

23110

D-T SÜRÜCÜLÜ HYBRID BLANKETLERDE
GEOMETRİ ve MALZEME PARAMETRELERİNİN
NÖTRONİK ANALİZİ

Osman İPEK



Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü'ne
Makina Anabilim Dalında Doktora tezi olarak
sunulmuştur.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

AGUSTOS - 1992

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

Bu çalışma jürimiz tarafından Makina Anabilim Dalında
Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

17 / 10 / 1992

Başkan: Prof. Dr. İhsan Uluçer

Üye : Doç. Dr. Selim Selvi

Üye : Doç. Dr. Ali Erişen

ONAY:

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

3.14.1992
Doç. Dr. Mehmet Emin Durak
Enstitü Müdürü

Ö Z G E Ç M İ Ş

1963 yılında İcel Erdemli 'de doğdu. İlk ve orta tahsilini Erdemli 'de yaptı. 1982 yılında Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Makina Bölümünde lisans öğretimine başladı. 1986 yılında lisans öğretimini tamamlayarak aynı öğretim dönemi içerisinde Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsün 'de Yüksek Lisans öğretimine başladı. Mayıs 1987 de Isparta Mühendislik Fakültesi Makina Bölümü 'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Haziran 1988 de Yüksek Lisansı tamamlayarak Eylül 1988 de Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Anabilim Dalı 'nda doktora başladı. Halen Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Makina Anabilim Dalı 'nda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

T E Ő E K K Ü R

Çalışmalarım esnasında, hertürlü fedakarlığı göstererek maddi maneve bütün yardımlarını benden esirgemeyen, değerli hocam Doç. Dr. Ali ERİŞEN 'e sonsuz Őükranlarımı arzederim.

ÖZET

Mevcut nükleer reaktörlerin (esas olarak Hafif Su Reaktörlerinin) yakıt ihtiyacını karşılayan fissile yakıt kaynaklarının tükenebileceğine dayalı olarak geliştirilen Hybrid Reaktör Sistem çalışmaları teorik ve deneysel bazda yürütülmektedir. Yapılan çalışmalarla bir karşılaştırma imkanı da sağlamak üzere, bir hybrid blanketin öncelikle optimum geometrisi belirlenmiş, daha sonra da, bu geometriye ait malzeme yapısı parametrik bir çalışmayı gerçekleştirmek üzere değiştirilmiştir.

Blanketin yakıt bölgesinde, fissile yakıt ve fissile yakıtla birlikte enerji üretimini sağlayacak klasik nükleer yakıtların (ThO_2 ve Tabii- UO_2) yanısıra, nükleer reaktörlerden artık olarak çıkan aktinid yakıtlar da (AmO_2 ve CmO_2) nümerik hesaplamalara sokulmuştur. Saf Li 'un trityum üretim malzemesi ve Be 'un da reflektör olarak kullanıldığı blanketler, diğerleri arasında, nötronik performans kriteri açısından en iyi durumda olanlardır.

Çalışma sırasında nötronik analiz ANISN nötron transport kodu yardımıyla ve $S_8 - P_3$ yaklaşımıyla, (30 nötron + 12 Gamma) 42 gruplu CLAW-IV data paketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

ABSTRACT

Hybrid Reactor System studies improved on to exhausting fissile fuel sources which meet fuel needs of existing nuclear reactors (mainly Light Water Reactors) have been executed theoretically and experimentally. Including the purpose of comparing with the other studies made till now, in this study the optimum geometry of a hybrid blanket was determined firstly and after that the material structure belonging to this geometry was changed in order to realize a parametric study.

In the fuel zones of the different blankets, in addition to the classical nuclear fuels (ThO_2 and nat-UO_2) assuring fissile fuel, and energy production, whether one of them or both of them at the same time, actinid fuels (AmO_2 and CmO_2) which are waste fuels from nuclear reactors were introduced into the numerical calculations. Blankets with pure lithium as the tritium producing material and with Beryllium as reflector are the best ones among the others regarding with neutronic performance.

The neutronic analysis throughout the study has been performed with the help of the ANISN neutron transport code in the $S_8 - P_3$ approximation using the 42 groups (30-neutron + 12-gamma-ray group) data library CLAW-IV.

S E M B O L L E R

E	: Nötron Enerjisi
V	: Hacim
S	: Yüzey
dV	: Diferansiyel Hacim Elemanı
dS	: Diferansiyel Yüzey Elemanı
J	: Açısal Nötron Akısı
\emptyset	: Nötro Akısı
v	: Nötron Hızı
ν	: Filyon Nötron Sayısı
k_{eff}	: Nötron Çoğalma Katsayısı
γ	: Yakalanma Etki Kesiti
Ω	: Nötron Haraket Yönü
Q	: Nötron Kaynak Debisi
N	: Birim Hacimdeki Nötron Miktarı
r	: Uzay Koordinatı
M	: Blanket Enerji Çoğalım Katsayısı
Σ	: Makroskobik Etki Kesiti
σ	: Mikroskobik Etki Kesiti
χ	: Çekirdek Parçalanmasında Nötron Spektrumu
t	: Zaman
m	: Nötron Kütlesi

İndisler

a	: Yutulma
b	: Üretim
f	: Filyon
t	: Toplam
2n	: (n,2n)

İ Ç İ N D E K İ L E R

	Sayfa No
1. BÖLÜM	1
GİRİŞ	1
1.1- Hybrid Reaktör	1
1.2- Hybrid Blanket	4
1.2.1- Füzyon Reaksiyonları	5
1.2.2- Fission Reaksiyonları	8
1.2.3- Dönüşüm ve Üretim Reaksiyonları	10
1.3- Çalışmanın Amacı	11
2. BÖLÜM	16
TRANSPORT TEORİSİNİN TANITIMI	16
2.1- Boltzmann Transport Denklemine Çıkarılışı	16
2.2- S_N Teorisinin Matematiksel İfadesi	24
2.3- Nümerik Hesap Uygulaması	29
3. BÖLÜM	30
ÇALIŞMADA KULLANILAN BLANKET YAPISI	30
4. BÖLÜM	38
NÜMERİK HESAPLAMALAR VE SONUÇLARI	38
4.1- Nötronik Performans Kriterleri	38
4.2- Geometri Optimizasyonu	40
4.3- Çalışmada Kullanılan Hybrid Blanketlere Ait Nötronik Performans Değerlendirmeleri	42
4.3.1- T6 Üretimi Açısından Hybrid Blanketlerin Nötronik Performanslarının Değerlendirilmesi	42
4.3.1.1- Yakıtlara Yönelik Değerlendirme	42
4.3.1.2- Nötron Çoğaltıcı Katmanlarda Yer Alan Malzemeye Göre Değerlendirme	43
4.3.1.3- Tritiyum Üretim Malzemesine Göre Değerlendirme	43
4.3.1.4- Reflektör Malzemesine Göre Değerlendirme	44

4.3.2- T7 Üretimi Açısından Blanket Nötronik Performanslarının Değerlendirilmesi	44
4.3.2.1- Yakıtlara Göre Yapılan Değerlendirme	45
4.3.2.2- Nötron Çoğaltıcı Katmanda Yer Alan Malzemeye Göre Değerlendirme	45
4.3.2.3- Tritiyum Üretim Bölgesindeki Malzemeye Göre Değerlendirme;	45
4.3.2.4- Reflektör Malzemesine Göre Değerlendirme	45
4.3.3- T6+T7 (Toplam Tritiyum) Üretimi Açısından Blanket Performansının Değerlendirilmesi	46
4.3.3.1- Yakıtlara Göre Değerlendirme	46
4.3.3.2- Nötron Çoğaltıcı Katman Malzemesine Göre Değerlendirme	46
4.3.3.3- Tritiyum Üretim Bölgesindeki Malzemeye Göre Değerlendirme	47
4.3.3.4- Reflektöre Göre Değerlendirme	47
4.3.4- (n,2n) Reaksiyon Miktarı Açısından Blanket Performanslarının Değerlendirilmesi	47
4.3.4.1- Yakıtlara Göre Değerlendirme	47
4.3.4.2- Nötron Çoğaltıcı Katman Malzemesine Göre Değerlendirme	48
4.3.4.3- Tritiyum Üretim Malzemesine Göre Değerlendirme	48
4.3.4.4- Reflektör Malzemesine Göre Değerlendirme	48
4.3.5- Fissile Yakıt Üretimine Yönelik Olarak Blanketlerin Nötronik Performans Değerlendirmesi	49
4.3.5.1- Yakıtlara Göre Değerlendirme	49
4.3.5.2- Nötron Çoğaltıcı Katmandaki Malzemeye Göre Değerlendirme	50
4.3.5.3- Tritiyum Üretim Bölgesinde Yer Alan Malzemeye Göre Değerlendirme:	50
4.3.5.4- Reflektör Malzemesine Göre Değerlendirme	51
4.3.6- (n,f) Bölünme Reaksiyon Miktarı Açısından Blanketlerin Değerlendirilmesi	51

4.3.6.1-	Yakıtlara Göre Yapılabilecek Degerlendirme	51
4.3.6.2-	Nötron Çogaltıcı Katmanda Yer Alan Malzeme- ye Göre Degerlendirme	52
4.3.6.3-	Tritiyum Üretim Malzemesine Göre Yapılan Degerlendirme	52
4.3.6.4-	Reflektöre Göre Yapılan Degerlendirme	52
4.3.7-	Toplam Tritiyum ve Fissile Yakıt Üretimi Açı- sından Blanketlerin PerformansDegerlendirilmesi	53
4.3.7.1-	Yakıtlara Göre Degerlendirme	53
4.3.7.2-	Nötron Çogaltıcı Katman Malzemesine Göre Degerlendirme	53
4.3.7.3-	Tritiyum Üretim Malzemesine Göre Degerlendirme	54
4.3.7.4-	Reflektör Malzemesi Açısından Degerlendirme	54
4.3.8-	M Enerji Çogalım Katsayısı Açısından Blanket Performansının Degerlendirilmesi	54
4.3.8.1-	Yakıtlara Göre Yapılan Degerlendirme	55
4.3.8.2-	Nötron Çogaltıcı Katman Malzemesi Açısından Degerlendirme	55
4.3.8.3-	Tritiyum Üretim Bölgesindeki Malzemeye Göre Degerlendirme	56
4.3.8.4-	Reflektör Malzemesine Göre Degerlendirme	56
4.3.9-	(n,2n) Reaksiyon Miktarının Katılmasıyla He- saplanan Efektif (k_{eff}^*) Nötron Çogalım Kat- sayısının Blanketlere Göre Degerlendirilmesi	56
4.3.9.1-	Yakıtlara Göre Yapılan Degerlendirme	56
4.3.9.2-	Nötron Çogaltıcı Katmandaki Malzemeye Göre Degerlendirme	57
4.3.9.3-	Tritiyum Üretim Malzemesine Göre Degerlendirme	57
4.3.9.4-	Reflektör Malzemesine Göre Degerlendirme	57
4.3.10-	(n,2n) Reaksiyon Nötronlarının Katılmasıyla Hesap Edilen (k_{eff}^{**}) Efektif Nötron Çogalım Katsayısının Blanketlere Göre Degerlendiril- mesi	58
4.3.10.1-	Yakıtlara Göre Yapılan Degerlendirme	58

4.3.10.2-	Nötron Çoğaltıcı Katmanda Yer Alan Malzemeye Göre Değerlendirme	59
4.3.10.3-	Tritiyum Üretim Malzemesi Açısından Değerlendirme	59
4.3.10.4-	Reflektör Malzemesine Göre Değerlendirme	60
4.3.11-	k_{eff}^* ve k_{eff}^{**} Değerlerinin Blanketlere Yönelik Karşılaştırılması	60
4.4-	Blanketlere Ait Nötronik Performansların Toplu Değerlendirilmesi	61
4.4.1-	Yakıt Grupları İtibariyle En İyi Blanketlerin Seçimi	61
4.4.2-	Kullanılan Yakıtlara Ait En İyi Nötronik Performansa Sahip Hybrid Blanket Yapısının Seçimi	63
4.5-	Reaksiyon Üretim Yoğunluklarının Hesaplanması	67
4.5.1-	Üretim Yoğunluğu Egrilerine Ait Şekillerin Ortak Değerlendirilmesi	68
4.5.2-	Üretim Yoğunluğu Egrilerinin Mukayeseli Değerlendirilmeleri	69
4.6-	Blanket Spektrum Hesaplamaları	71
4.7-	Seçilmiş Blanketler İçin Yıllık Tritiyum ve Fissile Yakıt Üretimi	74
5. BÖLÜM		105
SONUÇ		105
KAYNAKLAR		109

1. BÖLÜM

GİRİŞ

Bu çalışmada, bu ana bölümün sonunda da açıklanacağı gibi, Hybrid Reaktörlerin nötron-fizik etüdünün gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaca uygun olarak yapılan nümerik hesaplamalar daha sonraki bölümlere bırakılırken bu ana bölümün alt bölümlerinde Hybrid Reaktörlerin yapısal özellikleri kapsamlı bir şekilde verilmeye çalışılmıştır.

1.1- Hybrid Reaktör

Son on yılına girdiğimiz yirminci asrın enerji tüketimi, gelişen teknoloji ile birlikte, özellikle 2.Dünya Savaşı sonrası, katlanarak artmıştır. Enerji üretiminin, önemli iki bileşeninden biri olan fosil yakıtlardan yapılagelen enerji üretimi; çevre kirliliği, yatakların giderek tükenmesi ve bazı teknolojik-ekonomik güçlükler gibi problemlere dayalı olarak sınırlandırılmaktadır. Fosil yakıtların boşaltmak durumunda olduğu, enerji üretim yüzde aralığının, diğer alternatif enerji kaynakları (özellikle güneş enerjisi) tarafından ekonomik olarak doldurulabilmesi, hem teknolojik güçlük arz etmekte hem de uzun bir zaman dilimini gerektirmektedir. Böyle bir kaynak dağılımı tablosu içerisinde, nükleer enerji üretimi, beklenen bir gelişim çizgisi üzerinde, 30-40 senelik bir teknolojik birikimle birlikte yer almış ve yer almaya da, beklenmeyen bir gelişme olma-

dıkça, devam edebilecektir. 2850 GWe kadarlık dünya enerji üretiminin yaklaşık, 330 GWe veya % 11.5 luk kadarı yaklaşık 440 nükleer reaktör aracılığıyla karşılanmaktadır ve yapılan tahminler, 20 senelik bir periyot içinde nükleer enerjinin, toplam enerji üretimi içerisinde aynı payı muhafaza edeceğini göstermektedir [1].

Sözü edilen nükleer enerji üretiminin ağırlıklı yüzdesi, Hafif Su Reaktörleri (LWRs) tarafından karşılanmakta ve bu reaktörlerde de, termal nötronlarla bölünebilen nükleer yakıt (fissile fuel) enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Böyle bir yakıt için tabiiatta yararlanılabilecek kaynak, Tabii Uranyum (% 0.07 ²³⁵U + % 99.3 ²³⁸U) dur. Böylece nükleer bölünmeye uğrayabilecek mevcut tabii kaynakların % 99 kadarı enerji üretimi için kullanılamamaktadır.

Günümüzde Tabii Uranyumdan karşılanmakta olan bölünebilir yakıt ihtiyacının; başka bir alternatif bulunmadıkça, 21. yüzyılın ilk çeyreğinin sonuna doğru karşılanamaz bir duruma ulaşacağı, bazı araştırmaların sonuçlarından çıkarılabilen bir gerçektir [2,3]. Bölünebilir yakıt ihtiyacının karşılanabilmesine yönelik olarak, hızlı reaktör teknolojisinin, 10 - 30 yıllık katlama periyotlarına (doubling time) sahip olması ve bu reaktörlerde elde edilen yakıtın yeni hızlı reaktörlerde kullanılabilecek olması, sözü edilen probleme, yakın gelecek için alternatif bir çözüm aranmasına yol açmıştır. Böylece, prensip olarak, bölünebilir yakıt eldesine dönük olarak çalışan hızlı veya üretken reaktör (breeder) sisteminin, bölünebilir yakıttan başka yeni bir nötron kaynağı ile çalıştırılması gündeme gelmektedir. Bu özellik ise potansiyel olarak, ya termonükleer reaktörlerde, (D-D) , (D-T) ve diğer muhtemel birleşme reaksiyonlarından elde edilebilecek nötronlarla, ya da ağır çekirdeklerin yüksek enerjili yüklü taneciklerle yarılması (spallation) sonucu açığa çıkan nötronlarla sağlanabilir.

Yukarıdaki probleme çözüm olarak, birçok araştırmacı tarafından teklif edilen Hybrid Reaktör sistemi, birbirinin özelliklerini tamamlamak üzere, çekirdek birleşme ve bölünme (fusion, fission) olaylarının birlikte gerçekleştirildiği bir sistem-

dir [4-10]. Böyle bir reaktörde, temel fikir, plazmanın etrafını fertil malzemeden (^{238}U veya ^{232}Th) meydana gelen bir blanketle sarmak ve bu malzemeyi yüksek yoğunluklu füzyon nötronları aracılığıyla bölünebilir yakıt (fissile fuel) dönüştürmektir. Bu şekilde blanketde yer alan nükleer yakıtın bir kısmı, termal reaktörlerde kullanılabilecek yakıt (^{239}Pu veya ^{233}U) dönüştürülürken, aynı zamanda, 14 MeV 'lik enerjik (D-T) nötronlarıyla sağlanan hızlı bölünme sonucu, enerji de elde edilebilmektedir. Böyle bir uygulamada, birim enerji başına fissile yakıt üretimi, bir hızlı üretekende elde edilenin yaklaşık olarak 30 katına kadar ulaşabilirken, blankette açığa çıkan enerji ise, düşük enerji kazanımlı bir füzyon reaktörünün sahip olduğunun yaklaşık 20 ile 40 katı kadar olabilmektedir [2,3].

Hybrid Reaktörün blanketinde üretilen fissile yakıtın çok az bir kısmı, yine blanket içerisinde, enerji üretimine katkıda bulunabilecek şekilde kullanılırken, geriye kalan miktar, uygun yöntemlerle, reaktör dışına alınıp, termal reaktörlere yakıt olarak aktarılabilir.

Böyle bir Hybrid Reaktör, ^{239}Pu ve ^{233}U gibi yüksek kalitede nükleer yakıt kullanan konvensiyonel nükleer reaktörlerin önemli bir kısmının oluşumunu ve devamını mümkün kılarken, bu reaktörlerin daima kritik altı çalışması nedeniyle; çalışma şartlarında yüksek emniyet faktörü ve yakıt yenilemek için daha esnek bir durum söz konusudur. Yine bu reaktörlerde, aktinidler olarak bilinen (actinides) nükleer reaktör artıklarının yüksek bir verimlilikle yakılmaları veya $^{242\text{m}}\text{Am}$ ve ^{245}Cm gibi çok kıymetli fissile malzemelere dönüştürülmeleri de sağlanır [10].

Hybrid reaktör sistemlerinin diğer bir avantajı da, çubuk şeklindeki yakıt bloklarını, LWR ve Hybrid reaktör arasında belirli bir periyotta çevrime sokarak, LWR 'lerin tükenmiş yakıtını gençleştirmede kullanılabilmeleridir. Böyle bir çevrime, yakıt çubugu malzemesi mekanik olarak işe yaramaz hale gelinceye kadar devam edilebilir [11].

Bir Hybrid Reaktörün ana dezavantajı ise, füzyon nötron kaynağı ve kompleks fissile blanket olarak isimlendirebileceğimiz iki karmaşık teknolojiyi bünyesinde birlikte ihtiva ediyor olma-

sıdır. Bu durum her ikisinin ayrı ayrı ele alınmasından daha yüksek mertebede bir karmaşıklığın ortaya çıkabileceğini ifade etmektedir.

Daha önce değinildiği gibi, Hybrid Reaktör; geometri olarak bir füzyon reaktörünün geometrisi esas alınarak geliştirilmek durumundadır. Bu özellik ise, ağırlıklı olarak blanket dizaynında kendini gösterir. Bu çerçevede, bir hybrid blanket, yapısı ve içerisinde ortaya çıkan nükleer reaksiyonlar itibarıyla, aşağıda ayrı bir alt bölüm içerisinde ele alınmıştır.

1.2 - Hybrid Blanket

Hybrid blanket anlayışı; füzyon blanketinde, trityum üretim bölgesinin önüne veya arkasına, füzyon nötronları tarafından bölünebilen bir yakıt (Fissionable) katmanının konması ve bu yolla bölünme enerjisinin yanısıra, termal nötronlarla parçalanabilen yakıt (Fissile) üretiminin de gerçekleştirilmesi esasına dayanır [2]. Bu blanket yapısında, reaksiyon odası, bir ilk cidarla çevrilir, onun da etrafında değişik amaçlar için kullanılmak üzere blanketin diğer katmanları yer alır. İlk cidar, kendinden sonra yer alan blanket'i, plazmadan kaynaklanan elektro-manyetik radyasyon ile, yüklü tanecik bombardımanından koruma fonksiyonunu, kısmen yüklenir. Bunun yanısıra, daha önemli olarak, kendisi de, manyetik olarak sıkıştırılmış plazmadan gelecek radyasyon ısısına dayanabilecek malzeme yapısına sahip olmalıdır [12].

Blanket'in fonksiyonları; plazmanın hakim olan çalışma modu (D-T) reaksiyonu ise, gerekli trityum üretimini (Fusile Breeding) ve fertil - fissile dönüşümüyle fissile yakıt üretimini (Fissile Breeding) sağlamak, nötron sayısını ve kendine füzyon nötronlarıyla ulaşan enerjiyi çoğaltmak, termal enerji eldesini sağlamak ve bir dereceye kadar da, nötronlar ve gamma ışınları için perdeleme görevini yerine getirmek şeklinde sıralanabilir. [8,10,13,14]

Hybrid Blankette meydana gelen nükleer reaksiyonlar ise, Füzyon, Filyon ve Breeding (Üretim) reaksiyonları olarak sınıf-

landırılabilir. Aşağıda, bu temel nükleer reaksiyonlar üç ayrı alt bölüm halinde incelenirken reaksiyon özelliklerinin blanket yapısına veya dizaynına olan katkıları, reaksiyon özelliği eşliğinde verilmiştir.

1.2.1- Füzyon Reaksiyonları

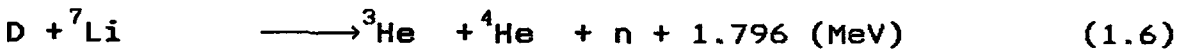
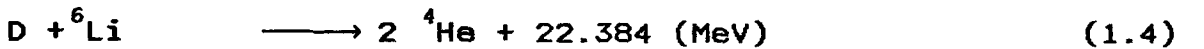
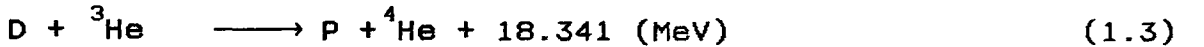
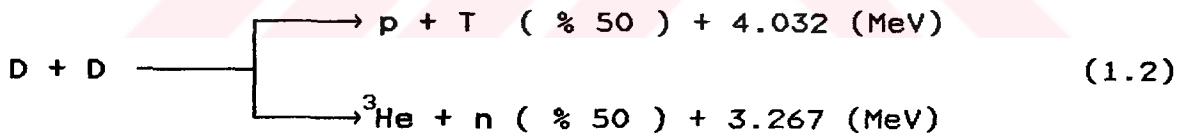
Termonükleer enerji kaynağı; düşük kütleli çekirdeklerin, uygun ortam şartlarında birleşerek, büyük bir enerjinin (MeV mertebesinde) açığa çıkmasının eşliğinde, daha büyük kütleli bir çekirdek oluşturmaları olarak tanımlanan 'Füzyon Reaksiyonları'na dayanır.

Füzyon reaksiyonları aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [2];

a1) Klasik Füzyon Yakıtı



b1) Geliştirilmiş Reaktörlerde Kullanılabilecek Füzyon Yakıtları

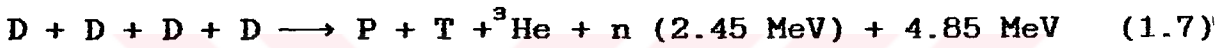


Bu reaksiyonlarda, toplam reaksiyon enerjisi, reaksiyon sonucu açığa çıkan parçacıklar arasında enerji ve momentumun ko-

runumu prensibine göre, paylaşılır. Böylece (D - T) ve (D -D) reaksiyonlarından açığa çıkan nötronların enerjileri sırasıyla, 14.1 MeV ve 2.45 MeV dir. (D -T) reaksiyonu, tüm füzyon reaksiyonları içerisinde, en yüksek reaksiyon ihtimaline haiz olması nedeniyle, klasik füzyon yakıtı olarak gözönüne alınmıştır. Bu yakıtın bir komponenti olan T, yapay bir elementtir.

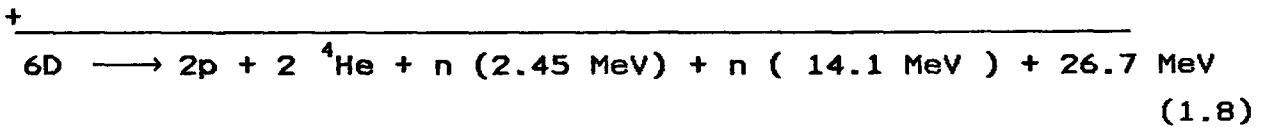
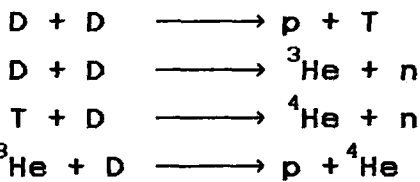
(D - D) reaksiyonu, D 'un tabiiatta bolca bulunması nedeniyle, ileri füzyon yakıtı olarak büyük bir potansiyele sahiptir. Günümüzde, üç farklı (D - D) füzyon reaktör tipi, ilgili sistem araştırmalarının konusunu teşkil etmektedir.

a2) Saf (Pure) (D - D) Reaktörleri



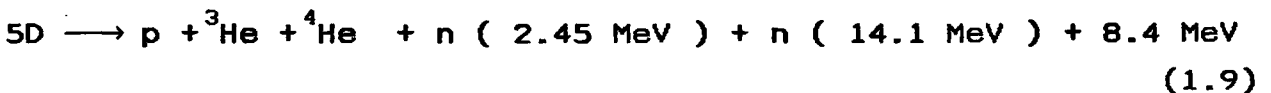
Bu reaksiyonda, açığa çıkan T ve ${}^3\text{He}$, ortamda tekrar reaksiyona girmelerine mani olmak için ortamdaki sürekli olarak alınmalıdır. Pratikte, T'nin büyük bir kısmının reaksiyona girmesine mani olmak mümkün değildir.

b2) Katalize D - Reaktörleri



c2) Semi Katalize D - Reaktörleri

Katalize D - Reaktörlerine benzer, fakat bu benzerlik (D - ${}^3\text{He}$) reaktörleri için, ${}^3\text{He}$ 'ün sürekli alınması şartıyla mümkün olmaktadır.



(D - T) füzyon reaktörlerinde, füzyon enerjisinin % 80'i, nötronlar tarafından taşınır. Bu göstermektedir ki, pratik olarak kullanılabilir enerjinin tümü, dışarıda ısı enerjisi olarak kullanılabilir. α parçacıkları, toplam füzyon enerjisinin % 20' si ile, füzyon reaksiyonuna destek olması için plazmayı ısıtırlar.

Diğer taraftan, (D - D) reaktörlerinde, füzyon enerjisinin önemli bir kısmı (yaklaşık % 65'i), elektrik yüklü füzyon reaksiyon ürünleri arasında paylaşılacaktır. Yüksek enerjili yüklü parçacıklar, herhangi bir ısı enerjisinden daha yüksek bir verimlilikle, enerji üretimi için doğrudan dönüştürücülerin (direct converters) kullanımını mümkün kılmaktadır. Bu durum, (D - ^3He) reaksiyonlu bir füzyon reaktöründe, ana reaksiyon ürünlerinin yüklü parçacıklar olmasından dolayı, sadece elverişlidir. Böyle bir reaktörde nötronlar, sadece aynı yan reaksiyonlar vasıtasıyla üretilecektir. Bir (D - ^3He) reaktöründe üretilen toplam enerjinin sadece yaklaşık % 2'sini bu nötronların taşıyacağı tahmin edilmektedir [2,3].

Bir Füzyon Reaktörü'nün yapısındaki artık radyoaktivite, malzemeye nötronların etkileşiminden meydana gelir. Nötron bakımından zayıf olan füzyon reaktörleri, eşdeğer güç çıktılı klasik nükleer reaktörlerle karşılaştırıldığında daha düşük radyoaktif artık taşıyacaktır.

İleri Füzyon Reaktörleri, daha yüksek enerji dönüşüm verimliliği ve düşük radyoaktivite taşıması dolayısıyla daha iyi bir avantaja sahip olmasına rağmen, teknolojik gelişimi, bahsi geçen ve ticari öneme haiz olan (D - T) füzyon reaktörlerinden çok daha uzun zamanı ve çabayı gerektirmektedir. Füzyon Reaktörlerinin ilk kuşağı (D - T) modundaki reaksiyonu ihtiva eden reaktörler olacaktır. Bir Hybrid Reaktör için, yüksek enerjili (D - T) füzyon nötronları, blankette, yüksek enerji çoğalımı ve yüksek fissile yakıt üretim kapasitesi bakımından çok önemli bir avantaj ortaya çıkarmaktadır.

Füzyon reaksiyonlarının, hybrid reaktör sistemlerinde nötron kaynağı olarak kullanılması durumunda, bu reaksiyonların oluştuğu ortam, füzyon sürücü (fusion driver) olarak isimlendi-

rilir. Böylece, yine hybrid sistem açısından, (D-T) ve (D-D) sürücülü reaktörlerden bahsetmek mümkündür.

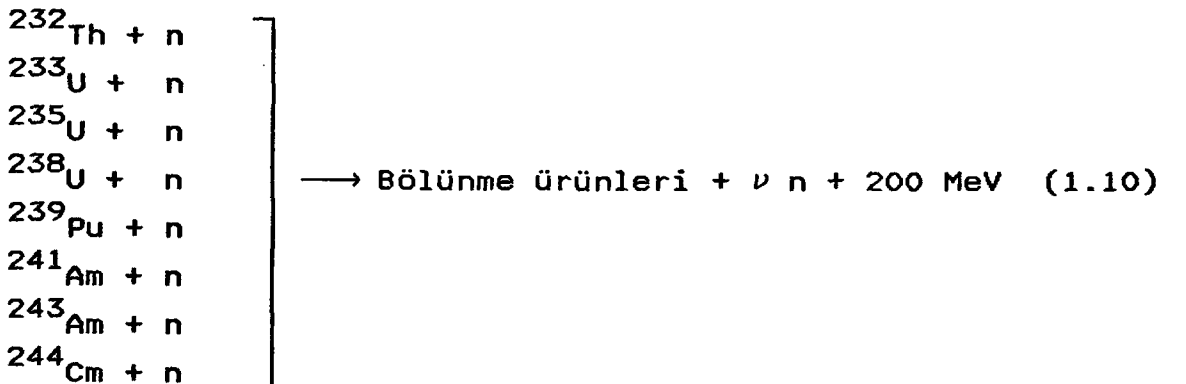
Kendilerine nötron sağlayan füzyon sürücüleri açısından, hybrid reaktörler üç ana grupta toplanabilir [3,5,15]. Bunlar sırasıyla:

- Tokamak sürücülü hybrid sistem (Tokamak-driver)
- Ayna tipi sürücülü hybrid sistem (Mirror-driver)
- Atalet özellikli füzyon sürücülü hybrid sistem (Inertial fusion driver)

Bütün füzyon sürücülerde temel özellik, plazmanın, belirli bir geometride, plazmayı çevreleyen "ilk cidar" a degmeksizin tutulabilmesidir. Mesela, Tokamak tipinde, plazma, toroidal bir geometride, magnetik olarak sıkıştırılır. Hybrid reaktör uygulaması açısından, ana eksen üzerinde uzunlamasına bir füzyon plazmasını bulunduran ayna tipi füzyon sürücü, sahip olacağı silindirik geometri sebebiyle, Tokamak tipine göre daha uygun bir yapı ortaya koyar.

1.2.2 - Fission Reaksiyonları

Yakıt bölgesinde blanket için düşünülecek olan fonksiyonların yerine getirilebilmesi, aşağıda sıralanan belirli bölünme ve dönüşüm reaksiyonları aracılığı ile sağlanır. Bölünme, esas olarak, ağır kütleli çekirdeklerin, nötron yutmaları sonucu ikiye ayrılmalarıdır. Hybrid reaktörlerin yapısına uygun en önemli bölünme reaksiyonları aşağıda verilmiştir. Pratik anlamda, reaktörler için önemli olan bu bölünme reaksiyonları;



şeklinde sıralanabilir. Bu çekirdeklerden, ^{232}Th ve ^{238}U 'in bölünmesi ancak enerjik nötronlar aracılığı ile sağlanabilirken, diğerleri, ortam atomlarıyla dengede bulunan 'Termal Nötron'larla bölünme reaksiyonuna girebilmektedirler.

İlk cidarın gerisinde kalan blanket yapısı, 'hybrid' reaktör sınıflandırılmasında da esas olacak şekilde, temel iki yaklaşıma göre dizayn edilebilir [3].

Brinci yaklaşım, ilk cidarın hemen arkasına, fertil malzemeden (^{238}U , ^{232}Th) yapılmış bir katman konmasını öngörür. Bu yapı içerisinde füzyon nötronları, fertil malzemeyle hızlı bölünme reaksiyonuna (Fast Fission) girer. Bu ise, gerek enerjinin gerekse nötron sayısının '1' den büyük bir faktörle çoğalması anlamını taşır. Her reaksiyon için, çoğalan nötronlardan birisi, aşağıda değinileceği gibi, (D-T) için gerekli trityum eldesine harcanırken, diğerleri fissile yakıt üretiminde kullanılabilir. Bu özellikleri sebebiyle, böyle bir hybrid blanket 'Hızlı Bölünme Blanketi' olarak isimlendirilir.

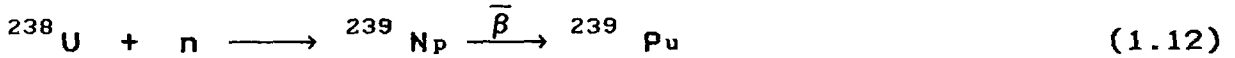
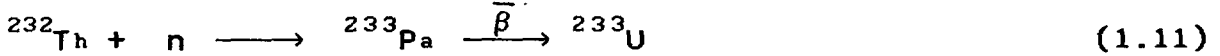
Diğer yaklaşımda ise, füzyon nötronları, ilk cidarın hemen gerisinde yer alan, nötron çoğaltıcı bir katmanda (Nötron Multiplier, Be, Pb, veya Li) sayıca (n,2n) reaksiyonlarıyla çoğaltılırken, aynı zamanda enerjileri < yavaşlatılır. Böylece bu katmandan sonra yer alan ve fertil yakıttan (genel olarak Th) oluşan bölgede, hakim olan reaksiyon, 'Fertil - Fissile' dönüşümü olup, bu blanket esas olarak, fissile yakıt eldesinde kullanılır (^{232}Th den ^{233}U). Be, nötronik açıdan en iyi çoğaltıcı malzeme olmasına rağmen, sınırlı kaynaga ve fabrikasyonunda bazı güçlüklerle sahip olması sebebiyle, diğer çoğaltıcı malzemeler de Be yerine kullanılmaktadır. Yine, bu blanket içerisinde, termal nötronlar ^6Li ile reaksiyona girecekleri için, oluşan ^{233}U çekirdeklerinin termal nötronlarla bölünme reaksiyonuna girme ihtimali bir hayli düşücektir. Bu sıralanan nitelikler ise, bu hybrid blanketin 'Düşük Bölünme Oranlı Blanket (Suppressed Fission Blanket)' olarak isimlendirilmesine sebep olur.

