

PAPER DETAILS

TITLE: A DESIGN FOR APEX FUSION REACTOR MODEL BY USING MONTE CARLO METHOD

AUTHORS: Basar SARER,Aybaba HANÇERLIOGLU,Nurettin SAVRUK

PAGES: 201-210

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/83346>

A DESIGN FOR APEX FUSION REACTOR MODEL BY USING MONTE CARLO METHOD

Başar ŞARER

Gazi Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, ANKARA

Aybaba HANÇERLİOĞULLARI
Özel Tümay Dershaneleri, ANKARA

Nurettin SAVRUK
Elektrik Üretim A.Ş., ANKARA

ABSTRACT

In APEX fusion reactor model, the first solid wall has been replaced with fast flowing thin liquid wall layer. Liquid wall has a large potential to enhance the vision of fusion. Because, liquid wall usage can increase life time of the structure to that of the reactor by decreasing failures on the structural materials, and also allows high neutron wall load ($>10 \text{ MW/m}^2$) (1), (2), (3), (10). In this study, design and calculations of APEX were carried out as 3-D torus by using MCNP-4B computer code. Molten salt Flibe (F, Li, Be) was taken as liquid wall. In liquid first wall concept, it has been seen that the usage of Flibe is advantageous.

Key Words: APEX, Liquid First Wall, Fusion Technology, MCNP

APEX FÜZYON REAKTÖR MODELİNİN MONTE CARLO YÖNTEMİ KULLANILARAK TASARLANMASI

ÖZET

APEX füzyon reaktör modelinde, plazma ile yüzleşen ilk katı duvarın yerini hızlı akan ince sıvı duvar tabakası almıştır. Sıvı duvar, bir enerji kaynağı olarak füzyonun vizyonunu muazzam bir şekilde geliştirme yeteneğine sahiptir. Çünkü, sıvı duvar kullanımı; yapısal malzeme hasarlarını azaltarak bu malzemelerin ömrünü reaktör ömrü seviyesine getirmekte, ayrıca yüksek nötron duvar yüküne ($>10 \text{ MW/m}^2$) imkan sağlamaktadır (1), (2), (3), (10). Bu çalışmada, APEX'in tasarım ve hesaplamaları MCNP-4B bilgisayar kodu kullanılarak torus şeklinde üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Sıvı duvar olarak Flibe (F, Li, Be) erimiş tuzu kullanılmıştır. Sıvı ilk duvar yaklaşımında, Flibe sıvısının kullanımının avantajlı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: APEX, Sıvı İlk Duvar, Füzyon Teknolojisi, MCNP

1. GİRİŞ

Geleneksel füzyon reaktörlerinde, plazma etrafındaki yapısal malzemeler için hasar mekanizmaları;

- yüksek enerjili füzyon nötronları ile çarpışma sonucunda yapısal malzeme içerisindeki atomların yerlerinin değişmesi ve
- (n,p), (n, α), (n,d) ve (n,t) nükleer reaksiyonları sonucu yapısal malzeme içerisinde gaz üretimidir. Hidrojen izotopları yüksek işletme sıcaklıklarında yapısal malzeme içerisinde dışarıya yayılabilir, ancak α parçacıkları metal içerisinde kalır ve Helyum gaz kürelerini üretir.

Plazma ile yüzleşen ilk duvar, plazmada açığa çıkan yüksek enerjili nötron, gama ışını ve yüklü parçacık

1. INTRODUCTION

In conventional fusion reactors, the damage mechanisms for structural materials are as follows;

- Dislocation of atoms in the structural material resulting from collision with high energy fusion neutrons
- Gas generation in the structural material arising from (n,p), (n, α), (n,d) ve (n,t) nuclear reactions. Hydrogen isotopes can diffuse from the structural material to outside at high operating temperatures, but α particles are detained in the metal and generate Helium gas bubbles.

The first wall facing with the plasma will be exposed to high energy neutron, gamma ray and charged particle

akılarına maruz kalacaktır. Bu ilk duvar, yapısal malzeme (katı) olması durumunda; en çok hasar bu bölgede oluşacak ve duvarın ömrü birkaç yıl ile sınırlanacaktır.

APEX çalışmalarında, plazmayla yüzleşen geleneksel ilk katı duvarın yerini hızlı akan bir ince sıvı duvar tabakası almıştır. Serbest ilk sıvı duvar kavramı yenilikçi bir yaklaşımdır. İlk sıvı duvar çok hızlı olup yüklü parçacıkları hapseder, hemen arkasında biraz daha yavaş akan kalın sıvı duvarda (manto) açığa çıkan enerjiyi hapseder ve ısıya çevirir. Sıvı duvar, bir enerji kaynağı olarak füzyonun vizyonunu muazzam bir şekilde geliştirme yeteneğine sahiptir. Geleneksel katı ilk duvar kavramı ile karşılaştırıldığında; sıvı duvar şu önemli avantajlara sahiptir: (4)(14)(15)

- Yenilenebilen duvar özelliği ile, yüksek güç yoğunluğuna ($>2 \text{ MW/m}^2$) imkan sağlar,
- Daha iyi trityum üretim potansiyeli vardır,
- Nötronik açıdan, yapısal malzemelerdeki radyasyon hasarı ve aktivasyonu önemli ölçüde azaltır,
- Reaktör kabı içerisindeki malzemelerin bakımı kolaylaşır,
- Reaktörde malzemelerle ilgili problemleri azaltır,
- Hem maliyet hem de zaman açısından ARGE gereksinimini azaltır,
- Yüksek termodinamik verim ($>40\%$) sağlar.

