

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**ELEKTRON DEMETİ DURDURUCUSUNUN
TASARIMI VE ZIRHLAMA OPTİMİZASYONU**

Mehmet YILDIZ

Danışman: Prof. Dr. Yüksel ALTAŞ

Eş-Danışman: Prof. Dr. Şule ERGÜN

Nükleer Bilimler Ana Bilim Dalı
Nükleer Teknoloji Doktora Programı

İzmir

2023

Mehmet YILDIZ tarafından doktora tezi olarak sunulan “Elektron Demeti Durdurucusunun Tasarımı ve Zırlama Optimizasyonu” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 06/02/2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Yüksel ALTAŞ

.....

Raportör Üye: Doç. Dr. Şenol SERT

.....

Üye : Prof. Dr. Nalan KABAY

.....

Üye : Prof. Dr. Durmuş Özdemir

.....

Üye : Doç. Dr. Ümran HIÇSÖNMEZ

.....

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Elektron Demeti Durdurucusunun Tasarımı ve Zırhlama Optimizasyonu” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

06 / 02 / 2023

Mehmet YILDIZ

ÖZET

ELEKTRON DEMETİ DURDURUCUSUNUN TASARIMI VE ZIRHLAMA OPTİMİZASYONU

YILDIZ, Mehmet

Doktora Tezi, Nükleer Teknoloji Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yüksel ALTAŞ

Eş Danışman: Prof. Dr. Şule ERGÜN

Şubat 2023, 92 sayfa

Demet durdurucuların temel işlevi, hızlandırıcılarda parçacık veya foton demetlerinin güvenli bir şekilde durdurulmasını sağlamaktır. Demetlerin gücünü, güvenli bir şekilde absorbe edebilmeli ve ısı transferi yoluyla bir soğutucuya aktarabilmelidir.

Demet durdurucu sistemlerinin malzemesi ve geometrisi, hızlandırıcı tesislerinin yapısına, çalışma sürelerine ve demetlerin özelliklerine göre belirlenir. Malzeme seçiminde ve sistemin tasarımında, demetin türü, enerjisi ve gücünün yanısıra, termal, mekanik ve radyoaktif etkenler önemli rol oynar.

Bu çalışmada, kurulmakta olan TARLA (Turkish Accelerator and Radiation Laboratory) Elektron Hızlandırıcısı ve Serbest Elektron Lazeri Tesisi'nde kullanılabilecek kapasiteye sahip, alüminyum gövdeli bir elektron demet durdurucusu tasarımı yapılmıştır. Demet durdurucunun zırhlamasında, baritli beton ve bor katkılı beton kullanılarak, FLUKA programı ile simülasyonlar gerçekleştirilmiş, hızlandırıcı çalışır durumdayken, tesiste oluşacak radyasyon doz hızı haritaları elde edilmiştir.

Uzun dönem çalışma sonrası, demet durdurucuda oluşan radyonüklidlerin sebep olacağı artık radyasyon doz hızı, soğuma sürelerine göre hesaplanmıştır.

Demet durdurucunun, termal-akışkan analizleri, ANSYS-Fluent programı ile gerçekleştirilerek, alüminyum gövde ve soğutma suyundaki sıcaklar belirlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Hızlandırıcı, demet durdurucu, radyasyon simülasyonu, FLUKA, ANSYS-Fluent.



ABSTRACT

DESIGN OF THE ELECTRON BEAM DUMP AND OPTIMISATION OF ITS SHIELDING

Mehmet YILDIZ

PhD in Nuclear Technology Department

Supervisor: Prof. Dr. Yüksel ALTAŞ

Co- Supervisor: Prof. Dr. Şule ERGÜN

February 2023, 92 pages

The main function of beam dumps is to ensure that beams of particles or photons are safely stopped in accelerators. The beam dump must be able to safely absorb the power of the beams and transfer it to a coolant by transferring heat.

The material and geometry of the beam dump systems are determined according to the structure of the accelerator facilities, their operating times and the related properties of the beams. In addition to the type, energy and power of the beam, thermal, mechanical and radioactive factors play an important role in material selection and design of the system.

In this study, an electron beam dump with an aluminum casing that can be used in Turkish Accelerator and Radiation Laboratory (TARLA) is designed.

Simulations were performed with the FLUKA program, using beam dump shielded with barite concrete and boron doped concrete and the radiation dose rate maps that will be observed in the facility have been obtained while the accelerator is in operation.

After the long-term operation, the residual radiation dose rate caused by the radionuclides formed in the beam dump was calculated according to the cooling period.

The thermal-hydraulic analyzes of the beam dump were performed with the ANSYS-Fluent program, and the temperatures in the aluminum body and in the cooling water were determined.

.

Keywords: Accelerator, beam dump, radiation simulation, FLUKA, ANSYS-Fluent.

ÖNSÖZ

Kurulumu Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü'nde devam etmekte olan Elektron Hızlandırıcısı ve Işınım Tesisi (TARLA), ülkemizin ilk hızlandırıcılara dayalı ışınım kaynağı laboratuvarı olacaktır.

Bu tesisin kurulumunda görev alan ekipte yer aldığım dönemde, radyasyon ölçüm sistemlerinin planlanması ile tesisin ihtiyaç duyduğu birçok bileşenden biri olan, demet durdurucu sistemin tasarımı çalışmalarına katkıda bulundum.

Ülkemizin bir ilki olacak TARLA tesisinde gerçekleştirilen çalışmalar, yapılan teorik çalışmaların somutlaştırılmasının önünü açacak, katkılar sunan bilim insanlarımıza ve tesisde görev alan çalışanlara iyi bir deneyim sağlayacaktır.

İZMİR

06/02/2023

Mehmet YILDIZ



İÇİNDEKİLER

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ.....	xi
İÇİNDEKİLER.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
TABLolar DİZİNİ.....	xvii
SİMGELEr VE KISALTMALAR	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	2
2.1 Parçaçık Hızlandırıcıların Gelişimi	2
2.1.1 İlk dönem.....	2
2.1.2 Esas Gelişmeler	4
2.2 Elektron Hızlandırıcısı ve Işınım Tesisi (TARLA).....	5
2.3 Demet Durdurucular	7
2.3.1 JNC Elektron Demet Durdurucusu.....	7
2.3.2 PSI Proton Demet Durdurucusu	8
2.3.3 FERMI, TTF1 Elektron Demet Durdurucuları.....	9
2.3.4 NLS Elektron Demet Durdurucusu	10
2.3.5 ELBE Elektron Demet Durdurucusu	11
2.3.6 ARIEL Elektron Demet Durdurucusu	11
2.3.7 SLAC Elektron Demet Durdurucusu.....	12
2.4 Elektronların Madde ile Etkileşmesi ve Enerji Kaybı.....	12
2.4.1 İyonlaştırma	13
2.4.2 Moller Saçılması.....	14
2.4.3 Bhabha Saçılması	14
2.4.4 Elektron-Pozitron Yok Oluşu	14
2.4.5 Frenleme (Bremsstrahlung) Radyasyonu	14
2.4.6 Radyasyon Uzunluğu.....	15
2.4.7 Elektronların Enerji Kaybı.....	16

2.5 Fotonların Madde İle Etkileşmesi	17
2.5.1 Fotoelektrik Etki.....	17
2.5.2 Compton Saçılması	17
2.5.3 Çift Oluşumu	17
2.5.4 Fotonükleer Etkileşimler	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM	21
3.1 Elektron Demet Durdurucu	21
3.1.1 Demet Durdurucunun Geometrisi	22
3.1.2 TARLA Tesisinin Yerleşim Planı	25
3.2 Simülasyon Yöntemleri.....	26
3.2.1 FLUKA 26	
3.2.2 ANSYS -Fluent	27
4. BULGULAR	29
4.1 Elektron Demeti Durdurucusunda Depolanan Enerji.....	29
4.2 TARLA Tesisinin Modeli	31
4.2.1 Hızlandırıcı Salonu Doz Hızı Görüntüleri	32
4.2.2 SEL Salonu Doz Hızı Görüntüleri	37
4.3 Artık Radyasyon.....	43
4.4 ANSYS-Fluent	47
5. SONUÇ	51
KAYNAKLAR DİZİNİ	53
TEŞEKKÜR.....	55
ÖZGEÇMİŞ	57
EKLER	1

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. TARLA tesisi şeması (Aksoy ve Karsli (Eds), 2015).	5
2.2. JNC Elektron demet durdurucusu (Takei ve Takeda, 2000).	8
2.3. PSI proton demet durdurucusu (Wohlmuther, 2011).	8
2.4. PSI proton demet durdurucusu (Reggiani, 2012).	9
2.5. FERMI elektron demet durdurucusu (Frohlich et.al, 2014).	10
2.6. FERMI elektron demet durdurucusu (Frohlich et.al, 2014).	10
2.7. ELBE elektron demet durdurucusu (Naumann et.al, 1999).	11
2.8. Ariel Elektron demeti durdurucusu (Nozar, 2014).	12
2.9. Elektron veya pozitronun, kurşunda radyasyon uzunluğu başına kesirli enerji kaybı (Ahmed 2015).	13
2.10. Bremsstrahlung verimi (NCRP,1977)	15
2.11. Fotonötron verimi (NCRP, 1977).	19
3.1. Demet durdurucu, yanal kesit görüntüsü.	23
3.2. Demet durdurucu, dikey kesit görüntüsü.	23
3.3. TARLA tesisi şeması.	25
3.4. TARLA tesisi FLUKA modeli.	25
4.1. Depolanmış enerjinin durdurucu içindeki dağılımı.	30
4.2. Salonlardaki iyon odası dedektörlerinin konumları.	32
4.3. Hızlandırıcı salonu doz hızı haritası, kurşun zırhlı.	33
4.4. Hızlandırıcı salonu, 40 cm baritli beton zırhlı doz hızı haritası.	34
4.5. Hızlandırıcı salonu, 60 cm baritli beton zırhlı doz hızı haritası.	35
4.6. Hızlandırıcı salonu, 40 cm bor katkılı beton zırhlı doz hızı haritası.	35
4.7. Hızlandırıcı salonu, 60 cm bor katkılı beton zırhlı doz hızı haritası.	36
4.8. SEL salonu, 60 cm baritli beton zırhlı doz hızı haritası.	37
4.9. SEL salonu, 80 cm baritli beton zırhlı doz hızı haritası.	38
4.10. SEL salonu, 100 cm baritli beton zırhlı doz hızı haritası.	39
4.11. SEL salonu, 60 cm bor katkılı beton zırhlı doz hızı haritası.	39
4.12. SEL salonu, 80 cm bor katkılı beton zırhlı doz hızı haritası.	40

4.13. SEL salonu, 100 cm bor katkılı beton zırlı doz hızı haritası.	41
4.14. SEL salonu, durdurucu etrafında (X ekseninde) doz hızları.	42
4.15. Durdurucudaki artık radyasyon doz hızı.	45
4.16. Alüminyum gövde içi sıcaklık dağılımı.	48
4.17. Soğutma suyu içinde sıcaklık dağılımı.....	49



TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. TARLA elektron demeti parametreleri (Aksoy ve Karsli (Eds), 2015).	6
3.1. Alüminyumun fiziksel özellikleri.	22
3.2. Elektron demet durdurucusunun ölçüleri.	24
4.1. Elektron demeti parametreleri.	29
4.2. Durdurucuda depolanan enerji.	30
4.3. İyon odaları doz hızları, kurşun dış gövdeli.	36
4.4. İyon odaları doz hızları, demir dış gövdeli.	37
4.5. İyon odaları doz hızları, kurşun dış gövdeli.	43
4.6. İyon odaları doz hızları, demir dış gövdeli.	43
4.7. Demet durdurucudaki radyoizotop envanteri.	46



SİMGELER VE KISALTMALAR**Simgeler** **Açıklamalar**

A	Amper
eV	Elektron volt
Hz	Hertz
V	Volt
Sv	Sievert
e^-	Elektron
e^+	Pozitron
γ	Gama ışını
C	Coulomb
E_0	Demet Enerjisi
E_c	Kritik Enerji

Kısaltmalar

THM	Türk Hızlandırıcı Merkezi
TARLA	Turkish Accelerator and Radiation Laboratory
SEL	Serbest Elektron Lazeri
CERN	Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire
Fermilab	Fermi National Accelerator Laboratory
IR	Kızıl Ötesi
JNC	Japan Nuclear Cycle Development Institute
PSI	Paul Sherrer Institute
FERMI	Free Electron laser Radiation for Multidisciplinary Investigations

TESLA	TeV Energy Superconducting Linear Accelerators
TTF	TESLA Test Facility
NLS	New Light Source (UK)
HZDR	Helmoltz-Zentrum Dresden Rossendorf
ELBE	Electron Linac for beams with high Brilliance and low Emittance
ARIEL	Advanced Rare Isotope Laboratory
SLAC	Stanford Linear Accelerator Center
NCRP	National Council on Radiation Protection
FLUKA	FLUktuierende Kaskade
ANSYS	Analysis SYStem
Fluent	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımı
INFN	Italian National Institute of Nuclear Physics

1. GİRİŞ

Hızlandırıcılar, kullanılmaya başlandıkları 1930'lu yıllardan itibaren teknolojinin ve temel bilimlerin gelişmesine öncülük etmektedirler. Bilimsel araştırmaların yanında birçok uygulama alanında hızlandırıcılar kullanılmaktadır. Temel parçacık fiziği, nükleer fizik, malzeme bilimi, tıp, moleküler biyoloji, izotop üretimi, sterilizasyon, elektronik, arkeoloji, polimer kimyası, savunma sanayi vb. birçok alanda, parçacık hızlandırıcılarının izlerini ve gelişmelerine katkıda bulunduğunu görmekteyiz.

1997 yılından itibaren ülkemizdeki üniversitelerden bilim insanlarının, tasarım çalışmalarını sürdürdüğü Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesinin bir parçası olan Elektron Hızlandırıcısı ve Serbest Elektron Lazeri Tesisinin (TARLA) kurulmasına, 2006 yılında Kalkınma Bakanlığı'nın desteği ve üniversitelerarası işbirliği ile Ankara Üniversitesi koordinatörlüğünde başlanmıştır (Yavaş vd., 2005).

TARLA Tesisi, temel olarak 1 mA'lık (1.6 mA 'e kadar) elektron demetini süper iletken elektron hızlandırıcısı kullanarak 40 MeV 'e kadar hızlandırmaktır. Hızlandırılan elektron demeti esas olarak serbest elektron lazeri (SEL) üretmek için kullanılacaktır. Tesiste ayrıca, yüksek enerjili elektron demeti ile frenleme radyasyonu üretilerek, sabit hedef deneyleri yapılabilecek Bremsstrahlung radyasyonu deney bölgesi planlanmıştır. (Aksoy vd., 2015).

Bu tez çalışmasında, TARLA Tesisinde, elektron demetinin hızlandırıcı hattı sonunda durdurulmasını sağlayacak demet durdurucu sistemin tasarımı, elektron demeti ile elektron durdurucunun etkileşimi ile gerçekleşecek nükleer reaksiyonların demet durdurucunun yapısında oluşturacağı radyoaktif ve ısı etkileri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. TARLA Tesisinin çalışması sırasında ortaya çıkacak radyasyon doz miktarlarının, tesis çalışanlarının ve çevre sakinlerinin radyasyondan korunması göz önünde bulundurularak, belirlenen sınır değerlerine göre, demet durdurucunun zırhlaması için gereken malzeme ve ilgili tasarım parametreleri belirlenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

Tezin bu kısmında, parçacık hızlandırıcılarla ilgili genel bilgiler ve tasarlanan sistemle ilgili bilgiler verilmiştir.

2.1 Parçacık Hızlandırıcıların Gelişimi

2.1.1 İlk dönem

Parçacık hızlandırıcılarının gelişiminin ilk dönemi, üç tarihsel süreçte ele alınabilir. İlk süreç, 1895 yılında Lenard'ın gazlarda elektron saçılması üzerine yaptığı çalışmalarla başlatılabilir ki, bu çalışmalar ilerleyen yıllarda kendisine Nobel ödülünü getirmiştir. Atomik yapının keşfi için doğal alfa kaynakları ile yaptığı çalışmalarda Rutherford, çekirdeğin yapısının araştırılması için daha yüksek enerjili parçacıklara ihtiyacı olduğunu düşünüyordu. O günlerdeki teknoloji ile bu yüksek enerjilere ulaşılması mümkün gözükmüyordu. Esas amaç olan, atomun parçalanması için gereken enerjinin, Gamov'un ortaya koyduğu teori ile çok daha düşük olduğu ortaya kondu. Bunun üzerine, teknolojik olarak mümkün olan 500 kV gücünde parçacık hızlandırıcı, Cockroft ve Walton tarafından tasarlanarak, 400 keV' a hızlandırılan protonlarla lityum atomunun parçalanması başarılmıştır ve bu çalışmalar kendilerine Nobel ödülü getirmiştir (Bryant, 1994).

İlk süreçteki önemli gelişmeler (Bryant, 1994);

- ➔ 1895, Lenard, gazlarda elektron saçılması
- ➔ 1913, Franck ve Hertz, elektron kabuklarının uyarılması,
- ➔ 1906-1919, Rutherford, doğal alfa kaynakları ile yaptığı deneyler, atomik yapının teorisi,
- ➔ 1928, Van de Graaff, 1.5 MV' luk elektrostatik jeneratörünün icadı,
- ➔ 1932, Cockroft ve Walton, 700 kV' luk jeneratör ile hızlandırılmış protonlarla lityum atomunun parçalanması,

olarak sıralanabilir.

Doğrusal gerilimle çalışan hızlandırıcıların limitleri, nükleer fizik araştırmaları için gereken yüksek enerjiler için bir engeldi, bu yüzden alternatif teknolojilerin gelişmesi kaçınılmazdı (Bryant, 1994). İkinci süreç, alternatif hızlandırıcıların ortaya çıkması olarak tanımlanabilir. Statik alanlar yerine, değişen alanların kullanılması yeni bir hızlandırıcı modelinin ortaya çıkmasını sağladı.

İkinci süreçteki önemli gelişmeler (Bryant, 1994);

- 1924, Ising, değişken alanlar kullanmış, Rezonant hızlanma, verilen voltaj değerinden daha yüksek enerjilere ulaşılması,
- 1928, Wideroe, 1 MHz 25 kV'luk osilatör kullanarak, potasyum iyonlarının 50 keV enerjiye ulaşması,
- 1929, Lawrence, Ising ve Wideroe' dan etkilenecek şekilde siklotronu tasarladı,
- 1932, Lawrence, siklotron kullanarak protonları 1.25 MeV enerjili protonlar elde ederek atomların parçalanması (Nobel ödülü),

olarak gerçekleşmiştir.

Wideroe, farklı bir yöntemle parçacıkları hızlandırma fikrini ortaya koymuş, bu da üçüncü sürecin gelişmesini sağlamıştır. Ancak, kendisi bu hızlandırıcı modelini gerçekleştirememiştir. Betatron hızlandırıcısı adı verilen bu model, Kerst ve Serber tarafından başarıyla çalıştırılmıştır (Bryant, 1994).

Üçüncü süreçteki önemli gelişmeler (Bryant, 1994);

- 1923, Wideroe, betatron tasarımını yapmış ancak yayınlamamıştır,
- 1927, Wideroe, başarısız betatron denemesi ardından lineer hızlandırıcı yapmaya yönelmiştir,

- 1940, Kerst, betatron tasarımı, 2.2 MeV enerjili elektronlara ulaşılmıştır,
- 1950, Kerst, 300 MeV enerjiye sahip, dünyanın en büyük betatronunu tasarlamıştır,

olarak sıralanabilir.

2.1.2 Esas Gelişmeler

1940'lara kadar ortaya konan hızlandırıcı mekanizmalarının ardından, çok daha yüksek enerjili parçacıklar elde etmek için yeni fikirlere ve teknolojilere ihtiyaç duyuldu. Bu süreçte, odaklama mekanizmalarının geliştirilmesi ile bazı sorunlar aşılmıştır. Veksler 1944 yılında sinkrotronu icat etmiş ve 1-3 GeV enerjili protonların üretilmesinin yolunu açmıştır. Daha sonra geliştirilen odaklama mekanizmaları ile de çok daha yüksek enerjili parçacıklara ulaşılmıştır (Bryant, 1994).

Günümüze kadar olan önemli gelişmeler (Bryant, 1994);

- 1944, Veksler, faz kararlılığı ve sinkrotronun icadı,
- 1946, Goward ve Barnes, ilk çalışan sinkrotron,
- 1947, Oliphant, Gooden ve Hyde, 1 GeV'lik proton sinkronu tasarlamıştır,
- 1952, Brookhaven Ulusal Laboratuvarı, 3 GeV'lik proton sinkrotronunun yapımı,
- 1952, Courant, Livingston ve Snyder yeni bir odaklama prensibi ortaya koymuşlar, bu prensip faz kararlılığı ile birlikte yüksek enerjili hızlandırıcıların çalışma prensibi haline gelmiştir,
- 1969, CERN, Halka şeklinde proton - proton çarpıştırıcısının yapımına başlanmış,
- 1983, Fermilab, Tevatron adı verilen hızlandırıcı, süper iletken teknolojisini kullanan ilk büyük hızlandırıcı,

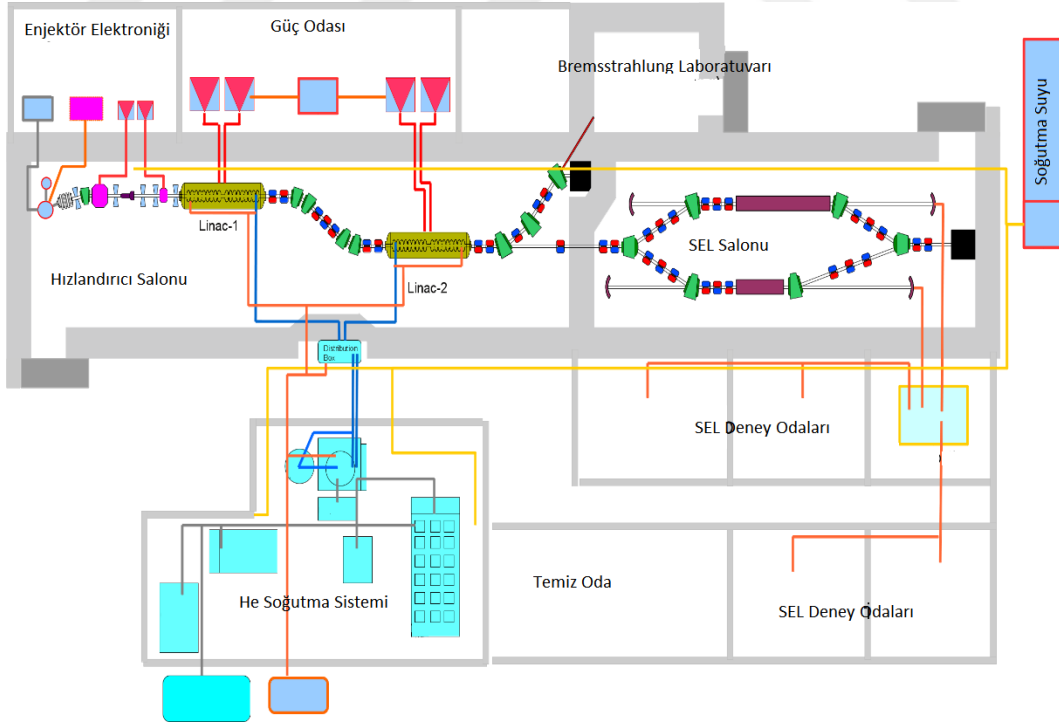
→ 1989, Stanford, İlk doğrusal elektron çarpıştırıcısı,

→ 2008, CERN, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı,

olarak ortaya çıkmıştır.