Bölünme reaksiyonlarının her birisi, blankette 200 MeV'lik bir enerjinin tutulmasına yol açarken, nötronlar, enerjilerini esas itibariyle, trityum üretiminin gerçekleştiği, Lityum böl-

gesinde bırakırlar. Hybrid blankette, enerji çoğaltımı, bir nötron çoğaltıcı tabakada bölünmeye uğramayan bir malzeme ile (Be,Pb, ve Li) sağlanabildiği gibi ağır çekirdeklerle gerçekleştirilen (n,2n) ve (n,3n) reaksiyonlarıyla da yakıt bölgesi içerisinde sağlanabilir. Böylece yüksek enerjili (D-T) nötronları, (n,2n) ve (n,3n) reaksiyonları vasıtasıyla nötron ekonomisine katkıda da bulunurlar. ^{232}Th de elde edilen (n,2n), reaksiyon miktarı ^{238}U de elde edilenden daha yüksektir. ^{232}Th blanketlerinde, (n,2n) reaksiyonundan dolayı nötron kazancı (n,f) reaksiyonu ile elde edilenden daha yüksek olduğu yapılan hesaplamalardan görülmüştür [2,3.10].

1.2.3 - Dönüşüm ve Üretim Reaksiyonları

Dönüşüm reaksiyonları, ağır çekirdeklerin, nötron yutarak, kütle sayısı 'bir' büyük olan yeni bir çekirdeğe dönüşmesi şeklinde tanımlanabilir. Bu dönüşüm; sonuçta bölünebilir yeni bir çekirdek (Fissile) ortaya çıkarıyorsa, olayın başlatıldığı çekirdek 'Fertil' çekirdek olarak isimlendirilmek üzere, 'Fertil - Fissile' dönüşümü veya fissile nükleer yakıt üretimi (Fissile Breeding) olarak bilinir. Bu reaksiyonların başlıcaları:



şeklinde sıralanabilir.

Bir Hybrid Reaktör blanketi kendi füzyon sürücüsü için, kendi Tritiyumunu ve Hafif Sulu Reaktörler (Light Water Reactor, LWR) için yeterli miktardaki fissile malzemeyi üretebilmelidir.

Hızlı spektrumlu bir hybrid blanket, kendi kurulu tesisinde yaktığından daha çok fissile malzeme üretir. Böylece, bir LWR

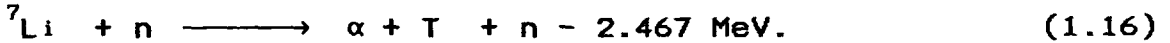
de; harcanan yakıttan oluşan plutonyum ötesi nükleer atık malzemeler, yüksek bir verimlilikle yakılabilirler veya kısmen ^{242}Am , ^{245}Cm gibi kıymetli fissile malzemelere dönüştürülürler. Bu malzemeler en küçük boyutlarda gerçekleştirebilecek fission olaylarını realize etme potansiyeline sahiptirler.

Yukarıdaki paragraflarda kısmen değinildiği şekilde, (D-T) reaksiyonuna dayalı bir plazma için gerekli Tritiyum'un eldesi de, yine blanket içerisinde gerçekleştirilen bir olaydır. Blanket içerisinde, yakıt bölgesinden sonra yer alan bu bölge, 'Tritiyum Üretim Bölgesi (Tritium Breeding Zone)' olarak bilinir. Bu katmanın malzemesi ise, Lityum ve bileşikleridir. 'Fusile Breeding' olarak bilinen, Tritiyum eldesine yönelik temel reaksiyonlar şunlardır:

$^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ olarak ta gösterilen



ve $^7\text{Li}(n,\alpha n')\text{T}$ olarak ta gösterilen



Bu reaksiyonlardan ilki termal, ikincisi ise hızlı nötronlarla daha etkili olarak oluşturulabilme özelliğini taşır. ^6Li ve ^7Li trityum üretimi için, sırasıyla termal ve hızlı nötron enerjisi aralığında daha verimlidirler. Daha yüksek enerji aralıklarında, bir nötron, ^7Li üzerinden bir trityum atomu üreterek yok olmayacak, diğer bir üretim reaksiyonunu gerçekleştirebilecektir. Böylece, bir füzyon blanketine gelen nötron başına, üretilen trityum daha fazla olacaktır. Füzyon Reaktörlerinde, füzyon yakıtı üretimine yönelik katlanma zamanınının (doubling time) daha kısa olmasının nedeni budur.

Hybrit blanketin önemli fonksiyonlarından olan enerji çoğaltımı, M enerji çoğaltım katsayısı ile aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$M = \frac{\left(\begin{array}{l} \text{Blankette Tutulan Bölünme} \\ \text{Reaksiyon Enerjisi} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Blankette Tutulan} \\ \text{Nötron Enerjisi} \end{array} \right)}{14.1 \text{ MeV (veya 2.45 MeV)}} + 1 \quad (1.17)$$

Diger taraftan, Hybrid Reaktör hesaplamaları, M blanket enerji çoğalım katsayısının 40'a kadar çıkabileceğini göstermektedir. Hatta ticari hybrid reaktörlerin konstrüksiyonuna başlamak için, teknolojik esasların, gerçekçi bir yaklaşımla 2000 yıllarına doğru hazır olabileceği tahmin edilmektedir [5,8].

Bir hybrid blankette açığa çıkan ısı enerjisi, sıvı ve gaz soğutucular aracılığı ile alınır ve elektrik enerjisi elde edilecek kısma aktarılır. Sıvı soğutucular, genel olarak, ısı iletim ve nükleer özellikleri sebebiyle sıvı metaller (Sıvı Lityum, Sıvı Sodyum) olmak durumundadır [5,16,17]. Gaz olarak ise, Helium kullanılır.

Diger bir uygulama da, Su Soğutmalı Hybrid Blanket'tir. Bu durumda, sudaki nötron moderasyonu sonucunda, düşük yüzde ile bulunan ^{235}U ve üretilen Plutonyum'un çekirdek bölünmesine ve dolayısıyla enerji çoğalımına olan katkısı sözkonusudur. Yine bu uygulamada, su ile yakıtın hacimsel oranı değiştirilerek, bölünebilir yakıt üretimi ve enerji çoğalımının, değişik oranlarda gerçekleştirilebileceği, geniş bir kullanım alanına ulaşılabilir. Ayrıca böyle bir blankette nötron spektrumunun, moderatör/yakıt oranına olan hassasiyeti, hybrid blanketteki güç dağılımını düzleştirmek için de kullanılabilir.

Nötron ekonomisinin sağlanabilmesi için, blanketin etrafı bir de 'Reflektör' ile çevrilir. Reflektör malzemesi, genel olarak grafit olup, bazen de düşük sıcaklıklı çalışma ortamları için, küçük kütleli çekirdeklerden meydana gelen malzemeler (Be, Fe, v.b) de kullanılır.

1.3- Çalışmanın Amacı

Yukarıdaki bölümlerde, bir hybrid reaktörün yapısından ve fonksiyonlarından kavramsal düzeyde söz edildi. Bu verilen fiziksel esaslara dayalı olarak bir çok sistem çalışması gerçekleştirilmiştir ve deneysel düzeyde de olmak üzere bu çalışmalar devam etmektedir. Sistem çalışmalarının bir kısmı füzyon nötronigini esas alarak fusile yakıt olarak da bilinen Trityum'un üretilebildiği blanketlerin dizaynına yönelik olarak gerçekleştirilirken [18-23] diğer bir kısmı, blanketinde bölünebilir malzeme bulunan sistemlere ait yakıt çevrimleri üzerinde yoğunlaştırılmıştır [24-26]. Bunların dışında, bir hybrid blankete ait bileşenlerin bir arada incelendiği, deneysel çalışma programları yürütülmektedir [27-32]. Yürütülen çalışmalar, yukarıdaki gibi sistematik bir ayrıma tabi tutulabildiği gibi; nötron-sürücüsü farklılığına göre D-T (Deuterium-Tritium) [25, 31-33] veya D-D (Deuterium-Deuterium) [34] sürücülü blanketler şeklinde; blanket geometrilerinin farklılığına göre de, düzlem geometrili olanlar [26-28] ve silindirik geometrili olanlar [24,25,29,30] şeklinde bir ayrıma tabi tutulabilir. Bir hybrid reaktörün gerçek yapısıyla uyum sağlamanın yanısıra, nümerik ve deneysel değerlendirme sonuçları arasında ortaya çıkan farkların, geometri seçimi veya nümerik hesaplamada kullanılan data kaynaklı olup olmadığını belirlemede, düzgün bir simetriye sahip olan silindirik geometrinin, düzlem geometriye göre, belirli bir avantajı olduğu ortaya konulmuştur [31].

Güç üretim sistemlerinin, genelde, geometrik parametreye bağlı olarak düzgün olmayan bir güç üretim egrisine sahip olmaları problemi, hybrid blanket için de geçerlidir. Düzgün bir güç dağılımına sahip olmak, hybrid blanket için de, mühendislik açısından, işletim kolaylığı sağlması yönüyle istenen bir özelliktir. Bu özelliği elde etmek üzere; su soğutmalı, tabii Li_2O 'lu ve D-T sürücülü bir blanket için yapılan nümerik çalışmada [35] üç ayrı metod yardımıyla daha düzgün bir güç dağılımı elde edilmiştir. Bu üç metod; ^6Li yüzdesini önden arkaya doğru zenginleştirmek, blanket içerisine nötron çoğaltıcı bir katman yerleştirmek ve enerji üretimi için kullanılan malzemenin hacim yüz-

desini önden arkaya doğru arttırmak, şeklinde sıralanmaktadır.

Güç dağılımını düzgünleştirmek için kullanılan diğer bir yöntem de, blanketin yakıt bölgesinde fisyon etki kesitleri (fission cross section) farklı olan karışık yakıt kullanmak ve yakıtların yüzdesini, blanketin önünden arkasına doğru değiştirmektir [36-41]. 35 numaralı kaynakta belirtilen 3. metodla, karışık yakıt kullanma yöntemi paralellik arz etmektedir.

Çok azı dışında, blanket dizayn çalışmaları, genelde, bir hybrid blanketin performans parametrelerini tesbit etmeye ve iyileştirmeye yöneliktir. Bir blanket dizaynında, optimizasyon açısından parametre tesbiti çok geniş tutulabilirse de [42]; blanketin temel bileşenleri olan, nötron çoğaltıcı katman, yakıt bölgesi, trityum üretim bölgesi ve reflektör katmanları aracılığı ile ortaya konan esas nötronik performans değerleri, değerlendirilmede öncelik taşıyanlardır. Yakıt bölgesinde yer alan yakıtı değiştirmeden, trityum üretim bölgesindeki malzemeyi (Li_2O) değişik zenginleştirme yüzdeleriyle TBR trityum üretim oranını (trityum breeding rate) arttırmak açısından kullanmak mümkün olabildiği gibi [35]; aynı bölgeyi çok katmanlı hale getirerek de aynı amaca ulaşılabileceği hesaplanmıştır [22,23,31,34]. Benzer bir yaklaşımla, yakıt bölgesinde, Tabii Uranyum ve Toryum veya ikisinin karışımı kullanılarak, fissile yakıt oranının arttırılması düşünüleceği gibi [24,25,30-32,34,38,39]; enerji çoğalım faktörünün arttırılmasına yönelik olmak üzere, yakıt bölgesine, fisyon etki kesitleri yönünden bir hayli yüksek değerlere sahip, aktinidlerin veya güç dağılımını da düzeltmek üzere, tabii yakıt-aktinid karışımı yakıtların yerleştirilmesinin düşünülmesi de söz konusudur [40,41].

Hybrid blanketin, fisyon-füzyon çizgisinde taşımış olduğu önem, önceki bölümlerde belirtilmişti. Bu önemine dayalı olarak, deneysel çalışma şartlarını kurabilmeyi düşünmenin yakın gelecek için realistik olmadığının bilindiği ülkemizde, yapılacak olan, hybrid blanket dizaynını gerçekleştirmeye yönelik çalışmalardır. Böyle bir çalışma, ilerideki olası deneysel çalışmaların da temelini teşkil edebilecektir. Bu tesbitin ışığı altında, bu çalışmada, bir hybrid blanketi oluşturan bütün bileşenlerin, opti-

mizasyon parametreleri dikkate alınarak, performans eğrilerinin ve karakteristiklerinin belirlenmesi ve bu belirlemeye dayalı olarak da bir değerlendirilmenin yapılması hedeflenmiştir. Gerek nötron sürücünün değişik iki moduyla, gerekse blanketin her katmanında kullanılan değişik malzemelerle, optimizasyon da amaçlanarak, gerçekleştirilen hesaplamalar, çalışmanın kapsamının çok geniş bir çerçevede ortaya çıkmasını sonuçlandırmıştır. Bu geniş çalışma spektrumu ile de, tabii olarak rahat bir kritik etme imkanı sağlanmıştır.

Hybrid blanket de dahil olmak üzere bir nükleer reaktör ortamında meydana gelebilecek reaksiyon miktarlarının hesabında kullanılacak nötron dağılımı, Boltzmann Transport Denklemlerin çözümüyle belirlenir. Fakat, integro-diferansiyel denklem olan bu denklemin analitik çözümlerini elde etmek kolay olmayan, hatta bazı durumlarda mümkün olmayan, bir özellik arzeder [43]. Bundan dolayı, analitik çözüm yerine, nümerik çözüme gidilir. Gerek, Boltzmann Transport Denkleminin elde edilişi, gerekse, nümerik çözümde kullanılan metod bir sonraki bölümde verilmiştir. Nümerik çözümde kullanılan bilgisayar programı ve nümerik data, seçilen hybrid blanketin geometrisi, nümerik hesaplama sonuçlarına ait tablo ve grafikler ve sonuçların irdelenmesi, çalışmanın bundan sonraki bölüm konularını oluşturmaktadır.

2.BÖLÜM

TRANSPORT TEORİSİNİN TANITIMI

Reaktör Sistem Çalışmalarında, nükleer ortamın nötron-fizik analizi ve dolayısıyla nötron dağılımı Boltzmann Transport Denklemlerinin çözümüyle verilir. Analitik olarak, ancak bazı yaklaşımlarla gerçekleştirilen bu çözüm S_N metodu olarak bilinen metodla nümerik olarak ta ortaya konulabilmektedir. Aşağıdaki alt bölümlerde, Boltzmann Denklemine önce elde edilmesi, sonrada denlemin nümerik çözümü için kullanılan S_N metodu takdim edilmiştir.

2 . 1 - Boltzmann Transport Denklemine Çıkarılışı

Herhangi bir V hacmi içerisinde ; dE aralığında E enerjili ve $d\vec{\Omega}$ aralığında $\vec{\Omega}$ yönünde hareket eden nötronların sayısı, $n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$ açısal nötron yoğunluğu olarak tanımlanmak üzere;

$$\left[\int_V n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) dV \right] dE d\vec{\Omega} \quad (2.1)$$

ifadesiyle verilir. Nötron sayısının zamana göre değişimi dikkate alınırsa balans denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\int_V n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) dV \right] dE d\vec{\Omega} = \left[\begin{array}{l} V'de kazanılan - V'den \\ kaybedilen \end{array} \right] \quad (2.2)$$

şeklinde yazılabilir. Seçilen V hacminin zamandan bağımsız olduğu farzedilirse;

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\int_V n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \right] dE d\vec{\Omega} = \left[\int_V \frac{\partial n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)}{\partial t} \right] \quad (2.3)$$

bağıntısı elde edilir.

V hacminde, nötronların açığa çıkması veya kaybolması durumunu da dikkate alarak, $n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$ açısal yoğunluk terimi cinsinden kazanç ve kayıp mekanizması matematiksel olarak yazılabilir.

Bunun için :

a - Kazanç Durumu

1 - V hacminde yeralan herhangi bir kaynaktan (fisyon gibi) açığa çıkan nötronlarla,

2 - S yüzeyinden V hacmine akan nötronlarla ve,

3 - V hacminde E' ve $\vec{\Omega}'$ durumundan E , $\vec{\Omega}$ ye saçılma çarpışmalarına maruz kalarak değişen farklı E' , $\vec{\Omega}'$ li nötronlarla belirlenir.

b - Kayıp Durumu ise,

4- S yüzeyinden kaçan nötronlarla,

5- V hacminde çarpışmaya maruz kalan nötronlarla belirlenir. Bu son maddede yer alan nötronların, gerek yutulma reaksiyonlarına gerekse nötronların enerjisini düşürecek çarpışma reaksiyonlarına maruz kaldıkları düşünülmektedir. Bu faktörlerin

herbiri için matematiksel ifadeler şu şekilde yazılabilir:

1 - Kaynak terimi

$$S(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) dV dE d\vec{\Omega} \equiv \left[\begin{array}{l} \vec{r} \text{ civarında } dV \text{ 'de, } E \text{ civarında} \\ dE \text{ 'de, ve } \vec{\Omega} \text{ civarında } d\vec{\Omega} \text{ 'de} \\ \text{birim zamanda açığa çıkan kaynak} \\ \text{nötron miktarı} \end{array} \right] \quad (2.4)$$

olacaktır. Dolayısıyla;

$$\text{KAZANÇ1} = \left[\int_V S(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) dV \right] dE d\vec{\Omega} \quad (2.5)$$

2 ve 4 - V hacmine yüzeyinden olan giriş çıkış. Bu terimler birlikte mütala edilerek, S yüzeyinde gerçekleşen net kaçaklar hesaplanabilir. Eger, $v n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$ çarpımı ile tanımlanan skaler nitelikli "Açısal Nötron Akısı" $\vec{J}(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$ olarak gösterilir, $\vec{\Omega}$ birim vektörü aracılığı ile $\vec{J}(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = \vartheta(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \vec{\Omega}$ vektörel büyüklüğü; "Açısal Akı Yoğunluğu" olarak tanımlanırsa; E ve $\vec{\Omega}$ 'li nötronların $d\vec{S}$ yüzey elemanının dışına birim zamanda kaçma miktarı:

$$\vec{J}(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \cdot d\vec{S} = v n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \vec{\Omega} \cdot d\vec{S} \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Böylece, S yüzeyi için giriş ve çıkış yapan nötronlardan geriye net olarak kalan miktar, kaçakların katkısı şeklinde;

$$\text{KAZANÇ2} - \text{KAYIP4} = \int_S v \vec{\Omega} n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \cdot d\vec{S} \quad (2.7)$$

olur. Gauss's Teoremine göre bu ifade $\left(\int_S \vec{A}(\vec{r}) \cdot d\vec{S} = \int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{A}(\vec{r}) dV \right)$

şeklinde hacim integrali olarak yazılırsa;

$$\begin{aligned} \left[\int_S v \vec{\Omega} n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \cdot d\vec{S} \right] dE d\vec{\Omega} &= \left[\int_V \vec{\nabla} \cdot v \vec{\Omega} n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) dV \right] dE d\vec{\Omega} \\ &= \left[\int_V v \vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla} n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) dV \right] dE d\vec{\Omega} \end{aligned} \quad (2.8)$$

3 - E civarında dE aralığına ve $\vec{\Omega}$ civarında $d\vec{\Omega}$ aralığına E'enerjili ve $\vec{\Omega}$ 'yönlü nötronların saçılması nedeniyle ortaya çıkan kazanç.

E', $\vec{\Omega}'$ durumundan E, $\vec{\Omega}$ 'ye saçılma ihtimali çift katlı diferansiyel saçılma etki kesiti terimiyle verilmektedir [43].

$$\left[\int_V v' \sum_S (E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) n(\vec{r}, E', \vec{\Omega}', t) dV \right] dE d\vec{\Omega} \quad (2.9)$$

Böylece, herhangi bir E', $\vec{\Omega}'$ 'den E, $\vec{\Omega}$ 'ye olabilecek katkılar dikkate alınmak durumundadır. Bu ifade, bütün, E' ve $\vec{\Omega}'$ 'ler için integre edilirse saçılma yoluyla elde edilecek toplam kazanç şu ifade ile verilebilir:

$$\text{KAZANÇ3} = \left[\int_V \int_{4\pi} \int_0^\infty v' \sum_S (E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) n(\vec{r}, E', \vec{\Omega}', t) \right] dE' d\vec{\Omega}' dV \quad (2.10)$$

Bu terim ile diğer enerji ve doğrultulardan ($dE d\vec{\Omega}$) aralığına olabilecek saçılmaların dikkate alınması sebebiyle, içsaçılma terimi olarak ta tanımlanmaktadır.

5 - V hacminde, olabilecek nötron etkileşimlerinden (özellikle çarpışmalardan) dogacak nötron kaybı:

Bir \vec{r} noktasında , etkileşime maruz nötronların birim zamandaki kayıp miktarı

$$f(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = v \sum_t (\vec{r}, E) n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \quad (2.11)$$

ifadesiyle belirlenebilir. V hacmi üzerinde birim zamandaki bu çarpışma miktarının integrali:

$$KAYIP5 = \left[\int_V v \sum_t (\vec{r}, E) n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) dV \right] dE d\vec{\Omega} \quad (2.12)$$

olur.

Bu terimlerin hepsi nötron balansını oluşturacak şekilde;

$$\left[V \text{ hacmindeki nötron sayısının birim zamandaki değişim miktarı} \right]$$

$$= KAZANÇ1 + KAZANÇ2 + KAZANÇ3 - KAYIP4 - KAYIP5 \quad (2.13)$$

özdeşliği olarak yazılabilir. Matematiksel karşılıkları yazılarak,

$$\int_V \left[\frac{\partial}{\partial t} n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) dV dE d\vec{\Omega} + v \vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla} n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) + v \sum_t (\vec{r}, E) n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) - \int_{4\pi} \int_0^\infty v' \sum_S (E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \right]$$

$$n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) dE' d\vec{\Omega}' - S(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \int dV dE d\vec{\Omega} = 0 \quad (2.14)$$

genel bağıntısına ulaşılır.

$$\int_V f(r) dV = 0 \Rightarrow f(r) = 0$$

şeklindeki bir eşitlikte, $dV = 0$ olacağından , yukarıdaki genel ifade ;

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) + v \vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla} n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) + v \sum_t(\vec{r}, E) n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \\ & = \int_{4\pi} \int_0^\infty v' \sum_S(E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) n(\vec{r}, E', \vec{\Omega}', t) + S(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) dE' d\vec{\Omega}' \end{aligned} \quad (2.15)$$

olarak yazılabilir. Bu denklem 'Nötron Transport Denklemi' olarak bilinir [43-45].

Açısal nötron akısının

$$\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = v n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \quad (2.16)$$

şeklindeki eşitliğinden hareketle $n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = \frac{1}{v} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$ yazılıp (2.15) bağıntısında yerine konur ve gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = S(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) + \int_{4\pi} \int_0^{\infty} \sum_S(E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega})$$

$$\phi(\vec{r}', E', \vec{\Omega}', t) dE' d\vec{\Omega}' - \sum_t(\vec{r}, E) \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) - \Omega \nabla \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \quad (2.17)$$

şeklindeki ' Boltzmann Transport Denklemi ' olarak ta bilinen, nötron transport denkleminin nötron akısına göre düzenlenmiş şekli elde edilir.

Fisyon nötronlarının etkisini açıklamak üzere , kaynak terimine nükleer fisyonu hesaba katan bir bileşen ilave edilerek, (2.17) denklemi genelleştirilebilir. E' enerjili ve $\vec{\Omega}'$ yönlü nötronların birim zamanda, birim hacim için meydana getirdikleri fisyon sayısı

$$\sum_f(E') \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}', t)$$

dır. E' enerjili bir nötron tarafından neden olunan fisyonla üretilen , fisyon nötronlarının ortalama sayısı $\nu(E')$ ise, \vec{r} konumunda birim zamanda birim hacimde üretilen fisyon nötronlarının toplam miktarı;

$$\int_{4\pi} \int_0^{\infty} \nu(E') \sum_f(E') \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}', t) dE' d\vec{\Omega}' \quad (2.18)$$

olur. Bu fisyon nötronları, $\chi(E)$ fisyon spektrumu tarafından verilen bir enerji dağılımına sahip olacaklardır. Fisyon nötronlarının izotropik olarak yayıldığı farzedilerek toplam oran;

$$S(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = \frac{\chi(E)}{4\pi} \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \int_0^{\infty} dE' \nu(E') \sum_f(E') \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}', t) \quad (2.19)$$

olarak elde edilir. (2.17) numaralı denklemin sağ tarafında yer alan kaçak ve absorpsiyon terimleri, üretim terimlerine (filyon ve saçılma) eşit olacak şekilde geometri ve malzeme yapısı düzenlenirse, denklemin sağ tarafı ve dolayısıyla nötron miktarının zamana göre değişimi sıfırlanmış olur. Bu durumda reaktörün kritik olduğundan ve nötron miktarının zamanla sabit kalacağından bahsedilebilir.

Verilen bir malzeme yapısı için (2.17) denkleminin sağındaki bütün terimler belirlenirken $\vec{\Omega} \cdot \vec{v} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$ terimi belirlenmemiştir. Bu, kritikliğin sadece $\vec{\Omega} \cdot \vec{v} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$ teriminin özel bir değeri için olabileceğini ifade etmektedir ve bu terim, sistemden nötron kaçaklarını ve sistemin geometriye olan bağlılığını gösterir. Bu şekilde kritik geometri tanımlaması yapılabilmektedir.

Verilen bir geometri için kritiklik, nötron absorblayıcıların sokulup çıkarılması vasıtasıyla \sum_{t_f} değiştirilerek elde edilir. Kritik olmayan sistemlerin statik hesaplamaları, nötron dağılımının zamana bağlılığı dikkate alınmaksızın, denklem kapsamlı olsun düşüncesiyle (2.19) denklemindeki $\nu(E')$ terimi k_{eff} faktörüne bölünerek yapılmaktadır.

$$S(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = \frac{1}{k_{eff}} \frac{\chi(E)}{4\pi} \int_{4\pi} \int_0^\infty \nu(E') \sum_f \phi(\vec{r}', E', \vec{\Omega}', t) dE' d\vec{\Omega}' \quad (2.20)$$

Sistemde filyon nötron kaynağının dışında $Q(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) dE d\vec{\Omega}$ gibi fazladan bir nötron kaynağı da mevcutsa;

$$S(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = \frac{1}{k_{eff}} \frac{\chi(E)}{4\pi} \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \int_0^\infty dE' \nu(E') \sum_f \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}', t) + Q(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \quad (2.21)$$

şeklinde ilave edilmek durumundadır.

2. 2- S_N Teorisinin Matematiksel İfadesi

Boltzmann Transport Denklemi 'nin yaklaşık bir çözümüne imkan veren S_N metodunda nötron akısının açığa bağlılığı; nötron hareket yönü incelenirken, uzay açısı N sektöre bölünerek, ve her sektör içinde nötron akısının açığa bağlı olmadığı kabul edilerek, ifade edilir.

Nötron akısının enerjiye bağlılığı, enerji bölgesini sonlu sayıda gruplara (IG) bölüp her grup içinde akı ve tesir kesitlerinin sabit olduğu gözönüne alınarak belirtilir.

Akının uzay koordinatlarına bağlılığı da, tetkik edilen bölge (IM) sayısınınca sonlu elemanlara bölünerek gözönüne alınır.

Anizotropik saçılma tesir kesitlerinin açığa bağlılığını ifade etmek için ise, küresel Legendre polinomlarından faydalanılır.

$$\sum_S (\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) = \sum_{L=1}^{L=L_{\max}} \frac{2L+1}{4\pi} \sum_{S,L} (\vec{r}, E' \rightarrow E) P_L(\vec{\Omega}', \vec{\Omega}) \quad (2.22)$$

Küresel Legendre polinomları ortagonal olduklarından, saçılma tesir kesitlerinin $\sum_{S,L}$ componentleri kolayca aşağıda gösterildiği şekilde elde edilebilir.

$$\sum_{S,L} (\vec{r}, E' \rightarrow E) = \int \sum_S (\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) P_L(\vec{\Omega}', \vec{\Omega}) d(\vec{\Omega}', \vec{\Omega}) \quad (2.23)$$

$\sum_S (\vec{r}, E \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega})$ degerleri tesir kesitlerinin tablolarından öğrenilebilir. Uzay açısını belirleyen vektörünün bileşkesinden biri olan θ 'nin kosinüsü,

$$\mu = \text{Cos}\theta \quad (2.24)$$

şeklinde tarif edilerek ve küresel Legendre polinomlarının top-

lama teoreminden faydalanılarak,

$$P_L(\vec{\Omega}', \vec{\Omega}) = P_L(\mu') P_L(\mu) + 2 \sum_{m=1}^L \frac{(L-m)!}{(L+m)!} P_L^m(\mu) P_L^m(\mu') \cos(\psi' - \psi) \quad (2.25)$$

şeklinde yazılabilir. [43-54]

Nötron akısının ψ açısına bağlı olmadığı, bir boyutlu düzlem ve küresel geometrilerde (2.17) bağıntısında belirtilen $\vec{\Omega}'$ integ-rasyonu, ψ' komponenti için 0 ile 2π arasında uygulandığı tak-dirde (2.25) ifadesinde $\cos\psi$ çarpımını ihtiva eden terimler;

$$\int_0^{2\pi} \cos\psi' d\psi' = 0$$

oldugundan eşitlikten çıkarlar. Böylece (2.22) ifadesi bir bo-yutlu düzlem ve küresel geometriler için;

$$\sum_S (x, E' \rightarrow E, \mu' \rightarrow \mu) = \sum_{L=1}^{L_{\max}} \frac{2L+1}{2} \sum_{S,L} (x, E' \rightarrow E) P_L(\mu') P_L(\mu) \quad (2.26)$$

şeklini alır.

Hızlı reaktör spektrumu, bu çalışmada gözönüne alınan blan-ket için, çıkış noktasını teşkil ettiğinden nötronların termik bölgedeki maruz kaldıkları ve termik reaktörler için büyük ehem-miyeti olan alt enerji gruplarından üst enerji gruplarına sa-cılma olayını (upscatter) göz önüne almaya gerek yoktur. Bu tak-dirde Boltzmann Transport Denklemi, küresel geometri için;

$$\begin{aligned}
& \mu \frac{\partial}{\partial x} \phi(x, E, \mu) + \frac{(1-\mu^2)}{x} \frac{\partial}{\partial \mu} \phi(x, E, \mu) + \sum_t (x, E) \phi(x, E, \mu) = \\
& Q(x, E, \mu) + \frac{1}{k_{eff}} \chi(E) \int_{E'=E}^{\infty} \nu(x, E) \sum_f (x, E) \int_{\mu'=-1}^1 \phi(x, E', \mu') d\mu' dE' + \\
& \sum_{L=1}^{L_{max}} \frac{2L+1}{2} P_L(\mu) \int_{E'=E}^{\infty} \sum_{S,L} (x, E' \rightarrow E) \int_{\mu'=-1}^1 P_L(\mu') \phi(x, E', \mu') d\mu' dE' \quad (2.27)
\end{aligned}$$

(2.27) ifadesini S_N metoduyla çözerken daha önce de belirtildiği gibi, açıya bağlılık $\mu=1$ ($\theta=0$) ile $\mu=-1$ ($\theta=\pi$) arasındaki bölge N sektöre bölerek incelenebilir. N , IG (Enerji Grup Sayısı) ve IM (Geometrik İnteval Sayısı) değerleri büyüdükçe nümerik çözümün sıhhati artar. Tesir kesitlerinin anizotropik karakteri de P_L açılımında l derecesi yükseldiçe daha sıhhatli yansıtılır. (2.27) ifadesinden S_N metoduna geçiş şöyle ifade edilebilir. (2.27) ifadesinin iki tarafı,

$$\int_{r \in \Delta r} \int_{E \in \Delta E} \int_{\mu \in \Delta \mu} dx dE d\mu$$

integral operatörüyle çarpılırsa:

$$\int_x \int_E \int_\mu \mu \frac{\partial}{\partial x} \phi(x, E, \mu) dx dE d\mu + \int_x \int_E \int_\mu \frac{(1-\mu^2)}{x} \frac{\partial}{\partial \mu} \phi(x, E, \mu) dx dE d\mu +$$

$$\begin{aligned}
\int \int \int \sum_t (x, E) \phi(x, E, \mu) dx dE d\mu &= \int \int \int \left\{ \frac{1}{k_{\text{eff}}} \chi(E) \int_E^{\infty} \nu(x, E) \sum_f (x, E) \right. \\
&\left. \int_{\mu=-1}^1 \phi(x, E', \mu') d\mu' dE' dx dE d\mu \right\} + \int \int \int Q(x, E, \mu) dx dE d\mu + \\
\int \int \int \left\{ \sum_{l=1}^{L_{\text{max}}} \frac{2l+1}{2} P_l(\mu) \int_{E'=E}^{\infty} \sum_{S, l} (x, E' \rightarrow E) \int_{\mu'=-1}^1 P_l(\mu') \phi(x, E', \mu') \right. \\
&\left. d\mu' dE' \right\} dx dE d\mu \quad (2.28)
\end{aligned}$$

elde edilir.

Ortalama deger teoremine göre $y_1 - y_2 = \Delta y$ integral aralığı için

$$\int y \cdot f(y) \cdot dy \cong \bar{y} \cdot f(\bar{y}) \cdot \Delta y \quad (2.29)$$

yazılabilir. Burada $y_1 < \bar{y} < y_2$ dir. \bar{y} gerçek ortalama degere ne kadar yakınsa (2.29) bağıntısı o kadar iyi netice verir.

$E \in \Delta E$ ve $x \in \Delta x$ aralıkları için ortalama deger teoreminden faydalanırken; tesir kesitlerinin enerjiye göre değışim ile birlikte ortamdaki geometrik yapıyı ve malzeme dağılımını göz-önüne alınarak, ΔE ve Δx bölgelerinin sınırlarının tesbitinde uygun bir karara varılması gerekir.

Nümerik açı (μ) 'nün integrasyonunun yapılması için çeşitli yollara başvurulabilir. S_N metodunun ilk geliştirildiği zamanlarda $\mu = -1$ ile $\mu = 1$ arasındaki bölge N eşit aralığa bölünüp nötron akışının bu aralıklarda sabit ve lineer olduğu kabul edilmiştir.

Açı entegrasyonu, Legendre - Gauss Kuadratür 'leri yardımıyla

$\mu=-1$ ile $\mu=1$ arasındaki bölge 8 sektöre bölünerek elde edilmiştir.

Böylece küresel geometride s yaklaşımıyla nötron akısının açığa bağlılığının gayet yüksek bir hassasiyetle elde edildiği kolayca anlaşılır.

