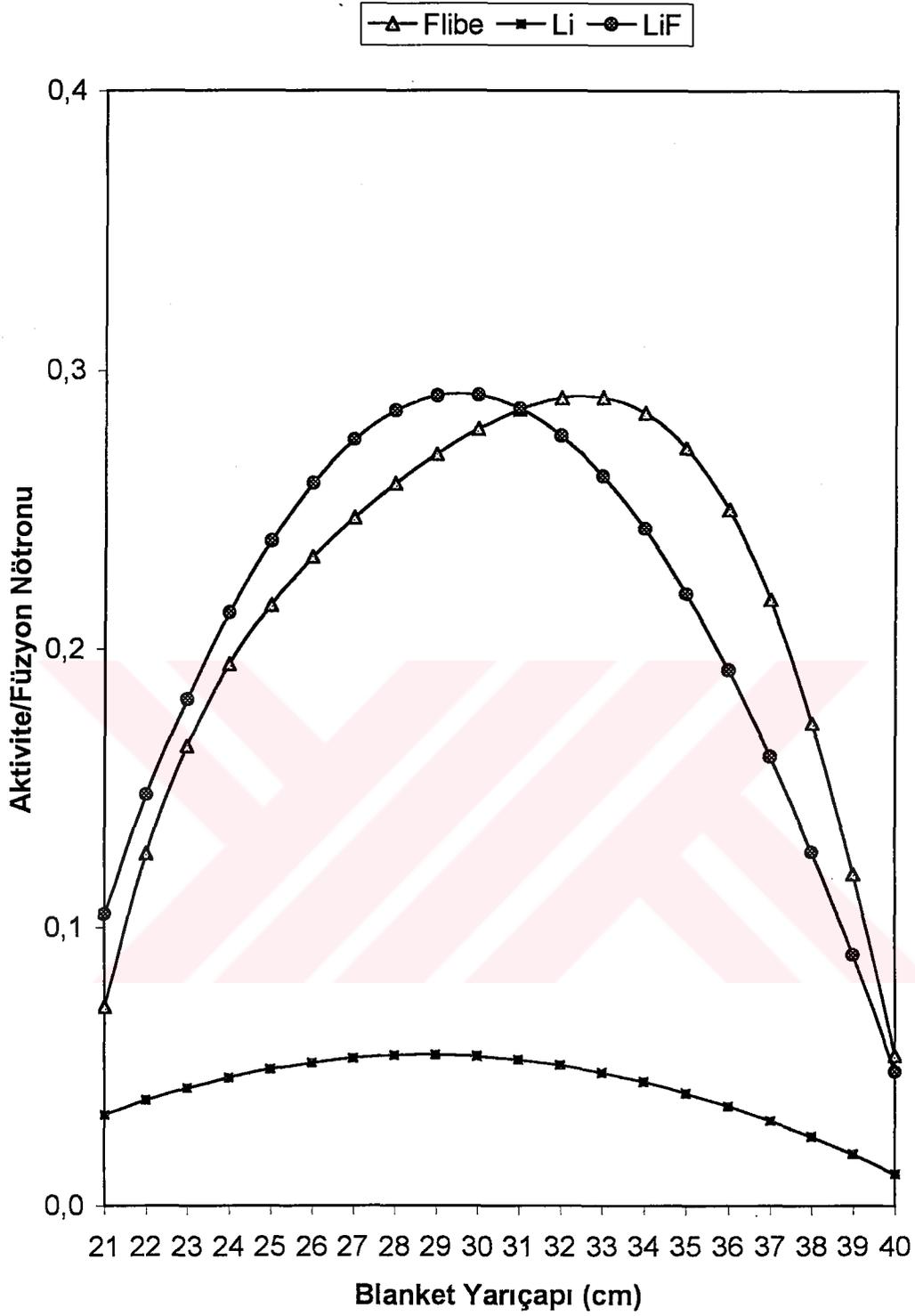




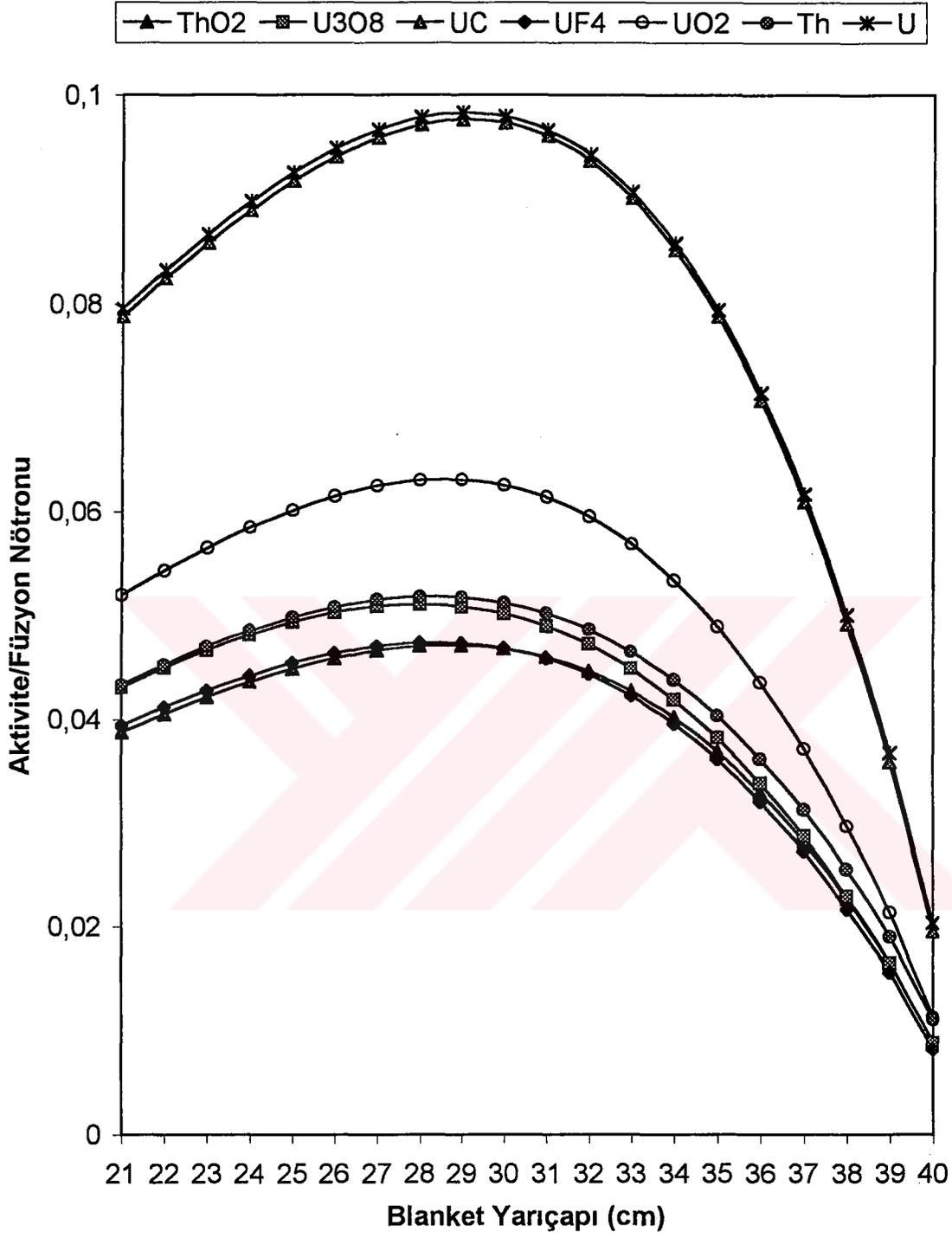
Şekil 4.1. Blankette kullanılan farklı malzemelerin füzyon nötronu için (n,2n) nötron çoğalımının blanket yarıçapına göre değişimi



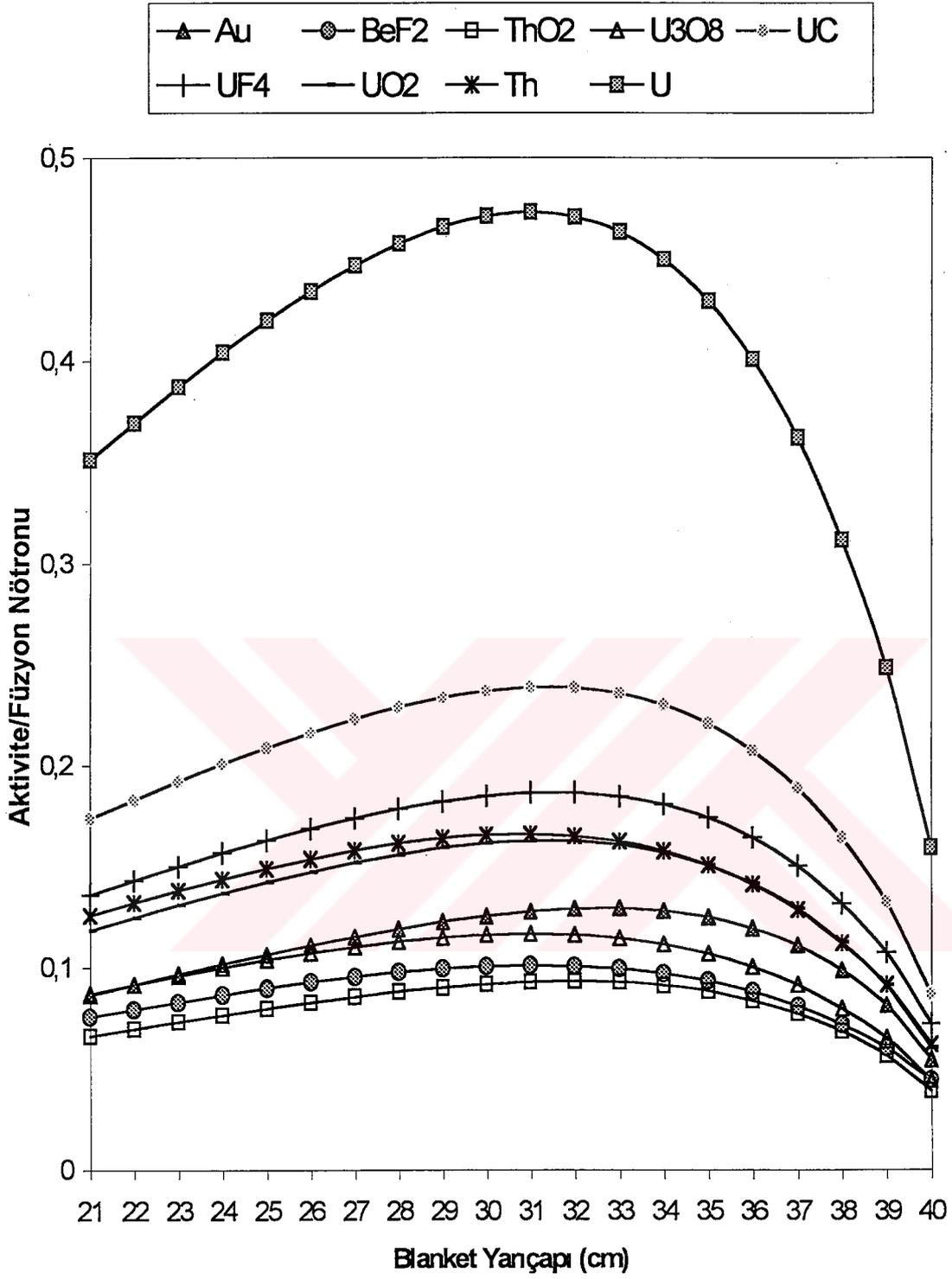
Şekil 4.2. Blankette kullanılan farklı malzemelerin füzyon nötronu için (n,3n) nötron çoğalımının blanket yarıçapına göre değişimi



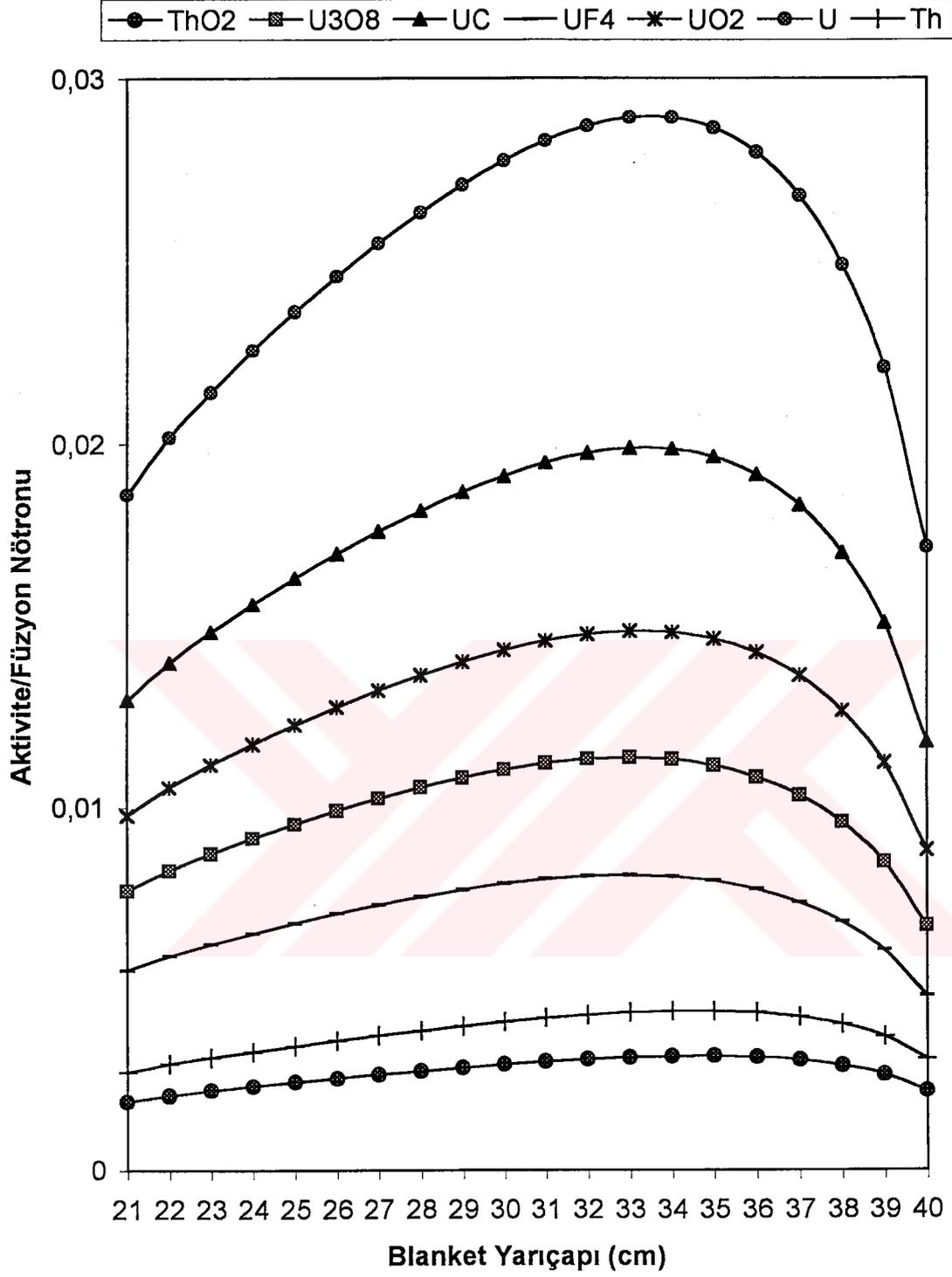
Şekil 4.3. Blankette kullanılan çeşitli malzemelerin füzyon nötronu için blanket yarıçapına bağlı olarak trityum üretimi