2.2 Elektron Hızlandırıcısı ve Işınım Tesisi (TARLA)

Kurulumu Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü'nde devam etmekte olan Elektron Hızlandırıcısı ve Işınım Tesisi (TARLA), ülkemizin ilk hızlandırıcılara dayalı ışınım kaynağı laboratuvarı olma özelliğine sahiptir. Hızlandırıcısı en yeni süper-iletken teknolojiye dayalı olan TARLA tesisinde elektronlar 40 MeV'e hızlandırılarak, elde edilen elektron demeti ile kızıl-ötesi (IR) bölgede 3-250 μm dalga boyu aralığında serbest elektron lazeri (SEL) ve 0-40 MeV enerji aralığında bremsstrahlung radyasyonu üretilmesi amaçlanmaktadır. TARLA tesisinin şeması Şekil 2.1'de gösterilmiştir (Aksoy ve Karşı(Eds), 2015)(Erenler, 2019).



Şekil 2.1. TARLA tesisi şeması (Aksoy ve Karşı (Eds), 2015).

Çizelge 2.1. TARLA elektron demeti parametreleri (Aksoy ve Karsli (Eds), 2015).

Parametre	Birimi	Planlanan Değer	Hedeflenen Değer
Demet Enerjisi	MeV	16-40	16-40
Paketçik yükü (max.)	pC	77	115
Ortalama demet akımı (max.)	mA	1	1,6
Enine emitans	mm mrad	<15	<15
Boyuna emitans	keV ps	<85	<85
Paketçik boyu	ps	0,4-6	0,4-6
Paketçik tekrarlama oranı	MHz	13	13-26
Makro atma süresi	µs	40 → CW	40 → CW
Makro atma tekrarlama oranı	Hz	1 → CW	1 → CW

TARLA tesisindeki elektron demeti parametreleri Çizelge 2.1’de verilmiştir. Tez çalışmasında, tasarımı yapılan demet durdurucular, Şekil 2.1’de siyah kare şeklinde gösterilmiştir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyonlarda, Çizelge 2.1’deki tasarım ve işletme parametreleri esas alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

TARLA tesisi, ürettiği yüksek akımlı elektron demeti ve elektromanyetik radyasyon ile malzeme bilimi, enerji, uzay ve nükleer teknolojiler, izotop üretimi, sağlık bilimi ve teknolojileri gibi alanlardaki modern araştırmaların ülkemizde de yapılmasını olanaklı kılacaktır.

2.3 Demet Durdurucular

Demet durdurucuların temel işlevi, hızlandırıcılarda parçacık veya foton demetlerinin güvenli bir şekilde durdurulmasını sağlamaktır. Demetlerin gücünü, güvenli bir şekilde absorbe edebilmeli ve ısı transferi yoluyla bir soğutucuya aktarabilmelidir.

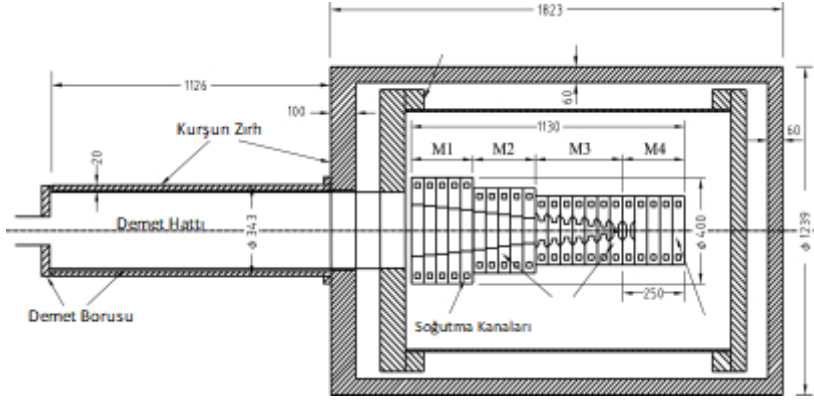
Demet durdurucusu bir hızlandırıcı tesisinin güvenli şekilde çalışabilmesi için büyük önem arz eden bir sistem olmakla beraber çalışma prensibi itibariyle hızlandırıcı için bir sabit hedef sistemi haline gelmektedir. Bu nedenle, demet durdurucuları çeşitli nükleer etkileşim çalışmalarında kullanılabilir.

Demet durdurucu sistemlerinin malzemesi ve geometrisi, hızlandırıcı tesislerinin yapısına, çalışma sürelerine ve demetlerin parametrelerine göre belirlenir. Malzeme seçiminde ve sistemin tasarımında, demetin türü, enerjisi ve gücünün yanı sıra, termal, mekanik ve radyoaktif etkenler önemli rol oynar. Malzeme olarak genelde karbon ve metaller kullanılmakla beraber, çok yüksek güce sahip demetleri durdurmak için su kullanılmaktadır.

Tezin bu kısmında, farklı demet durdurucu tasarımları anlatılmıştır.

2.3.1 JNC Elektron Demet Durdurucusu

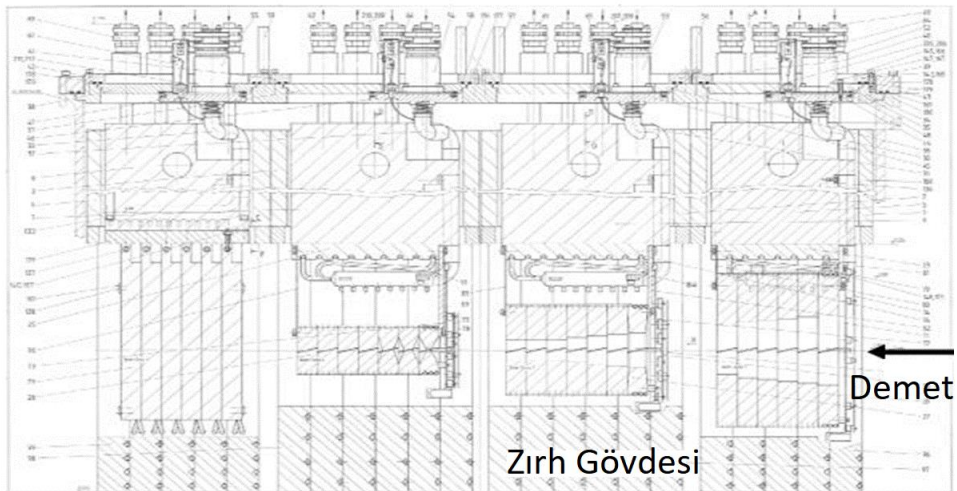
Şekil 2.2’de gösterilen demet durdurucusu, Japonya Nükleer Çevrim Enstitüsü’nde kullanılmak üzere, 10 MeV enerjili ve yüksek akıma (20 mA) sahip elektron demeti için her biri 5 cm kalınlıkta 22 tane yüksek saflıkta bakır plaka kullanılarak tasarlanmıştır.



Şekil 2.2. JNC Elektron demet durdurucusu (Takei ve Takeda, 2000).

2.3.2 PSI Proton Demet Durdurucusu

Paul Sherrer Enstitüsünde kullanılmakta olan Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’de gösterilen demet durdurucusu, 590 MeV enerjili ve 2.3 mA akıma ulaşabilen proton demeti için tasarlanmıştır. Suyla soğutulan 4 adet bakır bloktan oluşmaktadır. Zırhlaması için yaklaşık 2m kalınlığında demir kullanılmaktadır (Wohlmuther, 2011).



Şekil 2.3. PSI proton demet durdurucusu (Wohlmuther, 2011).

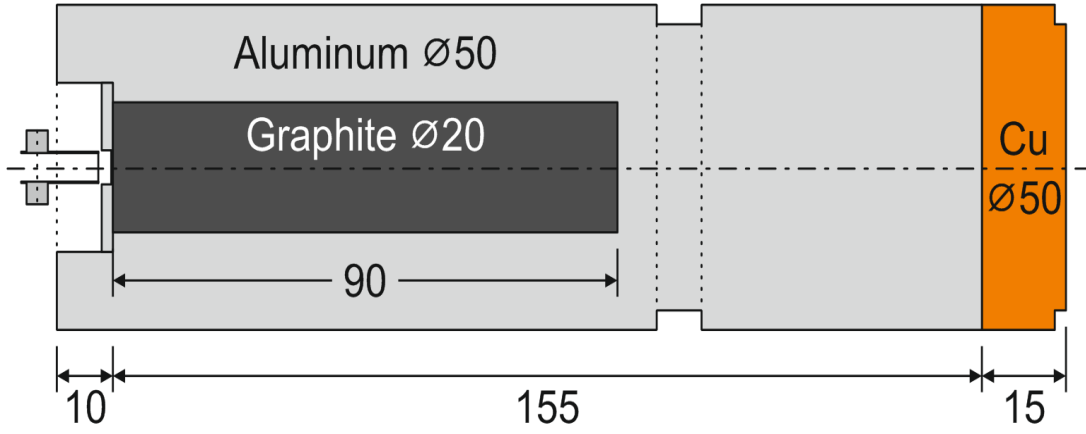


Şekil 2.4. PSI proton demet durdurucusu (Reggiani, 2012).

2.3.3 FERMI, TTF1 Elektron Demet Durdurucuları

İtalya Trieste’de bulunan FERMI tesisinde kullanılmakta olan demet durdurucusu, 1.4 GeV enerjili 10 kW’lık elektron demeti için tasarlanmıştır (Şekil 2.5 ve Şekil 2.6). Suyu soğutulan alüminyum blok içine yerleştirilen grafit gövdeden oluşmaktadır. Uzunluğu düşürmek için bakır bir blokla sonlandırılmıştır (Frohlich et.al, 2014).

Almanya’da bulunan TESLA tesisinde de 0.8 GeV enerjili ve 64 μ A akımlı elektron demeti için benzer bir tasarım kullanılmaktadır. Alüminyum bloğun uzunluğu FERMI’de kullanılan durdurucuya göre 40cm daha kısadır (Maslov, 1999).



Şekil 2.5. FERMI elektron demet durdurucusu (Frohlich et.al, 2014).



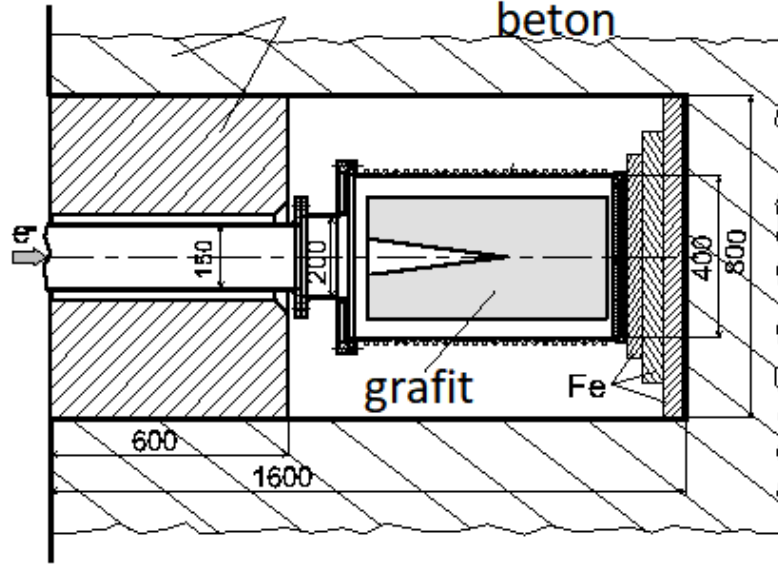
Şekil 2.6. FERMI elektron demet durdurucusu (Frohlich et.al, 2014).

2.3.4 NLS Elektron Demet Durdurucusu

İngiltere’de bulunan NLS tesisinde kullanılmakta olan demet durdurucusu, 2.25 GeV enerjili 450 kW’lık elektron demeti için tasarlanmıştır. Suyla soğutulan bakır blok içine yerleştirilen grafit gövdeden oluşmaktadır. Uzunluğu düşürmek için bakır bir blokla sonlandırılmıştır (Fernandez-Hernando et.al, 2010).

2.3.5 ELBE Elektron Demet Durdurucusu

Şekil 2.7'deki demet durdurucusu, Almanya'da bulunan HZDR Enstitüsü ELBE tesisinde kullanılmakta ve 40 MeV enerjili 50 kW'lık elektron demeti için tasarlanmıştır. Suyla soğutulan grafit gövde, demir blokla sonlandırılmıştır (Naumann et.al, 1999).



Şekil 2.7. ELBE elektron demet durdurucusu (Naumann et.al, 1999).

2.3.6 ARIEL Elektron Demet Durdurucusu

Kanada parçacık hızlandırıcı merkezi Triumf'daki Ariel demet hattında kullanılmakta olan demet durdurucusu, 75 MeV enerjili 100 kW'lık elektron demeti için tasarlanmıştır (Şekil 2.8). Suyla soğutulan alüminyum gövdenin 134 cm uzunluğu ve 13 cm X 17 cm kenar uzunluklarına sahiptir (Nozar, 2014).



Şekil 2.8. Ariel Elektron demeti durdurucusu (Nozar, 2014).

2.3.7 SLAC Elektron Demet Durdurucusu

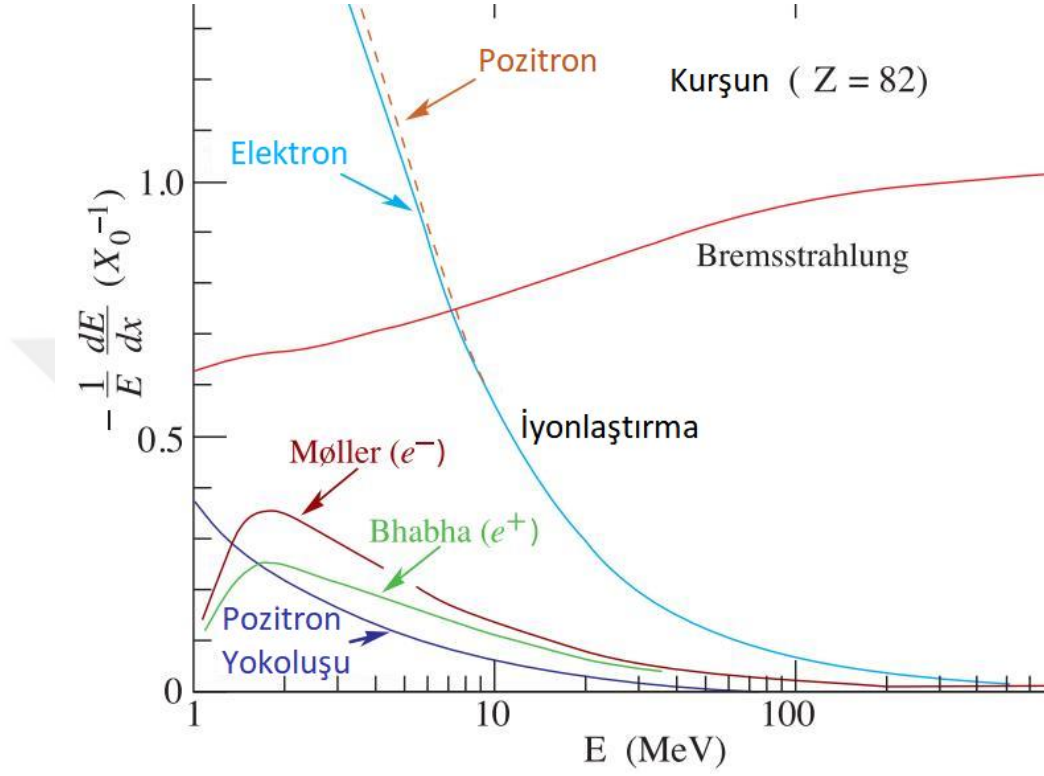
ABD Stanford Üniversitesi'ndeki SLAC tesisinde kullanılmakta olan demet durdurucusu, 70 GeV enerjili 100 kW'lık elektron demeti için tasarlanmıştır. Suyla soğutulan alüminyum gövdenin uzunluğu 145 cm'dir ve demir blokla sonlandırılmıştır (Walz et.al, 1989).

2.4 Elektronların Madde ile Etkileşmesi ve Enerji Kaybı

Bir elektron demetinin madde içinden geçerken yapacağı etkileşimler genel olarak enerjisine bağlıdır. Düşükten orta enerjilere kadar, asıl etkileşim çeşitleri şunlardır;

- iyonlaştırma,
- Moller saçılması,
- Bhabha saçılması ve
- elektron-pozitron yok oluşu.

Yüksek enerjilerde frenleme (Bremsstrahlung) radyasyonu yayınlanması baskın hale gelmektedir. Şekil 2.9’da elektronların enerjisine bağlı olarak, kurşun atomunda enerji kaybı mekanizmaları gösterilmiştir (Ahmed, 2015).



Şekil 2.9. Elektron veya pozitronun, kurşunda radyasyon uzunluğu başına kesirli enerji kaybı (Ahmed 2015).

2.4.1 İyonlaştırma

Elektron, bir atomdaki elektronlara yeterli enerjiyi verirse, elektronları bağlı olduğu yörüngeden kopararak atomun iyonlaşmasına neden olabilir. Kopan elektronun enerjisi, gelen elektronun enerjisi kadar bağlanma enerjisine de bağlıdır. Kopan elektronun enerjisi yeterince yüksekse, birincil iyonlaşma ile aynı şekilde ikincil iyonlaşmalara neden olabilir. Bu süreç, kopan elektronun enerjisi atomun iyonlaşma potansiyelinden daha az olana kadar devam edebilir.

2.4.2 Moller Saçılması

Gelen elektronun başka bir elektronla yaptığı elastik saçılma olayıdır. Bu olay sembolik olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Ahmed, 2015).

$$e^{-} + e^{-} \rightarrow e^{-} + e^{-} \quad (2.1)$$

2.4.3 Bhabha Saçılması

Gelen elektronun bir pozitronla elastik saçılma olayıdır. Bu olay sembolik olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Ahmed 2015).

$$e^{-} + e^{+} \rightarrow e^{-} + e^{+} \quad (2.2)$$

2.4.4 Elektron-Pozitron Yok Oluşu

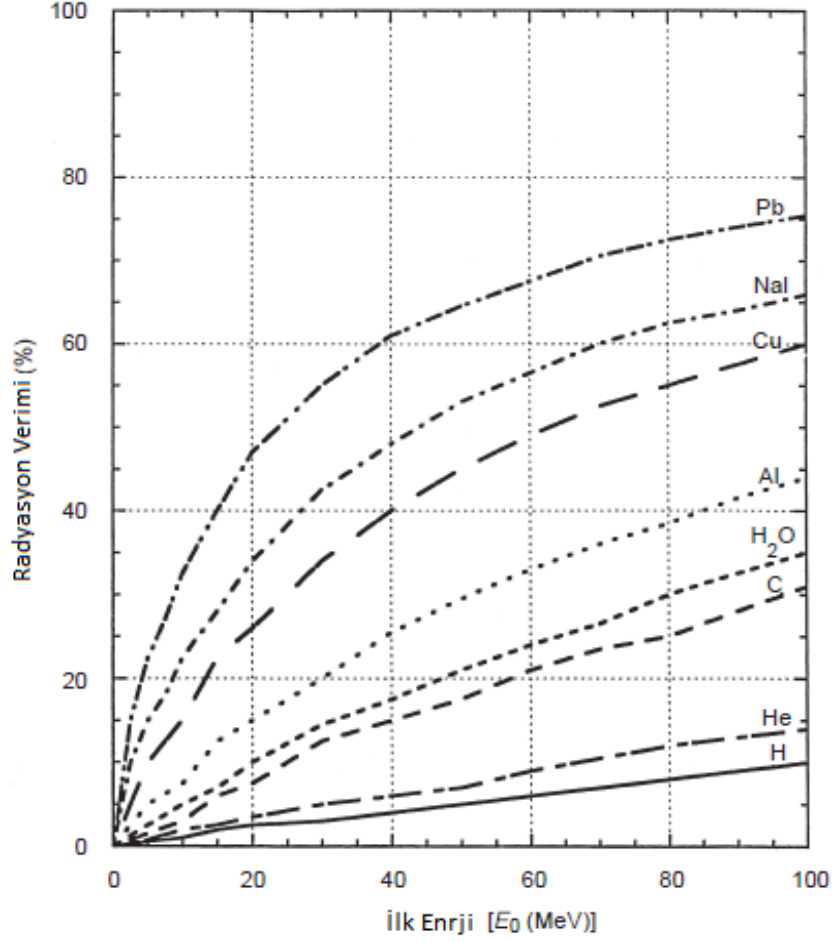
Pozitronlar, elektronların antiparçacıklarıdır. Enerjilerini kaybedip durağan hale geldiklerinde, elektronla etkileşerek yok olurlar. Bu etkileşim sonucunda ortaya, 2 adet 0.511 MeV enerjili gama ışını çıkar. Elektron-pozitron yok oluşu, kütleinin enerjiye dönüşmesi mekanizmasıdır (Ahmed 2015).

$$e^{-} + e^{+} \rightarrow 2\gamma \quad (2.3)$$

2.4.5 Frenleme (Bremsstrahlung) Radyasyonu

Bremsstrahlung radyasyonu, yüksek enerji ile hareket eden yüklü parçacıkların, etkileştiği atom çekirdeklerinin Coulomb alanında yavaşlatıldığında yayılır. Bremsstrahlung mekanizmasının gerçekleşme olasılığı, hızlı parçacığın kütleinin karesi ile ters orantılı, etkileşime girdiği atomların atom numarası ile doğru orantılıdır. Elektronlar için birkaç 10 MeV'den itibaren, birçok malzeme ile bremsstrahlung mekanizması baskın hale gelmektedir (Ahmed, 2015).