2. APEX FÜZYON REAKTÖR MODELİ

APEX Modelinde, Şekil 1’de görüldüğü gibi, ilk katı duvarın yerini hızla akan ince bir sıvı duvar tabakası almaktadır. Şekilde, farklı bölgeler için $^{\circ}\text{C}$ cinsinden sıcaklıklar gösterilmiştir. Sıvı girişinde sıcaklık ortalama 500°C civarında olurken sıvı çıkışında ve sıvı yüzey sıcaklığı ortalama 600°C civarlarında olmaktadır.

APEX çalışmaları esnasında, sıvı duvar düşüncesi bazı ortak özellikler yanında oldukça farklı noktaları ve değerleri içeren kavramlar da geliştirmiştir. Tablo-1’de görüldüğü üzere, bu kavramlar; sıvının kalınlığı, kullanılan sıvı çeşidi ve sıvı akışını kontrol etmede kullanılan tutma kuvveti çeşidine göre sınıflandırılabilir. (13)

Enerji taşıyıcı sıvı, yeterli Trityum temin edebilmek için Lityum içeren bir ortam olmalıdır. Pratiksel olarak adaylar; Lityum veya Sn-Li sıvı metalleri ile Flibe (F, Li, Be) erimiş tuzudur. Lityum ve Flibe sıvıları, uzun yıllar geleneksel kavramlar için dikkate alınmıştır. Sn-Li, plazma yüzeyinde akan sıvı için önemli bir avantaj olan; yüksek sıcaklıklardaki oldukça düşük buhar basıncı özelliğinden dolayı APEX çalışmalarına dahil edilmiştir. Plazmanın kararlılığı, enerji taşıyıcı sıvının elektriksel iletkenliğine bağlı olarak değişmektedir. Sıvı metal akışlarında, manyetik-hidrodinamik (MHD) çekmelerin üstesinden gelmek için elektrik izolatörlerin kullanılması gerekebilir. Flibe için ise, MHD etkileri oldukça önemsizdir. (3)(15)

fluxes that originate from the plasma. In case this first wall is structural material (solid), the highest damage will occur at this region and the lifetime of the wall will be limited with a few years.

In the APEX studies, the conventional first solid wall facing with the plasma is replaced with fast flowing thin liquid wall layer. Free-surface first liquid wall concept is a revolutionary concept. The first liquid wall flows very fast and detains charged particles, and followed by the thick liquid wall (blanket) which flows slowly and absorbs generated energy and converts it to heat. Liquid wall has a capability to enhance tremendously the vision of the fusion as an energy source. Comparing with the conventional solid first wall concept, liquid wall has following advantages; (4)(14)(15)

- with the renewable wall characteristic, allows high power density ($>2 \text{ MW/m}^2$),
- has improved tritium breeding potential,
- Neutronically, reduces radiation damage and activation dramatically in structural material,
- Easiers maintainability of in-vessel components,
- Reduces problems related with reactor material.
- Reduces R&D requirements concerning both cost and time scale,
- provides high thermodynamic efficiency ($>40\%$).

2. APEX FUSION REACTOR MODEL

In APEX model, as shown in Figure 1, the first solid wall is replaced with fast flowing thin liquid wall layer. In the figure, the temperatures in $^{\circ}\text{C}$ are given for various regions. At the liquid exit and liquid surface the temperature is about 600°C whereas it is 500°C at the liquid inlet.

The liquid wall idea evolved during the APEX study into a number of concepts that have some common features but also have widely different issues and merits. These concepts can be classified (as shown in Table 1) according to: thickness of the liquid, type of liquid used, and the type of restraining force used to control the liquid flow (13).

The working liquid must be lithium- containing medium in order to provide adequate tritium. The only such practical candidates are the liquid metals lithium and Sn-Li, and the molten salt Flibe (F, Li, Be). Lithium and Flibe were considered for traditional concepts for many years. Sn-Li was introduced into APEX because it has very low vapor pressure at elevated temperature, which is an important advantage in a plasma-facing flowing liquid. The plasma stability differs based on the electrical conductivity of the working liquid. Flowing liquid metals may require the use of electrical insulators to overcome the MHD drag, while for Flibe free surface flows, MHD effects caused by the interaction with the mean flow are less significant. (3)(15)