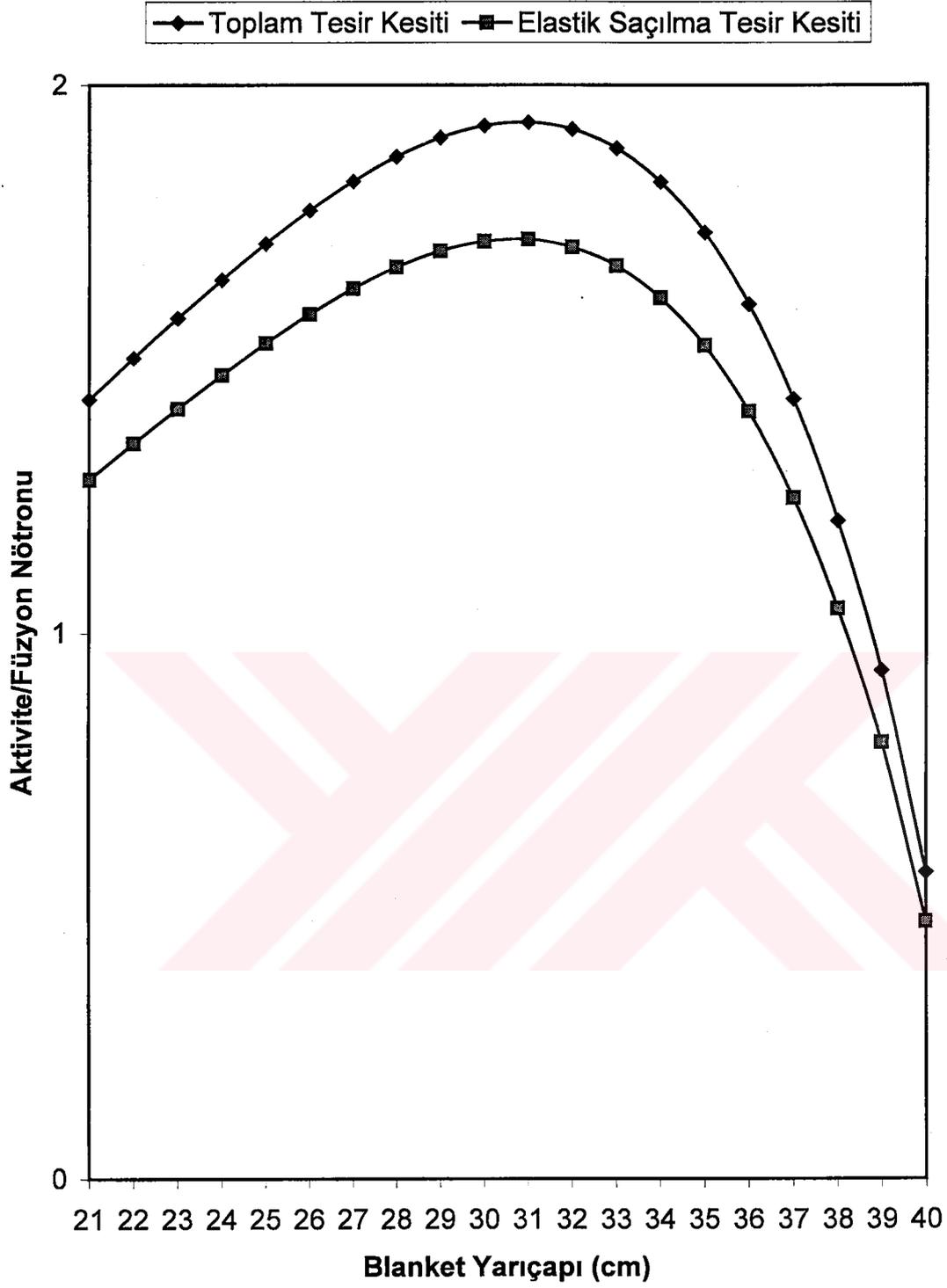
Şekil 4.4. Çeşitli malzemelerde füzyon nötronu için n,γ reaksiyonunun blanket yarıçapına göre değişimi



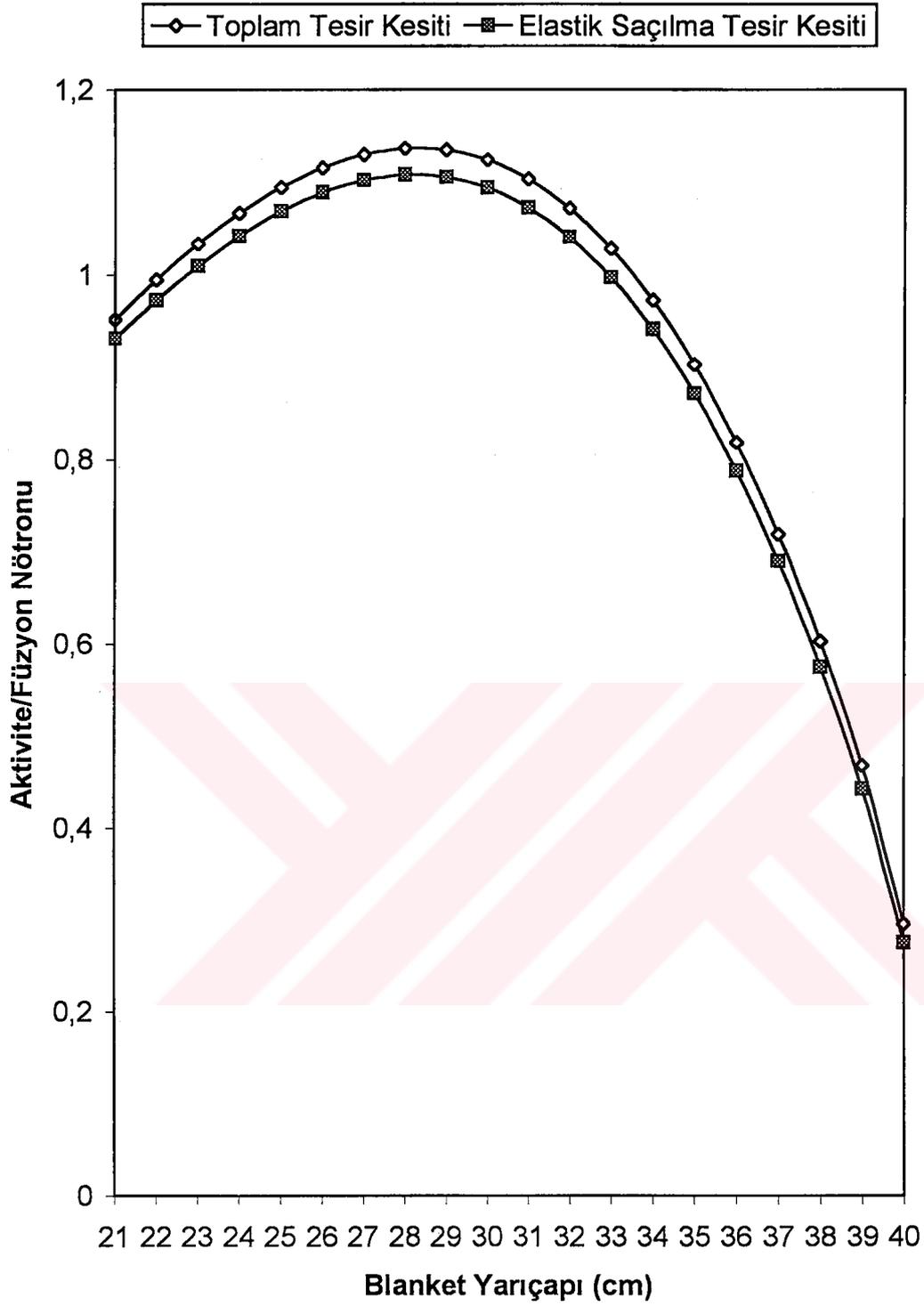
Şekil 4.5. Blankette kullanılan çeşitli malzemelerin füzyon nötronu için inelastik kesitlerinin blanket yarıçapına göre değişimi



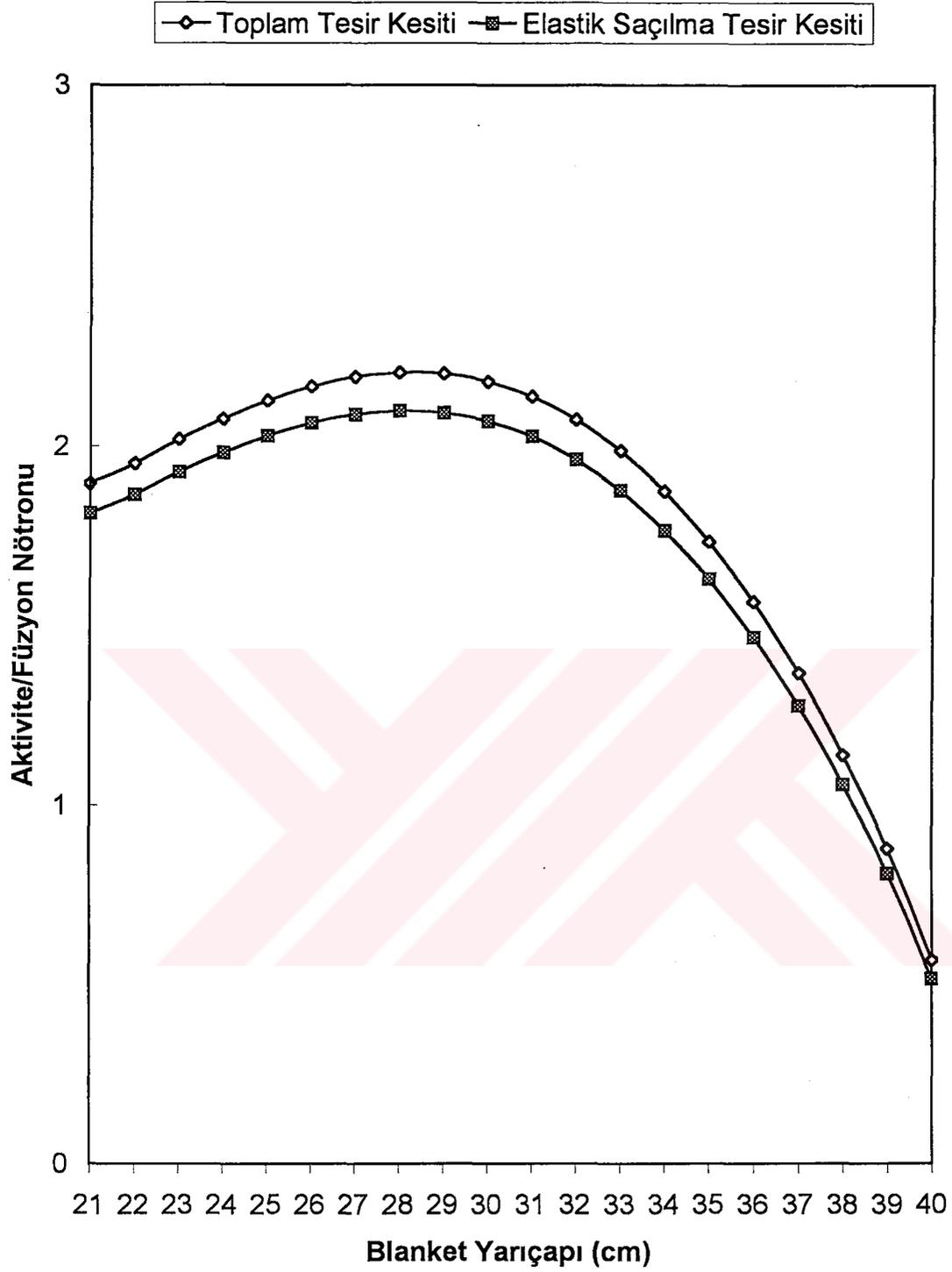
Şekil 4.6. Blankette kullanılan çeşitli malzemelerde füzyon nötronu için oluşan fisyonun blanket yarıçapına göre değişimi