Şekil 2.10’da, elektron enerjilerine göre, etkileştikleri malzemeye göre, bremsstrahlung mekanizması ile kaybettiği enerjini oranı gösterilmiştir (NCRP 144).



Şekil 2.10. Bremsstrahlung verimi (NCRP,1977)

2.4.6 Radyasyon Uzunluğu

Yüksek enerjili elektronlar, esas olarak bremsstrahlung yoluyla madde ile etkileşime girerken, yüksek enerjili fotonlar elektron-pozitron çifti üretimi ile etkileşime girer. Parçacıklar tarafından kat edilen karakteristik madde miktarı radyasyon uzunluğu X_0 olarak adlandırılır. Radyasyon uzunluğu, yüksek enerjili bir elektronun başlangıç enerjisinin $\frac{1}{e}$ 'sine düşene kadarki kısmını bremsstrahlung mekanizması ile kaybettiği, ortalama mesafedir (Ahmed, 2015).

$$\frac{1}{X_0} = 4\alpha r_e^2 \frac{N_A}{A} [Z^2 \{L_{rad} - f(Z)\} + ZL'_{rad}] \quad (2.4)$$

$$X_0 = \frac{716.4A}{Z(Z+1)\ln(287/\sqrt{Z})} \quad (2.5)$$

Denklem 2.4' deki L_{rad} ve L'_{rad} değerlerine, Ahmed'in (2015) kitabında sayfa 72'den ulaşılabilir.

2.4.7 Elektronların Enerji Kaybı

Düşük enerjiden orta enerjilere kadar, elektronların çarpışma yoluyla kaybettiği enerji oldukça önemlidir ve belirli bir enerjiye kadar çarpışma yoluyla kaybettiği enerji, ışınımsal (bremsstrahlung) enerji kaybından daha yüksektir. Dolayısıyla bir malzemenin elektronları durdurma gücünü hesaplariken bu iki bileşeni de düşünmek gerekir (Ahmed, 2015).

$$S_{elektron} = S_{\text{çarpışma}} + S_{\text{ışınım}} \quad (2.6)$$

$$\left[\frac{-dE}{dx} \right]_{\text{çarpışma}} = \frac{2\pi Z e^4 \rho}{m_e v^2} \left[\ln \left(\frac{m_e v^2 E}{2I^2 (1-\beta^2)} \right) - \ln^2 (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) + (1-\beta^2) + \frac{1}{8} (1 - \sqrt{1-\beta^2})^2 \right] \quad (2.7)$$

$$\left[\frac{-dE}{dx} \right]_{\text{ışınım}} = \frac{Z(Z+1)e^4 \rho E}{137m_e^2 c^4} \left[4 \ln \left(\frac{2E}{m_e c^2} \right) - \frac{4}{3} \right] \quad (2.8)$$

$$\frac{S_{\text{ışınım}}}{S_{\text{çarpışma}}} \approx \frac{(Z+1.2)E}{800} \quad (2.9)$$

Çarpışma ve ışınımsal enerji kaybının eşit olduğu enerji, o malzeme için kritik enerji olarak tanımlanır (Ahmed, 2015).

$$E_c \approx \frac{800}{Z+1.2} \text{ MeV} \quad (2.10)$$

2.5 Fotonların Madde İle Etkileşmesi

Fotonlar, madde ile esas olarak üç farklı şekilde etkileşime girebilir; fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumu. Farklı maddeler, bu etkileşim mekanizmaları için farklı enerji eşiklerine ve farklı foton enerjileri için farklı tesir kesitlerine sahiptir.

2.5.1 Fotoelektrik Etki

Fotoelektrik etki, Einstein'ın ortaya koyduğu fikri doğrulayan bir süreçtir. Işık bir malzeme üzerine vurduğunda elektronlar yayınlanabilir. Yayınlanan elektronlar, ışığın yoğunluğuna değil, frekansına, yani ışığın enerjisine bağlıdır.

Fotonlar, enerjisinin tamamını bir atomun bir elektronuna aktarabilir. Bu durumda, elektron yörüngesinden koparak iyonlaşma meydana gelir. Kopan elektronun enerjisi, gelen fotonun enerjisi ile elektronun bağlanma enerjisi arasındaki fark kadar olacaktır. Kopan elektronun enerjisi yeterince yüksekse, birincil iyonlaşma ile aynı şekilde ikincil iyonlaşmalara neden olabilir. Bu süreç, kopan elektronun enerjisi atomun iyonlaşma potansiyelinden daha az olana kadar devam edebilir (Ahmed, 2015).

2.5.2 Compton Saçılması

Fotonların elektronlarla yaptığı elastik olmayan bir çarpışma sonucu, enerjilerinin bir kısmını elektrona aktararak, farklı bir yönde ve daha düşük enerjide saçılması olayıdır. Elektron da fotonun aktardığı enerji ile saçılmaktadır (Ahmed, 2015).

2.5.3 Çift Oluşumu

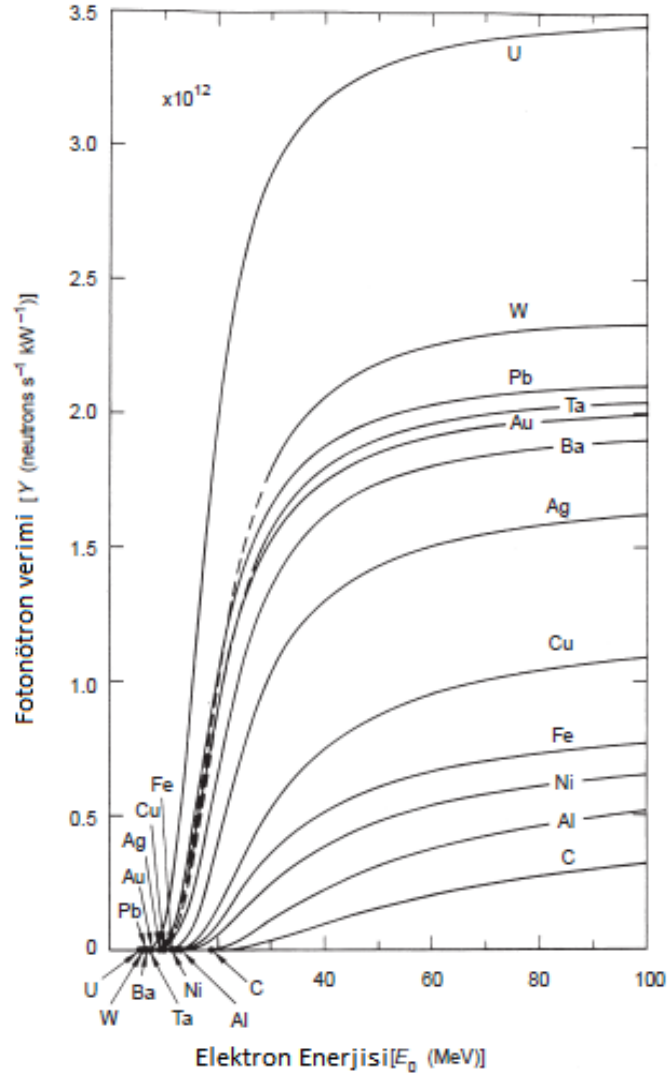
Çift oluşumu, bir fotonun madde ile etkileştiğinde, özellikle çekirdekle, bir elektron-pozitron çiftine dönüşmesi olayıdır. Fotonun durağan kütlesi olmadığı için, bu sürecin Einstein'ın kütle enerji ilişkisi $E = mc^2$ 'ye göre enerjiyi kütleyle çevirdiği söylenebilir. Çift oluşumunun, Bölüm 2.3.3'de anlatılan elektron-pozitron yok oluş sürecinin tam tersi olduğu da söylenebilir (Ahmed, 2015).

Çift oluşumunun, çekirdekle etkileşmesinde gerçekleşmesi için, en az 2 elektron kütlesi karşılığında enerjiye (1.022 MeV) sahip fotonlara ihtiyaç vardır.

Çift oluşumu olayı, fotonların elektronlarla etkileştiğinde de meydana gelebilir ancak bunun için daha yüksek enerjili (2.044 MeV) fotonlara ihtiyaç vardır. Bu olay, üçlü oluşum veya üçlü çift oluşumu olarak adlandırılır (Ahmed, 2015).

2.5.4 Fotonükleer Etkileşimler

Yüksek enerjili fotonların çekirdekle etkileşmeleri sonucu, çekirdekte parçalanma meydana gelebilir. Fotonun enerjisine ve etkileştiği atoma göre farklı sonuçlar ortaya çıkacaktır. Elektron demeti durdurucusunda ortaya çıkacak bremsstrahlung radyasyonunun enerjisi, elektronların enerjisine bağlı olarak 0-40 MeV aralığında olacaktır. Bu yüksek enerjili fotonlar, çekirdek ile etkileştiğinde nötronların yayınlanmasına sebep olacaktlardır. Bu nötronlar fotonötron olarak adlandırılır. Şekil 2.11'de, elektron hızlandırıcılarında, elektron enerjisi ve gücüne göre ortaya çıkan nötronların miktarı gösterilmiştir (NCRP, 1977).



Şekil 2.11. Fotonötron verimi (NCRP, 1977).

Fotonların nötron kopartarak etkileştiği çekirdekler ve daha sonra kopan fotonötronların etkileşime gireceği diğer çekirdekler, çoğunlukla radyoaktif hale gelmektedir. Belli bir çalışma süresi sonunda, hızlandırıcının çalışmadığı halde dahi demet durdurucudan radyasyon yayınlanacağı için zırhlama yapılmak zorundadır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Elektron Demet Durdurucu

Demet durdurucuların temel işlevi, Bölüm 2.2’de belirtildiği gibi, hızlandırıcılarda parçacık veya foton demetlerinin güvenli bir şekilde durdurulmasını sağlamaktır. Demetlerin gücünü, güvenli bir şekilde absorbe edebilmeli ve ısı transferi yoluyla bir soğutucuya aktarabilmelidir.

Elektron demeti tasarımında dikkate alınan özellikler;

- Malzemenin elektron demetini durdurma gücü,
- Malzemenin termal iletkenliği ve erime noktası,
- Tasarımın geometrisi,
- Malzemenin bulunabilirliği, işlenebilirliği ve maliyeti,
- Bremsstrahlung ve fotonötron verimi,
- Radyonüklid oluşumu ve artık radyasyon doz hızı..

Bölüm 2.2’de aktarılan, demet durdurucu örneklerinden de görüleceği gibi, demet ile ilk etkileşimin olduğu bölgede genel olarak alüminyum, grafit veya bakır kullanılmaktadır.

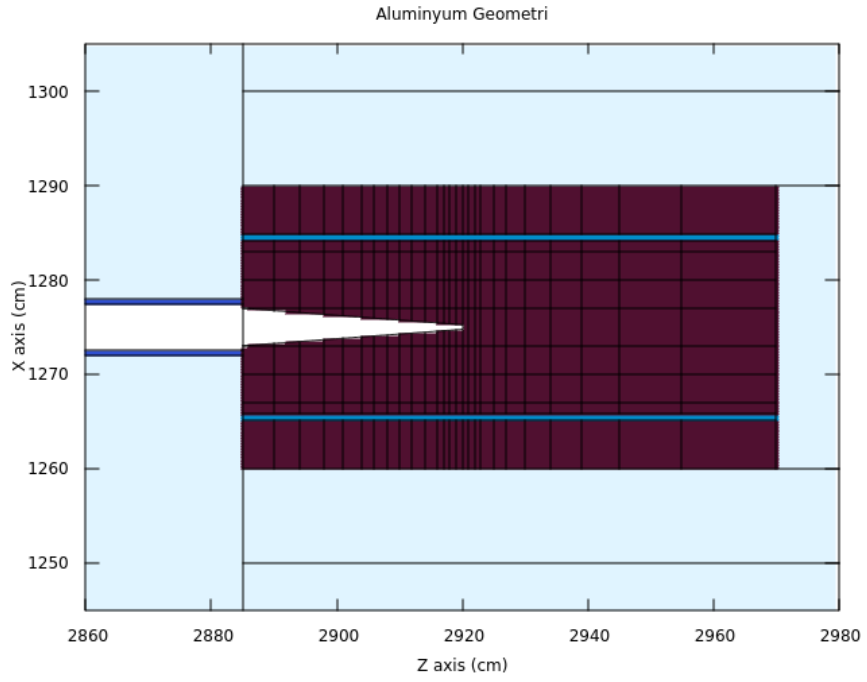
Bu tez çalışmasında, demet durdurucusunun malzemesi olarak alüminyum seçilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.1’de alüminyumun fiziksel özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Alüminyumun fiziksel özellikleri.

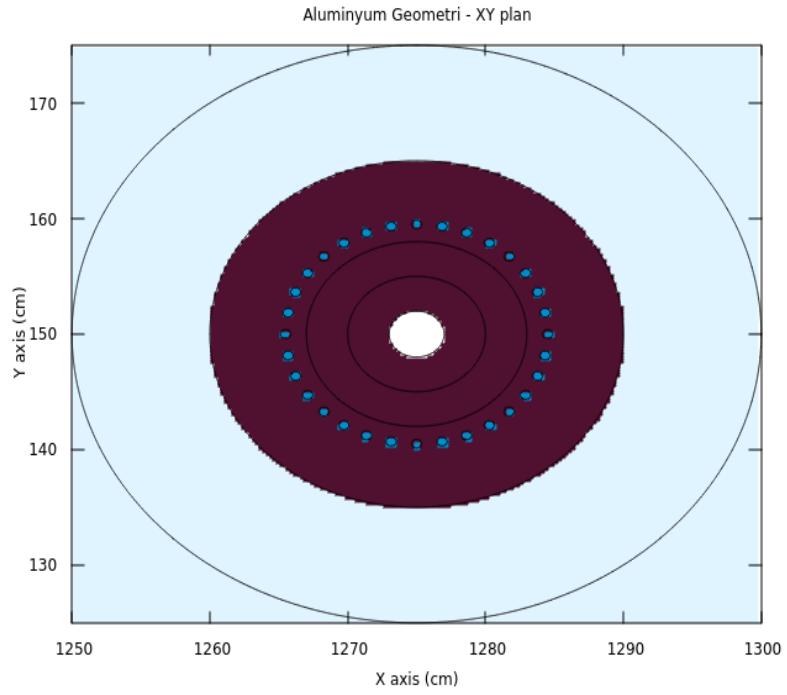
Kütle numarası	27
Yoğunluğu (g/cm ³)	2.7
Özgül ısısı (kJ/kg.K)	0,896
Termal İletkenliği (W/mK)	236-240
Erime Sıcaklığı (C)	660
Kritik Enerji (MeV)	42,70
Nötron Oluşumu Eşik Enerji (MeV)	13,03
Nötron Verimi (nötron/s.kW) (50 MeV)	0,25x10 ¹²
Bremsstrahlung Oranı (%)	35
Radyasyon Uzunluğu X_0 (cm)	8,9
Moliere yarıçapı (cm)	4,42
Durdurma Gücü (MeV.cm ² /g)	3,55

3.1.1 Demet Durdurucunun Geometrisi

Literatür araştırmaları ve öncü denemeler sonucunda belirlenen, demet durdurucunun tasarımının son hali Şekil 3.1 ve Şekil 3.2' de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Demet durdurucu, yanal kesit görüntüsü.



Şekil 3.2. Demet durdurucu, dikey kesit görüntüsü.

Demet durdurucu uzunluğunun belirlenmesi için aşağıda verilen denklem kullanılmaktadır.

$$L_{99\%} = (1.52 \ln(E_0) - 4.1 \ln(E_c) + 17.6) X_0 \quad (3.1)$$

Burada E_0 ve E_c , MeV cinsinden verilmektedir. X_0 ise radyasyon uzunluğudur.

Demet durdurucunun yarıçapı için aşağıda verilen denklem kullanılmaktadır.

$$R_M \cong \frac{21.2}{E_c} X_0 \quad (3.2)$$

Burada E_c , MeV cinsinden verilmektedir. R_M ise Moliere yarıçapı olarak adlandırılmaktadır.

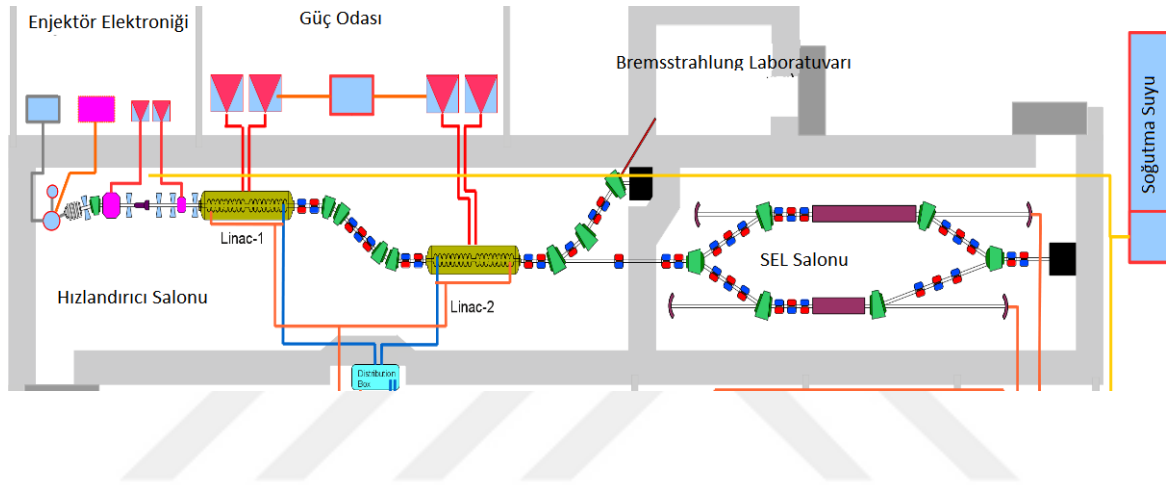
Elektronun demet enerjisinin %90'ı $1R_M$ içinde, %99 ise $5R_M$ içinde soğurulmaktadır. Demet durdurucuda kullanılan alüminyum için $X_0 = 8.9$ cm olarak verilmektedir. Denklem 3.1 kullanılarak $L_{99\%}$, 74.95 cm olarak hesaplanmıştır. Denklem 3.2 kullanılarak alüminyum için R_M , 4.42 cm olarak hesaplanmıştır. Buna göre, demet durdurucunun uzunluğu 75 cm, yarıçapı ise 15 cm (yaklaşık $3R_M$) olarak belirlenmiştir. Demet durdurucunun ölçüleri Çizelge 3.2' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Elektron demet durdurucusunun ölçüleri.

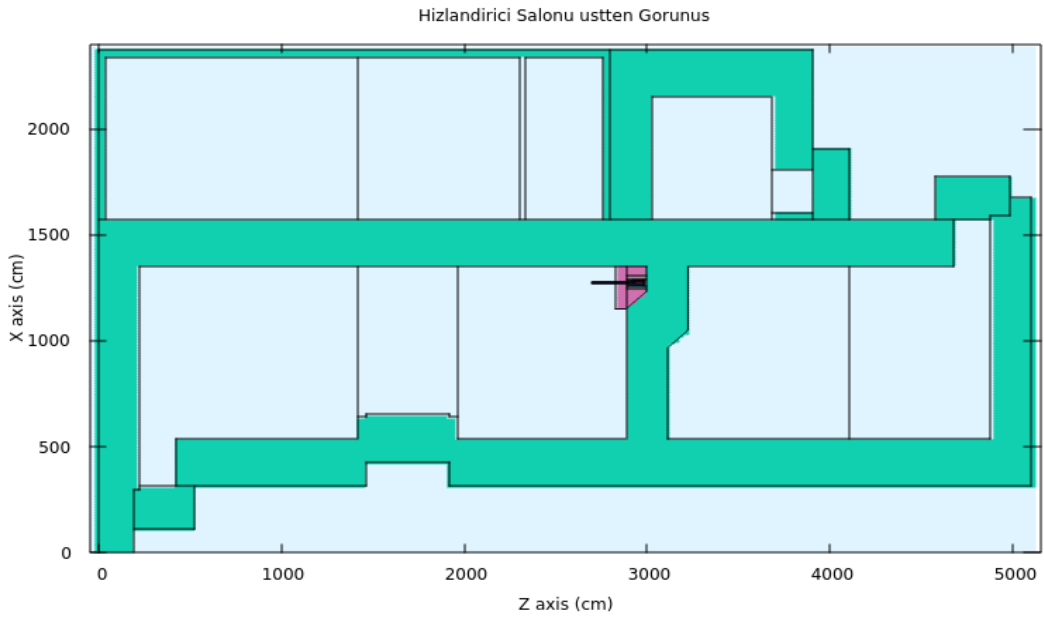
Alüminyum İç Gövde Yarıçapı (cm)	15
Alüminyum İç Gövde Uzunluğu (cm)	85
Dış Gövde Yarıçapı (cm)	30
Dış Gövde Uzunluğu (cm)	130
Su Kanalları Çapı (cm)	0.75
Su Kanalları bulunduğu Yarıçap (cm)	9

3.1.2 TARLA Tesisinin Yerleşim Planı

TARLA hızlandırıcı tesisi çalışırken ortaya çıkacak doz hızlarını simüle edebilmek için, tasarlanan demet durdurucuların, TARLA hızlandırıcı odası ve SEL odasındaki planlanan yerlerine yerleştirilerek simülasyonların gerçekleştirilmesi gerekir. Bu amaçla, TARLA tesisinin gerçek ölçüleri kullanılarak, FLUKA modellemesi yapılmıştır. Şekil 3.3'te, tesisin şematik planı ve Şekil 3.4'te, FLUKA modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.3. TARLA tesisinin şeması.



Şekil 3.4. TARLA tesisinin FLUKA modeli.

