

T.C.
SİNOP ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
DİSİPLİNLERARASI NÜKLEER ENERJİ VE ENERJİ
SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI



FÜZYON REAKTÖRLERİNDE BİRİNCİL DUVARDAKİ
RADYASYON HASARI

EYYÜB POLAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN
DOÇ.DR. HASAN OĞUL

SİNOP - 2022

TEZ KABUL

EYYÜB POLAT tarafından hazırlanan “**FÜZYON REAKTÖRLERİNDE BİRİNCİL DUVARDAKİ RADYASYON HASARI**” başlıklı bu çalışma, 13.01.2022 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak, jürimiz tarafından **YÜKSEK LİSANS tezi** olarak kabul edilmiştir.

Başkan (Danışman)	Doç. Dr. Hasan OĞUL Sinop Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi	İmza
Üye	Doç. Dr. Selahattin BARDAK Sinop Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi	İmza
Üye	Doç. Dr. Kamuran DİLSİZ Bingöl Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi	İmza

Enstitü Müdürü

Doç. Dr. Erkal ARSLANOĞLU

ETİK BEYANI

Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



EYYÜB POLAT

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FÜZYON REAKTÖRLERİNDE BİRİNCİL DUVARDAKİ RADYASYON HASARI

EYYÜB POLAT

SİNOP ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
DİSİPLİNLERARASI NÜKLEER ENERJİ VE ENERJİ SİSTEMLERİ
ANABİLİM DALI
DANIŞMAN:DOÇ. DR. HASAN OĞUL

Füzyon enerjisi, artan enerji ihtiyacına müteveccih çözümün bir parçası ve aynı zamanda, fosil yakıtların iklim değişikliği üzerinde olumsuz etkisi ve kısıtlılığından dolayı, üretim ve iklim dostu bir yol olarak gösterilmektedir. Füzyon neredeyse sınırsız miktarda enerji sağlayabilir, yakıt kaynakları bakımından neredeyse sınırsız olabilir ve radyoaktif atık olarak fisyonu benzer bir içerik oluşmaz, ancak reaktörler henüz pozitif bir net enerji çıktısı üretmeyi başaramamıştır. İşlevsel bir füzyon reaktörü inşa etmek meşakkatlidir, ancak birçok önemli araştırma projesi yürütülmektedir. Teknik yapılandırmalar ve plazma fiziği üzerine araştırmalar hala devam etmekte ve bu da füzyon enerjisi için kesin bir zaman diliminde olacağını zorlaştırmaktadır. Tokamaklar ve Stellaratörler, füzyon için başlıca reaktör modelleridir. Her iki reaktöründe avantajları ve dezavantajları vardır. Bu sebeple, bu tezde bir ITER füzyon reaktöründe, birincil duvar yapısında genel olarak kullanılan, yoğunluğu demir elementi ile fazla olan malzemelerin üzerine etki eden belli enerji aralıklarında ki radyasyonun etkileşim durumları, SRIM/TRIM yardımı ile; toplam yer değiştirmeler, iyonizasyon, iyon aralıkları, titreşimler vb. diyagramlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Füzyon Reaktörü, SRIM/TRIM, DPA, ITER Birincil Duvar, İyonizasyon

Ocak 2022, 107 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

RADIATION DAMAGE TO FIRST WALL IN FUSION REACTORS

EYYÜB POLAT

**SINOP UNIVERSITY INSTITUTE OF GRADUATE PROGRAMS
DEPARTMENT OF INTERDISCIPLINARY NUCLEAR ENERGY AND
ENERGY SYSTEMS
SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. HASAN OĞUL**

Fusion energy is shown as a part of the solution to the increasing energy demand and also as a production and climate-friendly way due to the negative impact and limitation of fossil fuels on climate change. Fusion can provide an almost unlimited amount of energy, can be virtually unlimited in fuel sources, and no fission-like content is formed as radioactive waste, but reactors have yet to produce a positive net energy output. Building a functional fusion reactor is grueling, but many important research projects are underway. Research on technical configurations and plasma physics is still ongoing, making it difficult to find a precise timeframe for fusion energy. Tokamaks and Stellarators are major reactor models for fusion. Both reactors have advantages and disadvantages. Therefore, in this thesis, in an ITER fusion reactor, the interaction states of the radiation in certain energy ranges, which are used in the first wall structure and that affect the materials with a high density of iron element, with the help of SRIM/TRIM, total displacements, ionization, ion gaps, vibrations, etc. diagrams were analyzed.

KEYWORDS:Fusion Reactor, SRIM/TRIM, DPA, ITER First Wall, Ionization

January 2022, 107 Page

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince bilgi ve tecrübesi ile beni yönlendirerek, yapılan bu çalışmanın her aşamasında bana yol gösterici olan ve yardımlarını esirgemeyerek bu süreçte gösterdiği anlayış ve desteği için tez danışmanım Doç. Dr. Hasan OĞUL hocama en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Ayrıca hayatımın her döneminde daimî desteği ve sabrı ile yanımda olan babam Abdullah POLAT ve annem Naile POLAT'a beni bugünlere getirdikleri için sonsuz teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim boyunca fikir alışverişinde bulunduğum ve zorlu süreçlerden beraber geçtiğim değerli arkadaşlarım, M. Sadık TANDOĞAN ve Mustafa YÜKSEKYAYLA'ya teşekkür ederim.

Son olarak, destek ve katkılarını aldığım, Z. Kadircan POLAT, M. Emin POLAT ve Abuzer YAZ'a teşekkürü borç bilirim.

Eyyüb POLAT

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL	ii
ETİK BEYANI.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Nükleer Enerji.....	3
2.3. Nükleer Füzyon Enerjisi	5
2.4. Füzyon Şartları.....	7
2.4.1. Füzyon Oluşumu.....	7
2.4.2. Füzyon Reaksiyonları İhtiyaçları.....	8
2.4.3. Döteryum ve Tritiyum	9
2.4.4. Yüksek Sıcaklık	11
2.5. Nükleer Füzyonun Avantajları ve Dezavantajları	11
2.5.1. Nükleer Füzyonun Avantajları.....	11
2.5.2. Nükleer Füzyonun Dezavantajları	13
2.6. Füzyon Reaktörlerine Giriş.....	13
2.7. Bir Nükleer Füzyon Tesisinin Tasarımı.....	14
2.8. Nükleer Füzyon Tesisinde Bulunan Radyoaktif Maddeler.....	17
2.8.1. Tritiyum	17
2.8.2. Aktifleştirilmiş Malzemeler veya Ürünler	18
2.9. ITER.....	18
2.9.1. ITER TARİHİ	18
2.9.2. ITER Deneysel Füzyon Tesisi	19
2.9.3. Tokamak Dizaynı.....	20

2.9.4. Mıknatıs Sistemi	20
2.9.5. Kriyostat ve Tokamak Binası	23
2.9.6. Vakum Kabı	23
2.9.7. Saptırıcı	24
2.9.8. Blanket	25
2.9.9. Birincil Duvar	26
2.9.9.1. Birincil Duvar Malzemeleri	27
2.10. Nükleer Füzyon Reaktörü Projeleri	29
2.11. Ara Deneysel Reaktörler	30
2.11.1. Çin'in CFETR Projesi	30
2.11.2. Amerika'nın FNSF-AT Projesi	31
2.11.3. Hindistan'ın SST-2 Projesi	32
2.12. Füzyon Güç Reaktörü Projeleri	33
2.12.1. Güney Kore'nin K-DEMO Projesi	33
2.12.2. Avrupa'nın DEMO Projesi	34
2.12.3. Japonya'nın Projesi	35
3. MATERYAL VE YÖNTEM	36
3.1. SRIM/TRIM	36
3.1.1. TRIM Giriş	37
3.1.2. TRIM Hesaplama Çeşitleri	39
3.1.2.1. İyon Dağılımı ve Hasarın Hızlı Hesaplanması	39
3.1.2.2. Tam Hasar Basamakları ile Ayrıntılı Hesaplama	40
3.1.2.3. Tek Katmanlı Çarpışma Adımları	40
3.1.2.4. Yüzey Püskürtme Hesaplaması	40
3.1.2.5. Nötron / Elektron / Foton Basamakları	40
3.1.2.6. Çeşitli İyon Enerjisi / Açısı / Pozisyonlar	41
3.1.2.7. Özel Çok Katmanlı Biyolojik Hedefler	41
3.1.3. İyon Verisi	41
3.1.3.1. İyonun Gelme Açısı	42
3.1.4. Hedef Verisi	42
3.1.4.1. Katı veya Gaz Hedefi	42
3.1.4.2. Hedef Öğeler	43
3.1.4.3. Bileşikler Tablosu	43

3.1.4.4. Katman Derinlikleri ve Stokiyometri	43
3.1.4.5. Katman Yoğunluğu.....	43
3.1.4.6. Katman Adı.....	44
3.1.5. Hedef Atomların Hasar Enerjileri.....	44
3.1.5.1. Yer Değiştirme Enerjisi	44
3.1.5.2. Yüzey Bağlama Enerjisi	44
3.1.5.3. Kafes Bağlama Enerjisi	45
3.1.6. Hesaplama Parametreleri	45
3.1.6.1. Veri ve Çizim için Görüntüleme Penceresi	45
3.1.6.2. İyon Sayısı	46
3.1.6.3. Hesaplamaların Otomatik Kaydedilmesi	46
3.1.6.4. Rastgele Sayı Çekirdeği.....	46
3.1.7. Çıktı Disk Dosyaları	47
3.1.7.1. Geri Saçılan / İletilen / Saçılan Atomlar	47
3.1.7.2. Geri Tepme Çarpışma Dosyası	47
3.2. Simülasyonda Kullanılan Elementler ve Bileşikler	48
3.2.1. Krom (Cr)	48
3.2.2. Tungsten (W)	49
3.2.3. Mangan (Mn)	50
3.2.4. Vanadyum (V)	51
3.2.5. Silisyum\Silikon (Si).....	52
3.2.6. Karbon (C)	53
3.2.7. Tantal (Ta)	54
3.2.8. Nitrojen/Azot (N).....	55
3.2.9. Demir (Fe).....	56
3.2.10. F82H	57
3.2.11. JLF-1	58
3.2.12. Eurofer-97.....	58
3.2.13. CLAM.....	59
4. BULGULAR	61
4.1. F82H ile Yapılan Simülasyonlar.....	61
4.1.1. Derinlik ve Y Eksenini.....	62
4.1.2. İyon Aralıkları.....	64

4.1.3. İyonizasyon.....	66
4.1.4. Hedef İyonizasyon (3B).....	68
4.1.5. Titreşimler.....	70
4.1.6. Çarpışma Olayları (Hedef Yer Değiş-tirmeler, Hedef Boşluklar, Yedek Çarpışmalar) ve Toplam Yer Değiş-tirmeler (3B)	72
5. SONUÇ	78
KAYNAKÇA.....	81
EKLER	86
JLF-1 ile Yapılan Simülasyonlar	86
Eurofer-97 ile Yapılan Simülasyonlar	93
CLAM ile Yapılan Simülasyonlar	100
ÖZGEÇMİŞ	107

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1 Tokamak'ın birincil duvarı için çeşitli F/M çeliklerinin tipik bileşimleri	28
Tablo 3.1 Krom elementinin kimyasal özellikleri	48
Tablo 3.2 Tungsten elementinin kimyasal özellikleri.....	49
Tablo 3.3 Mangan elementinin kimyasal özellikleri	50
Tablo 3.4 Vanadyum elementinin kimyasal özellikleri	51
Tablo 3.5 Silisyum\Silikon elementinin kimyasal özellikleri.....	52
Tablo 3.6 Karbon elementinin kimyasal özellikleri.....	53
Tablo 3.7 Tantal elementinin kimyasal özellikleri	54
Tablo 3.8 Nitrojen\Azot elementinin kimyasal özellikleri	55
Tablo 3.9 Demir elementinin kimyasal özellikleri	56
Tablo 3.10 SRIM'den elde edilen F82H verileri.....	57
Tablo 3.11 SRIM'den elde edilen JLF-1 verileri	58
Tablo 3.12 SRIM'den elde edilen Eurofer-97 verileri	59
Tablo 3.13 SRIM'den elde edilen CLAM verileri	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Nükleer fisyon reaksiyonu.....	4
Şekil 2.2 Nükleer füzyon reaksiyonu.....	6
Şekil 2.3 Füzyon yakıt döngüsü.....	10
Şekil 2.4 Nükleer füzyon tesisi	14
Şekil 2.5 Tritiyum binası.....	15
Şekil 2.6 Tokamak ve trityum tesisin şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.7 Sıcak hücre binası	16
Şekil 2.8 Fıçı (Cask) transfer sistemi organizasyonu	17
Şekil 2.9 Plazmanın manyetik sınırlandırılması	20
Şekil 2.10 ITER tesisi iç yapısal elemanları	21
Şekil 2.11 Toroidal alan bobinleri	22
Şekil 2.12 ITER Tokamak vakum odası	23
Şekil 2.13 Reaktör sisteminin şematik görünümü	26
Şekil 2.14 Çin'in kabul edilen Tokamak konfigürasyonu.....	31
Şekil 2.15 Amerika'nın FNSF-AT tasarımı	32
Şekil 2.16 Hindistan'ın SST-2 projesinin inşası	33
Şekil 2.17 Kore'nin, K-DEMO projesinin şematik gösterimi.....	34
Şekil 2.18 Avrupa'nın DEMO projesinin genel tasarımı	35
Şekil 3.1 SRIM yazılımının arayüzü.....	36
Şekil 3.2 TRIM kurulum penceresi.....	37
Şekil 3.3 TRIM simülasyon ekranı	38
Şekil 3.4 TRIM hesaplama çeşitleri.....	39
Şekil 3.5 Periyodik tablo elementleri.....	42
Şekil 3.6 Krom (Cr) elementi	48
Şekil 3.7 Tungsten (W) elementi	49
Şekil 3.8 Mangan (Mn) elementi	50
Şekil 3.9 Vanadyum (V) elementi	51
Şekil 3.10 Silisyum\Silikon (Si) elemeti.....	52
Şekil 3.11 Karbon (C) elementi	53
Şekil 3.12 Tantal (Ta) elementi	54

Şekil 3.13 Nitrojen/Azot (N) elementi.....	55
Şekil 3.14 Demir (Fe) elementi.....	56
Şekil 4.1 Hidrojen iyonunun, a) 20 keV, b) 1 MeV c) 1,5 MeV, d) 2 MeV enerjileri ile Derinlik ve Y Ekseni Grafikleri	63
Şekil 4.2 Helyum iyonunun 3,5 MeV enerji ile Derinlik ve Y ekseni Grafiği	63
Şekil 4.3 Kripton iyonunun 1.2 MeV enerji ile Derinlik ve Z ekseni Grafiği	64
Şekil 4.4 Xenon iyonunun 1.2 MeV enerji ile Derinlik ve Y ekseni Grafiği	64
Şekil 4.5 Hidrojen iyonunun, a) 20 keV, b) 1 MeV c) 1,5 MeV, d) 2 MeV enerjileri ile İyon Aralıkları Grafikleri	65
Şekil 4.6 Helyum iyonunun İyon Aralıkları Grafiği.....	65
Şekil 4.7 Kripton iyonunun İyon Aralıkları Grafiği	66
Şekil 4.8 Xenon iyonunun İyon Aralıkları Grafiği	66
Şekil 4.9 Hidrojen iyonunun, a) 20 keV, b) 1 MeV c) 1,5 MeV, d) 2 MeV enerjileri ile İyonizasyon Grafikleri.....	67
Şekil 4.10 Helyum iyonunun İyonizasyon Grafiği	67
Şekil 4.11 Kripton iyonunun İyonizasyon Grafiği.....	68
Şekil 4.12 Xenon iyonunun İyonizasyon Grafiği	68
Şekil 4.13 Hidrojen iyonunun, a) 20 keV, b) 1 MeV c) 1,5 MeV, d) 2 MeV enerjileri ile Hedef İyonizasyon (3B) Grafikleri	69
Şekil 4.14 Helyum iyonunun Hedef İyonizasyon (3B) Grafiği	69
Şekil 4.15 Kripton iyonunun Hedef İyonizasyon (3B) Grafiği	70
Şekil 4.16 Xenon iyonunun Hedef İyonizasyon (3B) Grafiği	70
Şekil 4.17 Hidrojen iyonunun, a) 20 keV, b) 1 MeV c) 1,5 MeV, d) 2 MeV enerjileri ile Titreşim Grafikleri.....	71
Şekil 4.18 Helyum iyonunun Titreşim Grafiği	71
Şekil 4.19 Kripton iyonunun Titreşim Grafiği.....	72
Şekil 4.20 Xenon iyonunun Titreşim Grafiği	72
Şekil 4.21 Hidrojen (20 keV) iyonunun Çarpışma Olayları Grafiği.....	73
Şekil 4.22 Hidrojen (20 keV) iyonunun Toplam Yer Değiştirmeler Grafiği (3B)	73
Şekil 4.23 Hidrojen (1 MeV) iyonunun Çarpışma Olayları Grafiği	74
Şekil 4.24 Hidrojen (1 MeV) iyonunun Toplam Yer Değiştirmeler Grafiği (3B).....	74
Şekil 4.25 Hidrojen (1,5 MeV) iyonunun Çarpışma Olayları Grafiği	74
Şekil 4.26 Hidrojen (1,5 MeV) iyonunun Toplam Yer Değiştirmeler Grafiği (3B).....	75

Şekil 4.27 Hidrojen (2 MeV) iyonunun Çarpışma Olayları Grafiği	75
Şekil 4.28 Hidrojen (2 MeV) iyonunun Toplam Yer Değiştirmeler Grafiği (3B).....	75
Şekil 4.29 Helyum iyonunun Çarpışma Olayları Grafiği	76
Şekil 4.30 Helyum iyonunun Toplam Yer Değiştirmeler Grafiği (3B).....	76
Şekil 4.31 Kripton iyonunun Çarpışma Olayları Grafiği.....	76
Şekil 4.32 Kripton iyonunun Toplam Yer Değiştirmeler Grafiği (3B)	77
Şekil 4.33 Xenon iyonunun Çarpışma Olayları Grafiği	77
Şekil 4.34 Xenon iyonunun Toplam Yer Değiştirmeler Grafiği (3B)	77



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat
$^{\circ}\text{F}$	: Fahrenayt
μm	: Mikrometre
^2H	: Döteryum
^3H	: Tritiyum
^4He	: Helyum
$\text{\AA}$	: Angström
amu	: Atomik kütle birimi
appm	: Dakika Başına Ortalama Değer
Ar	: Argon
Be	: Berilyum
C	: Karbon
Cas	: Kaset
cm	: Santimetre
cm²	: Santimetre kare
cm³	: Santimetre küp
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
D	: Döteryum
eV	: Elektron volt
Fe	: Demir
g	: Gram
Ge (67)	: Germanyum-67
GeV	: Gigaelektron volt
GJ	: Gigajoule
H	: Hidrojen
He	: Helyum
K	: Kelvin
kB	: Kilobayt
kg	: Kilogram
kh	: Sertlik
kJ	: Kilojoule
Kr	: Kripton
Li	: Lityum
m	: Metre
m²	: Metrekare
m³	: Metreküp
MA	: Megaamper
MB	: Megabayt
MeV	: Megaelektron volt
mm	: Milimetre
Mn	: Manganez
MPa	: Megapascal

MT	: Metrikton
MW	: Megawatt
MWe	: Megawatt elektrik
N	: Azot, Nitrojen
n	: Nötron
Nb	: Niyobyum
Ne	: Neon
örn	: Örnek, Örneğin
p	: Proton
Pb	: Kurşun
Si	: Silisyum (Silikon)
T₂	: Tritiyum
Ta	: Tantal (Tantalum)
Ti	: Titanyum
U-235	: Uranyum-235
V	: Vanadyum
vb	: ve benzeri
W	: Tungsten
Xe	: Ksenon
Zr	: Zirkonyum

Kısaltmalar

316 SS	: 316 kalite paslanmaz çelik
3B	: Üç boyut
9Cr-1Mo	: %9 Krom ve %1 Molibden içeren martensitik çelik
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASIPP	: Plazma Fiziği Çin Bilimler Akademisi
Bp	: Polioidal manyetik alan
Bt	: Manyetik alan
CB	: Kaset gövdesi
C-C	: Güçlendirilmiş karbon-karbon
CDS	: Karbür dağılımı ile güçlendirilmiş
CFETR	: Çin Füzyon Mühendisliği Test Reaktörü
D₂O	: Ağır su
DCLL	: Çift soğutuculu lityum kurşun
D-D	: Döteryum-Döteryum reaksiyonu
DEMO	: Deneysel reaktör
Disp	: Yer değiştirme
dpa	: Atom başına yer değiştirmeler
D-T	: Döteryum-Tritiyum reaksiyonu
EFDA	: Avrupa Füzyon Geliştirme Anlaşması
Euratom	: Avrupa Atom Enerjisi Topluluğu
F/M	: Ferritik martensitik çelik tipi
FNSF-AT	: Füzyon Nükleer Bilim Tesisi-Gelişmiş Tokamak
HTO	: Tritiyumlu Su
ICRP	: Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu
ICRU	: Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçümleri Komitesi

IPP	: Bağımsız Güç Üreticisi
ITER	: Uluslararası Termonükleer Deneysel Reaktör
IVT	: İç dikey hedefler
JAEA	: Japonya Atom Enerjisi Ajansı
K-DEMO	: Kore Deneysel Reaktörü
KHK	: Kanun hükmünde kararname
LILW-SL	: Düşük ve orta seviyeli kısa ömürlü atıklar
MAI	: En Bol İzotop
MEXT	: Eğitim, Kültür, Spor, Bilim ve Teknoloji Bakanlığı-Japonya
MnO₂	: Manganez dioksit
M.Ö.	: Milattan önce
N^{-1/3}	: Bir katmanın atom yoğunluğunun ters küp kökü
Nb₃Sn	: Niyobyum-kalay
NIFS	: Ulusal Füzyon Bilimi Enstitüsü
ODS	: Oksit dağılımı güçlendirilmiş
OVT	: Dış dikey hedefler
PFC	: Plazmaya bakan üç bileşen
ppm	: Milyonda bir birim
PT	: Periyodik tablo
RAFM	: Azaltılmış Ferritik Martensitik Aktivasyonu
SiO₂	: Silikon Dioksit
SlimCS	: İnce merkezli solenoid
SRIM	: Durma ve İyon Madde Aralığı
SS 316L(N) IG	: Düşük aktivasyonlu östenitik çelikler
SST-2	: Durağan Durum Süper İletken Tokamak-2
Ti-Y-O	: Titanyum-İtiryum-Oksijen
TRIM	: İyonların Taşınması
TBM	: Test Blanket Modül
VLLW	: Çok düşük seviyeli atıklar
Z	: Atom numarası

1. GİRİŞ

Enerjiye olan talep sürekli artmaktadır. 2050 yılında toplam nüfusun yaklaşık 10 milyara ulaşacağı ve yaşam standardının da yükselmeye devam edeceği tahmin edilmektedir (NYUN, 2021). Uluslararası Enerji Ajansı, aynı zamanda insanların önemli bir bölümünün günlük elektriğe erişiminin olmadığı 2040 yılına kadar enerji talebinde %30'luk bir artış öngörmektedir. Bütün bu veriler ışığında, enerji alanı önümüzdeki yıllarda büyük zorluklar ile karşı karşıya kalabilir. Fosil yakıtların iklim değişikliği üzerinde olumsuz etkisi ve ayrıca arzları da kısıtlıdır. Yenilenebilir enerjinin payı artmakta ve talebe yardımcı olmak için geliştirilmektedir (Oy vd., 2011). Ülkeler ayrıca enerji üretimlerinde bağımsız olmayı da isterler, bu da çeşitli bir güç kaynağının olması gerektiği anlamına gelir. Eski yöntemlerin yerini almak için yenilenebilir bol yakıt kaynaklarına ihtiyaç vardır.