Ortalama değer teoremi çevresinde Δx , ΔE ve $\Delta \mu$ aralıklarında nötron akısı sabit kabul edildiği takdirde (2.28) bağıntısı:

$$\mu \frac{\partial}{\partial x} \phi(x_j, E_g, \mu_i) \Delta x_j \Delta E_g \Delta W_i + \frac{(1-\mu_i^2)}{x_j} \frac{\partial}{\partial \mu} \phi(x_j, E_g, \mu_i)$$

$$\Delta x_j \Delta E_g \Delta W_i + \sum_t (x_j, E_g) \phi(x_j, E_g, \mu_i) \Delta x_j \Delta E_g \Delta W_i = Q(x_j, E_g, \mu_i)$$

$$\Delta x_j \Delta E_g \Delta W_i + \left\{ \frac{1}{k_{\text{eff}}} \chi(E_g) \sum_{g' \rightarrow g}^{IG} \nu(x_j, E_g) \sum (x_j, E_g \rightarrow E_{g'}, \mu_i') \right.$$

$$\left. \sum_{n=1}^N \phi(x_j', E_{g'}, \mu_i') \Delta E_g \Delta W_n \right\} \Delta x_j \Delta E_g \Delta W_i + \sum_{l=1}^{L_{\text{max}}} \frac{2L+1}{2} P_l(\mu_i)$$

$$\Delta x_j \Delta E_g \Delta W_i \sum_{g' \rightarrow g}^{IG} \sum_{s,l} (x_j, E_g \rightarrow E_g) \sum_{n=1}^N P_l(\mu_n') \phi(x_j', E_{g'}, \mu_n') \Delta E_{g'} \Delta W_n'$$

(2.30)

şeklinde ifade edilebilir.

Burada W_i ağırlıkları Legendre polinomları yardımıyla;

$$w_i = \frac{2}{(1-\mu^2) P_N' (\mu_i)^2} \quad (2.31)$$

şeklinde tarif edilmiştir.

2.3- Nümerik Hesap Uygulaması

Bu çalışmada göz önüne alınan değişik hybrid blanket geometrileri için, Boltzmann Transport Denkleminin nümerik çözümleri silindirik geometrileride, S_8 - P_3 yaklaşımı esas alınmak suretiyle, ANISN Transport Kodu [46] kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Nümerik hesaplamalarda kullanılan data ise 42 gruplu (30 nötron + 12 foton) CLAW-IV data paketidir [47]. Bu data aracılığı ile, nötron transport etki kesitleri, 0.025 eV ile 17.1 Mev 'lik enerji aralığında 30 grup olarak hesaplamalara sokulmuştur. Aynı data paketi, hybrid blanket ortamında, ortaya çıkacak, nötron etkileşimi miktarının hesabında kullanılan, reaksiyon etki kesitlerini de içerisinde bulundurmaktadır.

Nümerik hesaplamalar sonucunda elde edilen değerlerin toplandığı tablo ve şekiller ilgili bölüm sonlarında topluca takdim edilmiştir.

3. BÖLÜM

ÇALIŞMADA KULLANILAN BLANKET YAPISI

Yapılmış olan çalışmalarla bir mukayese yapabilmek amacıyla değişik zamanlarda uluslararası bilim topluluğuna sunulmuş ve değerlendirilmiş deneysel bir hybrid blanket geometrisi çalışma boyunca esas olarak alınmıştır [32,38-40]. Nötronik parametrelerin değerlendirilmesine yönelik nümerik hesaplamalar, bu geometriden hareket edilerek gerçekleştirilmiştir. Şekil-3.1 de çalışma sırasında esas alınan blanket geometrileri şematik olarak verilmiştir.

Şekil-3.1 de görülen blanket geometrileri; başlangıç hesaplarında esas itibariyle dört ana bölgeden oluşmaktadır ve bu durum Şekil-3.1.(a) 'da da görülmektedir.

1. Bölge: D-D veya D-T füzyonunun oluşturulduğu plazmayı çevreleyen silindirik ilk çidar (İÇ) (first wall). İlk çidarın malzeme yapısı ise içersinde Silisyum, Krom, Mangan, Nikel, Molibden ve Demir bulunan 2 cm kalınlığında SS316 paslanmaz çeligidir.

2.Bölge: ThO_2 kullanılarak yapılan yakıt çubuklarından oluşan 10 sıralık yakıt bölgesi (YB) (fuel zone). Yakıt çubukları gaz soğutmalı bir blanket yapısı oluşturmak üzere toplam eleman hacminde % 45.25 'lik bir hava boşluğuna izin verecek şekilde, Alüminyum bir kılıf ($D_d= 12$ mm, $D_i= 10$ mm) içerisinde yer alan

10 mm çapındaki yakıt elemanlarından meydana gelir. Yakıt çubukları silindirik geometrinin eksenine dik bir düzlemde altıgen bir yapı oluşturacak şekilde dizilmişlerdir. Bu durum Şekil-3.2 'de görülmektedir.

3. Bölge: Li_2O bileşiminde yer alan ${}^6\text{Li}$ 'nin yavaş nötronlarla, ${}^7\text{Li}$ 'nin, hızlı nötronlarla girdiği etkileşim sonunda Trityumun elde edildiği, 20 cm kalınlıklı Trityum Üretim Bölgesi (TÜB) (Tritium Breeding Zone).

4. Bölge: Nötronların geri yansıtıldığı 30 cm kalınlıkta ve grafitten oluşan reflektör katmanı.

Nümerik hesap sonuçlarının değerlendirilmesinde göz önüne alınacak ve bir sonraki bölümde verilecek olan performans kriterlerini parametrik bir inceleme açısından karşılaştırabilmek amacıyla, Şekil-3.1 (a) da verilen geometri üzerinde aşağıda belirtilen geometrik değişiklikler yapılmıştır:

Önce, trityum üretim bölgesini (TÜB) geçen enerjik nötronların, grafit ortamda modere edilerek Li_2O daki ${}^6\text{Li}$ ile girecekleri trityum üretim reaksiyon miktarını arttırmak amacıyla [23], katman kalınlıklarının toplamı Şekil-3.1 (a) 'daki ilgili katman kalınlıklarına eşit olmak üzere, TÜB ve reflektör bölgeleri ikiye katmana bölünerek, yeni bir geometri elde edilmiştir (Şekil-3.1 (b)). Aynı amaçla, TÜB ve Reflektör, her birisine ait katman hacimlerinin toplamı, Şekil-3.1 (a) 'daki katman hacimlerine eşit olmak üzere, ikiye katmana bölünerek, Şekil-3.1 (c) 'deki geometri elde edilmiştir. Malzeme yapısını değiştirmeden, yine, TÜB ve Reflektör, benzer anlayışla üç kısma bölünerek, Şekil-3.1 (d) ve (e) 'deki geometrilere geçilmiştir.

Şekil-3.1 (f) de görülen geometri ise, Şekil-3.1 (e) 'deki geometrik yapıya, ilk cidar ve yakıt katmanları arasında bulunmak üzere, bir nötron çoğaltıcı (NC) katmanının konulmasıyla elde edilmiştir.

Açık olarak, Şekil-3.1 de belirtilen şematik gösterimlerin, herbirine farklı malzeme yapısına sahip geometriler karşılık gelecektir. Nümerik hesaplamalarda, ilk beş hesap, malzeme yapısının sabit tutularak, katman kalınlıklarının belirtilen şekilde

yakıt olarak ^{232}Th yerine Tabii Uranyum (% 0.7 ^{235}U ve % 99.3 ^{238}U) 'un alındığı blanketlere ait hesaplamalardır. Bu ilk on hesapta kullanılan blanket geometri ve malzeme yapısı Tablo-3.1 de gösterilmiştir.

Bu ilk on hesabın sonunda, geometrinin optimizasyonuna yönelik olarak yapılan değerlendirme ile, nümerik hesaplamaların devamında kullanılacak geometrinin seçimi için TÜB ve Reflektör katmanlarının hacimce üç kısma bölündüğü geometrimin uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Bu sonucu belirleyen performans değerleri, bir sonraki bölümde tablo halinde verilmiştir.

Daha sonraki hesaplamalarda, belirlenen bu optimal geometri içerisinde sadece malzeme yönünden değişikliğe gidilmiştir. Böylece, yakıt bölgesinde kullanılan yakıtlar;

- ThO_2 , UO_2 , AmO_2 ve CmO_2

şeklinde değiştirilirken; Tritiyum üretim bölgesinde,

- Li_2O , Saf Li ;

Reflektör bölgesinde;

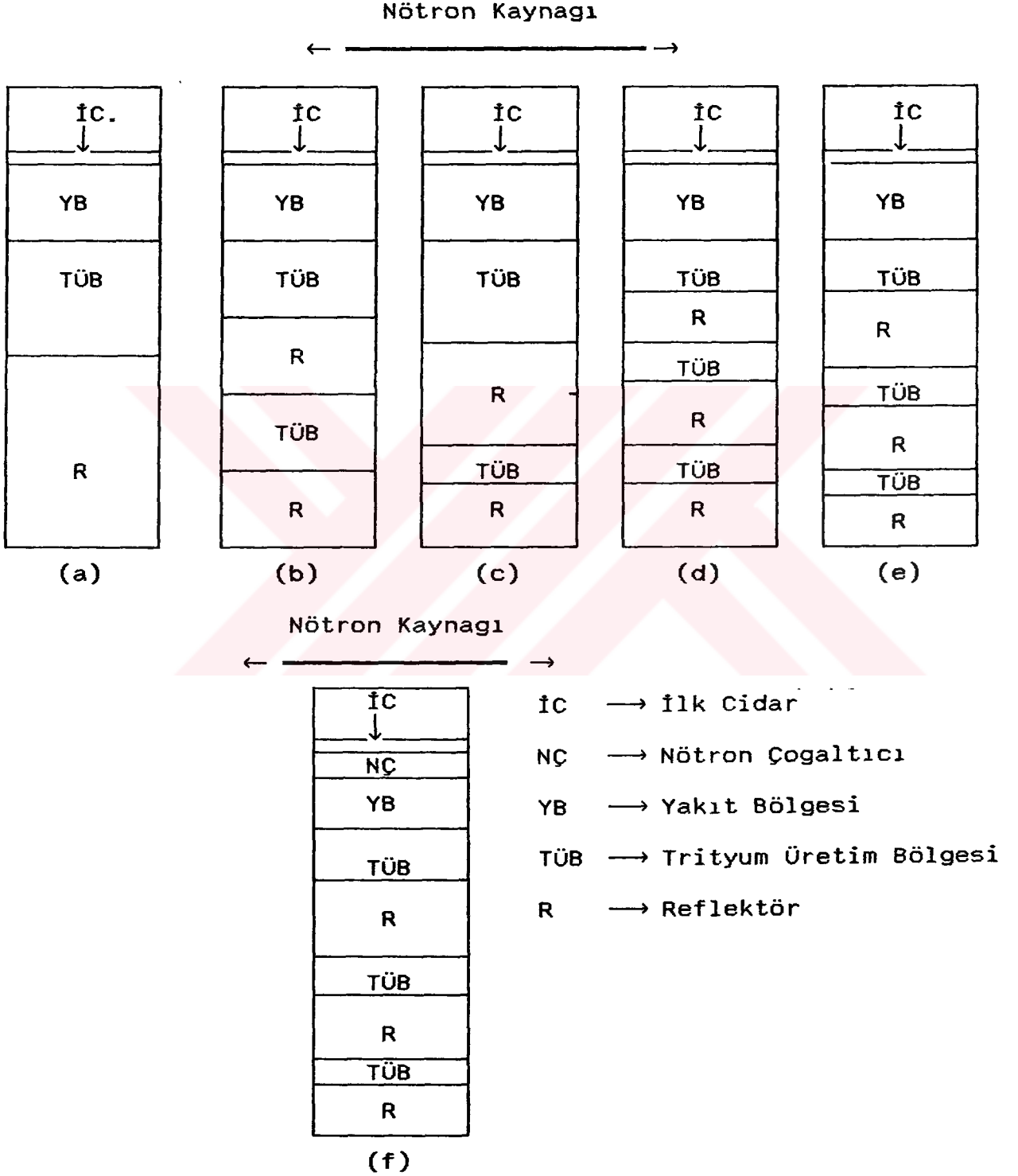
- C , Be ve

Nötron çoğaltıcı katman içerisinde,

- Be ve Pb

malzemeleri kullanılarak parametrik çalışmaya ait nümerik hesaplamalar tamamlanmıştır. Sıralanan yakıtlar arasında yer alan AmO_2 , ^{241}Am ve ^{243}Am izotoplarını içinde bulunduracak ve izotopik bileşimini LWR den elde edildiği artık yakıt bileşimine eşdeğer olacak şekilde nümerik hesaplamalara sokulmuştur [33]. Değişik bölgelerde kullanılan malzeme yapısı ve çekirdek yoğunlukları Tablo-3.3 de verilmiştir. Ayrıca bu hesaplamalara

ait geometri düzenlemesi ilk hesaplamalar hariç fakat onların devamı olmak üzere Tablo-3.3 'de detaylı olarak verilmiştir.



Şekil- 3.1 Hybrid Blanket Geometrileri

Tablo-3.1 Geometrik Olarak Optimize Edilecek Hybrid Blanketlerin
Malzeme ve Geometrik Yapıları ile Geometri Numaraları

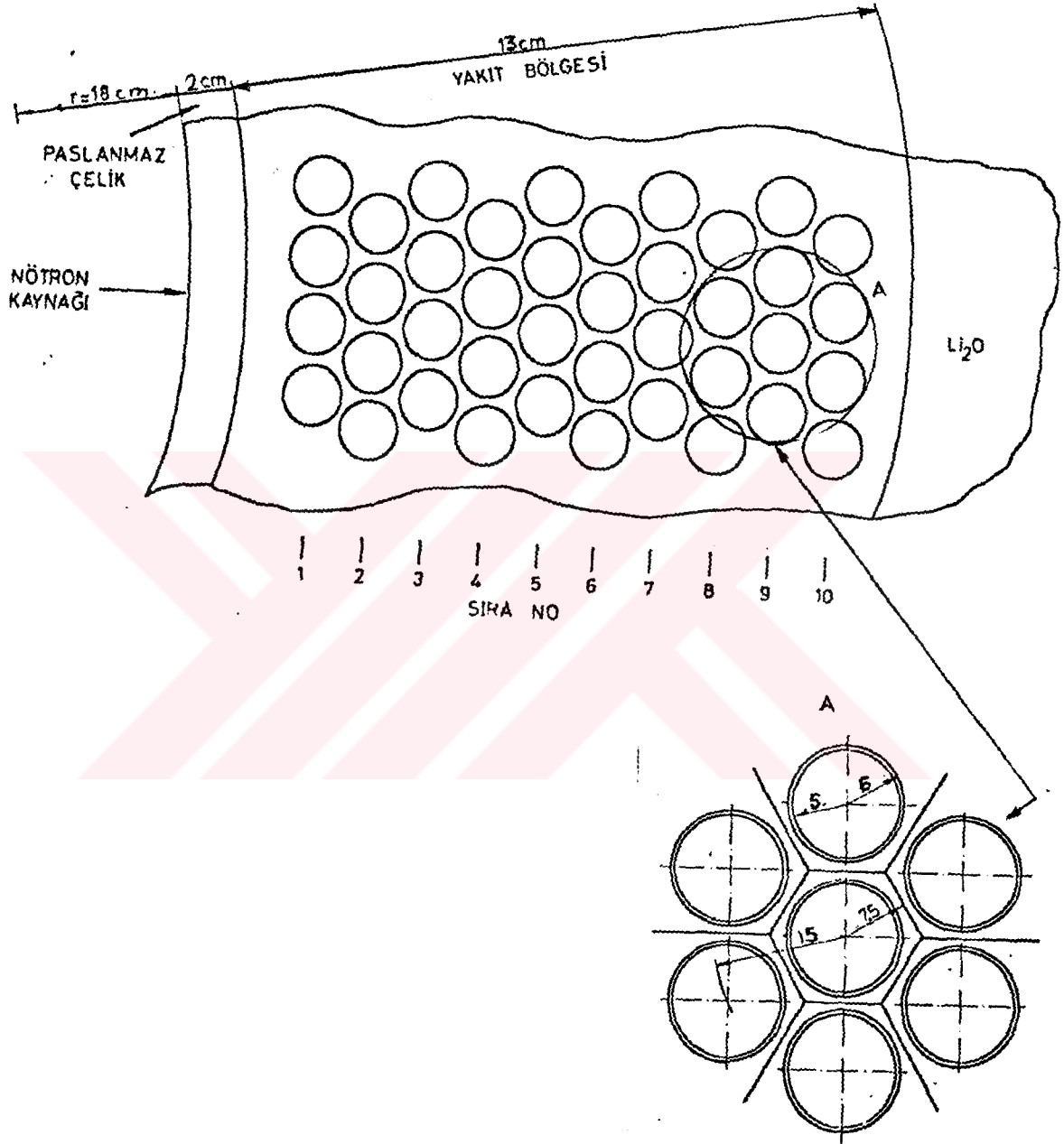
Kullanılan Geometriler	Katman Durumu	Geometri
$\text{ThO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	Tek Parçalı	(1)
$\text{ThO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	Katman Kalınlığına Göre İki Parçalı	(2)
$\text{ThO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	Hacime Göre İki Parçalı	(3)
$\text{ThO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	Katman Kalınlığına Göre Üç Parçalı	(4)
$\text{ThO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	Hacime Göre Üç Parçalı	(5)
$\text{UO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	Tek Parçalı	(6)
$\text{UO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	Katman Kalınlığına Göre İki Parçalı.	(7)
$\text{UO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	Hacime Göre İki Parçalı	(8)
$\text{UO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	Katman Kalınlığına Göre Üç Parçalı.	(9)
$\text{UO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	Hacime Göre Üç Parçalı	(10)

Tablo-3.2 Çalışmada Kullanılan Hybrid Blankete Ait malzeme Kompozisyonu ve Çekirdek Yoğunlukları.

Bölge	Cidar Kalınlığı (cm)	Malzeme	Çekirdek	Çekirdek Yoğunluğu ($* 10^{30}/m^3$)
1 İlk Cidar	2	Tipi 316 Paslanmaz Çelik	Silisyum Krom Manganez Demir Nikel Molibden	1.7108-03 1.6627-02 1.7548-03 5.7651-02 8.1863-03 1.0022-03
2 Nötron Cogaltıcı	3.59 2.58 (CmO ₂ ile)	Berilyum Kurşun	Berilyum Kurşun	1.21634-01 3.29944-02
3 Yakıt	13 11.7 (NÇ ile)	ThO ₂	²³² Th Oksijen Aluminyum	7.88147-03 1.57630-02 8.67910-03
		Tabii Uranyum (%0.7 ²³⁵ U+ %99.3 ²³⁸ U)	²³⁵ U ²³⁸ U Oksijen Aluminyum	5.51703-05 7.82630-03 1.57630-02 8.67910-03
		AmO ₂	²⁴¹ Am ²⁴³ Am Oksijen Aluminyum	2.51498-03 5.36649-03 1.57630-02 8.67910-03
	3.9 2.6 (NÇ ile)	CmO ₂	²⁴⁴ Cm Oksijen Aluminyum	7.88147-03 1.57630-02 8.67910-03
4 Tritiyum Üretim Bölgesi	8 + 5 + 4 7.57+4.89+3.94 (NÇ ile)	Li ₂ O	⁶ Li ⁷ Li Oksijen	4.63794-03 5.70380-02 3.08374-02
	10.21+5.45+4.22 (CmO ₂ ile)	Saf Li	⁶ Li ⁷ Li	3.45947-03 4.25441-02
5 Reflektör	14 + 10 + 9 13.54+9.81+8.89 (NÇ ile)	Karbon Berilyum	Karbon Berilyum	1.12840-01 1.21634-01
	15.96+10.68+9.4 (CmO ₂ ile)			
	13.75+9.91+8.94 (Cm ₂ O ve NÇ ile)			

Tablo-3.3. Optimize Edilmiş Blanket Geometrisi İçin Değiştirilen Blanket Malzeme Yapıları

Blanket Malzeme Yapısı	Blanket No	Blanket Malzeme Yapısı	Blanket No
$\text{ThO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{Be}$	11	$\text{AmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{Be}$	34
$\text{ThO}_2 + \text{Saf Li} + \text{C}$	12	$\text{AmO}_2 + \text{Saf Li} + \text{C}$	35
$\text{ThO}_2 + \text{Saf Li} + \text{Be}$	13	$\text{AmO}_2 + \text{Saf Li} + \text{Be}$	36
$\text{Be} + \text{ThO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	14	$\text{Be} + \text{AmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	37
$\text{Be} + \text{ThO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{Be}$	15	$\text{Be} + \text{AmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{Be}$	38
$\text{Be} + \text{ThO}_2 + \text{Saf Li} + \text{C}$	16	$\text{Be} + \text{AmO}_2 + \text{Saf Li} + \text{C}$	39
$\text{Be} + \text{ThO}_2 + \text{Saf Li} + \text{Be}$	17	$\text{Be} + \text{AmO}_2 + \text{Saf Li} + \text{Be}$	40
$\text{Pb} + \text{ThO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	18	$\text{Pb} + \text{AmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	41
$\text{Pb} + \text{ThO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{Be}$	19	$\text{Pb} + \text{AmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{Be}$	42
$\text{Pb} + \text{ThO}_2 + \text{Saf Li} + \text{C}$	20	$\text{Pb} + \text{AmO}_2 + \text{Saf Li} + \text{C}$	43
$\text{Pb} + \text{ThO}_2 + \text{Saf Li} + \text{Be}$	21	$\text{Pb} + \text{AmO}_2 + \text{Saf Li} + \text{Be}$	44
$\text{UO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{Be}$	22	$\text{CmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	45
$\text{UO}_2 + \text{Saf Li} + \text{C}$	23	$\text{CmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{Be}$	46
$\text{UO}_2 + \text{Saf Li} + \text{Be}$	24	$\text{CmO}_2 + \text{Saf Li} + \text{C}$	47
$\text{Be} + \text{UO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	25	$\text{CmO}_2 + \text{Saf Li} + \text{Be}$	48
$\text{Be} + \text{UO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{Be}$	26	$\text{Be} + \text{CmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	49
$\text{Be} + \text{UO}_2 + \text{Saf Li} + \text{C}$	27	$\text{Be} + \text{CmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{Be}$	50
$\text{Be} + \text{UO}_2 + \text{Saf Li} + \text{Be}$	28	$\text{Be} + \text{CmO}_2 + \text{Saf Li} + \text{C}$	51
$\text{Pb} + \text{UO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	29	$\text{Be} + \text{CmO}_2 + \text{Saf Li} + \text{Be}$	52
$\text{Pb} + \text{UO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{Be}$	30	$\text{Pb} + \text{CmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	53
$\text{Pb} + \text{UO}_2 + \text{Saf Li} + \text{C}$	31	$\text{Pb} + \text{CmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{Be}$	54
$\text{Pb} + \text{UO}_2 + \text{Saf Li} + \text{Be}$	32	$\text{Pb} + \text{CmO}_2 + \text{Saf Li} + \text{C}$	55
$\text{AmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	33	$\text{Pb} + \text{CmO}_2 + \text{Saf Li} + \text{Be}$	56



Şekil-3.2 : Radyal Doğrultuda 10 Sıra Yakıt Bölgesini Oluşturan Yakıt Çubuklarının Altıgen Doğrultuda Düzenlenişi

4. BÖLÜM

NÜMERİK HESAPLAMALAR VE SONUÇLARI

Bir önceki bölümde geometrik ve malzeme yapısı tasarlanan ve parametrik incelemeye konu olacak blanket sayısı, Tablo-3.1 ve Tablo-3.3 'ten anlaşılacağı üzere 48 tanedir. Bu blanketlere ait nümerik hesaplamalar, 2.3 numaralı alt bölümde verilen esaslar içersinde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar aşağıdaki alt bölümlerde değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerden de önce, değerlendirmeye esas olan nötronik performans kriterleri hemen aşağıda takdim edilmiştir.

4.1 - Nötronik Performans Kriterleri

Çalışma boyunca, nümerik hesaplamalar, uygulandıkları blanketlerin nötronik performansını ortaya çıkarmak üzere gerçekleştirilmişlerdir. Nötronik performansı belirleyen ve miktarları nümerik hesaplamalar sonucunda elde edilen ve temel reaksiyonların göstergesi olan kriterler aşağıda sıralanmıştır:

1 - ${}^6\text{Li}$ 'nin, değişik enerjili nötronlarla (esas olarak yavaş nötronlarla) girdiği etkileşimlerden elde edilen trityum miktarı (T6),

2 - ${}^7\text{Li}$ 'nin, değişik enerjili nötronlarla (esas olarak hızlı nötronlarla) girdiği etkileşimlerden elde edilen trityum miktarı (T7),

3 - Üretilen toplam trityum miktarı (T6+T7) (Total Fusile Breeding),

4 - Özellikle Şekil-3.1(f) de yer alan nötron çoğaltıcı katman ve kullanılan yakıtlar için söz konusu olan, nötron ekonomisi açısından nötron popülasyonuna katkı olarak nitelendirilebilecek (n,2n) reaksiyon miktarı,

5 - Fertil çekirdeklerden, fissile çekirdeklere dönüşümü karakterize eden (n,γ) reaksiyon miktarı (Fissile Breeding),

6 - Yakıt bölgesinde değişik enerjili nötronlarla ortaya çıkan ve gerek nötron popülasyonunu gerekse blanketin enerji çıktısını etkileyen, nükleer yakıtlara ait (n,f) bölünme reaksiyon miktarı (Fission Density),

7 - Hybrid blanketlerin temel fonksiyonu olan, trityum ve fissile yakıt üretim miktarının toplamı (Fusile+Fissile) (Total Breeding),

8 - Blanketin enerji çıktısının değerlendirilebilmesi için tanımlanan ve (1.17) numaralı eşitlikte hesap edilen, M Blanket enerji çoğaltım katsayısı,

9 - Hybrid blanketin kritik altı çalıştığının göstergesi olmak üzere aşağıdaki eşitliklerle hesaplanan, k_{eff}^* ve k_{eff}^{**} nötron çoğalma katsayıları. k_{eff}^* (n,2n) reaksiyonları katılmadan, k_{eff}^{**} ise katılmış olarak yapılan hesaplamayı ifade etmektedir.

(n,2n) reaksiyonları katılmaksızın

$$k_{eff}^* = \frac{\int \int \nu \sum_f \phi \, dV \, dE}{\int \int \sum_a \phi \, dV \, dE + \int \int J \, dS \, dE} \quad (4.1)$$

ve $(n, 2n)$ reaksiyonları katılarak;

$$k_{\text{eff}}^{**} = \frac{\int \int (\nu \Sigma_f + 2 \cdot \Sigma_{2n}) \phi \, dV \, dE}{\int \int (\Sigma_a + \Sigma_{2n}) \phi \, dV \, dE + \int \int J \, dS \, dE} \quad (4.2)$$

4.2 - Geometri Optimizasyonu

ANISN bilgisayar kodu kullanılarak yapılan nümerik hesaplamaların ilk on tanesi, geometri optimizasyonu için gerçekleştirilmiştir. Şekil-3.1 de görülen (a), (b), (c), (d) ve (e) geometrilerinin yakıt bölgelerinde sırasıyla ThO_2 ve UO_2 kullanılarak elde edilen nümerik sonuçlar nötronik performanslar açısından Tablo-4.1 de özetlenmiştir. Bu tablonun incelenmesinden aşağıdaki değerlendirmeleri yapmak mümkün olabilmektedir.

1 - T6 üretimi, gerek ThO_2 gerekse UO_2 yakıtlı geometrilerde, TÜB ve Reflektör bölgelerinin katmanlara ayrılması durumunda tek katmanlı duruma göre bir artış göstermekte (ThO_2 'li durumda % 7-8, UO_2 'li durumda % \approx 7 kadar), fakat katmanlı durumun iki veya üç olması artım miktarını önemli düzeyde etkilememektedir.

2 - T7 üretimindeki durum ise, katmanlı yapının nötron spektrumunu yumuşatmasının sonucu olarak, T6 'dakinin tersidir ve katmanlı yapıdaki T7 üretiminin, katmansız yapıdakine göre azalma miktarının mertebesi T6 'daki artan mertebenin yaklaşık üç katıdır (% \approx 22-23).

3 - Toplam trityum üretim miktarı açısından, katmanlı yapıda, büyük bir yüzde farkı ortaya çıkmamasına rağmen, bir avantaj olduğu da gözlenmektedir. Bunun sebebi, T6 ve T7 üretim miktarlarından, T6 'nın mutlak degerce, yaklaşık 10 degerindeki bir katsayı ile T7 'ye baskın olmasıdır. Yine aynı tablodan, TÜB ve Reflektör katmanlarının ikişer katmana ayrılmalarının üçer katmana ayrılma durumundan yaklaşık % 2 'lik fazlalığa sahip olduğu

da görülebilmektedir.

4 - (n,2n) reaksiyon miktarında geometriye yönelik olarak dikkate değer bir farklılık görülmemekte, fakat ThO_2 'nin UO_2 'ye nazaran olan avantajı açık olarak tespit edilebilmektedir.

5 - (n, γ) reaksiyonları açısından hem ThO_2 hem de UO_2 yakıtlı blanketlerde TÜB ve Reflektör 'ün katmanlı hale getirilmesi gözle görülür bir avantaj getirmektedir. Bu avantajın yüzdesi yakıt olarak UO_2 de ThO_2 'ye nazaran bariz olarak iyidir (ThO_2 de yaklaşık % 16, UO_2 de yaklaşık % 20 mertebesinde).

6 - (n,f) reaksiyon miktarı açısından, katmanlı yapının ThO_2 yakıtlı blanketler için herhangi bir katkısı gözlenmezken, UO_2 yakıtlı blankette, % 0.6 gibi düşük bir pozitif katkısı görülebilmektedir. Ayrıca, UO_2 'nin (n,f) etkileşimi açısından, ThO_2 'ye göre yaklaşık beş katı seviyesinde bir iyiliği de yine tablodan izlenebilmektedir.

7 - Tritiyum ve fissile yakıt üretim miktarlarının toplamı açısından tablo incelendiğinde; UO_2 yakıtlı blanketin, ThO_2 'li blankete göre biraz daha iyi durumda olduğu ayrıca katmanlı yapının, her iki yakıt içinde avantaj sağladığı (yaklaşık % 6 mertebesinde) tespit edilebilen hususlar olmaktadır.

8 - Tablonun, enerji çoğalım katsayısı açısından değerlendirilmesi durumunda, UO_2 yakıtlı blanketin ThO_2 'ye göre yaklaşık iki katı kadarlık bir üstünlüğe sahip olduğu, ve yine katmanlı geometrilerin, katmansız geometrilere nazaran yaklaşık % 1 mertebesinde daha iyi durumda oldukları görülebilir.

Bu değerlendirmelerin özeti olarak, katmanlı bir TÜB ve Reflektör yapısına sahip blanketin seçilmesinin bütün kriterler açısından açık olarak gerekliliği söylenebilir. Ayrıca, (n, γ) ve (n,f) reaksiyonlarıyla M sayısındaki üstünlükleri dikkate alındığında, trityum üretimindeki kısmi azalma ile birlikte, Tablo-4.1 'in son sütununda yer alan 10.Geometri, veya diğer bir ifade ile, TÜB ve Reflektörü, hacimce üç kısma ayrılan geometri,

optimal şartları saglıyor olarak kabul edilmiştir. Seçilen bu geometri, bu aşamadan sonra gerçekleştirilen diğer tüm nümerik hesaplamalarda esas olarak alınmıştır.

4.3 - Çalışmada Kullanılan Hybrid Blanketlere Ait Nötronik Performans Degerlendirmeleri

Bir önceki alt bölümde seçilen optimal geometrinin, değişik bölgelerindeyer alan malzemeler değiştirilerek, farklı hybrid blanketlere ait nötronik performansların, 4.1 numaralı alt bölümde verilen kriterlere göre degerlendirmesi bu alt bölümde yapılacaktır. Degiştirilecek malzemelerin neler olacağı, blanket geometrisinin tanımı yapılırken 3. bölümde verilmişti.

Bu noktada belirtilmesi gereken bir husus olarak; CmO_2 yakıtlı blanketlerde, ^{244}Cm 'un bölünme etki kesit degerinin çok büyük olması sebebiyle, blanketin kritiklige ulaşmasını önlemek amacıyla, yakıt bölgesinin 3 yakıt elemanı sırasından oluştuğu zikredilmek durumundadır.

Verilen sıralamaya uygun olarak yapılan nümerik hesaplama sonuçları, 4.1 numaralı alt bölümde verilen performans kriterleri sırası esas alınarak, aşağıdaki alt bölümler tablolar halinde verilmiştir.

4.3.1 - T6 Üretimi Açısından Hybrid Blanketlerin Nötronik Performanslarının Degerlendirilmesi

Tablo-4.2 'de, değişik blanketler için yapılan nümerik hesaplamalar sonucu elde edilen T6 üretim miktarları yer almaktadır. Tablonun degerlendirilmesi ile aşağıdaki özellikler belirlenebilir.

4.3.1.1 - Yakıtlara Yönelik Degerlendirme

Bütün blanketlerde, T6 üretimi açısından yakıtların iyilik sırasının tablodaki yakıt sıralamasına uygun olarak ortaya çık-

ması, yani en yüksek miktara CmO_2 ile ulaşıldığı, AmO_2 , UO_2 ve ThO_2 yakıtlarıyla giderek azalan üretim miktarının elde ediliyor olması sözkonusudur. Ayrıca, yine tablodan gözlenebilen diğer bir özellik, klasik yakıt olarak da bilinen ThO_2 ve UO_2 yakıt gruplarıyla, Aktinid yakıtlar olarak bilinen AmO_2 ve CmO_2 yakıt grupları arasında T6 üretim miktarı açısından bir merteye farkı olduğudur. ThO_2 den UO_2 'ye artış yüzdesi % 15-25 arsında, AmO_2 den CmO_2 'ye artış yüzdesi ise yaklaşık % 5-35 gibi daha geniş bir aralıkta değişirken, bu iki grup arasındaki artış daha büyük bir yüzde mertebesinde (UO_2 den AmO_2 'ye yaklaşık % 28-64 aralığında) gerçekleşmektedir.

4.3.1.2 - Nötron Çoğaltıcı Katmanlarda Yer Alan Malzemeye Göre Değerlendirme

İlgili bütün blanketler için gözlenen ortak özellik, Be 'nin, nötron çoğaltıcı katman olarak olumsuzluk arzettiği; Pb 'un ise, Be göre yine bütün blanketlerde T6 üretimine katkıda bulunduğu, fakat nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan blanketlerin bazısına göre ise negatif bir özellik taşıdığıdır. Klasik yakıtlar için, nötron çoğaltıcı katman olarak Pb kullanmak kısmi bir artış (% 1-10 arasında) miktarı sağlarken, aktinid yakıtlarda nötron çoğaltıcı katman kullanılması T6 üretimine olumsuz katkı yapmaktadır. Yine, nötron çoğaltıcı katman bulunduran blanketlerde, hem Be nin, hemde Pb 'un klasik yakıtlardaki T6 üretimine olan katkısı, aktinid yakıtlardakinlerden daha düşük kalmaktadır.

4.3.1.3 - Tritiyum Üretim Malzemesine Göre Değerlendirme

Tritiyum üretim malzemesi açısından, T6 üretim miktarının, bütün blanketlerde Li_2O yerine Saf Li kullanılması durumunda, arttığı görülmektedir. Bu sonuç, açık olarak, bu bölgeye ulaşan nötronların ^6Li ve ^7Li çekirdekleriyle, Li_2O 'tekinden daha çok etkileşime girme ihtimaline sahip olmalarıyla ilgilidir. Blanketlerde kullanılan reflektör ve nötron çoğaltma katmanına göre değişiklikler arzetsede de, Li_2O yerine Saf Li kullanmak, yakıtlar açısından önemli sayılabilecek bir değişiklik getirmemektedir. Ancak, klasik yakıtlarda (ThO_2 , UO_2) Saf Li 'un kullanılmasıyla, aktinid yakıtlara (AmO_2 , CmO_2) göre % 3-6 merteye-

sinde bir artış kaydedilebilmektedir. Tesbit edilebilen diğer bir nokta da, CmO_2 yakıtlı ve Grafit reflektörlü blanketlerde Li_2O yerine Saf Li'un kullanılmasının yüzde olarak etkisinin diğer blanketlere göre bir hayli düşük seviyede kaldığıdır.