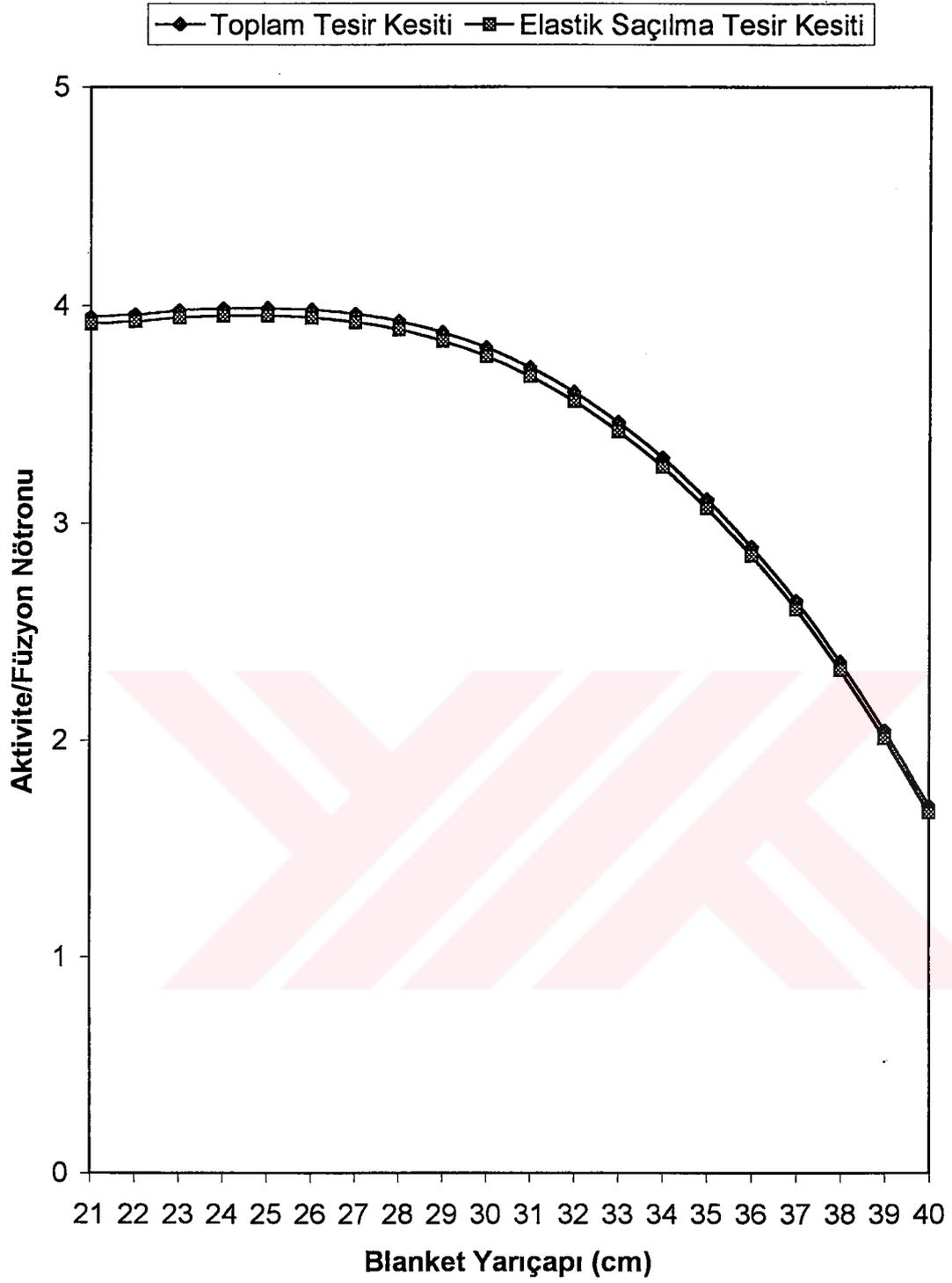
Şekil 4.7. Au'nun füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



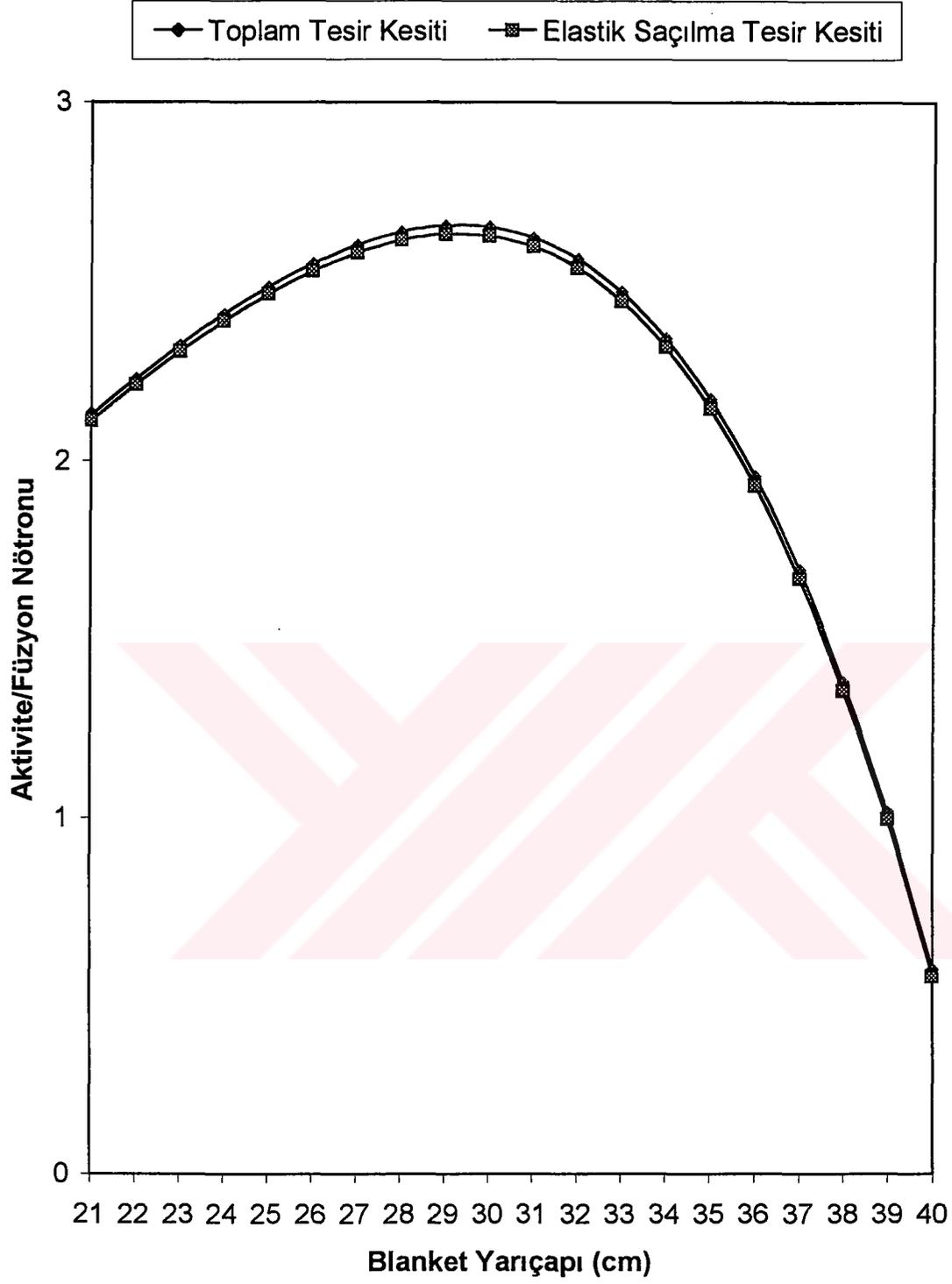
Şekil 4.8. Al'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



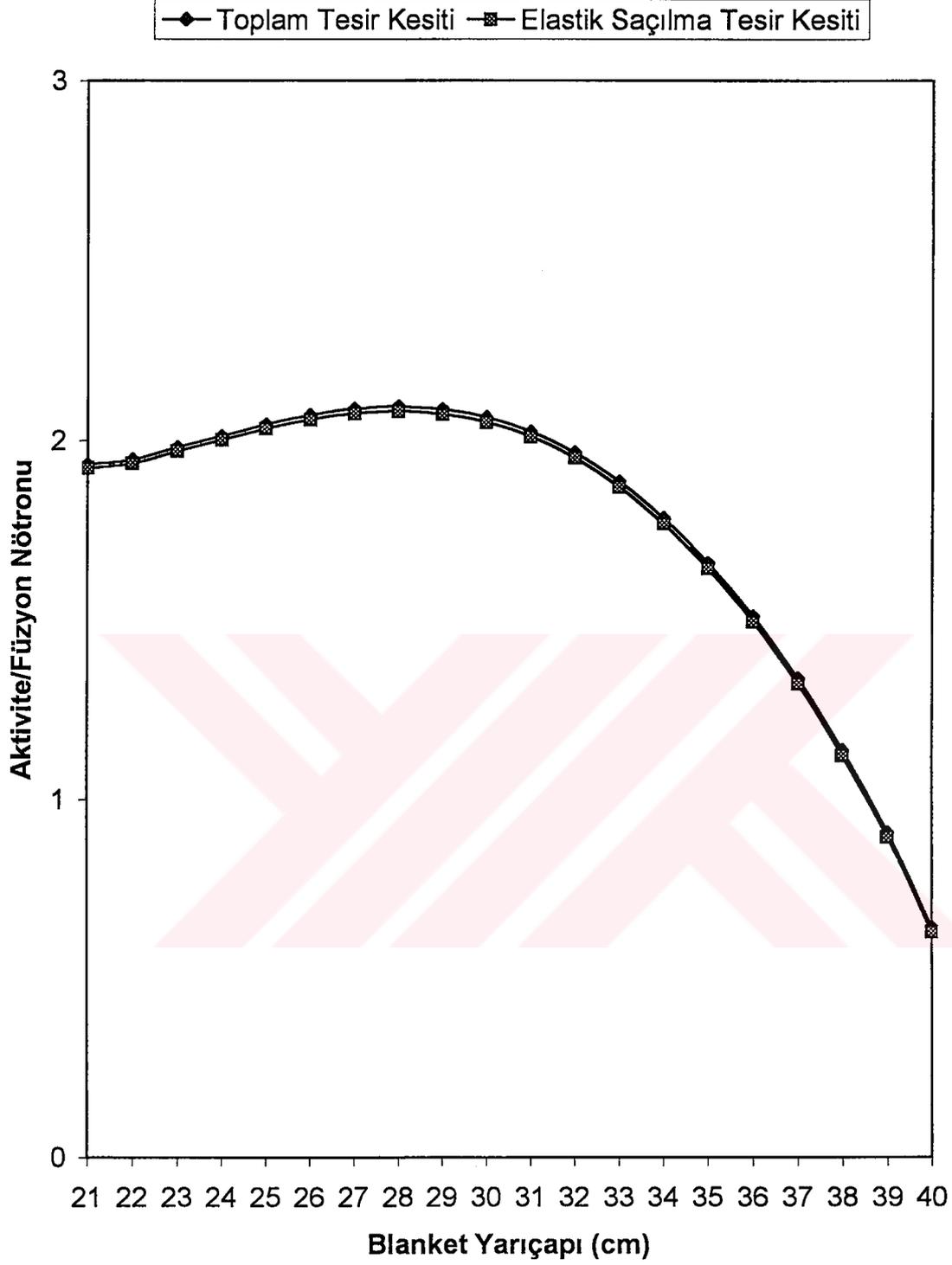
Şekil 4.9. BeF<sub>2</sub>'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



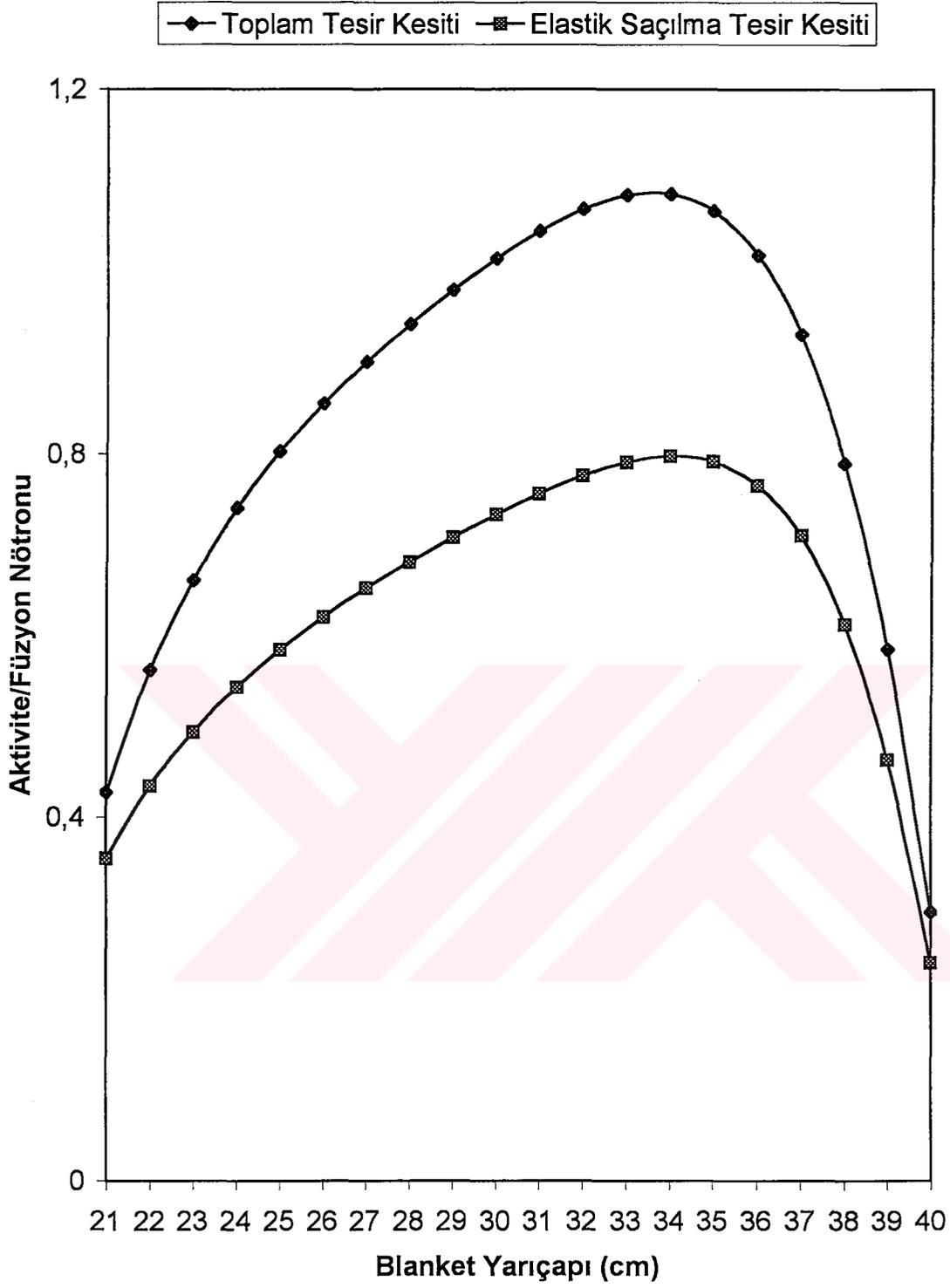
Şekil 4.10. Be'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