Artan enerji tüketimi, iklim değişikliği konusundaki endişeler ve enerji bağımsızlığı arzusu, bazı ülkelerde yeni bir dönem yaşayan nükleer enerji için teşvik işlevi görmüştür. Filyon reaktörleri 1950'lerden beri çalışmakta ve önemli miktarda enerji üretmektedirler ancak radyoaktif atıkların ve olası risklerin ciddiyeti nedeniyle tartışılmaktadırlar.

Füzyon enerjisi, artan enerji talebine yönelik çözümün bir parçası ve aynı zamanda enerji üretmenin iklim dostu bir yolu olarak sunulmuştur. Ana yakıt kaynakları büyük ölçüde mevcut olabilir ve fisyona benzer atık veya radyoaktivite üretmez. Ayrıca zincirleme reaksiyonu olarak da çalışmaz, bu nedenle filyon ile benzer kaza risklerini içermez.

Füzyon neredeyse sınırsız miktarda enerji sağlayabilir, ancak reaktörler henüz pozitif bir net enerji çıkışı üretmeyi başaramamıştır. İşlevsel bir füzyon reaktörü inşa etmek zahmetlidir, ancak birçok önemli araştırma projesi yürütülmektedir. Teknik konfigürasyonlar ve plazma fiziği üzerine araştırmalar hala devam etmekte ve bu da füzyon enerjisi için kesin bir zaman çerçevesi tahmin etmeyi zorlaştırmaktadır (LWNA, 2017).

Füzyonda kullanılan yakıt miktarı geleneksel yöntemlere göre önemli ölçüde daha azdır ve füzyon reaktörünün içinde bir kerede sadece birkaç gram yakıt gerekir. Bu nedenle füzyon, bazı fosil yakıtların yakılmasından yaklaşık dört milyon kat daha enerjiktir. Bu, döteryumun deniz suyundan kolayca ve ucuza elde edilebildiği gerçeğiyle birleştirildiğinde, yakıt üretiminin etkileri önemli ölçüde daha küçüktür. Döteryumu

damıtmak için teknoloji zaten var ve rezervler çok büyüktür. Trityum ise lityum tarafından üretilebilir, bu da lityumu sınırlayıcı madde yapar. Sert kayalardan ya da tuz göllerindeki tuzlu sulardan lityum çıkarma yöntemleri zaten oluşturulmuş durumda ve rezervler bin yıldan fazla sürebilir ve ardından lityum deniz suyundan hasat edilebilir (ITER, 2021a; ITER, 2021b).

Füzyon, çalışmak için çok zorlu koşullar gerektirir ve bu seviyelere ulaşmak için birçok teknik bileşene ihtiyaç vardır. Tokamaklar ve Stellaratörler, füzyon için en belirgin reaktör modelleridir. ITER Tokamak ve IPP'nin Wendelstein 7-X stellaratörü, şebekeye enerji üretmeleri planlanmasa da en gelişmiş olanlarıdır. Her iki reaktörün de bazı avantaj ve dezavantajları vardır (IPP, 2021a).

Bundan dolayı bu tezde bir ITER reaktöründe kullanılan birincil duvar yapısında kullanılan malzemelerin üzerine etki eden radyasyon ile etkileşim durum grafikleri olan; toplam yer değiştirmeler, iyonizasyon, iyon aralıkları, hedef İyonizasyon, titreşimler, çarpışma olayları, derinlik ve Y eksenli grafiklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Nükleer Enerji

Nükleer enerji ilk akla gelenin aksine sadece fisyon enerjisi olarak bilinmez. Füzyon enerjisi de nükleer enerjide bilinen başka bir enerji kaynağıdır. Bir atom temel olarak nötronlar, protonlar ve elektronlar vs. parçacık türünden oluşur. Çekirdekleri birbirine bağlayan kuvvetler, nükleer kuvvetler, elektronların elektromanyetik enerji bağından çok daha güçlüdür. Bu nedenle, nükleer reaksiyonlarda yakıt kütlesi başına salınan enerji, kimyasal reaksiyonlara kıyasla çok daha fazladır. Bu nükleer enerji, nükleer fisyon ve nükleer füzyon olmak üzere iki farklı şekilde kullanılabilir. Birincisi, nötronların radyasyonu ile ağır çekirdeklerin fisyonunu içerir. Öte yandan nükleer füzyon, tam tersi bir süreçtir. Füzyon reaksiyonlarında, Einstein'ın ünlü yasası $E=mc^2$ izlenerek, enerji olarak salınan bir miktar kütle eksikliğinin olduğu nispeten daha ağır bir çekirdek oluşturmak için hafif çekirdekler birleştirilir veya kaynaştırılır (Letcher, 2014; Sánchez, 2014).

Fisyon durumunda, yakıt en yaygın olarak uranyumdur, birkaç yıl önce bol olarak kabul edilebilecek olsa da kullanıldığı oranda yaklaşık 230 yılda tükenebilecek olan ağır bir mineraldir, ancak tüketimi artıyor ve hatta ikiye katlayabilme durumu vardır. Ancak Fransa gibi ülkelerde, ömrünü 30 000 yıla kadar uzatabilecek fisyon sonrası uranyumun geri dönüşümü gerçekleştirilmektedir. Göz önünde bulundurulmuş bir diğer girişim, tuzlu sudan uranyum ekstraksiyonudur ve bu da süresini önemli ölçüde uzatabilir (Seward, 2009).

Nükleer füzyon söz konusu olduğunda, şu anda geçerli olan tek döteryum-trityum reaksiyonuna odaklanarak, döteryumun bulunduğu yerde tükenmez olarak kabul edilebilir. Dünyadaki tüm hidrojen, yaklaşık 156 ppm'lik bir konsantrasyona sahiptir ve hidrojen, organik maddenin parçalanmasıyla doğal olarak üretilir ve gezegene yayılmış geniş bir kaynaktır. Diğer kaynak olan trityum doğada bulunmaz ancak lityumdan üretilir (Bradshaw vd., 2011).

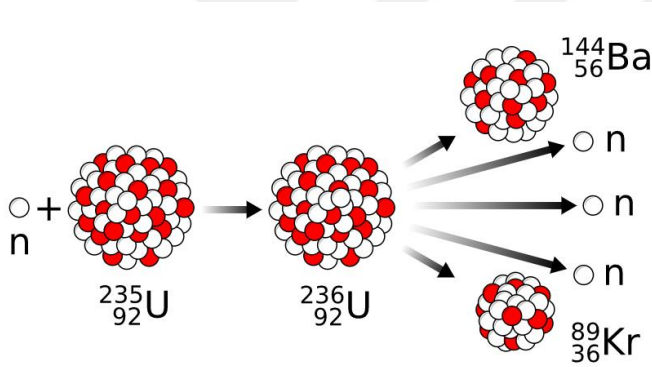
Nükleer fisyon yıllardır endüstriyel bir enerji kaynağı olarak kullanılıyor olsa da füzyon çeşitli teknik zorluklar nedeniyle gelecekteki enerji santralleri için hala çalışma aşamasındadır. Bununla birlikte, 1990'dan 2000'e kadar Avrupa füzyon programı tarafından yürütülen bir dizi çalışmadan elde edilen sonuçlar şunları göstermiştir:

- Füzyon gücünün, küresel iklim değişikliğini ele almak ve halkın kabulünü kazanmak için iyi kanıtlanmış ve çekici doğal güvenlik ve çevresel özelliklere sahip olması
- Füzyon elektriğinin maliyetinin, çevre açısından sorumlu diğer elektrik üretim kaynaklarının maliyetiyle karşılaştırılabilir olması muhtemeldir (Maisonier, 2005).

2.2. Nükleer Fisyon Enerjisi

Küçük olmalarına rağmen, atomların çekirdeklerini bir arada tutan büyük miktarda enerjileri vardır. Bazı elementlerin belirli izotopları bölünebilir ve enerjilerinin bir kısmını ısı olarak serbest bırakır. Bu bölünmeye fisyon denir. Fisyonda açığa çıkan ısı, elektrik santrallerinde elektrik üretimine yardımcı olmak için kullanılabilir.

Uranyum-235 (U-235), kolayca parçalanan izotoplardan biridir. Fisyon sırasında, U-235 atomları gevşek nötronları emer. Bu, U-235'in kararsız hale gelmesine ve fisyon ürünleri adı verilen iki hafif atoma bölünmesine neden olur.



Şekil 2. 1: Nükleer fisyon reaksiyonu (URL-1, 2017)

Fisyon ürünlerinin birleşik kütlesi, orijinal U-235'inkinden daha azdır. İndirgeme, maddenin bir kısmının enerjiye dönüşmesi nedeniyle meydana gelir. Enerji ısı olarak açığa çıkar. Isı ile birlikte iki veya üç nötron salınır. Bu nötronlar diğer atomlara çarparak daha fazla fisyonla neden olabilir.

Bir dizi fisyonla zincirleme reaksiyon denir. Yeterli uranyum doğru koşullar altında bir araya getirilirse, sürekli bir zincirleme reaksiyon meydana gelir. Buna kendi kendine yeten zincirleme reaksiyon denir. Kendi kendini idame ettiren bir zincirleme reaksiyon, elektrik üretimine yardımcı olmak için kullanılabilecek çok miktarda ısı yaratır.

Nükleer santraller, diğer buharlı elektrik santralleri gibi elektrik üretir. Su ısıtılır ve kaynayan sudan çıkan buhar türbinleri çevirir ve elektrik üretir. Buharlı elektrik santrallerinin çeşitli türlerindeki temel fark, ısı kaynağıdır. Kendi kendini idame ettiren bir zincirleme reaksiyondan gelen ısı, bir nükleer santralde suyu kaynatır. Diğer enerji santrallerinde suyu ısıtmak için kömür, petrol veya gaz yakılır.

Tipik fisyonun oluşabileceği mekanizma Denklem 2.1'de gösterilmektedir. Yani, serbest bir nötron bölünebilir bir atom (uranyum-235, plütonyum-239, vb.) tarafından yakalanır. Ortaya çıkan nötron açısından zengin atom kararsızdır ve fisyon ürünlerine ve ek serbest nötronlara (ortalama olarak yaklaşık 2,5 veya daha fazla) ayrılır. Bu nötronlar yeni bölünebilir atomlara ulaştığında, fisyon zincir reaksiyonu devam eder. Bu zincirleme reaksiyon, fisyon ürünü zehirlenmesi veya sistemin kritikliğini değiştiren başka bir mekanizma nedeniyle artık sürdürülebilir olmayana kadar devam edebilir.



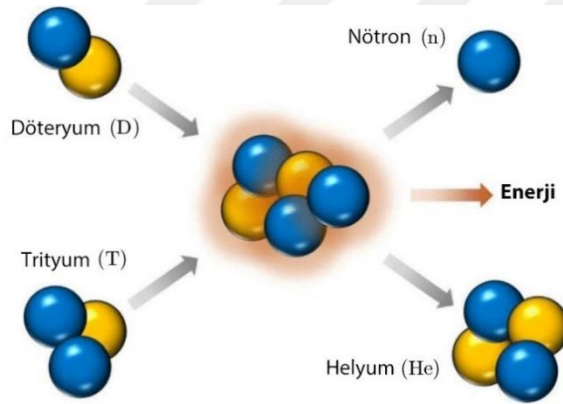
Birkaç faktör, fisyon enerjisinin uzun vadeli sürdürülebilirliğini zorlaştırmaktadır. Nükleer maddelerin çoğalma riski ve teknolojilerin derin jeolojik depolara gömülmesini gerektiren radyoaktif atıkların üretilmesi ve geçmişte açık olan nükleer yakıt döngüsüne olan mevcut güven nedeniyle uzun vadede düşük maliyetli uranyum cevheri kaynaklarının mevcudiyeti ile ilgili endişeler vardır. Sadece Amerika Birleşik Devletleri'nde, geçmiş ve mevcut nükleer reaktör filosu yaklaşık 55 000 metrik ton (MT) kullanılmış nükleer yakıt üretmiştir ve yakında Yucca Dağı jeolojik atık deposunu yasal sınırı olan 70 000 MT'ye dolduracak kadar kullanılmış nükleer yakıt olacaktır (NE, 1994).

2.3. Nükleer Füzyon Enerjisi

Etrafımızdaki füzyonun en parlak örneği, bu seçeneği kullanarak milyarlarca yıldır ısı ısıyan yıldızlar ve Güneş'tir. Uranyum gibi ağır çekirdeklerin parçalanıp enerji saldıgı nükleer fisyonun aksine, füzyonda hafif elementlerle başlar ve daha ağır elementler oluşturmak üzere kaynaşabilmeleri için onları bir araya getirir. Ortaya çıkan daha ağır elementler, kaynaştırıcı elementlerden biraz daha az kütleyle sahiptir ve bu kütle farkı, enerjinin serbest kalmasına neden olur. Örnek olarak, döteryum ve trityum çekirdekleri (ki bunlar sırasıyla kütle numarası 2 ve 3 olan iki ağır hidrojen izotopudur) bir araya getirildiğinde, birleşerek bir helyum çekirdeği ve bir nötron oluştururlar; kütle farkı 17,6 MeV enerji olarak serbest bırakılır. Enerji, ürün çekirdeklerinin kinetik enerjileri şeklinde

ortaya çıkar ve buradan elektrik üretimi için yakalanabilir ve kullanılabilir. Füzyonun gerçekleşmesi için, protonları veya (pozitif yüklü ve doğal olarak itici olan) daha ağır reaktif çekirdeklerini, elektrostatik itmeyi yenecek kadar yakına getirmek gerekir; bir çekirdekte birlikte nükleonlar, kuantum mekaniksel tünelleme işlemiyle kaynaşmalarına yardımcı olur. Bu, çekirdekler çok yüksek termonükleer sıcaklıklara ısıtıldığında, termal parçacıkların kinetik enerjisi, elektrostatik itmenin üstesinden gelmelerine ve kaynaşmaya yetecek kadar yaklaşmalarına yardımcı olmaya yeterli olduğunda mümkündür. Döteryum ve trityum çekirdekleri durumunda, bu, D-T çekirdeklerinin bir karışımının ~ 10 keV (yani ~ 100 milyon $^{\circ}\text{C}$) civarında bir sıcaklığa ısıtılmasını gerektirir; ortaya çıkan süreç termonükleer füzyon olarak bilinir.

Bir füzyon reaksiyonu yoluyla açığa çıkan enerji, kimyasal reaksiyonlardakinden çok daha büyüktür, çünkü bir çekirdekteki nükleonları bir arada tutan bağlanma enerjisi, atomları ve molekülleri elektronik bağlantılar yoluyla birbirine bağlayan enerjiden çok daha büyüktür. Örneğin, bir hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisi (bir hidrojen atomundan tek elektronu almak için gereken enerji) 13,6 eV'dir. D-T reaksiyonunda salınan 17,6 MeV'in milyonda birinden daha azdır.



Şekil 2. 2: Nükleer füzyon reaksiyonu (Dubus, 2014)

Füzyon reaksiyonları ayrıca, çok ağır çekirdekleri içeren bireysel fisyon reaksiyonları genellikle bireysel füzyon reaksiyonlarından çok daha enerjik olsa da fisyon reaksiyonlarından çok daha büyük bir enerji yoğunluğuna (reaktiflerin birim kütlesi başına salınan enerji) sahiptir. Sadece kütlenin enerjiye dolaylı dönüşümü, örneğin madde-antimadde çarpışmaları yoluyla, kütle birimi başına füzyon reaksiyonlarından daha fazla enerji salınabilir.

Protonların yavaş bir termonükleer füzyonu, esas olarak Güneş'e ve yıldızlara güç veren şeydir, çok büyük kütlelerin kaynaştırma protonlarını termal genişleme nedeniyle sınırdan çıkarma eğilimine karşı bir arada tutması nedeniyle muazzam yerçekimsel enerjidir. Plazmanın tanımlanamadığı döteryum ve trityum kullanılarak termonükleer patlamalar şeklinde kontrolsüz füzyon reaksiyonları Dünya'da çoktan elde edilmiştir. Bu nedenle termonükleer füzyonun çok fazla enerji ürettiğine şüphe yoktur.

Dünya yüzeyinde astronomik kütleler üretmek imkânsız olduğundan, bilim adamları için en büyük zorluk, daha sonra elektrik üretimi veya başka bir yararlı uygulama için kullanılacak sınırlı bir plazmada kontrollü bir şekilde füzyon elde etmektir. Füzyon enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmeyi amaçlayan kontrollü termonükleer füzyon araştırması, 50 yılı aşkın bir süredir dünya genelinde sürdürülmektedir.

Bu alanın muazzam bilimsel ve teknolojik ihtiyaçlarına rağmen, füzyon araştırmaları, yarı iletken çip üretimi ve hızlandırıcı araştırmalarındaki gelişmeler gibi modern bilim ve teknolojiye en hızlı büyüyen teknik zorluklardan bazılarıyla karşılaştırılabilir dikkat çekici ve istikrarlı bir ilerleme kaydetmiştir.

Manyetik hapsedme füzyon konseptine dayanan Tokamak tabanlı füzyon deneyleri, üçlü ürün olarak adlandırılan karakteristik hapsedme parametresini de birkaç yılda bir iki katına çıkarmış ve füzyon reaksiyonu sonucu üretilen çıkış enerjisinin reaksiyona ulaşmak için harcanan girdi enerjisine eşit olduğu kırılma-çift koşuluna çoktan ulaşmıştır. Bu, giriş ısıtma gücünden yaklaşık on kat daha fazla güç üretecek ITER cihazının yapımına başlanmıştır. ITER'in bundan yaklaşık on yıl sonra faaliyete geçmesi planlanmaktadır (Naseri, 2000).

2.4. Füzyon Şartları

2.4.1. Füzyon Oluşumu

Füzyon, Güneş'in ve diğer yıldızların enerji kaynağıdır. Güneş'in yakıtı döteryum değil, sıradan hidrojendir; bir dizi nükleer reaksiyonda, dört hidrojen çekirdeği bir helyum çekirdeği oluşturmak üzere birleştirilir. Bununla birlikte, Güneş'in süreçlerinin Dünya'da yararlı olamayacak kadar yavaş gerçekleştiğini belirtmek için iyi nedenler var. Örneğin Güneş'te yüksek oranda enerji üretme yeteneği, mevcut hidrojenin muazzam miktarına bağlıdır.

Laboratuvar deneyleri, nükleer füzyonun döteryum ile elde edilebileceğini göstermiştir. Döteronlar (döteryum çekirdekleri), siklotron veya benzeri bir makine gibi yüklü bir parçacık hızlandırıcıda yüksek hıza çıkarılabilir. Bu döteronlar, döteryum içeren katı bir hedefe çarparsa, füzyon reaksiyonları meydana gelir. Ancak, hızlandırılmış döteronlar ile hedeftekiler arasındaki çarpışmaların sadece çok küçük bir kısmı füzyona yol açar. Çarpışmaların büyük çoğunluğunda, çarpan döteron sadece saptırılır (dağılır) ve aynı zamanda enerjisinin bir kısmını kaybeder; daha sonra esasen başka bir döteron ile kaynaşamaz hale gelir. Gerçekte, hızlandırılmış döteronların enerjisinin çoğu hedefte ısı olarak kaybolur. Sonuç olarak, döteronları hızlandırmak için, meydana gelen az sayıdaki füzyon reaksiyonlarının ürettiğinden çok daha fazla enerji harcanır. Hızlandırma prosedürü, enerjinin pratik olarak serbest bırakılması için bir temel olmasa da iki döteryum çekirdeği arasındaki füzyonun mümkün olduğunu gösterir.

Son olarak, nükleer füzyon, sözde hidrojen (veya H-) bombasında salınan büyük miktarda enerjinin kaynağıdır. Bu tür silahlar, bileşenlerinden biri olarak döteryum ile tetikleyici olarak hizmet eden bir nükleer fisyon bombası içerir. İkincisi, füzyon reaksiyonlarının gerçekleşmesi için gereken enerjiyi sağlar.

2.4.2. Füzyon Reaksiyonları İhtiyaçları

Kontrollü nükleer füzyonun nasıl gerçekleştirilebileceğini görmek için temel gereksinimler vardır. İlk olarak, iki hafif çekirdek, etkileşime izin verecek kadar yakın gelmelidir. Her çekirdek pozitif bir elektrik yükü taşıdığından, iki çekirdek birbirine yaklaştıkça birbirini daha fazla iter. Sonuç olarak, çekirdeklerin etkileşime girmesi için, onları ayrı tutma eğiliminde olan elektrostatik itme kuvvetinin üstesinden gelmek için yeterli başlangıç enerjisine sahip olmaları gerekir. İtme kuvvetinin büyüklüğü, iki çekirdek üzerindeki elektrik yükleriyle artar. Bu kuvveti küçük tutmak için, etkileşen çekirdekler mümkün olan en düşük yüke (veya atom numarasına) sahip olmalıdır. Atom numarası en küçük olan element, çekirdeği (ve izotoplarının çekirdekleri) tek bir yük taşıdığı için hidrojenidir. Bu nedenle, dünyadaki füzyon reaksiyonları için bariz seçim, bir tür hidrojenidir. Ucuz ve bol olması da elbette bir avantajdır. Hidrojenin üç izotopu bilinmektedir. Kütle numarası bir olan en hafifi, sıradan hidrojen, H'dir; bu izotopun bir atomunun çekirdeğine proton denir. Sıradan hidrojen, Güneş'te füzyona uğrayan izotoptur. Bir sonraki izotop, ^2H veya daha yaygın olarak D sembolü ile temsil edilen,

kütle numarası iki olan döteryumdur; çekirdeği, döteron da D ile gösterilir, ancak D, nötr atom ile pozitif yüklü çekirdek arasında ayırım yapmak gerektiğinde kullanılır. Daha önce de belirtildiği gibi tamamen doğal suda oluşur ve çok fazla zorluk çekmeden çıkarılabilir. Son olarak, ^3H veya T ile temsil edilen, kütle numarası üç olan trityum vardır; çekirdeği triton denir. Bu izotop radyoaktiftir ve doğada çok nadir bulunur, ancak nötronların lityum çekirdekleriyle etkileşimi ile üretilmektedir.

2.4.3. Döteryum ve Trityum

Döteronlar ve tritonlar ile füzyon süreçleri, onları faydalı bir oranda enerjinin serbest bırakılması için makul olarak olası kaynaklar haline getirmek için yeterince hızlı gerçekleşir. Bu izotoplar bu nedenle en pratik füzyon yakıtlarıdır. Döteryumun düşük maliyeti ve bulunabilirliği nedeniyle bu izotopun tek başına kullanılması tercih edilir; füzyon süreci daha sonra sadece döteronları içerecektir. Kabaca eşit olasılıklarla meydana gelen bu tür iki reaksiyon (2.2), (2.3) bilinmektedir;



Burada, n bir nötronu temsil eder.

Enerji salınımı, milyon elektron volt (MeV) birimiyle ifade edilir.

Bu iki reaksiyondan:

Birincisinde ürünler bir helyum-3 çekirdeği ve bir nötron

İkincisinde ise bir triton ve bir hidrojen çekirdeğidir (proton).