4.3.1.4 - Reflektör Malzemesine Göre Değerlendirme

Bütün blanketlerde, reflektör malzemesi olarak kullanılan Be'un, T6 üretim miktarını grafitte göre arttırdığı gözlenmektedir. Bu artımın yüzde olarak en alt değeri, % 13 ile AmO_2 yakıtlı, Pb nötron çoğaltıcılı ve Li_2O TÜB 'lü blankette; en üst değeri de % 43 ile ThO_2 yakıtlı, nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan ve Saf Li TÜB 'ne sahip olan blankette ortaya çıkmaktadır.

Genel bir değerlendirme olarak; hybrid blankette;

- Reflektör olarak grafit yerine Be,
- TÜB malzemesi olarak, Li_2O yerine Saf Li
- Nötron çoğaltıcı katmanda, klasik yakıtlar için Pb, aktinid yakıtlar için ise ne Be ne de Pb;
- Yakıt bölgesinde de Aktinid yakıtların kullanılması T6 üretiminin artmasına yol açmaktadır.
- Mutlak degerce en yüksek T6 üretimi CmO_2 yakıtlı TÜB de Saf Li bulunan, nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan Be reflektörlü blankette ortaya çıkmaktadır.

4.3.2- T7 Üretimi Açısından Blanket Nötronik Performanslarının Değerlendirilmesi

T6 'nın yanısıra, ^7Li 'nin, bulunduğu ortamda ağırlıklı olarak enerjik olan nötronlarla girdiği etkileşimin sonunda ortaya çıkan trityum çekirdeği de (T7), plazma yakıtı olarak, blankette üretilmek durumundadır. T7 üretim miktarları, kullanılan blanketler için Tablo-4.3 de verilmiş ve aşağıdaki değerlendirmeler bu tabloya göre yapılmıştır.

4.3.2.1- Yakıtlara Göre Yapılan Değerlendirme

Klasik ve Aktinid yakıtlar için, T7 üretimine yönelik çarpıcı bir fark olduğu tablodan görülmektedir. Klasik yakıt kullanan blanketlerde ThO_2 yerine UO_2 'nin kullanılması yaklaşık % 3 mertesinde bir artışa yol açarken; AmO_2 'un kullanılması klasik yakıtlara göre % 15-20 arasında bir artışla, özellikle CmO_2 de ise % 100 'ün üzerinde bir artışla sonuçlanmaktadır. Böylece, CmO_2 'nin T7 üretimine olan olumlu katkısı en üst seviyede gerçekleşmektedir.

4.3.2.2- Nötron Çoğaltıcı Katmanda Yer Alan Malzemeye Göre Değerlendirme

Bütün Blanketlerde nötron çoğaltıcı katmanında, Be ve Pb kullanmak T7 üretim miktarının düşmesine yol açmaktadır. Bu düşme, Be 'nin kullanılmasında % 22-30 mertesinde gerçekleşirken, Pb 'nin kullanılmasıyla Be 'e göre % 5-8 mertesinde ilave bir düşme daha olmaktadır.

4.3.2.3- Tritiyum Üretim Bölgesindeki Malzemeye Göre Değerlendirme:

Göz önüne alınan blanketlerin hepsinde, Li_2O 'nin yerine Saf Li 'un kullanılması, beklenen bir sonuç olarak, T7 üretim miktarının artmasıyla sonuçlanmaktadır. Bu artış, hemen hemen bütün blanketlerde % 22-23 'lük bir yüzdeye sahip olması açısından bir düzgünlük te göstermektedir. Sadece, CmO_2 yakıtlı ve nötron çoğaltıcı katmanı olmayan blanketlerde bu artış yüzdesi % 26 seviyesindedir.

4.3.2.4- Reflektör Malzemesine Göre Değerlendirme

Tritiyum üretim bölgesindeki değişimin düzgünlüğüne benzer olarak, reflektörlerde C yerine Be kullanılması bütün blanketlerde, % 1-2 gibi düşük fakat düzgün bir azalma ile sonuçlanmaktadır. Bu azalma CmO_2 bulunduran blankette % 0.5 değerine kadar düşebilmektedir.

4.3.3- T6+T7 (Toplam Tritiyum) Üretimi Açısından Blanket Performanslarının Değerlendirilmesi

T6 ve T7 üretim miktarlarının toplamıyla elde edilen değerler, toplam trityum üretim miktarını vermek üzere Tablo-4.4 da gösterilmiştir. Bu tablonun değerlendirilmesiyle, T6 ve T7 için ayrı ayrı yapılan değerlendirmeler, bu başlık altında toplanmış olacaktır.

4.3.3.1- Yakıtlara Göre Değerlendirme

Bütün blanketlerde, tablodaki sıralamayla paralellik arzedecek şekilde, ThO_2 den, UO_2 , AmO_2 ve CmO_2 yakıtlarına geçildikçe, toplam trityum üretim miktarı da artış kaydetmektedir. T6 ve T7 'nin ayrı ayrı yapılan değerlendirmelerinde de olduğu gibi, toplam trityum üretimi içinde klasik ve aktinid yakıt ayrımı tablodan gözlenmektedir. Klasik yakıtlar için % 12-23 arasındaki artış yüzdesi, aktinid yakıtlara geçişte % 27-60 mertebesinde gözlenirken, aktinid yakıtlar arası artma % 9-38 seviyesinde olmaktadır. Toplam trityum üretim miktarı, mutlak değerce, füzyon nötronu başına 2.62 değeriyle ($CmO_2 + Li + Be$) dizilişine sahip blankette en yüksek değerine ulaşmaktadır.

4.3.3.2- Nötron Çoğaltıcı Katman Malzemesine Göre Değerlendirme

Nötron çoğaltıcı katman bulunmayan blanketlere göre, Be 'un nötron çoğaltıcı katman olarak kullanılması durumunda, toplam trityum üretim miktarında, düşme gözlenirken, Be yerine Pb 'un kullanılmasıyla bu durum tersine dönmekte ve (T6+T7) toplamında artma ortaya çıkmaktadır. Klasik yakıtlarda, Be 'un kullanılmasıyla ortaya çıkan azalma % 6-17 arasında değişirken, aktinid yakıtlarda % 31 mertebesine kadar çıkmaktadır. Be yerine Pb kullanılmasıyla belirlenen artma ise, klasik yakıtlarda % 10-16 seviyesinde, aktinid yakıtlarda ise % 5-25 gibi daha geniş bir aralıkta hesaplanmaktadır. Ayrıca, nötron çoğaltıcısı bulunmayan blanketlere göre Pb 'nun bu fonksiyon için ilave edilmesi, Be 'a benzer tarzda, (T6+T7) üretiminde, ThO_2 'li blanketlerden ikisi hariç diğer bütün blanketlerde azalmaya yol açmaktadır. Bunun da yüzdesi % 0.5-16 arasında kalmaktadır.

4.3.3.3- Trityum Üretim Bölgesindeki Malzemeye Göre Değerlendirme

Bütün Blanketlerde, T6+T7 toplamı için ortak olarak gözlenen özellik, Li_2O yerin Saf Li 'un kullanılmasıyla, bir artışın ortaya çıkmasıdır. Ayrıca, bu artışın ortaya çıkması noktasında, klasik ve aktinid yakıtlar arasında önemli bir yüzde değişim farklılığı gözlenmemektedir (klasik yakıtlarda % 17-34, aktinid yakıtlarda % 6-30).

4.3.3.4- Reflektöre Göre Değerlendirme

Li_2O , Saf Li değerlendirilmesinde olduğu gibi, burada da, grafit yerine, Be 'un reflektör malzemesi olarak kullanılması durumunda, T6+T7 miktarında bütün blanketler için artış ortaya çıkmaktadır. Artış yüzdesi, yakıt farklılığından etkilenmemekte, fakat, TÜB 'nde kullanılan malzemeden etkilenmektedir. Li_2O 'li blanketlerde, bu artış % 14-22 mertebesinde kalırken, Saf Li 'lu blanketlerde artış yüzdesi % 23-38 gibi ilkinin iki katına ulaşan bir mertebede olmaktadır.

4.3.4- (n,2n) Reaksiyon Miktarı Açısından Blanket Performanslarının Değerlendirilmesi

(n,2n) reaksiyonu, blanketin gerek yakıt, gerekse trityum üretim bölgesindeki nötron popülasyonunu arttırarak, trityum ve fissile yakıt üretiminin yanısıra, blanket enreji çıktısını arttıracı bir fonksiyona sahiptir. Tablo-4.5 de blanketlere göre (n,2n) reaksiyon miktarları verilmiştir. Nümerik hesaplamalarda kullanılan data 'da, Am elementine ait (n,2n) reaksiyon etki kesitleri verilmediği için, bu element için reaksiyon miktarları tabloda gösterilememiştir.

4.3.4.1- Yakıtlara Göre Değerlendirme

Klasik yakıtların değerlendirilmesinde, ThO_2 'li blanketlerin bütününde, UO_2 'ye göre % 25-11 arasında bir fazlalık gözlenmekte ve bu yüzde, nötron çoğaltıcı katmanı olmayıp, reflektörü grafit olan blanketlerde % 39 'a kadar varmaktadır. CmO_2 'un UO_2 'a göre

durumu ise ilgi çekici bir değişim arz etmektedir. CmO_2 'ye ait $(n,2n)$ değerleri, UO_2 'ye ait değerlerden, grafit reflektörlü blanketlerde % 12-15 (nötron çoğaltıcı katman yoksa % 95) arasında daha düşük, Be reflektörlü blanketlerde ise % 23-47 mertebesinde daha fazladır. Bütün blanketler içerisinde, $(\text{Be}+\text{CmO}_2+\text{Saf Li}+\text{Be})$ dizilişine sahip blanket 0.83 değeriyle en büyük $(n,2n)$ reaksiyon miktarına sahiptir.

4.3.4.2- Nötron Çoğaltıcı Katman Malzemesine Göre Değerlendirme

Tablodan, açık olarak, blankete nötron popülasyonuna katkıda bulunacak bir katman ilave edilmesi halinde, bunun, ilave edilen katmandaki $(n,2n)$ reaksiyonlarından dolayı olduğu, tespit edilebilmektedir. Böylece, ister Be ister Pb olsun, $(n,2n)$ değerinde bir artış ortaya çıkmaktadır. Bu artış, grafit reflektörlü blanketlerde özellikle dikkati çekmektedir. Çünkü, sadece nükleer yakıtında $(n,2n)$ ortaya çıkabilecek bir yakıttan, hem nötron çoğaltıcı katmanında hemde reflektöründe $(n,2n)$ reaksiyonlarının ortaya çıkabildiği bir blanket geometrisine ulaşılmaktadır. Be yerine, Pb'un nötron çoğaltıcı katman olarak getirilmesi, Be katmanlıya göre $(n,2n)$ de bir düşmeye sebep olmakta ve bu düşme, ilgili blanketlerde % 17-35 gibi nisbeten dar sayılabilecek bir aralıkta gerçekleşmektedir.

4.3.4.3- Tritiyum Üretim Malzemesine Göre Değerlendirme

Tablodan, $(n,2n)$ reaksiyon miktarı için düzgün olarak gözlenebilen bir durum, Li_2O yerine Saf Li kullanılması durumunda, grafit reflektörlü blanketlerde azalmanın, Be reflektörlü blanketlerde ise artmanın ortaya çıkmasıdır. Bu, tabiiyle, $(n,2n)$ reaksiyonu açısından Be'un olumlu katkısının sonucudur. Grafit reflektörlülerdeki düşme % 0.1-2 gibi ufak bir yüzde ile, Be reflektörlülerdeki artma ise % 14-36 (CmO_2 ve nötron çoğaltıcı katman bulunmayan blankette % 81) aralığındaki bir yüzde ile belirtilebilir.

4.3.4.4- Reflektör Malzemesine Göre Değerlendirme

Tablodan çıkarılabilecek diğer bir düzgün değerlendirme de, reflektör malzemesi değişimiyle ilgilidir. Bütün blanketlerde,

grafit yerine Be 'un reflektör olarak kullanılması, (n,2n) reaksiyon miktarının artmasına yol açmaktadır ki, bu da Be 'un (n,2n) reaksiyonları açısından sahip olduğu potansiyelin tabii bir sonucudur. Nötron çoğaltıcı katmanı olmayan blanketlerde, bu artış büyük değerlere katlanırken (CmO_2 de Li_2O için 73, Saf Li için 136), Be nötron çoğaltıcılı blanketlerde % 33-92 (CmO_2 ve Saf Li 'luda % 154); Pb 'lu olanlarda ise, klasik yakıtlar için %43-75 ve CmO_2 'li blanketler için % 135-215 değerine varmaktadır.

4.3.5- Fissile Yakıt Üretimine Yönelik Olarak Blanketlerin Nötronik Performans Değerlendirmesi

Hybrid blanketlerin, trityum üretiminin yanısıra önemli olan diğer bir fonksiyonu da, giriş bölümünde de değinildiği gibi, mevcut nükleer reaktörlerin, tükenmekte olan fissile yakıt potansiyeline katkıda bulunacak şekilde fertil-fissile çekirdek dönüşümünü gerçekleştirmektir. Bu dönüşüm ise, reaktör ortamında (n, γ) etkileşimleri aracılığıyla gerçekleşir. Bu bakımdan, bir hybrid blanketin fissile yakıt üretim performansı, blankette ortaya çıkan (n, γ) reaksiyonlarının miktarıyla değerlendirilebilir. Çalışmada kullanılan blanketlere yönelik olarak (n, γ) değerlendirmeleri Tablo-4.6 aracılığı ile aşağıda verilmiştir.

4.3.5.1- Yakıtlara Göre Değerlendirme

Gerek klasik (ThO_2 ve UO_2), gerekse aktinid (AmO_2 ve CmO_2) yakıtlardan, (n, γ) etkileşimiyle elde edilecek fissile çekirdeklerin (sırasıyla ^{233}U , ^{239}Pu , ^{242}Am ve ^{245}Cm) her birisi nükleer teknolojinin ihtiyaç duyduğu nötronik özelliklere sahiptirler. AmO_2 yakıtını meydana getiren izotoplardan ^{241}Am 'in (n, γ) reaksiyonuyla ^{242}Am 'ye dönüşmesi, değişik yüzdelerle gerçekleşen ve yarı ömürleri farklı olan iki izomer çekirdeğin ortaya çıkması ile sonuçlanmaktadır. Bunlardan, 152 senelik yarı ömrüyle kararlı bir çekirdek özelliği taşıyan ^{242m}Am 'nin oluşma yüzdesi % 35 ve 16 saatlik yarı ömrüyle kararsız olan ^{242}Am izomer çekirdeğinin oluşma yüzdesi ise % 65 tir. AmO_2 'teki diğer izotop olan ^{243}Am 'ün (n, γ) reaksiyonuyla ^{244}Am 'e dönüşümü, 10 saat yarı ömürlü bir çekirdekle sonuçlandığı için, ^{242}Am çekirdeği gibi,

fissile çekirdek üretimi açısından önem taşımamaktadır. ^{244}Cm 'den (n,γ) reaksiyonuyla meydana gelen ^{245}Cm ise 8532 senelik yarı ömrüyle, çok önemli ve kararlı bir fissile çekirdektir [33].

Tablo-4.6 da, içerisinde fertil çekirdek bulunduran yakıtlardan, klasik olanlara nazaran, aktinid yakıtlardan AmO_2 'nin yukarıdaki paragrafta belirtilen özelliği sebebiyle (^{241}Am 'den sadece % 35 oranında $^{242\text{m}}\text{Am}$) en kötü durumda olduğu görülmektedir. CmO_2 'deki klasik yakıtlara göre bağlı olarak düşük gözükten değerler, CmO_2 'i bulunduran blanketli yakıt bölgesinin, ^{244}Cm 'e ait (n,f) bölünme reaksiyon tesir kesit değerinin çok yüksek olması sebebiyle, diğer yakıtlı blanketlerdeki 10 sıra yerine 3 sıra (nötron çoğaltıcı olmayan geometride) ve 2 sıralık (nötron çoğaltıcı katmanlı geometride) yakıt elemanı grubuna sahip olmasındandır. Ayrıca; ThO_2 ile UO_2 arasında UO_2 'nin lehine % 1-8 arasında bir artma gözlenmektedir.

4.3.5.2- Nötron Çoğaltıcı Katnamdaki Malzemeye Göre Değerlendirme

Bütün blanketler için, Be 'nin nötron çoğaltıcı katman olarak ilave edilmesiyle, (n,γ) reaksiyon miktarının arttığı, Be 'nin yerine Pb 'nin kullanılmasıyla da azalma gösterdiği Tablo-4.6 den görülebilmektedir. Be 'nin katkısı klasik yakıtlarda % 75-80 mertebesine ulaşırken aktinid yakıtlarda % 21 ile % 59 arasında değişmektedir (AmO_2 de % 21-26, CmO_2 de % 45-59 mertebesinde). Be yerine Pb 'un kullanılmasıyla, (n,γ) daki bağlı azalma tüm yakıtlar için % 25-44 mertebesinde kalmaktadır. Fakat, Pb karşılaştırması, nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan blanket' e göre yapılırsa, klasik yakıtlarda, Pb kullanılmasıyla (n,γ) artarken, aktinid yakıtlarda bu değişimin azalma şeklinde ortaya çıktığı gözlenmektedir.

4.3.5.3- Tritiyum Üretim Bölgesinde Yer Alan Malzemeye Göre Değerlendirme:

Pb nötron çoğaltıcılığı, Be reflektörlü ve CmO_2 yakıtlı olan hariç, bütün blanketlerde, trityum üretim malzemesi olarak Li_2O

yerine Saf Li 'nin kullanılması, (n,γ) reaksiyon miktarının azalması şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu azalma, yine bir genellik içerisinde, grafit reflektörlü olanlarda, Be 'lu olanlara göre daha fazla olmaktadır (grafitlilerde % 5-9, Be 'lu olanlarda % 1-7 mertebesinde; CmO_2 yakıtlarda grafit için bu oran % 8-18, Be için % 2-8). Tablodan gözlenen diğer bir özellik te; Saf Li 'un kullanılmasıyla ortaya çıkan azalma, en fazla, nötron çoğaltıcı katman bulunmayan blanketlerde olmakta, Be ve Pb 'lu nötron çoğaltıcı katmanı bulunduran blanketlerde ise bu azalma daha düşük yüzdelerle inebilmektedir.

4.3.5.4- Reflektör Malzemesine Göre Degerlendirme

Aktinid yakıt kullanan iki blanket ($\text{AmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$) ve ($\text{Pb} + \text{AmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$) dışında, bütün blanketlerde, grafit yerine, Be 'un kullanılmasıyla, (n,γ) reaksiyon miktarı artmaktadır ve bu artış, Li_2O 'lu blanketlerde Saf Li 'lu olanlara nazaran % 2-5 mertebesinde daha düşük kalmaktadır. Grafit yerine, Be 'un kullanılmasıyla ortaya çıkan artış, özellikle CmO_2 yakıtlı ve Saf Li 'lu blanketlerde % 14-16 lık yüzdelerle dikkat çekmektedir.

4.3.6- (n,f) Bölünme Reaksiyon Miktarı Açısından Blanketlerin Degerlendirilmesi

Bölünme reaksiyonu, nükleer reaktör ortamlarının en dikkate değer reaksiyonudur. Çünkü, ortama ait nötron populasyonu ve elde edilecek ısı enerjisi, bu reaksiyon miktarı kullanılarak hesap edilmek durumundadır. Hybrid blankette de, bu zikredilen fonksiyonların ne ölçüde yerine geldiğinin bilinmesi, kullanılan yakıta ait (n,f) reaksiyon miktarının hesaplanmasıyla mümkün olabilir. Tablo-4.7 de, çalışmada kullanılan blanketelere ait toplam (n,f) reaksiyon miktarları verilmiş olup, bu tablo esas alınarak yapılabilen degerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

4.3.6.1- Yakıtlara Göre Yapılabilecek Degerlendirme

Tablo degerleri dikkate alındığında, (n,f) reaksiyon miktarı açısından, UO_2 'nin ThO_2 'e, AmO_2 'nin de UO_2 'e göre çok daha

etkin olduğu görülmektedir. CmO_2 sütununda yer alan değerlerin AmO_2 'e göre düşük olması noktasında, daha öncede bir kaç kez zikredilen, CmO_2 'li blanketlerin sadece 2 veya 3 sıralı yakıt eleman gruplarına sahip olduğu unutulmamalıdır. 2 veya 3 sıraya rağmen, CmO_2 'e ait (n,f) değerleri UO_2 'ye ait değerlerden 2 veya 3 misli daha fazla olabilmektedir. Yaklaşık olarak 3 katsayılılık bir artış ThO_2 den UO_2 'ye ve yaklaşık 3-7 katsayılılık bir artış da UO_2 den AmO_2 'e geçerken ortaya çıkmaktadır. CmO_2 'un özel durumu bir kenara bırakılırsa, geriye kalan üç yakıtı kullanan blanketler içerisinde, fisyon nötronu başına en yüksek (n,f) reaksiyon miktarını veren blanketin, 0.715 değeriyle ($\text{AmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$) dizilişine sahip blanket olduğu da belirlenebilmektedir.

4.3.6.2- Nötron Çoğaltıcı Katmanda Yer Alan Malzemeye Göre Değerlendirme

Nötron çoğaltıcı olarak Be 'un blankete katılmasıyla, (n,f) reaksiyon miktarı, ilgili blanketlerin tümünde azalma göstermektedir. Be 'un gösterdiği bu olumsuz etki ThO_2 'li blanketlerde % 36, UO_2 'li blanketlerde % 26, AmO_2 'li blanketlerde % 35 ve CmO_2 'li blanketlerde % 48-52 mertebesinde dir. Blankete Be değil de, Pb katılmasıyla da Be 'dekine benzer değişimler ortaya çıkmaktadır ve bunların mertebesi % 27-42 arasında kalmaktadır. Fakat, nötron çoğaltıcı katman katılıp ta Be yerine, Pb kullanılması, klasik yakıtlarda (n,f) miktarında düşmeye yol açarken, aktinid yakıtlarda artma gözlenmektedir. Klasik yakıtlardaki azalmanın mertebesi % 3-10 arasında, aktinid yakıtlardaki artmanın yüzdesi ise % 12-21 arasında kalmaktadır.

4.3.6.3- Tritiyum Üretim Malzemesine Göre Yapılan Değerlendirme

Bütün blanketlerde, Li_2O yerine Saf Li kullanılması durumunda da, yine (n,f) reaksiyon miktarında azalma gözlenmektedir. İlk üç yakıt % 1-5 arasındaki bir düşmeye yol açarken, CmO_2 yakıtlı blankette düşme yüzdesi % 9-17 mertebesine ulaşabilmektedir.

4.3.6.4- Reflektöre Göre Yapılan Değerlendirme

Bazı blanketlerde arttırıyor, bazılarında da azaltıyor olmasına rağmen, grafitte göre Be 'un reflektör olarak kullanılması,

(n,f) reaksiyon miktarında önemli bir değişiklik ortaya . çıkar-
mamaktadır (en düşük % 0.01, en yüksek % 1 mertebesinde).

4.3.7- Toplam Tritiyum ve Fissile Yakıt Üretimi Açısından Blanketlerin Performans Degerlendirilmesi

T6 ve T7 toplamı, plazmada (D-T) reaksiyonu için gerekli tritiyum miktarını verirken, fissile yakıt üretimi, mevcut nükleer reaktörlerin ihtiyacını desteklemek amacıyla dikkate alınır. Tritiyum ve fissile yakıt üretimi, bu değerlendirmenin ışığı altında, bir hybrid blanketin toplam yakıt üretimini (Total Breeding, Fusile + Fissile Breeding) oluşturacak şekilde, ayrı bir değerlendirmeye tabi tutulmak durumundadır. Aşagıda, Tablo-4.8 'de verilen ve daha önce verilmiş olan Tablo-4.2, Tablo-4.3 ve Tablo-4.6 'da verilen değerlerin toplamı olan değerlerin, toplam yakıt üretimi açısından değerlendirilmesi verilmiştir.

4.3.7.1- Yakıtlara Göre Degerlendirme

Toplam yakıt üretimi açısından aktinid yakıtların, klasik yakıtlara olan üstünlüğü tablolardan hemen görülebilmektedir. Klasik yakıtların kendi arasında UO_2 'in ThO_2 'ye % 10 ile % 20 arasında değişen bağıl bir iyiliği olmasının yanısıra, AmO_2 'in UO_2 'e göre 1.15 ile 1.35 arasında değişen bir katsayı ile daha iyi olması, hatta, 2 veya 3 sıralı CmO_2 'e sahip blanketlerin bile UO_2 'ye göre 1.27 ile 1.64 arasında bir katsayı ile daha iyi olmaları sözkonusudur. İncelenmesi yapılan blanketler içinde, füzyon nötronu başına toplam olarak 2.812 fusile ve fissile yakıt çekirdeği üretiminin sağlandığı (CmO_2 + Saf LiO + Be) dizilişine sahip olan blanket en iyi durumda olarak tesbit edilebilmektedir.

4.3.7.2- Nötron Çoğaltıcı Katman Malzemesine Göre Degerlendirme

Toplam yakıt üretimi açısından, klasik ve aktinid yakıtlar arasında, Be ve Pb açısından çapraz bir paralellik gözlenmektedir. Şöyleki; nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan blanketlerde, Be 'dan bir katman ilave edilmesi, toplam yakıt üretimini, kla-

sik yakıtlarda (ThO_2 de % 3-13, UO_2 de % 2-6) arttırırken, aktinid yakıtlarda bunun tersi bir durum ortaya çıkmakta ve toplam yakıt miktarını (AmO_2 'de % 27, CmO_2 de % 12-17) azaltmaktadır. Bu ters yönlü etki, nötron çoğaltıcı katmandaki Be yerine Pb kullanılmasıyla tersine dönmekte, klasik yakıtlarda bir azalma (ThO_2 de % 3-5, UO_2 de 3-6), aktinid yakıtlarda ise bir artma (AmO_2 'de % 15-19, CmO_2 de % 0.06-1.5) ortaya çıkmaktadır. Böylece, klasik yakıtlar için Be olumlu bir katkıya sahipken, Pb bu etkiyi olumsuzlaştırmakta, aktinid yakıtlarda ise, Be ile ortaya çıkan olumsuz etki Pb kullanılmasıyla, belli bir yüzde ile özellikle AmO_2 'li blankette giderilebilmektedir.

4.3.7.3- Tritiyum Üretim Malzemesine Göre Değerlendirme

Bu parametreye göre yapılan blanket değerlendirmesinde homojen bir sonuç gözlenmektedir. Bütün blanketlerde, Li_2O yerine Saf Li kullanılması, toplam yakıt üretim miktarının artmasına yol açmaktadır. Bu artışa ait yüzde ise bütün blanketler itibarıyla % 4 ile % 26 arasında değişmektedir. Böylece, toplam yakıt üretimi açısından, Saf Li, Li_2O 'ya tercih edilmek durumunda olmaktadır.

4.3.7.4- Reflektör Malzemesi Açısından Değerlendirme

Tritiyum üretim malzemesi için yapılan değerlendirmede olduğu gibi, reflektör malzemesi açısından da, bütün blanketlerdeki bir düzgünlük gözlenebilmektedir. Grafit yerine Be kullanmakla, bütün blanketlerde, % 8-35 arasında değişen bir bağıl yüzde ile, toplam yakıt üretimi açısından bir iyilik sağlanmakta ve Be 'u bu açıdan grafit 'e tercih edilir duruma getirmektedir.

4.3.8- M Enerji Çoğalım Katsayısı Açısından Blanket Performansının Değerlendirilmesi

Toplam yakıt üretiminin yanısıra, hybrid blankette, enerji üretiminin göstergesi anlamında enerji çoğalım katsayısı da, blanketin performans kriterlerinden birisi olarak dikkate alınmak durumundadır. Blankette yer alan yakıtta ve tritiyum üretim malzemesi olarak kullanılan Li da nötron etkileşimi sonucu

açıga çıkan enerjinin, blankete ulaşan füzyon nötronu enerjisine göre bir karşılaştırma özelliği olan bu katsayının, bu çalışmada kullanılacak blanketler için hesaplanan değerleri Tablo-4.9 'da verilmiş ve bu tablo aracılığı ile yapılan değerlendirmeler de aşağıda sıralanmıştır

4.3 8.1- Yakıtlara Göre Yapılan Değerlendirme

Enerji çoğaltım katsayısı açısından yapılan değerlendirmede de, klasik ve aktinid yakıt farkı açık olarak belirlenebilmek durumundadır. Klasik yakıtlar içerisinde UO_2 'nin ThO_2 'e göre bağlı olarak, % 65-90 mertebesinde bir üstünlüğü olmasının yanısıra, AmO_2 'in de UO_2 'e göre 3-3.4 aralığındaki bir katsayı ile belirtilebilecek bir üstünlüğü ortaya çıkmaktadır. CmO_2 ise AmO_2 'e göre, bu noktaya kadar hatırlana gelen 2 veya 3 yakıt elemanı sırasına sahip olmasıyla, ilgili blanketler arasında, bağlı olarak % 27-42 'lik olumsuzluğa sahiptir. Çalışmada kullanılan blanketler arasında, 11.69 değerindeki bir enerji çoğaltım katsayısıyla ($AmO_2 + Li_2O + Be$) malzeme dizilişine sahip blanketin M sayısı seçiminde en iyi durumda olduğu gözlenmektedir.

4.3.8.2- Nötron Çoğaltıcı Katman Malzemesi Açısından Değerlendirme

Nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan blanketten, Be katmanlı bir blankete geçişte, enerji çoğaltım katsayısı ThO_2 de % 11-12, UO_2 de % 17-18, AmO_2 de % 31-33 ve CmO_2 de % 39-45 mertebesinde düzgün sayılabilecek bir şekilde azalmaktadır. Aynı katmana Be değil de Pb yerleştirilmesi durumunda ise, azalma sadece UO_2 de % 3-4 seviyesinde devam ederken, diğer yakıtlara sahip blanketlerde, Be 'lu olanlara göre, ThO_2 de % 1-2, AmO_2 de % 11-12 ve CmO_2 de % 12-16 mertebesinde artmalar ortaya çıkmaktadır. Fakat, nötron çoğaltıcı katman bulunmayan blanketlere, direkt olarak Pb katmanının ilavesiyle, M sayısında yine düşme gözlenmektedir. Denilebilir ki, nötron çoğaltıcı katmanın ilavesi, M sayısı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir.

4.3.8.3- Tritiyum Üretim Bölgesindeki Malzemeye Göre Değerlendirme

Li_2O ve Saf Li açısından yapılan değerlendirme sırasında da, klasik ve aktinid yakıt farkı belirgin bir özellik olarak ortaya çıkmaktadır. Bu karşılaştırmaya konu olan blanketlerin tümünde, Li_2O yerine Saf Li 'un kullanılmasıyla, klasik yakıtlarda artma, aktinid yakıtlarda ise azalma ortaya çıkmaktadır. Klasik yakıtlardaki artma % 0.1-6 seviyesinde kalırken, aktinid yakıtlardaki azalma % 2-14 mertebesine ulaşmaktadır. Saf Li, böylece, klasik yakıtlarda M sayısını arttırmakta, aktinid yakıtlarda ise azaltmaktadır.

4.3.8.4- Reflektör Malzemesine Göre Değerlendirme

İlgili tabloda gözlenebilen, diğer bir düzgün özellikte, bütün blanketlerde, grafit yerine Be 'un kullanılmasıyla, M sayısında bir artış ortaya çıkması şeklindedir. Artış yüzdesi, bütün blanketlerde, yakıt farkı olmaksızın, % 0.4-7 yüzde aralığına dağılmıştır. Bu sonuca dayalı olarak, Be 'un M sayısını arttırmada, grafitte göre farklı bir üstünlüğe sahip olduğu söylenebilir.

4.3.9- (n,2n) Reaksiyon Miktarının Katılmamasıyla Hesaplanan Efektif (k_{eff}^*) Nötron Çoğalım Katsayısının Blanketlere Göre Değerlendirilmesi

Birinci dereceden öneme sahip olan bir parametre olmamasına rağmen, hybrid blanketlerin kritik- altı çalışmasının göstergesi olmak durumunda, (k_{eff}^*) katsayısının, blanket malzemesine göre değerlendirilmesi ayrı bir öneme sahiptir. Tablo-4.10 de incelenen blanketlere ait (k_{eff}^*) dağılımı verilmiş ve bu tabloya dayalı olarak yapılan değerlendirmeler aşağıda sıralanmıştır.

4.3.9.1- Yakıtlara Göre Yapılan Değerlendirme

Aktinid yakıtların, hybrid blanket kritikliğine olan etkisi, Tablo-4.10 da açık olarak gözlenmektedir. Minimal düzeydeki kritiklik veya (k_{eff}^*) ThO_2 'li blanketlerde gözlenirken, UO_2 'li

blanketlerdeki kritikliğin ThO_2 'li lere göre 3.5 'a varan bir katsayı ile arttığı tespit edilmektedir. Aktinid yakıtlara geçişte ise, UO_2 'li blanketlere göre 2.7 'ye varan bir katsayı ile belirlenebilen bir kritiklik artışı sözkonusudur. CmO_2 'li blanketlerde ise, yakıt bölgesindeki yakıt elemanları sıra sayısının 2 veya 3 olmasını gerektiren temel husus, bu noktada daha kuvvetli bir şekilde ortaya çıkmakta ve bu blanketlere ait k_{eff}^* değerlerinin yüksekliği dikkat çekmektedir. Bu blanketlerde 9 veya 10 sıraya müsaade edilmesi durumunda, blanketin kritik-üstü olduğu yapılan nümerik hesaplamalardan açık olarak görülmüş fakat bu hesaplar çalışma içersinde yer almamıştır. Diğer bir deyişle, 2 veya 3 sıralı yakıt elemanları yerleştirilmek suretiyle, blanketin kritik-altı olması temin edilebilmiştir. Tablodan, kritiklik seviyesi en yüksek olarak verilen blanketin 0.72878 degeriyle ($\text{AmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{C}$) dizilişine sahip blanket olduğu; kritiklik açısından en az risk taşıyan blanketin ise 0.0705 degeriyle ($\text{Pb} + \text{ThO}_2 + \text{Saf Li} + \text{C}$) yapısına sahip blanket olduğu tesbit edilmiştir.

4.3.9.2- Nötron Çoğaltıcı Katmandaki Malzemeye Göre Degerlendirme

Nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan blanketlerde, bir Be katmanının ilavesiyle, (k_{eff}^*) ile ifade edilen kritikliğin, bütün blanketlerde daha düşük degerlere indigi (katmansız 'a göre ThO_2 'lide % 36, UO_2 'lide % 22, AmO_2 'lide % 13, CmO_2 'lide % 26-27 mertebesinde) görülmektedir. Be yerine Pb kullanılmasıyla, kritiklik, klasik yakıtlarda azalmakta (ThO_2 'lide % 2-3, UO_2 'lide % 6-7), aktinid yakıtlarda ise artmaktadır (AmO_2 'lide % 3-4, CmO_2 'lide % 7-10). Böylece, Pb klasik yakıtlarda kritikligi azaltıcı, aktinid yakıtlarda arttırıcı bir fonksiyona sahip olmaktadır.