3.2 Simülasyon Yöntemleri

Günümüzde, birçok bilimsel araştırma alanda kullanılan simülasyon programları ve ilgili yazılım paketleri, elde edilen verilerin analizinde veya verileri elde etmeden önce bazı tahminlerde bulunmak için oldukça kullanışlıdır.

Bu tez çalışmasında, FLUKA ve ANSYS-Fluent olmak üzere iki simülasyon programı kullanılmıştır.

3.2.1 FLUKA

FLUKA (FLUktuierende KAskade), entegre bir parçacık fiziği Monte Carlo simülasyon paketidir. Parçacıkların taşınımı ve madde ile etkileşimlerinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Fasso et.al, 2005).

Bir INFN-CERN anlaşması kapsamında geliştirilmiş olan FLUKA'nın güncellenmesi sürdürülmektedir. Modern fiziksel modeller, FLUKA'nın tasarımında ve geliştirilmesinde sürekli olarak dikkate alınır. Modern fiziksel modellerin uygulanması ve iyileştirilmesi, FLUKA'nın geliştirilmesinde her zaman en önemli öncelik olmuştur. FLUKA, hem kitaplık verilerine hem de deneysel verilerle karşılaştırılan fizik modellerine dayalıdır (Fasso et.al, 2005).

FLUKA'nın kullandığı fiziksel modeller çeşitli dergilerde ve konferans yayınlarında açıklanmıştır. FLUKA, elektron, foton, müon, hadron, nötron, ağır iyon, nötrino, ve tüm antiparçacıklar gibi yaklaşık 60 farklı parçacıktaki etkileşimi ve taşınmayı yüksek hassasiyetle simüle edebilmektedir. Ardık radyoaktivite ve yayılan radyasyon hesaplanabilir (Fasso et.al 2005).

Flair, bir grafik ara yüzü olarak, FLUKA'ya paralel olarak geliştirilmiştir. FLUKA girdi dosyalarının düzenlenmesini, programın çalıştırılmasını ve çıktı dosyalarının görselleştirilmesini kolaylaştırır (Fasso et.al 2005)..

Elektron demet durdurucusu ile elektron demetinin etkileşimleri, FLUKA ile gerçekleştirilmiştir. Demet durdurucuya aktırdığı enerji, tesisin çalışması sırasında ortaya

çıkan radyasyon doz hızı, artık radyasyon doz hızı gibi hesaplamalar FLUKA ile gerçekleştirilmiştir.

3.2.2 ANSYS -Fluent

ANSYS Fluent, karmaşık geometrilerdeki akışkan hareketlerini ve ısı transferlerini modellemede kullanılan simülasyon programıdır. Çeşitli sıkıştırılmaz ve sıkıştırılabilir, laminar ve türbülanslı akış problemlerinin modellemeleri yapılabilir. ANSYS Fluent'te ısı transferi için farklı matematiksel modeller, istenilen geometrilerde birlikte kullanılabilir (ANSYS Fluent, 2013).

Elektron demet durdurucusunda depolanan enerjinin soğutma suyuna aktarılması gerekmektedir. Durdurucunun tasarımında, suyun akışını sağlayacak kanallar yerleştirilmiştir. ANSYS-Fluent yazılımı ile hem akış rejimi hemde durdurucudan suya ısı transferinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. ANSYS-Fluent ısı transfer modellemelerinde katılar için

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (3.3)$$

denklemini kullanmaktadır. Akışkanlar için ise

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (3.4)$$

denklemini kullanmaktadır. Burada k, ısı iletkenlik; T, sıcaklık; Q, ısı kaynağı; ρ , yoğunluk; C_p , ısı kapasite; \mathbf{u} ise akışkanın hız vektörüdür.



4. BULGULAR

Bu tez çalışmasında, TARLA tesisi demet hattı donanımlarından biri olan elektron demet durdurucusunun tasarımında kullanılabilecek malzemelerden olan alüminyum seçilmiştir. Demet durdurucusunun boyutları, elektron demetinin gücünün büyük kısmını absorbe edebilecek şekilde alüminyuma göre belirlenmiştir. Alüminyum alaşımlarından, iyi termal ve fiziksel özelliklere sahip Al-6061 kodlu alaşımın kimyasal özellikleri simülasyon çalışmalarında kullanılmıştır.

Bütün simülasyonlar, 1,25 milyar birincil parçacıkla yani elektronla gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen simülasyonlarda, Çizelge 4.1'deki elektron demeti parametreleri esas alınarak kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Elektron demeti parametreleri.

Parametre	Birimi	Planlanan Değer	Hedeflenen Değer
Demet Enerjisi	MeV	16-40	50
Ortalama demet akımı (max.)	mA	1	1,6
Enine emittans	mm mrad	<15	<15

4.1 Elektron Demeti Durdurucusunda Depolanan Enerji

Simülasyonlarda, maksimum gücün ortaya çıkacağı, 50 MeV enerjili 1,6 mA akımlı elektron demeti parametreleri kullanılmıştır.

Durdurucu gövdesinin öncelikli amacı, ortaya çıkan gücün mümkünse çok büyük kısmını absorbe ederek soğutucu sisteme aktarmaktır.

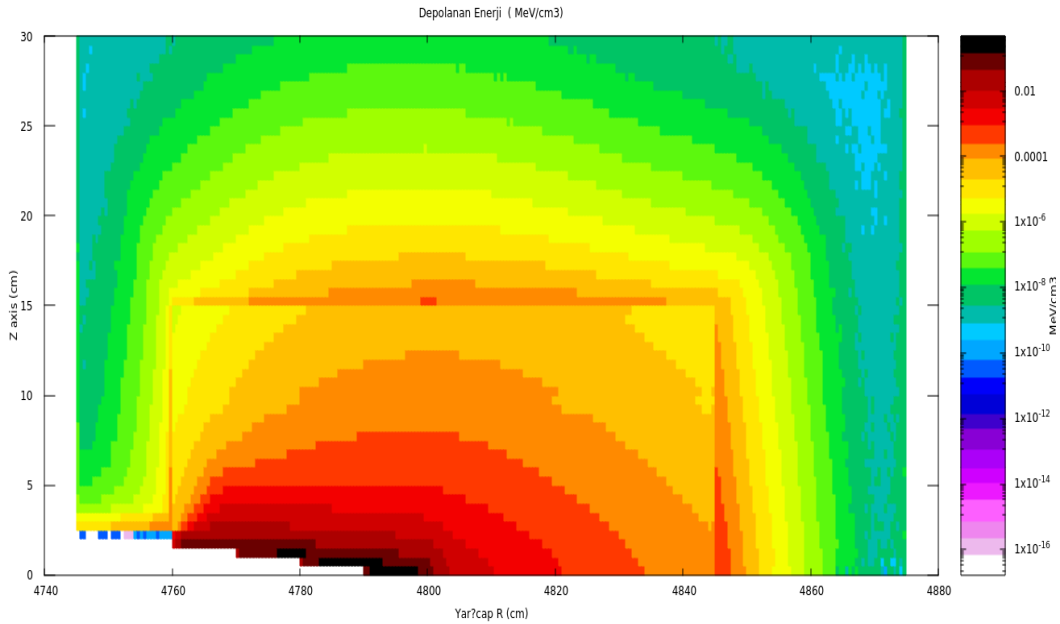
Şekil 4.1'de, simülasyon sonucu ortaya çıkan enerji dağılımı gösterilmiştir. Enerji depolanmasının büyük kısmı, elektron demetinin durdurucu ile etkileştiği ilk bölgede gerçekleştiği görülmektedir. Elektronların madde içindeki menzilleri kısa olduğundan,

etkileşmelerinin ve enerji kaybının büyük kısmı ilk birkaç santimetre içinde gerçekleşmektedir. Çizelge 4.2’de, durdurucuda depolanan enerji gösterilmiştir.

Enerji depolanma simülasyonu gerçekleştirilirken, demet durdurucu 60 bölgeye ayrılmıştır. Her bölgede depolanan enerji miktarı kaydedilerek, ANSYS-Fluent ile gerçekleştirilen termal-akışkan simülasyonlarında kullanılmıştır.

Çizelge 4.2. Durdurucuda depolanan enerji.

BÖLGE	DEPOLANAN ENERJİ (MeV/e ⁻)	GÜÇ (kW)
Alüminyum iç gövde	48,24	77,184
Dış gövde	1,64	2,629
Toplam	49,88	79,813



Şekil 4.1. Depolanan enerjinin durdurucu içindeki dağılımı.

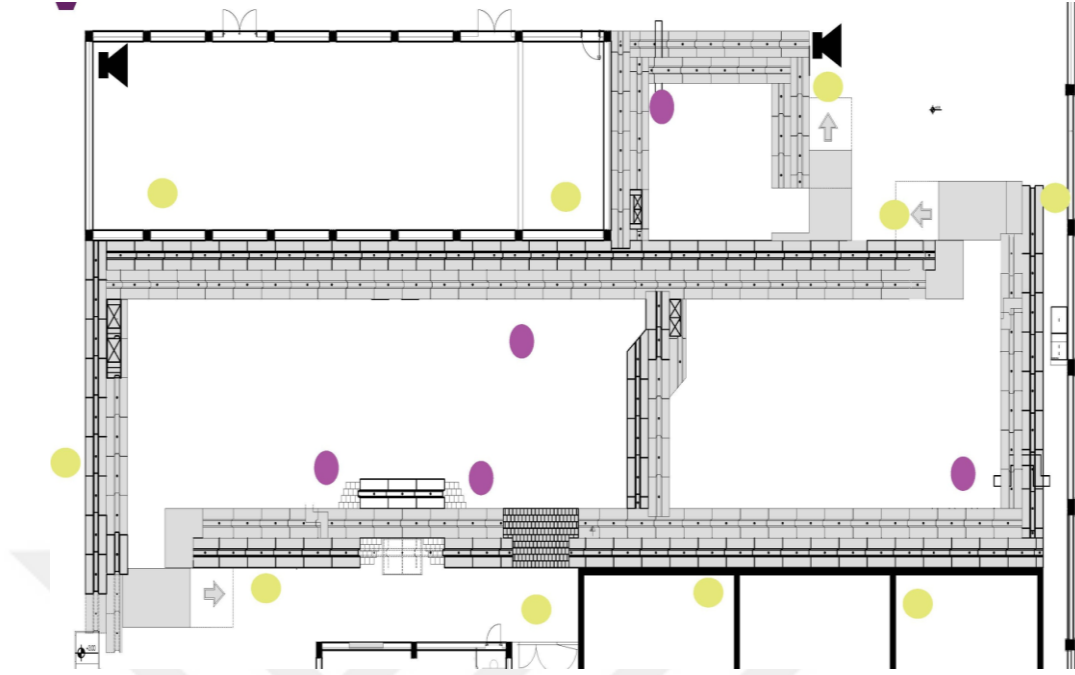
4.2 TARLA Tesisinin Modeli

TARLA tesisinde, iki ayrı konumda elektron demet durdurucusu kullanılacaktır. Birincisi hızlandırıcı salonunda, diğeri ise SEL salonunda konumlandırılacaktır. Demet durdurucular, Şekil 3.3’de, tesisin şematik gösteriminde siyah karelerin bulunduğu yerlerde konumlandırılacaktır.

Hızlandırıcı salonunda, 40-50 MeV enerjilere hızlandırılan elektronların, istenildiği takdirde, kolimatörle etkileşmesi sağlanarak, bremsstrahlung deney istasyonunda kullanılacak fotonların üretimi gerçekleştirilecektir. Demet durdurucu ise bu kolimatörden sonra konumlandırılarak, kolimatörden geçen elektronların durdurulması için kullanılacaktır.

Hızlandırıcı salonunda, 40-50 MeV enerjilere hızlandırılan elektronlar ile, istenildiği takdirde, SEL salonunda bulunan, iki farklı kapasiteye sahip salındırıcı magnetler sayesinde lazer ışını üretimi gerçekleştirilecektir. Demet durdurucu ise bu magnetlerden sonra konumlandırılarak, magnetlerden geçen elektronların durdurulması için kullanılacaktır.

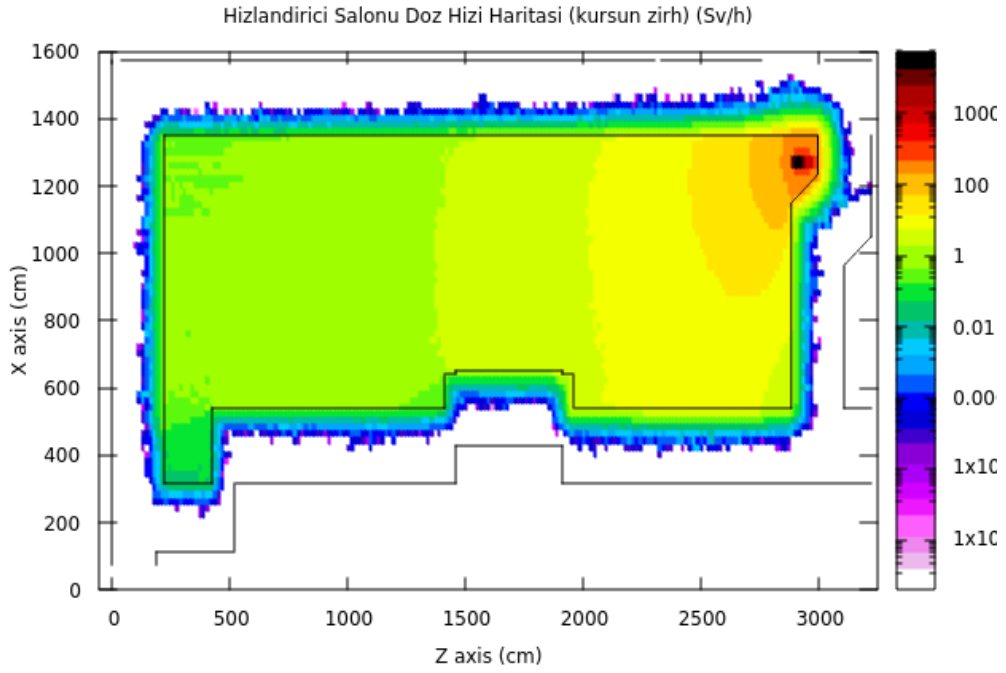
Demet durdurucular, hızlandırıcı ve SEL salonlarındaki konumlarında ayrı ayrı modellenerek, simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2’teki tesisin şematik gösteriminde, salonlarda bulunan iyon odası dedektörlerinin konumları mor dairelerle belirtilmiştir. Simülasyonlarda, hızlandırıcının çalıştığı durumlarda, ortaya çıkan radyasyon doz hızı görüntüleri, her bir salon için ayrı ayrı elde edilmiştir. Doz hızı görüntülerindeki veriler, tabandan 50 cm ile 200 cm yükseklik aralığındaki, foton ve nötron toplam doz hızlarının ortalama değerleridir. Ayrıca, iyon odalarındaki doz hızları belirlenmiştir.



Şekil 4.2. Salonlardaki iyon odası dedektörlerinin konumları.

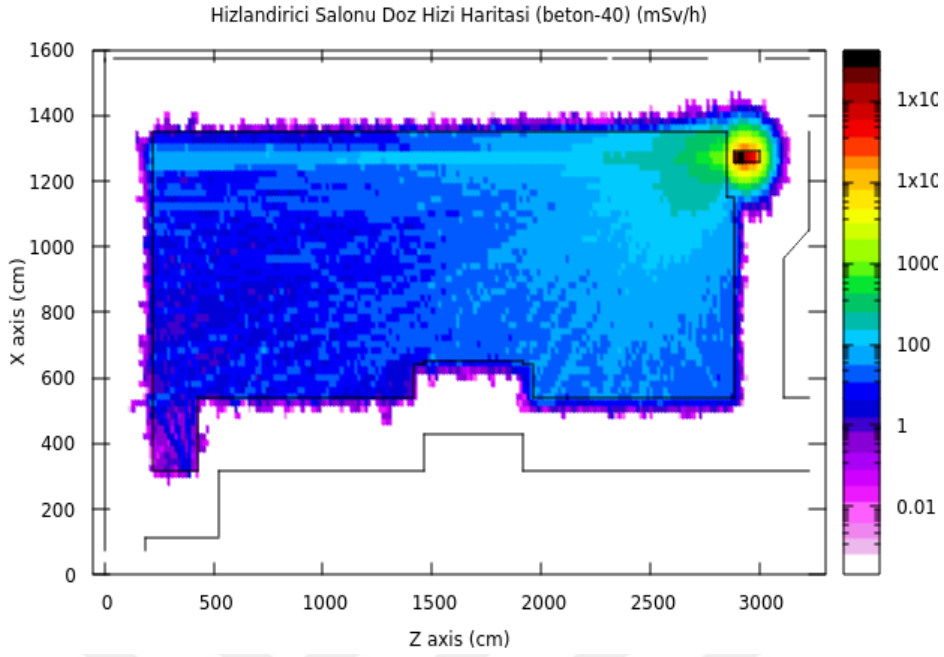
4.2.1 Hızlandırıcı Salonu Doz Hızı Görüntüleri

- İlk olarak, demet durdurucunun sadece kurşun zırhlı olarak kullanılmayacağını görmek için, demet durdurucunun simülasyonu ilave zırh kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ile Şekil 4.3'teki doz hızı haritası ortaya çıkmıştır. Durdurucuya uzaklığın 5 m'den yakın olduğu bölgelerde, doz hızı 100 Sv/h'i geçmektedir. Uzaklığın 5 m'den 10 m'ye kadar olan bölgelerde doz hızı 10-100 Sv/h aralığında olduğu görülmektedir. Yüksek radyasyon dozunun olduğu ortamlarda, radyasyon hasarına bağlı olarak, elektronik cihazların, kabloların, demet hattında bulunan donanımların çalışma ömürleri çok kısa olacaktır.



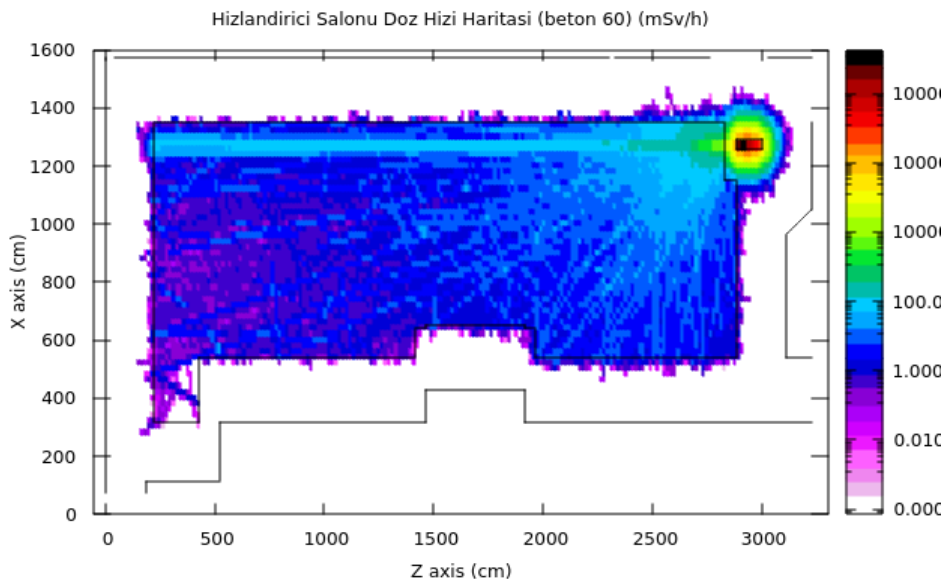
Şekil 4.3. Hızlandırıcı salonu doz hızı haritası, kurşun zırlı.

- Demet durdurucuların zırhlamasında, farklı kalınlıklarda baritli beton ve bor katkılı beton kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Uygulanan beton kalınlıkları, demet hattı yönündeki kalınlıklardır. Durdurucuların üstüne ve altına, aynı bileşenli yaklaşık 1,5 m kalınlıkta beton kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. 40 cm kalınlıkta baritli beton zırhlama ile gerçekleştirilen simülasyondan elde edilen veriler ile Şekil 4.4'deki doz hızı haritası ortaya çıkmıştır. Durdurucuya uzaklığın 5 m'den yakın olduğu bölgelerde, doz hızı 200-500 mSv/h aralığında, uzaklığın 5 m'den 10 m'ye kadar olan bölgelerde doz hızı 50-150 mSv/h aralığında olduğu görülmektedir.



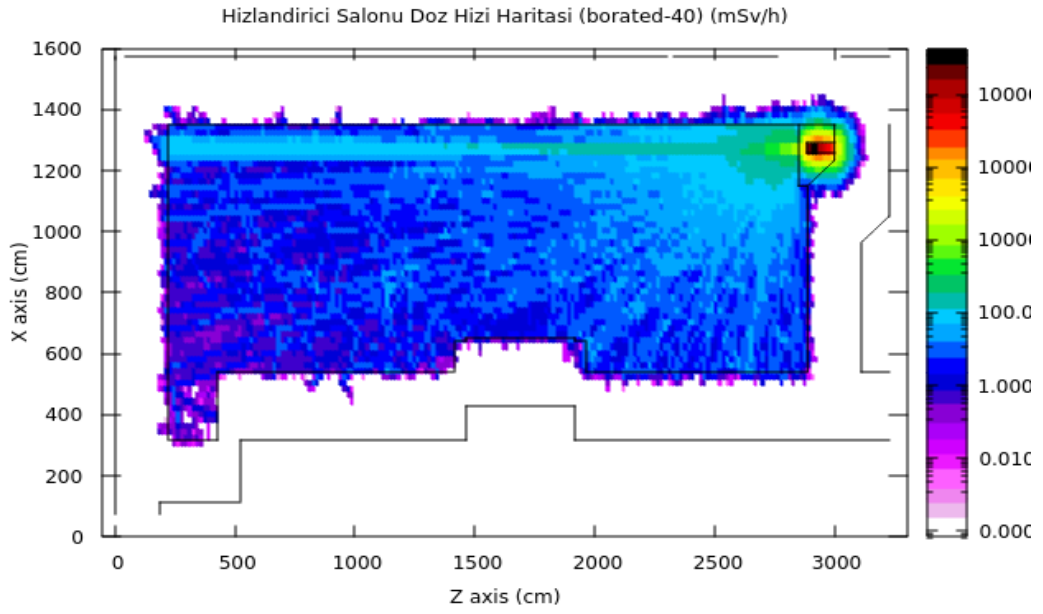
Şekil 4.4. Hızlandırıcı salonu, 40 cm baritli beton zırhlı doz hızı haritası.