Bu şekilde oluşan triton daha sonra başka bir döteron ile oldukça hızlı bir şekilde reaksiyona (2.4) girebilir, yani,

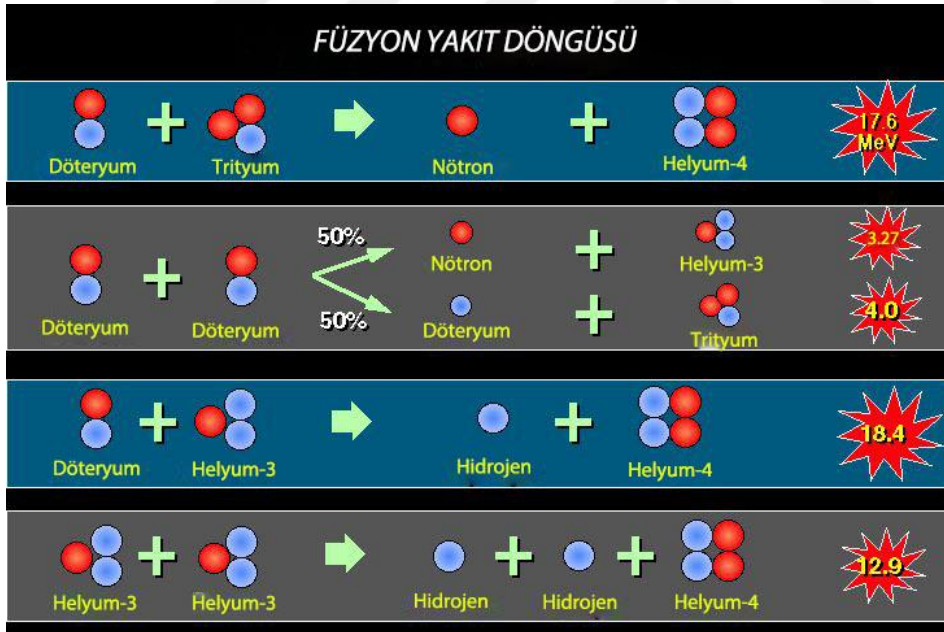


Bir helyum-4 çekirdeği ve bir nötron oluşumuna ve ayrıca 17,6 MeV'lik büyük enerji salınımına yol açar.

Tek başına döteryumun füzyonu, enerjinin serbest bırakılması için tercih edilen reaksiyon olacaktır, ancak süreci pratik hale getirmek için gereken koşulların çok şiddetli olduğunu göreceğiz. Bu koşulların, katalizli D-D reaksiyonu adı verilen bir reaksiyona küçük bir oranda trityum eklenmesiyle hafifletilmesi mümkündür. Ancak şu anda genel kanı, kontrollü füzyonun ilk önce yukarıda verilen D-T reaksiyonuna uygun olarak döteryum

ve trityum çekirdekleri arasındaki reaksiyon yoluyla gerçekleştirileceğidir. Trityum doğal kaynaklardan elde edilemeyeceğinden, nötronların lityum çekirdekleriyle etkileşimi ile yapay olarak yapılacaktır. D-T reaksiyonunda salınan nötronlar bu amaç için kullanılacaktır. İşlem sonuç olarak trityum üretme olarak adlandırılır. D-T reaksiyonu ile enerji üretimi için hammaddeler böylece döteryum ve lityum olacaktır. İkincisinin geniş rezervleri, makul bir maliyetle karada mevcuttur. Okyanuslarda daha da büyük miktarlar mevcuttur, ancak karadaki lityum kaynakları tükenmeden önce, tek başına döteryum füzyonu için koşullara ulaşılmalıdır.

Üç füzyon sürecinin kurucu nötronlar (n) ve protonlar (p) arasındaki yeniden düzenlemeleri Şekil 2.3'te verilmiştir. Bir döteron, bir proton ve bir nötrondan ve bir proton ve iki nötrondan oluşan bir tritondan oluşur. Serbest kalan enerji kinetik enerji olarak görünür ve iki ürün arasında kütleleriyle ters orantılı olarak bölünür. Her bir ürünün taşıdığı enerji miktarı belirtilir. Döteryum ve trityum çekirdekleri arasındaki reaksiyonda, füzyon enerjisinin çoğu, yaklaşık %80'i, elektriksel olarak yüklü olmayan nötron ile ilişkilidir.



Şekil 2. 3: Füzyon yakıt döngüsü (URL-2, 2014)

Sadece hidrojen izotoplarını içeren az önce açıklanan üç füzyon reaksiyonuna ek olarak, döteryum ve helyum-3 arasındaki nükleer füzyon reaksiyonuna (2.5) da biraz ilgi vardır, yani,



Bu işlem için gereken Helyum-3, D-D reaksiyonlarının ilki tarafından üretilecektir. Her iki ürün de ${}^4\text{He}$ ve H, elektrik yükleri taşır.

2.4.4. Yüksek Sıcaklık

Dikkate alınması gereken bir sonraki nokta, çekirdeğe itici kuvvetlerin üstesinden gelmelerine izin vermek için yeterli enerjinin nasıl verileceğidir. Açık bir yol, hızlandırıcı ve sağlam bir hedef kullanmaktır. Ancak bu prosedürün pratik değeri olamayacak kadar çok enerji harcadığı görülmüştür. Bununla birlikte, laboratuvarında D-D ve D-T reaksiyonlarının olasılıklarını (nükleer tesir kesitleri) incelemek için yaygın olarak kullanılmıştır. Bu reaksiyonların meydana geleceği koşullar hakkında şu anda bilinenlerin çoğu bu şekilde belirlenmiştir.

Çekirdeğe enerji sağlamanın başka bir yolu, füzyona uğrayacak olan izotop (döteryum) veya izotoplardan (döteryum ve trityum) oluşan bir gazın sıcaklığını yükseltmektir. Bir atomun (veya çekirdeğin) kinetik enerjisi, mutlak sıcaklığıyla orantılıdır; bu nedenle, füzyon reaksiyonlarının meydana gelmesine izin vermek için sadece yeterince yüksek bir sıcaklığa ulaşmak meselesidir. Bu tam olarak Güneş'te olan şeydir. İlk bakışta, durumun parçacıkların hızlandığı duruma biraz benzer olduğu görünebilir. Bununla birlikte, çekirdekler, kaçamayacakları şekilde bir şekilde sınırlandırılırsa, sonuçlar çok farklıdır. Yüksek sıcaklıklı bir sistemdeki nükleer çarpışmaların çoğu füzyon yerine saçılma ile sonuçlansa da sonuç enerji kaybından ziyade enerjinin yeniden dağılımıdır. Sıcaklık ve ortalama enerji değişmez. Kapalı bir alanda, rastgele yönlerde hareket eden çekirdekler, füzyon reaksiyonları gerçekleşene kadar tekrar tekrar çarpışırlar (Glasstone, 1974).

2.5. Nükleer Füzyonun Avantajları ve Dezavantajları

2.5.1. Nükleer Füzyonun Avantajları

Nükleer füzyonun avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Sera gazı üretmeyen temiz enerji kaynağı.
- Sınırsız miktarda mevcut yakıt, döteryum ve trityum üretimi kolaydır.

Döteryum, doğal suda ağır su (D_2O) olarak (6000'de 1 kısım) karışık halde bulunur.

Neredeyse tükenmez. Trityum doğal olarak mevcut değildir çünkü çok fazla nötrona

sahiptir ve bu nedenle yaklaşık 12,6 yıllık yarı ömrü ile beta bozunmasına karşı kararsızdır. Yerkabuğunda ve ayrıca okyanuslarda yaygın olarak bulunan lityumdan üretilmelidir. Saf döteryum füzyonu da mümkündür, ancak başarılı kullanımı için gerekli koşullar daha katıdır (daha zayıf füzyon tesir kesitleri nedeniyle) ve bu nedenle yalnızca ikinci nesil füzyon reaktörlerinde karşılanması muhtemeldir. Bu nedenle yakıt neredeyse tükenmezdir ve muhtemelen on binlerce yıl dayanacaktır.

- Füzyon, fisyonun farklı olarak zincirleme reaksiyon içermez, bu nedenle erime riskini ortadan kaldırarak süreç durdurulabilir.

Füzyon reaksiyonu doğası gereği güvenlidir. Kontrolden çıkma reaksiyonları, kritiklik veya erime tehlikesi yoktur. Belirli bir zamanda, cihazdaki toplam füzyon malzemeleri envanteri, gücü birkaç saniyeliğine üretmeye yeterlidir. Bu, belirli bir anda depolanan envanterin büyük bir patlamaya neden olmak için yeterli olduğu fisyon reaktörleriyle karşılaştırılmalıdır.

- Füzyon nükleer atık üretmez, sadece 100 yıl boyunca reaktörün çekirdeği radyoaktif kalır.

Füzyon reaksiyon ürünlerinin hiçbiri ilk etapta radyoaktif değildir. Füzyon nötronları radyoaktiviteyi indükleyebilir, ancak bu, yapısal ve diğer malzemelerin akıllıca seçilmesiyle en aza indirilebilir, böylece yalnızca kısa ömürlü radyoaktivite üretilir. Temelde nötronsuz füzyon üreten ve dolayısıyla radyoaktivite içermeyen proton-bor gibi gelişmiş yakıtların kullanılması olasılığı da vardır.

- Minimum arazi ve su kullanımı
- Mevsimsel, günlük ve bölgesel değişiklik yoktur. Ayrıca enerji depolama sorunu yoktur.
- Füzyon, günümüz yakıtlarına kıyasla nispeten düşük maliyetlerle tüm dünyayı besleme potansiyeline sahiptir.

Füzyon yakıtına her yerden kolayca erişilebilir. Bu, tüm uluslara muazzam bir enerji güvenliği sağlar ve petrol gibi fosil yakıtların siyasi olarak yanıcı eşit olmayan dağılımıyla (ulusların %6'sı dünyadaki petrol zenginliğinin %66'sından fazlasına sahiptir) tezat teşkil eder.

- Bir terörist grubun ya da çevredeki bir grubun, kaba bir araç oluşturmak üzere bir araya getirilebilecek önemli malzemelerle kaçması veya yayılması tehlikesi yoktur.

Füzyon reaksiyonunun başlatılması o kadar zordur ki, füzyonun başlatılabileceği koşulları yaratmak için bir manyetik füzyon reaktörü veya bir lazer füzyon reaktörü veya bir atomik fisyon cihazı gibi büyük bir teknik kuruluşa ihtiyaç duyar. Bu nedenle, bu tür kötüye kullanımdan tamamen muaftır.

2.5.2. Nükleer Füzyonun Dezavantajları

Nükleer füzyon enerjisinin dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Füzyon yalnızca aşırı yüksek sıcaklıklarda (1015 milyon K) meydana gelebilir ve bu da kontrol altına alınmasını zorlaştırır.
- Füzyonun çalışması için gereken enerji, füzyonun kendisinin ürettiği enerjiden daha büyük olabilir.
- Mevcut araştırma ve deneyler, yenilenebilir yeşil yakıtlara yatırılacak milyarlarca dolara mal olabilecektir.
- Soğuk füzyon, füzyonu verimli hale getirmenin tek yolu olabilir fakat soğuk füzyon henüz başarılı bir şekilde geliştirilmemiştir.
- Sermaye maliyetleri yüksek, birim boyutu yüksek olacaktır.
- Henüz aktif değildir (Hughes, 2013; Silver vd., 2014).

2.6. Füzyon Reaktörlerine Giriş

Mevcut güç reaktörleri, enerji üretmek için başta uranyum olmak üzere ağır çekirdeklerin fisyonunu kullanır. Ancak füzyon projeleri, hidrojen izotopları, döteryum ve trityumun hafif çekirdeklerinin füzyonuna dayanmaktadır. Nükleer füzyon üzerine ilk araştırmalar 1950'lerde başladığından beri, onu üretmek için en sık kullanılan sistem, plazma formunda hidrojen izotoplarının gaz halinde bir karışımının helisel manyetik alan kullanılarak sınırlandırıldığı alan bobinleri tarafından üretilen manyetik alanların kombinasyonundan toroidal bir oda içeren Tokamak'tır.

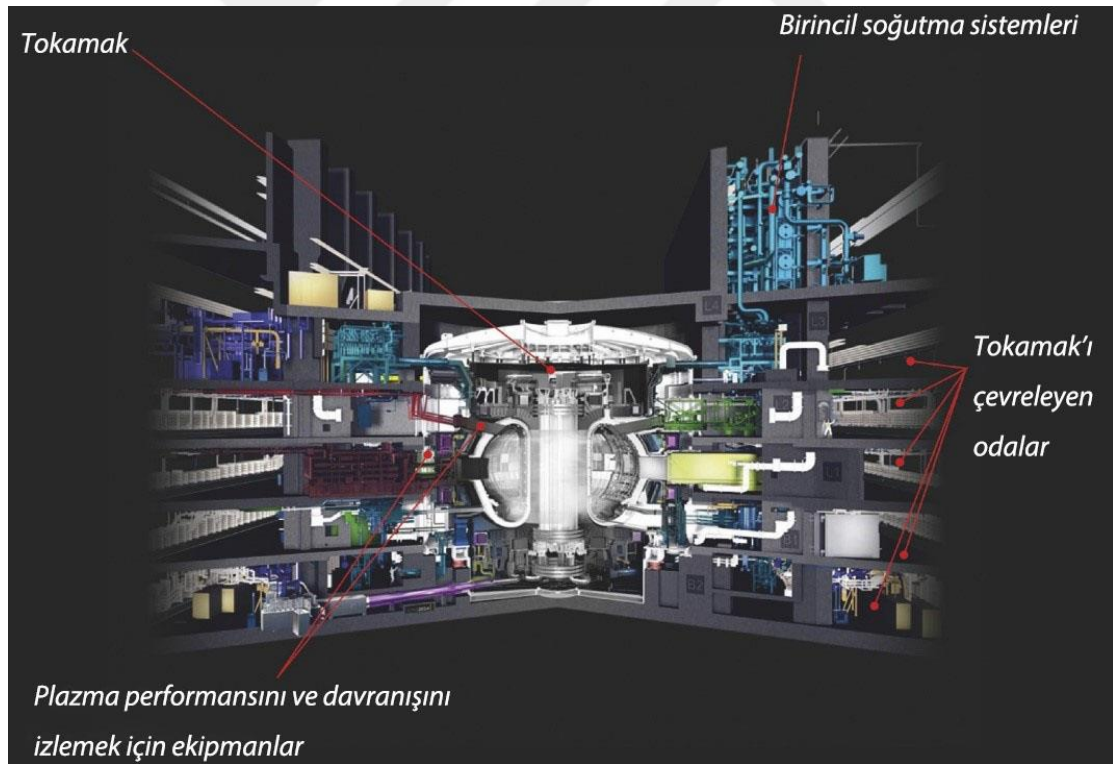
1950'lerden bu yana, füzyon üzerine araştırma yapmak için dünya çapında 200'den fazla Tokamak geliştirilmiştir. 1980'lerin sonlarında, Avrupa Atom Enerjisi Topluluğu (Euratom), Japonya, Sovyetler Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri tarafından füzyon gücünün bilimsel ve teknik fizibilitesi amacıyla ITER inşa etme kararı alınmıştır. Bu karar, nükleer füzyonun sanayileşmesinden önce, daha çok bir güç reaktörüne benzeyen DEMO (Demonstration santrali) adı verilen ikinci bir araştırma reaktörünün inşasını

planlayan uzun vadeli bir girişimin parçasıdır. Daha önce inşa edilmiş Tokamaklarda kullanılanlardan çok daha fazla kullanılan radyoaktif madde miktarları nedeniyle, ITER tesisi, nükleer tesisleri yöneten Fransız yasalarına göre bir inşaat ruhsatı gerektiren manyetik sınırlama kullanan ilk füzyon tesisidir.

Şu anda dünyanın çeşitli ülkelerinde (Çin Halk Cumhuriyeti, Kore Cumhuriyeti, Hindistan Cumhuriyeti vb.) farklı nükleer füzyon reaktör projeleri üzerinde çalışılmaktadır. Bu projelerin çoğu aynı Tokamak konseptine dayanmaktadır. Bu tesisler, ITER tesisinden daha önemli güvenlik ve radyasyondan korunma konularını içermektedir.

2.7. Bir Nükleer Füzyon Tesisinin Tasarımı

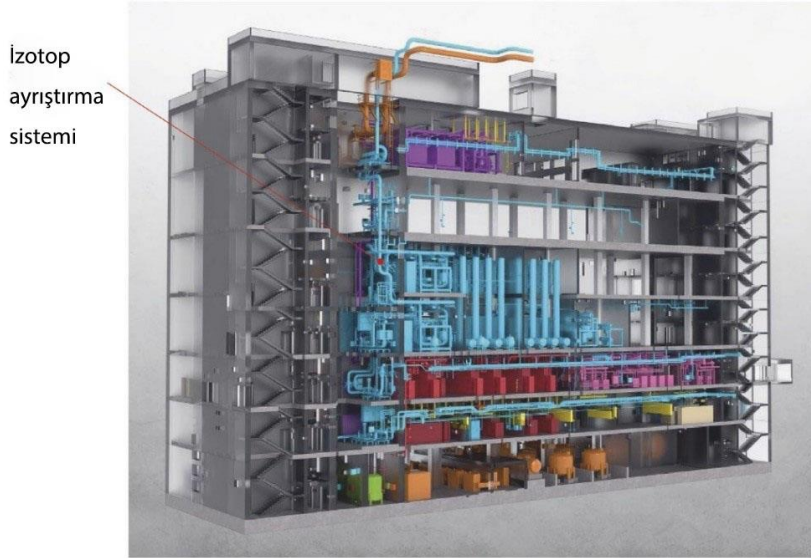
Bir nükleer füzyon tesisinde, ana Tokamak binasında bulunan Tokamak, esas olarak birincil soğutma sistemlerini (Şekil 2.4) ve vakum kabı tahliye tankını barındıran odalarla çevrilidir.



Şekil 2. 4: Nükleer füzyon tesisi (Day ve Giegerich, 2013)

Vakum tankı yakıt hatları (döteryum ve trityum) ve füzyon reaksiyon ürünlerini ortadan kaldıran kriyo-pompalar Tokamak binasında bulunur, ancak yakıt ikmal sisteminin

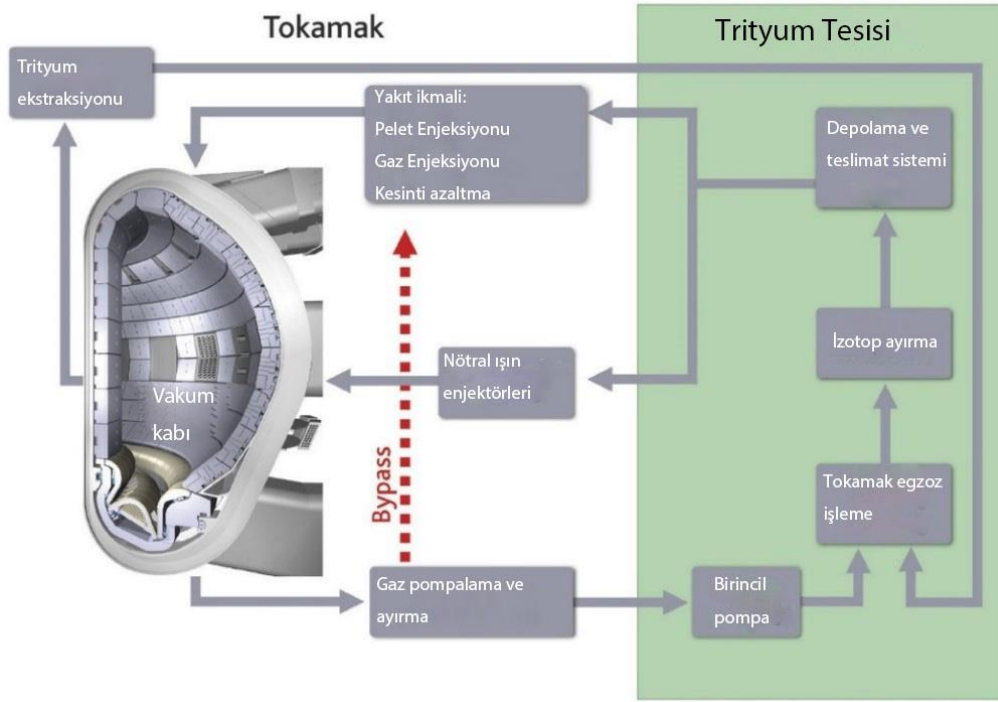
sadece bir parçasıdır. Bu sistem, bu kaptan çıkarılan ürünlerde bulunan yanmamış yakıtı, trityum üretim blanketlerinde üretilen herhangi bir yakıtla birlikte vakum kabına geri dönüştürür. Diğer yakıt ikmal sistemi ekipmanı, trityum binası olarak adlandırılan yardımcı bir binada yer almaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2. 5: Trityum binası (IRSIN, 2017)

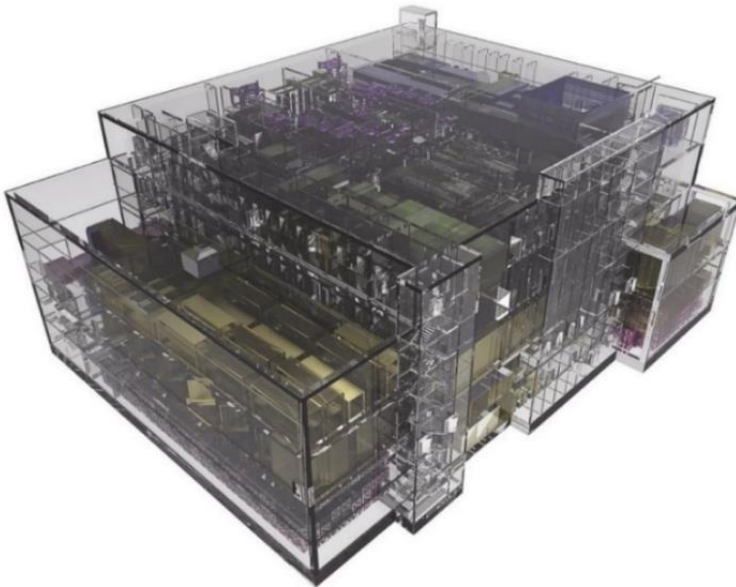
Vakum kabından ve trityum üretim blanketlerinden çıkarılan ürünleri işler, yani hidrojen izotoplarını (hidrojen, döteryum, trityum) diğer gazlardan (He, Ar, vb.) ve safsızlıklardan (toz vb.) ayırır.

Hidrojen izotop ayrımı yapar. İzotop ayırma sistemi, çeşitli izotopların farklı kaynama noktalarına dayalı olarak çalışan kriyojenik damıtma kolonlarından oluşur. Ayrılan hidrojen izotopları veya bu izotopların karışımları daha sonra depolanır. Yakıt, metal hidrit yataklarında (zirkonyum, titanyum, uranyum vb.) depolanır. Vakum tankına yakıt ikmali sağlar. Bu ekipmanların gösterimi Şekil 2.6'da verilmiştir.



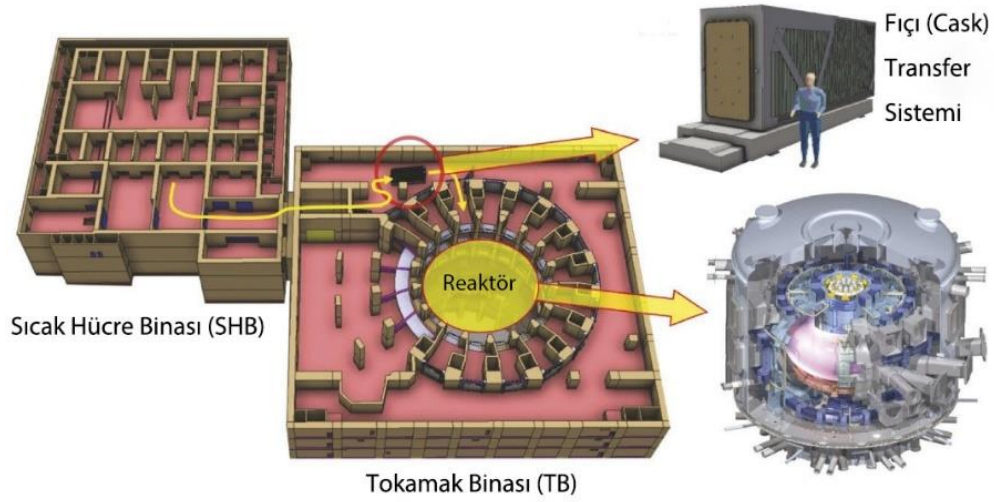
Şekil 2. 6: Tokamak ve trityum tesisin şematik gösterimi (Day ve Giegerich, 2013)

Şekil 2.6’da görüldüğü gibi, vakum kabı iç bileşenleri periyodik bakım gerektirir. Bu bakım, sıcak hücre binası olarak adlandırılan yardımcı bir binada bulunan hücrelerde yapılır (Şekil 2.7). Bu bina aynı zamanda orta seviye uzun ömürlü atıkları ve trityumlu atıkları işlemek ve depolamak için de kullanılabilir.