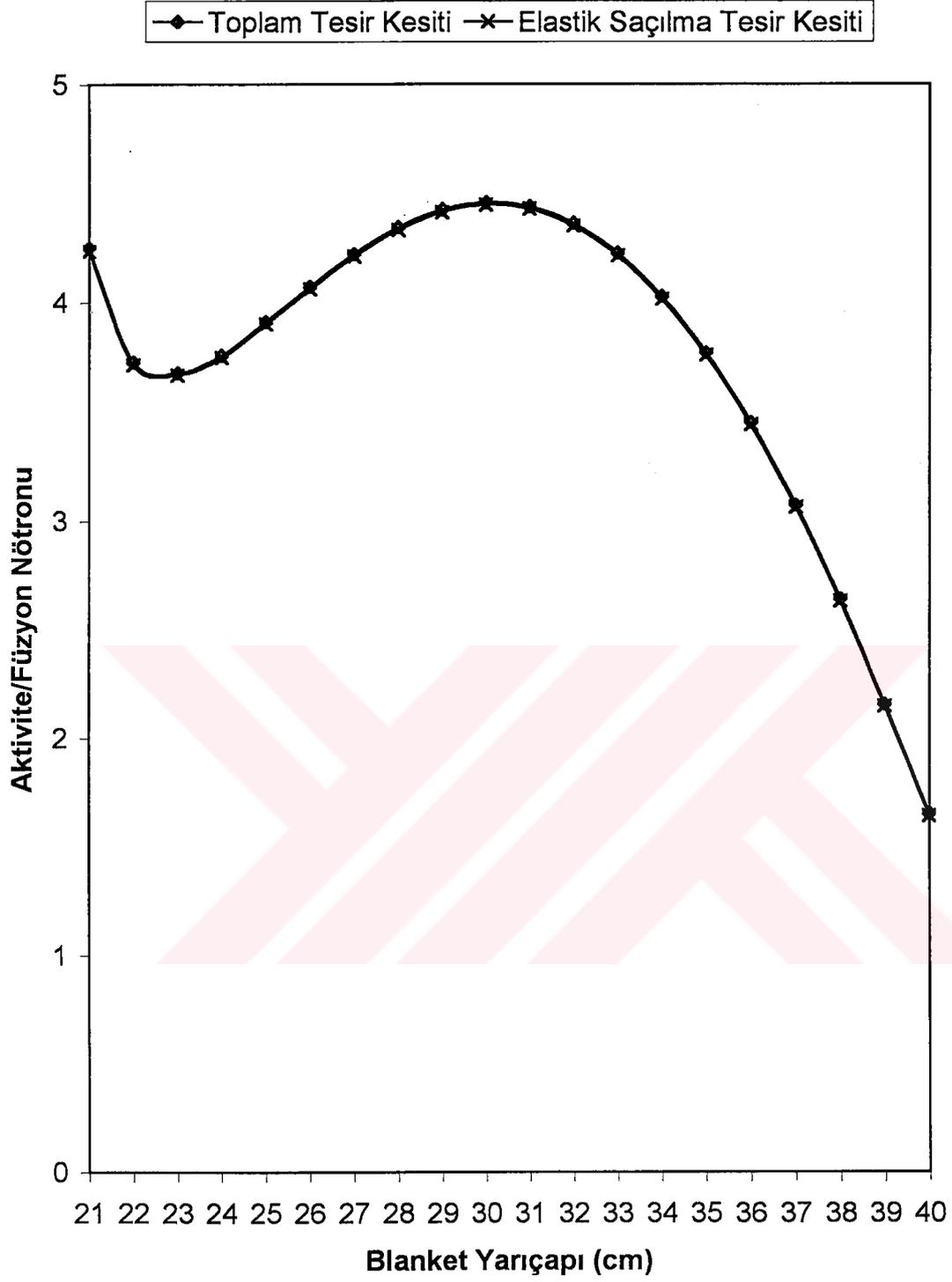
Şekil 4.11. Bor'un füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



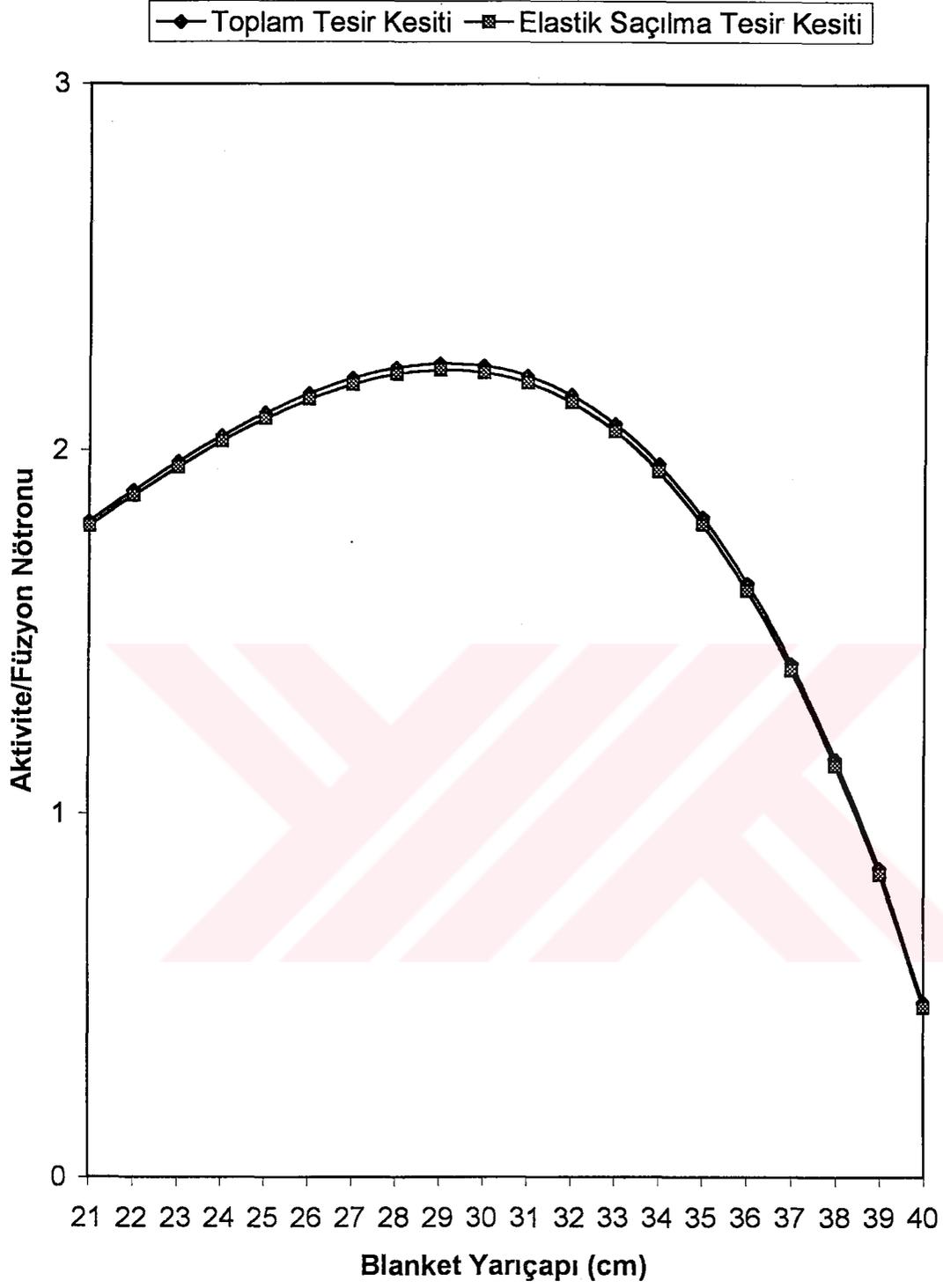
Şekil 4.12.  $D_2O$ 'in füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



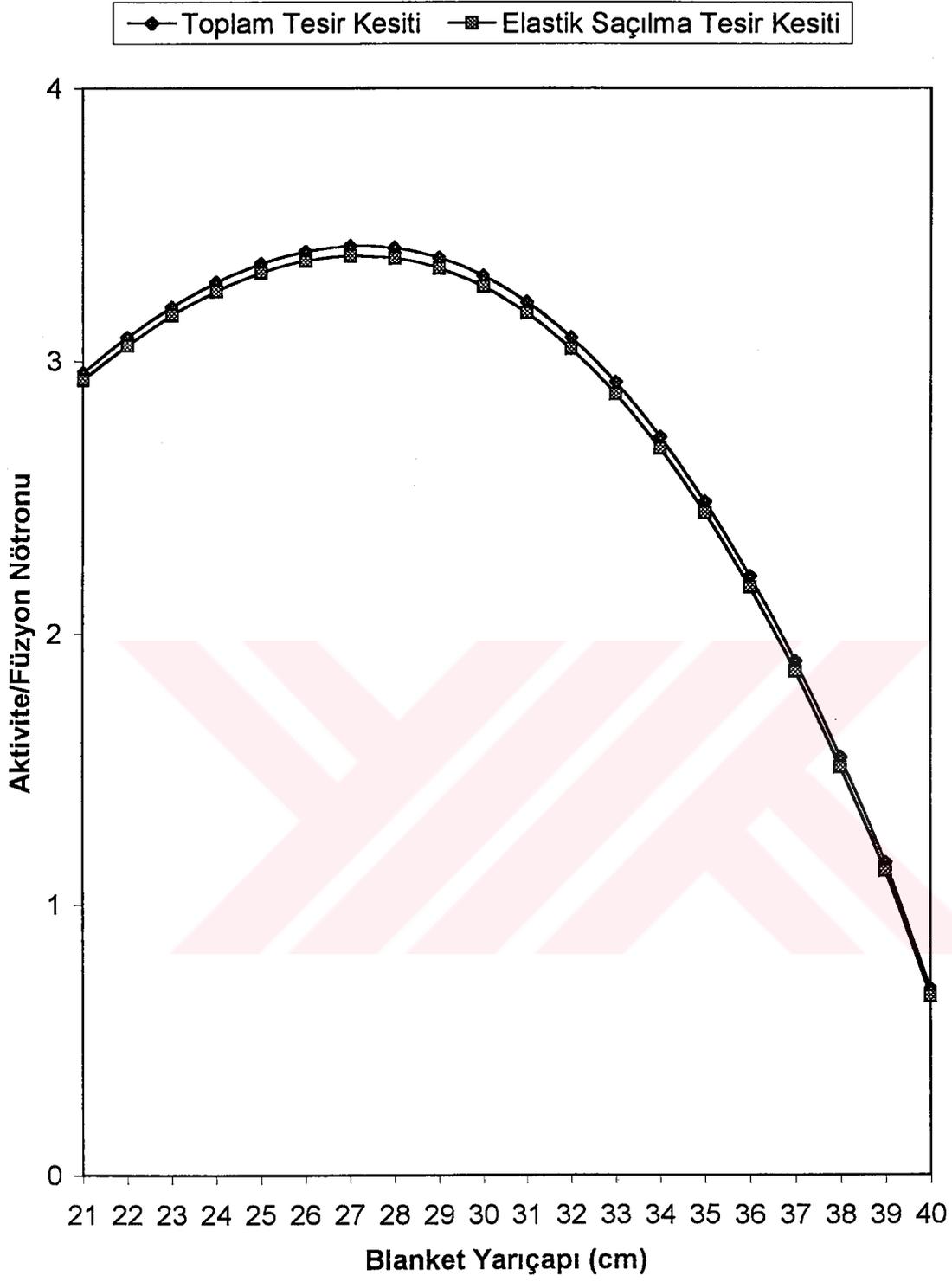
Şekil 4.13. Flibe'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



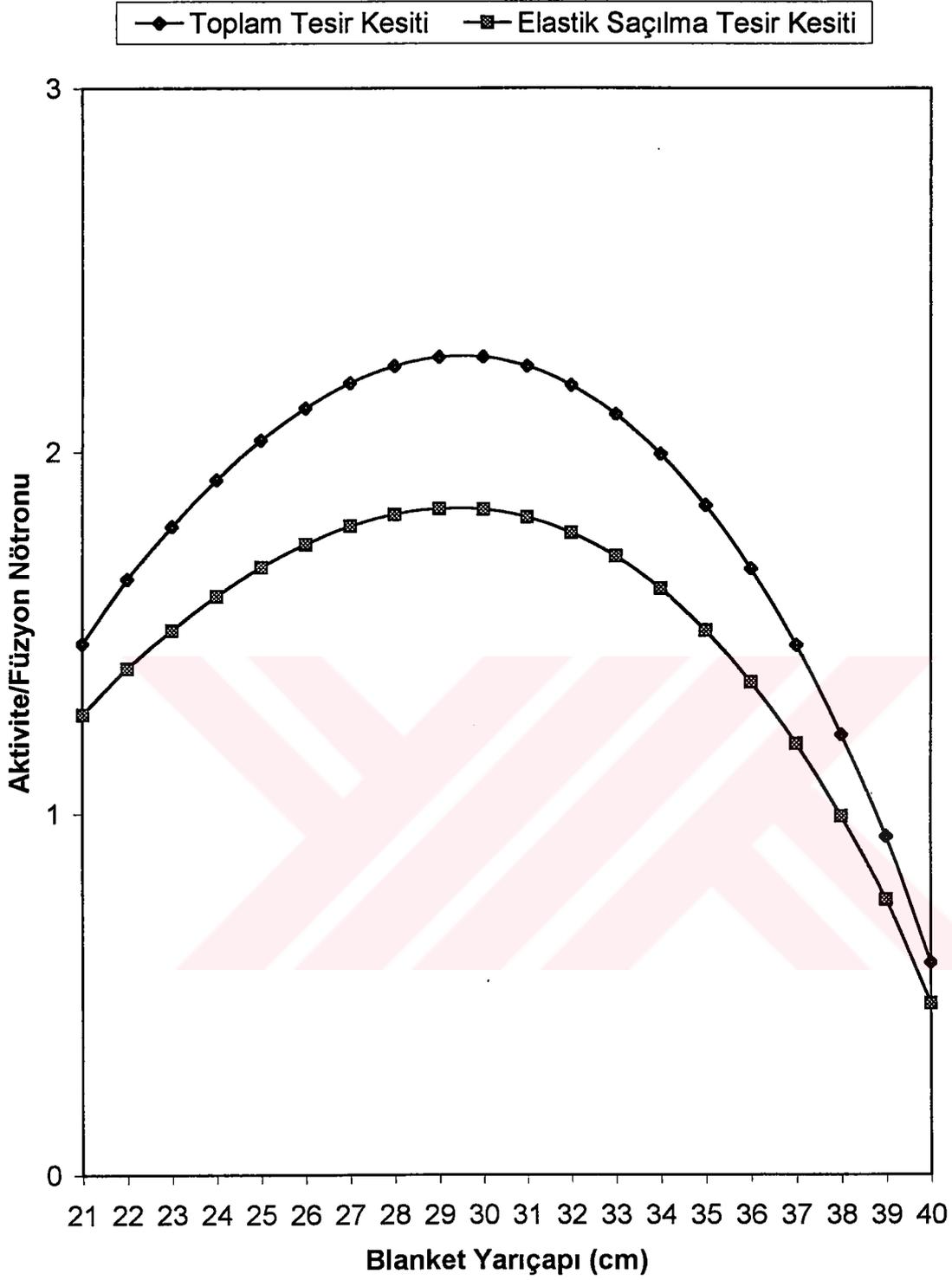
Şekil. 4.14. H<sub>2</sub>O'nun füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