- 60 cm kalınlıkta baritli beton zırhlama ile gerçekleştirilen simülasyondan elde edilen veriler ile Şekil 4.5'deki doz hızı haritası ortaya çıkmıştır. Durdurucuya uzaklığın 5 m'den yakın olduğu bölgelerde, doz hızı 50-200 mSv/h aralığında, uzaklığın 5 m'den 10 m'ye kadar olan bölgelerde doz hızı 50-100 mSv/h aralığında olduğu görülmektedir.



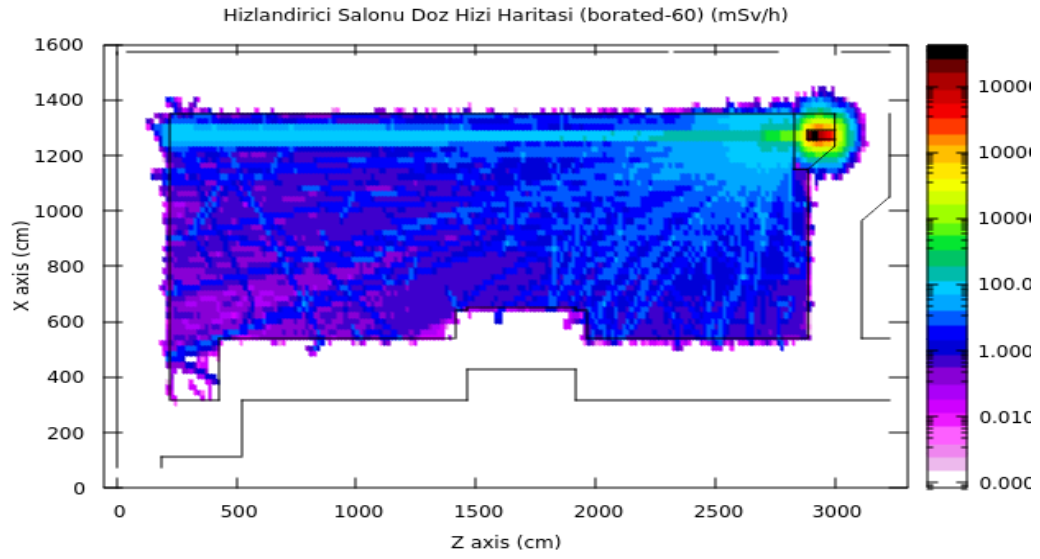
Şekil 4.5. Hızlandırıcı salonu, 60 cm baritli beton zırhlı doz hızı haritası.

- 40 cm kalınlıkta bor katkıli beton zırhlama ile gerçekleştirilen simülasyondan elde edilen veriler ile Şekil 4.67'deki doz hızı haritası ortaya çıkmıştır. Durdurucuya uzaklığın 5 m'den yakın olduğu bölgelerde, doz hızı 50-200 mSv/h aralığında, uzaklığın 5 m'den 10 m'ye kadar olan bölgelerde doz hızı 50-100 mSv/h aralığında olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6. Hızlandırıcı salonu, 40 cm bor katkıli beton zırhlı doz hızı haritası.

- 60 cm kalınlıkta bor katkıli beton zırhlama ile gerçekleştirilen simülasyondan elde edilen veriler ile Şekil 4.7'deki doz hızı haritası ortaya çıkmıştır. Durdurucuya uzaklığın 5 m'den yakın olduğu bölgelerde, doz hızı 50-100 mSv/h aralığında, uzaklığın 5 m'den 10 m'ye kadar olan bölgelerde doz hızı 1-100 mSv/h aralığında olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7. Hızlandırıcı salonu, 60 cm bor katkılı beton zırlı doz hızı haritası.

- Konumları Şekil 4.2’te gösterilen iyon odası dedektörlerinden, hızlandırıcı salonunda 3 adet bulunmaktadır. Gerçekleştirilen simülasyonlarda elde edilen verilerden, iyon odalarının bulunduğu konumlardaki doz hızları Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de gösterilmiştir. Çizelge 4.3’te, alüminyum iç gövde ile kurşun dış gövdeden oluşturulan demet durdurucuları ile yapılan simülasyon sonuçları verilmiştir. Çizelge 4.4’te ise alüminyum iç gövde ile demir dış gövdeden oluşturulan demet durdurucuları ile yapılan simülasyon sonuçları verilmiştir. Özellikle 2 numaralı yani demet durdurucusuna en yakın iyon odası sonuçlarına bakarak, dış gövde için demir kullanılarak, daha düşük radyasyon doz hızı seviyelerine ulaşılabilir.

Çizelge 4.3. İyon odaları doz hızları, kurşun dış gövdeli.

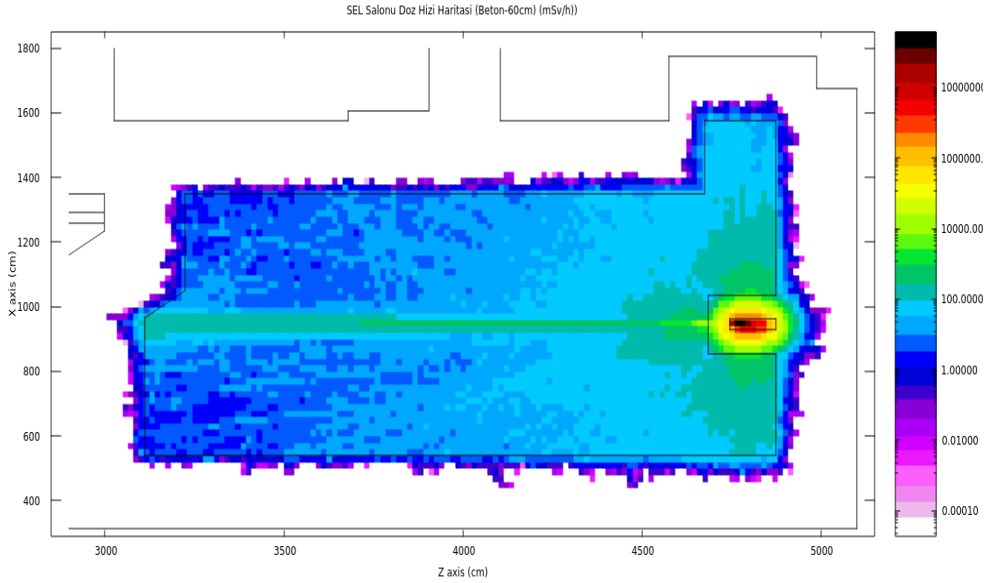
	Baritli Beton (40 cm)	Baritli Beton (60 cm)	Bor Katkılı Beton (40 cm)	Bor Katkılı Beton (60 cm)
İyon Odası 1 (mSv/h)	4,4	3,5	2,2	0,98
İyon Odası 2 (mSv/h)	103	63	16	3,2
İyon Odası 3 (mSv/h)	6,02	2	0,51	0,65

Çizelge 4.4. İyon odaları doz hızları, demir dış gövdeli.

	Baritli Beton (40 cm)	Baritli Beton (60 cm)	Bor Katkılı Beton (40 cm)	Bor Katkılı Beton (60 cm)
İyon Odası 1 (mSv/h)	5,59	1,95	0,91	0,10
İyon Odası 2 (mSv/h)	29	7,16	12,38	2,53
İyon Odası 3 (mSv/h)	4,18	3,34	0,85	0,96

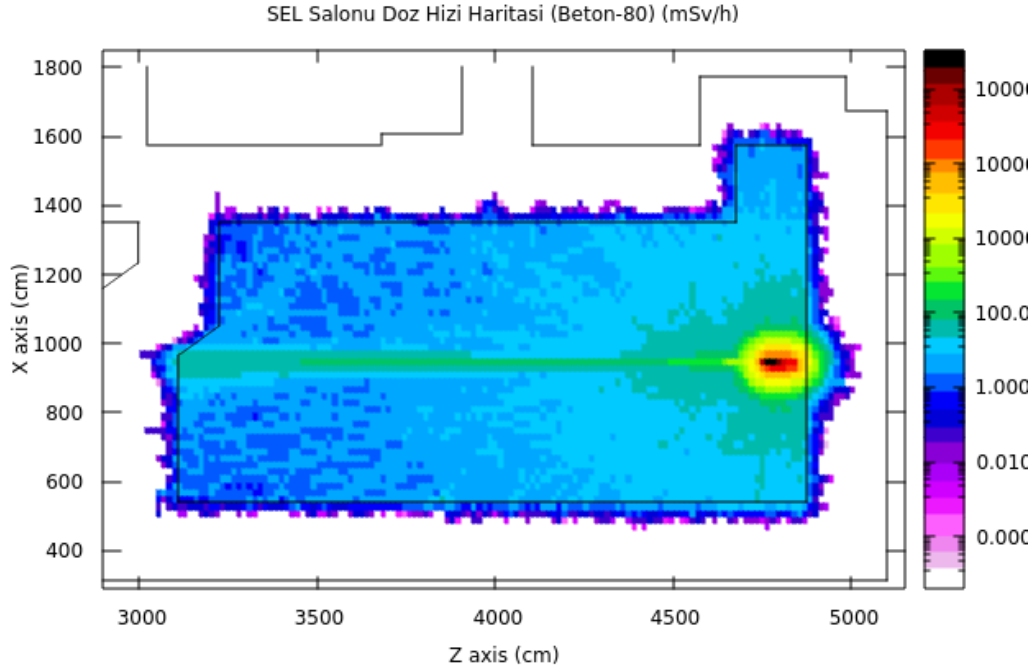
4.2.2 SEL Salonu Doz Hızı Görüntüleri

- 60 cm kalınlıkta baritli beton zırhlama ile gerçekleştirilen simülasyondan elde edilen veriler ile Şekil 4.8'deki doz hızı haritası ortaya çıkmıştır. Durdurucuya uzaklığın 5 m'den yakın olduğu bölgelerde, doz hızı 50-150 mSv/h aralığında, uzaklığın 5 m'den 10 m'ye kadar olan bölgelerde doz hızı 10-50 mSv/h aralığında olduğu görülmektedir.



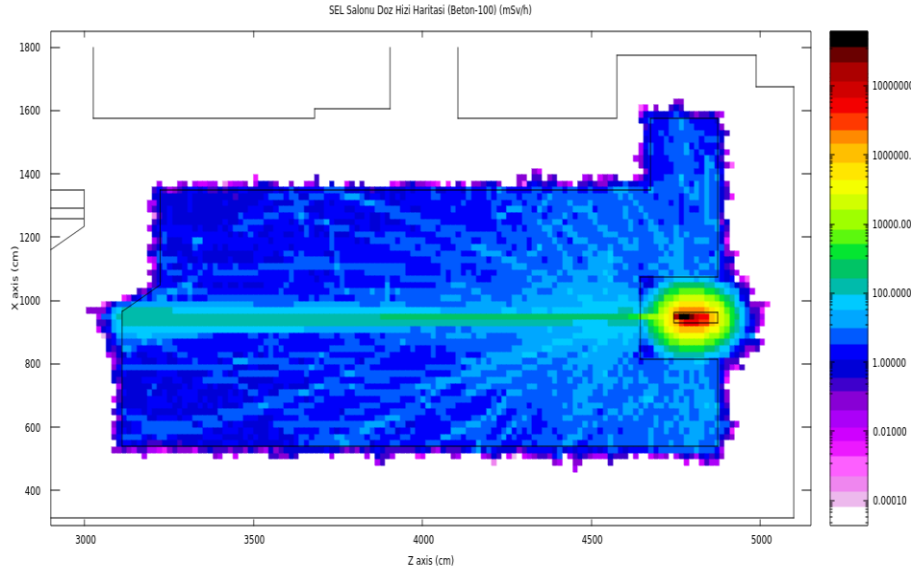
Şekil 4.8. SEL salonu, 60 cm baritli beton zırhlı doz hızı haritası.

- 80 cm kalınlıkta barıtlı beton zırhlama ile gerçekleştirilen simülasyondan elde edilen veriler ile Şekil 4.9'daki doz hızı haritası ortaya çıkmıştır. Durdurucuya uzaklığın 5 m'den yakın olduğu bölgelerde, doz hızı 50-150 mSv/h aralığında, uzaklığın 5 m'den 10 m'ye kadar olan bölgelerde doz hızı 10-50 mSv/h aralığında olduğu görülmektedir.



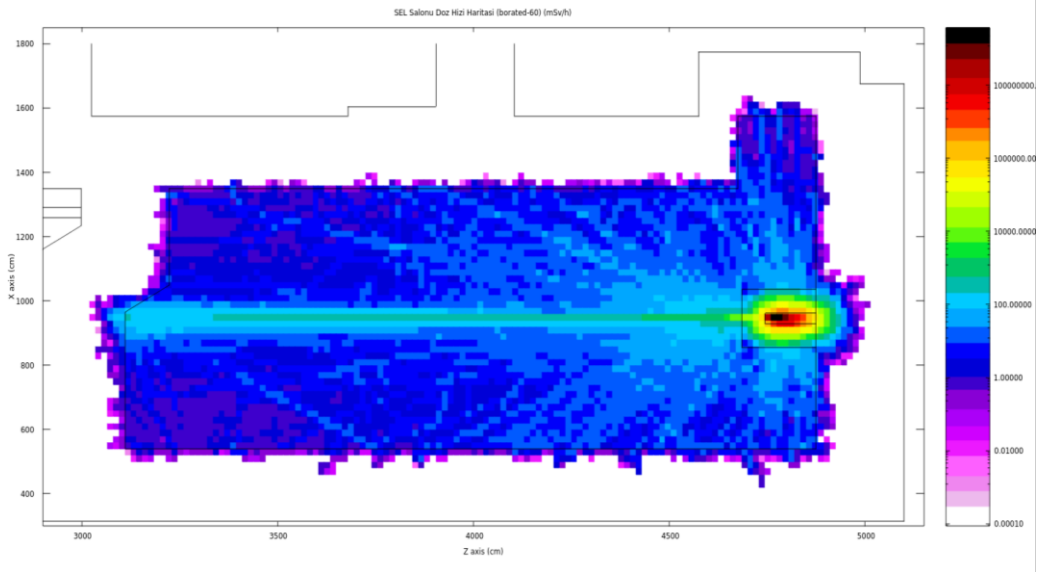
Şekil 4.9. SEL salonu, 80 cm barıtlı beton zırhlı doz hızı haritası.

- 100 cm kalınlıkta barıtlı beton zırhlama ile gerçekleştirilen simülasyondan elde edilen veriler ile Şekil 4.10'deki doz hızı haritası ortaya çıkmıştır. Durdurucuya uzaklığın 5 m'den yakın olduğu bölgelerde, doz hızı 10-50 mSv/h aralığında, uzaklığın 5 m'den 10 m'ye kadar olan bölgelerde doz hızı 1-30 mSv/h aralığında olduğu görülmektedir.



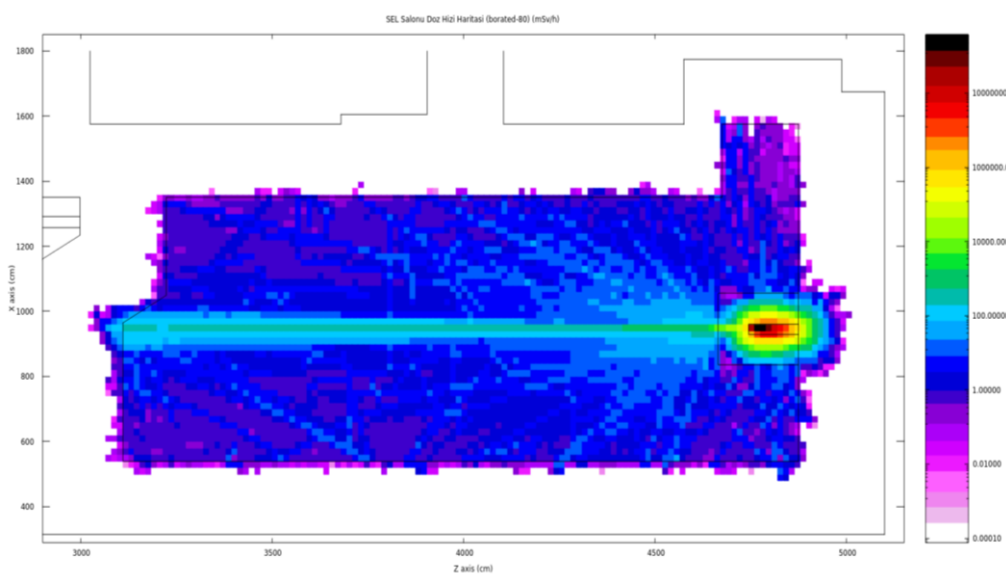
Şekil 4.10. SEL salonu, 100 cm baritli beton zırhlı doz hızı haritası.

- 60 cm kalınlıkta bor katkıli beton zırhlama ile gerçekleştirilen simülasyondan elde edilen veriler ile Şekil 4.11'deki doz hızı haritası ortaya çıkmıştır. Durdurucuya uzaklığın 5 m'den yakın olduğu bölgelerde, doz hızı 20-50 mSv/h aralığında, uzaklığın 5 m'den 10 m'ye kadar olan bölgelerde doz hızı 1-20 mSv/h aralığında olduğu görülmektedir.



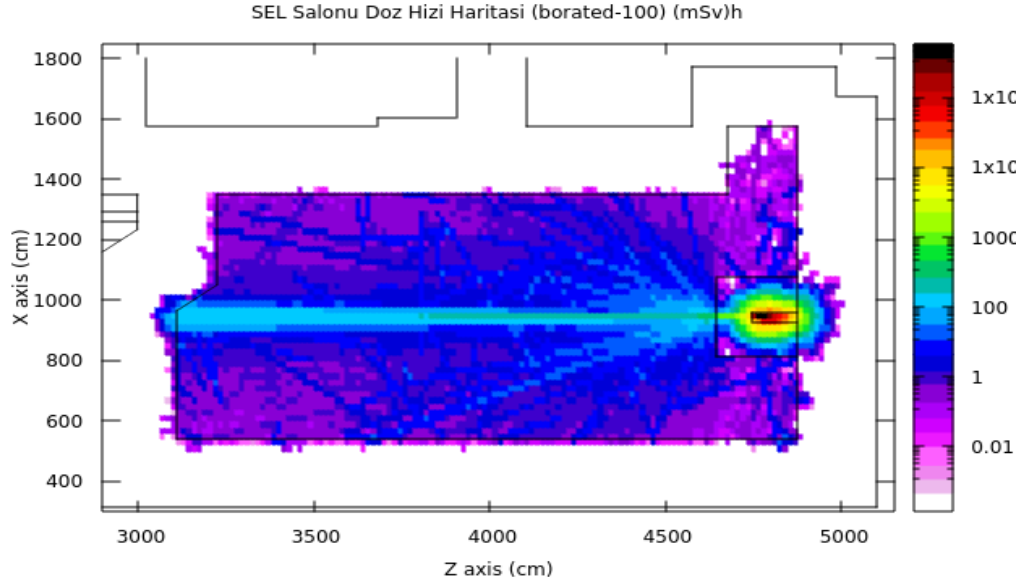
Şekil 4.11. SEL salonu, 60 cm bor katkıli beton zırhlı doz hızı haritası.

- 80 cm kalınlıkta bor katkılı beton zırhlama ile gerçekleştirilen simülasyondan elde edilen veriler ile Şekil 4.12'deki doz hızı haritası ortaya çıkmıştır. Durdurucuya uzaklığın 5 m'den yakın olduğu bölgelerde, doz hızı 1-20 mSv/h aralığında, uzaklığın 5 m'den 10 m'ye kadar olan bölgelerde doz hızı 0,5-1 mSv/h aralığında olduğu görülmektedir.



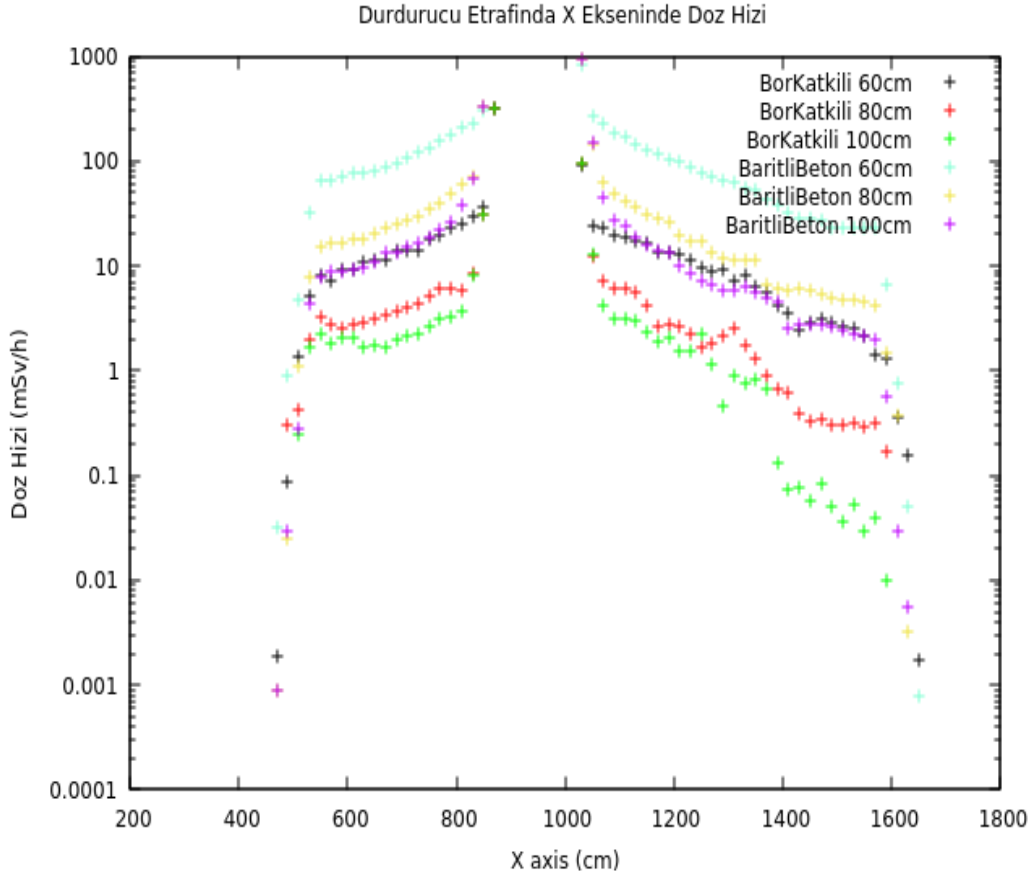
Şekil 4.12. SEL salonu, 80 cm bor katkılı beton zırhlı doz hızı haritası.