Şekil 2. 7: Sıcak hücre binası (IRSN, 2017)

Vakum kabı iç bileşenlerinin aktivasyonundan kaynaklanan doz oranlarının, bu ekipmanın parçalarının yalnızca robotik yollarla çıkarılabileceği ve bunların vakum kabından hücrelere transferinin yalnızca otomatik transfer fiçileri ile gerçekleştirilebileceğine dikkat edilmelidir (Şekil 2.8). Diğer atıklar, ister düşük ve orta seviyeli kısa ömürlü atıklar (LILW-SL) isterse çok düşük seviyeli atıklar (VLLW) olsun, “radwaste binası” olarak adlandırılan başka bir yardımcı binada işlenir ve depolanır. Tüm binalar, proses ekipmanı, odalar ve binalar tarafından sağlanan statik sınırlamanın yanı sıra radyoaktif maddelerin hapsedilmesini sağlayan havalandırma sistemleriyle donatılmıştır. Çok sayıda oda ve ekipman ögesinin (glove box vb.) havalandırma sistemleri, normal ve kaza çalışma koşullarında havanın aşınması için ekipman içerir.



Şekil 2. 8: Fıçı (Cask) transfer sistemi organizasyonu (IRSN, 2017)

2.8. Nükleer Füzyon Tesisinde Bulunan Radyoaktif Maddeler

Bir nükleer füzyon tesisinde iki tür radyoaktif madde bulunur: Trityum ve aktifleştirilmiş malzemeler veya ürünler.

2.8.1. Trityum

Trityum çoğunlukla contalar ve belirli malzemeler arasında kolayca yayılan bir gaz (T_2) veya ilgili ekipman için genellikle aşındırıcı olan trityumlu su (HTO) olarak bulunur. Füzyon reaksiyonları için gerekli trityum ITER tesisinin dışından gelecek ve DEMO reaktörleri için trityum üretim battaniyelerinde üretilen olacaktır. Trityumun çoğu trityum binasında (birkaç kg) bulunur, ancak vakum kabı iç bileşenleri ve atık depolama üzerinde

yapılan bakım işlemleri nedeniyle vakum kabında (battaniyenin birincil duvarında ve battaniyenin lityum taşıyan kısmında) ve daha az ölçüde sıcak hücre binasında da önemli bir miktar bulunur. Müdahale olmadan, vakum kabının iç bileşenlerinin birinci duvarına adsorbe edilen trityum miktarları çok büyük hale gelebilir. Nükleer füzyon tesislerinin operatörleri, çok fazla yakıt kaybını önlemek ve trityum içeren kazalarda aşırı sonuçlardan kaçınmak için adsorbe edilen trityum miktarlarını sınırlar.

2.8.2. Aktifleştirilmiş Malzemeler veya Ürünler

Blanket ve saptırıcı, vakum kabı, saha bobinleri, kriyostat ve plazma davranışını ve performansını izlemek, ek plazma ısıtması, yakıt sistemi ve soğutma ve vakum sistemleri için ekipman gibi yüksek ölçüde aktive edilir. Blanket trityum üretilmesi ise, kullanılan trityum üreme blanketinin türüne bağlı olarak değişen aktif sıvılar, gazlar ve katı maddeler de içerecektir. Bunlar kısaca;

Aktif toz: Vakum kabı örtüsünün birincil duvarının ve saptırıcının birincil duvarının aşınmasından kaynaklanan toz etkinleştirilir ve aktif duruma geçer, ayrıca adsorbe edilmiş trityum içerir.

Su aktivasyon ürünleri: Birincil soğutma sistemlerindeki suyun aktivasyon ürünleri trityum, karbon-14, nitrojen-16 ve nitrojen-17'dir.

Suda aktifleştirilmiş korozyon ürünleri: Su kaçağı durumunda harekete geçilebilen birincil soğutma sistemlerinde oluşan korozyon ürünleri, vakum kabı iç bileşenlerinden ve kabın kendisinden geçiş sırasında aktive edilen çözeltideki iyonlar ve duvarlarda sabit olmayan birikintilerdir.

Aktif gazlar: Kriyostat ve biyolojik kalkan muhafazası arasında bulunan hava ve daha az ölçüde Tokamak bina odalarındaki hava, füzyon reaksiyonları tarafından üretilen nötron akısı tarafından aktive edilir (IRSN, 2017).

2.9. ITER

2.9.1. ITER TARİHİ

Latince yol anlamına gelen ITER, bir sosyal deney olduğu kadar bilimsel ve teknolojik bir meydan okumadır. Soğuk savaş sırasında, manyetik füzyon, cumhurbaşkanları Reagan ve Gorbaçov'un Avrupa Birliği ve Japonya'nın katıldığı büyük bir ortak deney yapmayı kabul ettikleri Kasım 1985'e kadar gizliliği kaldırılmış bir faaliyettir. ABD

geçici olarak anlaşmadan çekilmiştir ve tasarım, maliyetini yarıya indirmek için reaktörün yeniden tasarlanmasına karar verilen 1998 yılına kadar gelişmiştir. 2004 yılında ABD, Çin ve Kore ile birlikte projeye yeniden katılmıştır, bunu 2005 yılında Hindistan izlemiştir. Sırasıyla füzyon enerjisi ve teknoloji geliştirmeleri olan uzun ve kısa vadeli amaçların gerçekleştirilmesi için proje finansmanı düzenlenmiştir.

ITER anlaşması Kasım 2006'da imzalanmıştır ve inşası 9 yıl süreceği tahmin ediliyordu fakat çeşitli nedenlerin birikmesi nedeniyle inşaat ertelenmiştir. Şu anda, ilk plazma 2036 için öngörülmektedir ve yüksek teknoloji bileşenlerinin çoğu nihai tasarımdan geçmiştir, büyük olasılıkla olacak gibi görünmekte ve kilometre taşına zaman içinde ulaşılabacaktır (Sánchez, 2014; Anderson ve Aldhous, 1990).

2.9.2. ITER Deneysel Füzyon Tesisi

ITER tesisinin genel amacı, birkaç yüz saniyelik darbeler için yaklaşık 500 MW üreterek füzyon gücünün bilimsel ve teknolojik fizibilitesini göstermektir. Bu tesis için planlanan 20 yıllık işletme süresi boyunca yaklaşık 40 000 plazma deşarjı gerçekleştirilebilmiştir. Hedeflenen füzyon gücü dışında, ITER tesisi Tokamak'ın temel özellikleri aşağıdaki gibidir:

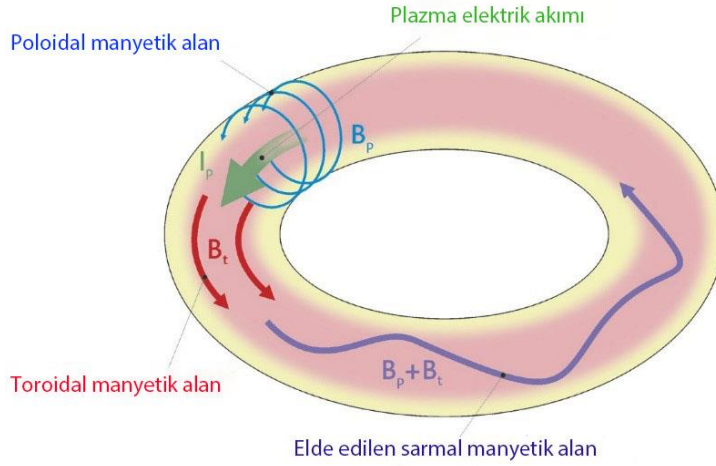
- Yaklaşık 1600 m³ hacimli bir vakum kabı
- 15 MA'lık bir nominal plazma akımı
- Blanket için bir berilyum birincil duvar
- Saptırıcı için bir tungsten birincil duvar
- Blanketin 440 modülünden altı trityum üretim modülü; bu modüller için ayrılmış altı yer, Uluslararası Füzyon Enerjisi Örgütü'nün yedi üyesinin (Çin Halk Cumhuriyeti, Avrupa Atom Enerjisi Topluluğu, Hindistan Cumhuriyeti, Japonya, Kore Cumhuriyeti, Rusya Federasyonu ve Amerika Birleşik Devletleri), geliştirdikleri çeşitli trityum üretim blanketlerini test edebilir.

ITER tesisi için yetkili işletim alanı aşağıdakilerle sınırlıdır:

- Tüm tesiste 4 kg'a eşit veya daha az miktarda trityum
- Vakumlu kapta 1 kg'a eşit veya daha az miktarda trityum
- Vakum kabında 1000 kg'a eşit veya daha az bir toz kütlesi (tungsten ve berilyum) (IRSN, 2017).

2.9.3. Tokamak Dizaynı

Tokamak, manyetik hapsedme konseptini kullanan bir nükleer füzyon tesisinde, füzyon reaksiyonları, iyonlardan ve elektronlardan oluşan bir madde hali olan toroidal bir plazma içinde gerçekleşir. Plazmanın manyetik olarak sınırlandırılması (Şekil 2.9) esas olarak toroidal alan bobinleri tarafından üretilen toroidal bir manyetik alan (B_t) ve plazmadaki bir elektrik akımı tarafından üretilen poloidal manyetik alan (B_p) tarafından üretilir.



Şekil 2. 9: Plazmanın manyetik sınırlandırılması (IRSN, 2017)

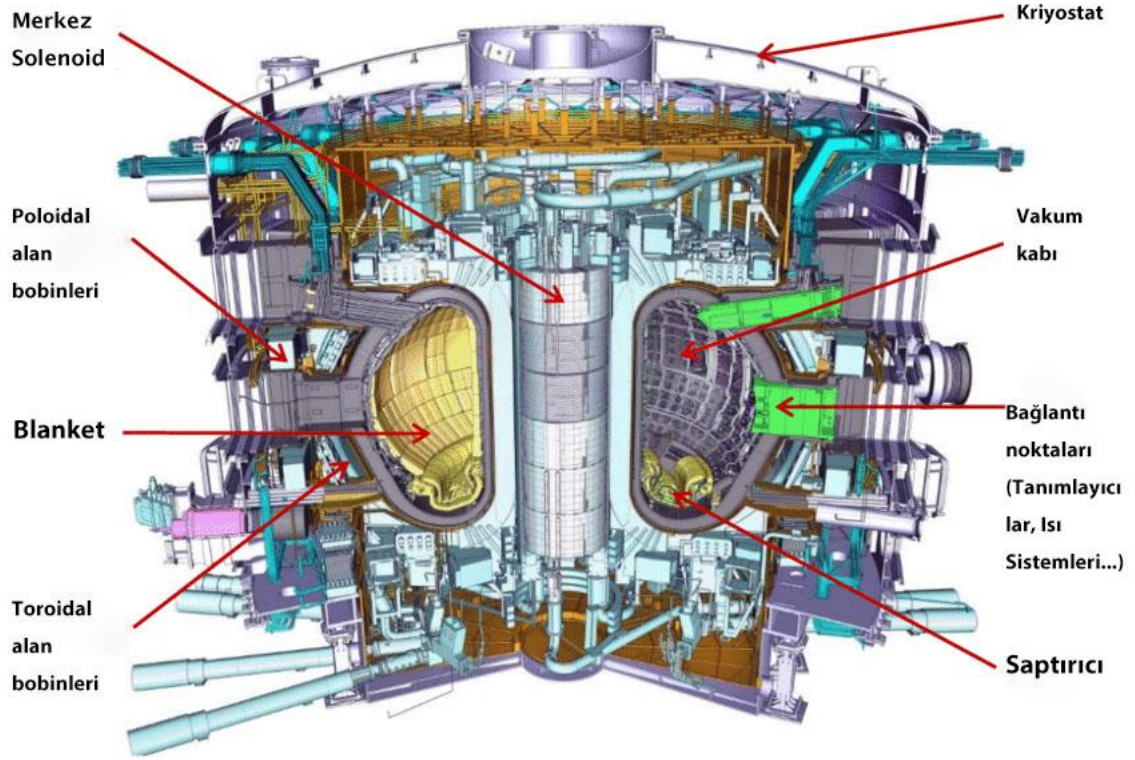
Böylece, etrafında iyonların ve elektronların sarmal oluşturduğu sarmal manyetik alan çizgileri üretilir, böylece plazmayı, içine döteryum ve trityum dahil edilen vakum kabı adı verilen kapalı bir toroidal kap içinde tutar. Plazma akımı olarak adlandırılan indüklenen akım, plazmayı ısıtır, ancak döteryum ve trityumun füzyonu için gerekli sıcaklık koşullarına ulaşmak için kendi başına yeterli değildir.

Trityum, hidrojenin radyoaktif izotopudur. Çekirdeği, kararlı helyum-3 üretmek için ortalama 5,7 keV enerjili bir beta emisyonu yoluyla bozunur. Yarı ömrü 12,3 yıldır. Füzyon reaksiyonu yüksek enerjili nötronlar (14 MeV) üretirken, fisyon reaksiyonları tarafından üretilen nötronların enerjisi 2 MeV'den azdır. Enerjinin beşte biri α parçacıkları aracılığıyla plazmaya salınırken, beşte dördü vakum kabının iç bileşenlerini oluşturan malzemeler ve kabın kendisi ile nötron etkileşimleri yoluyla ısıya dönüştürülür.

2.9.4. Mıknatıs Sistemi

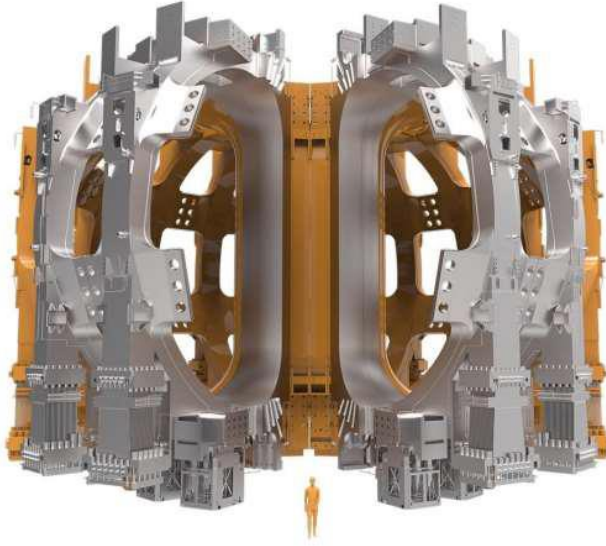
Tokamaklar, toroidal ve poloidal alan bobinlerine ve ayrıca merkezi bir solenoide sahiptir. Plazmadaki elektrik akımını indükleyen ilave solenoid teknik olarak basittir,

ancak dezavantajı, elektrik akımının bir transformatör aracılığıyla indüklenmesidir. Yakıt gazı haznenin içinde olduğunda, transformatör boşaltılır. Akım yavaş yavaş azalır ve minimuma ulaşıldığında artık akımın azalmasına ve reaksiyonların kapanmasına yol açan bir akı değişikliği üretmez. Daha etkili süper iletken mıknatıslar geliştirildikçe, darbe uzunluğu teorik olarak bir saate kadar çıkacaktır (IPP, 2021b).



Şekil 2. 10: ITER tesisi iç yapısal elemanları (Dubus, 2014)

Şekil 2. 10' da ITER Tokamak tesisinde ki iç yapısal elemanları göstermektedir. Kullanılan manyetik konfigürasyon, "D" şeklindeki toroidal mıknatıs bobinleri, torus şeklindeki kabın içinde hapsolür. İç poloidal bobinler, plazma içindeki akımı indükleyen transformatörü oluşturur. Plazma yörüngelerini iyileştirmek ve sızıntıyı en aza indirmek, plazma akımı tarafından oluşturulan poloidal alanı güçlendirmek için dış poloidal manyetik bobinler eklenir (Eurofusion, 2021).



Şekil 2. 11: Toroidal alan bobinleri (Eurofusion, 2017)

ITER Tokamak, 18 toroidal ve 6 poloidal alan mıknatısından oluşur. Şekil 2.11'de gösterilen toroidal alan bobinleri, 17 metre yüksekliğindeki ITER Tokamak'taki en büyük bileşenlerden biridir ve ayrı ayrı inşa edilecektir. Toroidal bobinlerin amacı 41 GJ manyetik enerji ve 11,8 tesla'ya kadar manyetik alan üretmektir. Poloid bobinler 4 GJ enerji ve 6 tesla manyetik alan üretebilir. Sistem ayrıca poloidal ve toroidal süper iletken bobinler arasında düzeltme bobinlerine sahiptir. Bu 18 bobin çok daha küçüktür ancak montajdaki geometrik kusurların neden olduğu sapmaları düzeltmeye yardımcı olur.

Merkezi solenoid, plazma içindeki elektrik akımını üreten simidin ortasındadır. Altı bağımsız bobin paketinden oluşan on üç metre boyunda ve dört metre genişliğindedir. Bu solenoid, depolanan 6,4 GJ manyetik enerjisiyle 15 MA plazma akımını başlatacaktır. Akım sadece 300-500 saniye dayanabilir ve bu da Tokamakların darbeli çalışmasına yol açabilir. Merkezi solenoid, 13 tesla alana sahip ITER Tokamak'taki en güçlü mıknatıs sistemidir. Solenoid için destek yapısı, bağımsız bobin paketleri ile oluşturulan güçlü manyetik alanlara ve elektromanyetik kuvvetlere dayanmalıdır (ITER, 2021c).

ITER mıknatısları niyobyum-kalaydan (Nb_3Sn) veya niyobyum-titanyumdan (Nb-Ti) yapılacaktır. Süper iletken şeritler bir araya toplanır ve çelik bir dış katmanla çevrelenir; bu yöntem, kablo içi iletkenler olarak adlandırılır. Mıknatıslar, süper kritik helyum ile 4 Kelvin'de soğutulduklarında süper iletken hale gelirler (ITER, 2021d). Süper kritik helyum, sıvı ve gaz arasındaki fazın kolayca açıklanamadığı kritik noktasının altında soğutulması anlamına gelmektedir (IL, 2021).

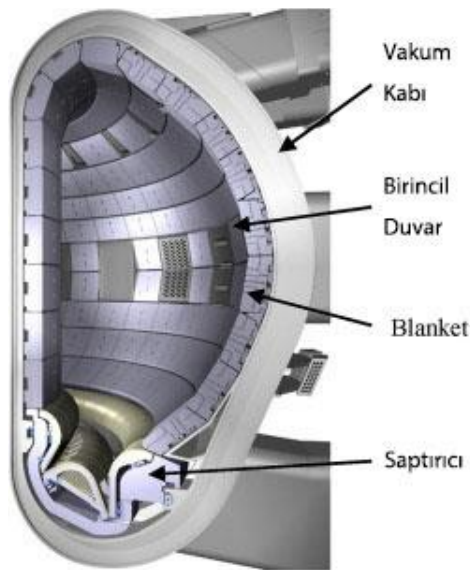
2.9.5. Kriyostat ve Tokamak Binası

Tokamak, 40 m ile silindirik bir biyolojik kalkan içinde yuvalanmış silindirik bir kriyostatta (yükseklik $\approx 36,5$ m) bulunur. Biyo-kalkan, sınıfın 53 m altına uzanan 71 m silindirik bir çukurun içinde yer alır. Kriyostat, vakum kabı ve içindeki süper iletken mıknatıslar için yüksek vakum ve ultra soğuk bir ortam sağlayan 16 000 m³ paslanmaz çelik bir muhafazadır. Yaklaşık 30 m genişliğinde ve yüksekliğinde, 28 m iç çapı ve 3850 ton ağırlığındadır (IAEA, 1992).

Vakum kabı ve kriyostat, sırasıyla, kap içinde bulunan uçucu maddelerin salınımına karşı birinci ve ikinci hapsetme bariyerlerini oluşturur. Kap, 0,5 MPa'lık bir maksimum iç basınca ve kriyostatı 0,2 MPa'lık bir maksimum iç basınca hapsetmek üzere tasarlanmıştır. Bu iki bariyer, kabın ve/veya kriyostatın her girişinde korunmalıdır. Bu tür iki bağımsız engel sağlamak, ITER tanımlama tasarımının karşılaştığı en zor zorluklardan biridir (Rebut vd., 2000; Aymar vd., 2000).

2.9.6. Vakum Kabı

ITER Tokamak vakum kabı, dikey merkezi solenoidi çevreleyen merkezde, Şekil 2.12'de gösterilen “D” şeklinde bir kesite sahip metal bir odadır. Kap 19,4 m genişliğinde ve 11,4 m yüksekliğinde olacaktır. Bu, plazma odası hacminde şu anda çalışmakta olan herhangi bir Tokamak'tan on kat daha büyük olacaktır (ITER, 2021e).



Şekil 2. 12: ITER Tokamak vakum odası (IRSN, 2017)

Duvarlardaki nötronların yavaşlaması ve bu duvarlar arasına yerleştirilen borlu paslanmaz çelik bloklardaki ısıyı, nötron reaksiyonlarından gelen ısı ile birlikte soğutma kulelerine aktarmak için soğutma suyu iki duvar arasında akar (ITER tesisi için) veya bir türbin jeneratörüne gider (DEMO reaktörleri için). Vakumlu kapta, iç basınçta artış (su girişi, hava girişi, vb.) içeren tüm öngörülebilir kaza durumlarıyla başa çıkmak için bir basınç bastırma sistemi bulunur. Blanket, yani kabın iç yüzeyi, ilk duvar panelleri ve kalkan bloklarından oluşur (ITER, 2021f). İlk duvar, doğrudan plazmaya baktığı için ısı yükünü yakalayacak şekilde tasarlanmıştır ve yüzey malzemesi olarak berilyum seçilmiştir. Berilyum çok dayanıklıdır ve yüksek ısı iletkenliğine sahiptir (Hakso, 2018). Gelecekte, iç katman, füzyon reaksiyonu sırasında trityum üremesinin test edilmesinde de rol oynayacaktır. Kalkan blokları destek sağlar ve yüksek enerjili nötronların mıkmatıslar gibi diğer bileşenlere zarar vermesini engellemek için tasarlanmıştır (ITER, 2021g).

Tokamak, vakum kabının tabanından kül ve ısıyı uzaklaştırma amacına sahip bir saptırıcıya sahiptir. Manyetik alanlar tüm vakum kabını kaplar ve bu nedenle plazma duvarlara değene kadar yayılır (IPP, 2021c). Plazmayı saf tutar ve duvarları termal ve nötronik yüklerden korur. Tüm metaller arasında en yüksek erime noktasına sahip tungsten, en yüksek sıcaklıklara dayanması gerekeceğinden yapı malzemesi olarak seçilmiştir (IPP, 2021d).

Kabın çift katmanlı duvarlarının içinde soğutma suyu içeren bir soğutma sistemi vardır. Yüksek enerjili parçacıklar duvarlara çarptıkça kinetik enerjileri çıkarılan ısıya dönüşecektir. Bu ısı geleceğin enerji santrallerinde buhar ve güç üretecektir.

ITER vakum kabı daha sonra bir ITER kriyostatının içine kapatılacaktır. Kap ve süper iletken mıkmatıslar için ultra vakumlu ve yoğun bir şekilde soğutulmuş bir ortamdır. Genişliği yaklaşık 30 m olan ITER Tokamak'ının en büyük bileşenidir (IPP, 2021e).

2.9.7. Saptırıcı

Vakum kabının alt kısmında bulunan saptırıcı, helyum-4'ü (plazma elektronlarını yakalayan füzyon reaksiyonlarından α parçacıkları), füzyona uğramamış yakıtı (trityum ve döteryum) ve yabancı maddeleri (özellikle aşınmış blanketin ve saptırıcının ilk duvarında ki tozu) çıkarır. Isıyı çeker, çevreleyen duvarları korur ve plazma kontaminasyonunu en aza indirir (Dobran, 2012a; Hirai vd., 2017).