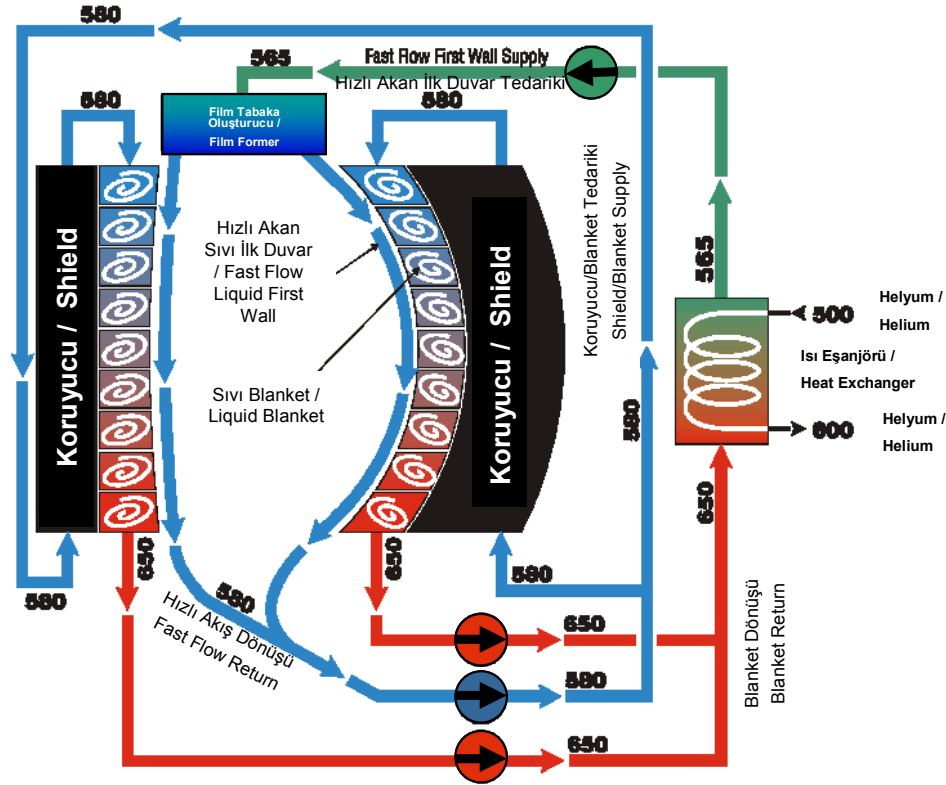


Figure 1. Temperature Profile For Liquid Flibe Flow
Şekil 1. Flibe Sıvı Akışı İçin Sıcaklık Şeması

Çizelge 1. APEX Sıvı Duvar Alternatifleri		Table 1. APEX Liquid Wall Alternatives	
Kalınlık	- İnce (~2 cm) - Orta (~15 cm) - Kalın (>40 cm)	Thickness	- Thin (~2 cm) - Moderately Thick (~15 cm) - Thick (>40 cm)
Enerji Taşıyıcı Sıvı	- Lityum - Sn-Li - Flibe	Working Liquid	- Lithium - Sn-Li - Flibe
Hidrodinamik Tahrikli Tutma Kuvveti	- Yerçekimi-Momentum Tahrikli (GMD) - Girdap (Swirl) Akışlı GMD - Elektromanyetik Olarak Tutma - Manyetik İtme	Hydrodynamic Driving / Restraining Force	- Gravity – Mometum Driven (GMD) - GMD with Swirl Flow - Elektromagnetically Restrained - Magnetic Propulsion
Sıvı Yapı	- Tekil sürekli akış - İki Akış (Plazma kısmında hızlı akan ince tabaka ve yavaş akan esas akış)	Liquid Structure	- Single, contiguous, stream - Two streams (fast flowing thin layer on the plasma side and slowly flowing bulk stream)

Plazmayla direkt olarak yüzleşen ve bir katı “sırt duvar”ın önündeki sıvı duvar için seçilen kalınlık, bazı ortak noktalara sahip fakat yegane avantaj ve gelişmeler içeren farklı kavramlar ortaya çıkarmaktadır. Hem ince hem de kalın duvar, yüksek yüzey ısı akısını ortadan kaldırmaya elverişlidir. İnce ve kalın sıvı duvarlar arasındaki birincil fark; nötronların arka duvara ulaşmadan önce sıvı içindeki girme derinliğinin şiddetidir. İnce sıvı duvar kavramı erişilmesi kolaydır; fakat “kalın” sıvı duvar kavramı sıvı arkasındaki yapısal malzemede radyasyon hasarını ve aktivasyonu önemli oranda azaltır. (2)(7)(8)

3. MCNP-4 KODU İLE APEX’İN MODELLENMESİ

Günümüzde endüstriyel problemlerin doğasındaki karmaşıklık maalesef pek çok analitik çözümü olanak dışı bırakmaktadır. Problemlerin yapısı değişen teknolojiyle birlikte karmaşık hale gelmekte ve bütünleşik sistemlerin sayısı hızla artmaktadır. (6)(10)(11)

Analitik yaklaşımların aksine simülasyon modelleri, karmaşık problemlerin modellenmesi ve çözümünde daha başarılı olurlar. Değişkenler arasındaki etkileşimi simülasyon modellerinde gözlemek daha kolaydır. Ancak, yoğun bilgisayar kullanımı gerekir. Gerçek sistemden toplanan bilgiler, bilgisayarda geliştirilen modellere uygulanarak birtakım sayısal sonuçlara ulaşmak hedeflenir. Bunların değerlendirilmesi ve yorumlanması yapılarak sistem performans ölçütlerine ait birtakım tahminlerde bulunulur. Simülasyon modelleri aracılığı ile en kötü durum senaryoları da incelenebilir. (6)