4.3.9.3- Tritiyum Üretim Malzemesine Göre Degerlendirme

Bütün blanketlerde, Li_2O yerine Saf Li kullanmakla, blanket kritikliğinde çok az bir miktarda da olsa azalma gözlenmektedir. Azalma yüzdesi ise % 0.5 (ThO_2 'lu ve nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan blanketler arasında) ile % 6.2 (CmO_2 'li ve yine nüt-

ron çoğaltıcı katmanı olmayan blanketler arasında) mertebesinde değişmektedir.

4.3.9.4- Reflektör Malzemesine Göre Değerlendirme

Reflektör Bölgesinde, grafit yerine Be elementini kullanmakla, blanket kritiklerinin, genelde, binde ile belirtilebilecek bağıl bir farkla arttıkları, üç dört blankette ise, yine binde ile verilebilecek bağıl bir farkla azaldıkları, belirtilen tablodan çıkartılabilecek değerlendirme sonuçlarıdır. Grafit yerine Be kullanmakla kritiklik azalmasının ortaya çıktığı blanketler, AmO_2 yakıtlı ve trityum üretim bölgesinde Li_2O bulunduran blanketler olmaktadır.

4.3.10-(n,2n) Reaksiyon Nötronlarının Katılmasıyla Hesap Edilen (k_{eff}^{**}) Efektif Nötron Çoğalım Katsayısının Blanketlere Göre Değerlendirilmesi

Nükleer ortamdaki nötron popülasyonunu arttırıcı bir fonksiyonu olması sebebiyle, k_{eff} 'in hesabında; (n,2n) reaksiyon miktarı, nötron kazancı olarak nitelenen fisyon nötronları terimi 2 ile çarpılarak, nötron kaybı olarak nitelenen yutulma ve kaçaklar toplamını veren terime de bizzat kendisi katılmak durumundadır. Bu şekilde tanımlanan ve kritikliği ifade eden k_{eff} terimini, k_{eff}^* şeklinde işaretlenen diğerinden ayırt etmek için k_{eff}^{**} sembolü kullanılmaktadır. Açık olarak, (n,2n) reaksiyon etki kesitinin yüksek olduğu malzemelerde etkinliğini gösterecek olan bu tanımlamanın, çalışmada kullanılan blanketler için aldığı değerler Tablo-4.11 de verilmiştir. Amerikyum elementine ait (n,2n) reaksiyon etki kesitleri, çalışmada kullanılan data paketinde bulunmadığı için, değerlendirme tablosunda bu yakıta ait sütün boş bırakılmıştır. Diğer blanketlere ait değerlendirmeler aşağıda sıralanmıştır.

4.3.10.1- Yakıtlara Göre Yapılan Değerlendirme

k_{eff}^* için verilen tabloda olduğu gibi, k_{eff}^{**} için de yakıtlara yönelik benzer bir blanket davranışı sözkonusudur. Yani, klasik yakıt grubunda, ThO_2 den UO_2 'ye geçiş sırasında yeni ta-

nımlanan k_{eff}^{**} degerinde artış ortaya çıkmaktadır. Bu artışın bağıl olarak yüzdesi % 3-38 arasında kalmaktadır. CmO_2 'e geçişte ise, k_{eff}^{**} degerinde, ^{244}Cm 'nin etkinliği sebebiyle, yine bir artış gözlenmektedir. Bu artış ise, 1.06-1.57 katsayıları arasında yer alan degerle katlanmaktadır. Böylece, kritikliğe olan etkileri itibariyle, ThO_2 , UO_2 ve CmO_2 sıralaması, etkinliğin giderek artma sırası olarak da gözlenmektedir. Tablolarda yer alan ve degerlendirilmesi yapılan blanketler içerisinde, 0.953 degeriyle (Be + CmO_2 + Saf Li + Be) malzeme yapısına sahip blanket, k_{eff}^{**} açısından en kritik durumu ifade etmektedir. Kritiklik açısından en az risk taşıyan blanket ise, 0.2968 degeriyle (ThO_2 + Saf Li + C) sıralamasına sahip olan blankettir.

4.3.10.2- Nötron Çoğaltıcı Katmanda Yer Alan Malzemeye Göre Degerlendirme

Nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan blanketlere göre, Be 'dan meydana gelen bir katmanın ilave edilmesi, k_{eff}^{**} degerinde, ilgili blanketlerin tümünde bir artışa yol açarken, Be katmanının yerine Pb konulursa, Be katmanlıya göre, k_{eff}^{**} degerinde bir azalma gözlenmektedir. Be katmanının ilavesi, ThO_2 yakıtlı ve grafit reflektörlü blanketlerde k_{eff}^{**} degerinin yaklaşık olarak ikiye katlanmasıyla sonuçlanırken, Be yerine Pb getirilmesi, yine en etkin olarak ThO_2 de olmak üzere, % 5-19 arasında bir bağıl düşmeye yol açmaktadır. Dikkat çeken diğer bir husus ta, k_{eff}^{**} degerinin gerek artması gerekse azalmasında, nötron çoğaltıcı katmanın etkisi açısından en az etkilenen yakıtın CmO_2 olduğudur (artmada % 8-13, azalmada % 6-8).

4.3.10.3- Tritiyum Üretim Malzemesi Açısından Degerlendirme

Li_2O yerine Saf Li 'un kullanılması, ilgili bütün bu blanketlerin, grafit reflektörlü olanlarında azalmaya, Be reflektörlü olanlarında ise artmaya yol açmaktadır. Grafit reflektörlü olanlardaki azalma % 0.13-6 seviyesinde kalırken, Be reflektörlü olanlardaki artma % 6.5-20 mertebesinde gerçekleşmektedir. Belirtilen değişim aralıklarında, yakıtlara yönelik bir düzgünlük belirlenmemektedir.

4.3.10.4- Reflektör Malzemesine Göre Değerlendirme

İlgili bütün blanketlerde, C yerine Be kullanılması, Be 'un (n,2n) reaksiyonu açısından bilinen etkinliği sebebiyle, k_{eff}^{**} değerinde artmaya yol açmaktadır. Üstelik bu artmalar bağıl olarak yüksek yüzdelerle de sahip olmaktadır. En düşük artış yaklaşık 15 değeriyle UO_2 yakıtlı Li_2O trityum üretim malzemeli ve Be nötron çoğaltıcı katmanı bulunan blanketler arasında ortaya çıkarken, en büyük artış yaklaşık % 106 (2 kat sayılık artıştan da fazla) değeriyle ThO_2 yakıtlı ve Saf Li trityum üretim malzemeli blanketler arasında tesbit edilmektedir.

4.3.11- k_{eff}^* ve k_{eff}^{**} Değerlerinin Blanketlere Yönelik Karşılaştırılması

k_{eff}^* ve k_{eff}^{**} efektif nötron çoğaltım katsayıları arasındaki esaslı fark, (n,2n) reaksiyonları sonucu ortaya çıkacak nötron artımının hesaba katılmasıyla ilgilidir. Bu yüzden, tüm blanketlerin tek tek karşılaştırılması yerine, sadece yakıtlara ait k_{eff} gruplarının toplu olarak karşılaştırılması yeterli olabilmektedir. Tablo-4.10 ve Tablo-4.11 de yer alan değerlere bu gözle bakıldığında, k_{eff}^* dan k_{eff}^{**} değerine geçişte, en büyük artışların ThO_2 yakıtlı blanketlerde, daha yumuşak artışların UO_2 yakıtlı blanketlerde ve en düşük artışların ise CmO_2 'li olanlarda ortaya çıktığı gözlenmektedir. Bu aynı zamanda, daha önceden de değinildiği gibi, (n,2n) reaksiyonu açısından ThO_2 'in UO_2 'ye, UO_2 'nin de CmO_2 'ye göre daha etkin olduğunun bir ifadesidir. Bu sonuca, Tablo-4.5 'deki, nötron çoğaltıcı katmanda ve reflektöründe Be ve Pb 'un bulunmadığı blanketlere ait (n,2n) değerleri, yakıtlar açısından karşılaştırıldıklarında da varmak mümkün olmaktadır. Tablo-4.11 'deki yakıt grupları, Tablo-4.10 'dakilerle karşılaştırıldıklarında, ThO_2 yakıtlı blanketlerdeki k_{eff}^* ile k_{eff}^{**} arasındaki artış katsayısının 2.6-10.5 arasında değiştiği, ve bu katsayının UO_2 yakıtlı blanketlerde 1.23-3.11 arasında, CmO_2 yakıtlı blanketlerde ise 1.003-2.13 arasında kaldığı hesaplanabilmektedir.

4.4- Blanketlere Ait Nötronik Performansların Toplu Değerlendirilmesi

Bir alt bölümde, 4.1 numaralı alt bölümde verilen performans kriterlerinin her biri için bütün blanketlere ait nötronik performans değerleri olabildiğince geniş bir karşılaştırmaya tabi tutuldu ve bu karşılaştırmadan elde edilen sonuçlar tesbit edildi. Ancak, bu şekilde gerçekleştirilen bir değerlendirme sonucunda, bütün blanketleri bütün kriterler açısından, tüm değerlendirmeleri göz önüne alarak sıralamaya tabi tutmanın ve performansı en iyi olan blanketi tespit etmenin zorluğu ve pratik olmadığı ortadadır. Bu zorluğu yenmek üzere, kriterler açısından blanket etkinliklerini gösteren tablolar dikkate alınarak bir dizi aritmetik işlem aracılığı ile, en azından yakıt grupları itibarıyla, en iyi blanketin ortaya konması gerçekleştirilebilir.

4.4.1- Yakıt Grupları İtibarıyla En İyi Blanketlerin Seçimi

Yukarıda değinilen aritmetik işlemin ne şekilde gerçekleştirildiği şöylece özetlenebilir. Performans kriterlerinin her birine ait verilen tablodaki her bir yakıtta ait değerler sütünü dikkate alınır. Bu sütunda yer alan değerler 12 tane olup, nötron çoğaltıcı katman, trityum üretim bölgesi ve reflektör malzemelerindeki değişime karşı gelen ve o yakıtta ait performans değerlerini karakterize eden sayılardır. Bu 12 sayı arasında yer alan en büyük ve en küçük sayılarla bunlar arasındaki fark esas alınarak, ilgilenilen performans kriteri için her bir sayının, o sütundaki sayılara göre bir bağıl değerlendirme puanı hesaplanır. Örneğin, en büyük sayı için bu puan 1.00 ve en küçük sayı için 0.00 olur. Böyle bir hesaplama ile, bütün yakıtların her biri ve her bir performans kriteri için değerlendirme puanları hesap edilip toplanırlarsa her bir yakıtta ait, performans kriterlerinin bileşkesi olan 12 sayıya ulaşılır. Bu 12 sayı, artık, ilgili yakıt için, farklı 12 blanket yapısıyla eşleşen ve bileşke performansları belirleyen bir sayı dizisidir. Bu dizi içerisinden yapılacak büyüklük sıralaması, ilgili yakıt için en iyi ve en kötü blanket yapı sıralamasını da ortaya koymuş olur.

Belirli bir yakıt için, bu çalışmada kullanılan blankete ait en iyi yapıyı seçme işlemi yukarda anlatıldığı gibi basit olarak özetlendikten sonra, degerlendirmesi blanketlere göre bir alt bölümde yapılan performans kriterlerinin içerisinde önemli olanları, hybrid blanket fonksiyonları dikkate alınarak, seçilmek durumundadır. 4.1 numaralı alt bölümde verilen performans kriterleri arasında;

- T6+T7 toplamı, blanketin fusile yakıt veya trityum üretimini belirlemesi açısından,

- (n,γ) reaksiyon miktarı, fissile yakıt (^{233}U , ^{239}Pu , $^{242\text{m}}\text{Am}$ ve ^{245}Cm) üretimi açısından,

- (n,f) reaksiyon miktarı, bir yandan bölünme reaksiyonları sonucu blanket ortamındaki nötron popülasyonunu belirleme, diğer yandan aynı reaksiyonlar sonucu açığa çıkabilecek enerji miktarını hesaplayabilme açısından,

- M enerji çoğalım katsayısı, çekirdek bölünmeleri ve Li esaslı malzeme içerisinde meydana gelen reaksiyonlar sonucu, füzyon nötronu başına hybrid blanketteki enerji çoğalımının göstergesi olması açısından,

- k_{eff}^* efektif nötron çoğalım katsayısı da, hybrid blanket için birincil olarak düşünülen özelliklerden olan kritik-altı çalışmayı karakterize etmesi ve bunun mertebesini belirlemesi açısından, önem taşıyan kriterlerdir. Diğerleri arasından, bu düşüncelerle ayrılan bu beş kritere ait tablolar seçilip (Tablo-4.4, Tablo-4.6, Tablo-4.7, Tablo-4.9 ve Tablo-4.10) bu alt bölümün başında tarif edilen yöntem kullanılarak, her bir yakıt için hesaplanabilen bileşke degerlendirme puanları Tablo-4.12 de sıralanmıştır. Bu noktada belirtilmesi gereken bir husus olarak, ilk dört kritere ait degerlendirme puanlarının toplanmasına karşılık, beşinci kriter yani k_{eff}^* 'e ait degerlendirme puanının ilk dördünün toplamından çıkartıldığı söylenebilir. Bunun sebebi, ilk dört kritere ait degerlendirme puanlarından, büyük olanlarının ilgili blanketin iyilik derecesiyle doğru orantılılık, halbuki, k_{eff}^* için elde edilen degerlendirme puanlarından büyük olanlarının, hybrid blanketin kritik-altı olması istegi ile ters orantılılık arzemesidir. Ayrıca, aynı tabloda (Tablo-4.12), sağ tarafta yer alan ikinci sayı grubu, sadece ilk dört kriterle

ilgili değerlendirme puanları toplanarak elde edilen değerleri göstermektedir. k_{eff}^* 'in dikkate alınmaması, diğer kriterler yanında bu kriterin ikincil olması nedeniyledir. Diğer bir deyişle, bir hybrid blanket, kritik-altı olma şartını sağlayacak şekilde tasarlandığı için, k_{eff}^* , seçilen diğer kriterler yanında ikincil durumda kalır.

En iyi blanket yapısını bulmak üzere, seçilen kriterler, bir başka yaklaşımla değerlendirilerek değişik bir kriter grubu daha aşağıdaki gibi oluşturulabilir:

- (n,f) bölünme reaksiyonlarının önemi daha önce belirtilmişti;

- T6 + T7 + (n,γ) kriteri; T6 + T7 toplamı ile (n,γ) reaksiyon toplamı verdigi göre, birleştirilerek göz önüne alınabilir,

- M sayısı da yine daha önce belirtilen öneme sahiptir, ve son olarak diğer grupta da olduğu gibi,

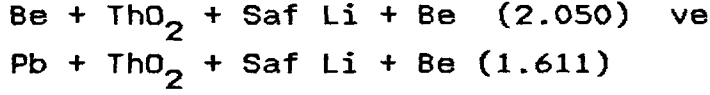
- k_{eff}^* efektif nötron çoğalma katsayısı. Bu şekilde yeni bir kriter grubu oluşturma, yukarıdaki sıralamadan da anlaşılacağı gibi, olaya, sadece, (n,f), toplam yakıt (fusile + fissile) miktarı ve M enerji çoğalım katsayısı ile ikincil bir öneme sahip k_{eff}^* açısından bakmayı sağlar.

Her bir yakıt için, değişik blanket yapılarına ait değerlendirme puanlarını hesaplama işlemi, bu yeni dört kritere uygulanarak Tablo-4.13 de yer alan değerler elde edilmiştir. Bu tabloda da yine sağ tarafta yer alan ikinci sayı gurubu, Tablo-4.12'dekine benzer olarak, sadece ilk üç kriter ((n,f), T6 + T7 + (n,γ) ve M) alınarak veya k_{eff}^* dışlanarak elde edilen değerlendirme puanlarını göstermektedir. Bu son iki tablonun değerlendirilmesi aşağıdaki alt bölümde verilmiştir.

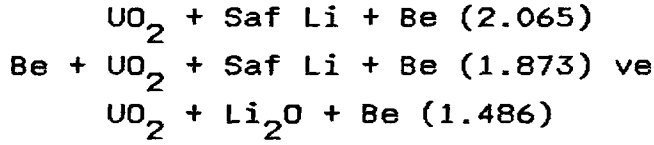
4.4.2- Kullanılan Yakıtlara Ait En İyi Nötronik Performansa Sahip Hybrid Blanket Yapısının Seçimi

Nötronik performansı en iyi olan blanketin seçimi için bir önceki alt bölümde hazırlanan tablolar göz önüne alınacaktır. Tablo-4.12 'nin ilk kısmındaki değerler incelendiğinde; ThO_2 yakıtlı blanketler içersinde 2.086 toplam değerlendirme puanıyla

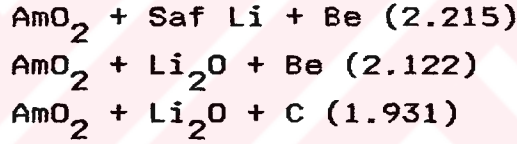
nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan ($\text{ThO}_2 + \text{Saf Li} + \text{Be}$) yapısındaki blanketin en iyi durumda olduğu, bunu takip eden diğer iki blanketin



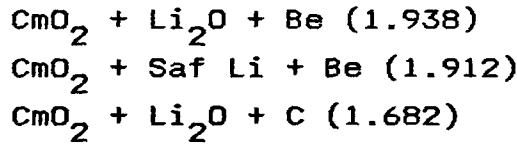
yapısındaki blanketler olduğuna tesbit edilmektedir. Benzer incelemeyle, UO_2 yakıtlı blanketler arasında ilk üç sırayı;



blanketlerinin sağladığı görülmektedir. AmO_2 yakıtlı blanketler arasındaki sıralamanın;



şeklinde ve CmO_2 yakıtlı blanketler arasındaki sıralamanın ise;



şeklinde olduğu görülmektedir. Tesbit edilen bu ilk üç sıralamalar ve değer tablosu tüm olarak dikkate alındığında yapılacak değerlendirme ise şöylece verilebilirler:

Dört yakıt içersinde, ilk üçü için birinci sırayı aynı blanketlerin alması dikkat çekicidir. CmO_2 için de, ilk üçü için tebit edilen blanket yapısında sadece, Saf Li yerine Li_2O gelmektedir. Yine tablodan gözlenebilen diğer bir özellik, değerlendirme puanları toplamı itibariyle en son sırada yer alan blanketlerin, genel olarak nötron çoğaltıcı katmanı Pb olan blanketler olduğudur. Pb yerine, nötron çoğaltıcı katmanında Be

bulunan blanketler ise orta sıralarda yer almaktadır. Yukarıda belirtilen genelleme içerisinde, istisna olarak, (Be + Yakıt + Saf Li + Be) ve (Pb + ThO₂ + Saf Li + Be) blanketleri görülmektedir. Bu istisnaların ilkinde, Saf Li 'un yanısıra Be nötron çoğaltıcı katman ve Be reflektör, bu blanketi, klasik yakıtlar içinde ikinci sıraya çıkarırken, aktinid yakıtlar için dördüncü ve beşinci sıralarda yer almasına neden olmuştur. İkinci istisnada ise, Pb 'un Be 'a göre olumsuz etkisine rağmen, Saf Li ve Be 'un ortak etkisi, söz konusu blanketi, ThO₂ yakıtlı olanlar içerisinde üçüncü sıraya yükseltmiştir.

Tablo-4.12 'ün ikinci kısmına, yani k_{eff}^* dikkate alınmadan yapılan değerlendirme puanlarının yer aldığı tabloya bakılacak olursa; tablonun ilk kısmında yer alan sıralamaya göre, daha bir netleşme göze çarpmaktadır. Bütün yakıtlar için, bir tek istisnasıyla, sıralamada ilk dört sırayı alan blanketler, nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan blanketler olarak tesbit edilmektedir. Bunun yanısıra, Pb nötron çoğaltıcı katmanlı blanketlerin son sıralara doğru biraz daha kaydığı tesbit edilmektedir. ThO₂, UO₂ ve AmO₂ yakıtlı blanketler içerisinde yine birinci sırayı

Yakıt + Saf Li + Be

yapısındaki blanketlerin aldığı, CmO₂ için de yine, tablonun ilk kısmında olduğu gibi,

CmO₂ + Li₂O + Be

yapısıyla tanımlanan blanketin ilk sırada yer aldığı gözlenmektedir. Denilebilir ki, değerlendirme puanları toplamından k_{eff}^* 'in çıkartılması, blanketin iyilik sıralamasını, nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan blanketler tarafına götürmüştür.

Tablo-4.12 'nin ikinci kısmına ait göze çarpan tek istisnai durum, ilk kısımda da belirlenen bir durum olarak, (Be + Yakıt + Saf Li + Be) yapısındaki blanketlerin, ilk dört sıralamanın hemen arkasında yer almasıdır. Bu belirlenen özellikte, Be 'un ve Saf Li 'un ortak etkisini göstermektedir.

Değerlendirme puanlarının hesabında kullanılan kriter sayısı-

nın bir azaltılarak (n, f) , $T6 + T7 + (n, \gamma)$ reaksiyon miktarlarına ve M sayısına (ve k_{eff}^* sayısına) göre hazırlanan Tablo-4.13 'deki degerler de, ana hatlarıyla Tablo-4.12 'deki durumu çok az değişiklikle hemen hemen yansıtmaktadır. Öncelikle, tablonun ilk kısmında, en iyi blanket yapısının bütün yakıtlar için (Yakıt + Saf Li + Be) yapısındaki blanket için ortaya çıktığı görülmektedir. Bunun dışında, klasik yakıtlarda daha az fakat aktinid yakıtlarda daha belirgin olarak, yakıtlara göre sıralamada ilk sıralar nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan blanketlere kayarken, Be ve Pb katmanlı blanketler öncelik açısından sıralamayı hemen hemen eşdeğer bir şekilde paylaşmaktadırlar. İlk kısım degerler arasında yine (Pb + Yakıt + Saf Li + Be) blanketleri, nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan blanketlerin arkasından sıralamaya girmektedir.

Tablonun ikinci kısmında yer alan degerlerde dikkati çeken en önemli özellik, nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan blanketlerin tam bir netlikle, Tablo-4.12 ve Tablo-4.13 'e yönelik degerlendirmeler sonucunda ilk defa, ilk dört sırayı almalarıdır. Bu kısımdaki sıralamada, birinci sırada yer alan blanketler, Tablo-4.12 'nin her iki kısmı için geçerli olan birincilerdir. İlk dördün arkasından yine (Pb + Yakıt + Saf Li + Be) ve (Be + Yakıt + Saf Li + Be) yapısına sahip blanketler gelmekte, Be ve Pb 'dan çoğaltıcı katmanlara sahip blanketler açısından sıraların yaklaşık olarak eşdeğer bir şekilde paylaşıldığı gözlenmektedir.

Özet olarak denilebilir ki; belirlenen kriterler açısından en iyi nötronik performansa sahip blanket yapısı, bütün yakıtlar için ortak olarak; nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan ve Be reflektörlü blanketler olup, ThO_2 , UO_2 ve AmO_2 için Saf Li, CmO_2 için ise Li_2O en iyi performansa götüren trityum üretim malzemesi olmaktadır. Nötron çoğaltıcı katman ilavesiyle, blanketlerin nötronik performansı giderek düşerken, bu düşme içerisinde, Li_2O ve Saf Li 'un fonksiyonları, nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan blanketlerdekinin tersine dönmekte; yani, Li_2O , Saf Li 'a göre daha iyi nötronik performansa götüren etken olmaktadır. Reflektör malzemesi olarak ta, Be, C 'a göre, hemen hemen bütün blanketlerde daha iyi nötronik performans sağlamaktadır.

4.5- Reaksiyon Üretim Yoğunluklarının Hesaplanması

4.3 numaralı alt bölümde, nötronik performansı belirleyen kriterlerin her birisi için, bütün blanketlere ait verilen değerlendirmelerde karşılaştırılmak durumunda olan değerler hacme göre integre edilerek, birim zamanda ortaya çıkan miktarları göstermekteydi. Dolayısıyla, verilen değerler, blanketin tümü itibariyle, ya yakıt bölgesi veya bir diğer bölge içerisinde meydana gelen toplam reaksiyon miktarı olarak hesaplandı. ANISN kodu kullanılarak yapılan hesaplamalar, yukarıda değinilen, hacim integrali alınmamış birim zamandaki reaksiyon miktarlarını verdiği gibi, hacim integrasyonu alınmış, birim hacim başına ve birim zamanda ortaya çıkan reaksiyon miktarılarını da vermek durumundadır. Böyle bir durum, reaksiyon miktarlarının geometrik parametreye bağlı olarak nasıl değiştiğini de göstermek durumdadır. Böylece, geometrinin fonksiyonu olarak, reaksiyon miktarı değişimi incelenebilir. Bu şekilde, incelenecek olan reaksiyon miktarları, birim hacim başına değerlendirildikleri için ilgili reaksiyon 'a ait "Reaksiyon Yoğunluğu" veya, ilgili reaksiyon sonucunda, yeni bir çekirdek üretimi söz konusu oluyorsa "Üretim Yoğunluğu" ismini de almak durumundadırlar.

Çalışmada kullanılan ve daha önceki alt bölümlerde değerlendirilmeleri yapıp, seçilmiş olan blanketler için, yukarıda belirtilen reaksiyon ve/veya üretim yoğunluklarını geometrinin fonksiyonu olarak incelemek ayrı bir öneme sahip olacaktır.

Yakıtlara göre en iyi bileşke nötronik performansa sahip blanket yapıları bir kez daha sıralanırsa; ilgili blanketler

- ThO_2 yakıtlılardan
 $\text{ThO}_2 + \text{Saf Li} + \text{Be}$ (13. Blanket)
- UO_2 'li yakıtlılardan
 $\text{UO}_2 + \text{Saf Li} + \text{Be}$ (24. Blanket)
- AmO_2 'li yakıtlılardan,
 $\text{AmO}_2 + \text{Saf Li} + \text{Be}$ (36. Blanketi)

- CmO_2 'li yakıtlılardan
 $\text{CmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{Be}$ (46. Balenkett)

şeklinde olur. Bu blanketler için, geometrinin (yarıçapın) fonksiyonu olarak çizilebilecek büyüklükler ise;

- Yakıt bölgesi için;

$(\nu\sigma_f)$ nötron üretim yoğunluğu ve (n,γ) fissile yakıt üretim yoğunluğu

- Tritiyum Üretim Bölgesi için;

T6, T7 ve toplam trityum (fusile) üretim (T6 + T7) yoğunlukları

- Bütün blanket ortamı için ortalama enerji (Eor) değerleri

Seçilen blanketlere ait yukarıda tebit edilen büyüklüklerin, yarıçapın fonksiyonu olarak değişimleri, Şekil-4.1, Şekil-4.2, Şekil-4.3 ve Şekil-4.4 'de grafik olarak verilmiştir.

4.5.1- Üretim Yoğunluğu Egrilerine Ait Şekillerin Ortak Değerlendirilmesi:

Digerlerine de değerlendirme kolaylığı getirebilmesi açısından ilk önce ortalama enerji (Eor) egrisi göz önüne alınabilir. Yarıçap değeri arttıkça, ortalama enerjinin düştüğü açık olarak gözlenmektedir. Bu, esas olarak, ilk çidardan itibaren, nötronların, buldukları ortam çekirdekleriyle yaptıkları çarpışma reaksiyonlarıyla, enerjilerinin düşmesi sonucudur. Tritiyum üretim bölgesinin ortalarında bir tepe noktasından geçmesi, bu bölge içerisinde Li ile girdikleri yutulma reaksiyonları sonucudur. ${}^6\text{Li}$ ile, esas olarak düşük enerjili nötronlar reaksiyon 'a girdiğinden, geri kalan nötronlar ağırlıklı olarak, yüksek enerjilidir ve Eor egrisinin bir lokal max den geçmesini temin ederler. Bu davranışın tersi bir davranış, reflektör bölgesi için geçerlidir. Reflektörde, ilerleyen nötronların enerjisi, elastik çarpışmalarla, bölge ortasında en üst düzeyde modere edildikleri için, lokal minimum noktasının ortaya çıkması da anlam kazanmış olur.

Tritiyum üretim bölgeleri itibariyle, Eor egrisinin tersi bir davranış T6 üretim yoğunluğu için geçerlidir ve şekillerden bu durum açık olarak gözlenebilmektedir. ${}^7\text{Li}$ 'nin ise ağırlıklı olarak, yüksek enerjili nötronlarla reaksiyona girmesi sebebiyle, T7 'ye ait üretim yoğunluğu egrilerinin şiddeti, artan yarıçap ve azalan nötron enerjisiyle birlikte azalmaktadır. Bu durum da yine egrilerden netlikle görülebilmektedir.

4.2 numaralı alt bölümde gerçekleştirilen geometri optimizasyonunda, tritiyum üretim bölgesinin katmanlı bir yapıya sahip olarak sonuçlandırılmasının sebebi de, yukarıdaki açıklama olmaktadır. Çünkü, katmanlı bir yapı halinde dağıtılan ve içersinde ${}^6\text{Li}$ bulunduran malzeme, bu sayede daha çok modere edilmiş veya enerjisi mümkün mertebeye yumuşatılmış nötron popülasyonu ile karşılaşabilmektedir. Hatta, Li bölgeleri arasında yer alan reflektör malzemesi de, nötron yumuşamasını arttırarak sözü edilen T6 üretimini kolaylaştırmaktadır.

Yakıt bölgesinde yer alan egrilerden, nötron üretim yoğunluğu egrileri, yarıçap değeri arttıkça düşme göstermektedir. Bu da, ilk cıdardan itibaren, nötron enerjisinin düşmesinin ve bu yüzden de, ilgili yakıtların her birisi için, (n,f) tesir kesit değerlerinin azalmasıyla açıklanabilecek bir sonuçtur. Bu aynı zamanda, fissile yakıt üretimini belirleyen (n,γ) reaksiyon yoğunluğunun da artmasıyla eşleşen bir durumdur. Çünkü, azalan nötron enerjisiyle birlikte, fisyon (bölünme) enerji aralığından uzaklaşmaktadır ve rezonans enerji bölgesine geçilmektedir ki, bu enerji bölgesi için ağır çekirdeklerde hakim olan reaksiyon türü (n,γ) reaksiyonudur.

4.5.2- Üretim Yoğunluğu Egrilerinin Mukayeseli Değerlendirilmeleri

Her bir yakıt için çizilen reaksiyon (üretim) yoğunluklarına ait egriler, her bir parametre için bütün yakıtları gösterecek şekilde birleştirilebilir. Böylece, her bir üretim yoğunluğuna farklı yakıtların etkisi gözlenebilir. Bu amaçla çizilen egriler Şekil-4.5 'te Eor ile birlikte fissile yakıt üretim yoğunluklarını, Şekil-4.6 'da Eor ile birlikte nötron üretim yoğunluklarını (NÜY) ve Şekil-4.7 'de de, Eor ile birlikte Toplam Tritiyum

Üretim Yoğunluklarını (TTÜY) göstermektedir. Yakıt bölgesinde 3 sıra yakıt elemanı bulunduran ve bu yüzden, diğer yakıtlarla net bir karşılaştırma imkanı sağlayamayacak olması dolayısıyla, CmO_2 yakıtlı blanketler, bu şekillerde göz önüne alınmamıştır. Şekil-4.5 de, ortalama nötron enerjisi azaldıkça, (n,γ) reaksiyonu ve dolayısıyla fissile yakıt (^{233}U , ^{239}Pu , $^{242\text{m}}\text{Am}$) üretiminin arttığı gözlenmektedir. Bu durum, daha önce de değinildiği gibi, azalan nötron enerjisiyle birlikte, rezonans bölgesine girme ve (n,γ) yutulmalarının artmasıyla açıklanabilir. Yine şekil üzerinden UO_2 yakıtlı blanketteki Eor'un ThO_2 'liye göre daha düşük bir seviyede yer almasına rağmen, ^{239}Pu üretiminin, ^{233}U üretiminden ihmal edilebilecek mertebede fazla olması, ^{238}U 'e ait (n,γ) reaksiyonu etki kesit değerinin ^{232}Th 'ninkine göre çok az büyük olmasındandır. $^{242\text{m}}\text{Am}$ 'nin üretim miktarının diğerlerinin yaklaşık $(1/3)$ 'ü seviyesinde gitmesinin sebebi ise, ^{241}Am den (n,γ) ile elde edilecek $^{242\text{m}}\text{Am}$ miktarının 4.3.5.2 numaralı alt bölümde yapılan açıklamaya uygun olarak çok düşük kalmasıdır.

Şekil-4.6 da aynı blanketler için (CmO_2 hariç) Eor ile birlikte nötron üretim yoğunluklarının (NÜY) yarıçapla değişim eğrileri yer almaktadır. Bu şekil üzerinden gözlenebilen en önemli nokta, AmO_2 'in diğer yakıtlara göre, nötron üretim yoğunluğu açısından sahip olduğu üstünlüktür. UO_2 'ye göre ortalama olarak, 5-6, ThO_2 'ye göre de yaklaşık 25 civarında bir artış katsayısı şekil üzerinden gözlenmektedir. Bu tesbitin diğer bir göstergesi de, Eor eğrilerinin yukarıdan aşağıya ThO_2 , UO_2 ve AmO_2 şeklinde sıralanmalarına karşılık, NÜY eğrileri bu sıralamanın tersiyle sıralanmaktadır. Ayrıca, NÜY eğrilerinin giderek düşmesi, Eor eğrilerinin yine giderek düşmesiyle paralellik arzeden bir durumdur ve (n,f) reaksiyonu için ilgili etki kesit değerlerinin enerjiye bağlılığının göstergesidir.

Şekil-4.7 'de ise, yakıt bölgesinin dışında kalan trityum üretimi ve reflektör bölgesinde, her bir blanketteki Eor ve Toplam trityum üretimi ($T6 + T7$) yoğunluklarına ait eğriler görülmektedir. Bu egriler için, üzerinde durularak söylenebilecek özellik; $(T6 + T7)$ toplamında $T6$ 'nın baskın faktör olması sebebiyle, Eor eğrileri içersinde daha düşük değerli olana,

daha yüksek (T6 + T7) toplam üretim miktarının karşı gelmesidir. Tabiiyle, egrilerden de görüleceği gibi, bu ifadenin tersi de geçerlidir. Yani en üstteki Eor egrisi ThO_2 'ye aittir ve ThO_2 'nin toplam trityum üretim yoğunluğu, diğerlerinden düşük kalmaktadır. UO_2 için geçerli egriler ise, hem Eor, hemde TTÜY olarak, diğerlerinin arasında yer almaktadır. Şekil-4.7 de, yine, CmO_2 'e ait egriler, daha önce açıklanan gerekçe sonucu yer almamıştır.

4.6- Blanket Spektrum Hesaplamaları

İncelenen blanketler içerisinde seçilen ve en iyi nötronik performansa sahip oldukları belirtilen, bir önceki alt bölümde de reaksiyon yoğunlukları açısından incelemeye tabi tutulan, hybrid blanketlerin önemli olabilecek geometrik noktalarında, nötron popülasyonunu incelemek, bu blanketler için ulaşılan sonuçları yorumlamada faydalı olabilir. Herhangi bir nükleer ortama ait nötron popülasyonunu incelemek, o ortam için nötron akı dağılımını elde etmekle mümkündür. Elde edilen akı dağılımı aynı zamanda, o ortama ait nötron spektrumu olarak ta bilinir.