Saptırıcı, her biri bir kaset gövdesine (CB) ve plazmaya bakan üç bileşene (PFC'ler) sahip 54 kasetten (Cas) oluşur: Kubbe ve iç ve dış dikey hedefler (IVT ve OVT) (Hirai vd., 2017). Dikey hedefler, yüksek partikül bombardımanı manyetik alan hattı kesişimlerinde bulunur; bu, duvar erozyonu ve trityum tutulmasını en aza indirmek için özel refrakter (ateşe dayanıklı) metal ve seramik zırhlar gerektiren koşum çalışma koşulları nedeniyle saptırıcıyı zorlu bir bileşen haline getirir. ITER saptırıcı, yüksek iyon akışlarının azaltılması için tungsten ve karbon fiber zırhlı östenitik paslanmaz çelik bir yapıdan oluşmalıdır (IPP, 2021e; Dobran, 2012a).

Hem blanketin ilk duvarı hem de plazmaya bakan bileşenler olarak saptırıcı, karmaşık bir malzeme tasarımı gerektirir, çünkü plazma bozulmaları nedeniyle milisaniyeler boyunca üzerlerinde yüksek miktarda enerji birikecek ve kararlı durum akışlarından çok daha yüksek ısı akışları üretecektir. Bu, yüzey malzemelerinin ablasyonuna, erimesine ve buharlaşmasına, çatlakların oluşmasına ve malzemelerin trityum kaynaklı kirlenmesine neden olacaktır. Bu nedenle, bu bileşenlerin tesis ömrü boyunca daha sık değiştirilmesi gerekecektir (IPP, 2021e).

2.9.8. Blanket

Blanket, kabı koruyan vakumlu kapların iç duvarlarını ve toroidal alanın süper iletken mıknatıslarını kaplayan her biri 45 cm kalınlığında 440 modülden oluşmaktadır. Blanket, vakum kabının metal duvarları için nötron koruması sağlar. Plazmanın ısıma ısını ve füzyon reaksiyonlarından kaynaklanan yüksek hızlı nötronların yavaşlaması nedeniyle ısının büyük bir kısmını soğutma kulelerine (ITER tesisi için) veya bir türbin jeneratörüne (DEMO reaktörler için) aktarmak için bir soğutucu ile soğutulur. Ayrıca, nötronların neden olduğu malzemelerindeki nükleer reaksiyonlar tarafından üretilen ısıyı, plazmadaki füzyon reaksiyonlarından (nötron reaksiyonları) uzaklaştırır.

Ayrıca, ITER tesisi için çok seyrek ve DEMO reaktörler için kapsamlı olarak, blanket trityum ıslahıdır, yani plazmadan nötron akışı altında aşağıdaki reaksiyonlar (2.6), (2.7) yoluyla trityum üreten lityum (Li) içerir:

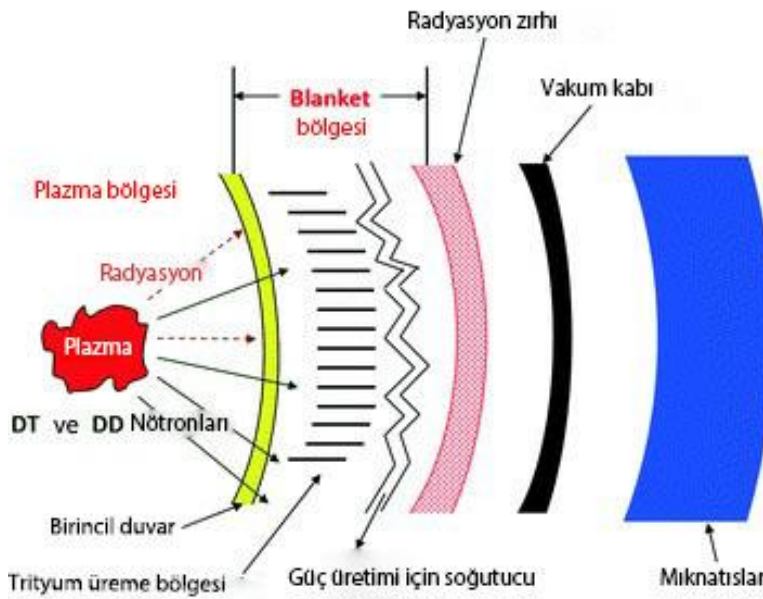


600 m² yüzey (1 m x 1,5 m modüller), reaktörün en zorlu bileşenlerinden biridir. Her modülün, ısı yükünü, nötron koruması için ana kalkan bloğu, saptırıcı kasetleri ortadan kaldıran plazmaya bakan ayrılabilir bir birincil duvarı vardır ve teşhis sensörlerinin yanı sıra sınırlayıcı, ısıtma antenleri ve test blanketi modülleri gibi port fişleri bulunmaktadır (Dobran, 2012b; ITER, 2021h).

2.9.9. Birincil Duvar

Blanketin plazmaya bakan duvarı, birincil duvar olarak adlandırılır ve onu aşındıran ve toz oluşturan nötron akışı, termal akış ve termal şoklar nedeniyle ağır yüklere maruz kalır. Ayrıca, bu ilk duvar trityumu adsorbe eder. Birincil duvar 15 cm kalınlığında, ilk 1 cm'lik berilyum katmanından, ardından 1 cm'lik Cu-Cr-Zr alaşımından ve son olarak yaklaşık 10 cm'lik bir östenitik paslanmaz çelik katmanından (316 SS) inşa edilmektedir. Bu malzemeler teknolojik olgunlukları, ısı giderme için su ile uyumlulukları ve nötron akışlarına karşı dirençleri için seçilmiştir.

Şekil 2.13'te reaktör odasının bir kesiti sunulmaktadır: Plazmaya bakan ilk duvar, ısıyı uzaklaştırılması için bir blanket (ve gelecekteki reaktörlerde trityum üretimi) ve radyasyondan korunma için bir kalkan. Daha sonra, plazmayı dış ortamdan koruyan ve ayıran vakum kabı vardır. Son olarak, mıknatıslar, radyasyona karşı koruma ve kolay bakım için blanketin ve vakum kabının dışına yerleştirilmiştir (Aymar vd., 2001).



Şekil 2. 13: Reaktör sisteminin şematik görünümü (Tanabe, 2017)

2.9.9.1. Birincil Duvar Malzemeleri

Yüksek He/dpa oranlarındaki (dpa; atom başına yer değiştirmeler, kafesin yer değiştirme hasarının ifade edildiği birimdir) malzeme davranışı, Tokamak'ın ilk duvarının malzemelerinin yanı sıra, içindeki malzemelerin de karşılaşabileceği muhtemeldir.

Tokamak'ın birincil duvarı plazmaya en yakın duvardır ve bu nedenle yüksek ısı akısı dışında yüksek enerjili nötronların verdiği hasar nedeniyle yüksek He/dpa oranlarına maruz kalır. Saptırıcı ve sınırlayıcı da aynı kategoriye girer. Malzeme plazmaya sıçrarsa, söndürülebilir. Bunun olmasını önlemek için, ya nötronların (ve bazen de plazmadaki elektronların ve diğer iyonların) kendisine çarpması nedeniyle sıçramayan ya da sıçradığı halde plazmayı söndürmeyen bir element seçilir. Yüksek atom numaralı (Z) elementler daha az sıçradıkları için birinci kategoriye girer ve düşük Z elementleri plazmaya sıçrasalar bile onu söndürecek kadar güçlü değildir. Plazmaya bakan elementin seçimi buna dayanmaktadır. Bir kez seçildiğinde, bu eleman birincil duvarın ayrılmaz bir parçası olmalıdır. Yanında birincil duvarda, özellikle saptırıcıda, aşırı ısınmasını önlemek için birincil duvardan ısı taşıyıcı ve soğutucu görevi görebilecek bir malzeme olmalıdır (Tablo 2. 1). Başlangıçta, östenitik paslanmaz çelik 316, birincil duvar yapısı olarak kullanılmak üzere seçilmiştir. Bununla birlikte, ferritik çeliklere kıyasla ısınlama altında daha fazla şişme eğilimi ve 600 °C'nin üzerinde kabul edilemez yorulma ömrü nedeniyle, özellikle de He ((n, α) reaksiyonları nedeniyle oluşan) birincil duvar için tercih edilen malzemedir. Düşük aktivasyon, uygun alaşım elementlerinin seçilmesi ve hem ikame hem de ara yerdeki safsızlıkların kontrolü ile elde edilir. Örneğin, F82H alaşımının tipik bileşimleri aslında ticari olarak temin edilebilen modifiye edilmiş 9Cr-1Mo çeliğinin türevleridir. F82H'ye veya eşdeğerlerine ulaşmak için bileşimdeki değişiklikler, bu çeliğin yüksek sıcaklık kapasitesini arttırmanın yanı sıra ısınlama nedeniyle istenen düşük aktivasyonu sağlamak için yapılmıştır.

Tablo 2. 1: Tokamak'ın birincil duvarı için çeşitli F/M çeliklerinin tipik bileşimleri (Suri vd., 2010)

Çelik/Bileşik	Cr	W	Mn	V	Si	C	Ta	N	Fe
F82H	7,46	1,96	0,21	0,15	0,10	0,09	0,023	0,006	90,001
JLF-1	9,0	2,0	0,45	0,25	0,2	0,10	0,07	0,05	87,88
Eurofer 97	8,9	1,1	0,47	0,2	-----	0,11	0,14	-----	89,08
CLAM	8,98	1,55	0,40	0,21	-----	0,11	0,15	-----	88,6

Bununla birlikte, F82H veya eşdeğerleri bile, bu reaktörler için öngörülen 30 yıllık ömür ve bu dönemde bu çeliklerde birikecek kabul edilemez büyük miktarlarda He nedeniyle prototip reaktörler için kabul edilemez. Alternatif, helyumu, çeliğin tozunun nano-yttria ile yıpratılması ve öğütülmüş karışımın sıcak ekstrüzyon veya geliştirilmekte olan çeşitli teknolojik yol ile son derece büyük sayılarda çelikte tanıtılan Ti-Y-O (Titanyum-İttriyum-Oksijen) komplekslerinin yüzeylerine çekirdeklenme yaparak küçük kabarcıklara dağıtabilen nano yapılandırılmış bir F82H şeklinde bulunmuştur. Bu çelik, 3. nesil oksit dağılımı güçlendirilmiş (ODS) F/M çeliği olarak bilinir (Romanoski vd., 2000; Klimiankou vd., 2003). Ticari bir Tokamak'ın birincil duvarının gereksinimlerine uyabilecek diğer üretimi kolay malzemeler için dünya çapında araştırmalar devam etmektedir (Kurtz vd., 2009). Bu tür gündemde olan birçok materyalin listesi aşağıda verilmiştir.

Birincil Duvar Plazma Kaplaması (Barabash vd., 1996; Nygren., 2006)

- Düşük Z – Be, C-C Bileşikleri → Yüksek püskürtme ama daha az söndürme
- Yüksek Z – W, Mo – Başlıca alaşımlar → Az püskürtme ama daha çok söndürme
- Birincil Duvar Isı Emici (Butterworth vd., 1992; Batra vd., 2003)
- Cu-Cr-Zr Alaşımı
- Bakır Alaşımları → Alümina ile güçlendirilmiş dispersiyon
- Birincil Duvar Yapısı
 - Çelikler (Kohyama vd., 1996; Tanigawa vd., 2008)
- Düşük aktivasyonlu östenitik çelikler [SS 316L(N) IG] ITER birincil duvarı için

- Ferritik/martensitik çelikler (F82H, EUROFER) DEMO ve Test blanket modülleri için
- Nanoyapılı ferritik/martensitik ODS çelikleri veya nanoyapılı yüksek azot karbür dağılımı ile güçlendirilmiş (CDS) PROTOTIP için F/M çelikleri
 - Vanadyum alaşımları Zinkle, 2005; Smith vd., 1995)
 - SiC-fiber/SiC bileşikleri (Ferraris vd., 2008; Nozawa vd., 2008)

Birincil duvar malzemeleri ile ilgili kritik konular, yüksek enerjili nötronlar nedeniyle dönüşüm ve yer değiştirme hasarlarını, büyük boyutlu karmaşık şekillerin üretilmesini ve füzyon ortamlarında kullanım için malzemelerin kalifikasyonu ve birleştirilmesini ve kodlarını içerir. Nötronlardan kaynaklanan hasar söz konusu olduğunda, hızlı reaktörlerin çekirdeğinde meydana gelen tüm etkiler füzyon ortamında da meydana gelir, ancak daha yoğun olarak. Nötronların birincil duvarı oluşturan atomlarla (n , α) tepkimeleri sonucu oluşan helyum, ele alınması zor bir konudur. Bir Tokamak içinde özellikle 14,1 MeV enerjili nötronlar tarafından ışınlaması nedeniyle malzemede He üretim hızı çok yüksektir (çelik için 200-600 appm/yıl aralığında) ve bu nedenle 30 yıllık ömründe, malzemenin büyük miktarlarda He biriktirmesi muhtemeldir. He'nin herhangi bir metalik matristeki çözünürlüğünün sıfır olduğu bilindiğinden, yüksek sıcaklıktaki helyum gevrekliği büyük bir endişe kaynağıdır. Ayrıca, bu He, bir Tokamak'ın birincil duvarı tarafından yaşanması muhtemel termal yorgunluk altında, birincil duvar östenitik çeliğinin ömrünü ciddi şekilde sınırlar. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, çok daha iyi bir termal iletkenliğe sahip olduğu için 316 paslanmaz çelik yerine F/M çeliği kullanılmıştır. Bu, 3 nm çapından daha küçük boyutlara sahip yttria parçacıklarının çok sayıda (10^{23} parçacık/ m^3) dağıtıldığı 3. nesil ODS F/M çeliği geliştirerek He'yi nano boyutlu baloncuklara dağıtarak daha fazla ele alınmaktadır. Ayrıca, Ti-Y-O kompleksleri, He kabarcıklarının çekirdeklenmesi için alanlar görevi görür (Trinka ve Singh, 2003; Esteban vd., 2007).

2.10. Nükleer Füzyon Reaktörü Projeleri

Farklı ülkeler, nükleer füzyon enerjisi üretimi açısından ITER deney tesisinden nasıl devam edileceğine ilişkin farklı yaklaşımlar benimsemiştir. Ancak, iki genel strateji ortaya çıkıyor:

- Elektrik üretimi için bir füzyon reaktörü inşa etmeden önce, bazı ülkeler daha küçük yani füzyon gücü 1000 MW'ın altında olan deneysel reaktörler kullanarak fizibilitesini göstermeyi amaçlıyor; Çin Halk Cumhuriyeti, Amerika Birleşik Devletleri ve Hindistan Cumhuriyeti için durum böyledir.
- Diğer ülkeler, füzyon gücü çıkışı 1000 MW'ın üzerinde olan, elektrik üretimi için doğrudan deneysel bir füzyon reaktörü inşa etmeyi hedeflemektedir; bu Kore Cumhuriyeti, Avrupa Atom Enerjisi Topluluğu ve Japonya için geçerlidir.

Bugüne kadar, Rusya Federasyonu'nun bir Tokamak nükleer füzyon tesisi için bilinen bir planı yoktur.

2.11. Ara Deneysel Reaktörler

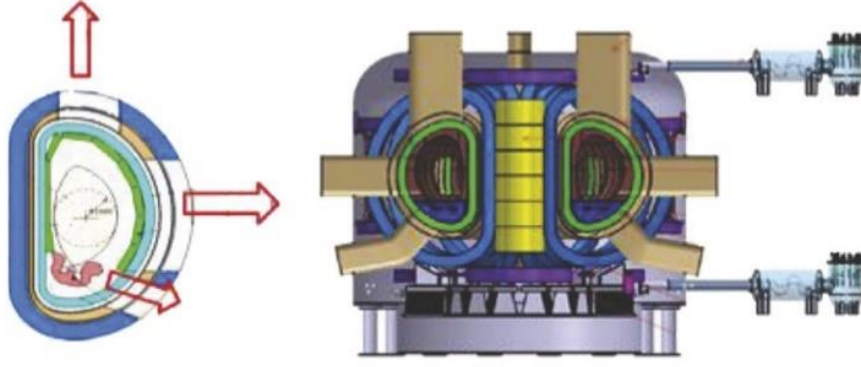
2.11.1. Çin'in CFETR Projesi

Çin Halk Cumhuriyeti, bir füzyon güç reaktörü inşa etmeden önce şunların yapılması gerektiğini düşünmektedir:

- Trityum üretim blanketinin uygulanmasının gerçek etkinliğini göstermek (trityumda kendi kendine yeterlilik, trityum işleme, genel soğutma)
- Yüksek nötron akışı altında kullanılan malzemelerin direncini göstermek
- Saptırıcının tasarımını iyileştirmek

Hedefleriyle, Çin Halk Cumhuriyeti, Çin Füzyon Mühendisliği Test Reaktörü (CFETR) adında bir tesis inşa etmeyi planlamaktadır.

200 MW'lık bir füzyon güç çıkışı ile başlayacak olan işletme, CFETR tesis işletmesinin ikinci fazında 1000 MW'a yükselecektir. Bu proje oldukça fazla sayıda yayına konu olmuştur. Çin Halk Cumhuriyeti, CFETR tesisinde kullanılacak trityum üretim blanketlerinin türünü henüz belirlememiştir. Birkaç çeşit trityum yetiştirme blanketi üzerinde çalışmaktadırlar. Kabul edilen Tokamak konfigürasyonu, bakım için blanketin ve saptırıcının çok büyük sektörlerini çıkarmak için kullanılan vakum kabının orta düzlem, alt ve üst penetrasyonlarına sahip bir konfigürasyondur (Şekil 2.14).



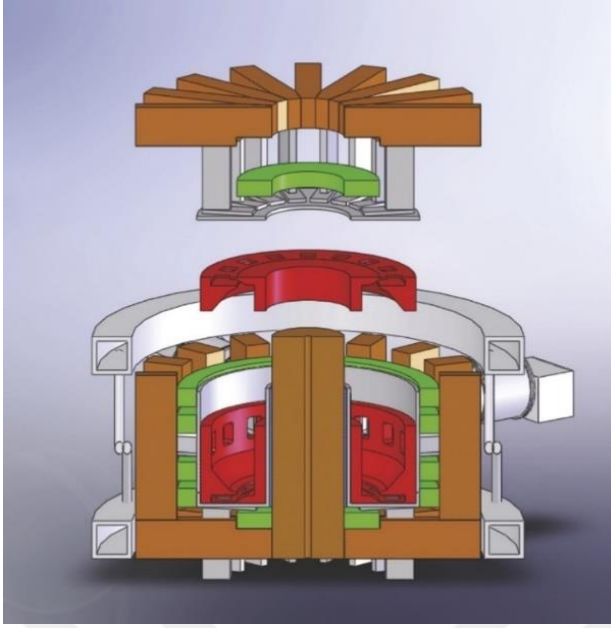
Şekil 2. 14: Çin'in kabul edilen Tokamak konfigürasyonu (Wan, 2013)

2.11.2. Amerika'nın FNSF-AT Projesi

Bugüne kadar ABD hükümetinin bir DEMO reaktörü inşa etme kararı olmamıştır. Ancak, Enerji Bakanlığı (DOE) tarafından bir strateji önerilmiştir. Bu, deneysel bir füzyon güç reaktörü inşa etmeye karar vermeden önce, şunları göstermek için Fusion Nuclear Science Facility Advanced Tokamak (FNSF-AT) adlı bir tesisin inşa edilmesi gerektiğini göstermektedir:

- Nükleer füzyon tesisleri elektrik enerjisi üretirken trityumda kendi kendine yeterli olabilir.
- Blanket ve saptırıcı, bakım gerektirmeden nispeten uzun süre kullanılabilir.
- İlgili fiziksel fenomenler iyi anlaşılmıştır (malzemelerle nötron etkileşimlerinin neden olduğu hasar, blanketin birincil duvarındaki trityum davranışı ve saptırıcı, vb.).

FNSF-AT için tasarım çalışmaları önümüzdeki birkaç yıl içinde başlasa bile, tesis 2030'dan önce faaliyete geçmeyecektir. Dolayısıyla 2050'den önce deneysel bir füzyon güç reaktörü düşünülemez.



Şekil 2. 15: Amerika'nın FNSF-AT tasarımı (Taylor, 2017)

Gelişen bilgiye dayalı olarak uyarlanabilmesi için FNSF-AT, özellikle vakum kabı iç bileşenlerinin çıkarılması için dikey geçişlerin uygulanması sayesinde modüler olacaktır (dikey bakım, Şekil 2.15). Devreye almada 125 MW olan füzyon gücü çıkışı 250 MW'a, ardından 400 MW'a yükseltilebilir. Hedef, yılda yaklaşık %30 plazma ile ortalama çalışma süresidir.

İki tür trityum üretim blanketi değerlendirilmektedir:

- Trityum üretimi için lityum bazlı oksit seramik, nötron güçlendirici olarak berilyum ve yapıları soğutmak için helyum kullanan Helyum Soğutmalı Seramik Üretici (HCCB);
- Nötron güçlendirici olarak trityum üretimi ve yapıların soğutulduğu için helyum ile birlikte bir LiPb ötektik kullanan Çift Soğutma Sıvısı Lityum Kurşun (DCLL). DCLL blanketi tercih edilen seçenek gibi görünmektedir.
- Tüm tesiste bulunan trityum miktarı yaklaşık 4 kg olacaktır.

2.11.3. Hindistan'ın SST-2 Projesi

Hindistan Cumhuriyeti'nin programı, 2027 yılına kadar Durağan Durum Süper İletken Tokamak-2 (SST-2) adlı bir tesisin ve 2037 yılına kadar 3300 MW füzyon gücü çıkışlı bir füzyon güç reaktörünün inşasını öngörmektedir (Şekil 2.16). SST-2 tesisinin temel amacı, gelecekteki güç reaktörü için ekipmanı, özellikle de trityum üretim blanketlerini

Yapısal malzeme

fısyon reaktörlerinde ışınlama

Tritiyum üretim blanketleri

Uluslararası Füzyon Malzemeleri Işınlama Tesisi (UFMIT)

Plazma fiziği araştırması

Aditya (1984)

SST-1 (1996)

ITER ve DEMO destek faaliyetleri

ITER

SST-2 (2027)

DEMO (2037)

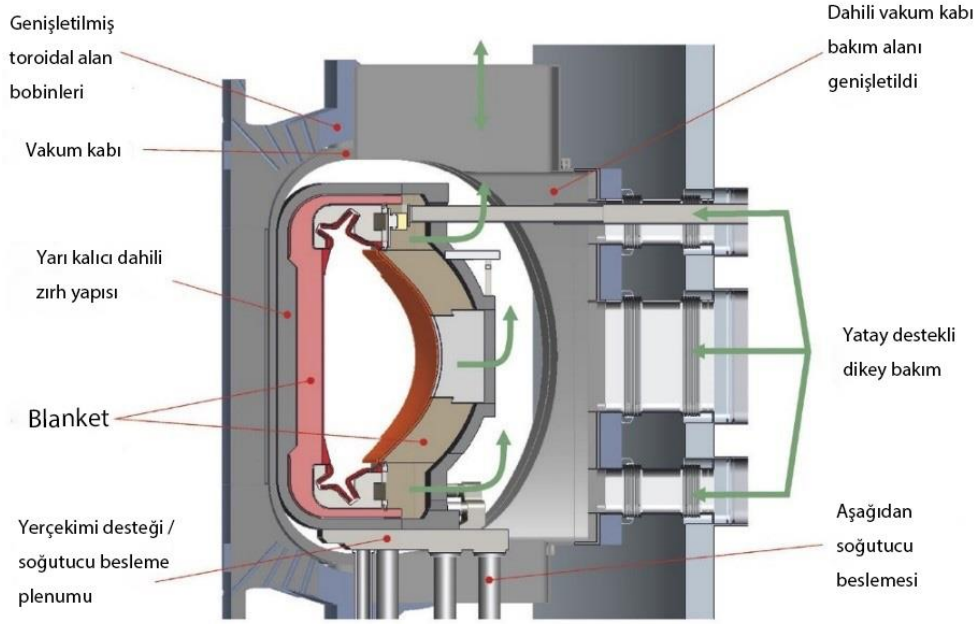
DEMO Tasarım ve inşaat

2.12. Füzyon Güç Reaktörü Projeleri

2037 yılına kadar Kore Cumhuriyeti, vakumlu kabı ITER tesisininkine benzer bir hacme sahip olacak “K-DEMO” adlı bir reaktör inşa etmeyi planlamaktadır (Şekil 2.17). İki aşamada çalıştırılacaktır:

- 33

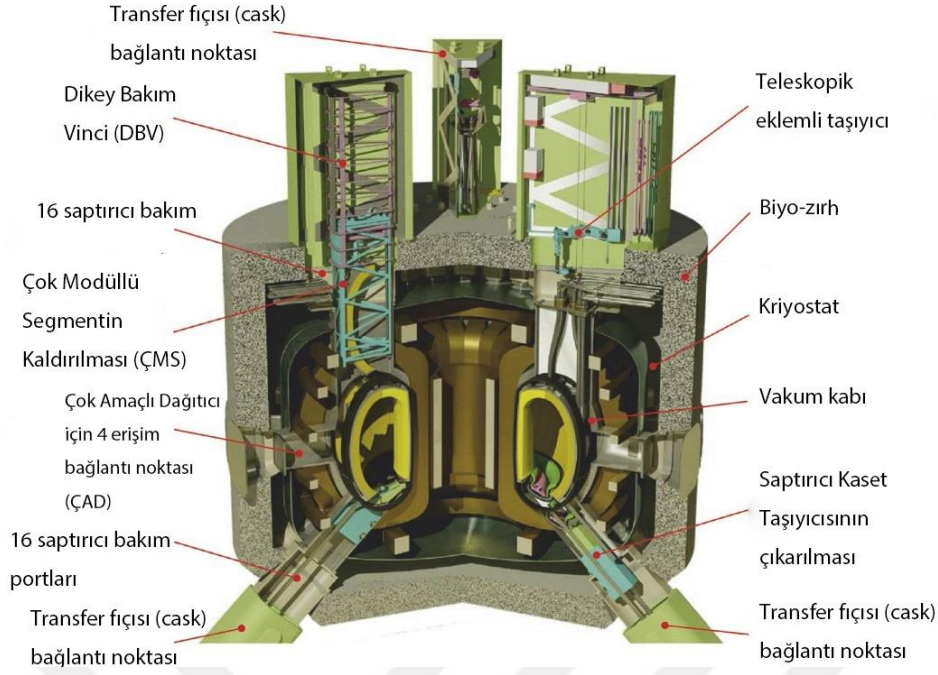
300 MWe net gücü ile oldukça benzer iki seçenek üzerinde çalışılmaktadır. Bu proje oldukça fazla sayıda yayına konu olmuştur.