Simülasyon tekniğinin Monte-Carlo tekniği olarak adlandırılması Von Neumann ve Ulam tarafından yapılmış olup ilk uygulamaları Nötron yayılımı problemlerinde gerçekleştirmişlerdir. Monte-Carlo tekniği, özel bir denemede ya da bir simülasyon çalışmasında bir ya da daha çok olasılık dağılımından rasgele sayılar seçme tekniğidir. Yöntem daha sonra, çoklu integral değerlendirme problemleri gibi oldukça karmaşık istatistiksel olmayan problemlerin çözümüne kolaylıkla adapte edilmiştir. Bazı yazarlar, yöntemin sadece varyans azaltma tekniklerinin örnekleme işlemlerinde kullanılması şeklinde sınıflandırılmasını önermişlerdir. Buna rağmen, yöntemin bugünkü kullanımı, genellikle olasılık dağılımlarından rasgele değerlerin seçimi şeklindedir. (10)

Çalışmada kullanılan APEX füzyon reaktörü, Monte-Carlo tekniğini kullanan MCNP-4 bilgisayar programı kullanılarak, torus şeklinde üç boyutlu olarak tasarlanmıştır (14)(15)(16). APEX reaktörü için boyutlar, APEX çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen ARIES-RS reaktör modelinden alınmıştır. Bu modelde torusun yarıçapı 552 cm, küçük yarıçapı ilk sıvı duvarın iç yüzeyinden 143 cm dir. Torusun yüksekliği, ilk sıvı duvar merkezinden 250 cm olarak alınmıştır. Çalışmada kullanılan reaktörün malzemeleri Tablo 2’de, yarıçap ve et kalınlıkları ise Şekil 2’de tek boyutlu olarak ayrıntılı bir şekilde gösterilmektedir.

The thickness selected for the liquid wall layer flow directly facing the plasma and in front of a solid “backing wall” leads to different concepts that have some common issues but many unique advantages and challenges. Both thin and thick liquid walls can adequately remove high surface heat flux. A primary difference between thin and thick liquid walls is the magnitude of attenuation of neutrons in the liquid before they reach the backing wall. The “thin” liquid wall concept is easier to attain, but “thick” liquid wall concepts greatly reduce radiation damage and activation of the structure behind the liquid. (2)(7)(8)

3. DESIGN FOR APEX BY MCNP-4 CODE

Nowadays, the complexity in the nature of the industrial problems unfortunately makes analytical solution impossible. The nature of problems becomes complicated and the number of integrated systems increases very fast with the technological developments. (6)(10)(11)

On contrary to the analytical approaches, simulation models are more successful in modeling and solution of complicated problems. It is easier to follow the interactions between the variables in simulation designs. But, it requires too much computer usage. It is aimed to get numerical results by applying the data collected from the reel system to the model developed on the computer. By evaluating and interpreting the results, some estimates are done for system performance criterions. By using simulation models the worst condition scenarios can also be investigated. (6)

Calling the simulation technique as Monte-Carlo technique was done by Von Neumann and Ulam, and first applications was carried out in neutron diffusion problems. Monte-Carlo technique is randomly number selection technique from one or more probabilistic distribution in a special trial or simulation study. The method was then adopted easily for solution of much more complicated and non-statistical problems such as integro-differential evaluation problems. Some authors suggested classification of the method for using only for sampling works of variance reduction techniques. However, the usage of the method nowadays is generally in selection of values randomly from the probabilistic distributions. (10)

APEX fusion reactor used in the study was designed by using MCNP-4 computer code, using Monte-Carlo technique, as 3-D torus (14)(15)(16). The dimensions for the APEX reactor has been taken from the ARIES-RS reactor design which was made in the framework of APEX studies. In this model, the radius of torus is 552 cm and minor radius starting from inner surface of first wall is 143 cm. The height of torus starting from center of first wall is 250 cm. The reactor materials used in the study are given in Table 2, and radius and thicknesses in one dimension are shown in detail in Figure 2.