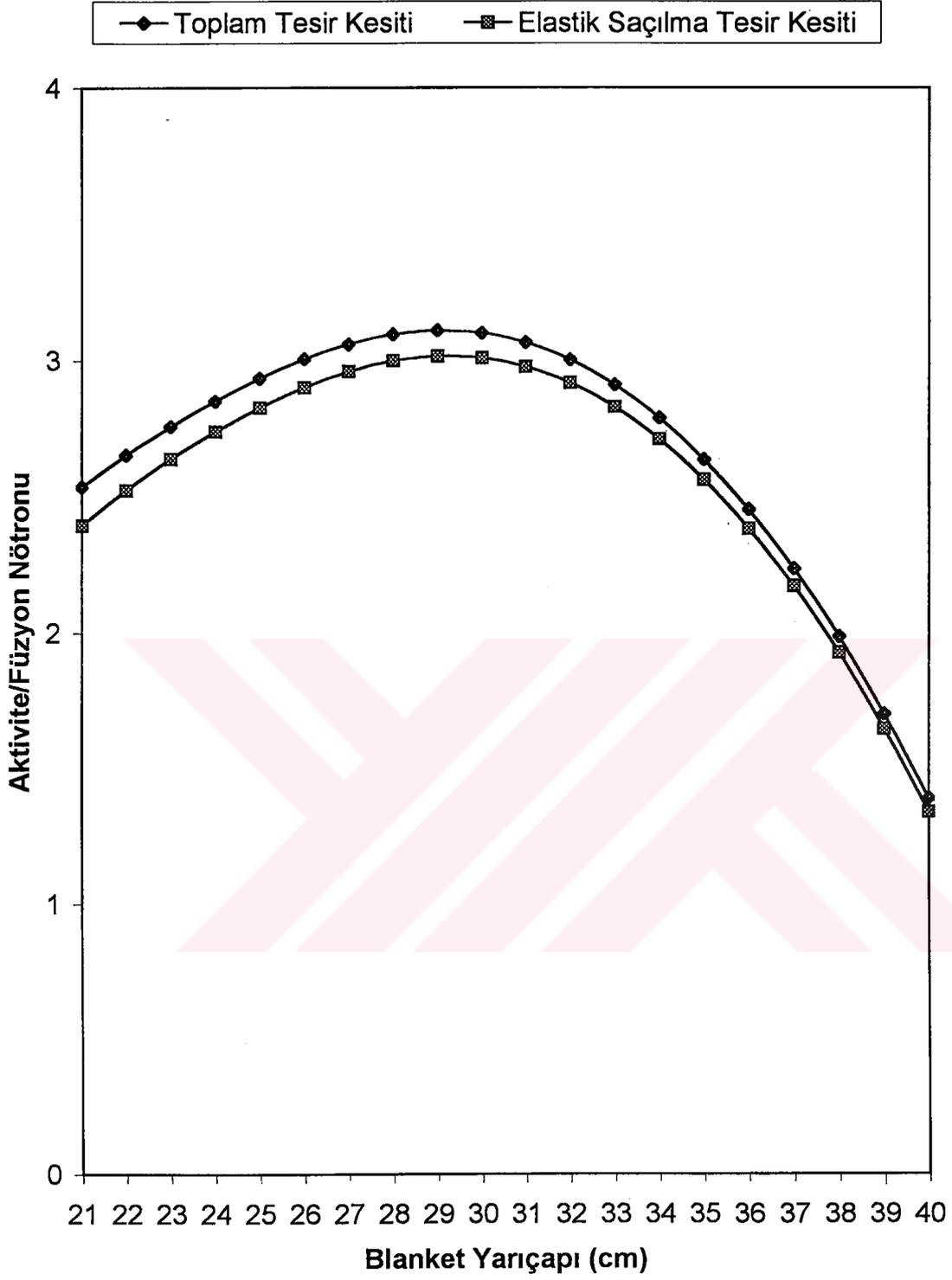
Şekil 4.15. C'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



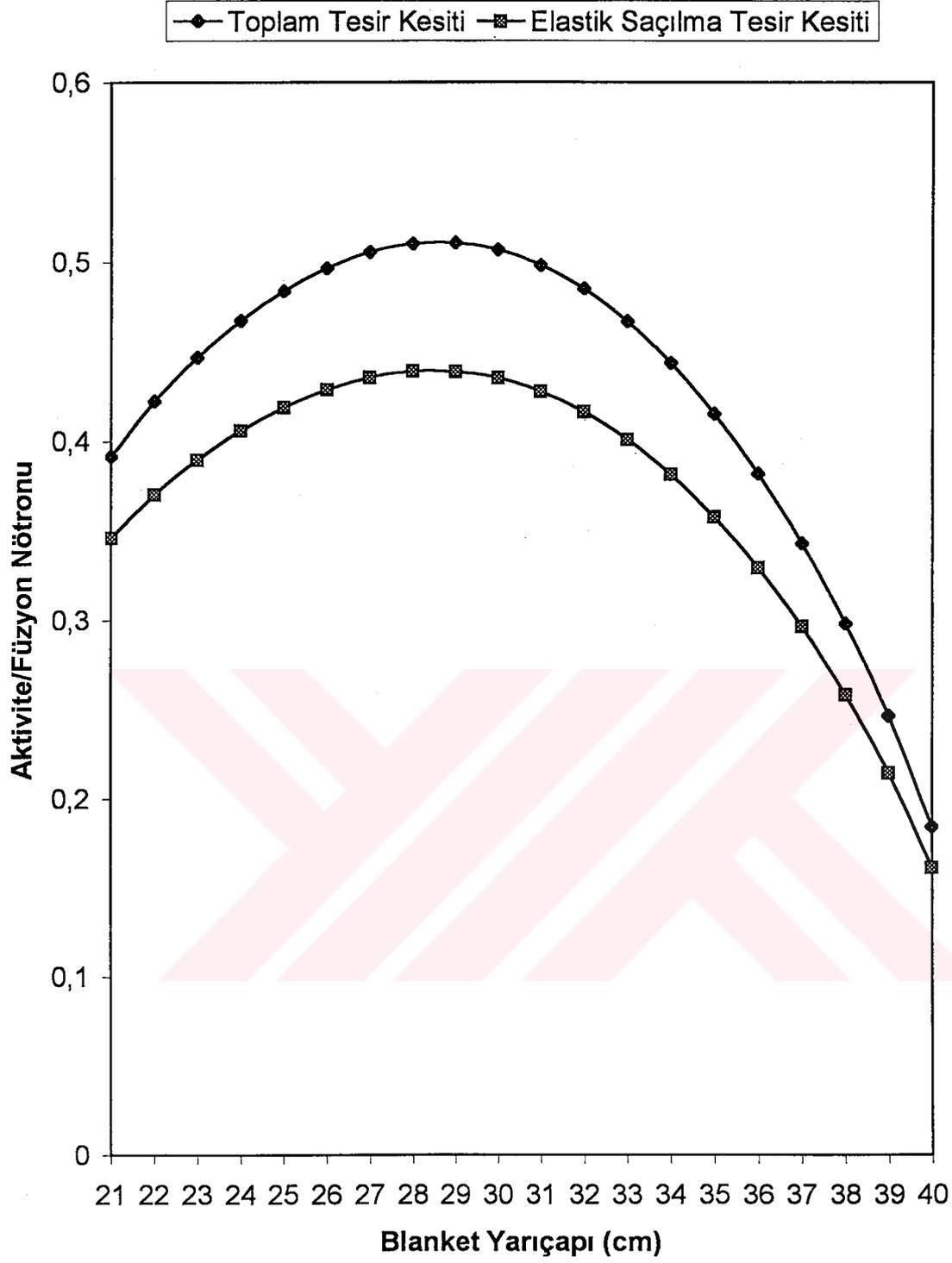
Şekil 4.16. Pb'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin Blanket Yarıçapına göre değişimi



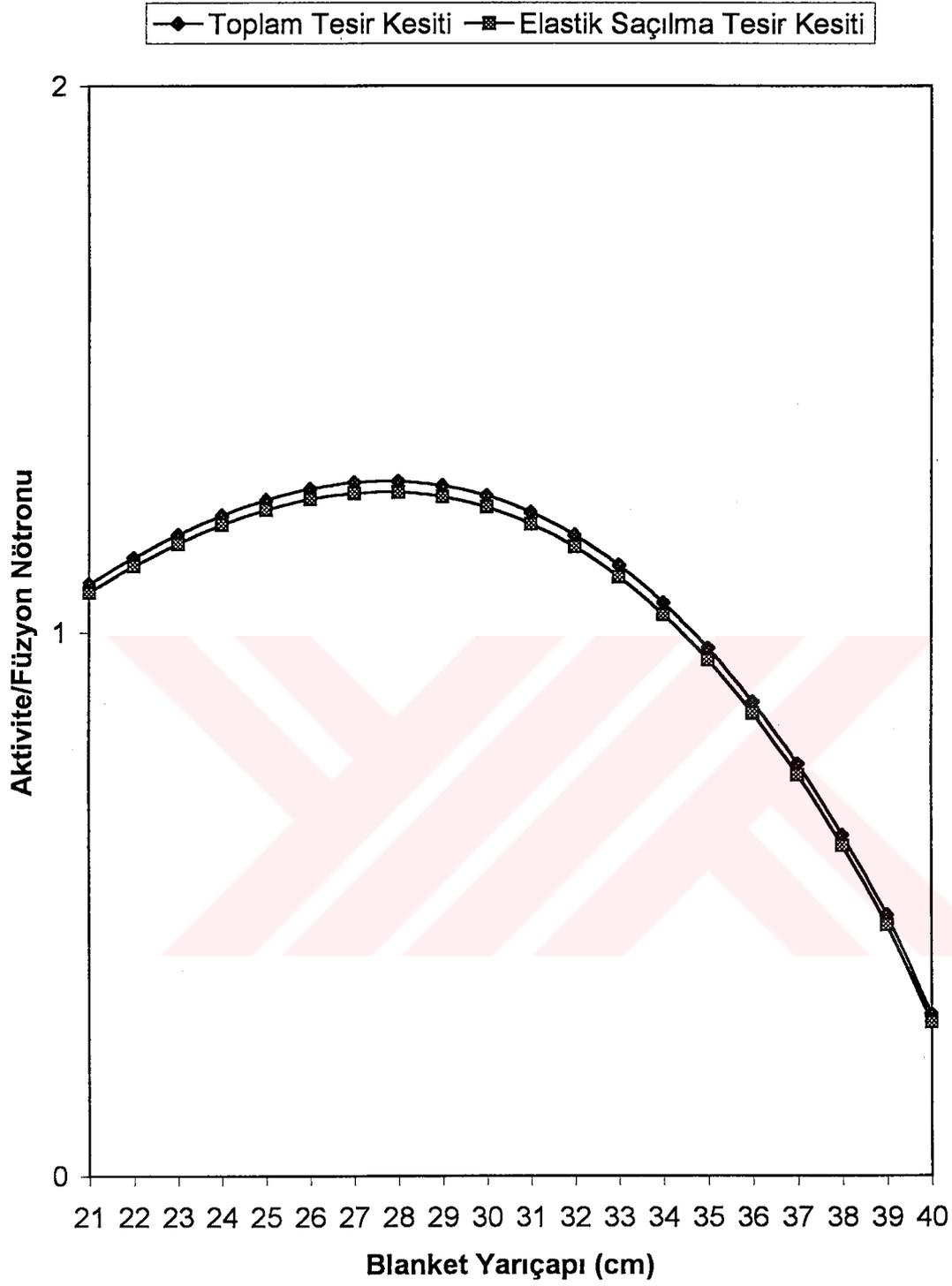
Şekil 4.17. LiF'in füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