Şekil 2. 17: Kore'nin, K-DEMO projesinin şematik gösterimi (Lee, 2012)

2.12.2. Avrupa'nın DEMO Projesi

Avrupa Atom Enerjisi Topluluğu, 2040 civarında bir Avrupa DEMO reaktörü işletmeyi hedeflemektedir. Operasyonu, ITER tesisine benzer tasarımlara dayalı olarak, trityum üretim blanketleri ve saptırıcının iyileştirileceği ilk DEMO 1 aşaması ile başlayacak ve kullanılabilirlik çok daha yüksek olacaktır (yaklaşık %30). İkinci işletme aşamasının (DEMO 2) amacı, iyi bir kullanılabilirlik ile yaklaşık 1950 MW'lık füzyon gücü çıkışından yaklaşık 500 MWe net elektrik gücü sağlamak olacaktır. Bu proje çok sayıda yayına konu olmuştur. 2020 civarında bir seçim yapmak amacıyla çeşitli trityum üretim blanketi türleri üzerinde çalışılmaktadır. Avrupa DEMO projesi Tokamak'ın genel tasarımı için dikey bakım tercih edilmiş gibi görünmektedir (Şekil 2.18).



Şekil 2. 18: Avrupa'nın DEMO projesinin genel tasarımı (Loving vd., 2014)

2.12.3. Japonya'nın Projesi

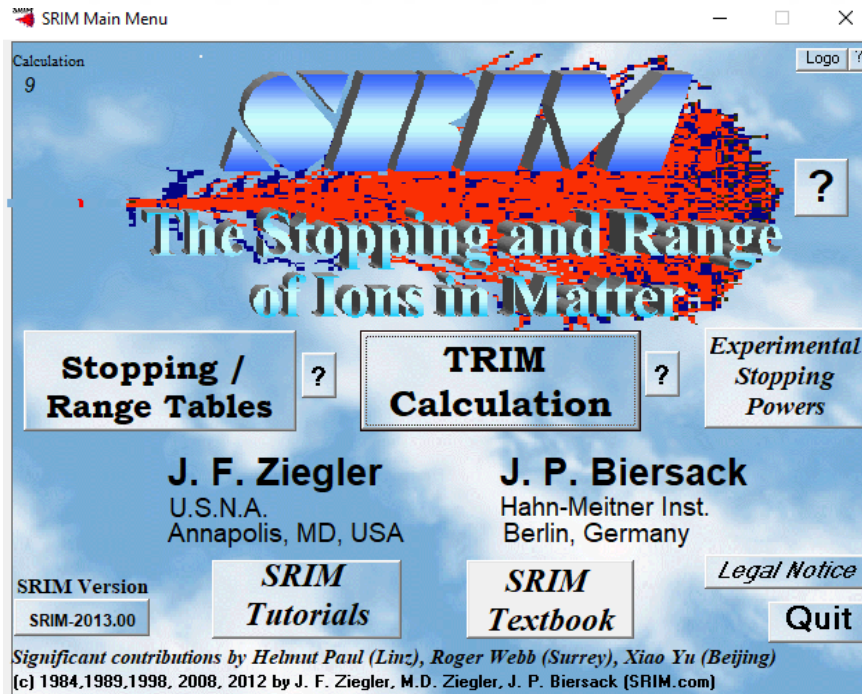
2014 yılına kadar Japonya, uzun süredir yaklaşık 3000 MW füzyon gücü çıkışına sahip SlimCS (ince merkezli solenoid) projesini bu ülke için bir sonraki füzyon tesisi olarak sunmuştur. Ardından Japonya, 1300 ila 1500 MW füzyon gücü çıkışlı yeni bir projeye yönelmiştir. Resmi bir isim olmadığı için birkaç yayına konu olan bu proje, bu belgenin devamında “yeni Japon projesi” olarak anılacaktır. Nihayet 2015 sonlarında Japonya, Ulusal Füzyon Bilimi Enstitüsü (NIFS) üyelerinden Eğitim, Kültür, Spor, Bilim ve Teknoloji Bakanlığı'nın (MEXT) talebi üzerine oluşturulan bir ekip tarafından hazırlanan bir yol haritası yayınlamıştır ve Japonya Atom Enerjisi Ajansı (JAEA), yaklaşık 1000 MW füzyon gücü çıkışına sahip bir DEMO reaktörünün yaklaşık 2030 yılında inşa edilmesini öngörmektedir (IRSN, 2017).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Füzyon reaktörleri uzun zamandır ticari boyutta kullanılmasına rağmen, dizayn, malzeme vb. sorunlarından dolayı henüz ticarileştirilmemiştir. Bu reaktör tipinin ticarileşmesine katkıda bulunabilmek için reaktör bileşenlerinin analizlerinin ve değerlendirmelerinin detaylı bir şekilde yapılması bir gereksinimdir. Bu kapsamda ITER füzyon reaktörünün bileşenlerinden birincil duvarının radyasyona maruz kalması durumunda malzemede ne tür etkileri olduğu teorik olarak saptanacaktır. Burada kullanılacak metodoloji tamamen SRIM/TRIM simülasyon paketine dayanmaktadır.

3.1. SRIM/TRIM

SRIM/TRIM, enerjik iyonların amorf hedeflerle etkileşimlerini hesaplayan bir Monte Carlo bilgisayar programıdır (Şekil 3. 1). SRIM (Stopping and Range of Ions Matter)/TRIM (Transport of Ions), iyon-atom çarpışmalarının kuantum mekaniksel durumlarını kullanarak maddede durma ve iyon aralığı 10 eV ile 2 GeV/amu arasında hesaplama yapan bir program grubudur (daima hareketli atomu iyon olarak ve tüm atomları atom olarak hedefler).



Şekil 3. 1: SRIM yazılımının arayüzü (URL-3, 2021)

3.1.1. TRIM Giriş

TRIM, her biri farklı malzemelerden oluşan sekiz katmana kadar bileşik malzemelerden oluşan karmaşık hedefleri kabul eden hem iyonların nihai 3B dağılımını hem de iyonun enerji kaybıyla ilişkili tüm kinetik olguları sadece TRIM kurulum penceresine istenilen verileri girerek hesaplar (Şekil 3. 2).

The screenshot shows the TRIM Setup Window with the following sections:

- ION DATA:** Symbol (He), Name of Element (Helium), Atomic Number (2), Mass (amu) (4.003), Energy (keV) (3500), Angle of Incidence (? 0).
- TARGET DATA:** Target Layers table with columns: Layer Name, Width, Density (g/cm³), Compound, Corr, Gas. One layer is listed: F82H, 100000, Ang, 7.968, 1.
- Input Elements to Layer:** Table with columns: Symbol, Name, Atomic Number, Weight (amu), Atom Stoich or %, Damage (eV) Disp, Latt, Surf. Elements listed include Cr, W, Mn, V, Si, C, Ta, N.
- Special Parameters:** Name of Calculation (He (3500) into F82H), Stopping Power Version (SRIM-2008), AutoSave at Ion # (10000), Total Number of Ions (99999), Random Number Seed, Plotting Window Depths (Min 0, Max 100000).
- Output Disk Files:** Checkboxes for Ion Ranges, Backscattered Ions, Transmitted Ions/Recoils, Sputtered Atoms, Collision Details.
- Buttons:** Resume saved TRIM calc., Save Input & Run TRIM, Clear All, Calculate Quick Range Table, Main Menu, Problem Solving, Quit.

Şekil 3. 2: TRIM kurulum penceresi (Ziegler vd., 2008)

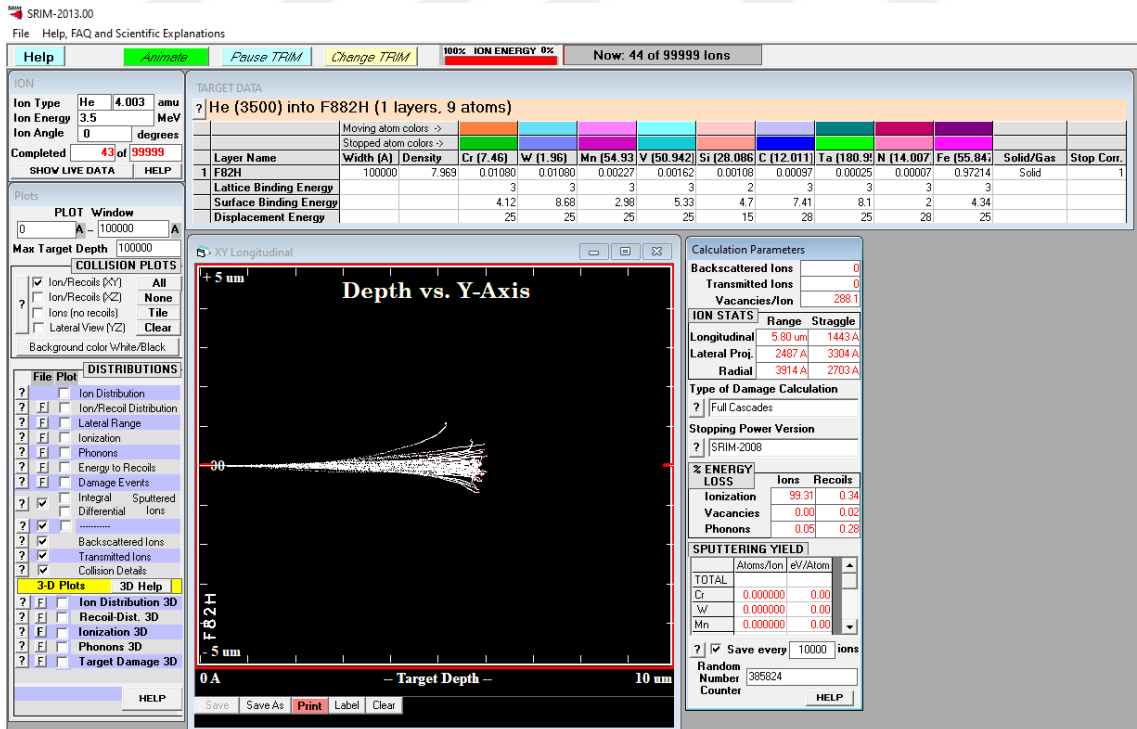
TRIM, hesaplama hızını arttırmak için kullanıcının çarpışma kinetiğinin bazı yönlerini atlmasına izin verir. Hızlı hesaplama, hedef atom basamaklarını yok sayar ve hesaplamayı iyon yörüngelerine sınırlar. Hedefteki tüm hedef atom basamakları detaylı olarak takip edilebilir. Programlar, herhangi bir zamanda kesilebilecek ve daha sonra yeniden başlatılabilecek şekilde yapılmıştır. Hesaplamanın grafikleri, simülasyonun çalıştığı ekrandan (Şekil 3. 3) kaydedilebilir ve gerektiğinde görüntülenebilir.

Simülasyondan bazı açıklamalar ise şöyledir:

- Hedeflerde İyon Durdurma ve Menzil: Maddede ki iyonların enerji kaybının çoğu yönü SRIM'de, maddedeki iyonların durdurulması ve aralığında

hesaplanmıştır. SRIM, herhangi bir elemental hedefte herhangi bir enerjide herhangi bir iyon için durdurma güçleri, aralık ve kama dağılımları tabloları üreten hızlı hesaplamaları içerir. Daha ayrıntılı hesaplamalar karmaşık çok katmanlı konfigürasyonlara sahip hedefleri içerir.

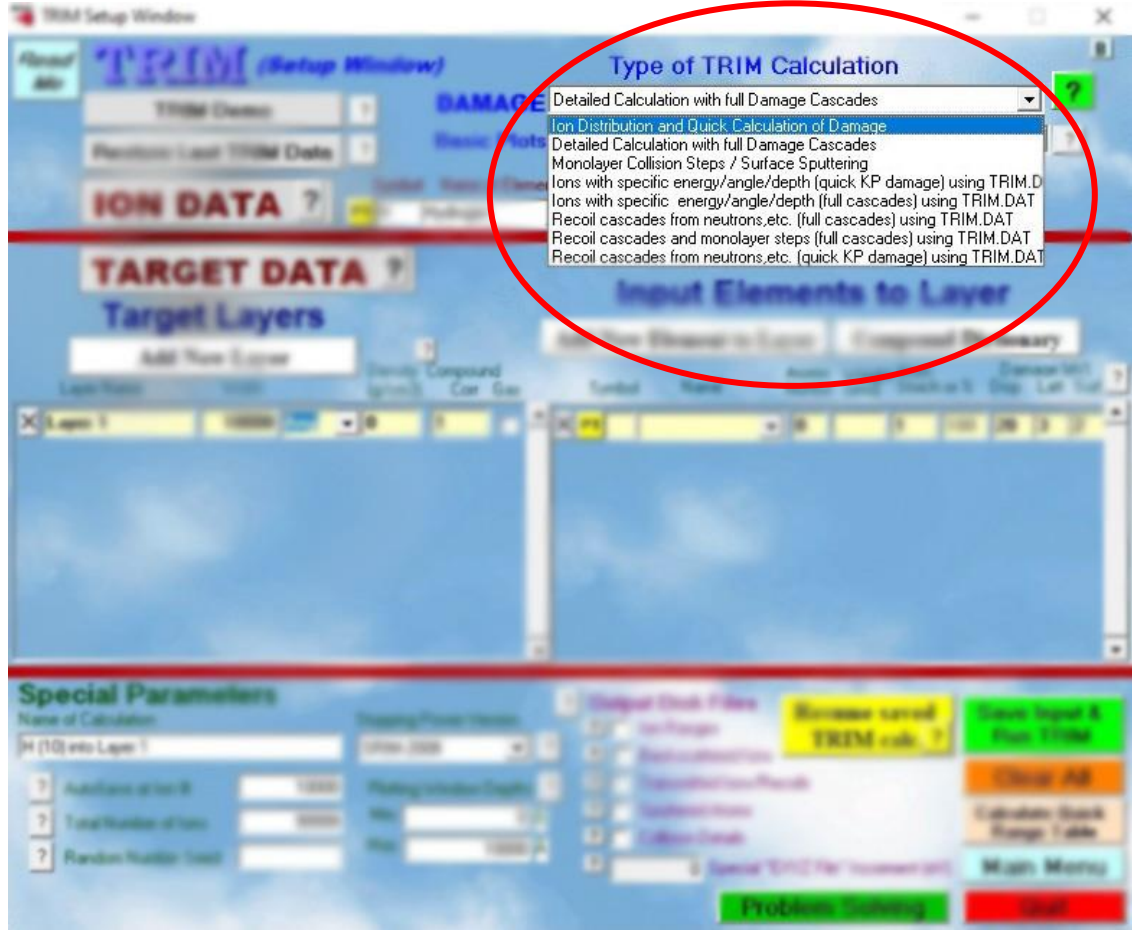
- İyon İmplantasyonu: İyon ışınları, hedef kimyasal ve elektronik özellikleri değiştirmek için atomları enjekte ederek örnekleri değiştirmek için kullanılır. İyon ışını ayrıca atomun yer değiştirmesiyle katı hedeflere zarar verir. Bu tür etkileşimlerin fiziği ile ilişkili kinetik etkinin çoğu SRIM paketinde bulunur.
- Püskürtme: İyon demeti, hedef atomları, iyon püskürtme olarak adlandırılan bir işlemi yapabilir. Herhangi bir enerjideki herhangi bir iyon ile püskürtme işleminin hesaplanması, SRIM paketine dâhil edilmiştir.
- İyon İletimi: İyon ışınları iyonlaşma odacıklarında veya iyon ışın enerjilerini azaltmak için kullanılan enerji parçalayıcı bloklarında olduğu gibi karışık gaz/katı hedef tabakalardan takip edilebilir.
- İyon Işın Terapisi: İyon ışınları özellikle radyasyon onkolojisinde tıbbi tedavide yaygın olarak kullanılmaktadır. Tipik uygulamalar dâhildir.



Şekil 3. 3: TRIM simülasyon ekranı

3.1.2. TRIM Hesaplama Çeşitleri

İstenilen hesaplama durumunu, TRIM Hesaplama Çeşitleri (Şekil 3. 4) bölümünden seçmek mümkündür.



Şekil 3. 4: TRIM hesaplama çeşitleri

3.1.2.1. İyon Dağılımı ve Hasarın Hızlı Hesaplanması

Hedef hasarının veya püskürtmenin ayrıntıları göz ardı ise bu seçenek kullanılmalıdır. Bu seçenekle hesaplanan hasar, Kinchin-Pease formalizmine dayalı hızlı istatistiksel tahminler olacaktır.

- İyonların hedefteki nihai dağılımı
- İyon tarafından hedefe iyonlaşma enerjisi kaybı
- Geri tepme atomlarına aktarılan enerji
- Geri saçılan iyonlar ve iletilen iyonlar doğru bir şekilde hesaplanacaktır.

İyonlar için rastgele sayı üretici geri tepmeler için kullanılandan farklı olduğundan, Tam Hasar Basamak (Full Damage Cascade) seçeneği kullanıldığında aynı iyon aralığı sonuçları alınır. Bu, hesaplamaları karşılaştırmak için elverişlidir.

3.1.2.2. Tam Hasar Basamakları ile Ayrıntılı Hesaplama

Bu seçenek, enerjisi herhangi bir hedef atomun en düşük yer değiştirme enerjisinin altına düşene kadar geri tepen her atomu takip eder. Bu nedenle hedefe verilen tüm çarpışma hasarı analiz edilir. Tek istisna, 20 000 atomu aşan çok nadir kütleli basamaklar içindir. Bu noktada, TRIM'in belleği tükenir ve tek bir basamakta 20 000 geri tepme atom sınırının aşıldığını belirten bir hata mesajı gönderilir. Mesaj gönderildikten sonra hesaplama devam eder. Bu hata, veri dosyası (..\Data\TRIM.cfg.) kullanılarak ortadan kaldırılabilir.

3.1.2.3. Tek Katmanlı Çarpışma Adımları

Bu hesaplama, iyonun hedefin her bir tek katmanında çarpışmasını sağlamak için gereklidir. Bu seçeneği kullanmanın sonuçları, sonuç verisinde veya sonuçta ortalama aralık, iyonizasyon, hasar vb. gibi aynı ortalama miktarları verecektir, fakat hesaplamanın yürütülmesi çok daha uzun sürecektir. Bu tür hesaplama, özel uygulamalar ve COLLISON.txt dosyasında olası her çarpışma hakkında veri oluşturmak için gereklidir.

3.1.2.4. Yüzey Püskürtme Hesaplaması

Bu hesaplama, doğru bir iyon püskürtme hesaplaması için gerekli olan, hedefin her bir tek katmanında iyonun çarpışmasını sağlamayı gerektirir. Yüzey bağlama enerjisi üzerindeki küçük varyasyonların püskürtme verimi üzerindeki etkisini analiz edilmesini sağlar. Bu parametre püskürtmenin merkezinde yer alır ve değerini tahmin etmek bazen zordur. TRIM, bir hedefin yüzey bağlama enerjisinin tahmin edilmesinde normal başlangıç değerleri olan kendi kütüphanesinde (. /Data/ATOMDATA) olan süblimleşme ısıları değerlerinin bir tablosunu sağlar.

3.1.2.5. Nötron / Elektron / Foton Basamakları

Bu seçenek, yalnızca bir hedefteki hasar basamaklarını hesaplamak için kullanılır. Geri tepme basamaklarını başlatan atomlar hakkında kinetik bilgileri içeren TRIM.DAT

dosyasını girdi olarak kullanır. TRIM.DAT dosyası, nötronlar, elektronlar veya fotonlar tarafından hedef atomlara aktarılan enerjiyi hesaplayan başka bir program tarafından oluşturulur. Ardından TRIM bu harici bilgiyi alır ve geri tepme basamaklarından hedefe verilen hasarı hesaplar. Bu seçenek seçilmesi durumunda karşınıza nasıl bir hasar hesaplaması yapmak istediğinizi soran bir alt menü gelecektir.

3.1.2.6. Çeşitli İyon Enerjisi / Açık / Pozisyonlar

Bu seçenek, çeşitli enerjilerde başlayan iyonlarla veya hedef yüzeye göre değişen yörünge açılarıyla veya hedefte çeşitli derinliklerde başlayan hesaplanmayı sağlar. Yaygın bir plazmadan veya hızlı püskürtme nedeniyle yüzeyi gerileyen bir hedef için veya metallere reaktör radyasyon hasarından gelen iyonların hesaplamaları olağandır. Bu seçenek, ilk iyon enerjisi, yörünge ve başlangıç konumu için TRIM.DAT dosyasını gerektirir. Bu seçenek seçilmesi durumunda karşınıza nasıl bir hasar hesaplaması yapmak istediğinizi soran bir alt menü gelecektir.

3.1.2.7.Özel Çok Katmanlı Biyolojik Hedefler

TRIM, standart ICRU ve ICRP hedef atamalarını kullanarak sekiz katmana kadar karmaşık biyolojik hedeflerin hesaplanmasına izin verir. Bu kurulum özeldir.

3.1.3. İyon Verisi

- İyon adını girin, örneğin oksijen için O veya lityum için Li (TRIM harflerin durumunu yok sayar).

Periyodik Elementler Tablosu (Şekil 3.4) elde etmek için PT'ye basın ve sadece elemente tıklayın.

- İyon kütlesi için, TRIM en bol izotopun kütlesini önerir (doğal ağırlığı değil).