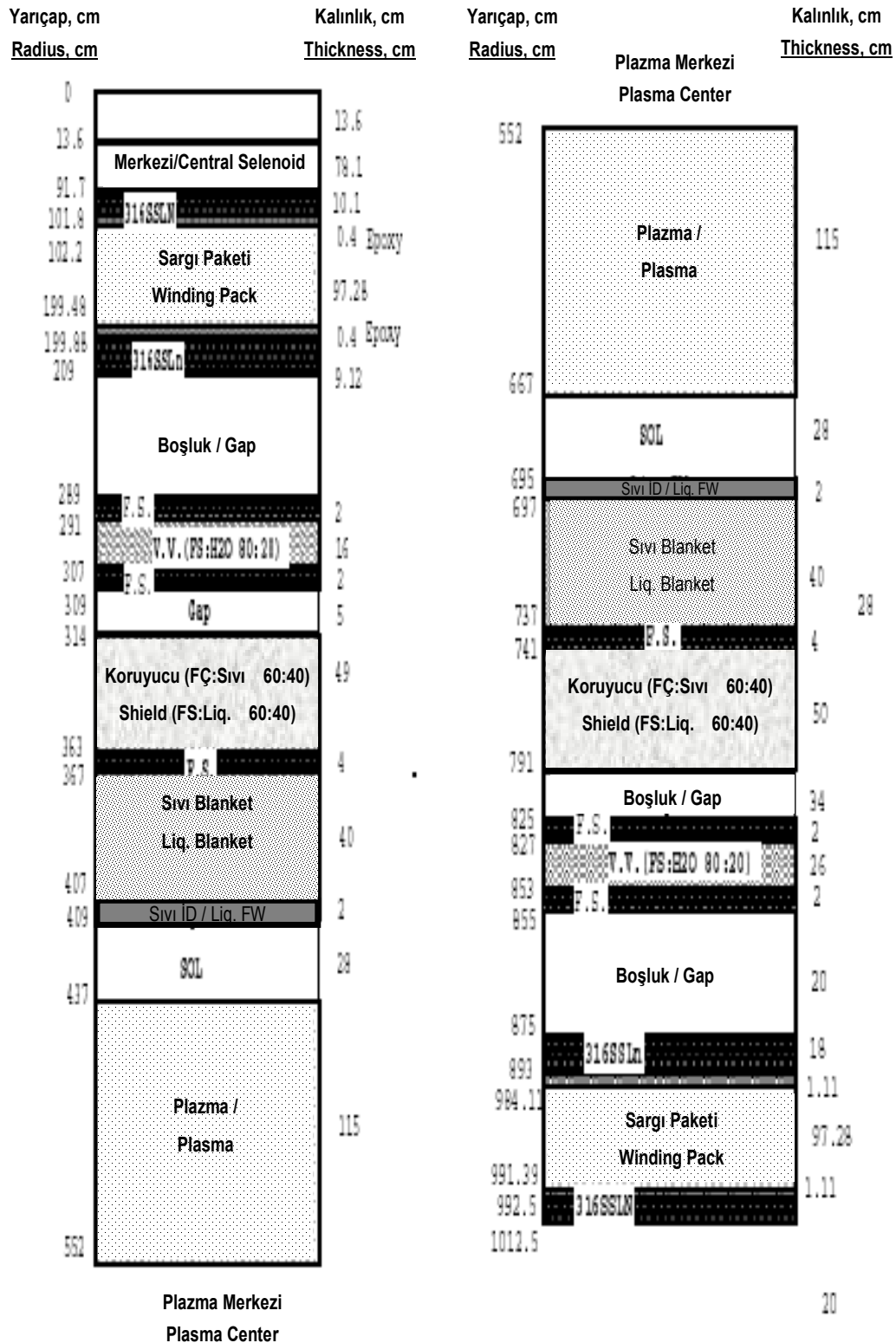


Figure 2. One Dimensional APEX Model
Şekil 2. Tek Boyutlu APEX Modeli

Table 2. Materials Used In The Design of The APEX Fusion Reactor
Çizelge 2. APEX Füzyon Reaktörü Tasarımında Kullanılan Malzemeler

Reaktörün Bölümleri/ Reactor Zones	Malzeme/ Material	Malzemenin İçerdiği İzotoplar/ Isotopes Included In the Material	% İzotop/ Isotope %	Kütleli Yoğunluk/ Mass Density (gr/cm ³)
1. Bölge 1 st Zone	Vakum/ Vacuum			
2. ve 3. Bölge 2 nd & 3 rd Zone	Sıvı Duvar/ Liquid Wall	Li-6 Li-7 F Be	0,150400 1,849600 4,000000 1,000000	1,98
4. Bölge 4 th Zone	Çelik Duvar/ Ferritic Steel	C V Cr Fe Ta W	0,001000 0,002500 0,090000 0,885800 0,000700 0,020000	8,03
5. Bölge 5 th Zone	Koruyucu/ Shield %60 F.S. + %40 Flibe	F Li-6 Li-7 Be W V Cr Fe Ta C	1,600000 0,060160 0,739840 0,400000 0,012000 0,001500 0,054000 0,531480 0,000420 0,000600	3,05
6. Bölge 6 th Zone	Boşluk/ Gap			
7. ve 9. Bölge 7 th & 9 th Zone	SS316LN	Fe Cr Mn Si Ni Mo Nb Co Cu	0,652818 0,175079 0,018009 0,002501 0,120055 0,025212 0,001910 0,002501 0,002524	8,01
8. Bölge 8 th Zone	Vakum Vessel/ Vacuum Vessel %80 Ferritic Steel + %20 H ₂ O	Ni Mo H O Fe Cr Mn Si Nb Co Cu	0,096044 0,020009 0,400000 0,200000 0,522255 0,140063 0,014407 0,002001 0,001120 0,002001 0,002019	5,28

4. SONUÇLAR

MCNP-4B bilgisayar kodu ile gerçekleştirilen APEX'in kesiti Şekil 3 ve 4' te gösterilmektedir. En içteki bölge plazma ve boşluktan oluşmaktadır. Bunu takiben ilk sıvı duvar, manto, çelik duvar, zırh, paslanmaz çelik, vakum vessel ve paslanmaz çelik bölgeleri bulunmaktadır

4. RESULTS

Cross-sectional views of APEX designed by using MCNP-4B computer code are shown in Figure 3 and 4. The inner region is consisting of plasma and vacuum. Following this, first liquid wall, blanket, ferritic steel, shield, stainless steel and ferritic steel zone take place.