Herhangi bir blanketin değişik bölgelerine ait nötron spektrumu, o blanket için geçerli olabilecek ve o blanket için söz konusu olan nötronik olayları açıklayıcı bir özellik taşıırken; değişik blanketlerin aynı geometrik konumlarına karşı gelen nötron spektrumları da farklı blanketlere ait özelliklerin bir-biriyle karşılaştırılmalarını mümkün kılar.

Belirlenen bu iki amaç için, nötronik performansı en iyi olarak seçilen blanketlerin herbirisi için, yakıt bölgesinin ilk cidar 'a komşu ve ortasındaki, diğer bölgelerin de (TÜB + Reflektör) ortasında yer alan intervallerde hesaplanan nötron spektrumları veya enerjiye göre nötron akılarının değişimleri sırasıyla Şekil-4.8, Şekil-4.9, Şekil-4.10 ve Şekil-4.11 'de çizilmiştir. Ayrıca, incelenen dört blanketin yakıt bölgelerinin orta intervallerine ait nötron spektrumları Şekil-4.12 'de biraraya toplanmıştır.

Şekil-4.8 de (ThO_2 + Saf Li + Be) blanketinin yakıt bölgesi-

nin başı ve ortası, trityum üretim bölgesinin ise sadece orta noktalarındaki nötron spektrumları görülmektedir. Şekildeki eğrilerden hemen gözlenebilen özellik olarak, yarıçap büyüdükçe veya yakıt bölgesinden, TÜB 'ne ilerledikçe nötron spektrumunun yumuşadığı veya bir başka deyişle, nötronların moderasyona uğradığı, söylenebilir. Hatta, son iki trityum üretim katmanının orta noktasına ait spektrumlarda, açık olarak nötron enerji seviye farkının, eğrilerinin paralel gidişleriyle birlikte ortaya çıktığı gözlenebilmektedir. Yine aynı şekil üzerinden, yakıt bölgesine ait her iki spektrum egrisinde de yüksek enerji bölgesinde ve 10-20 eV aralığındaki yakıt yutulmaları sonucu ortaya çıkan spektrum düşmeleri dikkat çekmektedir.

Şekil-4.9 da (UO_2 + Saf Li + Be) blanketine ait, Şekil-4.8 'de olduğu gibi, elde edilmiş olan nötron spektrumları görülmektedir. Spektrum yumuşaması, yarıçap arttıkça bu blankette de açık olarak gözlenmekte ve Th 'lu olana göre kritik enerji bölgesinde daha şiddetli bir yutulmaya sahip UO_2 için 5-10 eV arasındaki düşme dikkat çekmektedir. UO_2 yakıtlı bu blankette dikkat çeken diğer bir nokta da; yüksek enerji bölgesinde, 2. ve 3. trityum üretme katmanlarına ait nötron dağılımlarının, düşük enerjili bölgede ($E < 1$ eV) ise 1. ve 3. trityum üretme katmanlarına ait nötron dağılımının yaklaşık olarak eşdeğer seviyede kaldığıdır. Halbuki, ThO_2 de, 2. ve 3. TÜB 'ne ait nötron dağılımları şiddet farkıyla paralellik göstermekte idiler.

Şekil-4.10 da (AmO_2 + Saf Li + Be) blanketine ait nötron spektrumları, belirtilen konumlar için gözlenmektedir. Blanket boyunca dışa doğru, spektrum yumuşamasının yanısıra, ^{241}Am ve ^{243}Am ile birlikte, yakıt bölgesinde üretilen fissile ^{242m}Am çekirdeğinin de (n,f) yönünden etkin olması sebebiyle, düşük enerji bölgesindeki nötron dağılımı, yakıt bölgesi (özellikle bölge ortası) itibariyle, çok düşük olarak (10^{-16} n/cm²sn) gözlenmektedir. Her üç trityum üretim bölgesindeki nötron dağılımı ise, ThO_2 yakıtlı blanketteki aynı bölgeler için geçerli eğrilere benzemektedir.

Şekil-4.11 de (CmO_2 + Li_2O + Be) blanketi için elde edilen spektrum eğrileri gözlenmektedir. Gerek yakıt bölgesi, gerekse TÜB açısından, ThO_2 yakıtlı hybrid blanketlere benzerlik, şekil

üzerinden gözlenmektedir.

Şekil-4.12 de, yukarıda sözü edilen ve nötronik performansları en iyi olarak belirlenen dört blanketin, yakıt bölgesinin orta noktaları için çizilmiş nötron spektrumları yer almaktadır. Yakıtlara ait, spektrum farklılıklarının ortaya çıktığı bu şekilde, önemli olarak göze batan husus, AmO_2 'li yakıt bölgesinin, diğerlerine göre daha enerjik (hard spectra) bir nötron dağılımına sahip olmasıdır. Bu özelliği sebebiyle, Tablo-4.9 'dan da görülebileceği gibi, AmO_2 'li blanket en büyük (n,f) reaksiyon miktarına sahip olmaktadır. Ayrıca, diğer üç yakıtta, düşük enerji bölgesi yutulmaları $1 < E < 100$ (eV) aralığında rahatlıkla gözlenebilirken, AmO_2 'li blankette bu durum ortaya çıkmamaktadır.

Değişik blanketlerde trityum üretim bölgelerinde nötron spektrumunun nasıl değiştiğini gözleyebilmek amacıyla, sırasıyla, ThO_2 , UO_2 , AmO_2 ve CmO_2 'li blanketlerin 2.TÜB 'lerinde, bölgenin başlangıcı, ortası ve sonunda yer alan intervalleri için çizilen spektrum egrileri sırasıyla Şekil-4.13, Şekil-4.14, Şekil-4.15 ve Şekil-4.16 da yer almaktadır. Şekillerin hepsinde ortak olarak gözlenen özellik, trityum üretim bölgelerinin orta intervalleri için söz konusu olan spektrumun, bölgenin başı ve sonundaki spektruma göre daha sert olduğudur. Bunun anlamı, bölge ortasındaki nötron dağılımı daha enerjiktir, veya düşük enerjili nötronların sayısına göre çok düşüktür. Örneğin, ThO_2 'li blanketler için sözkonusu egrilerin, ortak olarak 10^{52} eV 'lık enerji değerine karşı gelen nötron akısı birim letarji ve bir füzyon nötronu için yaklaşık $2.5 \times 10^{-4} (\text{cm}^2 \text{sn})^{-1}$ değerinde iken, merkez intervaline ait egrinin, düşük enerji bölgesindeki en düşük değeri, yaklaşık 0.1 eV seviyesinde $2.5 \times 10^{-6} (\text{cm}^2 \text{sn})^{-1}$ mertebesinde-dir. Bu iki değer-in oranı, yaklaşık 100 gibi bir sayı verir ki bu değer yüksek seviyeli ve düşük enerjili nötron miktarlarının oranı olarak yorumlanabilir. Egriler arasında spektrum sertliği açısından bir değerlendirmeye gidebilmek için ise, yukarıda belirlenen katsayının, diğer egriler için aldığı değeri bulmak gerekir. Örneğin, bölge başındaki

intervalle eşleşen spektrum için bu katsayı $2.5 \times 10^{-4} / 4.5 \times 10^{-5} \approx$

5.6, bölge sonundaki intervale eşleşen spektrum için aynı katsayı $2.5 \times 10^{-4} / 10^{-5} \approx 25$ şeklindedir. Bu spektrumların, merkezdeki spektrumla sertlik mukayesesi için, 100 katsayısının yanında, 5.6 ve 25 sayılarını mukayese etmek yeterli olur.

Bu son dört şeklin hepsinde gözlenen ve yukarıda rakamlarla da örneklenen diğer bir ortak özellik, bölge başındaki spektrumların, bölge sonundaki spektruma göre daha yumuşak olduğudur. Bu varılan sonuç, daha önce 4.5.2 numaralı alt bölümdeki Eor egrisi için yapılan değerlendirmeyle de paralellik arz etmektedir. Bu şekillere ait son bir husus; Şekil-4.9 da verilen ve UO_2 'li blanketin yakıt bölgesinin orta noktasına ait çizilen spektrumdaki yaklaşık 10 eV yutulma çukurunun, Şekil-4.14 de TÜB 'nin orta intervali için çizilen spektrumda, enerji değeri yaklaşık 700 eV 'a kaymış olarak gözlenmesidir.

4.7- Seçilmiş Blanketler İçin Yıllık Tritiyum ve Fissile Yakıt Üretimi

1000 MW (termal) değerindeki bir füzyon plazma gücü, ilk cıdara ulaşan (D-T) füzyon nötronları için esas alınarak, yıllık olarak, seçilmiş blanketlerde üretilmek durumunda olan toplam trityum üretimi ve fissile yakıt miktarı Tablo-4.14 de gösterilmiştir. Bu tablo'da toplam trityum üretiminin yanısıra, trityum açısından, füzyon reaksiyonunu yürütmek için gerekli olan trityumdan fazla olarak elde edilmek durumunda olan trityum miktarı da, ayrıca bir satır halinde gösterilmiştir. Tablodaki değerlerin hesaplanmasında kabul edilen diğer bir özellik te, blanketleri bulandıran enerji tesisine ait işletim faktörünün 0.75 olduğudur.

Tablo-4.1: Hybrid Blanket Geometri Optimizasyonu İçin Seçilen Geometrilere
ve Bunlara Ait Nötronik Performans Değerleri

Deg. Krit. ↓	ThO ₂ Yakıtlı Geometrilere					UO ₂ Yakıtlı Geometrilere				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T6	0.6590	0.6983	0.7144	0.7091	0.7082	0.8207	0.8707	0.8896	0.8839	0.8830
T7	0.1088	0.0886	0.0855	0.0784	0.0736	0.1120	0.0914	0.0882	0.0809	0.0761
T6+T7	0.7678	0.7869	0.7999	0.7875	0.7818	0.9327	0.9621	0.9778	0.9649	0.9591
n, 2n	0.1220	0.1218	0.1219	0.1219	0.1218	0.0748	0.0748	0.0748	0.0747	0.0747
n, γ	0.2310	0.2546	0.2512	0.2669	0.2685	0.2487	0.2768	0.2726	0.2917	0.2937
n, f	0.0366	0.0366	0.0366	0.0366	0.0366	0.1500	0.1507	0.1506	0.1510	0.1510
T6+T7 (n, γ)	0.9988	1.0414	1.0510	1.0544	1.0503	1.1814	1.2388	1.2504	1.2566	1.2527
M	1.7430	1.7563	1.7618	1.7599	1.7597	3.4066	3.4327	3.4376	3.4419	3.4420

Tablo-4.2: Çalışmada Kullanılan Hybrid Blanketlere Ait T6 Reaksiyon Miktarı Değerlerinin Değişimi.

NÇ	TÜB	Reflektör	Yakıt Bölgesi			
			ThO ₂	UO ₂	AmO ₂	CmO ₂
Be	Li ₂ O	C	7.08202E-01	8.82952E-01	1.44944E+00	1.67530E+00
		Be	8.78969E-01	1.06231E+00	1.67806E+00	1.94303E+00
	Saf Li	C	8.28631E-01	1.03000E+00	1.66312E+00	1.75230E+00
		Be	1.18196E+00	1.40685E+00	2.15182E+00	2.40937E+00
	Li ₂ O	C	6.58909E-01	7.58132E-01	9.92279E-01	1.26303E+00
		Be	7.90224E-01	8.95477E-01	1.16036E+00	1.55939E+00
Saf Li	C	7.90301E-01	9.04852E-01	1.16229E+00	1.43692E+00	
	Be	1.05791E+00	1.18797E+00	1.51092E+00	1.99878E+00	
Pb	Li ₂ O	C	7.71497E-01	8.94363E-01	1.26635E+00	1.40870E+00
		Be	9.02262E-01	1.03092E+00	1.43858E+00	1.70113E+00
	Saf Li	C	9.06143E-01	1.04664E+00	1.45959E+00	1.52908E+00
		Be	1.17863E+00	1.33471E+00	1.82521E+00	2.15182E+00

Tablo-4.3 : Çalışmada Kullanılan Hybrid Blanketlere Ait T7 Reaksiyon Miktarları Değerlerinin Değişimi.

NC	TÜB	Reflektör	Yakıt Bölgesi			
			ThO ₂	UO ₂	AmO ₂	CmO ₂
Be	Li ₂ O	C	7.36058E-02	7.60581E-02	9.38725E-02	1.70756E-01
		Be	7.28086E-02	7.52160E-02	9.27315E-02	1.69618E-01
	Saf Li	C	9.03717E-02	9.34432E-02	1.15223E-01	2.16035E-01
		Be	8.93091E-02	9.23029E-02	1.13628E-01	2.14773E-01
	Li ₂ O	C	5.34135E-02	5.49316E-02	6.54139E-02	1.32612E-01
		Be	5.26938E-02	5.41813E-02	6.44744E-02	1.31165E-01
Saf Li	C	6.51090E-02	6.70070E-02	7.98410E-02	1.63658E-01	
	Be	6.40860E-02	6.59298E-02	7.84548E-02	1.62316E-01	
Pb	Li ₂ O	C	4.87152E-02	5.02077E-02	6.15633E-02	1.22936E-01
		Be	4.81134E-02	4.95757E-02	6.06959E-02	1.21658E-01
	Saf Li	C	5.93746E-02	6.12391E-02	7.50805E-02	1.51138E-01
		Be	5.85552E-02	6.03665E-02	7.38109E-02	1.49542E-01

Tablo-4.4 : Çalışmada Kullanılan Hybrid Blanketlere Ait T6+T7 Toplam Tritiyum Üretim Miktarının Değişimi

NC	TÜB	Reflektör	Yakıt Bölgesi			
			ThO ₂	UD ₂	AmO ₂	CmO ₂
Be	Li ₂ O	C	7.81808E-01	9.59010E-01	1.54331E+00	1.84606E+00
		Be	9.51777E-01	1.13753E+00	1.77080E+00	2.11265E+00
	Saf Li	C	9.19003E-01	1.12344E+00	1.77834E+00	1.96834E+00
		Be	1.27127E+00	1.49915E+00	2.26545E+00	2.62414E+00
	Li ₂ O	C	7.12323E-01	8.13064E-01	1.05769E+00	1.39564E+00
		Be	8.42934E-01	9.49658E-01	1.22484E+00	1.69056E+00
Saf Li	C	8.55410E-01	9.71859E-01	1.24213E+00	1.60058E+00	
	Be	1.12199E+00	1.25390E+00	1.58937E+00	2.16109E+00	
Pb	Li ₂ O	C	8.20212E-01	9.44571E-01	1.32792E+00	1.53164E+00
		Be	9.50376E-01	1.08050E+00	1.49928E+00	1.82279E+00
	Saf Li	C	9.65518E-01	1.10787E+00	1.53467E+00	1.68022E+00
		Be	1.23718E+00	1.39507E+00	1.89902E+00	2.30136E+00

Tablo-4.5 : Çalışmada Kullanılan Hybrid Blanketlere Ait (n,2n) Reaksiyon Miktarının Değişimi

NÇ	TÜB	Reflektör	Yakıt Bölgesi			
			Th ₂	UO ₂	AmO ₂	CmO ₂
Be	Li ₂ O	C	1.21848E-01	7.47413E-02	-----	3.99073E-03
		Be	3.01234E-01	2.68846E-01	-----	2.94795E-01
	Saf Li	C	1.21464E-01	7.44829E-02	-----	3.91715E-03
		Be	4.05040E-01	3.66761E-01	-----	5.34969E-01
	Li ₂ O	C	4.05754E-01	3.84690E-01	-----	3.34969E-01
		Be	5.40247E-01	5.23295E-01	-----	6.43987E-01
Saf Li	C	4.04215E-01	3.83838E-01	-----	3.28941E-01	
	Be	6.13517E-01	5.98903E-01	-----	8.36184E-01	
Pb	Li ₂ O	C	2.95761E-01	2.70428E-01	-----	2.19462E-01
		Be	4.23313E-01	4.01284E-01	-----	5.15992E-01
	Saf Li	C	2.95408E-01	2.70143E-01	-----	2.18428E-01
		Be	4.93213E-01	4.72840E-01	-----	6.88663E-01

Tablo-4.6 : Çalışmada Kullanılan Hybrid Blanketlere Ait (n,γ) Reaksiyon Miktarının Değişimi

NC	TÜB	Reflektör	Yakıt Bölgesi			
			ThO ₂	UO ₂	AmO ₂	CmO ₂
Be	Li ₂ O	C	2.68535E-01	2.93687E-01	1.34559E-01	2.03608E-01
		Be	2.74802E-01	2.98288E-01	1.34252E-01	2.06739E-01
	Saf Li	C	2.48709E-01	2.71717E-01	1.21255E-01	1.65163E-01
		Be	2.69999E-01	2.91732E-01	1.25614E-01	1.88278E-01
	Li ₂ O	C	4.72700E-01	5.15528E-01	1.63389E-01	2.94667E-01
		Be	4.76969E-01	5.18597E-01	1.63289E-01	3.04685E-01
Saf Li	C	4.49841E-01	4.89512E-01	1.52716E-01	2.58466E-01	
	Be	4.65865E-01	5.04626E-01	1.55912E-01	2.98433E-01	
Pb	Li ₂ O	C	3.03694E-01	3.05473E-01	1.19371E-01	1.66714E-01
		Be	3.05417E-01	3.06266E-01	1.18411E-01	1.73554E-01
	Saf Li	C	2.84915E-01	2.86671E-01	1.09313E-01	1.52775E-01
		Be	2.98024E-01	2.99334E-01	1.11776E-01	1.78629E-01

Tablo-4.7 : Çalışmada Kullanılan Hybrid Blanketlere Ait (n,f) Reaksiyon Miktarının Değişimi

NÇ	TÜB	Reflektör	Yakıt Bölgesi			
			ThO ₂	UO ₂	AmO ₂	CmO ₂
Be	Li ₂ O	C	3.66151E-02	1.51037E-01	7.15209E-01	4.83531E-01
		Be	3.66571E-02	1.51227E-01	7.13331E-01	4.82714E-01
	Saf Li	C	3.62546E-02	1.47913E-01	6.77982E-01	4.02629E-01
		Be	3.63800E-02	1.48703E-01	6.78161E-01	4.06350E-01
	Li ₂ O	C	2.33483E-02	1.11521E-01	4.59433E-01	2.30229E-01
		Be	2.33717E-02	1.11602E-01	4.58405E-01	2.31405E-01
Saf Li	C	2.31076E-02	1.08786E-01	4.39393E-01	2.09319E-01	
	Be	2.31761E-02	1.09278E-01	4.39364E-01	2.11548E-01	
Pb	Li ₂ O	C	2.27267E-02	1.00749E-01	5.20025E-01	2.79032E-01
		Be	2.27523E-02	1.00757E-01	5.17604E-01	2.78987E-01
	Saf Li	C	2.24814E-02	9.83310E-02	4.93413E-01	2.44433E-01
		Be	2.25538E-02	9.86873E-02	4.91567E-01	2.47382E-01

Tablo-4.8 : Çalışmada Kullanılan Hybrid Blanketlere Ait ($T_6+T_7+(n,\gamma)$) Reak-siyon Miktarının Değişimi

NÇ	TÜB	Reflektör	Yakit Bölgesi			
			ThO ₂	UO ₂	AmO ₂	CmO ₂
Be	Li ₂ O	C	1.05034E+00	1.25270E+00	1.67787E+00	2.04967E+00
		Be	1.22658E+00	1.43582E+00	1.90505E+00	2.31939E+00
	Saf Li	C	1.16771E+00	1.39516E+00	1.89960E+00	2.13350E+00
		Be	1.54127E+00	1.79088E+00	2.39206E+00	2.81242E+00
	Li ₂ O	C	1.18502E+00	1.32859E+00	1.22107E+00	1.69031E+00
		Be	1.31990E+00	1.46825E+00	1.38813E+00	1.99524E+00
Saf Li	C	1.30525E+00	1.46137E+00	1.38485E+00	1.85904E+00	
	Be	1.58786E+00	1.75852E+00	1.74528E+00	2.45952E+00	
Pb	Li ₂ O	C	1.12391E+00	1.25004E+00	1.44729E+00	1.69835E+00
		Be	1.25579E+00	1.38676E+00	1.61769E+00	1.99634E+00
	Saf Li	C	1.25043E+00	1.39455E+00	1.64398E+00	1.83299E+00
		Be	1.53521E+00	1.69441E+00	2.01080E+00	2.47999E+00

Tablo-4.9 : Çalışmada Kullanılan Hybrid Blanketlere Ait M Enerji Çoğalım Katsayısı Miktarının Değişimi

NÇ	TÜB	Reflektör	Yakıt Bölgesi			
			ThO ₂	UO ₂	AmO ₂	CmO ₂
Be	Li ₂ O	C	1.75965E+00	3.44195E+00	1.16366E+01	8.42700E+00
		Be	1.81818E+00	3.50549E+00	1.16875E+01	8.50626E+00
	Saf Li	C	1.79540E+00	3.44753E+00	1.11810E+01	7.30559E+00
		Be	1.91706E+00	3.58659E+00	1.13494E+01	7.58131E+00
	Li ₂ O	C	1.55474E+00	2.83909E+00	7.85345E+00	4.69419E+00
		Be	1.59963E+00	2.88683E+00	7.89590E+00	4.81142E+00
Saf Li	C	1.59591E+00	2.85007E+00	7.62688E+00	4.45660E+00	
	Be	1.68768E+00	2.95311E+00	7.74475E+00	4.65383E+00	
Pb	Li ₂ O	C	1.58413E+00	2.73251E+00	8.80590E+00	5.43585E+00
		Be	1.62886E+00	2.77896E+00	8.83000E+00	5.53445E+00
	Saf Li	C	1.62633E+00	2.74988E+00	8.49399E+00	4.98593E+00
		Be	1.71981E+00	2.85267E+00	8.59186E+00	5.23906E+00

Tablo-4.10 : Çalışmada Kullanılan Hybrid Blanketlere Ait k_{eff} * Nötron Çoğalım Katsayısı Değerleri

NÇ	TÜB	Reflektör	Yakıt Bölgesi			
			ThO ₂	UO ₂	AmO ₂	CmO ₂
	Li ₂ O	C	1.14095E-01	3.31970E-01	7.28785E-01	6.42742E-01
		Be	1.14206E-01	3.32243E-01	7.28376E-01	6.42431E-01
	Saf Li	C	1.13338E-01	3.28181E-01	7.19244E-01	6.03190E-01
		Be	1.13654E-01	3.29215E-01	7.19390E-01	6.05279E-01
Be	Li ₂ O	C	7.29894E-02	2.57920E-01	6.29959E-01	4.63977E-01
		Be	7.30632E-02	2.58081E-01	6.29544E-01	4.65183E-01
	Saf Li	C	7.24409E-02	2.53942E-01	6.20512E-01	4.42408E-01
		Be	7.26437E-02	2.54732E-01	6.20577E-01	4.46834E-01
Pb	Li ₂ O	C	7.10036E-02	2.41668E-01	6.54559E-01	5.06802E-01
		Be	7.10808E-02	2.41731E-01	6.53653E-01	5.06831E-01
	Saf Li	C	7.04515E-02	2.37959E-01	6.43621E-01	4.76117E-01
		Be	7.06580E-02	2.38594E-01	6.42918E-01	4.78965E-01

Tablo-4.11 : Çalışmada Kullanılan Hybrid Blanketlere Ait k_{eff}^{**} Nötron Çoğalım Katsayısı Değerleri

NC	TÜB	Reflektör	Yakıt Bölgesi			
			ThO ₂	UO ₂	AmO ₂	CmO ₂
Be	Li ₂ O	C	2.97901E-01	4.11331E-01	-----	6.44676E-01
		Be	5.11543E-01	5.86195E-01	-----	7.71968E-01
	Saf Li	C	2.96831E-01	4.07886E-01	-----	6.05359E-01
		Be	6.12936E-01	6.59244E-01	-----	8.45013E-01
	Li ₂ O	C	5.99862E-01	6.44962E-01	-----	6.97813E-01
		Be	7.16239E-01	7.45444E-01	-----	8.58558E-01
Saf Li	C	5.98226E-01	6.42810E-01	-----	6.83910E-01	
	Be	7.71769E-01	7.93548E-01	-----	9.53398E-01	
Pb	Li ₂ O	C	4.86930E-01	5.41032E-01	-----	6.52710E-01
		Be	6.15695E-01	6.52111E-01	-----	8.09879E-01
	Saf Li	C	1.83810E-01	5.38902E-01	-----	6.32660E-01
		Be	1.81637E-01	7.05075E-01	-----	8.80787E-01

Tablo-4.12: Nümerik Hesaplamaları Yapılan Bütün Blanketlerin Toplam Tritiyum miktarı, (n, γ) , (n, f) , M ve k_{eff} , Kriterlerine Göre Hesaplanmış Nötronik Performans Değerlendirme Puanları. (Sag Tarafteki Değerler k_{eff}^* Dahil Edilmeden Hesaplanmıştır).

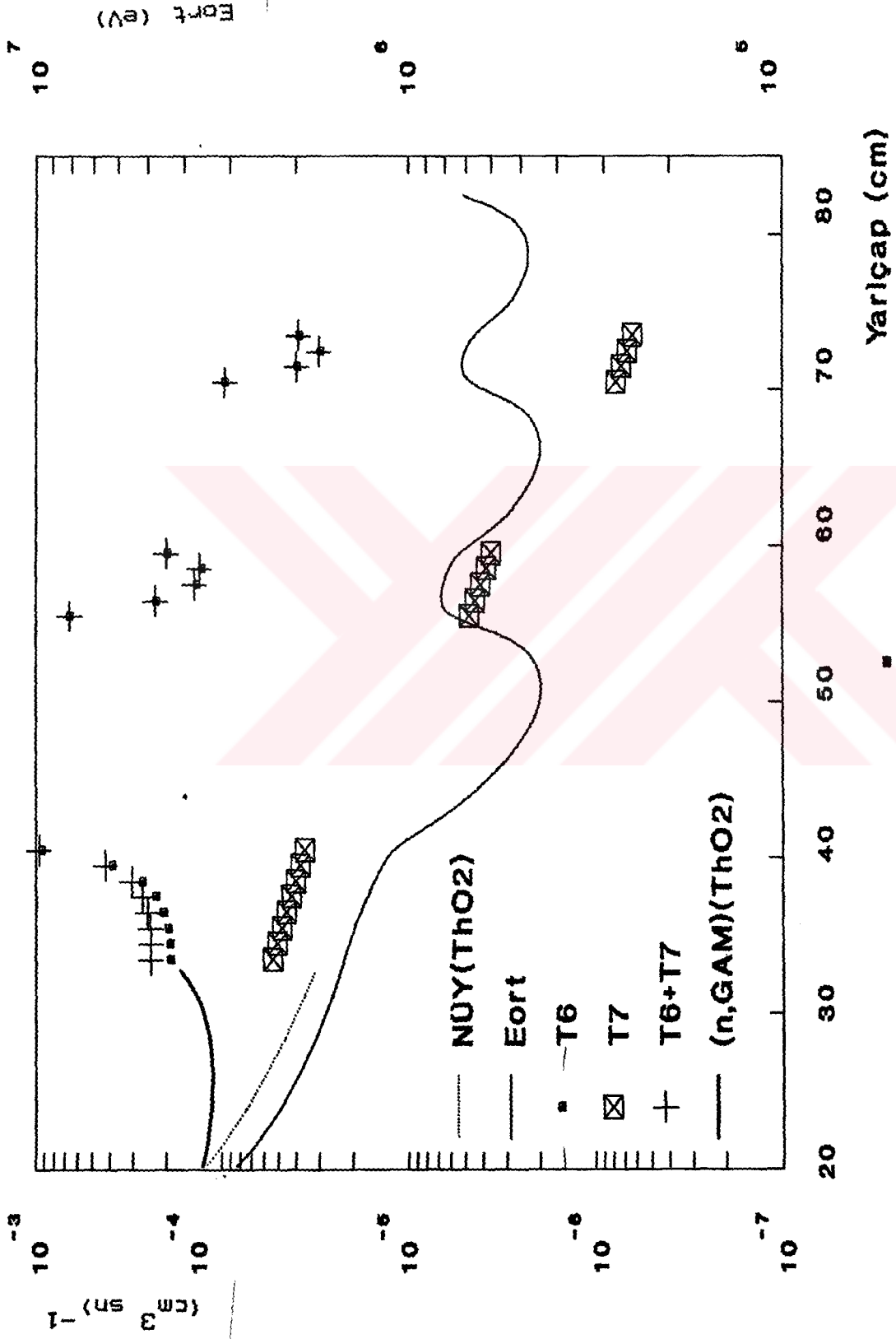
NC	TÜB	Reflektör	Yakıt Bölgesi				Yakıt Bölgesi			
			ThO ₂	UO ₂	AmO ₂	CmO ₂	ThO ₂	UO ₂	AmO ₂	CmO ₂
Be	Li ₂ O	C	0.777	1.132	1.856	1.682	1.774	2.129	2.856	2.268
		Be	1.269	1.486	2.048	1.938	2.269	2.486	3.044	2.936
	C	1.026	1.269	1.646	1.154	2.006	2.226	2.558	1.957	
	Be	2.086	2.065	2.171	1.912	3.073	3.033	3.084	2.725	
Be	Li ₂ O	C	0.984	1.150	1.042	0.961	1.042	1.362	1.129	1.069
		Be	1.361	1.418	1.188	1.295	1.421	1.631	1.271	1.409
	C	1.250	1.279	0.956	0.863	1.295	1.449	0.956	0.863	
	Be	2.050	1.873	1.330	1.617	2.100	2.051	1.331	1.639	
Pb	Li ₂ O	C	0.519	0.336	0.678	0.378	0.532	0.375	0.992	0.699
		Be	0.884	0.590	0.808	0.683	0.898	0.630	1.114	1.005
	C	0.810	0.511	0.592	0.323	0.810	0.511	0.805	0.491	
	Be	1.611	1.101	.963	1.057	1.616	1.108	1.170	1.239	

Tablo-4.13: Nümerik Hesaplamaları Yapılan Bütün Blanketlerin Toplam Tritiyum miktarı (fusile+fissile), (n,f), M ve k_{eff}^* Kriterlerine Göre Hesaplanmış Nötronik Performans Degerlendirme Puanları. (Sag Tarafteki Degerler k_{eff}^* Dahil Edilmeden Hesaplanmıştır).