- 100 cm kalınlıkta bor katkılı beton zırhlama ile gerçekleştirilen simülasyondan elde edilen veriler ile Şekil 4.13'deki doz hızı haritası ortaya çıkmıştır. Durdurucuya uzaklığın 5 m'den yakın olduğu, demet hattı doğrultusu dışındaki bölgelerde doz hızı 1 mSv/h' den daha düşük, uzaklığın 5 m'den 10 m'ye kadar olan bölgelerde doz hızı 0,01-1 mSv/h aralığında olduğu görülmektedir.



Şekil 4.13. SEL salonu, 100 cm bor katkılı beton zırlı doz hızı haritası.

- Şekil 4.14'te, SEL salonu için elde edilen verilerden, durdurucu etrafında ve X eksenine doğrultusundaki doz hızları aynı grafikte gösterilmiştir. Bor katkılı beton zırlı simülasyonlar, normal veya baritli betonlara kıyasla, çok daha düşük doz hızlarının elde edilebileceğini göstermiştir.



Şekil 4.14. SEL salonu, durdurucu etrafında (X ekseninde) doz hızları.

- Konumları Şekil 4.2’te gösterilen iyon odası dedektörlerinden, SEL salonunda 2 adet bulunmaktadır. Gerçekleştirilen simülasyonlarda elde edilen verilerden, iyon odalarının bulunduğu konumlardaki doz hızları Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da gösterilmiştir. Çizelge 4.5’te, alüminyum iç gövde ile kurşun dış gövdeden oluşturulan demet durdurucuları ile yapılan simülasyon sonuçları verilmiştir. Çizelge 4.6’da ise alüminyum iç gövde ile demir dış gövdeden oluşturulan demet durdurucuları ile yapılan simülasyon sonuçları verilmiştir. Özellikle 1 numaralı yani demet durdurucusuna en yakın iyon odası sonuçlarına bakarak, dış gövde için demir kullanılarak, daha düşük radyasyon doz hızı seviyelerine ulaşılabilir.

Çizelge 4.5. İyon odaları doz hızları, kurşun dış gövdeli.

	Baritli Beton (60 cm)	Baritli Beton (80 cm)	Baritli Beton (100 cm)	Bor Katkılı Beton (60 cm)	Bor Katkılı Beton (80 cm)	Bor Katkılı Beton (100 cm)
İyon Odası 1 (mSv/h)	35	10	7	21	1,1	0,22
İyon Odası 2 (mSv/h)	8	4	3	1,4	0,46	0,1

Çizelge 4.6. İyon odaları doz hızları, demir dış gövdeli.

	Baritli Beton (60 cm)	Baritli Beton (80 cm)	Baritli Beton (100 cm)	Bor Katkılı Beton (60 cm)	Bor Katkılı Beton (80 cm)	Bor Katkılı Beton (100 cm)
İyon Odası 1 (mSv/h)	23	13,1	7,37	2,86	0,97	0,16
İyon Odası 2 (mSv/h)	1,53	1,02	0,52	0,48	0,18	0,12

4.3 Artık Radyasyon

Bölüm 2.4.4’de aktarılan fotonükleer etkileşimler sonucunda, demet durdurucuda radyoaktif çekirdekler meydana gelmektedir. Bu radyonüklidlerin miktarı, tesisin çalışma rejimiyle doğrudan ilişkilidir. Hızlandırıcının çalıştığı sürelerde, birçok radyonüklid ortaya çıkmaktadır. Bunların birçoğu kısa yarı-ömürlü radyonüklidlerdir. Tesisin çalışmadığı dönemlerde bu kısa yarı-ömürlü radyonüklidler tamamen bozunabileceklerdir. Bu sayede demet durdurucuda, kendi yapısında bulunan elementler ile sadece uzun yarı-ömürlü

çekirdekler bulunacaklardır. Böylece, oluşabilecek radyonüklid çeşitliliği bir nebze azaltılabilir.

Bu bölümde gerçekleştirilen simülasyon, uzun dönem çalışmaya göre tasarlanmıştır. Tesisin, yılda 4000 saat ve 5 yıl boyunca çalıştığı varsayılarak bir modelleme gerçekleştirilmiştir.

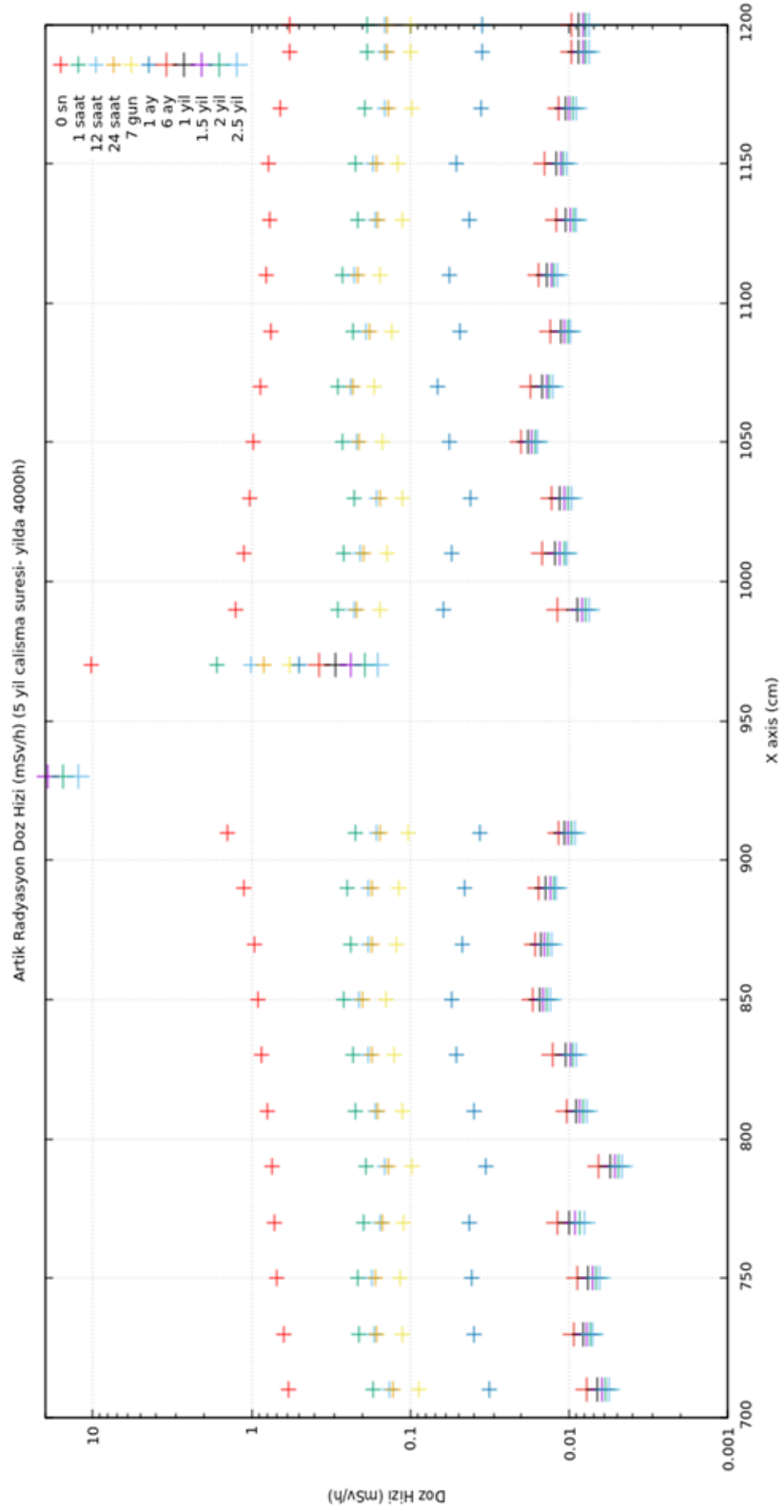
Şekil 4.15’da, elde edilen verilerle, soğuma sürelerine karşılık, durdurucu etrafındaki doz hızları gösterilmiştir. Buradaki doz hızının kaynağı, durdurucunun iç gövdesi yani alüminyumdur. Bu doz hızları, alüminyum iç gövdenin, dış gövdesi yani zırhlaması olmadan ortaya çıkacak doz hızlarıdır.

Soğuma süreleri yani, hızlandırıcının durmasından sonra geçen süreler, grafikte sağ üst köşede görülmektedir.

Hızlandırıcı durduğu anda, durdurucudan yaklaşık 1 m uzaklıkta doz hızı 1mSv/h düzeyindedir. Bu doz hızı seviyesinin yüzde birine düşmesi için yaklaşık 2 yıllık bir süreye ihtiyaç vardır.

Çizelge 4.7’ de demet durdurucudaki artık radyasyona sebep olan radyoizotop envanteri gösterilmiştir. Çizelge de, radyoizotopların yarı-ömürleri, bozunma türleri ve oluşacak ürün çekirdekler de verilmiştir.

Demet durdurucunun, bakım onarımı, değiştirilmesi, taşınması veya depolanması gibi süreçlerde artık radyasyon seviyesi göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 4.15. Durdurucudaki artık radyasyon doz hızı.

Çizelge 4.7. Demet durdurucudaki radyoizotop envanteri.

İzotop	Aktivite (Bq/cm ³)	Yarı ömür	Bozunum Modu / Enerji	Bozunum Ürünü
Zn-65	3,48E+05	243,66 gün	Pozitron 329,863 keV	Cu-65 kararlı
Ni-63	3,46E+04	100,1 yıl	Beta 66,975 keV	Cu-63 kararlı
Ni-59	4,73E+01	76000 yıl	Pozitron 50,561 keV	Co-59
Co-60	7,55E+04	5,275 yıl	Beta 2,8231 MeV	Ni-60 kararlı
Co-58	4,82E+02	70,85 gün	Pozitron 1,28535 MeV	Fe-58 kararlı
Co-57	1,83E+03	271,74 gün	ElectronCapture 835,927 keV	Fe-57 kararlı
Fe-55	8,79E+06	2,737 yıl	ElectronCapture 231,212 keV	Mn-55 kararlı
Mn-54	5,33E+06	312,12 gün	ElectronCapture 1,3772 MeV	Cr-54 kararlı
Mn-53	2,47E+01	3,81e6 yıl	ElectronCapture 596,84 keV	Cr-53 kararlı
Mn-52	2,51E-35	5,59 gün	Pozitron 3,6893 MeV	Cr-52 kararlı
Cr-51	4,45E-02	27,71 gün	ElectronCapture 752,576 keV	V-51 kararlı
V-49	5,53E+04	329,8 gün	ElectronCapture 601,856 keV	Ti-49 kararlı
V-48	4,03E-10	15,97 gün	Pozitron 2,9901 MeV	Ti-48 kararlı
Ti-44	8,47E+03	60,25 yıl	ElectronCapture 267,63 keV	Sc-44 pozitron 3,972 saat 2,6302 MeV

Sc-46	2,52E+02	83,78 gün	Beta 2,3663 MeV	Ti-46 kararlı
Sc-44	8,47E+03	3,97 saat	Pozitron 2,6302 MeV	Ca-44 kararlı
Al-26	1,07E+04	716641 yıl	Pozitron 2,9821 MeV	Mg-26 kararlı
Na-22	7,94E+06	2,603 yıl	Pozitron 1,8201 MeV	Ne-22 kararlı
H-3	1,55E+06	12,32 yıl	Beta 18,591 keV	He-3 kararlı
Toplam (Bq/cm³) (Al)	2,42E+07			
Toplam (Bq) (Al)	4,85E+11			

4.4 ANSYS-Fluent

ANSYS sonlu elemanlar metodunu kullanarak nümerik çözümler yapan bir simülasyon programıdır. İçerdiği fluent modülü ile belirlenen geometrilerde, ısı transferi ve akış modellemeleri yapılabilmektedir. Fluent modülünde, ısı transferi mekanizmalarını (iletim, taşınım, ışınım) inceleyebilen simülasyon araçları bulunur.

FLUKA simülasyonlarında, demet durdurucuda depolanan enerji Bölüm 4.1’de gösterilmiştir. Elektronların etkileştiği ilk yüzeye yakın bölgelerde enerjisinin büyük kısmını kaybettiği Şekil 4.1’de görülebilir. Homojen bir enerji depolanması olmadığı için, simülasyonlar da durdurucu 60 bölgeye ayrılmış, her bölgede depolanan enerji belirlenmiştir. Durdurucunun, 60 bölgeyi çizimi ANSYS Design Modeller modülünde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1’de demet durdurucunun ölçüleri verilmiştir. Alüminyum gövde içinde, 32 adet soğutma suyu kanalı mevcuttur.

FLUKA verilerinden elde edilen her bir bölgede depolanan enerji, fluent simülasyonlarında her bir bölge için ısı üretimi olarak tanımlanmıştır.

Elektron demetinin, durdurucuya aktarabileceği maksimum güç 80kW'dır. Soğutma sisteminde kullanılacak ısı değiştiricinin, giriş su sıcaklığı ile çıkış su sıcaklığı farkını en çok 10 °C 'de sağlayacak kapasitede olacağı varsayımıyla, saatte yaklaşık en az 7 ton su akışı sağlanması gerekir. Fluent simülasyonlarında, kütle akış hızı 7000 kg/h olarak girdi parametrelerinde kullanılmıştır.

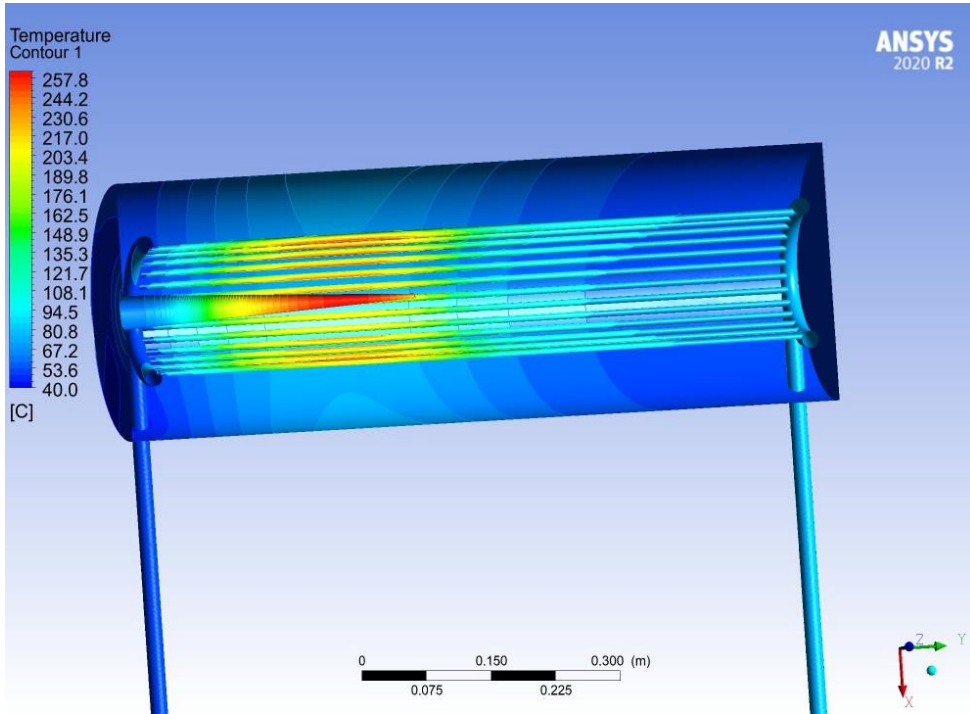
Akış rejimi Reynolds Sayısı kullanılarak belirlenir. Reynolds Sayısı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D\mu} \quad (4.1)$$

Burada \dot{m} , kütle akış hızı; D , kanal çapı; μ , akışkanın dinamik viskozitesidir.

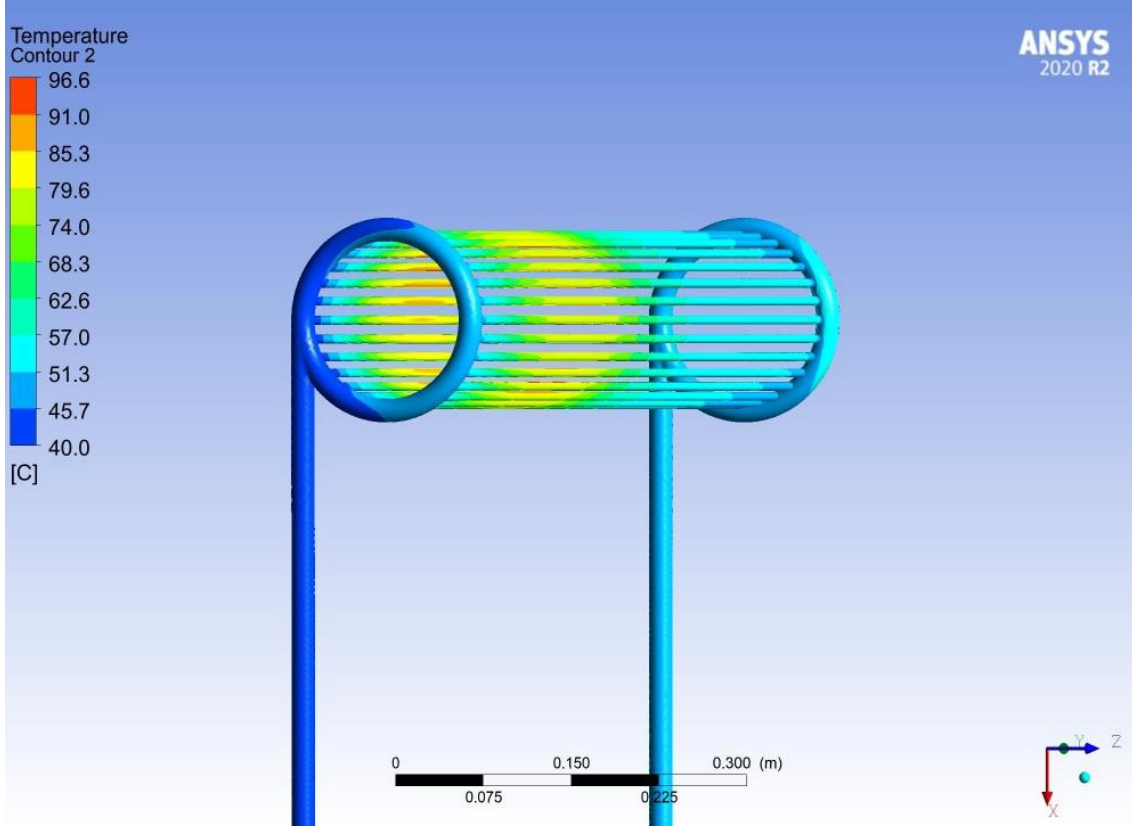
Reynolds sayısı, 15804 olarak hesaplanmış ve akış rejiminin türbülans olduğu belirlenmiştir. Bu yüzden ANSYS-Fluent'de akışın modellenmesi için k-epsilon türbülans modeli girdi parametresi olarak kullanılmıştır.

Fluent ile gerçekleştirilen simülasyon sonucu, durdurucu içindeki sıcaklık dağılımı Şekil 4.16'de gösterilmiştir. Alüminyum gövde içinde sıcaklığın en çok 257,8 °C'ye çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.16. Alüminyum gövde içi sıcaklık dağılımı.

- Fluent ile gerçekleştirilen simülasyon sonucu, soğutma suyu içindeki sıcaklık dağılımı Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Soğutma suyu içinde sıcaklığın en çok $96,6^{\circ}\text{C}$ ’ye çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.17. Soğutma suyu içinde sıcaklık dağılımı.



5. SONUÇ

Tezin amacı, TARLA tesisinde kullanılabilecek kapasiteye sahip, bir elektron demet durdurucusu tasarımı yapmak olarak belirlenmiştir.

Farklı malzemelerle yapılan ön çalışmalar sonucunda, demet durdurucunun iç gövde malzemesi olarak alüminyum seçilmiştir.

Bu seçimi belirleyen etmenler;

- alüminyumun, ülkemizde bulunabilir ve istenilen şekil ve ölçülerde kolay işlenebilir olması,
- bremsstrahlung ve fotonötron veriminin özellikle bakıra karşı daha düşük olması,
- kısa çalışma dönemlerinde, nötron etkileşimleri sonucu oluşan radyonüklidlerin sebep olduğu artık radyasyon doz hızının, bakıra göre daha düşük olması, uzun dönemde aralarında önemli bir fark olmaması,
- grafitin, ülkemizde imalatının ve işlenebilirliğinin boyutlarının sınırlı olması,
- grafit gövdenin yüksek sıcaklıklara çıkmasından dolayı soğutma sisteminin uzun süreli çalışma zorunluluğu,
- grafitin demetle etkileşmesinde partiküllerin gövdeden kopması sonucu, demetin bulunduğu vakum ortamına zarar vermesi

olarak belirtilebilir.

Geometri olarak, silindirik bir yapı, birçok yönden homojenlik sağlayacağı için tercih edilmiştir. Silindirin boyutlarını belirlerken, elektron demet gücünün çok büyük bir kısmını absorbe edebilmesine önem verilmiştir. Bunun için, X_0 (radyasyon uzunluğu) değeri ve Moliere yarıçapı değerleri ile hesaplamalar yapılmıştır. Özellikle hızlandırıcı salonundaki durdurucunun yerleştirileceği konuma, daha büyük bir durdurucu yerleştirilemeyeceği için boyut hesapları önem teşkil etmektedir.

Durdurucu iç gövdeye, demetin girişi için koni şekli verilmiştir. Bu şekli oluşturmaktaki amaç, elektron demet gücünün ilk etkileştiği yüzey alanını arttırmaktır. Böylece, elektron demetinin durdurucuya depolayacağı enerjinin, daha büyük bir hacme dağılması sağlanmaktadır.

Elektron demetinin, demet durdurucusuna ulaşmadan kısa bir mesafe önce, demetin enine emitansının arttırılması, demet enerjisinin durdurucu gövde içinde daha büyük bir hacimde soğurulmasını sağlayacaktır.