Bu değerler periyodik tabloda MAI (En Bol İzotop) olarak gösterilmiştir. Ancak herhangi bir kütle (birim = amu) girebilirsiniz.

- İyon enerjisi için herhangi bir değer girin (birim = keV).

TRIM, 10 eV ile 10 GeV/amu arasındaki tüm değerleri kabul edecektir.

TRIM'in herhangi bir nükleer reaksiyon analizi içermediği konusunda uyarılmalıdır, bu nedenle enerjileri yaklaşık 5 MeV/amu'nun üzerinde olan iyonlar, hesaplamalarına dahil edilmeyen esnek olmayan enerji kayıplarına sahip olabilir.

2 He		Nat. Wgt. = 4.003	Density = 0.1259 g/cm ³
		MAI Mass=4	Atom Dens. = 1.894E+22 at/cm ³
		MAI Wgt.= 4.003	Heat Subl. = 0 eV
			Fermi Vel. = 0.16 Vo
Helium			
IA			VIII
H	IIA		III B IV B VB VIB VIIB
Li Be			He
Na Mg	IIIA IVA VA VIA VIIA	VIIIA	IB IIB
K Ca Sc Ti V Cr Mn Fe Co Ni Cu Zn Ga Ge As Se Br Kr			B C N O F Ne
Rb Sr Y Zr Nb Mo Tc Ru Rh Pd Ag Cd In Sn Sb Te I Xe			Al Si P S Cl Ar
Cs Ba La Hf Ta W Re Os Ir Pt Au Hg Tl Pb Bi Po At Rn			
Fr Ra Ac			
Close		Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu	
		Th Pa U	
Click to select an element			Wgt./Mass = amu Densities = Solid Phase

Şekil 3. 5: Periyodik tablo elementleri (Ziegler vd., 2008)

Süblimleşme Isısı, bir katının (püskürtme için kullanılan) yüzey bağlama enerjisi için varsayılan değerdir ve Fermi Hızı, V_0 ($\sim 1.3 \times 10^6$ m/s), o elemandaki durdurma gücünü hesaplamak için kullanılır.

3.1.3.1. İyonun Gelme Açısı

Bu girdi, iyonun hedef yüzeye göre gelme açısını değiştirir. Normalde iyon, 0° olarak tanımlanan bir açıyla X eksenı boyunca hedef yüzeye diktir. Bu açı $0-89.9^\circ$ arasında herhangi bir açı ile değiştirilebilir. İyon yönündeki değişimin XY düzleminde olduğu varsayılır.

3.1.4. Hedef Verisi

3.1.4.1. Katı veya Gaz Hedefi

TRIM, gaz hedeflerini katı hedeflerine göre farklı şekilde ele alır. Hedef durumu burada belli olmalıdır. Hedefinizin gaz ve katı katmanları karışıkça, program içinde "TRIM'i Karışık Gaz / Katı Hedeflerle Kullanma (Using TRIM with Mixed Gas / Solid Targets)" bölümü okunmalıdır. Kuvars hedef gibi katı halde oksijen gibi normal gazlar içeren hedefler katı olarak bildirilmelidir. İyonların katı fazdaki atomlarla etkileşimi, gazlardaki atomlardan farklı olarak ele alınır.

3.1.4.2. Hedef Öğeler

Hedefinizi oluşturan çeşitli öğeleri, iyonunuzu girdiğiniz şekilde girin, örn. Cu = Bakır. PT düğmesi kullanılarak kullanılarak periyodik tablosuna ulaşılabilir. Katman başına en fazla on iki hedef öge girebilirsiniz. TRIM'in özel bir uygulaması, basamakların katman oluşturan iyon ışınlarıyla karıştırılmasını takip etmektir. Örneğin, bir silikon substrata karıştırılan bir SiO₂ yüzey katmanından silikon atomlarını takip etmek isterseniz, hedef element Si'yi bir kez yüzey katmanı için ve bir kez substrat için olmak üzere iki kez belirtilebilir. TRIM, iki Si atomunu ayrı tutacak ve çeşitli analitik grafiklerde birini diğerinden ayırt edebilme sağlayacaktır.

3.1.4.3. Bileşikler Tablosu

TRIM, basit tek katmanlı hedefler için kullanılabilen ortak bileşiklerin bir ansiklopedisine sahiptir. “TRIM Setup” penceresinde “Compound Dictionary'e” basılarak bu tablolara ulaşılabilir. Bileşik stokiyometrilere ek olarak, bu tablo tipik yoğunlukları ve ayrıca bağlanma bilgilerini sağlar. Birçok hafif bileşik, özellikle hidrokarbonlar için, bu bağlanma bilgisi daha sonra durdurma güçlerinde önemli düzeltmeler yapmak için kullanılır. Bu tabloyu kullanıldığında, hedef giriş adımlarının çoğu atlanabilir.

3.1.4.4. Katman Derinlikleri ve Stokiyometri

Hedef öğeler listesi girildikten sonra, hedef katmanlarını (sekiz katmana kadar) oluşturulabilir. İlk hedef kalınlığı girilir. Varsayılan birimler Angström'dür, ancak birimlerin açılır menüsünü kullanarak mikron, milimetre, metre veya kilometre birimlerini de kullanılabilir. Her katman için, o katmandaki her bir ögenin miktarını girilmelidir. TRIM bu girişi normalleştirir, böylece herhangi bir birim kullanılabilir. Örneğin, bir SiO₂ hedefi için aşağıdakilerden herhangi birini kullanabilirsiniz:

Si(1) O(2); Si(100) O(200); Si(33) O(67); vs.

3.1.4.5. Katman Yoğunluğu

Her katmanın bir yoğunluğu olmalıdır (birim = g/cm³). TRIM, göreceli stokiyometrilere ile ağırlıklandırılmış temel hedef yoğunlukların bir karışımını kullanarak yoğunlukları tahmin edecektir. Ancak yoğunluğun makul olup olmadığını kontrol etmeye özen

göstermelisiniz. Nihai TRIM dağılımları, hedef yoğunlukla ölçeklenir, bu nedenle yoğunluktaki herhangi bir hata, doğrudan aralıklardaki vb. hatalara dönüştürülür.

3.1.4.6. Katman Adı

Her katman, buraya girdiğiniz ad kullanılarak grafiklerde ve tüm veri dosyalarında açıklanır. Silicon veya SiO₂ gibi basit adlar veya Si(33)-Ge(67) gibi daha ayrıntılı tanımlayıcı adlar kullanabilirsiniz.

3.1.5. Hedef Atomların Hasar Enerjileri

Hedefin en sağında, veriler için üç giriş vardır:

- Hasar (eV) / Yer değiştirme (Damage (eV) / Disp.),
- Kafes (Lattice),
- Yüzey (Surface).

Bunlar hedef atomların Yer Değiştirme Enerjisi (Displacement Energy), Kafes Bağlanma Enerjisi (Lattice Binding Energy) ve Yüzey Bağlanma Enerjisi (Surface Binding Energy) değerleridir. TRIM, her öge için varsayılan değerler sağlar.

3.1.5.1. Yer Değiştirme Enerjisi

Bu, bir geri tepmenin hedefin kafes kuvvetlerini yenmesi ve orijinal bölgesinden birden fazla atom aralığını uzaklaştırması için ihtiyaç duyduğu enerjidir. Geri tepen atom birden fazla kafes aralığında hareket etmezse, orijinal yerine geri sıçrayacağı ve geri tepme enerjisini fononlara bırakacağı varsayılır. Tipik değerler, yarı iletkenler için yaklaşık 15 eV ve metaller için 25 eV'dir. Polimerler gibi kırılğan malzemeler için 2-5 eV kadar düşük bir değer daha doğru olabilir. Yer değiştirme fiziğini anlayan kullanıcılar için, farklı hedef atomların her biri için ayrı enerjiler girilebilir. Aynı elementi içeren birkaç katmana sahip hedefler için, örneğin Si üzerinde SiO₂, iki katmandaki Si atomları için farklı yer değiştirme enerjileri kullanabilirsiniz.

3.1.5.2. Yüzey Bağlama Enerjisi

Püskürtme ile ilgileniyorsanız, bu parametre püskürtme veriminin anahtarıdır (hedef yüzeyden ayrılan hedef atom sayısı). Bu, hedef atomların hedefin yüzeyinden ayrılmak için üstesinden gelmesi gereken enerjidir (birim = eV). Bunun yüzey atomları için

geleneksel kimyasal bağlanma enerjisi olmadığına dikkat edin, çünkü radyasyon hasarı, yüzey gevşemesi, yüzey pürüzlülüğü vb. tarafından üretilenler gibi tüm yüzey doğrusal olmayanları içerir. Tipik olarak, süblimleşme ısısı bu enerjinin iyi bir tahminidir. Tek elemanlı hedefler için, TRIM varsayılan olarak her eleman için bir enerji tablosuna sahip olacaktır. Bu değer, yakındaki elementlerin değerlerini de gösterecek olan PT düğmesi kullanılarak periyodik element tablosu kullanılarak görüntülenebilir. Özel bir püskürtme hesaplaması sırasında, yüzey bağlama enerjisindeki küçük değişikliklerin püskürtme verimi üzerinde ne gibi etkileri olacağını size göstermek için Grafikler Menüsü'nde özel grafikler mevcuttur.

3.1.5.3. Kafes Bağlama Enerjisi

Bu, geri tepen her hedef atomun kafes bölgesinden çıkıp hedefte geri teptiğinde kaybettiği enerjidir. Tipik olarak yaklaşık 1-3 eV'dir, ancak çoğu bileşik için değerler bilinmemektedir. Bu enerjinin fononlara (titreşim) gittiği varsayılır. Kafes bağlama enerjisi, ne yazık ki, püskürtme veriminin hesaplanmasında da önemlidir. Bağlanma enerjisinin 1'den 3 eV'e değiştirilmesi, püskürtme verimini 2 kata kadar düşürebilir.

3.1.6. Hesaplama Parametreleri

3.1.6.1. Veri ve Çizim için Görüntüleme Penceresi

TRIM, öngörülen aralık, iyon başına boşluk vb. gibi ortalamalar oluşturmak için tüm hedef derinliğini kullansa da ayrıntılı analiz için hedefin bir bölümünü büyütme mümkündür. Bu, TRIM'in görüntüleme penceresidir. Kalın hedefler için bu önemli bir husustur. Derinlik penceresi, TRIM'in ince ayrıntılar için hedefteki küçük bir derinlik bölgesini genişletmesine olanak tanır. Örneğin, "Gaz İyonizasyon Dedektörü'nde He (5 MeV)" adlı TRIM Demo'da hedef 50 mm derinliktedir. Bununla birlikte, İzleme Penceresi 40 mm-50 mm'ye ayarlanmıştır, bu da hem çizimler hem de veri dosyaları için He iyonlarının son aralığının daha ayrıntılı bir analizine olanak tanır. TRIM, bu pencereyi 100 eşit derinlikte kutuya böler ve burada hesaplama için ortalama verileri, örneğin iyonizasyona karşı enerji kaybı ve son iyon aralıklarını saklar. Başka bir örnek olarak, TRIM Kurulum Penceresi'nin DEMO bölümünde, bir seçim, yaklaşık 8 mm'lik bir aralığa sahip 10 MeV H içine Be içindir. Bu DEMO için derinlik penceresi 7,99 – 8,00 mm olarak ayarlanmıştır. Bu, her iyon yolunun sadece son ucundaki ayrıntılı çarpışmaları

grafik üzerinde görmenize ve ayrıca son çarpışma ayrıntılarını 0,1 µm'lik derinlemesine segmentlere sahip olmanıza olanak tanır. Görüntüleme Penceresi, TRIM Kurulum Penceresi'nde, "Plotting Window Depths" altında ayarlanır. Varsayılan sıfırdır; bu, TRIM'in depolanan verileri için toplam hedef derinliği kullanacağı anlamına gelir. Tek bir atomik tek katmandan daha küçük bölmelerle sonuçlanan bir Derinlik Penceresi girerseniz, bunun istendiğine dair bir uyarı alırsınız (ör. 100 tek katmandan daha az bir pencere derinliği talep etmek, katman kenarlarına yakın bozulmalara neden olabilir. TRIM, bir tek katmanı, bir katmanın atom yoğunluğunun, $N^{-1/3}$ 'ün ters küp kökü olarak tanımlar; burada yoğunluk, N , atom/cm³ birimlerine sahiptir. Dolayısıyla 5×10^{22} atom/cm³ yoğunluğa sahip silikonun katman kalınlığı $(5 \times 10^{22})^{-1/3} = 2,7$ Å'dır.

3.1.6.2. İyon Sayısı

Bu, hesaplanacak iyon sayısını ayarlamanıza izin verir. Sayı 9 999 999 iyon kadar çıkabilir. Normalde, varsayılanı (99 999) seçersiniz ve yeterli istatistiğe sahip olduğunda TRIM'i kesersiniz. Bazı kullanıcılar, farklı TRIM hesaplamalarının doğrudan karşılaştırılabilmesi için seçilen sayıda iyondan sonra durmak ister.

Bir TRIM hesaplamasını tekrarlarsanız, rastgele sayı tohumunu değiştirmedığınız sürece her iyon bir önceki hesaplamanınkiyle aynı olacaktır. Bir hesaplamayı tamamlarsanız (istenilen tüm iyonları bitirirseniz), "Kaydedilen TRIM Hesaplamayı Sürdür" düğmesini kullanarak bu hesaplama devam edebilirsiniz. Ardından hesaplanacak toplam iyon sayısını artırınız.

3.1.6.3. Hesaplamaların Otomatik Kaydedilmesi

Bazı TRIM hesaplamaları günler alabileceğinden, bu, TRIM'in belirli aralıklarla kendini otomatik olarak kaydetmesini sağlar. Bu sayıyı hesaplama sırasında 1-32 000 arasında değiştirebilirsiniz.

3.1.6.4. Rastgele Sayı Çekirdeği

Bu sayı değiştirilmediği sürece TRIM her zaman aynı hesaplamaları (aynı giriş kurulumuyla) üretecektir. 0 ile 999 999 999 arasında herhangi bir tamsayı girilebilir. Varsayılan, rastgele sayı teorisinde neredeyse mistik bir sayı olan ve bulacağınız diğer tüm sayılardan daha iyi olan 716 381'e ayarlanmıştır. Bununla birlikte, benzer fakat farklı

üç hesaplama yapmak istiyorsanız, o zaman çekirdeği 1'den 2'ye 3'e değiştirmek iyi olur. TRIM'deki gerçek rastgele sayı üretici şuradan uyarlanmıştır. TRIM'in sağ alt kısmındaki hesaplama penceresi, kullanılan rasgele sayıların bir sayacıdır. Büyük geri tepmeli hesaplamalar için bu sayı hızla büyür ve 1000'den az iyon için 231'i geçebilir.

3.1.7. Çıktı Disk Dosyaları

Tüm TRIM çıktı dosyaları, TRIM Kurulum penceresinden bildirilebilir veya hesaplama sırasında istenebilir. Bu dosyaları kurulum penceresinde bildirmenin avantajı, ilk iyondan kayda başlamalarıdır.

3.1.7.1. Geri Saçılan / İletilen / Saçılan Atomlar

Bu, her bir geri saçılan, iletilen iyonun veya iletilen, saçılan her hedef atomun kinetiği hakkındaki bilgilerin kaydedileceği şekilde bireysel iyon istatistikleri için veri dosyalarını etkinleştirir. Bu dosyalar ayrıca “TRIM Calculation” penceresinde bu isteklerin yanındaki onay işaretleri kaldırılarak hesaplama sırasında açılıp kapatılabilir.

3.1.7.2. Geri Tepme Çarpışma Dosyası

Bu, yer değiştirmiş bir atoma yol açan her iyon / atom çarpışması için veri dosyalarını etkinleştirir. Bu dosya oldukça hızlı büyüyebilir ve dikkatli kullanılmalıdır (1000 çarpışma yaklaşık 64 kB disk alanı kaplar). Büyük kademeli bazı durumlarda, tek bir iyon >1 MB veri üretecektir (Ziegler vd., 2008).

3.2. Simülasyonda Kullanılan Elementler ve Bileşikler

3.2.1. Krom (Cr)



Şekil 3. 6: Krom (Cr) elementi (URL-4, 2021)

Krom, 1798'de Paris'te Fransız kimyager Nicholas Louis Vauquelin tarafından keşfedilmiştir. Vauquelin elementi asitte çözdü, çözeltide oluşan renk yelpazesinden dolayı Yunanca renk anlamına gelen chroma kelimesinden krom adını vermiştir (Emsley, 1998). Tablo 3.1'de krom elementinin kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 3. 1: Krom elementinin kimyasal özellikleri (Haynes, 2014)

Sembol	Cr	Erime Noktası	1907 °C, 3465 °F, 2180 K
Atom Numarası	24	Kaynama Noktası	2671 °C, 4840 °F, 2944 K
Atomik Ağırlık	51,996	Özkütle (g cm⁻³)	7,14
Elektron Dizilimi	[Ar] 3d ⁵ 4s ¹	Hal	Katı
Periyot	4	Radyoaktivite	Hayır
Grup	6	Değerlik	II, III, IV
Blok	d	Füzyon Isısı	20,5 kJ.mol

3.2.2. Tungsten (W)



Şekil 3. 7: Tungsten (W) elementi (URL-5, 2021)

Tungstenin keşfedilmesi, mineraloji ile ilgilenen ve İspanya'daki Vergara'daki Ruhban Okulu'nda bulunan Juan ve Fausto Elhuyar kardeşlere gitmektedir. 1783'te aynı asidik metal oksidi üretmişlerdir ve hatta karbonla ısıtarak tungsten metaline düşürmüşlerdir (Emsley, 1998). Tablo 3.2'de tungsten elementinin kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 3. 2: Tungsten elementinin kimyasal özellikleri (Haynes, 2014)

Sembol	W	Erime Noktası	3407 °C, 6164,6 °F, 3680,15 K
Atom Numarası	74	Kaynama Noktası	5555 °C, 10 031 °F, 5828,15 K
Atomik Ağırlık	183,84	Özkütle (g cm⁻³)	19,25
Elektron Dizilimi	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁴ 6s ²	Hal	Katı
Periyot	6	Radyoaktivite	Hayır
Grup	6	Değerlik	II, III, IV, V, VI
Blok	d	Füzyon Isısı	35 kJ.mol

3.2.3. Mangan (Mn)



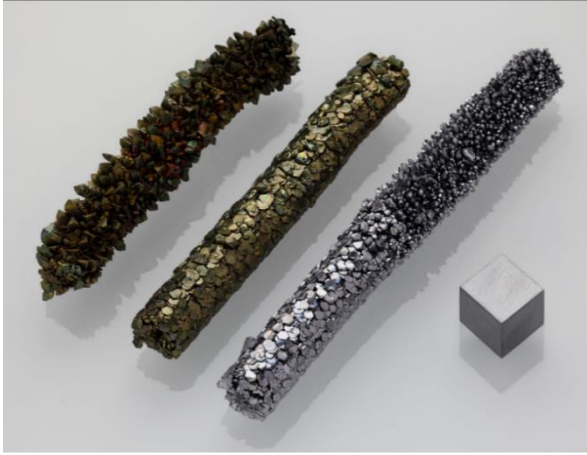
Şekil 3. 8: Mangan (Mn) elementi (URL-6, 2021)

Siyah cevher piroluzit (manganez dioksit, MnO_2) formunda olup, yaklaşık 30 000 yıl önce Fransa'nın Lascaux bölgesinin tarih öncesi mağara ressamı tarafından kullanılmıştır. 1700'lerde birkaç kimyager, metal bileşeni piroluzit içinde izole etmeye çalışmıştır, ancak başarısız olunmuştur. Bunu ilk yapan 1774'te İsveçli kimyager ve mineralog Johan Gottlieb Gahn'dır. Ancak Viyana'da bir öğrenci olan Ignatius Kaim, daha önce 1771'de yazdığı tezinde manganez metalini nasıl ürettiğini anlatmıştır (Emsley, 1998). Tablo 3.3'te mangan elementinin kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 3. 3: Mangan elementinin kimyasal özellikleri (Haynes, 2014)

Sembol	Mn	Erime Noktası	1246 °C, 2275 °F, 1519 K
Atom Numarası	25	Kaynama Noktası	2061 °C, 3742 °F, 2334 K
Atomik Ağırlık	54,938	Özkütle ($g\ cm^{-3}$)	7,47
Elektron Dizilimi	[Ar] 3d ⁵ 4s ²	Hal	Katı
Periyot	4	Radyoaktivite	Hayır
Grup	7	Değerlik	II, III, IV, V, VI, VII
Blok	d	Füzyon Isısı	13,2 kJ.mol

3.2.4. Vanadyum (V)



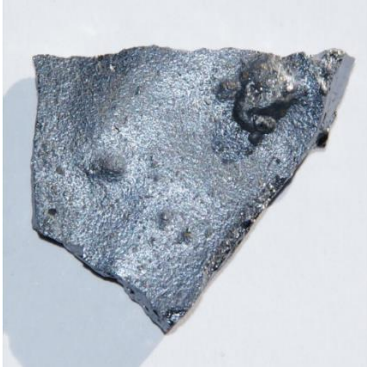
Şekil 3. 9: Vanadyum (V) elementi (URL-7, 2021)

Vanadyum iki kez keşfedilmiştir. İlk kez 1801'de Mineraloji Profesörü olan Manuel del Rio tarafından yapılmıştır. Bunu bir vanadit numunesi olan $Pb_5(VO_4)_3Cl$ 'de bulmuştur fakat bunun krom minerali olduğu sonucuna varılmıştır. Vanadyum ikinci defa 1831'de Nil Gabriel Selfström tarafından Stockholm'de keşfedilmiştir. Dökme demir cevherinden ayırdığı örneğin yeni bir element olduğunu ve başka bir vanadyum minerali üzerinde çalıştığını keşfetmiştir. Saf vanadyum, 1869'da Henry Roscoe eliyle üretilmiştir ve metalin daha önceki örneklerinin vanadyum nitrür olduğunu göstermiştir (Emsley, 1998). Tablo 3.4'te vanadyum elementinin kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 3. 4: Vanadyum elementinin kimyasal özellikleri (Haynes, 2014)

Sembol	V	Erime Noktası	1910 °C, 3470 °F, 2183 K
Atom Numarası	23	Kaynama Noktası	3407 °C, 6165 °F, 3680 K
Atomik Ağırlık	50,9415	Özkütle (g cm⁻³)	6,11
Elektron Dizilimi	[Ar] 3d ³ 4s ²	Hal	Katı
Periyot	4	Radyoaktivite	Hayır
Grup	5	Değerlik	II, III, IV, V
Blok	d	Füzyon Isısı	22,8 kJ.mol

3.2.5. Silisyum\Silikon (Si)



Şekil 3. 10: Silisyum\Silikon (Si) elemanı (URL-8, 2021)

Keskin çakmaktaşı şeklindeki silika (SiO_2), insanlar tarafından yapılan ilk aletler arasındadır. Eski uygarlıklar, kaya kristalleri gibi diğer silika formlarını kullanmışlardır ve kumu cama nasıl çevireceklerini bilmekteydiler.