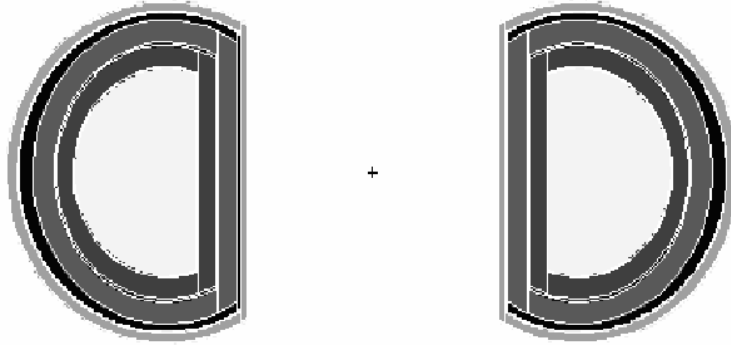


Figure 3. Cross-Sectional View of APEX Fusion Reactor Model Designed in MCNP-4B
Şekil 3. MCNP-4B’de Oluşturulan APEX Füzyon Reaktör Modeli İçin Torusun Kesiti

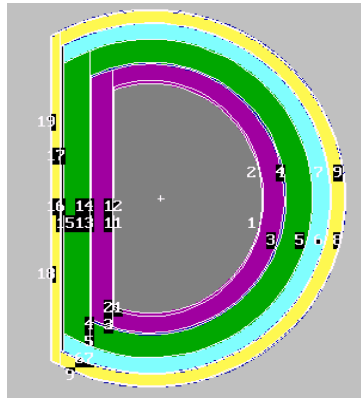


Figure 4. Cross-Sectional View of APEX Fusion Reactor Model Designed in MCNP-4B with Cell and Surface Numbers From Inner to the Outer
Şekil 4. MCNP-4B’de Oluşturulan APEX Füzyon Reaktör Modelinin İçten Dışa Doğru Hücre ve Yüzeylerinin Numaralandırılmış Kesitleri

Modellemenin akabinde, plazma; sıvı ilk duvarın iç yüzeyinin homojen bir biçimde maruz kaldığı nötron kaynağı olarak modellenmiş ve Şekil 5’te gösterilen füzyon nötron spektrumu kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır

Following modeling, plasma was designed as neutron source that the inner surface of first liquid wall exposed to neutrons homogeneously and the calculations were conducted with the fusion neutron spectrum shown in Figure 5.

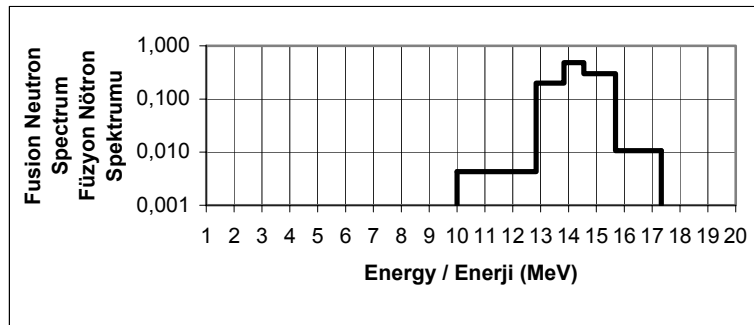


Figure 5. Neutron Spectrum Used In The Calculations

Şekil 5. Hesaplamalarda Kullanılan Kaynak Nötron Spektrumu

Flibe tuzu içerisindeki Li-6’nın zenginliğinin değişimine bağlı olarak sıvı duvar, manto ve zırh bölgelerinde kaynak nötron başına üretilen toplam trityum miktarları (TBR) hesaplanmıştır. Tüm Li-6 zenginlikleri için TBR değeri, kendi kendine yetebilen bir füzyon reaktörü için gerekli olan $TBR > 1,05$ şartını sağlamaktadır.

The total tritium production amount per source neutron (TBR) in first liquid wall, blanket and shield zones was calculated with respect to the enrichment of Li-6 in the Flibe. For all Li-6 enrichments, TBR meets the requirement of $TBR > 1,05$ which is necessary for self sufficient fusion reactor.

Şekil 6'da MCNP ile gerçekleştirilen üç boyutlu hesaplama sonuçları, APEX çalışma grubu tarafından ANISN bilgisayar kodu ile gerçekleştirilen tek boyutlu modelleme sonuçları ile birlikte gösterilmekte olup sonuçlar birbirine yakındır. Tritiyum üretim oranı (TBR); doğal Li zenginliği için (%7,56 Li-6 ve %92,44 Li-7) maksimum olmakta ve Li-6 zenginliği arttıkça azalmaktadır. Bunun nedeni; sıvı ilk duvarın plazmadan çıkan yüksek enerjili nötronlara maruz kalmasıdır. Li-6 zenginliğinin artırılması; Li-7 oranının azaltılması ve dolayısıyla da Li-7($n,n'\alpha$)t reaksiyonları aracılığıyla oluşan nötron akısının da azalması demektir. Diğer taraftan, sıvı ilk duvar yaklaşımında Flibe içerisindeki doğal Li için TBR değerinin en yüksek olması; geleneksel katı ilk duvar yaklaşımlarında Flibe kullanımı için gerekli olan Li zenginleştirme işlemine gereksinimi ortadan kaldıracak için önemli bir avantajdır.