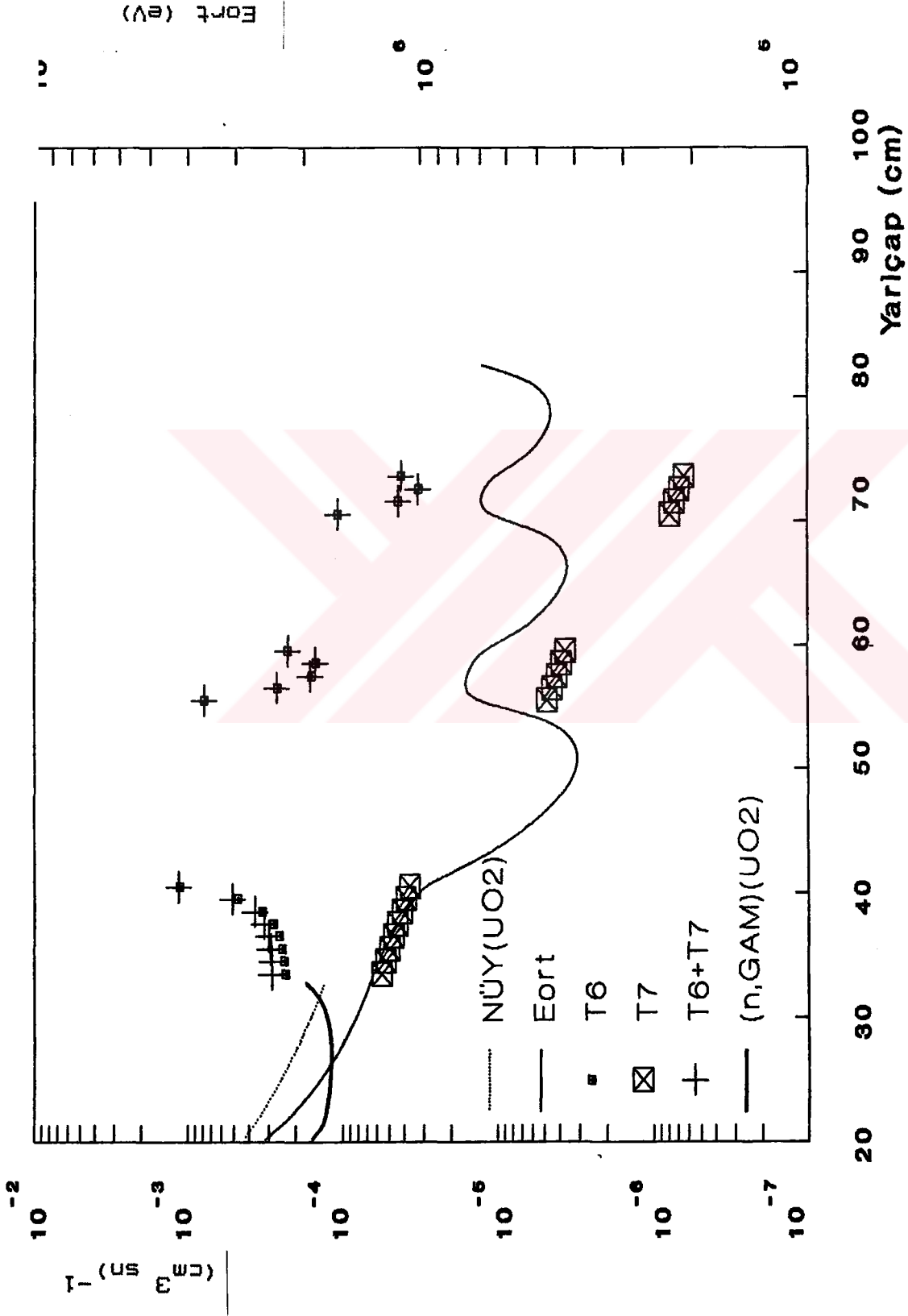
NC	TÜB	Reflektör	Yakit Bölgesi				Yakit Bölgesi			
			ThO ₂	UO ₂	AmO ₂	CmO ₂	ThO ₂	UO ₂	AmO ₂	CmO ₂
	Li ₂ O	C	0.566	0.835	1.377	1.300	1.563	1.832	2.377	2.300
		Be	1.055	1.249	1.581	1.560	2.055	2.249	2.577	2.558
		C	0.874	1.085	1.407	1.001	1.854	2.042	2.319	1.804
	Saf Li	Be	1.906	1.984	1.870	1.678	2.893	2.952	2.783	2.491
		C	0.254	0.307	0.042	0.027	0.312	0.519	0.129	0.135
		Be	0.628	0.622	0.195	0.327	0.688	0.835	0.278	0.441
Be	Li ₂ O	C	0.587	0.557	0.140	0.150	0.632	0.727	0.140	0.150
		Be	1.366	1.227	0.476	0.721	1.416	1.405	0.477	0.743
		C	0.222	0.007	0.461	0.182	0.235	0.046	0.775	0.503
	Li ₂ O	Be	0.592	0.313	0.613	0.471	0.606	0.353	0.919	0.793
		C	0.570	0.287	0.558	0.218	0.570	0.287	0.771	0.386
		Be	1.358	0.963	0.894	0.854	1.363	0.970	1.101	1.036
Pb	Saf Li	Be	1.358	0.963	0.894	0.854	1.363	0.970	1.101	1.036
		C	0.570	0.287	0.558	0.218	0.570	0.287	0.771	0.386
		Be	1.358	0.963	0.894	0.854	1.363	0.970	1.101	1.036

Tablo-4.14: 1000 MW (thermal) 'lık Füzyon Plazma Gücü İçin, Seçilen Blanketlerdeki Üretilen Tritiyum ve Fissile Yakıt Miktarları (kg/yıl olarak)

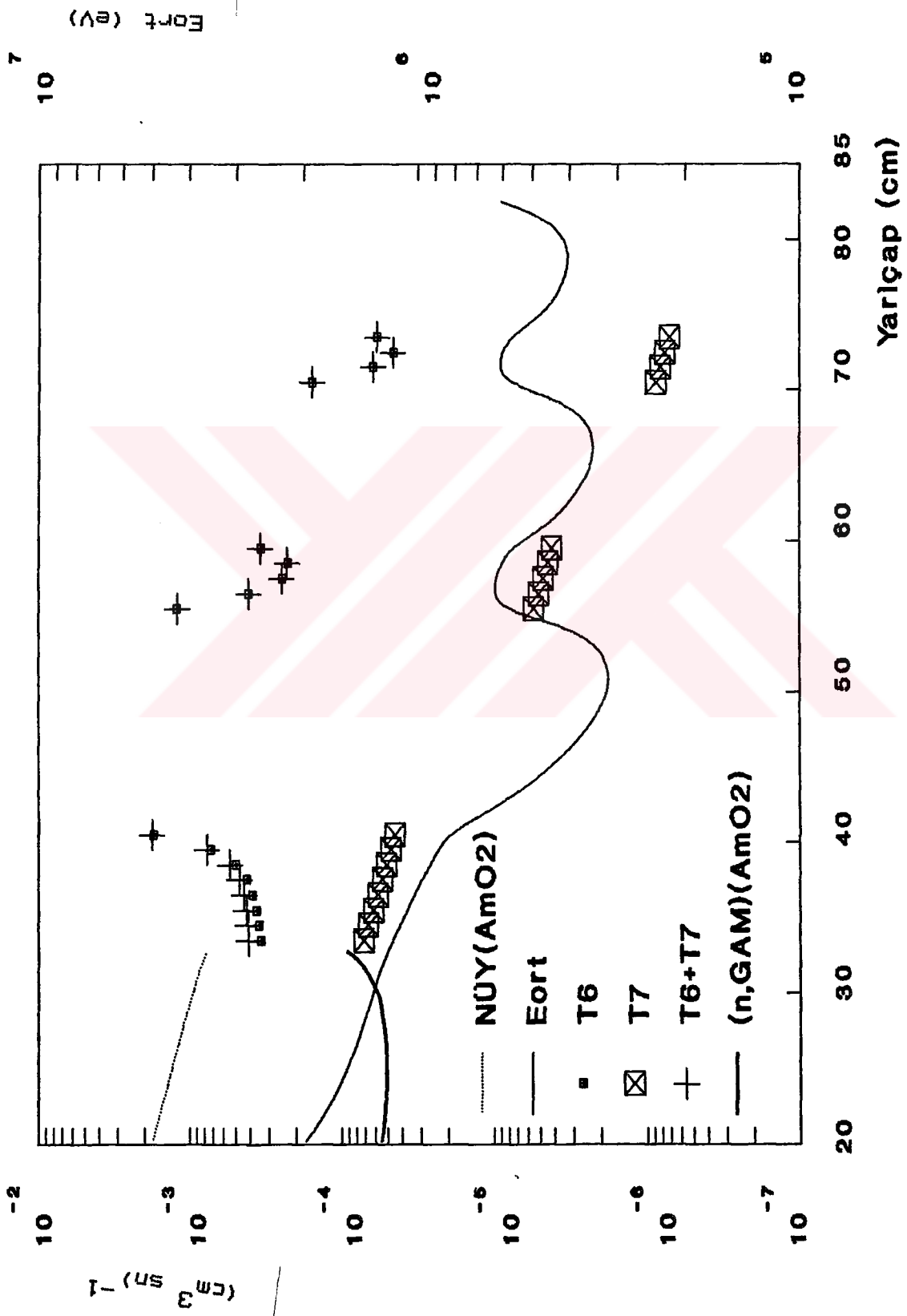
Üretilen Yakıt (Fusile, Fissile)	Seçilmiş Blanket Yakıtları			
	ThO ₂	UO ₂	AmO ₂	CmO ₂
Toplam Tritiyum	52.67	62.11	94.46	87.52
Fazlalık Tritiyum	11.24	20.68	52.76	46.09
²³³ U	864.34	-----	-----	-----
²³⁹ Pu	-----	958.00	-----	-----
^{242m} Am	-----	-----	417.58	-----
²⁴⁵ Cm	-----	-----	-----	695.79



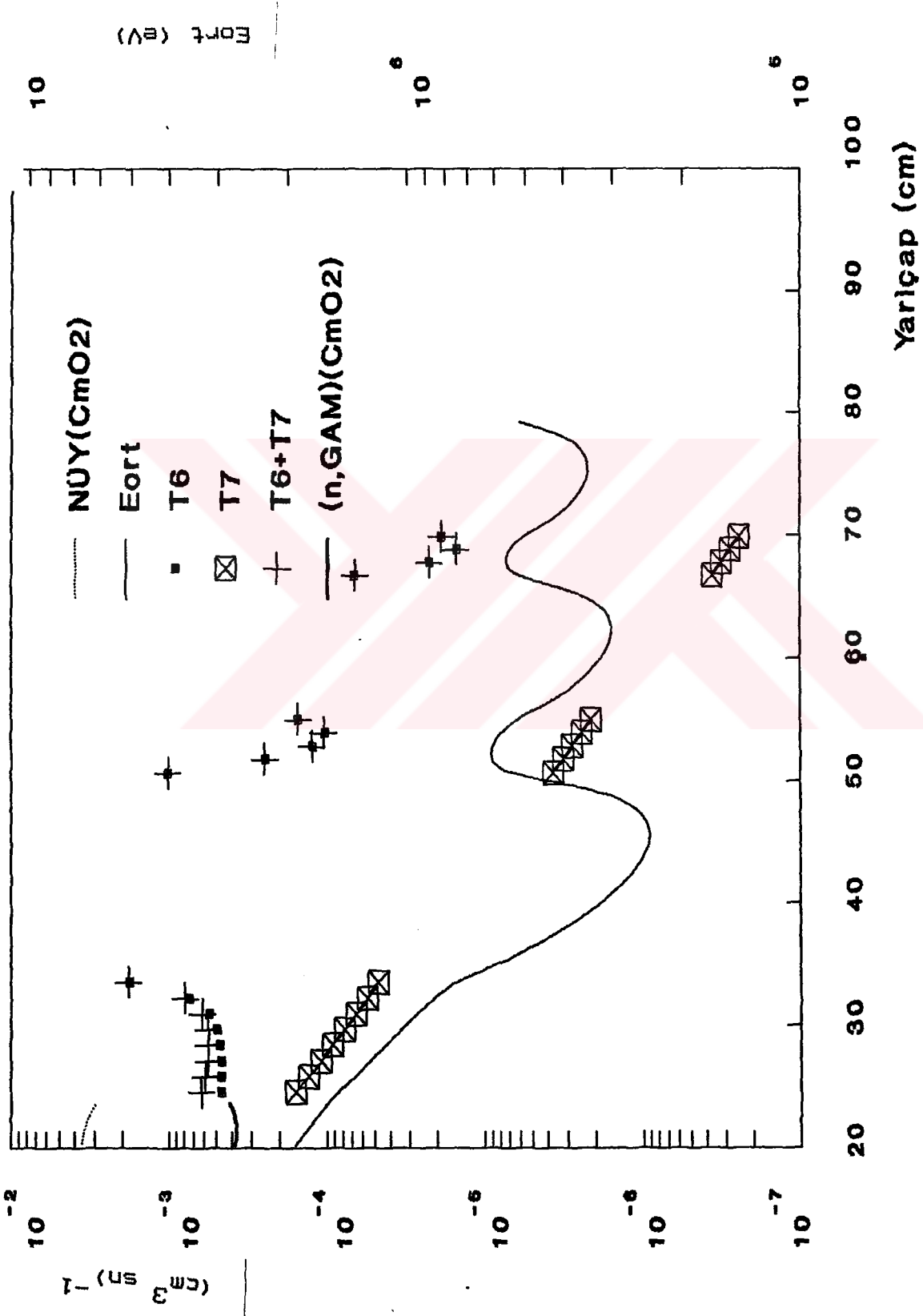
Şekil-4.1: (ThO₂+Saf Li+Be) Blanketine (13.Blanket) Ait Yoğunluk ve Ortalama Enerjinin (Eort) Blanket Yarıçapına Göre Değişimi



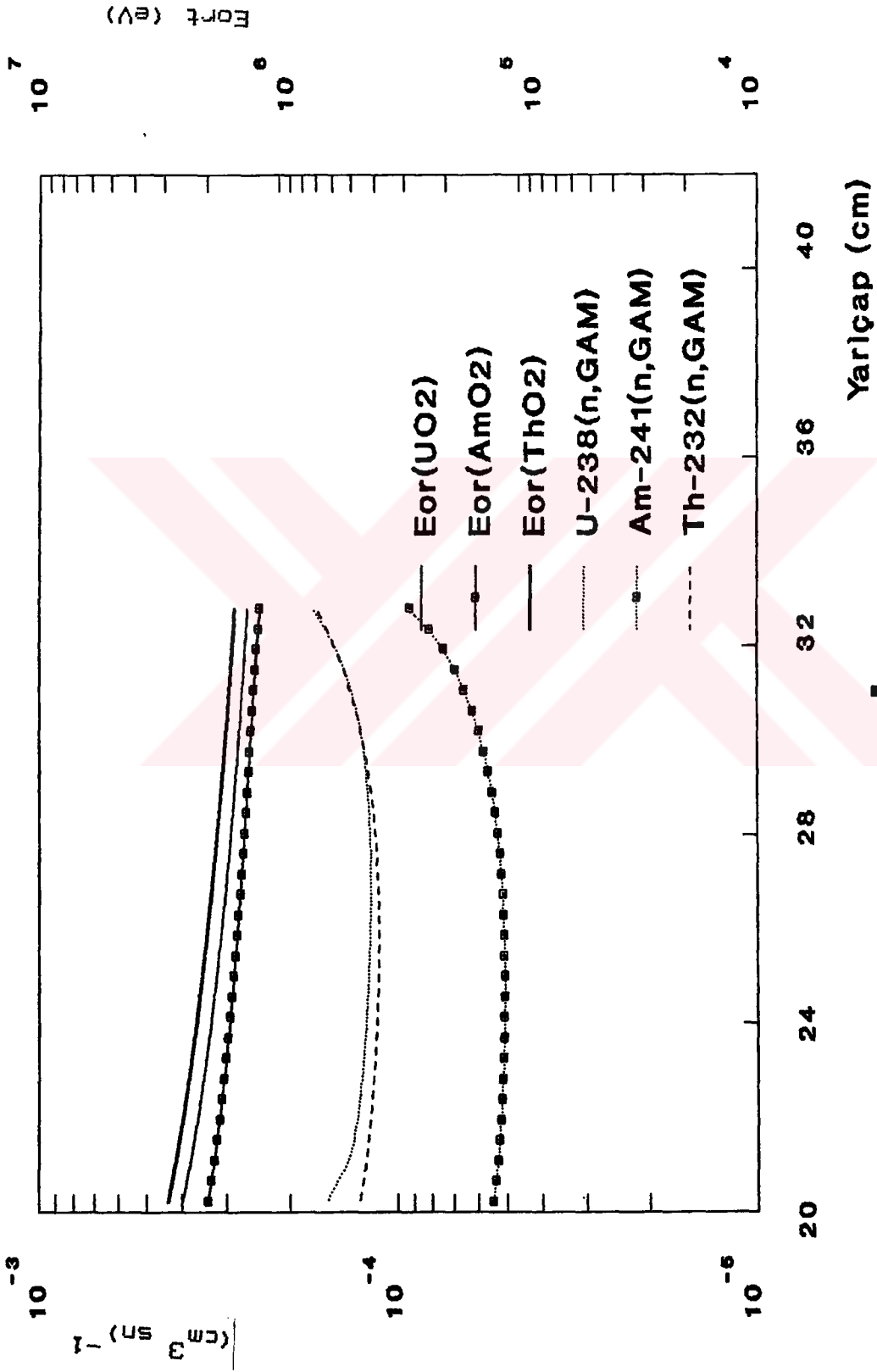
Sekil-4.2: (UO₂+Saf Li+Be) Blanketine (24-Blanket) Ait Yoğunluk ve Ortalama Enerjinin (Eort) Blanket Yarıçapına Göre Değişimi



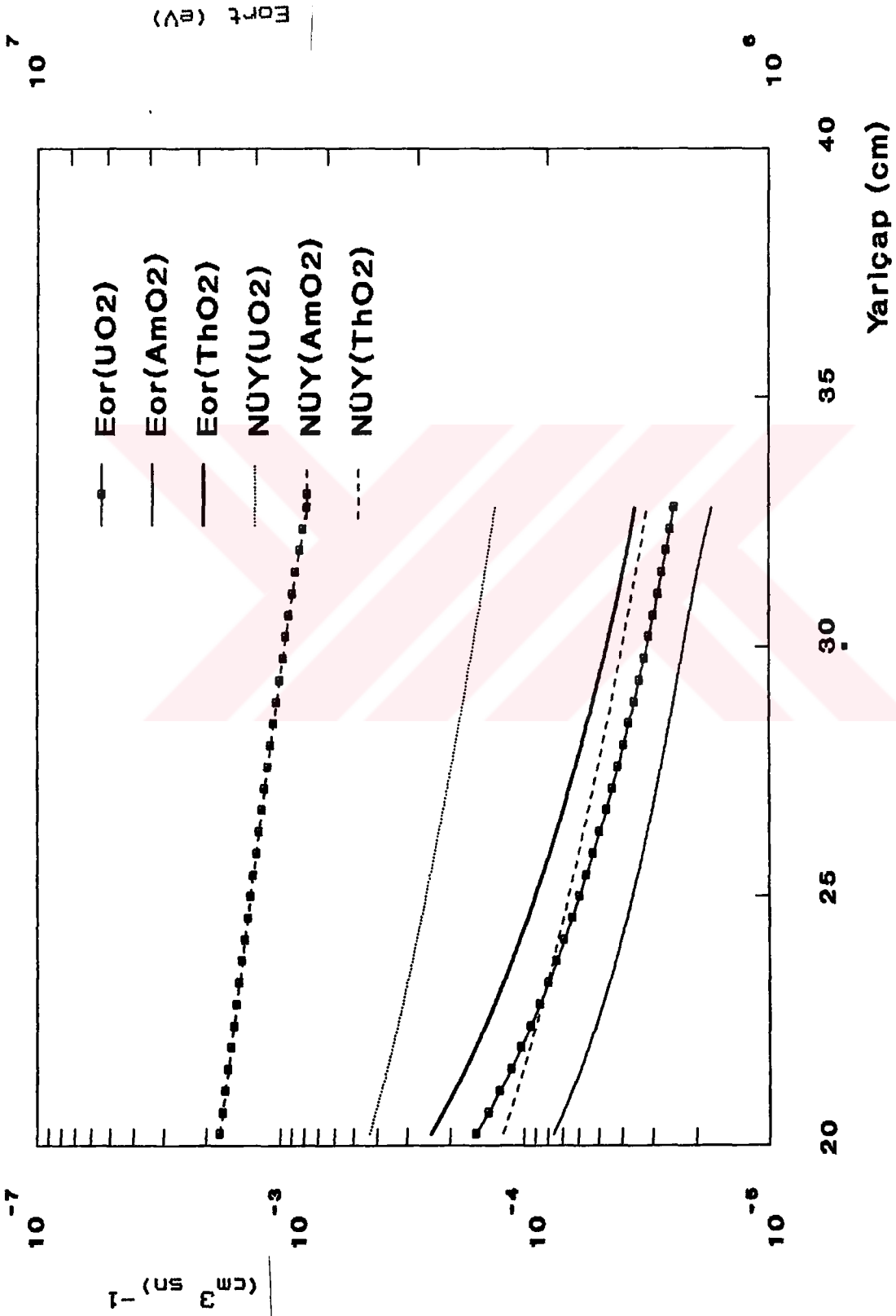
Şekil-4.3: (AmO₂+Saf Li+Be) Blanketine (36.Blanket) Ait Yoğunluk ve Ortalama Enerjinin (Eort) Blanket Yarıçapına Göre Değişimi



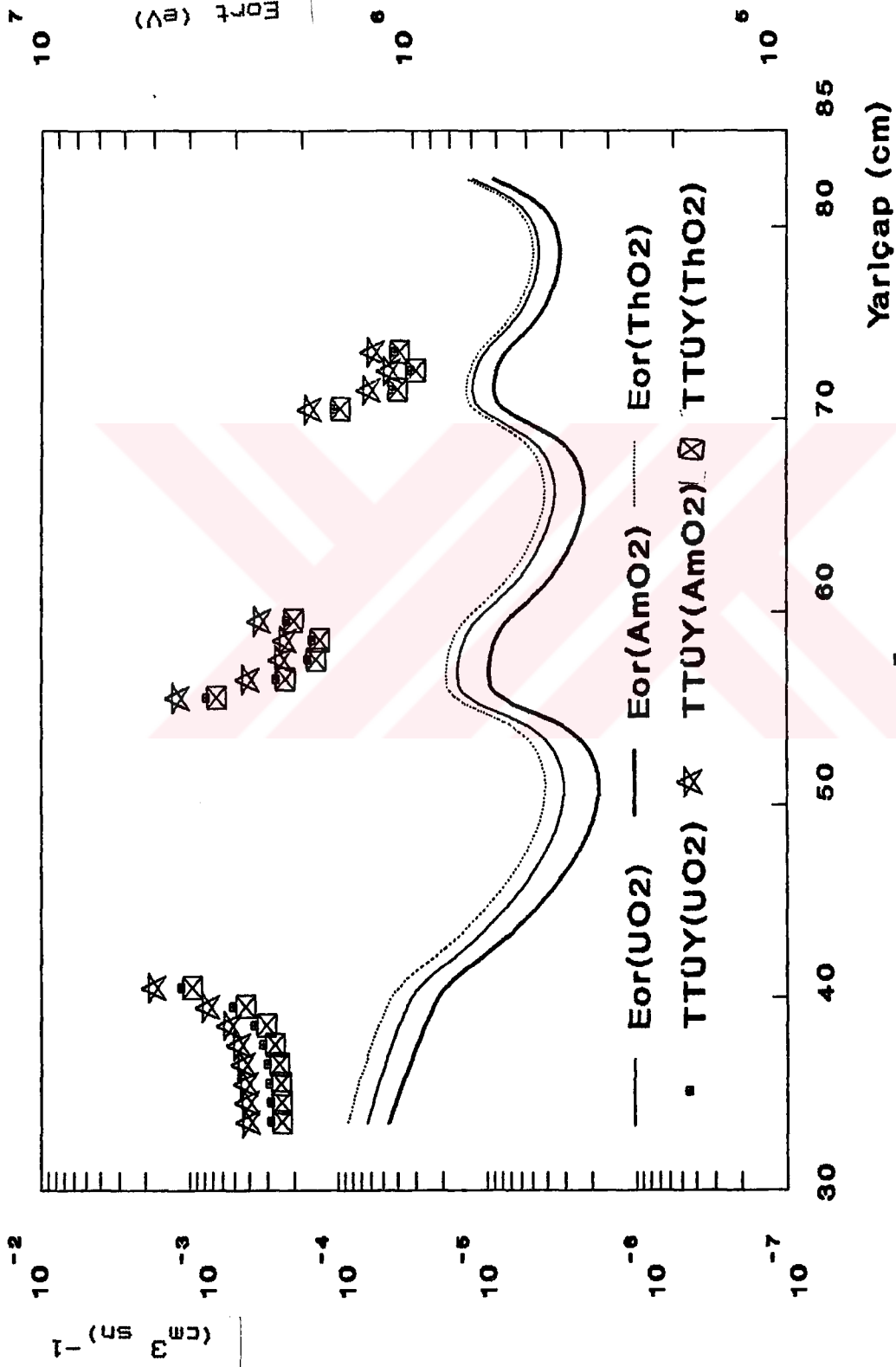
Sekil-4.4: ($\text{CmO}_2 + \text{Li}_2\text{O} + \text{Be}$) Blanketine (46. Blanket) Ait Yoğunluk ve Ortalama Enerjinin (Eort) Blanket Yarıçapına Göre Değişimi



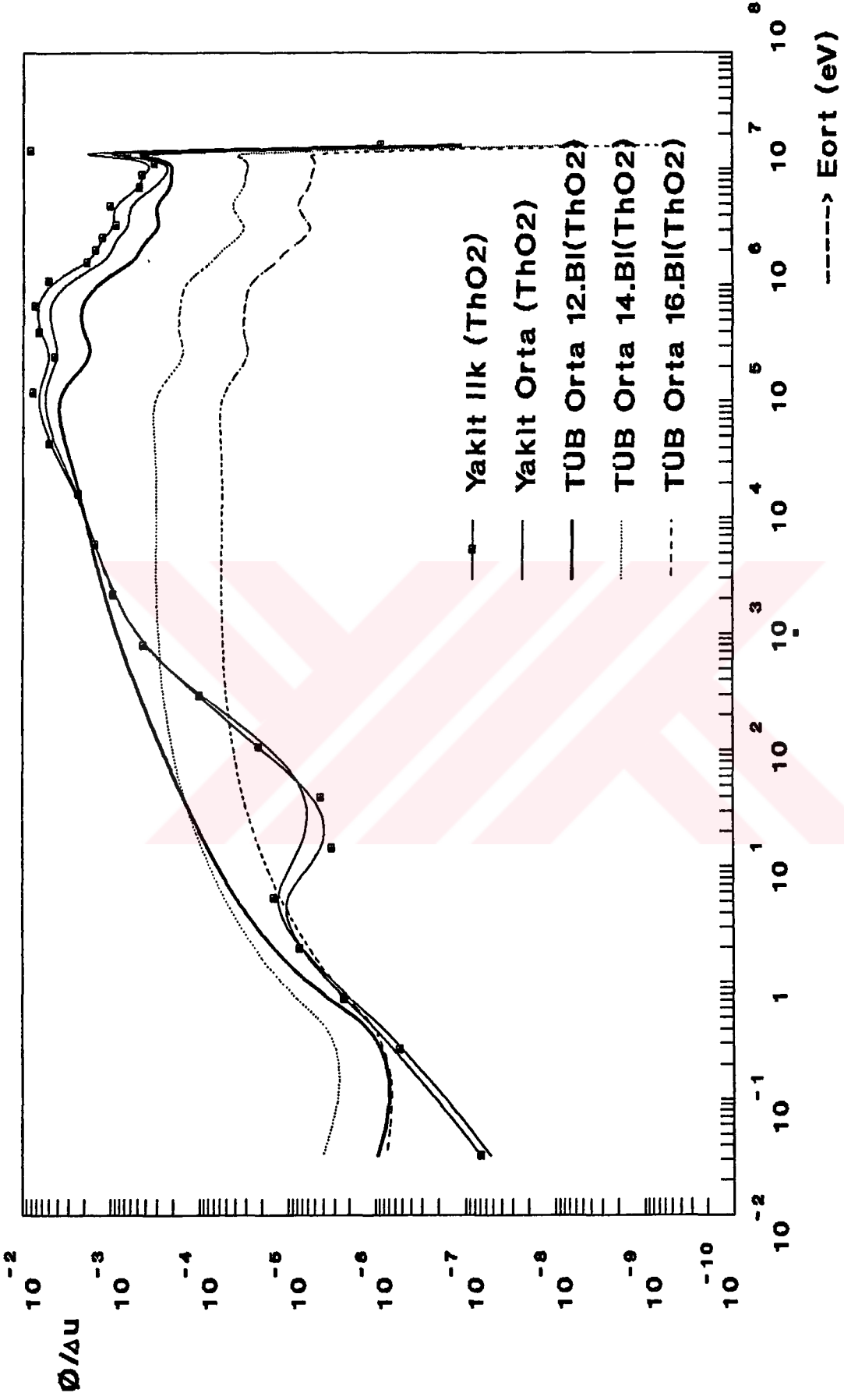
Şekil-4.5: Seçilmiş Blanketlerin Yakıt Bölgesine Ait Eor ve Fisile Yakıt Üretiminin Blanket Yarıçapıyla Değişimi



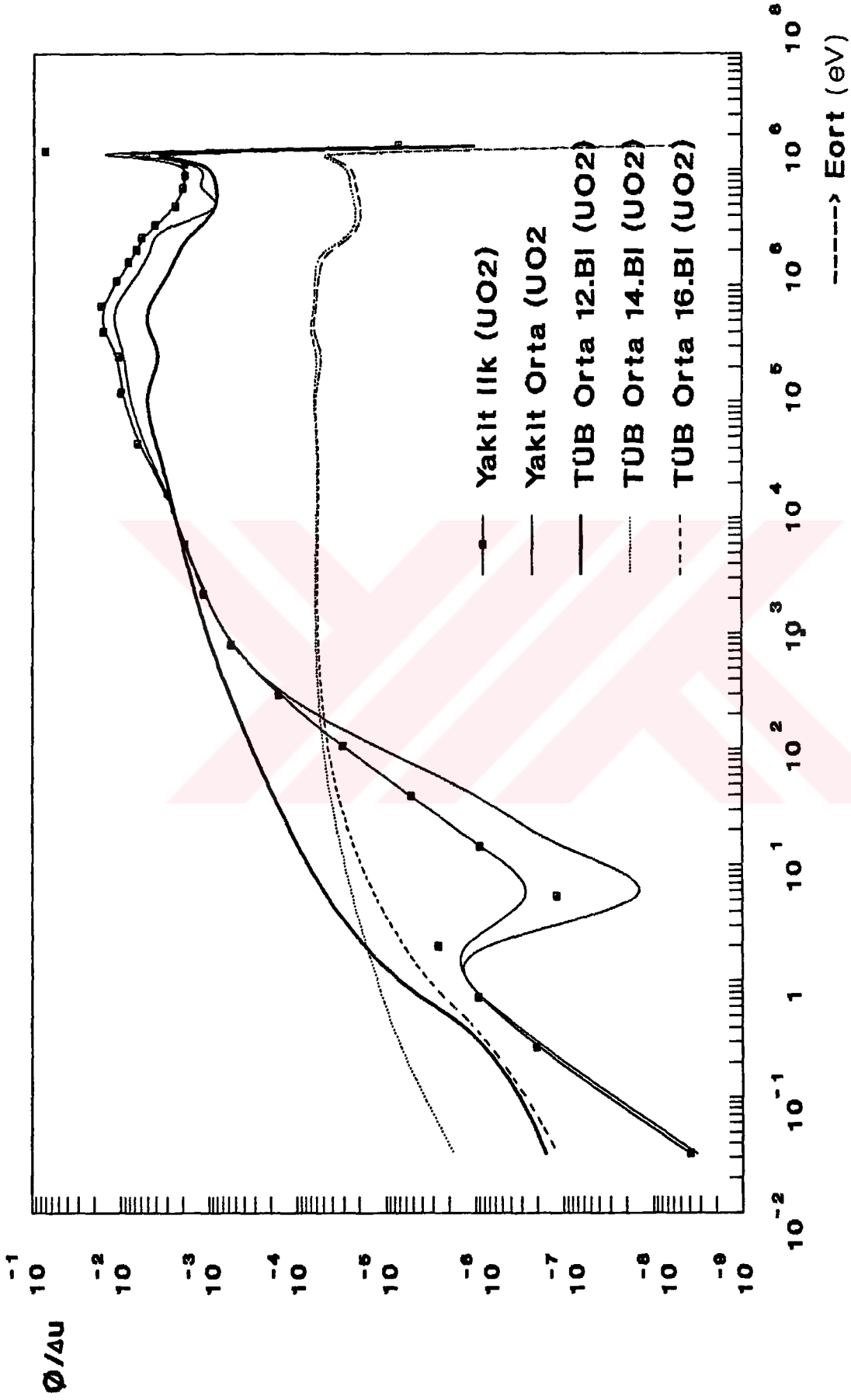
Sekil-4.6: Seçilmiş Blanketlerin Yakıt Bölgesine Ait Eor ve Nöt-ron Üretim Yoğunluklarının (NÜY) Blanket Yarıçapıyla Değişimi



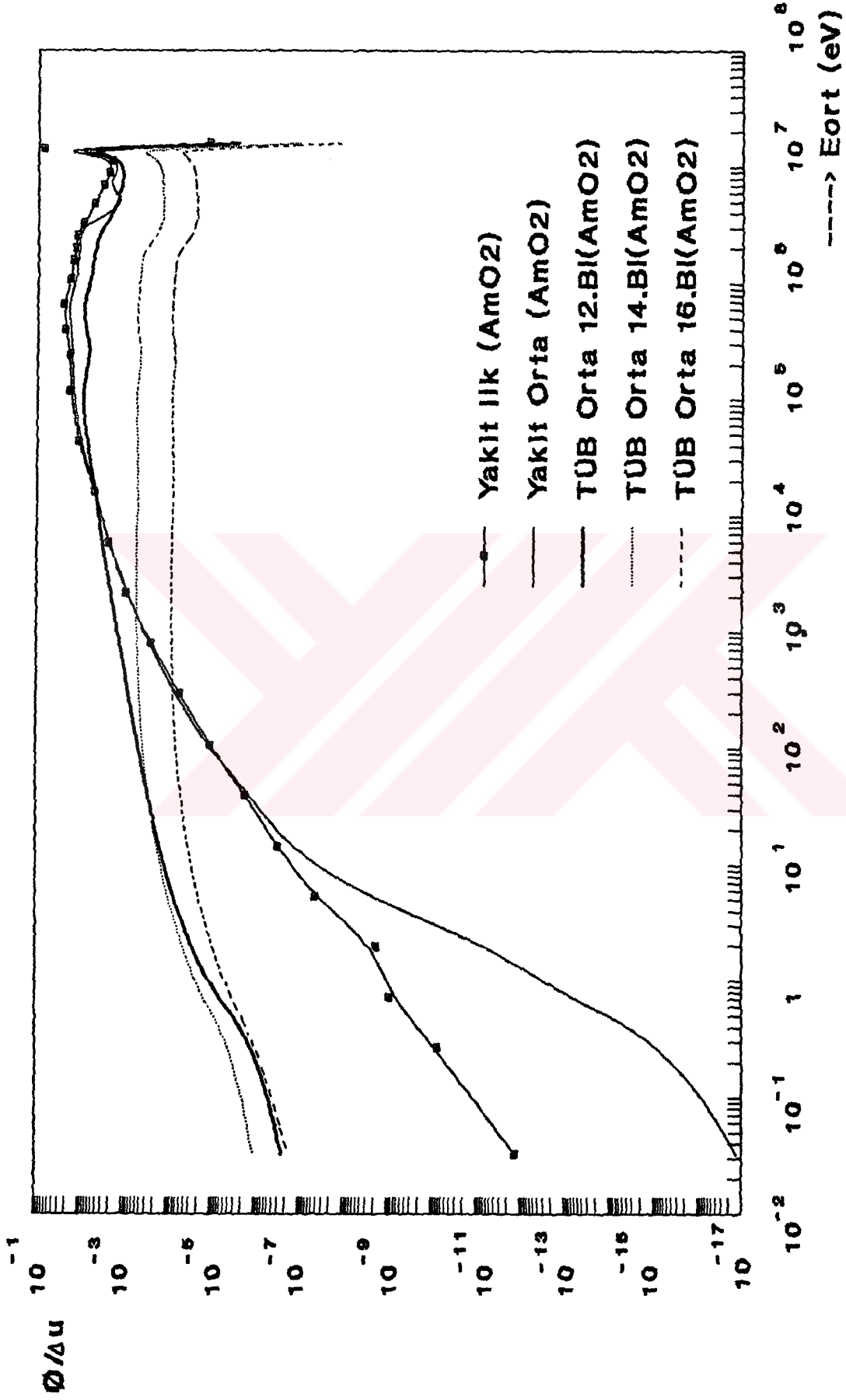
Şekil-4.7: Seçilmiş Blanketlerin Yakıt Bölgesine Ait Eor ve Toplam Tritiyum Üretimi Yoğunluğunun (TTÜY) Blanket Yarlıçapıyla Değişimi



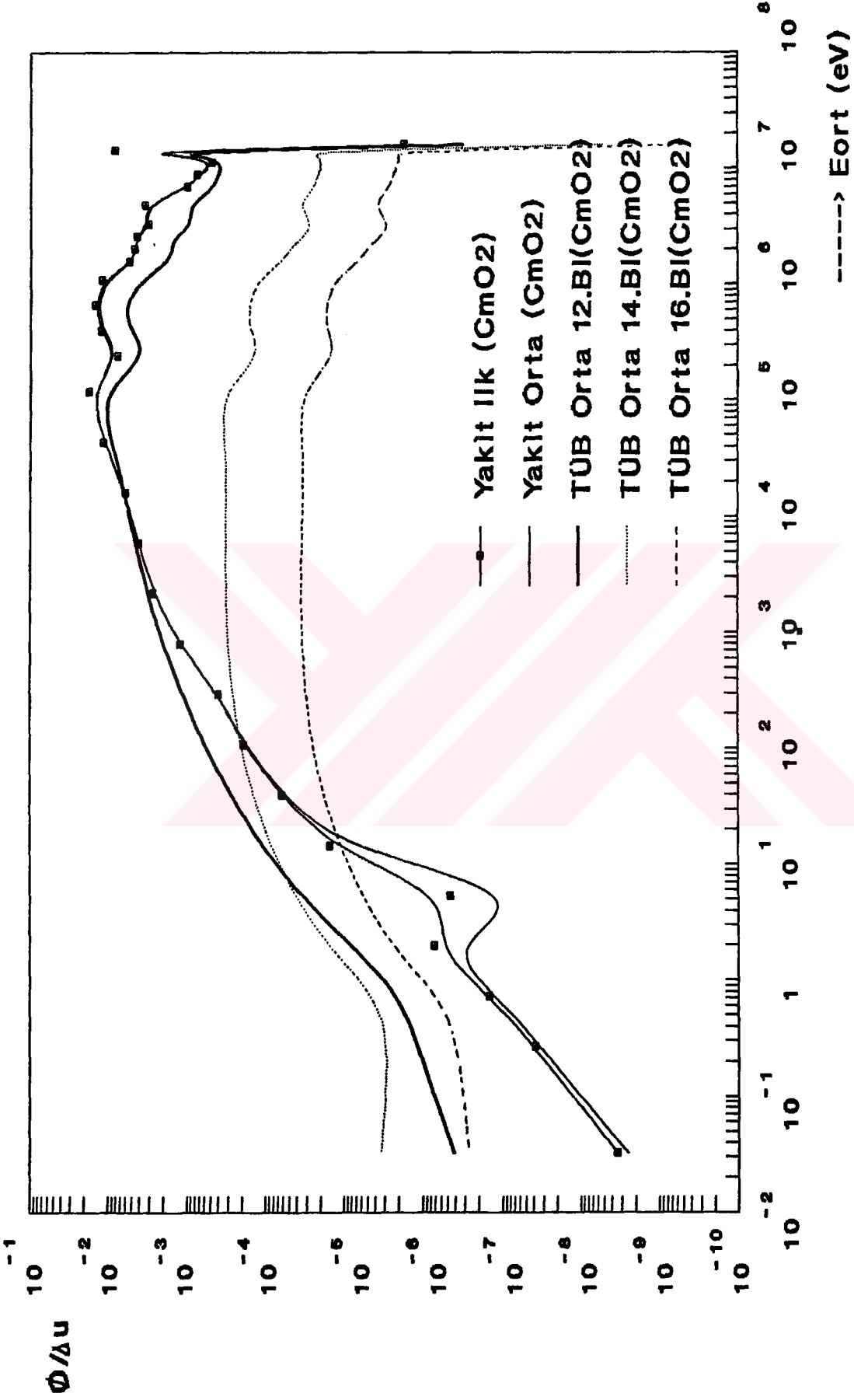
Sekil-4.8: (ThO₂+Saf Li+Be) Blanketine (13.Blanket) Ait Değişik Noktalar İçin Nötron Spektrumları