Alüminyum gövde, kurşun ve demir blokun içine yerleştirilerek, ayrı ayrı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Buradaki amaç, iç gövdede elektronların bremsstrahlung mekanizması ile enerji kaybetmesi ile ortaya çıkan X ışınlarının durdurulmasıdır.

Farklı boyut ve bileşenden oluşan beton zırhlamalarla, salonlardaki radyasyon doz hızı haritaları elde edilmiştir. Doz hızı haritaları incelendiğinde, dış gövde olarak demir kullanmanın, kurşuna göre daha az radyasyon doz hızına sebep olduğu görülmektedir. Bunun sebeplerinden biri olarak, demirin fotonötron veriminin, kurşuna göre yaklaşık 3 kat daha düşük olması söylenebilir.

Zırhlama malzemesi olarak, bor katkılı beton kullanarak daha düşük doz hızlarına ulaşılabileceği, doz hızı haritalarında görülmektedir.

Doz hızı haritaları incelendiğinde, zırhlamanın en zayıf olduğu bölgenin, demetin geliş yönünün zıttı doğrultusunda olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda, konum olarak durdurucuya en yakın uygun bir noktaya, 2m yüksekliğinde ve 1 metre genişliğinde yapılacak hesaplamalarla gerekli kalınlıkta kurşun bir plaka yerleştirilmesi ile o doğrultudaki doz hızları çok daha düşük seviyelere indirilmesi, böylece, o bölgelerde bulunabilecek cihaz ve donanımlarda daha az radyasyon hasarının ortaya çıkması sağlanmış olacaktır.

Termal-akışkan çalışmalarında elde edilen sonuçlara göre, tasarımı yapılan demet durdurucunun, uygun bir ısı değiştirici sistemle, tesisin çalışma şartlarında güvenle kullanılabilmesi belirlenmiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ahmed, S.N.** 2015, Physics and Engineering of Radiation Detection, 2nd Edition, Elsevier Inc., Amsterdam.
- Aksoy, A. ve Karlı, Ö. (Eds)**, 2015, The Technical Design Report of Turkish Accelerator and Radiation Laboratory in Ankara, Ankara University, Ankara.
- Ansys®**, Discovery AIM v2020 R2.
- Ansys®**, Fluent v2020 R2.
- Bryant, P.**, 1994, A brief History and Review of Accelerators., CAS-CERN Accelerator School: 5th General Accelerator Physics Course.
- Erenler, D.**, 2019, Tarla İçin Yüksek Güçlü Elektron Demet Durdurucusunun Fiziği ve Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, 72s.
- Ferrari, A., Sala, P.R., Fasso, A. and Ranft, J.**, 2005, "FLUKA: a multi-particle transport code", CERN-2005-10 (2005), INFN/TC_05/11, SLAC-R-773.
- Fernandez-Hernando, J.L. and Angal-Kalinin, D.**, 2010, Beam Dump and Collimation Design Studies for NLS: Thermal and Structural Behaviour, Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan.
- Frohlich, L., Casarin, K. and Vascotto, A.**, 2014, Simulation and Measurement of The Radiation Field of The 1.4 GeV Electron Beam Dump of The FERMI Free Electron Laser, Radiation Protection Dosimetry (2015), Vol. 163, No. 2, pp. 141–147.
- Knoll, G. F.**, 2010, Radiation Detection and Measurement, 4th Edition, Wiley.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Maslov, M., Likhovitskii, A. and Schmitz, M.**, 1999, Design of a Beam Dump for the TTF-FEL Phase II (TTF2) Project: The Modification of The Existing TESLA Test Facility Dump, DESY, TESLA-FEL 99-06.
- Naumann, B., Neubert, W., Prade, H. and Prohl, D.**, 1999, A Possible Beam Dump Design for Intense Electron Beams, Report FZD-267, HZDR Publications.
- NCRP**, 1977, Report no. 144, Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities.
- Nozar, M.**, 2014, Shielding Design for the ARIEL e-Linac, 100 kW tuning BD & the EHDT beamline Using FLUKA, 3rd Advanced FLUKA Course & Workshop, INFN, Italy.
- Reggiani, D.**, 2012, Extraction, Transport and Collimation of The PSI 1.3 MW Proton Beam, https://accelconf.web.cern.ch/HB2012/talks/weo3a03_talk.pdf (Erişim tarihi: 15 Aralık 2022)
- Takei, H. and Takeda, Y.**, 2000, Beam Dump for High Current Electron Beam at JNC, KEK Proceedings, 200(20); 255-263.
- Walz, D.R., McFarlane, A. and Lewandowski, E.**, 1989, Beam Dumps, Stoppers and Faraday Cups at The SLC, IEEE Particle Accelerator Conference, Chicago.
- Wohlmuther, M.**, 2011, Targets and Beam Dumps, <https://cas.web.cern.ch/cas/Bilbao-2011/Lectures/Wohlmuther.pdf>. (Erişim tarihi: 10 Şubat 2018)
- Yavaş, .**, 2005, Türk Hızlandırıcı Merkezi projesi:Geçilen ve Kalan Yolun Haritası. 23. Ulusal Fizik Kongresi (TFD23), Muğla Üniversitesi.

TEŞEKKÜR

Yaptığım çalışmamın her aşamasında, önerilerinden, bilgi birikiminden tecrübelerinden yararlandığım ve her türlü çalışma kolaylığını sağlayan çok değerli tez hocalarım Sayın Prof. Dr. Yüksel ALTAŞ ve Sayın Prof. Dr. Şule ERGÜN' e en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesindeki görüş ve önerileriyle desteklerini esirgemeyen, Sayın Prof. Dr. Hüseyin TEL, Sayın Prof. Dr. Nalan KABAY ve Sayın Doç Dr. Şenol SERT'e, ayrıca EÜ Nükleer Bilimler Enstitüsü Müdürü Sayın Prof. Dr. Sabriye YUŞAN' a teşekkürlerimi sunarım.

TARLA Projesi'nde yer almamı sağlayan Sayın Doç. Dr. Avni AKSOY ve Sayın Dr. Özlem KARSLI' ya teşekkürlerimi sunarım.

TARLA Projesi'nde görev yaptığım dönemde, birlikte çalıştığım başta Öğr. Gör. Çağlar KAYA olmak üzere tüm TARLA ekibine en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında teşvik ve desteklerini sürekli hissettiğim, Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü ailesine saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın tamamlanmasında katkılarını sunan Uğur KARAKURT, Osman BİLEN ve Alim KIRIŞIK'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince kendilerine fazla zaman ayıramadığım eşim Şule Yeşim YILDIZ ve oğlum Bilgi Görkem YILDIZ' a bütün içtenliğimle teşekkürlerimi sunarım.

06 / 02 / 2023

Mehmet YILDIZ



ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Yıldız

Eğitim Durumu

Lise: Saint-Joseph Fransız Koleji, İzmir (1990)

Lisans: Nükleer Enerji Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Hacettepe Üniversitesi (2012)

Yüksek Lisans: Nükleer Bilimler Enstitüsü, Nükleer Teknoloji Anabilim Dalı, Ege Üniversitesi (2015)

Doktora: Nükleer Bilimler Enstitüsü, Nükleer Teknoloji Anabilim Dalı, Ege Üniversitesi (2023)

İş Deneyimi:

Yıldız Metal Sıvama, Yönetici (1995- 2014)

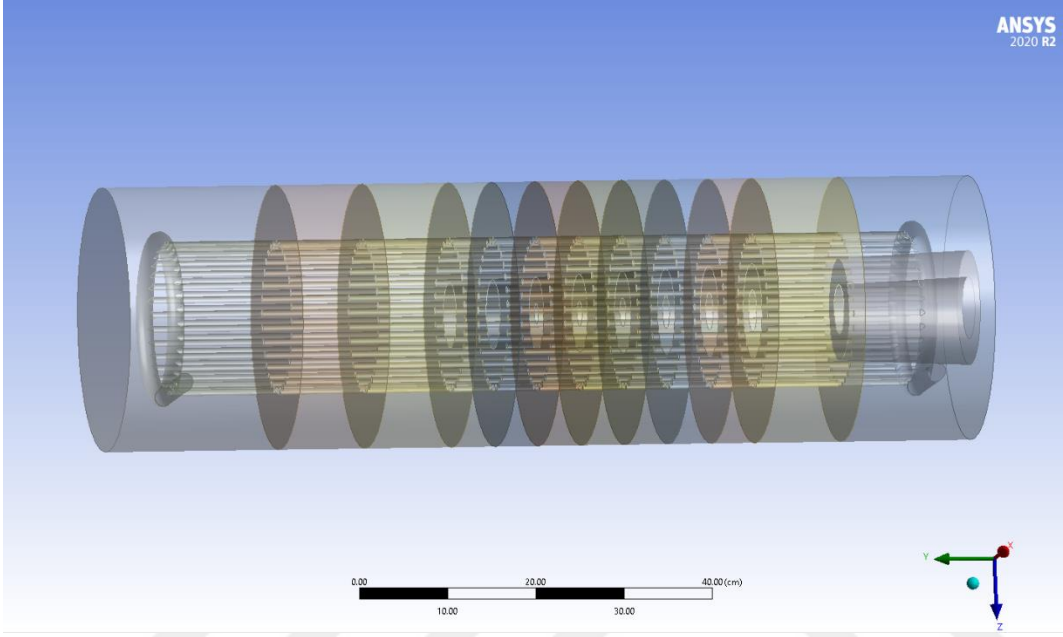
Akdeniz Üniversitesi, Radyasyon Onkolojisi ABD, Servis Mühendisi (2015- 2017)

Ankara Üniversitesi, Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü, Nükleer Enerji Müh.(2017-2018)

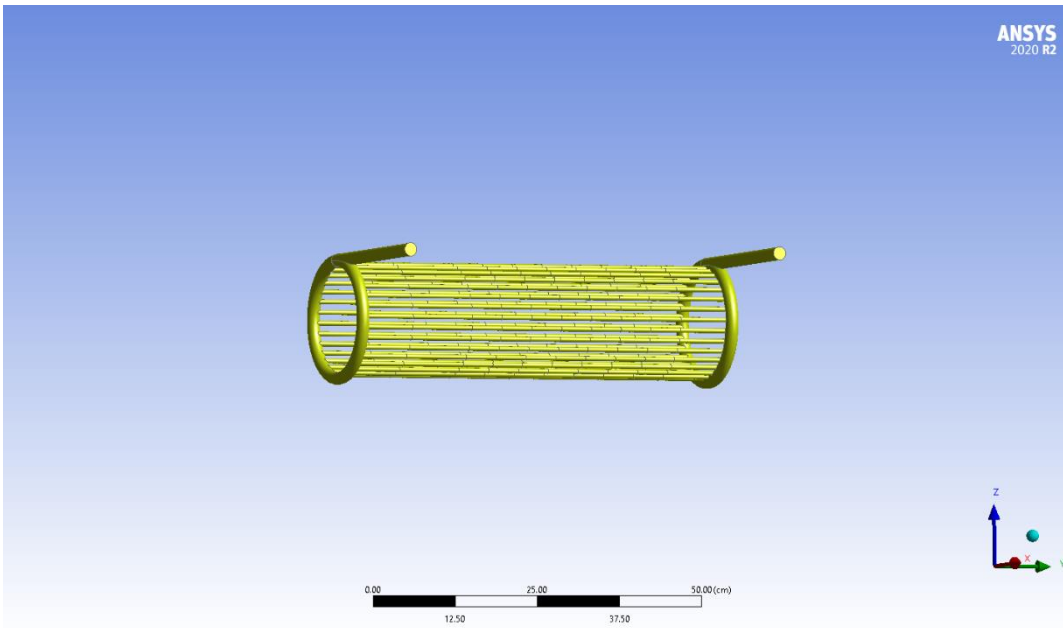
Hacettepe Üniversitesi, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü, Öğr.Gör. (2018-)

EKLER

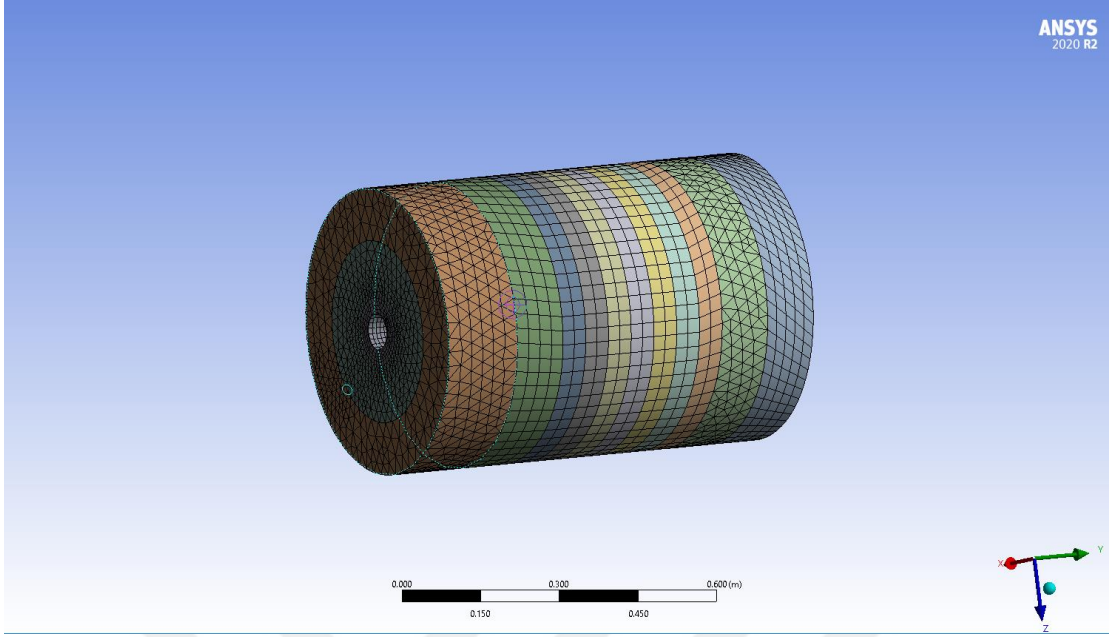
EK 1- ANSYS-Fluent Geometri Şekilleri ve Girdi Parametreleri



Şekil E.1: Demet durdurucunun 3-boyutlu gösterimi



Şekil E.2: Su kanalının 3-boyutlu gösterimi.



Şekil E.3: Demet durucunun kafes (“mesh”) modeli.

Viscous Model

Model

- Inviscid
- Laminar
- Spalart-Allmaras (1 eqn)
- k-epsilon (2 eqn)
- k-omega (2 eqn)
- Transition k-kl-omega (3 eqn)
- Transition SST (4 eqn)
- Reynolds Stress (7 eqn)
- Scale-Adaptive Simulation (SAS)
- Detached Eddy Simulation (DES)
- Large Eddy Simulation (LES)

k-epsilon Model

- Standard
- RNG
- Realizable

Near-Wall Treatment

- Standard Wall Functions
- Scalable Wall Functions
- Non-Equilibrium Wall Functions
- Enhanced Wall Treatment
- Menter-Lechner
- User-Defined Wall Functions

Options

Buoyancy Effects: Only Turbulence Production

- Viscous Heating
- Curvature Correction
- Production Kato-Launder
- Production Limiter

Model Constants

Cmu: 0.09

C1-Epsilon: 1.44

C2-Epsilon: 1.92

TKE Prandtl Number: 1

TDR Prandtl Number: 1.3

Energy Prandtl Number: 0.85

Wall Prandtl Number: [empty]

User-Defined Functions

Turbulent Viscosity: none

Prandtl Numbers

TKE Prandtl Number: none

TDR Prandtl Number: none

Energy Prandtl Number: none

Wall Prandtl Number: none

Buttons: OK, Cancel, Help

Şekil E.4: ANSYS-Fluent girdi parametreleri.

EK 2 – FLUKA Örnek Girdi Dosyası

```
TITLE
50MeV electron basic dump
DEFAULTS                                PRECISIO
PHOTONUC      1.                        HYDROGEN @LASTMAT
PHYSICS        1.                        COALESCE
PHYSICS        3.                        EVAPORAT
BEAM           -0.05 -4.81E-05   -5.   2.   0.0   -1.ELECTRON
BEAMPOS        945.   150.   4759.
GEOBEGIN                                COMBNAME
  0 0      dump
SPH a1      0.0 0.0 0.0 100000.
SPH a2      0.0 0.0 0.0 10000.
RPP cevre   -300. 2475. 0.0 590. -100. 5400.
RPP cevre1  -400. 2575. 0.0 690. -200. 5500.
* accelerator and fel, planes
XYP z0      0.0
XYP z1      190.
XYP z2      225.
XYP z3      425.
XYP z4      1413.
XYP z5      1463.
XYP z6      1914.
XYP z7      1964.
XYP z8      2886.
XYP z9      2998.5
XYP z10     3111.
XYP z11     3223.5
XYP z12     4675.
XYP z13     4875.
XYP z14     4987.5
XYP z15     5100.
YZP x0      0.0
YZP x1      298.
YZP x2      315.
YZP x3      428.
YZP x4      540.
YZP x5      640.
YZP x6      653.
YZP x7      1350.
* electronic breehms planes
XYP z16     40.
XYP z17     2305.
XYP z18     2330.
XYP z19     2760.
XYP z20     2800.
XYP z21     3025.
XYP z22     3680.
XYP z23     3905.
YZP x8      1575.
YZP x9      1592.
YZP x10     1605.
YZP x11     1675.
YZP x12     1805.
YZP x13     2150.
```

YZP x14 2335.
YZP x15 2375.
* taban tavan
XZP tab0 0.0
XZP tav0 400.
XZP tav1 300.
XZP tav2 490.
XZP tvelek 440.
XZP tvelek1 460.
PLA z24 709.820009 0.0 -529.9989400032 965. 0.0 3111.
PLA z25 801.27929865 0.0 -598.2885338947548 1150. 0.0 2886.
PLA z26 -340.54054055 0.0 -280. 1150. 0.0 2886.
PLA z27 -546.5294139785 0.0 -449.3686261371 1049. 0.0 3223.5
* taban dip
XZP tab1 -300.
* accgate
YZP xag 115.
XYP zag 525.
XZP yag -30.
* bremgate
XYP zbg 4105.
YZP xbg 1905.
* felgate
XYP zfg 4575.
YZP xfg 1775.
* beam vacuum
ZCC bepipe 1275. 150. 3.
ZCC bepipei 1275. 150. 2.5
XYP zp1 2850.
XYP zp2 2851.
XYP zp3 2885.
* Target
ZCC tar 1275. 150. 15.
TRC taric 1275. 150. 2885. 0.0 0.0 35. 2. 0.25
XYP zt25 2885.
XYP zt26 2893.
XYP zt27 2898.
XYP zt28 2903.
XYP zt29 2906.
XYP zt30 2909.
XYP zt31 2912.
XYP zt32 2914.
XYP zt33 2916.
XYP zt34 2918.
XYP zt35 2919.
XYP zt36 2920.
XYP zt37 2921.
XYP zt38 2922.
XYP zt39 2924.
XYP zt40 2926.
XYP zt41 2930.
XYP zt42 2935.
XYP zt43 2940.
XYP zt44 2950.
* PbShielding
ZCC pb 1275. 150. 30.
YZP xa 1234.
* dedektörler

* acchall

RCC ich1d 660. 170. 1470. 0.0 16. 0.0 4.
RCC ich1i 660. 170.1 1470. 0.0 15.8 0.0 3.9
RCC ich2d 1345. 170. 2280. 0.0 16. 0.0 4.
RCC ich2i 1345. 170.1 2280. 0.0 15.8 0.0 3.9
RCC ich3d 545. 170. 2000. 0.0 16. 0.0 4.
RCC ich3i 545. 170.1 2000. 0.0 15.8 0.0 3.9
ZCC su1 1265.5 150. 0.375
ZCC su2 1284.5 150. 0.375
ZCC su3 1275. 159.5 0.375
ZCC su4 1275. 140.5 0.375
ZCC su5 1281.7175144 156.7175144 0.375
ZCC su6 1268.2824856 156.7175144 0.375
ZCC su7 1268.2824856 143.2824856 0.375
ZCC su8 1281.7175144 143.2824856 0.375
ZCC su9 1283.7768556 146.3645074 0.375
ZCC su10 1266.2231444 146.3645074 0.375
ZCC su11 1266.2231444 153.63549261 0.375
ZCC su12 1283.77685556 153.63549261 0.375
ZCC su13 1278.63549261 158.77685556 0.375
ZCC su14 1271.36450739 158.77685556 0.375
ZCC su15 1271.36450739 141.22314444 0.375
ZCC su16 1278.63549261 141.22314444 0.375
ZCC su17 1276.85335806 140.68253984 0.375
ZCC su18 1273.14664194 140.68253984 0.375
ZCC su19 1273.14664194 159.317460164 0.375
ZCC su20 1276.85335806 159.317460164 0.375
ZCC su21 1284.317460164 151.85335806 0.375
ZCC su22 1284.317460164 148.146641941 0.375
ZCC su23 1265.68253984 148.146641941 0.375
ZCC su24 1265.68253984 151.85335806 0.375
ZCC su25 1267.101038683 155.277917214 0.375
ZCC su26 1267.101038683 144.722082786 0.375
ZCC su27 1282.898961317 144.722082786 0.375
ZCC su28 1282.898961317 155.277917214 0.375
ZCC su29 1280.277917214 157.898961317 0.375
ZCC su30 1269.722082786 157.898961317 0.375
ZCC su31 1269.722082786 142.101038683 0.375
ZCC su32 1280.277917214 142.101038683 0.375
ZCC r1 1275. 150. 4.
ZCC r2 1275. 150. 9.
XYP zt45 2970.
XYP zt46 2870.
XYP zf1 4650.
XYP zf2 4651.
XYP zf4 4705.
XYP zf5 4725.
XYP zf6 4745.
XYP zf7 4760.
XYP zf8 4845.
TRC feltaric 945. 150. 4760. 0.0 0.0 35. 2. 0.25
* beam vacuum
ZCC felpipe 945. 150. 3.
ZCC felpipei 945. 150. 2.5
* Target
ZCC feltar 945. 150. 15.
* PbShielding
ZCC felpb 945. 150. 30.