In Figure 6, the results of 3-D calculations with MCNP is shown in comparison with the results of one dimensional modeling with ANISN code carried out by APEX working group and results are close to each other. Tritium production rate (TBR) is maximum for natural Li enrichment (7,56% Li-6 ve 92,44% Li-7) and decreases with the increase in Li-6 enrichment. The reason is that the first liquid wall is exposed to the high energy neutrons originate from the plasma. Increasing Li-6 enrichment means decreasing Li-7 enrichment and thus decreasing neutron flux generated by Li-7($n,n'\alpha$)t reactions. On the other hand, occurrence of maximum TBR value for natural Lithium in Flibe in first liquid wall approach is an important advantage because it eliminates enrichment required in case of Flibe used in conventional solid first wall approach.

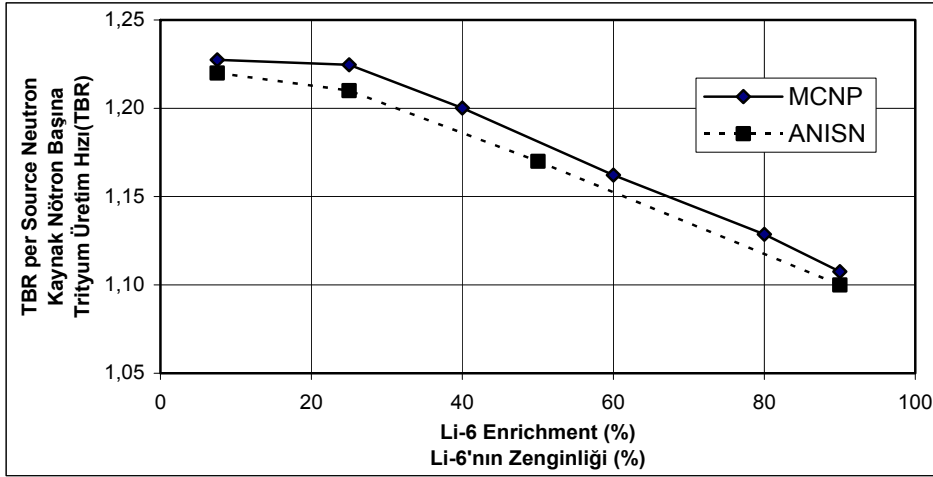


Figure 6. Tritium Production Rate Per Source Neutron Versus Li-6 Enrichment (5)(6)

Şekil 6. Flibe içerisindeki Li-6 Zenginliğine Bağlı Olarak Kaynak Nötron Başına Tritiyum Üretim Hızının Değişimi. (5)(6)

Şekil 7'den görüleceği üzere; Li-6 zenginliği arttıkça, Li-6'nın nötron ile reaksiyonundan Li-7'nin nötron ile reaksiyonuna nazaran daha fazla enerji açığa çıktığından füzyon reaktöründe nötron reaksiyonlarından elde edilen enerji artmaktadır.

Geleneksel katı ilk duvar Şekil 5'te gösterilen yüksek enerjili nötron akısına direkt maruz kalmaktadır. Halbuki, sıvı ilk duvar kullanıldığında, yapısal katı malzemenin maruz kalacağı nötronların enerjisi ve akısı Şekil 8'den görüleceği üzere oldukça düşmektedir. Nötronların enerjisi, 10 MeV mertebesinde eV düzeyine inmektedir. Bu sayede, yapısal malzeme hasarları oldukça azaltılmaktadır.

In Figure 7, it is concluded that energy generated from the neutron reactions in the fusion reactor is increased with Li-6 enrichment because more energy is generated in Li-6 neutron reaction than Li-7 neutron reaction.

Conventional first solid wall is exposed barely to the high energy neutrons shown in Figure 5. But, when the first liquid wall is used, the neutron energy and flux that structural material exposed to it is decreased too much as shown in Figure 8. The neutron energy is decreased from 10 MeV to eV levels. Hence, structural material damages are importantly reduced.

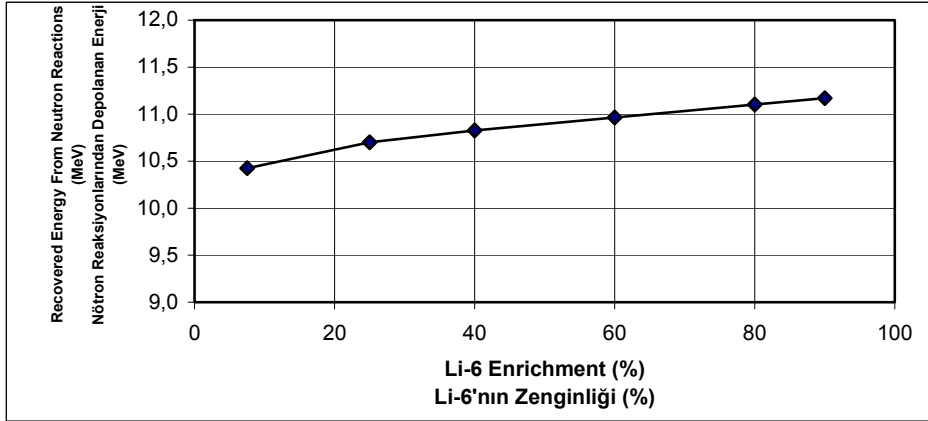


Figure 7. Recovered Energy From Neutron Reactions Per Source Neutron Versus Li-6 Enrichment in Flibe (MeV)
Şekil 7. Flibe İçerisindeki Li-6 Zenginliğine Bağlı Olarak Nötron Reaksiyonlarından Depolanan Enerji (MeV)