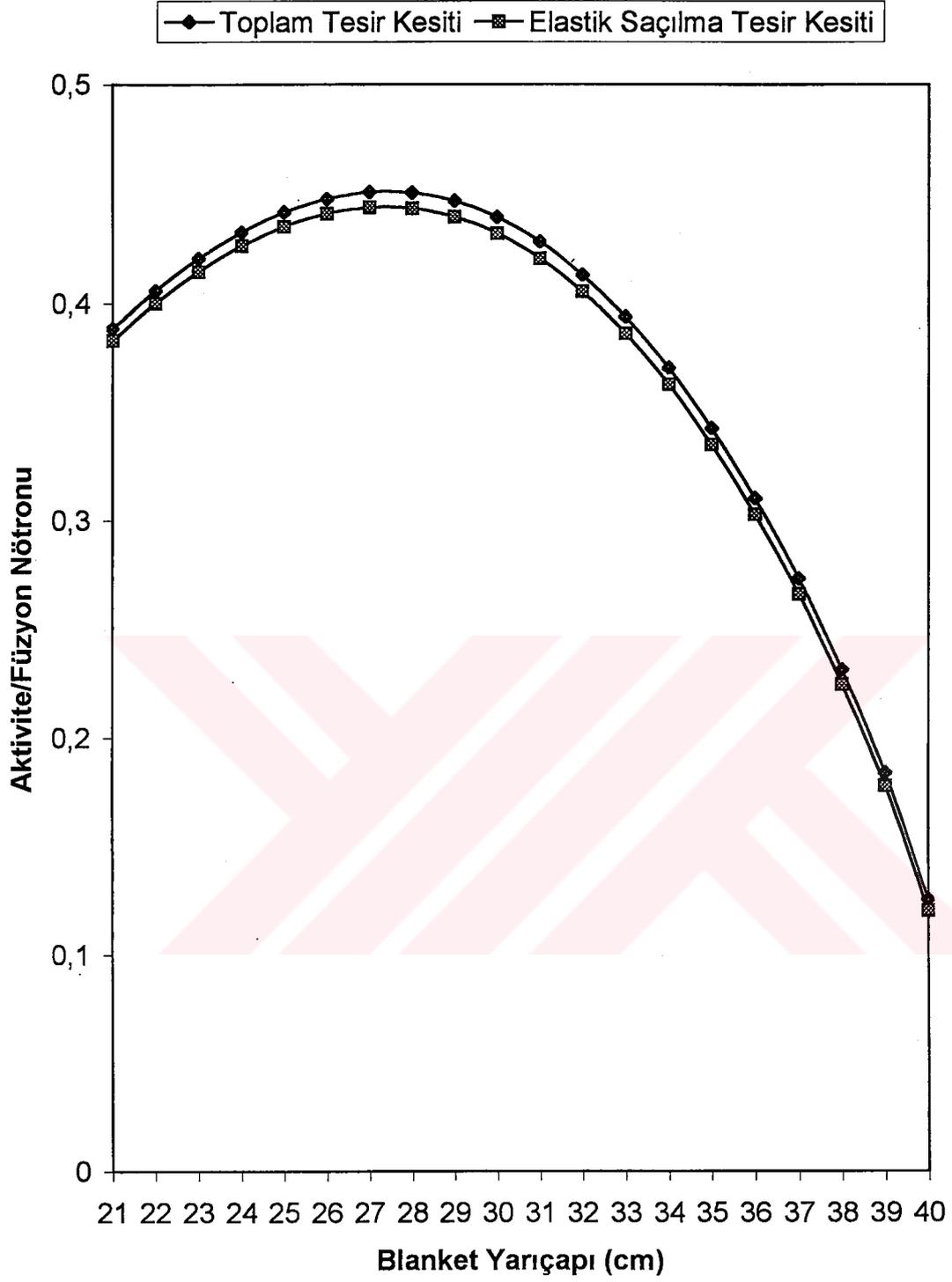
Şekil 4.18. LiH'in füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



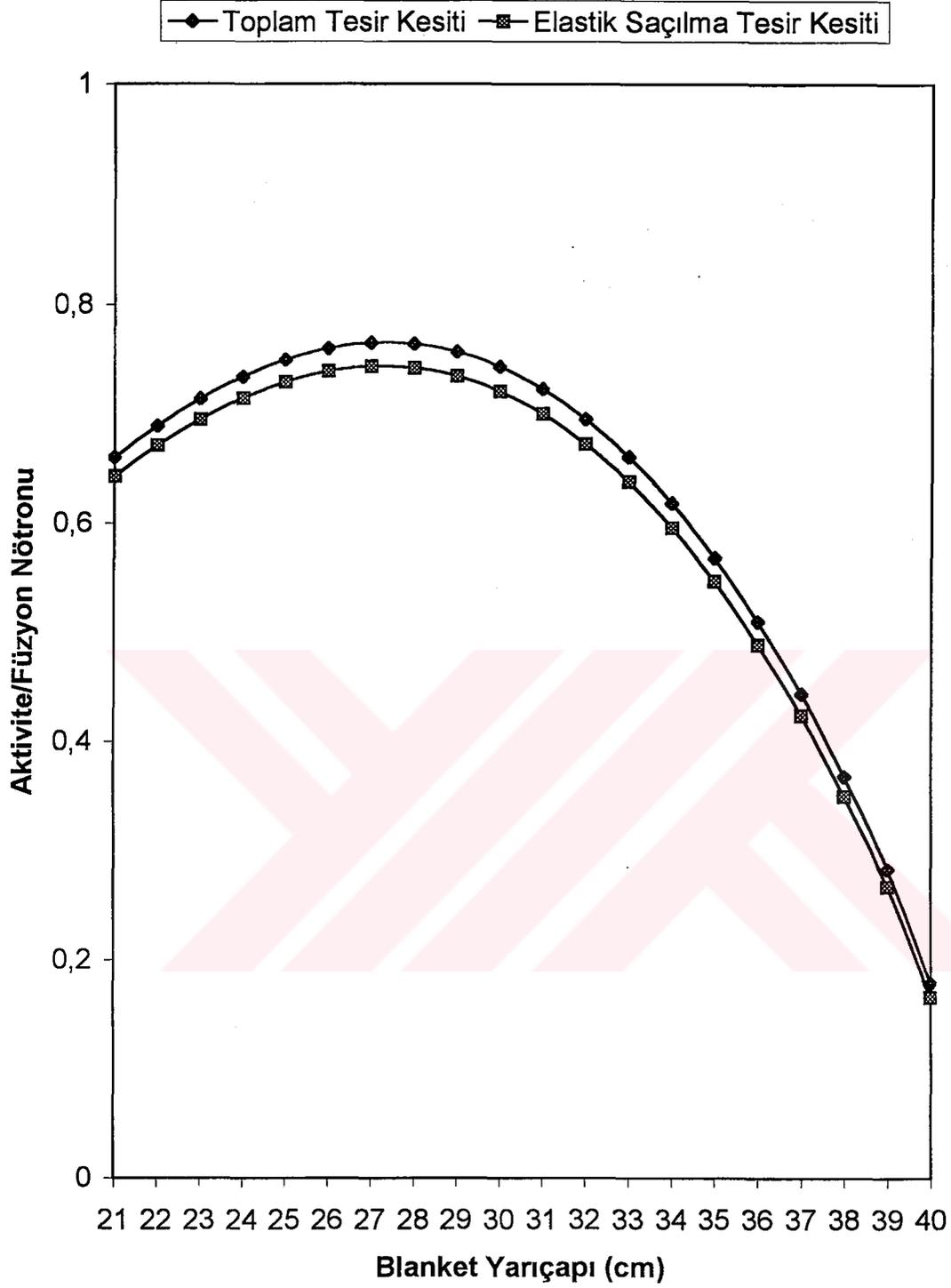
Şekil 4.19. Tabii lityumun füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



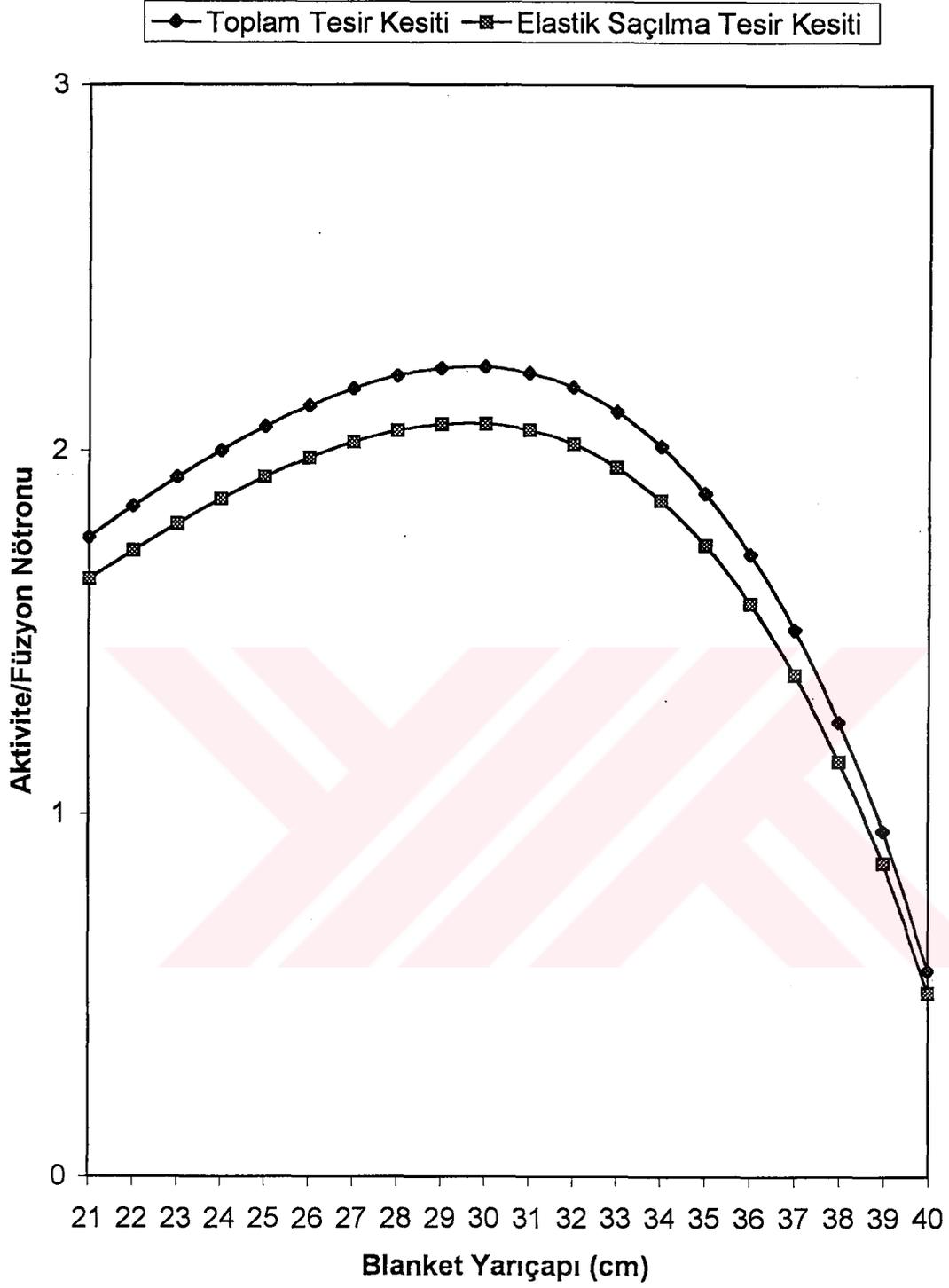
Şekil 4.20. Mg'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



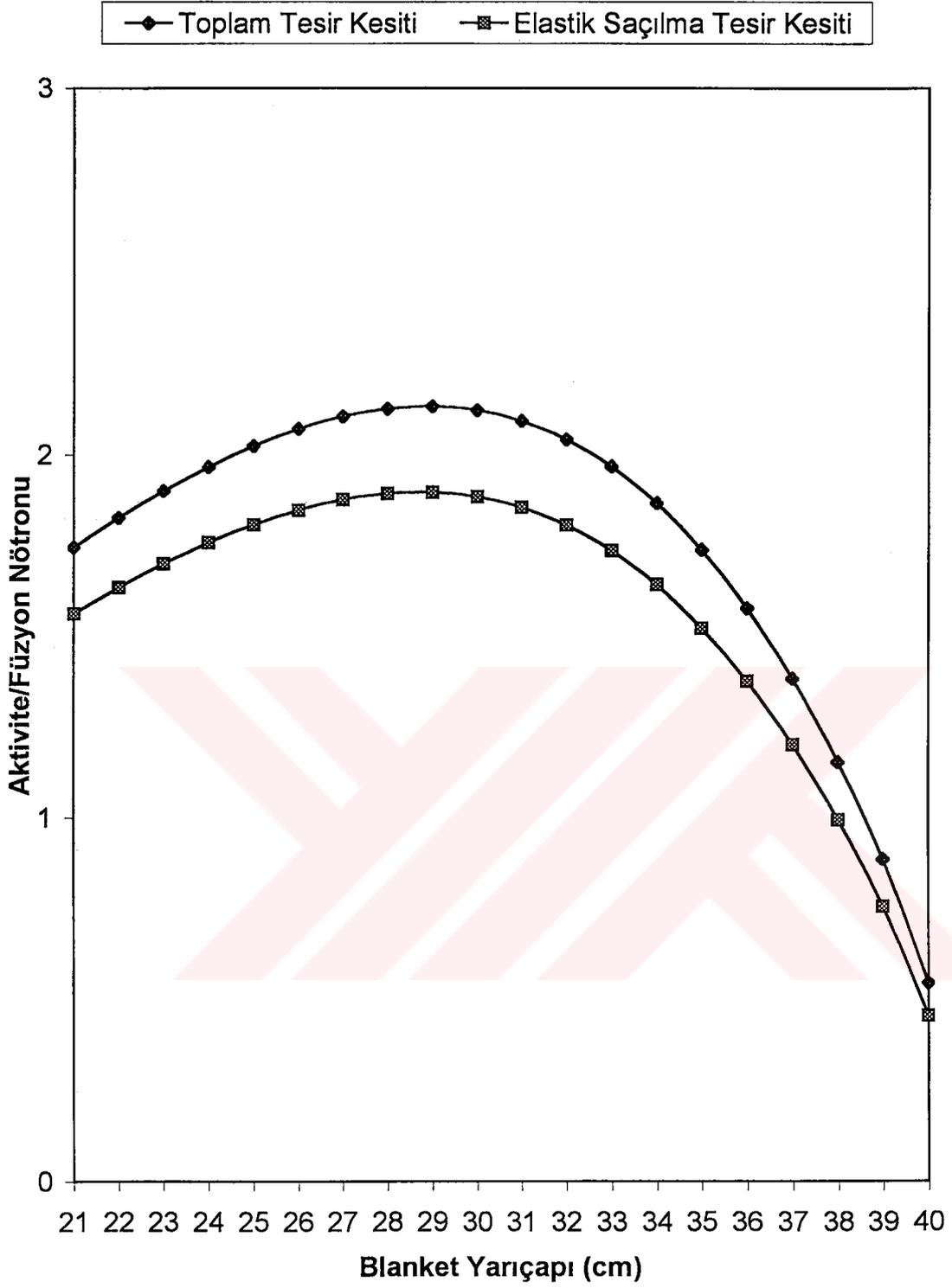
Şekil 4.21. K'nın füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