ZCC felsu1 935.5 150. 0.375
ZCC felsu2 954.5 150. 0.375
ZCC felsu3 945. 159.5 0.375
ZCC felsu4 945. 140.5 0.375
ZCC felsu5 951.7175144 156.7175144 0.375
ZCC felsu6 938.2824856 156.7175144 0.375
ZCC felsu7 938.2824856 143.2824856 0.375
ZCC felsu8 951.7175144 143.2824856 0.375
ZCC felsu9 953.7768556 146.3645074 0.375
ZCC felsu10 936.2231444 146.3645074 0.375
ZCC felsu11 936.2231444 153.63549261 0.375
ZCC felsu12 953.77685556 153.63549261 0.375
ZCC felsu13 948.63549261 158.77685556 0.375
ZCC felsu14 941.36450739 158.77685556 0.375
ZCC felsu15 941.36450739 141.22314444 0.375
ZCC felsu16 948.63549261 141.22314444 0.375
ZCC felsu17 946.85335806 140.68253984 0.375
ZCC felsu18 943.14664194 140.68253984 0.375
ZCC felsu19 943.14664194 159.317460164 0.375
ZCC felsu20 946.85335806 159.317460164 0.375
ZCC felsu21 954.317460164 151.85335806 0.375
ZCC felsu22 954.317460164 148.146641941 0.375
ZCC felsu23 935.68253984 148.146641941 0.375
ZCC felsu24 935.68253984 151.85335806 0.375
ZCC felsu25 937.101038683 155.277917214 0.375
ZCC felsu26 937.101038683 144.722082786 0.375
ZCC felsu27 952.898961317 144.722082786 0.375
ZCC felsu28 952.898961317 155.277917214 0.375
ZCC felsu29 950.277917214 157.898961317 0.375
ZCC felsu30 939.722082786 157.898961317 0.375
ZCC felsu31 939.722082786 142.101038683 0.375
ZCC felsu32 950.277917214 142.101038683 0.375

XYP zf3 4685.

* pbsh

ZCC fpb 945. 150. 30.

YZP fx1 995.

YZP fx2 1015.

YZP fx3 1035.

YZP fx4 1055.

YZP fx5 1075.

YZP fx6 895.

YZP fx7 875.

YZP fx8 855.

YZP fx9 835.

YZP fx10 815.

XZP fy1 220.

XZP fy2 240.

XZP fy3 260.

XZP fy4 280.

END

* blackbody

bbody 5 +a1 -a2

* vacuum

vac 5 +a2 -cevre1 -(+tab0 -tab1 -z0 +z15 -x0 +x15)

* diş hava kontrol

out 5 +cevre1 -cevre

* regions

* duvarlar

* 3 ayrı tavan: acc +fel, brehms,elektronik

* taban: duaccfel e dahil tek taban

duaccfel 5 -z0 +z1 -x0 +x1 -tab0 +tav2
|-z0 +z2 -x1 +x7 -tab0 +tav2
|-z0 +z12 +x8 -x7 +tav2 -tab0
|+z13 -z12 +x8 -x7 +tav2 -tav1
|+z3 -z2 +x4 -x2 +tav2 -tav1
|+z4 -z3 +x4 -x2 +tav2 -tab0
|+z5 -z4 +x5 -x2 +tav2 -tab0
|+z6 -z5 +x6 -x3 +tav2 -tab0
|+z7 -z6 +x5 -x2 +tav2 -tab0
|+z13 -z7 +x4 -x2 +tav2 -tab0
|+z10 -z8 -z26 -x2 +tav2 -tab0
|+tav2 -tab0 -z27 +z26 -z24 +z25
|+z11 -z9 +x7 +z27 +tav2 -tab0
|+z15 -z14 +tav2 -tab0 -x2 +x11
|+z14 -z13 +tav2 -tab0 -x2 +x9
|-x3 +x8 +tav2 -tav0 -z0 +z15
|-z0 +z15 +x15 -x0 +tab0 -tab1

elekdu 5 -z0 +z16 +x15 -x8 +tvelek1 -tab0
|-z0 +z20 +x15 -x14 +tvelek1 -tab0
|-z17 +z18 -x8 +x14 +tvelek1 -tab0
|-z19 +z20 -x8 +x14 +tvelek1 -tab0
|-z0 +z20 +x15 -x8 +tvelek1 -tvelek

brehdu 5 -z20 +z21 +x15 -x8 +tav2 -tab0
|-z21 +z22 +x15 -x13 +tav2 -tab0
|-z22 +z23 +x15 -x12 +tav2 -tab0
|-z22 +z23 +x12 -x10 +tav2 -tav1
|-z22 +z23 +x10 -x8 +tav2 -tab0
|+x15 -x8 -z20 +z23 +tav2 -tav0

acgate 5 -z1 +zag -xag +x1 -x0 +tav2 -tab0
|-z2 +zag +x2 -x1 +tav2 -tab0

brgate 5 +xbg -x8 +zbg -z23 +tav2 -tab0

felgate 5 +xfg -x9 +z14 -zfg +tav2 -tab0
|+x9 -x8 +z13 -zfg +tav2 -tab0

* dış hava

airout 5 +cevre +z0
|+cevre -x15
|+cevre -z15
|+cevre +x0
|+cevre -tav2
|+cevre -tvelek1 -z0 +z20 +x15 -x8
|+cevre +xag -z1
|+cevre +x2 -zag
|+cevre +z6 -z5 +x3 -x2
|+cevre -z14 -x11
|+cevre -xbg -z23
|+cevre -xfg -zbg
|+cevre +xfg -x8 +zfg -zbg

* acchall giris

acc1 5 +z3 -z2 +x4 -x2 +tav1 -tab0
|+z4 -z2 +x7 -x4 +tav0 -tab0

* acchall orta

acc2 5 +z5 -z4 +x7 -x5 +tav0 -tab0
|+z6 -z5 +x7 -x6 +tav0 -tab0 -ich1d
|+z7 -z6 +x7 -x5 +tav0 -tab0

* acchall dip

acc3 5 +z8 -z7 +x7 -x4 +tav0 -tab0 -(+bepipe -zpl +zp3) -ich2d -ich3d -(+z8 -zt46 +tav1 -tab0 +x7 -xa)

```

    | -z8 +z9 -xa +x7 -(+x7 -xa +tav1 -tab0 -z8 +z9) +tav0 -tab0
    | +xa -z25 -z8 +tav0 -tab0 +z9
* fel giris
fel1    5 +z13 -z12 +x8 -x7 +tav1 -tab0
    | +z13 -zbg +x7 -x4 +tav0 -tab0 -(+felpipe -zf1 +zf6) -(+felpb -zf6 +z13)
* fel dip
fel2    5 +zbg -z11 -x4 +x7 +tav0 -tab0
    | +z11 -z10 +z24 -x4 +tav0 -tab0
* brehm gate
* giris
bre1    5 +x12 -x10 +z23 -z22 +tav1 -tab0
* kucuk elektronik
ele1    5 +x14 -x8 +z19 -z18 +tvelek -tab0
* brehms ic
bre2    5 +z22 -z21 +x13 -x8 +tav0 -tab0
* buyuk elektronik
* dip
eledip  5 +z17 -z4 +x14 -x8 +tvelek -tab0
* buyuk elektronik
* giris
elegir  5 +z4 -z16 +x14 -x8 +tvelek -tab0
* beam pipe
* SS316
bpipe   5 +bepipe -bepipei -zp2 +zp3
* beam pipe
* SS316
bpipe1  5 +bepipe +zp2 -zp1
* beam pipe
* iç vacuum
bpipeic 5 +bepipei -zp2+zp3
* dedectors
* acchall ionch1
ioch1d  5 +ich1d -ich1i
ioch1ic 5 +ich1i
* acchall ionch2
ioch2d  5 +ich2d -ich2i
ioch2ic 5 +ich2i
* acchall ionch3
ioch3d  5 +ich3d -ich3i
ioch3ic 5 +ich3i
dump    5 -taric +tar -zt25 +zt45 -su1 -su2 -su3 -su4 -su5 -su6 -su7 -su8 -su9 -su10 -su11 -su12 -su14 -su13
    -su15 -su16 -su17 -su18 -su19 -su20 -su21 -su22 -su23 -su24 -su25 -su26 -su27 -su28 -su29 -su30
    -su31 -su32
su1     5 +su1 -zt25 +zt45
su2     5 +su2 -zt25 +zt45
su3     5 +su3 -zt25 +zt45
su4     5 +su4 -zt25 +zt45
su5     5 +su5 -zt25 +zt45
su6     5 +su6 -zt25 +zt45
su7     5 +su7 -zt25 +zt45
su8     5 +su8 -zt25 +zt45
su9     5 +su9 -zt25 +zt45
su10    5 +su10 -zt25 +zt45
su11    5 +su11 -zt25 +zt45
su12    5 +su12 -zt25 +zt45
su13    5 +su13 -zt25 +zt45
su14    5 +su14 -zt25 +zt45
su15    5 +su15 -zt25 +zt45

```

```

su16      5 +su16 -zt25 +zt45
su17      5 +su17 -zt25 +zt45
su18      5 +su18 -zt25 +zt45
su19      5 +su19 -zt25 +zt45
su20      5 +su20 -zt25 +zt45
su21      5 +su21 -zt25 +zt45
su22      5 +su22 -zt25 +zt45
su23      5 +su23 -zt25 +zt45
su24      5 +su24 -zt25 +zt45
su25      5 +su25 -zt25 +zt45
su26      5 +su26 -zt25 +zt45
su27      5 +su27 -zt25 +zt45
su28      5 +su28 -zt25 +zt45
su29      5 +su29 -zt25 +zt45
su30      5 +su30 -zt25 +zt45
su31      5 +su31 -zt25 +zt45
tarici    5 +taric
* beton shielding
betsh     5 +x7 -xa +tav1 -tab0 +z9 -zt46 -(+pb +z9 -zt46)
su32      5 +su32 -zt25 +zt45
fe        5 +pb -tar -zt46 +z9
fe1       5 +tar -zt45 +z9
fe2       5 -zt46 +zp3 +tar -bepipe
* beam pipe
* SS316
felbpipe  5 +felbpipe -felbpipei -zf2 +zf7
felpipe1  5 +felpipe -zf1 +zf2
felpic    5 +felpipei +zf7 -zf2
feltaic   5 +feltaric
feldump   5 +feltar -feltaric +zf8 -zf7 -felsu1 -felsu10 -felsu11 -felsu12 -felsu13 -felsu14 -felsu15 -felsu16
          -felsu17 -felsu18 -felsu19 -felsu2 -felsu20 -felsu21 -felsu22 -felsu23 -felsu24 -felsu25 -felsu26
          -felsu27 -felsu28 -felsu29 -felsu3 -felsu30 -felsu31 -felsu32 -felsu4 -felsu5 -felsu6 -felsu7
          -felsu8 -felsu9
felsu1    5 +felsu1 +zf8 -zf7
felsu2    5 +felsu2 +zf8 -zf7
felsu3    5 +felsu3 +zf8 -zf7
felsu4    5 +felsu4 +zf8 -zf7
felsu5    5 +felsu5 +zf8 -zf7
felsu6    5 +felsu6 +zf8 -zf7
felsu7    5 +felsu7 +zf8 -zf7
felsu8    5 +felsu8 +zf8 -zf7
felsu9    5 +felsu9 +zf8 -zf7
felsu10   5 +felsu10 +zf8 -zf7
felsu11   5 +felsu11 +zf8 -zf7
felsu12   5 +felsu12 +zf8 -zf7
felsu13   5 +felsu13 +zf8 -zf7
felsu14   5 +felsu14 +zf8 -zf7
felsu15   5 +felsu15 +zf8 -zf7
felsu16   5 +felsu16 +zf8 -zf7
felsu17   5 +felsu17 +zf8 -zf7
felsu18   5 +felsu18 +zf8 -zf7
felsu19   5 +felsu19 +zf8 -zf7
felsu20   5 +felsu20 +zf8 -zf7
felsu21   5 +felsu21 +zf8 -zf7
felsu22   5 +felsu22 +zf8 -zf7
felsu23   5 +felsu23 +zf8 -zf7
felsu24   5 +felsu24 +zf8 -zf7
felsu25   5 +felsu25 +zf8 -zf7

```

felsu26 5 +felsu26 +zf8 -zf7
 felsu27 5 +felsu27 +zf8 -zf7
 felsu28 5 +felsu28 +zf8 -zf7
 felsu29 5 +felsu29 +zf8 -zf7
 felsu30 5 +felsu30 +zf8 -zf7
 felsu31 5 +felsu31 +zf8 -zf7
 felsu32 5 +felsu32 +zf8 -zf7
 fpb 5 +fpb -feltar -zf6 +z13
 fpb1 5 +feltar -felpipe +zf7 -zf6
 fpb2 5 +feltar +z13 -zf8

END

GEOEND

MATERIAL 3.35 barbet
 MATERIAL 2.43 barbet1
 MATERIAL 7.85 a36
 COMPOUND -0.9813 IRON -0.01 MANGANES -0.0028 CARBONa36
 COMPOUND -0.002 COPPER -0.0004 PHOSPHO -0.003 SILICONa36
 COMPOUND -0.0005 SULFUR a36
 COMPOUND -0.003585 HYDROGEN -0.311622 OXYGEN -0.001195 MAGNESIUbarbet
 COMPOUND -0.004183 ALUMINUM -0.010457 SILICON -0.107585 SULFURbarbet
 COMPOUND -0.050194 CALCIUM -0.047505 IRON -0.4634 BARIUMbarbet
 COMPOUND -0.0096 HYDROGEN -0.51 OXYGEN -0.0042 MAGNESIUbarbet1
 COMPOUND -0.0079 ALUMINUM -0.152 SILICON -0.0042 SULFURbarbet1
 COMPOUND -0.225 CALCIUM -0.005 IRON -0.029 BORONbarbet1
 COMPOUND -0.0531 CARBON barbet1
 MATERIAL 16. 2. SULFUR
 MATERIAL 56. 3.5 BARIUM
 MATERIAL 8. 316L
 COMPOUND -0.0003 CARBON -0.65 IRON -0.01 SILICON316L
 COMPOUND -0.12 NICKEL -0.17 CHROMIUM -0.02 MANGANES316L
 COMPOUND -0.00045 PHOSPHO -0.003 SULFUR -0.02 MOLYBDEN316L
 MATERIAL 15. 2.2 PHOSPHO
 MATERIAL 24. 7.18 CHROMIUM
 MATERIAL 25. 7.44 MANGANES
 MATERIAL 42. 10.22 MOLYBDEN
 MATERIAL 30. 7.133 ZINC
 MATERIAL 2.7 al6061
 MATERIAL 5. 2.34 BORON

* Boron carbide B4_C

*

MATERIAL 2.52 B4C
 COMPOUND -0.78261 BORON -0.21739 CARBON B4C
 STERNHEI 2.9859 0.0093 2.1006 0.37087 2.8076 B4C
 COMPOUND -0.9495 ALUMINUM -0.01 SILICON -0.008 MANGANESal6061
 COMPOUND -0.0025 ZINC -0.005 IRON -0.001 CHROMIUMal6061
 COMPOUND -0.012 MAGNESIU -0.011 COPPER -0.001 TITANIUMal6061
 STERNHEI 4.6906 0.0049 3.3668 0.14714 2.8652 0.08ZINC
 STERNHEI 4.8793 0.2267 3.2784 0.10525 3.2549 0.14MOLYBDEN
 STERNHEI 4.2702 0.0447 3.1074 0.14973 2.9796 0.14MANGANES
 STERNHEI 4.1781 0.034 3.0451 0.15419 2.9896 0.14CHROMIUM
 STERNHEI 4.5214 0.1696 2.7815 0.2361 2.9158 0.14PHOSPHO
 STERNHEI 6.3153 0.419 3.4547 0.18268 2.8906 0.14BARIUM
 STERNHEI 4.6659 0.158 2.7159 0.33992 2.6456 0.14SULFUR
 ASSIGNMA BLCKHOLE bbody
 ASSIGNMA VACUUM vac
 ASSIGNMA barbet duaccfel
 ASSIGNMA barbet elekdu VACUUM
 ASSIGNMA barbet brehdu VACUUM

ASSIGNMA barbet acgate
 ASSIGNMA barbet brgate VACUUM
 ASSIGNMA barbet felgate VACUUM
 ASSIGNMA AIR airout VACUUM
 ASSIGNMA AIR out VACUUM
 ASSIGNMA AIR acc1
 ASSIGNMA AIR acc2
 ASSIGNMA AIR acc3
 ASSIGNMA AIR fel1 VACUUM
 ASSIGNMA AIR fel2 VACUUM
 ASSIGNMA AIR bre1 VACUUM
 ASSIGNMA AIR bre2 VACUUM
 ASSIGNMA AIR ele1 VACUUM
 ASSIGNMA AIR eledip VACUUM
 ASSIGNMA AIR elegir VACUUM
 ASSIGNMA VACUUM bpipeic
 ASSIGNMA AIR ioch1ic
 ASSIGNMA AIR ioch2ic
 ASSIGNMA AIR ioch3ic
 ASSIGNMA 316L bpipe
 ASSIGNMA 316L ioch1d
 ASSIGNMA 316L ioch2d
 ASSIGNMA 316L ioch3d
 ASSIGNMA WATER su1 su31
 ASSIGNMA WATER su32
 ASSIGNMA VACUUM tarici
 ASSIGNMA 316L bpipe1
 ASSIGNMA AIR betsh
 ASSIGNMA al6061 dump
 ASSIGNMA 316L felbpipe
 ASSIGNMA WATER su32
 ASSIGNMA LEAD fe
 ASSIGNMA LEAD fe1
 ASSIGNMA LEAD fe2
 ASSIGNMA 316L felpipe1
 ASSIGNMA VACUUM felpic
 ASSIGNMA VACUUM feltaic
 ASSIGNMA al6061 feldump
 ASSIGNMA WATER felsu1 felsu32
 ASSIGNMA a36 fpb
 ASSIGNMA a36 fpb1
 ASSIGNMA a36 fpb2
 SCORE ENERGY
 * Scoring
 * AmDoseEq
 USRBIN 10. DOSE-EQ -21. 1800. 500. 5150.totdose
 USRBIN 300. 0.0 2900. 75. 50. 150. &
 * Scoring
 * AmDoseEq Neutron
 USRBIN 10. DOSE-EQ -21. 1800. 500. 5150.doseNe
 USRBIN 300. 0.0 2900. 75. 50. 150. &
 USRBIN 10. DOSE-EQ -21. 1800. 500. 5150.dosePh
 USRBIN 300. 0.0 2900. 75. 50. 150. &
 AUXSCORE USRBIN ALL-PART totdose AMB74
 AUXSCORE USRBIN NEUTRON doseNe AMB74
 AUXSCORE USRBIN PHOTON dosePh AMB74
 USRBIN 11. ENERGY -22. 30. 150. 4875.TarEne
 USRBIN 0.0 945. 4745. 60. 260. &

USRBDX 99. PHOTON -23. feldump fpb 8011.fluPh
 USRBDX 100. &
 USRBDX 99. PHOTON -23. feldump fpb2 707.fluPh1
 USRBDX 100. &
 USRBDX 99. NEUTRON -23. feldump fpb 8011.fluNe
 USRBDX 260. &
 USRBDX 99. NEUTRON -23. feldump fpb2 707.fluNe1
 USRBDX 260. &
 RADDECAY 1.
 * yilda 4000 h * 5yil
 IRRPROFI 1.5768E84.56027E15 1. 0.0
 DCYTIMES 0.0 3600. 43200. 86400. 604800. 2592000.
 DCYTIMES 15552000. 31104000. 46656000. 62208000. 77760000.
 DCYSCORE 1. dose0 USRBIN
 AUXSCORE USRBIN ALL-PART AMB74
 * Scoring
 * AmDoseEq
 USRBIN 10. DOSE-EQ -25. 1800. 500. 5150.dose0
 USRBIN 300. 0.0 2900. 75. 50. 150. &
 DCYSCORE 2. dose1 USRBIN
 * Scoring
 * AmDoseEq
 USRBIN 10. DOSE-EQ -25. 1800. 500. 5150.dose1
 USRBIN 300. 0.0 2900. 75. 50. 150. &
 DCYSCORE 3. dose2 USRBIN
 * Scoring
 * AmDoseEq
 USRBIN 10. DOSE-EQ -25. 1800. 500. 5150.dose2
 USRBIN 300. 0.0 2900. 75. 50. 150. &
 DCYSCORE 4. dose3 USRBIN
 * Scoring
 * AmDoseEq
 USRBIN 10. DOSE-EQ -25. 1800. 500. 5150.dose3
 USRBIN 300. 0.0 2900. 75. 50. 150. &
 DCYSCORE 5. dose4 USRBIN
 * Scoring
 * AmDoseEq
 USRBIN 10. DOSE-EQ -25. 1800. 500. 5150.dose4
 USRBIN 300. 0.0 2900. 75. 50. 150. &
 DCYSCORE 6. dose5 USRBIN
 * Scoring
 * AmDoseEq
 USRBIN 10. DOSE-EQ -25. 1800. 500. 5150.dose5
 USRBIN 300. 0.0 2900. 75. 50. 150. &
 DCYSCORE 7. dose6 USRBIN
 * Scoring
 * AmDoseEq
 USRBIN 10. DOSE-EQ -25. 1800. 500. 5150.dose6
 USRBIN 300. 0.0 2900. 75. 50. 150. &
 DCYSCORE 8. dose7 USRBIN
 * Scoring
 * AmDoseEq
 USRBIN 10. DOSE-EQ -25. 1800. 500. 5150.dose7
 USRBIN 300. 0.0 2900. 75. 50. 150. &
 DCYSCORE 9. dose8 USRBIN
 * Scoring
 * AmDoseEq
 USRBIN 10. DOSE-EQ -25. 1800. 500. 5150.dose8

```
USRBIN      300.  0.0 2900.  75.  50. 150. &
DCYSCORE    10.                dose9      USRBIN
* Scoring
* AmDoseEq
USRBIN      10. DOSE-EQ -25. 1800. 500. 5150.dose9
USRBIN      300.  0.0 2900.  75.  50. 150. &
DCYSCORE    11.                dose10     USRBIN
* Scoring
* AmDoseEq
USRBIN      10. DOSE-EQ -25. 1800. 500. 5150.dose10
USRBIN      300.  0.0 2900.  75.  50. 150. &
RANDOMIZ     1.
START      50000000.                0.0  0.0
STOP
```