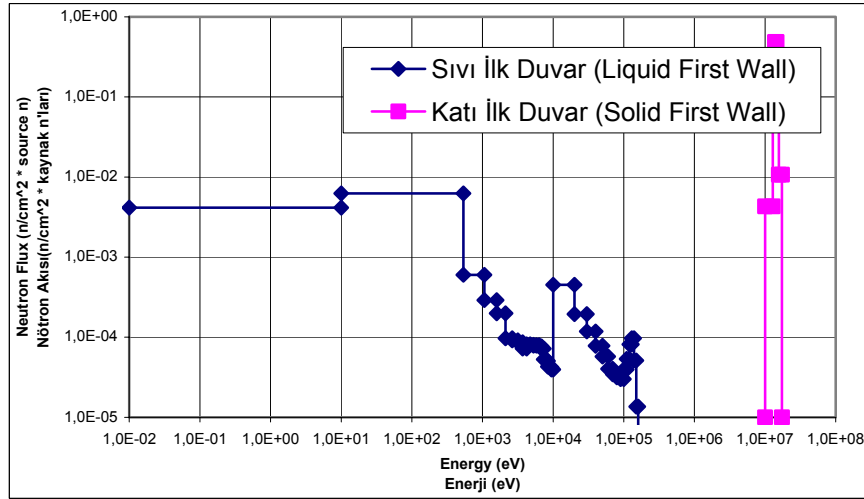


Figure 8. Neutron Flux for Solid and Liquid First Wall Approaches That The Structural Material Close to the Plasma Exposed To It
Şekil 8. Katı ilk duvar ve sıvı ilk duvar kavramları için plazmaya en yakın yapısal malzemenin maruz kalacağı nötron akıları

KAYNAKLAR/ REFERENCES

1. Ralph, W., Liquid First Walls for Magnetic Fusion Energy, UCRL-ID-123902, **Lawrence Livermore National Laboratory**, 1996.
2. A.Abdou, M., The APEX Team, Mechanical and Aerospace Engineering Department, **University of California**, Los Angeles
3. Şahin, S., Kaya, M., "MFE Reactors with Liquid Protection for the First Wall", **Fusion Technology**, Vol.34, No:2, 1998.
4. Hançerlioğulları, A., "APEX Hibrid Reaktör Modellemesi İçin Monte Carlo Yöntemi Kullanılarak Nötron Transport Hesaplamalarının Yapılması", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi**, Ankara, 2003.
5. Ying, A., Thick Liquid Blanket Concept, APEX Interim Report, **University of California**, Los Angeles, 1999.
6. Johnston, R., A General Monte Carlo Neutronics Code, LAMS-2856, Losalamos, 1963
7. Şahin, S., Moir, R.W., Şahinaslan, A., Şahin, H.M., "Radiation Damage In Liquid-Protected First Wall Materials, For IFE-Reactor", **Fusion Technology**, Part (A) 30(3) pp.1027 –1035, 1996.
8. Şahin, S., Şahinaslan, A., Kaya, M., "Neutronic Calculations for a Magnetic Fusion Energy Reactor With Liquid Protection for the First Wall", **Fusion Technology**, 34 (2) pp.95-108, 1998

9. Übeyli, M., “Füzyon-Fisyon Hibrid Reaktöründe Yakıt Gençleştirilmesi ve Zenginleştirilmesi”, **Politeknik Dergisi**, Cilt 4, Sayı 4, 2001.
10. Şarer, B., Hançerlioğulları, A., Übeyli, M., “Nükleer Hesaplamalarda Monte Carlo Yönteminin Kullanımı” , **8 nci Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojiler Kongresi**, Kayseri, 2003.
11. Şarer, B., Hançerlioğulları, A., Übeyli, M., “Füzyon Teknolojisinde Sıvı İlk Duvar Yaklaşımı:APEX”, **8 nci Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojiler Kongresi**, Kayseri, 2003.
12. Bathke, C.G. and ARIES Team, “Systems Analysis in Support of the Selection of the ARIES-RS Design Point”, **Fusion Engineering and Design**, 38 (59), 1997.
13. Hoffman, A.L., “Flux Buildup in Field Reversed Configurations Using Rotating Magnetic Fields”, **Physics of Plasmas**, 5 (979), 1998.
14. Perkins, L.J., Ho, S.K., Hammer J.H., “Deep Penetration Fueling of Reactor – Grade Tokamak Plasmas With Accelerated Compact Toroids”, **Nuclear Fusion**, 28 (1365), 1988.
15. Moir, R.N., “Rotating Liquid Blanket for Toroidal Fusion Reactor”, **Fusion Engineering and Design**, Vol. 5, 1987.
16. Parks, P.B., “Refueling Tokamaks By Injection Of Compact Toroids”, **Physical Review Letters**, 61 (1364), 1988.

Received/ Geliş Tarihi: 31.03.2004 Accepted/Kabul Tarihi:20.10.2004