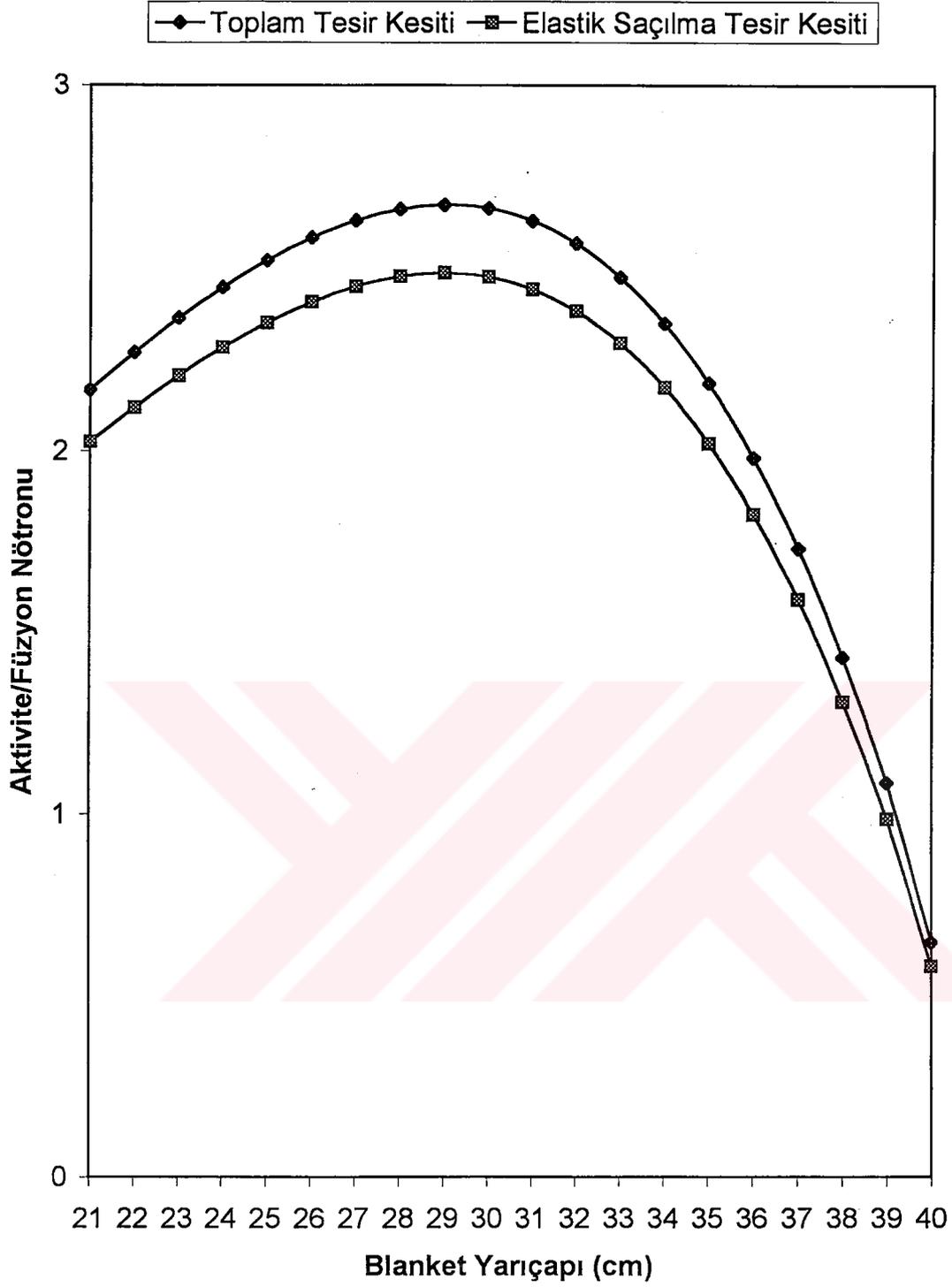
Şekil 4.22. Na'nın füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



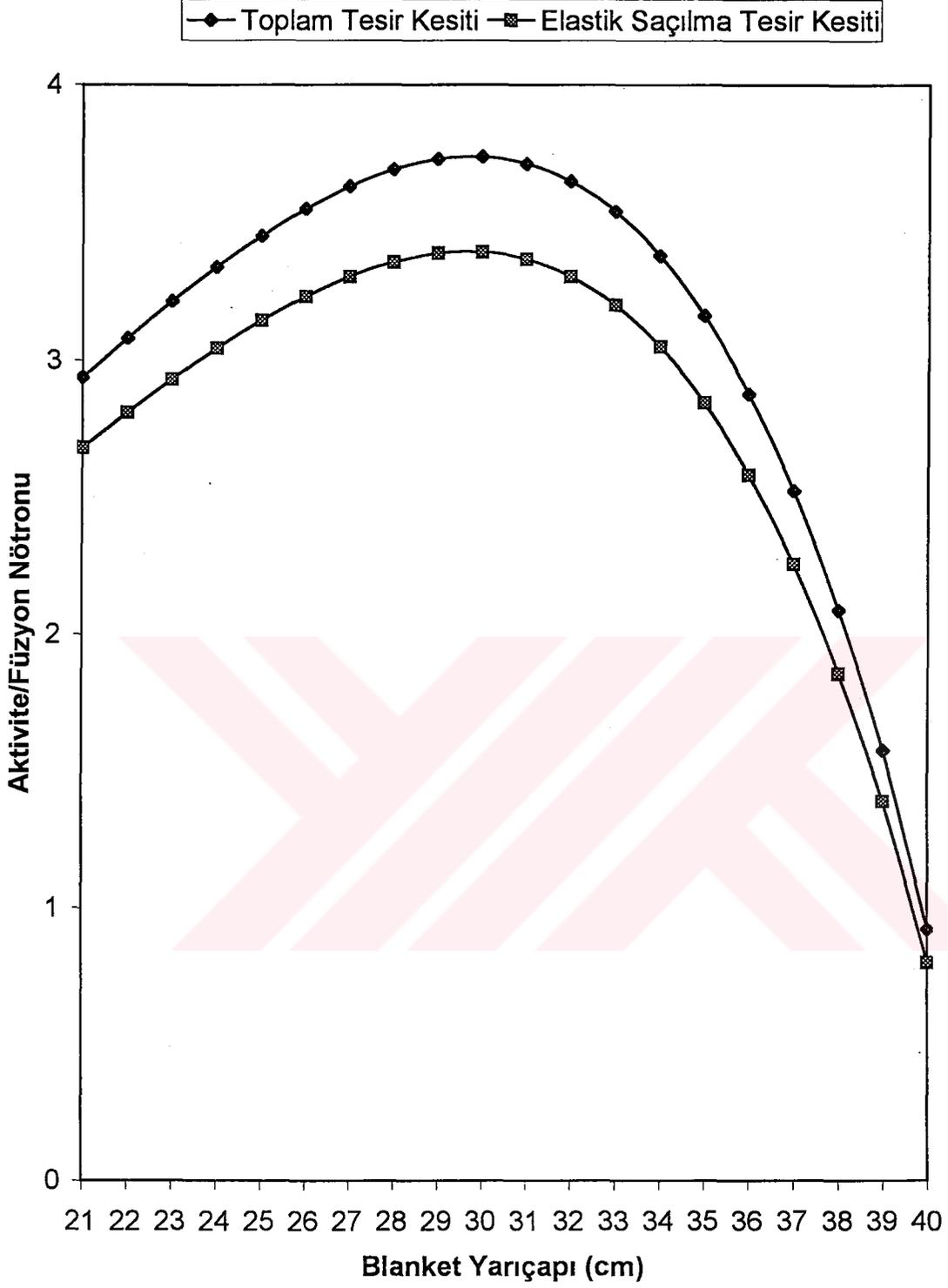
Şekil 4.23.  $\text{ThO}_2$ 'in füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



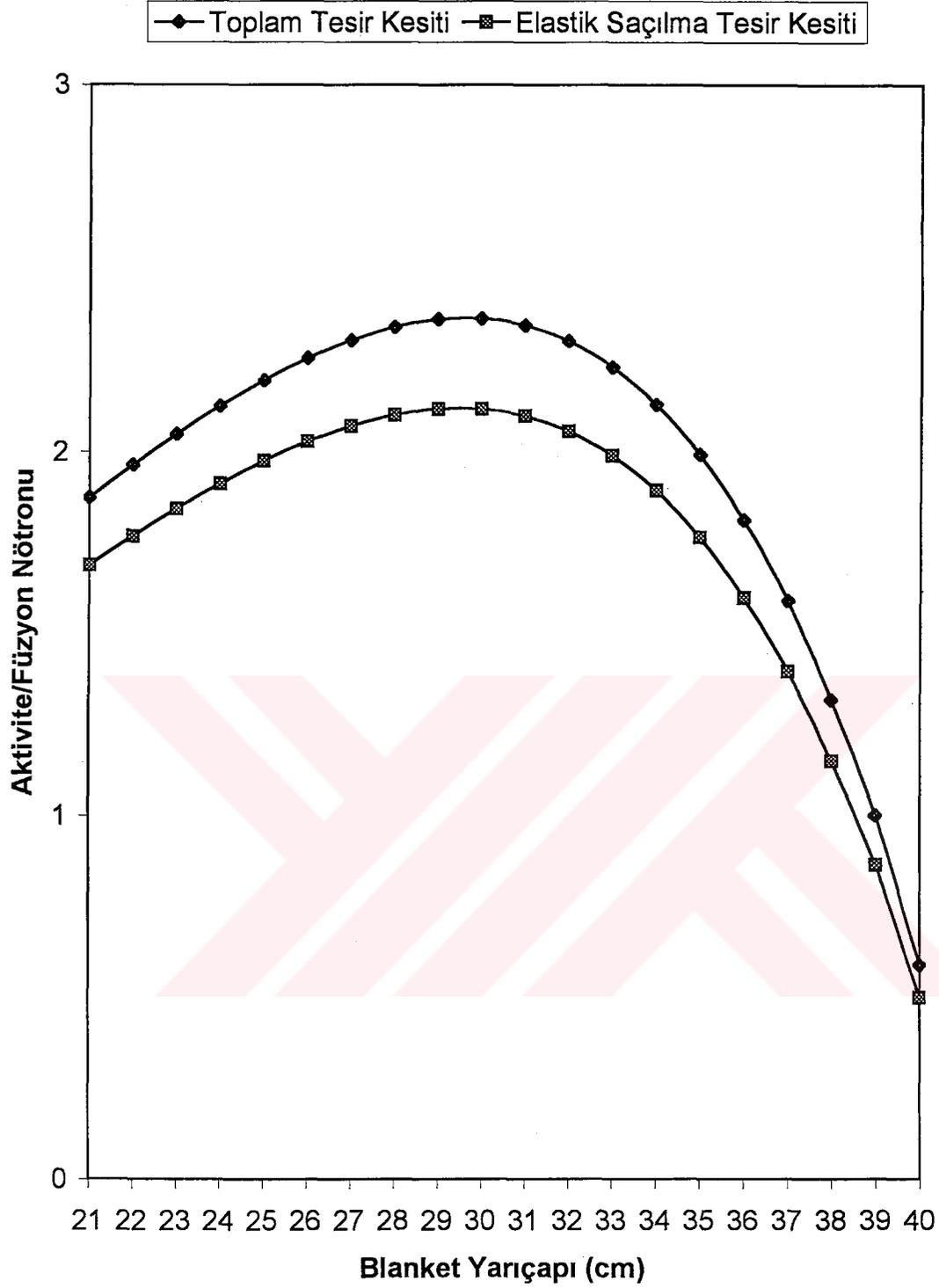
Şekil 4.24. Th'nin füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



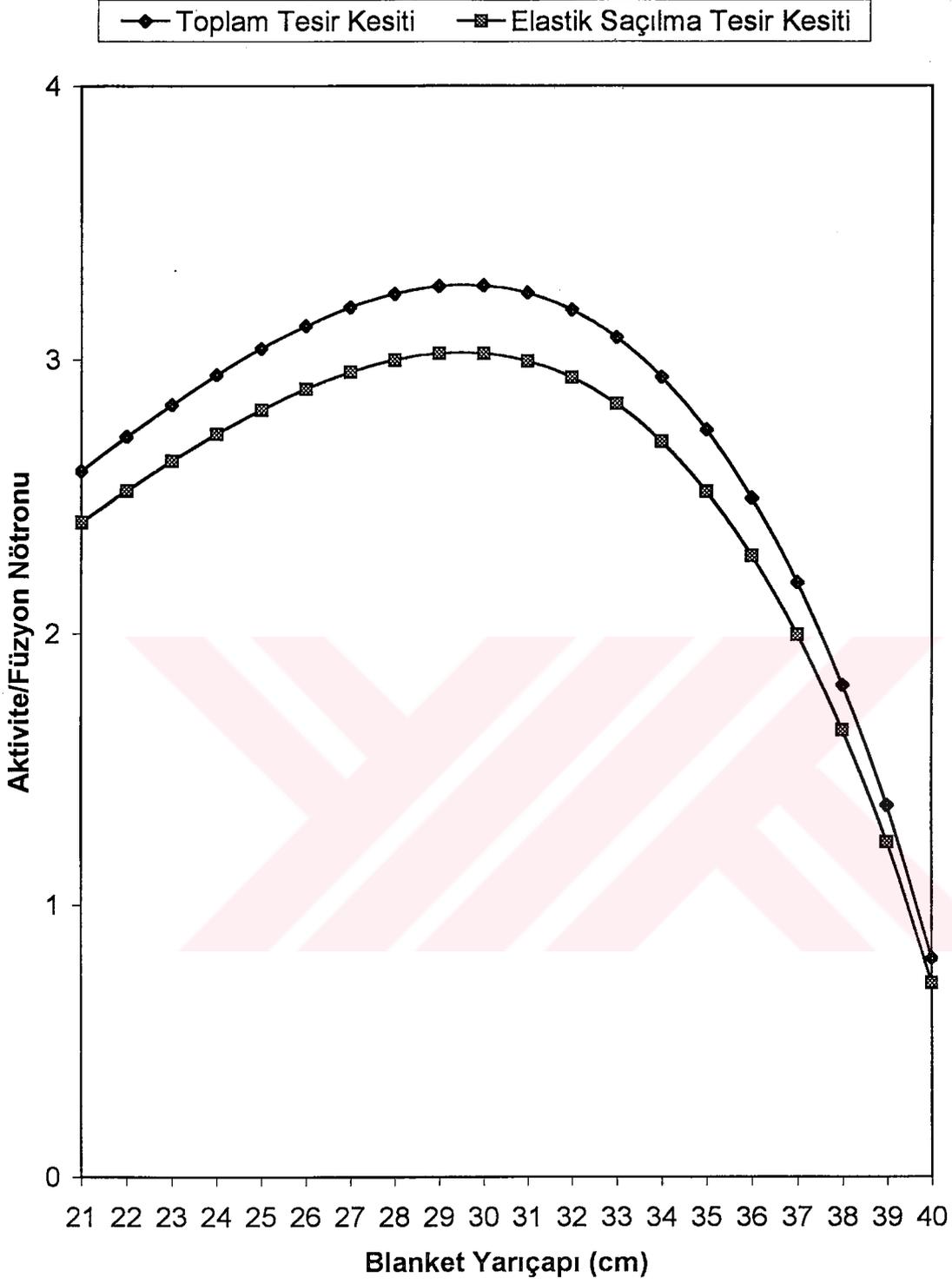
Şekil 4.25.  $U_3O_8$ 'in füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