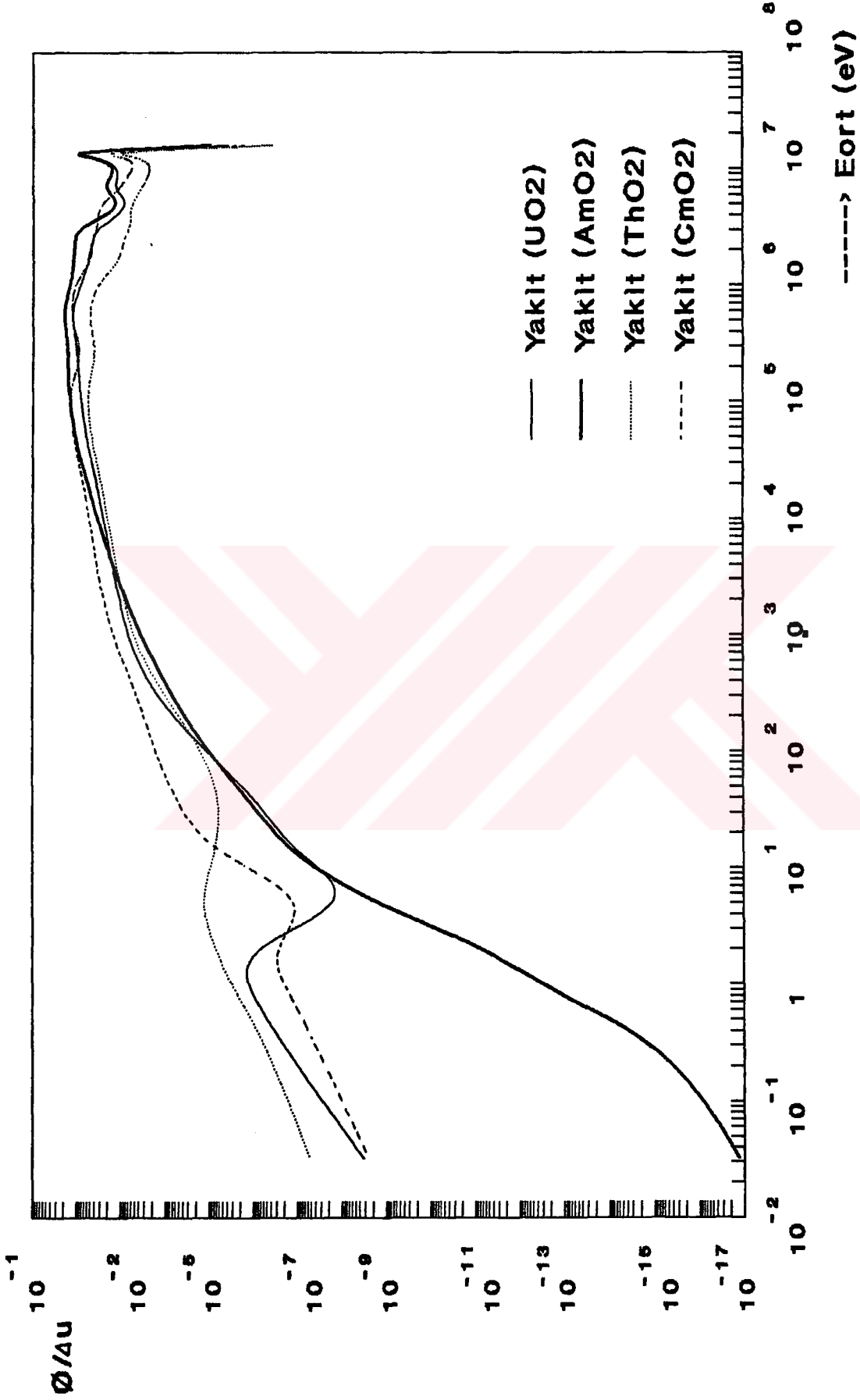
Sekil-4.9: (UO₂+Saf Li+Be) Blanketine (24.Blanket) Ait Değişik Noktalar İçin Nötron Spektrumları



Sekil-4.10: (AmO₂+Saf Li+Be) Blanketine (36.Blanket) Ait Değişik Noktalar İçin Nötron Spektrumları



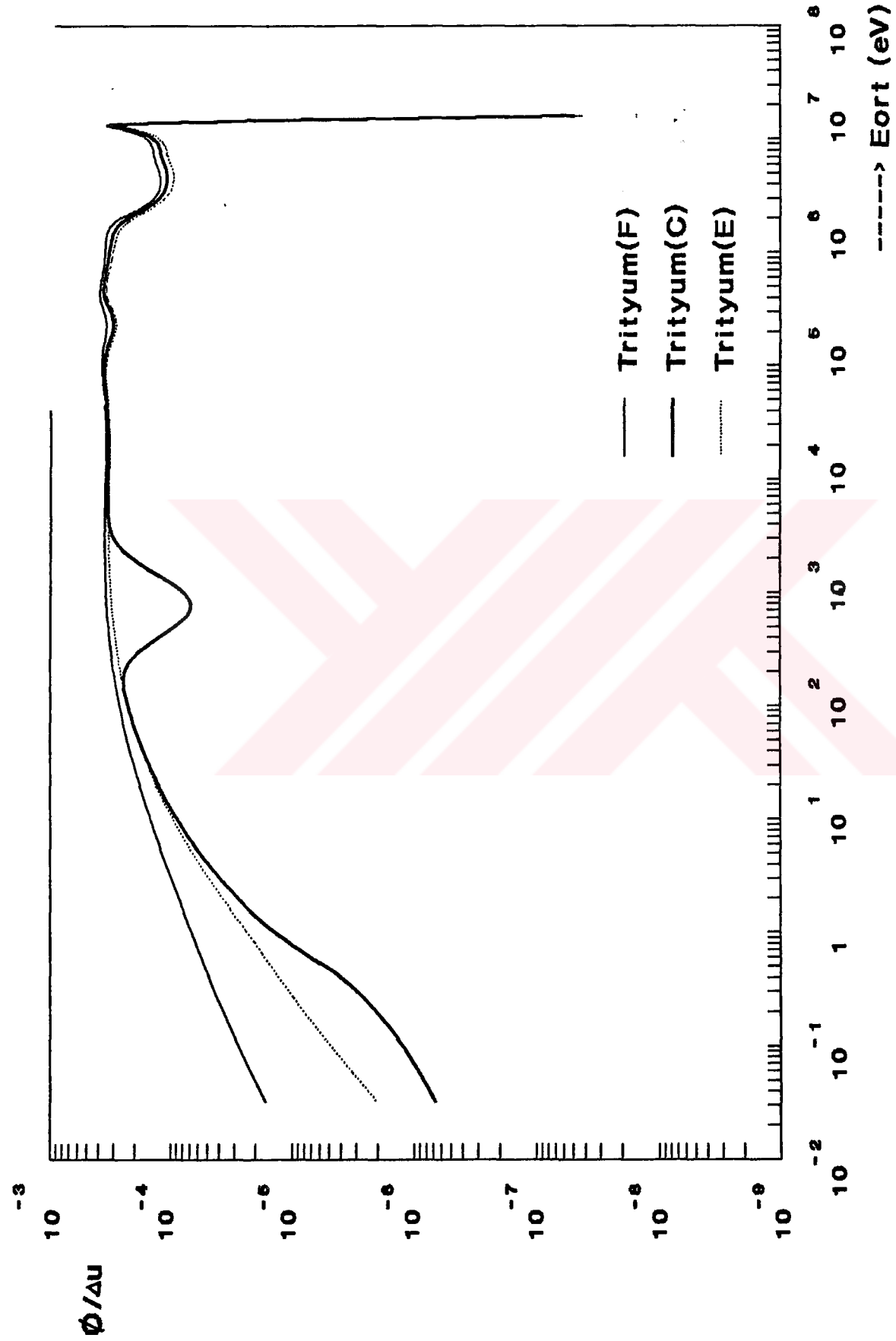
Sekil-4.11: (CmO₂+Li₂O+Be) Blanketine (46.Blanket) Ait Değişik Noktalar İçin Nötron Spektrumları



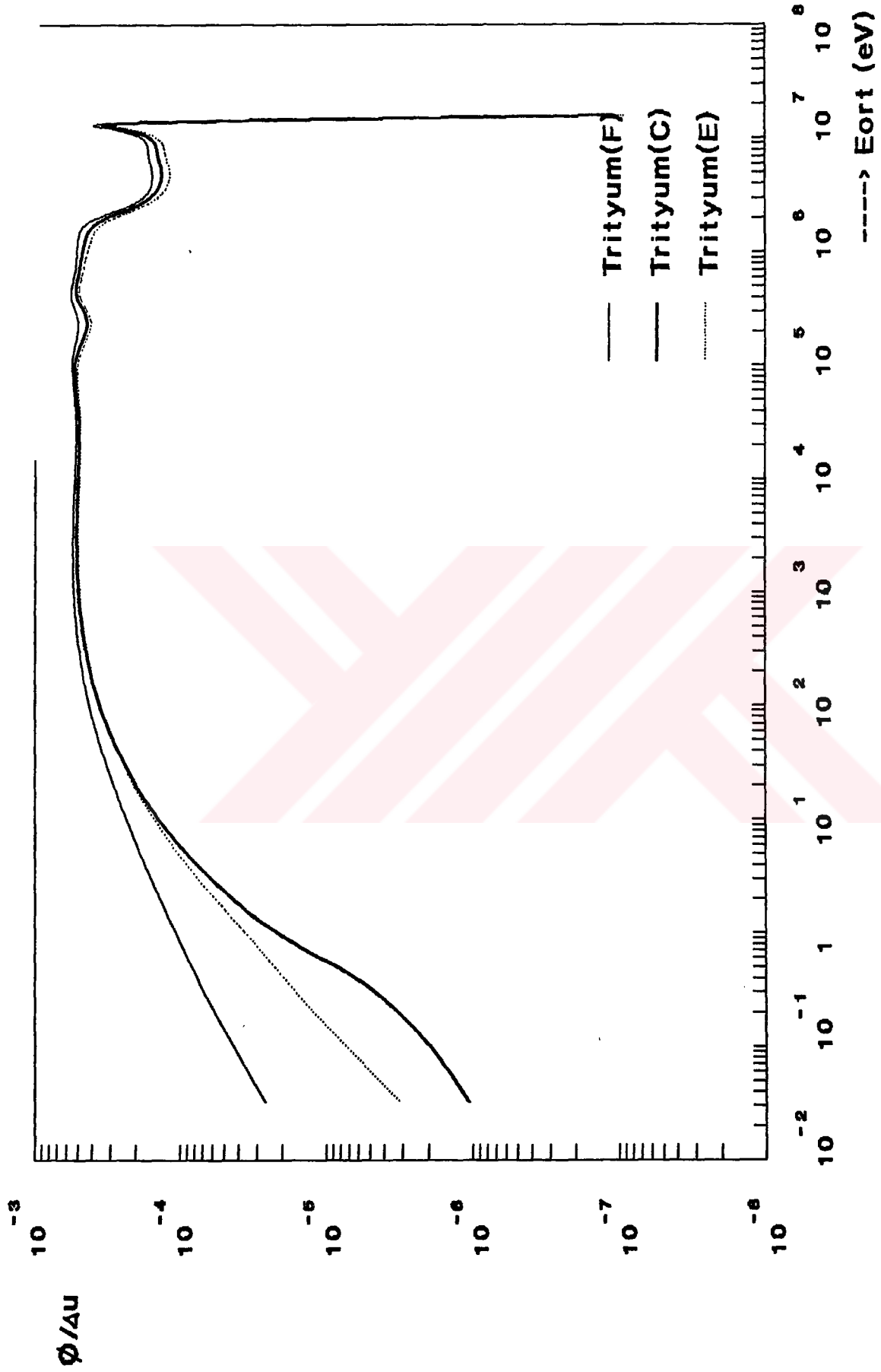
Sekil-4.12: Seçilen Blanketler İçin Yakıt Bölgesinin Orta Noktasında Çizilen Nötron Spektrumları



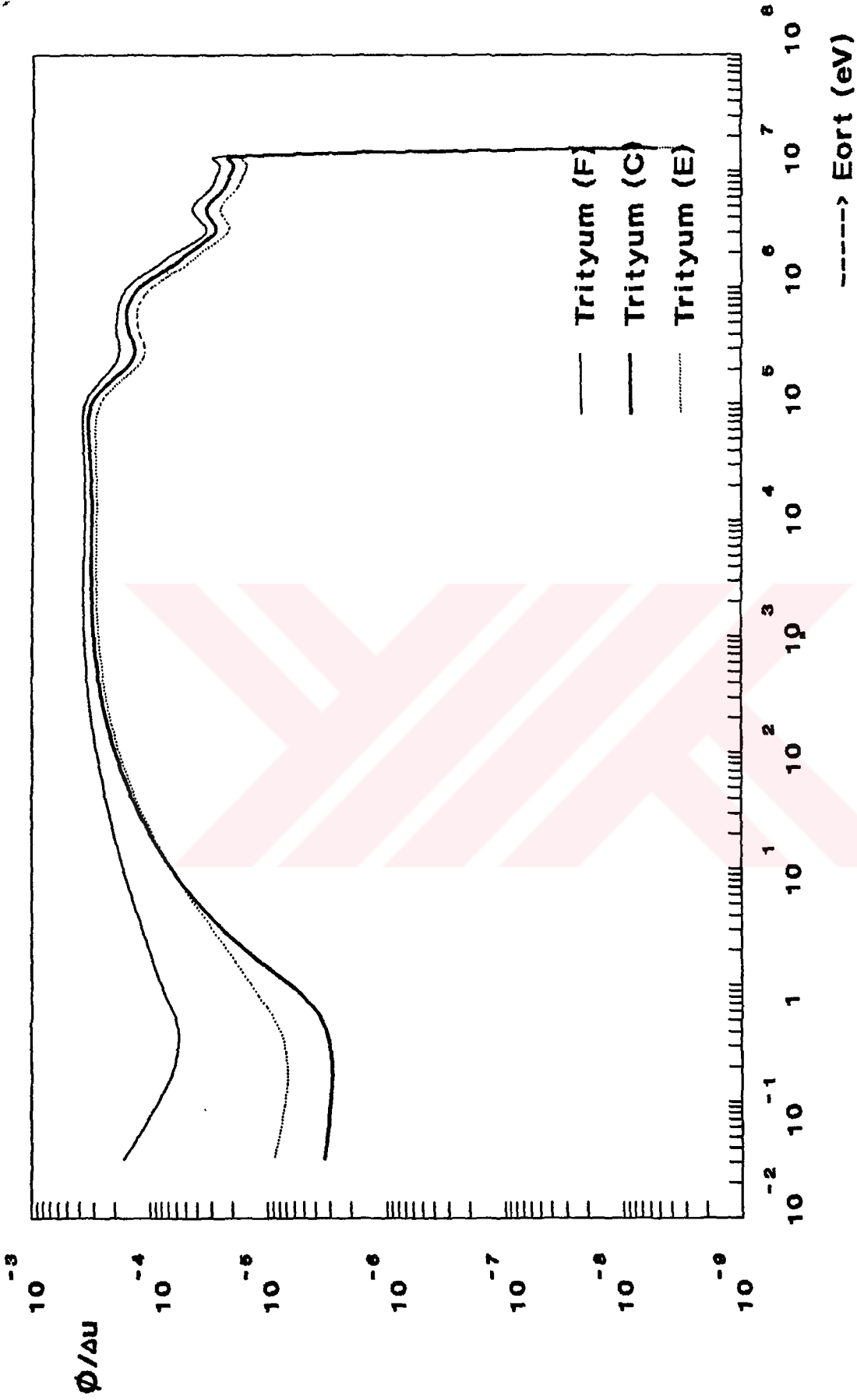
Sekil-4.13: (ThO₂+Saf Li+Be) Blanketinde 2.Tritiyum Üretim Bölgesinin Her İki Kenarı ve Ortasındaki Nötron Spektrumları



Sekil-4.14: (UO_2 +Saf Li+Be) Blanketinde 2.Tritiyum Üretim Bölgesinin Her iki kenarı ve Ortasındaki Nötron Spektrumları



Sekil-4.15: (AmO₂+Saf Li+Be) Blanketinde 2.Tritiyum Üretim Bölgesinin Her İki kenarı ve Ortasındaki Nötron Spektrumları



Şekil-4.16: (CmO₂+Li₂O+Be) Blanketinde 2.Tritiyum Üretim Bölgesinin Her İki kenarı ve Ortasındaki Nötron Spektrumları

5. BÖLÜM

S O N U Ç

Gerçekleştirilen çalışmayla, geniş bir geometri ve blanket malzemesi aralığında, önce optimum bir geometri belirlenmiş, sonra da belirlenen bu geometri için, blanketin yakıt, trityum üretim ve reflektör bölgelerinde yer alan malzemeler değiştirilerek parametrik bir çalışmayla nötronik performansı en iyi olan blanketler tesbit edilmiştir.

Optimum geometrinin tesbitinde müracaat edilen ve trityum üretim ve reflektör bölgelerini birden fazla katmanlı yapıya ayırarak yapılan inceleme, trityum üretimini arttırıyor olması itibariyle daha önce yapılan çalışmalarla [22-26,34,38-40] paralellik arz etmektedir. Katmanlı yapının getirdiği bu avantajın diğer nötronik özelliklere de yansımış olması sebebiyle Tablo-4.1 - 'den optimum geometri olarak, trityum üretim ve reflektör bölgeleri hacimce üç 'e bölünmüş geometrik yapı, daha sonraki hesaplamalar için esas blanket yapısı olarak seçilmiştir.

Belirlenen blanket geometrisi için, iki tane klasik (ThO_2 ve UO_2), iki tane de, nükleer reaktörlerin artığı olan aktinid (AmO_2 ve CmO_2) yakıtla birlikte, trityum üretim bölgesi malzemesi Li_2O ve Saf Lityum, reflektör malzemesi olarak grafit ve berilyum seçilerek ve yakıt bölgesinin önüne berilyum veya kurşundan yapılmış bir nötron çoğaltıcı katman da yerleştirilerek 48 tane değişik blanket yapısı nümerik hesaplamalar için hazırlanmış-

tır. Böyle bir geniş blanket yapısı aralığında birbiriyle karşılaştırılmak üzere, her bir nötronik parametre bütün blanketler için hesaplanarak tablolar halinde takdim edilmiştir. Bu tabloların detaylı değerlendirilmesi, değişik bölgelerde kullanılan malzemelerin etkisini açık olarak ortaya koymuştur. Herbir yakıt grubu için farklı mertebede olmak üzere, genel bir davranış olarak, nötron çoğaltıcı katman kullanmak, nötronik parametreleri olumsuz etkilerken, Li_2O yerine Saf Lityum ve grafit yerine de Berilyum kullanmanın, blanketlerin performansını arttırıcı bir nitelik taşıdığı gözlenmiştir. İlgili tablolardan, ayrıca aktinid yakıtların klasik yakıtlara olan nötronik üstünlükleri de tesbit edilebilmektedir. Klasik yakıtlar arasında, ThO_2 fissile yakıt (^{233}U) üretimiyle dikkat çekerken, UO_2 yakıtlı blanketlerdeki enerji çoğalım katsayısının büyüklüğü açıkça görülmektedir. Aktinid yakıtlara ait bölünme tesir kesitlerinin büyük değerlere sahip olması, enerji çoğalımı temin etmek için bu yakıtları büyük avantaja sahip kılmaktadır. Bunun yanısıra, bunlardan elde edilen, çok yüksek kaliteli fissile yakıt çekirdekleri de ($^{242\text{m}}\text{Am}$ ve ^{245}Cm) bu yakıtları bulunduran blanketlerin avantajları olarak tesbit edilmelidir. Aktinid yakıtlı blanketler için söylenebilecek tek dezavantaj, kritikliklerini belirleyen k_{eff}^* sayılarının klasik yakıtlarinkine göre yüksek kalmasıdır.

Yukarıda belirtilen değerlendirmeleri kantitatif bir ölçekle belirlemek üzere Tablo-4.12 ve Tablo-4.13 hazırlanmıştır. Nötronik performans kriterlerinin bileşke olarak ortak katkısının her bir blankete yansıtıldığı bu tablolardan; ThO_2 , UO_2 ve AmO_2 yakıtlı blanketler için, nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan, trityum üretim bölgesinde Saf Lityum'un kullanıldığı ve Berilyum reflektörlü blanket malzeme yapılarının, CmO_2 yakıtlı blanketler için de yine nötron çoğaltıcı katmanı bulunmayan, Li_2O 'in trityum üretim malzemesi olarak kullanıldığı ve yine Berilyum reflektörlü malzeme yapısının, en iyi nötronik performansa sahip oldukları gözlenmektedir. Nötronik performans yönünden seçilmiş bir statü kazanan bu dört blanketin sahip oldukları her bir nötronik performans kriteri, birbirleriyle karşılaştırılabilirlik amacıyla Tablo-4.15 'de yeniden takdim edilmiştir. Bu tablo-

dan; bütün blanketlerin, toplam trityum üretimi açısından (D-T) reaksiyonu için gerekli bir tane trityumdan başka fazlalık trityum miktarını ürettikleri, bu fazlalığın AmO_2 yakıtlı blankette en büyük degere ulaştığı görülmektedir. Fissile yakıt üretimi açısından en iyi durum, UO_2 yakıtlı blankette ortaya çıkmaktadır. AmO_2 'li blanketteki bağlı düşüklük, ^{241}Am 'den (n, γ) reaksiyonuyla $^{242\text{m}}\text{Am}$ çekirdeğinin elde edilmesindeki yüzde düşüklüğüyle açıklanabilirken, CmO_2 'teki bağlı düşüklük, bu yakıtı bulunduran blanketlerde, yakıt elemanının yer aldığı sıra sayısının, diğerlerinde olduğu gibi 10 tane değil de, 3 tane olmasıyla ve dolayısıyla ^{245}Cm üretiminde kullanılan ^{244}Cm miktarının diğerlerine göre bağlı bir düşüklük arzemiş olması sebebiyledir. Blanket ortamındaki nötron popülasyonunu ve blanket enerji çıktısını etkilemesi açısından, (n,f) reaksiyon miktarı, Tablo-4.15 'den de görüleceği gibi, aktinid yakıtların klasik yakıtlara üstün olduğu bir davranış sergilemektedir. Enerji çoğalım katsayısında da (n,f) reaksiyonunuda olduğu gibi, aktinid yakıtların üstünlüğü sözkonusudur. Blanketlerin kritikliğinin ölçüsü olan k_{eff}^* nötron çoğalım katsayısında ise, klasik yakıtların, aktinid yakıtlara göre daha emniyetli olmasını sağlayan, daha düşük değerlere sahip oldukları gözlenmektedir. Belirlenen bu sonuçlar, özellikle 33 numaralı kaynak olmak üzere, kaynaklar listesinde verilen diğer ilgili çalışmalarda [22,23,34,38,39,41,42] elde edilen sonuçlarla da uyum arz etmektedir.

Son bir ilgi çekici tesbit yapmak üzere Tablo-4.14 göz önüne alınabilir. 0.75 'lik işletme faktörüyle çalışan ve 1000 MW (termal) 'lık güce sahip bir fisyon reaktöründe taze yakıt tüketimi senede yaklaşık olarak 290 kg dır [34]. Böylece Tablo-4.14 'deki değerler göz önüne alınarak; sözü edilen fisyon reaktörünün de bu çalışmada klasik yakıtlardan elde edilen fissile yakıtlarla çalıştırılacağı kabul edilerek; ThO_2 blanketli hybrid reaktörle yaklaşık 3, UO_2 blanketli hybrid reaktörle yaklaşık 3.3, AmO_2 blanketli hybrid reaktörle 1.44 ve CmO_2 blanketli hybrid reaktörle yaklaşık olarak 2.4 fisyon reaktörüne yakıt temin etmek mümkün olabilmektedir.

Tablo-4.15: Seçilmiş Blanketlere Ait Nötronik Performans Değerleri

Blanket	ThO ₂ +Saf Li+Be	UO ₂ +Saf Li+Be	AmO ₂ +Saf Li+Be	cmO ₂ +Li ₂ O+Be
↓Kriter				
T6	1.18196E+00	1.40685E+00	2.15182E+00	1.94303E+00
T7	8.93091E-02	9.23029E-02	1.13628E-01	1.69618E-01
T6+T7	1.27127E+00	1.49915E+00	2.26545E+00	2.11265E+00
(n,2n)	4.05040E-01	3.66761E-01	-----	5.25485E-01
(n,γ)	2.69999E-01	2.91732E-01	1.25614E-01	2.06739E-01
(n,f)	3.63800E-02	1.48703E-01	6.78161E-01	4.82714E-01
T6+T7+γ	1.54127E+00	1.79088E+00	2.39206E+00	2.31939E+00
M	1.91706E+00	3.58659E+00	1.13494E+01	8.50626E+00
K _{eff} [*]	1.13654E-01	3.29215E-01	7.19390E-01	6.21542E-01
K _{eff} ^{**}	6.12936E-01	6.59244E-01	-----	7.71968E-01

K A Y N A K L A R

1. B.A. Semenoy, D. Guthrie, and Y. Tatsuta "The future role of nuclear power in the global energy balance" IAEA BULLETIN, Vol.33, NO. 3 VIENNA, AUSTRIA 1991.
2. Şahin S. "Physics of the Fusion - Fission (Hybrid) Reactors" Ecole Polytechnique Federale de Lausanne Institut de Genie Atomique 1015 Lausanne, Switzerland
3. Şahin, S., "Mainline Fusion - Fission (Hybrid) Reactor Concepts", Ecole Polytechnique Federale de Lausanne Institut de Genie Atomique 1015 Lausanne, Switzerland.
4. Leonard, B.R. Jr., "A Review of Fusion - Fission (Hybrid) Concepts", Nucl. Tech., 20, 161, 1973.
5. "Proceedings of US-USSR Symposium on Fusion-Fission Reactors", Lawrence Livermore National Laboratory, California, CONF- 760733, July 13 - 16, 1976.
6. Youssef, M.Z. and Conn, R.W., "A Survey of Fusion - Fission System Desings and Nuclear Analysis", UWFD-308, University of Wisconsin, July 1979.
7. Moir, R.W., "The Fusion-Fission Fuel Factory", Fusion vol. 1, Part B, Chap. 15, Teller E. Ed. , Academic Press, New York, 1981.
8. Şahin, S. et al., "Basic Structure of the Fusion - Fission (Hybrid) Reactor Experimental Research Project in Laboratoire de Genie Atomique de l'EPFL", Atomkernenergie/Kerntechnik, 36, 33, 1980.
9. Greenspan, E., "Fusion Fission Hybrid Reactors", Advanced in Nuclear Science and Technology, Vol. 16, Editors Lewins, J. and Becker, M., Plenum 1984.

10. Jassby, D.L., "Nuclear Development Needs For Fusion-Fission Hybrid Reactors", PPPL-1647 UC-20d March 1980.
11. Yapıcı, H., "Candu Tüketilmiş Yakıtının Gençleştirilmesi İçin Modere Edilmiş ve Hızlı (D,T) Hibrit Blanketlerin Potansiyelinin İncelenmesi" Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Mart 1989.
12. Ehrlich, K. , "First Wall Materials For Fusion Reactors", Kerntechnik, 19, 263, Jahrgang 1977.
13. Abdou, M. "Nuclear Design of the Blanket/Shield System for a Tokamak Experimental Power Reactor", Nucl. Tech.,29,7, 1976.
14. Maniscalco, J.A. et al., "Recent Progress in Fusion-Fission Hybrid Reactor Design Studies", Nucl. Technol./Fusion, 1, 419, 1981.
15. Jassby,D.L., "Workshop Summaries For The Third Us/Ussr Symposium On Fusion-Fission Reactors", PPPL-1550 UC-20d July 1979.
16. Steiner, D., "The Technology For Power By Fusion", Nuclear Science And Engineering: 58,107-165 May 1975.
17. Welss, W.M., "ORNL Fusion Power Demonstrating study: Lithium as a Blanket Coolant", Oak Ridge National Laboratory Report ORNL-TM-6214,1978.
18. Swinhoe, M.T. and Uttley, C.A., "Tritium Breeding in Fusion", NBS Special Publication, 594, p. 246, U.S. National Bureau of Standards, 1980.
19. Bachmann, H. et al., "Neutron Spectra and Tritium Production Measurements in a Lithium Sphere to Check Fusion Reactor Blanket Calculations", Nucl. Sci. Eng., 47, 74, 1978.
20. Abdou, M , "Tritium Breeding in Fusion Reactors", Argonne

National Laboratory Report ANL/FPP/TM-165, 1982.

21. Sedano, P.G. and Perlado, J.M., "Parametric Studies on the Neutronics of a Hybrid (Fusion-Fission) Blanket", Fusion Technology, Vol.8, p. 1067, (July 1985).
22. Maki, K., "Increase of Tritium Breeding Ratios By Blankets Having Front Breeder Zone In Fusion Reactors", Fusion Technology Vol. 8 Nov. 1985.
23. Joneja, O.P. and Nargundkar, V.R., "Application of Multilayered Blanket Concept To The Tokamak Configuration For Tritium Breeding Calculations", Fusion Technology Vol. 8 Nov. 1985.
24. Al-Kusayer, T.A. and Şahin, S., "Natural Uranium Hybrid Blankets for AYMAM Project", Proc. 6th Int. Conf. Alternative Energy Sources, Miami Beach, Florida, p. 384, Dec. 12-14, 1983.
25. Al-Kusayer, T.A. and Şahin, S., and Khan, S. "(D-T) Driven Thorium Hybrid Blankets", Proc. 6th Int. Conf. Alternative Energy Sources, Miami Beach, Florida, p. 384, Dec. 12-14, 1983.
26. Şahin, S. "A Neutron Physics Analysis for the Experimental Facility LOTUS", Atomkernernergie/Kerntechnik, 41,95, 1982.
27. Abdul Khalik, S., Haldy, P. A., and Kumar, A., "Blanket Design and Calculated Performance for the LOTUS Fusion-Fission Hybrid Test Facility", Nucl. Technol./Fusion, 5, 189, 1984.
28. Harker, Y.D., et al., "TFTR Lithium Blanket Module Program Final Design Report", Vol.VII, EGG-PSB-6808, EG&G Idaho, June 1984.
29. Şahin, S. and Al-Kusayer, T.A., "Advanced Fusion Fuel Driven AYMAM Hybrid Blankets", Proc. 6th Int. Conf. Alternative Energy Sources, Miami Beach, Florida, p. 161, Dec. 12-14,

- 1983.
30. Şahin, S., Al-Kusayer, T.A. Al-Semair, M., and Abdul Raof, M., "Neutronic Investigations of Experimental AYMAM Hybrid Blankets", Trans. Am. Nucl. Soc. 47, 151, 1984.
 31. Şahin, S., Al-Kusayer, T.A., Abdul Raof, M., "Preliminary Design Studies of a Cylindrical Experimental Hybrid Blanket with Deuterium-Tritium Driver", Fusion Technol., 10, 84, 1986.
 32. Erişen, A. "Desing Calculations of a Cylindrical D-T Driven UO_2 Hybrid Blanket", Alternative Energy Sources VIII, Vol. 2, p. 55, 1989.
 33. Şahin, S. and Kumar, A., "Neutronics Analysis of Deuterium-Tritium Driven Experimental Hybrid Blanket", Fusion Technology Vol. 6 July 1984.
 34. Şahin, S. and Al-Kusayer, T.A., "Conceptual Design Studies of A Cylindrical Experimental ThO_2 Hybrid Blanket With (D,D) Deriver", Atomkernenergie/Kerntechnik Vol. 47 No.4 1985.
 35. Massidda, John E., and Mujid S. Kazimi, "Pover Flattening In D-T Blankets", Fusion Technolgy Vol. 8 July 1985.
 36. Şahin, S., Al-Eshaik, M., "A Numerical-Graphical Power Flattennig Method for Source Driven Fast Fission Blanket", presented at 4th Int. Conf. on Emerging Nuclear Energy Sytems, Madrid, Spain, June 30 - July 4, 1986.
 37. Şahin, S., Al-Eshaik, M., "Fission Power Flatteing in Hybrid Blankets Using Mixed Fuel", Submitted to Fusion Technol.
 38. Şahin, S., Erişen, A., Çebi, Y., "A Fast Hybrid Blanket With Flat Fission Power over a Long Operational Period", Trans. Am. Nucl. Soc., 54, 134, 1987.

39. Şahin, S., Erişen, A., Çebi, Y., "Realization of a Flat Fusion Power Density in a Hybrid Blanket over a Long Operational Period", Fusion Technology, Vol. 15, No.1, p.37, Jan. 1989.
40. Şahin, S., Erişen, A., Çebi, Y., "A $^{244}\text{Cm}/\text{Nat.}-\text{UO}_2$ Hybrid Blanket With Flat Fission Power Production", Transactions of the Am. Nuc. Soc. and Eur. Nuc. Soc., Vol. 57, p.303 Oct. 1988
41. Şahin, S., "Cm-244 Multiplier And Breeder In A ThO_2 Hybrid Blanket Driver By A (D,T) Source", Fusion Technology Vol.10 Nov. 1986.
42. MORGAN, GROVER D. D. A. BOWERS, and DAVID E. RUESTER, "Engineering Feasibility Evaluation of Blanket Concepts For Blanket Comparison And Selection Study", Fusion Technology Vol. 8 July 1985.
43. J.J. Dudertadt, L.J. Hamilton, "Nuclear Reactor Analysis", Universty of Michigan, 1976.
44. A.M. Weinberg, E.E. Wigner, "The Physical Theory of Neutron Chain Reactors", The Universty of Chicago 1959.
45. D.I. Garber, G. Stromberg, M.D. Geldberg, D.E. Cullon and W.M. Mary, "Angular Distribution in Neutron Included Reaction", BNL-400, Breakhaven National Lab. July 1970.
46. W.W. Engle, Jr., "ANISN, A One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering", ORNL-K-1964, Oak Ridge National Lab. 1970.
47. T.A. Al-Kusayer, S. Şahin, A. Drira, "CLAW -IV, Coupled 30 Neutrons, 12 Gamma-Ray Group Cross Section With Retrieval Programs for Radiation Transport Calculations", available from the Radiation Shielding Information Center, Oak Ridge National Lab. 1984; see also RSIC Newsletter, p.41 May 1988.