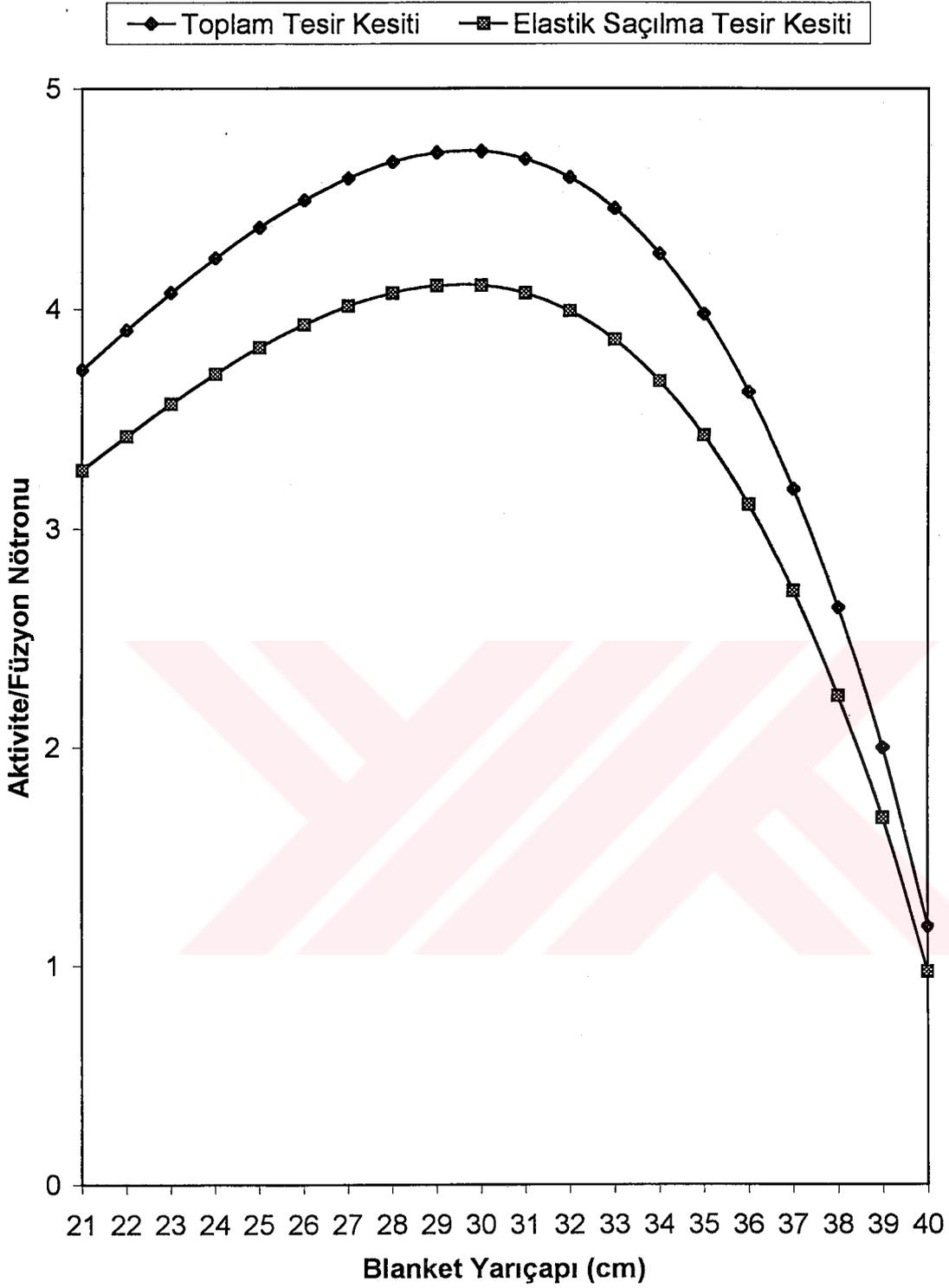
Şekil 4.26. UC'in füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



Şekil 4.27.  $UF_4$ 'in füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



Şekil 4.28.  $UO_2$ 'in füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi



Şekil 4.29. Tabii uranyumun füzyon nötronu için toplam tesir kesiti ve elastik saçılma tesir kesitinin blanket yarıçapına göre değişimi

## BÖLÜM V

### SONUÇLAR

Bu çalışmada, çeşitli nükleer yakıt ve malzemelerin (D,T) füzyon nötronları için nötronik analizi yapılmıştır. Bu amaçla, hibrid reaktör yapısına uygun bir blanket yapısı seçilerek 14.1 MeV enerjiye sahip nötronlar ile çeşitli malzemelerin elastik saçılma, inelastik saçılma, trityum üretimi, fisyon, (n,2n), (n,3n), (n, $\gamma$ ) ve toplam tesir kesitleri incelenerek şu sonuçlar elde edilmiştir.

1. Au, Pb, Th, U, ThO<sub>2</sub>, UC, UO<sub>2</sub>, UF<sub>4</sub> incelenen blankette 35. cm'de en iyi nötron çoğaltma özelliği göstermişlerdir. Nötron çoğaltımı trityum, <sup>239</sup>Pu, <sup>233</sup>U gibi yeni yakıt üretimi ve enerji üretimi bakımından istenilen bir durumdur.
2. H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O, C, B, Be nötronlar ile blankette 28. ile 35. cm'ler arasında çok iyi çarpışma performansı göstermişlerdir. Bu malzemeler yüksek enerjili nötronları yavaşlattığı için literatürde de belirtildiği şekilde nükleer reaktörlerde moderatör malzeme olarak kullanılmaktadır.
3. Bir füzyon yakıtı olan trityum üretiminde en iyi sonuç malzeme bölgesinde flibe ve tabii lityum kullanıldığında elde edilmiştir. BeF<sub>2</sub>, LiH, Be gibi malzemeler ise trityum üretimi açısından çok küçük değerler vermişlerdir. Ayrıca blanketin malzeme bölgesi büyütülüp tekrar inceleme yapıldığında trityum üretiminin arttığı görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- Akinoğlu, B. G., 1991. Dünyada ve Gelişmekte Olan  lkelerde Enerji ve  evre. *Mühendis ve Makina Dergisi*. Cilt 32, 373, 22-28.
- Al-Kusayer, T. A., şahin, S. and Drira, A., 1998. CLAW-IV, Coupled 30 Neutrons, 12 Gamma Ray Group Cross Sections with Retrieval Programs for Radiation Transport Calculations. *RSIC Newsletter*. Radiation Shielding Information Center, Oak Ridge National Laboratory, p.4.
- Aybers, N., Bayülken, A., 1990. *Nükleer Reaktör Mühendisliği-I Temel Bilgiler*, İT  Matbaası, İstanbul, 1-392.
- Bayrak, M., 1999. *Kullanılmış Yakıt Karışımlarının  retken Füzyon S r c l  Reaktörlerde Zenginleştirilmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 108s.
- Bonilla, J. C., 1957. *Nuclear Engineering*. McGraw-Hill Book Company, New York. 1-850.
- Demirağ, O., 1996.  lkemizde Enerji Politikaları ve Nükleer Enerji. *Enerji D nyası*. 18-24.
- Engle, W. W. Jr., 1970. ANISN: A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering. K-1963. *Oak Ridge National Laboratory*.
- Greene, N. M. and Craven, C. W. Jr., 1969. XSDRN: A Discrete Ordinates Spectral Averaging Code. *ORNL/TM-2500*.
- Greene, N. M., Arwood, J. W., Wright, R. Q. and Parks, C. V., 1995. The Law Library A Multigroup Cross Section Library for Use in Radioactivity Waste Analysis Calculations. *ORNL/TM-2370*.
- IAEA, 1999. Energy Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2020, <http://www.taek.gov.tr/nukleer/dunya/ulkeler.html>.

- Lawson, J. D., 1957. Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor. *Proc. Phys. Soc. London*. B70.6.
- Sahin, H. M., 1997. *Mars veya Daha Uzak Gezegenlere Gönderilecek Bir Uzay Kargo Gemisinin Füzyon Roket Motorunun Tasarımı*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara. 94s.
- Şahin, S., Al-Kusayer, T. A. and Raoof, M. A., 1986. Preliminary Design Studies of a Cylindrical Experimental Hybrid Blanket with Deuterium-Tritium Driver. *Fusion Technology*. **Vol.10**, 72-84.
- Sahin, S., 1996. Mainline Fusion-Fission (Hybrid) Reactor Concepts. *Ecole Polytechnique Federale de Lausanne Institut de Atomique PHP-Ecublens*, 1015 Lausanne, Switzerland.
- Sahin, S., Yapıcı, H., Bayrak, M., 1999. Spent Mixed Oxide Fuel Rejuvenation in Fusion Breeders. *Fusion Engineering and Design*. **Vol. 47**, 9-23.
- Ünalın, S., Yapıcı, H., Özceyhan, V. and Çürüttü, İ., 1998. Improvement of Neutronic Performance of a Catalyzed (D,D) Driven Hybrid Reactor Using Various Moderators and Coolants Materials. *The Arabian Journal for Science and Engineering*. **Vol.23**. No.1A, 35-46.
- Yapıcı, H., Çürüttü, İ., Özceyhan, V. and Kırbıyık, M., 1998. Potential of a Fusion-Fission Hybrid Reactor Using Uranium for Various Coolants to Breed Fissile Fuel for LWRs. *Annals of Nuclear Energy*. **Vol.26**, 821-832.
- Yapıcı, H., İpek, O., Özceyhan, V. and Erişen, A., 2000. Analysis of the Rejuvenation Performance of Hybrid Blankets by Using Uranium Fuels (UN, UC, UO<sub>2</sub>, U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>) and Different Coolants for Various Volume Fraction. *Annals of Nuclear Energy*, **Vol.27**, 279-294.
- Yapıcı, H. and Özceyhan, V., 2000. Numerical Neutronic Analysis of a Natural Lithium Cooled Fusion Breeder Fuelled with UO<sub>2</sub>. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, **Vol.25**. No.2A, 96-109.

## EKLER



EK 1: PROGRAM INPUTLARI

=xsdrn

Flibe

-1\$\$ 500000

0\$\$ 7 10 4 20 3 16 17 18 19 8 9

'00\$ E

1\$\$ 2 3 24 1 0 2 22 8 3 0 100 70 0 0 3

2\$\$ -2 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0

3\$\$ 0 0 1 0 0 0 3 0 198 1 0 0

5\*\* 2r1.-4 1. 0. 0. 1.420892 0. 0. 0. 0. 0.001 0.75 e T

13\$\$ 5r1 17r2

14\$\$

1001	1002	3006	3007	4009	5011
6012	8016	9019	11023	12000	13027
79197	82000	90232	92235	92238	

14000	19000	24000	26000	28000	
-------	-------	-------	-------	-------	--

15\*\*

0.000E+00	0.000E+00	1.806E-03	2.228E-02	1.204E-02	0.000E+00
0.000E+00	0.000E+00	4.818E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	

7.87300-4	6.73400-4	1.72800-2	5.92600-2	8.05500-3	
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	--

t

30\$\$ 2r0 20r1 2r0

32\*\* 24R0.0 24R0.0107 24R0.301 24R0.485 24R0.199 24R0.0043 FO t

33## f0 t

35\*\* 1I18.70 19I20.0 1I40.0 41.3

36\$\$ 2R1 20R2 2R3

39\$\$ 1 2 1

40\$\$ F3

42**	0.0	0.0604938	0.0453704	0.0453704	0.0604938	0.0604938
	0.0453704	0.0453704	0.0604938	0.0	0.0453704	0.0462962
	0.0453704	0.0453704	0.0462962	0.0453704	0.0	0.0453704
	0.0453704	0.0453704	0.0453704	0.0	0.0604938	0.0604938

43**	-0.9759000	-0.9511897	-0.7867958	-0.5773503	-0.2182179	0.2182179
	0.5773503	0.7867958	0.9511897	-0.8164965	-0.7867958	-0.5773503
	-0.2182179	0.2182179	0.5773503	0.7867958	-0.6172134	-0.5773503
	-0.2182179	0.2182179	0.5773503	-0.3086067	-0.2182179	0.2182179

49\$\$

9r 1001  
9r 1002  
9r 3006  
9r 3007  
9r 4009  
9r 5011  
9r 6012  
9r 8016  
9r 9019  
9r11023  
9r12000  
9r13027  
9r14000  
9r19000  
9r24000  
9r26000  
9r28000  
9r79197  
9r82000  
9r90232  
9r92235  
9r92238

50\$\$

t e tie n2n n3n tnf ng nt tnt  
-1 -2 -4 -16 -17 -18 -102 -105 -205 21q9

t

end

=NITAWL  
O\$\$ 84 2 3 4 E  
'O\$\$ 84 E  
'O\$\$ 84 a4 4 E  
1\$\$ A2 22 E 1T  
2\$\$  
1001 1002 3006 3007 4009 5011 6012 8016 9019 11023 12000 13027  
14000 19000 24000 26000 28000 79197 82000 90232 92235 92238  
T  
END



TC. YÜKSELİMLER VE İKTİSADİ KALKINMA BAKANLIĞI  
EKİLENTİ VE İZLEME BÜYÜK MÜDÜRLÜĞÜ