Elektroliz yoluyla silisin bileşenlerine indirgeme girişimleri başarısız olmuştur. 1811'de Joseph Gay Lussac ve Louis Jacques Thénard, silikon tetraklorürü potasyum metali ile reaksiyona sokmuştur ve çok saf olmayan bir silikon formu üretmiştir. Silikonu keşfetmenin ödülü, 1824'te potasyum florosilikat, potasyum ile ısıtılarak silikon elde eden Stockholm'den İsveçli kimyager Jöns Jacob Berzelius'a aittir. Ürün, potasyum silisit ile kirlenmiştir, ancak bunu, reaksiyona girdiği suyla karıştırarak çıkarmıştır ve böylece nispeten saf silikon tozu elde etmiştir (Emsley, 1998). Tablo 3.5'te silisyum\silikon elementinin kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 3. 5: Silisyum\Silikon elementinin kimyasal özellikleri (Haynes, 2014)

Sembol	Si	Erime Noktası	1414 °C, 2577 °F, 1687 K
Atom Numarası	14	Kaynama Noktası	3265 °C, 5909 °F, 3538 K
Atomik Ağırlık	28,0855	Özkütle (g cm^{-3})	2,33
Elektron Dizilimi	[Ne] $3s^2 3p^2$	Hal	Katı
Periyot	3	Radioaktivite	Hayır
Grup	14	Değerlik	II, IV
Blok	p	Füzyon Isısı	50,2 kJ.mol

3.2.6. Karbon (C)



Şekil 3. 11: Karbon (C) elementi (URL-9, 2021)

Karbon doğal olarak antrasit (bir tür kömür), grafit ve elmas olarak bulunur. Tarihsel olarak daha kolay elde edilebilen kurum veya kömürdür. Nihayetinde bu çeşitli malzemeler aynı elementin biçimleri olarak kabul edilmiştir. Natüralist Giuseppe Averani ve Floransalı Doktor Cipriano Targioni, elmasların ısıtılarak yok edilebileceğini ilk keşfedenler olmuşlardır. 1694'te büyük bir büyüteç kullanarak güneş ışığını bir elmasa odakladılar ve mücevher sonunda kaybolmuştur. Pierre-Joseph Macquer ve Godefroy de Villetaneuse deneyi 1771'de tekrarlamıştır. Daha sonra, 1796'da İngiliz kimyager Smithson Tennant, elmasın yandığında sadece CO₂ oluşturduğunu göstererek, elmasın sadece bir karbon formu olduğunu sonunda kanıtlamıştır (Emsley, 1998). Tablo 3.6'da karbon elementinin kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 3. 6: Karbon elementinin kimyasal özellikleri (Haynes, 2014)

Sembol	C	Erime Noktası	(Süblimleşir) 3825 °C, 6917 °F, 4098 K
Atom Numarası	6	Kaynama Noktası	(Süblimleşir) 3825 °C, 6917 °F, 4098 K
Atomik Ağırlık	12.0107	Özkütle (g cm⁻³)	2,26
Elektron Dizilimi	[He] 2s ² 2p ²	Hal	Katı
Periyot	2	Radyoaktivite	Hayır
Grup	14	Değerlik	II, IV
Blok	p	Füzyon Isısı	105 kJ.mol

3.2.7. Tantal (Ta)



Şekil 3. 12:Tantal (Ta) elementi (URL-10, 2021)

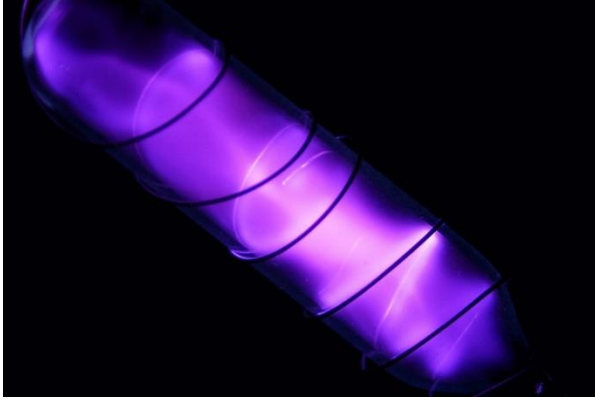
Tantal, 1802'de İsveç Uppsala Üniversitesi'nde Anders Gustav Ekeberg tarafından yeni bir metal olarak rapor edilmiştir. Ancak William Wollaston, çıkarıldığı mineralleri analiz ettiğinde, bunun bir yıl önce keşfedilen niyobyumla aynı olduğunu ilan etmiştir. Benzerliklerinin bir sonucu olarak, kimlikleri konusunda kafa karışıklığı yaşanmıştır. Bu iki element genellikle birlikte bulunur ve kimyasal olarak çok benzer olduklarından, keşif sırasında mevcut yöntemlerle ayrılması zordur.

Heinrich Rose'un tantal ve niyobyumu ayırması ve bunların farklı iki element olduğunu kesin olarak kanıtlaması 1846'ya kadar değildir ve yine de onun tantal örneği hala biraz saf değildir ve 1903'e kadar Werner von Bolton tarafından saf tantal üretilmemiştir (Emsley, 1998). Tablo 3.7'de tantal elementinin kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 3. 7: Tantal elementinin kimyasal özellikleri (Haynes, 2014)

Sembol	Ta	Erime Noktası	3017 °C, 5463 °F, 3290 K
Atom Numarası	73	Kaynama Noktası	5455 °C, 9851 °F, 5728 K
Atomik Ağırlık	28,0855	Özkütle (g cm⁻³)	16,65
Elektron Dizilimi	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ³ 6s ²	Hal	Katı
Periyot	6	Radyoaktivite	Hayır
Grup	5	Değerlik	II, III, IV, V
Blok	d	Füzyon Isısı	36 kJ.mol

3.2.8. Nitrojen/Azot (N)



Şekil 3. 13: Nitrojen/Azot (N) elementi (URL-11, 2021)

Amonyum klorür formundaki azot, simyacılar tarafından tuz amonyak olarak biliniyordu. Mısır'da gübre, tuz ve idrar karışımının ısıtılmasıyla üretilmiştir. Azot gazının kendisi 1760'larda hem Henry Cavendish hem de Joseph Priestley tarafından elde edilmiştir ve bunu havadaki oksijeni kaldırarak yapmışlardır. Yanan bir mumu söndürdüğünü ve onu soluyan bir farenin yakında öleceğini kaydetmişlerdir. Bunu element olarak öneren ilk kişi, Eylül 1772'de yaptığı doktora tezinde genç bir öğrenci Daniel Rutherford'dur (Emsley, 1998). Tablo 3.8'de nitrojen\azot elementinin kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 3. 8: Nitrojen\Azot elementinin kimyasal özellikleri (Haynes, 2014)

Sembol	N	Erime Noktası	-210 °C, -346 °F, 63,2 K
Atom Numarası	7	Kaynama Noktası	-195,795 °C, -320,431 °F, 77,355 K
Atomik Ağırlık	14,006	Özkütle (g cm⁻³)	0,001145
Elektron Dizilimi	[He] 2s ² 2p ³	Hal	Gaz
Periyot	2	Radyoaktivite	Hayır
Grup	15	Değerlik	I, II, III, IV, V
Blok	p	Füzyon Isısı	0,36 kJ.mol

3.2.9. Demir (Fe)



Şekil 3. 14: Demir (Fe) elementi (URL-12, 2021)

Çeşitli demir türlerini açıklayan ilk kişi, 1722'de Ferchault de Réaumur'dur. Çeliğin dövme ve dökme demirin, içerdikleri kömür (karbon) miktarıyla nasıl ayırt edilmesi gerektiğini açıklamıştır. Aynı yüzyılda başlayan Sanayi Devrimi, büyük ölçüde bu metale dayanmıştır (Emsley, 1998). Tablo 3.9'da demir elementinin kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 3. 9: Demir elementinin kimyasal özellikleri (Haynes, 2014)

Sembol	Fe	Erime Noktası	1538 °C, 2800 °F, 1811 K
Atom Numarası	26	Kaynama Noktası	2861 °C, 5182 °F, 3134 K
Atomik Ağırlık	14,006	Özkütle (g cm⁻³)	7,87
Elektron Dizilimi	[Ar] 3d ⁶ 4s ²	Hal	Katı
Periyot	2	Radyoaktivite	Hayır
Grup	8	Değerlik	II, III, VI
Blok	d	Füzyon Isısı	13,8 kJ.mol

3.2.10. F82H

Çeşitli azaltılmış aktivasyonlu ferritik/martensitik çelikler (RAFM'ler), F82H (Fe-8Cr-2W-V-Ta) çelikleri, ITER'deki Japon test blanket modülü (TBM) sistemi için umut verici aday malzemelerden biri olarak kabul edilmiştir. Çünkü F82H çeliği, mükemmel ısı direnci ve iyi ısınlama direncine sahiptir. Mukavemet, sürünme ve tokluk açısından bu malzemenin tatmin edici mekanik performansı, benzersiz mikro yapısından kaynaklanmaktadır. F82H çeliğinin mikro yapısı, çıta martensit ve $M_{23}C_6$ ($M = Cr, W$ ve Fe) ve MX ($M = Ta, V$; $X = C, N$) gibi çökeltilerden oluşan temperli ferritik/martensitik yapı olarak tanımlanır. Bu karbürler görünüşte mekanik özellikleri etkilemek için büyük önem taşımaktadır, bu nedenle F82H çeliğinde çökelti üzerine birçok çalışma araştırılmıştır.

Isıl işlem ve çalışma koşullarından dolayı RAFM çeliklerinin mukavemeti etkilenir. Bir RAFM, F82H çeliği için 1-100 kh uzun vadeli eskitmenin mekanik özellikler üzerindeki etkileri rapor edilmiştir. Mikroyapısal analizler, Laves fazının (Fe_2W) yaşlandırma sırasında 650 °C'de 3 kh, 600 °C ve üzerinde 10-30 kh, 550 °C ve üzerinde ise 100 kh için çökeldiğini netleştirmiştir (Kano vd., 2016). Tablo 3.10'da SRIM'den elde edilen F82H verileri verilmiştir.

Tablo 3. 10: SRIM'den elde edilen F82H verileri

Sembol	Element	Atom Sayısı	Ağırlık	Atom Yüzdeliği	Yer değiştirme	Kafes	Yüzey
Cr	Krom	24	51.996	7.46	25	3	4.12
W	Tungsten	74	183.85	1.96	25	3	8.68
Mn	Manganez	25	54.938	0.21	25	3	2.98
V	Vanadyum	23	50.942	0.15	25	3	5.33
Si	Silikon	14	28.086	0.1	15	2	4.7
C	Karbon	6	12.011	0.09	28	3	7.41
Ta	Tantal	73	180.95	0.023	25	3	8.1
N	Azot	7	14.007	0.006	28	3	2
Fe	Demir	26	55.847	90.001	25	3	4.34

3.2.11. JLF-1

Düşük aktivasyonlu ferritik/martensitik çelik JLF-1(8.92Cr–2W), füzyon reaktörlerinin örtü yapı bileşenleri için aday alaşımlardan biri olarak kabul edilir. Füzyon reaktörünün birinci duvar, battaniyeler ve manyetik sistem gibi yapısal bileşenleri, reaktör ömrü boyunca gerilme, sürünme, yorulma, sürünme-yorulma deformasyonuna dayanmalıdır. Yapısal malzemeler olarak uygulamada, JLF-1 çeliğinin yüksek sıcaklıktaki çekme özelliğini ve mikroyapı değişimini değerlendirmek gerekir, çünkü malzemenin yüksek sıcaklıktaki çekme özellikleri tasarım için kilit noktadır (Li, 2012). Tablo 3.11’de SRIM’den elde edilen JLF-1 verileri verilmiştir.

Tablo 3. 11: SRIM’den elde edilen JLF-1 verileri

Sembol	Element	Atom Sayısı	Ağırlık	Atom Yüzdeliği	Yer değiştirme	Kafes	Yüzey
Cr	Krom	24	51.996	7.46	25	3	4.12
W	Tungsten	74	183.85	1.96	25	3	8.68
Mn	Manganez	25	54.938	0.21	25	3	2.98
V	Vanadyum	23	50.942	0.15	25	3	5.33
Si	Silikon	14	28.086	0.1	15	2	4.7
C	Karbon	6	12.011	0.09	28	3	7.41
Ta	Tantal	73	180.95	0.023	25	3	8.1
N	Azot	7	14.007	0.006	28	3	2
Fe	Demir	26	55.847	90.001	25	3	4.34

3.2.12. Eurofer-97

Eurofer-97, Avrupa Füzyon Geliştirme Anlaşması (EFDA)-Yapısal Malzemeler çerçevesinde bir Avrupa referans malzemesidir. Bu alaşım, azaltılmış aktivasyon ferritik/martensitik çelikler tip 9CrWTaV için gerekli kimyasal bileşim özelliklerine göre Avrupa’da üretilmiştir. Yapısal malzeme olarak niteliği günümüzde araştırılmakta ve konvansiyonel özelliklerin karakterizasyonunu ve 70 dpa’lık hasar seviyelerine kadar

ışınlama davranışının belirlenmesini içermektedir. Önerilen çalışma sıcaklığı 300-550 °C 'dir (Fernández, 2004). Tablo 3.12'de SRIM'den elde edilen Eurofer-97 verileri verilmiştir.

Tablo 3. 12: SRIM'den elde edilen Eurofer-97 verileri

Sembol	Element	Atom Sayısı	Ağırlık	Atom Yüzdeliği	Yer değiştirme	Kafes	Yüzey
Cr	Krom	24	51.996	7.46	25	3	4.12
W	Tungsten	74	183.85	1.96	25	3	8.68
Mn	Manganez	25	54.938	0.21	25	3	2.98
V	Vanadyum	23	50.942	0.15	25	3	5.33
Si	Silikon	14	28.086	0.1	15	2	4.7
C	Karbon	6	12.011	0.09	28	3	7.41
Ta	Tantal	73	180.95	0.023	25	3	8.1
N	Azot	7	14.007	0.006	28	3	2
Fe	Demir	26	55.847	90.001	25	3	4.34

3.2.13. CLAM

CLAM çeliğinin/alaşımının kimyasal bileşimi, aynı diğer malzemelerde benzerlik olduğu gibi 9Cr1.5WVTa nominal bileşimine dayanmaktadır. Niyobyum ve molibden elementleri uzun süreli aktivasyona neden olur ve yaygın martenzitik çeliklere kıyasla W, V ve Ta ile değiştirilir. Yüksek sıcaklıklarda özellikleri iyileştirmek için tantal içeriği %0,15'e ayarlanabilir fakat önerilen maksimum servis sıcaklığı 550 °C olması tavsiye edilir. O, N, S ve Nb vb. gibi safsızlık elementleri mümkün olduğu kadar düşük bir seviyeye düşürülür (Li vd., 2007). Tablo 3.13'te SRIM'den elde edilen CLAM verileri verilmiştir.

Tablo 3. 13: SRIM'den elde edilen CLAM verileri

Sembol	Element	Atom Sayısı	Ağırlık	Atom Yüzdeliği	Yer değiştirme	Kafes	Yüzey
Cr	Krom	24	51,996	7,46	25	3	4,12
W	Tungsten	74	183,85	1,96	25	3	8,68
Mn	Manganez	25	54,938	0,21	25	3	2,98
V	Vanadyum	23	50,942	0,15	25	3	5,33
Si	Silikon	14	28,086	0,1	15	2	4,7
C	Karbon	6	12,011	0,09	28	3	7,41
Ta	Tantal	73	180,95	0,023	25	3	8,1
N	Azot	7	14,007	0,006	28	3	2
Fe	Demir	26	55,847	90,001	25	3	4,34

4. BULGULAR

Radyasyonun etkisiyle yüksek nokta kusur konsantrasyonları, yer değiştirme d6ng6leri ve boşluklar gibi kusurlar oluşacaktır. Radyasyona dayanıklı olması gereken bu birincil duvar malzemeleri d6ř6k p6řk6rtme verimi, y6ksek erime noktası, iyi termal-mekanik 6zellikler, y6ksek termal iletkenlik ve tekrarlanan termal şoka dayanma yeteneği gibi bazı gereksinimleri karşılamalıdır. Hidrojen ve helyum gibi d6ř6k atom numaralı gazlar, kabarcık oluşumuna yol açabilirken, y6ksek atom numaralı 6z6nenler ikinci fazlar olarak k6melenebilir veya 6kebilir. Bu mikroyapısal oluşum, termal iletkenlik ve dayanıklılık kaybına yol açacaktır. Başka bir plazma etkileşimi zorluğu, helyum implantasyonu, y6zeyi ciddi şekilde değiştirerek toz oluşumuna ve dolayısıyla plazmanın kirlenmesine yol açabilir. Ayrıca gaz kabarcıkları ve ilgili yapıların oluşumu yoluyla y6zeye yakın b6lgeyi gevrekleştirmesi muhtemeldir.

Bu tezde d6rt farklı birincil duvar malzemesi ele alınmıştır. ITER reakt6r6n6n birincil duvar yapısında kullanılabilecek F82H, JLF-1, Eurofer-97 ve CLAM materyallerine etki eden helyum (He), hidrojen (H), kripton (Kr) ve xenon (Xe) ile etkileşim durumları sonucunda gevrekleşme, şişme, erozyon veya p6řk6rtme gibi malzemelerde çeşitli hasarlara yol açabilme durumları g6z 6n6ne alınıp, bir Monte Carlo kodu olan SRIM/TRIM aracılığıyla referans malzemeler, tablolarda g6sterilen değerler ile sim6le edilmiştir. Sonuçlanan grafikler, toplam yer değiştirmeler, iyonizasyon, iyon aralıkları, hedef iyonizasyon, titreşimler, çarpışma olayları, derinlik ve Y eksenini grafikleri incelenmiştir.

4.1. F82H ile Yapılan Sim6lasyonlar

Bu b6l6mde temsil olarak sadece F82H ile yapılan sim6lasyonun sonuç grafikleri yer almaktadır. ıkan sonuçların değerlendirilmesi 6ncelik F82H ile olup diğer alaşımlar ile de karşılaştırma olmuştur. Diğer alaşımların grafikleri Ekler b6l6m6nde olup kategorize edilmemiştir.

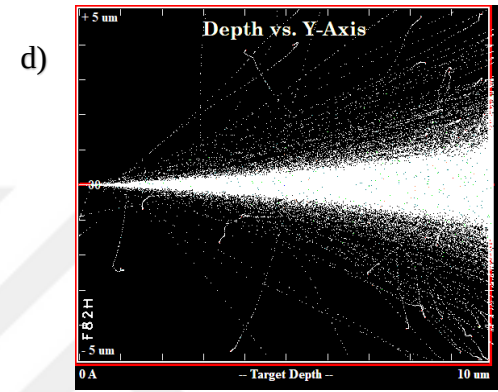
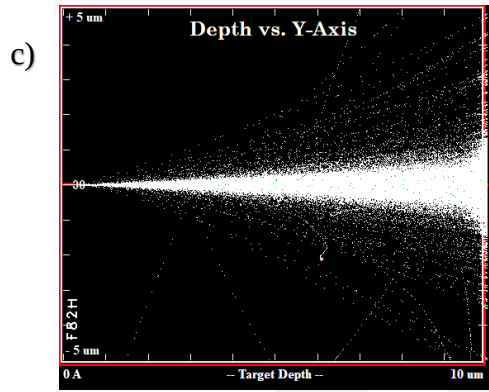
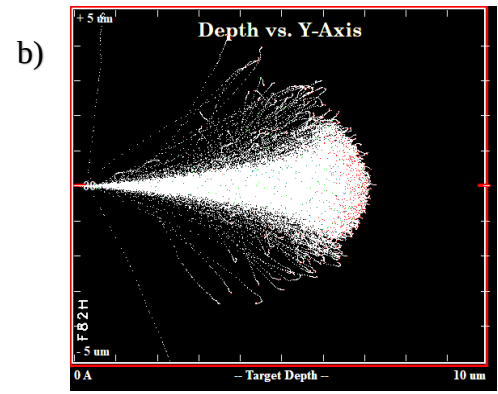
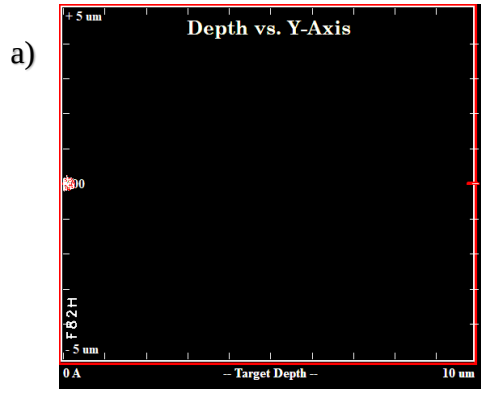
4.1.1. Derinlik ve Y Eksen

Y eksen ve enine görünümleri verilen grafiklerde, kırmızı noktalar, hedef atomların kafes(lattice) bölgelerinden vurulduğu iyon ve hedef atomlar arasındaki çarpışmalardır. Çoğunlukta ki yeşil veya beyaz alanlar ise geri tepen hedef atomlar, hedef malzeme atomları arasındaki çarpışmalardır. Geri tepme hedef atomları hasar süresi içinde çarpışma çağılayanlarına neden olur. Nokta yalnızca, aktarılan enerji, vurulan atomun kafes (lattice) bölgesinden yer değiştirmesine yetecek kadar büyük olduğunda çizilmektedir. Bu nedenle grafik, gerçekleşen yer değiştirme sayısını gösterir.

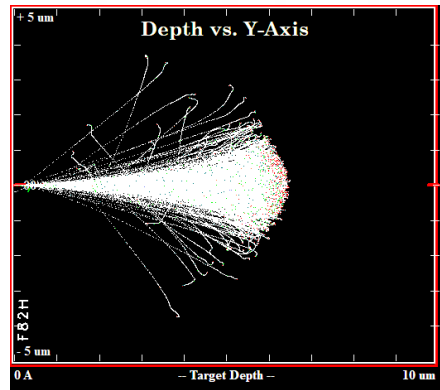
Şekilde, F82H alaşımının yüzeyi üzerinde 20 keV, 1 MeV, 1,2 MeV, 1,5 MeV ve 3,5 MeV enerjilerde hızlandırılıp, hidrojen, helyum, kripton ve xenon iyonlarının Y eksen üzerinde dağılım profili ve yolu gösterilmektedir. Ana malzemenin kristal yapısından ve uygulanan gerilimin büyüklüğüne göre düzensiz yörüngeler gözlemlenmiştir. Gönderilen iyonların yolu, malzemede F82H molekülleri için;

- Hidrojen- 20 keV’de, 0 ile 1 μm (Şekil 4. 1a)
- Hidrojen- 1 MeV’de, 7 ile 8 μm (Şekil 4. 1b)
- Hidrojen- 1,5 MeV ve 2 MeV’de, 10 μm den fazla (Şekil 4. 1c, 4. 1d)
- Helyum-3,5 MeV’de 6 ile 7 μm (Şekil 4. 2)
- Kripton- 1,2 MeV’de 0 ile 1 μm (Şekil 4. 3)
- Xenon- 1,2 MeV’de 0 ile 1 μm (Şekil 4. 4) derinliklerine kadar ulaşmıştır.

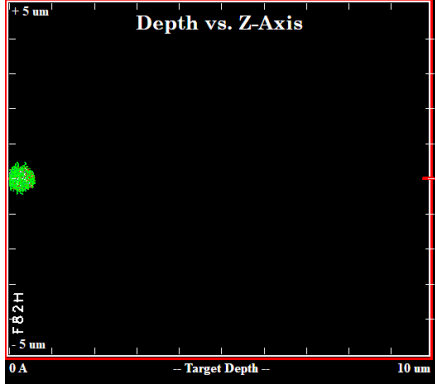
Bu F82H alaşımının grafikleri Ekler’de yer alan diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında kayda değer farklı bir durum olmadığı gözlemlenmiştir.



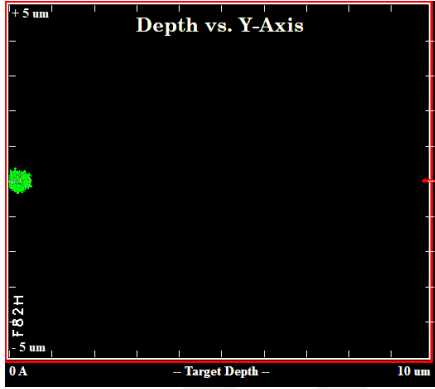
Şekil 4. 1: Hidrojen iyonunun, a) 20 keV, b) 1 MeV c) 1,5 MeV, d) 2 MeV enerjileri ile Derinlik ve Y Eksenli Grafikleri



Şekil 4. 2: Helyum iyonunun 3,5 MeV enerji ile Derinlik ve Y eksenli Grafiği



Şekil 4. 3: Kripton iyonunun 1.2 MeV enerji ile Derinlik ve Z eksenini Grafiği



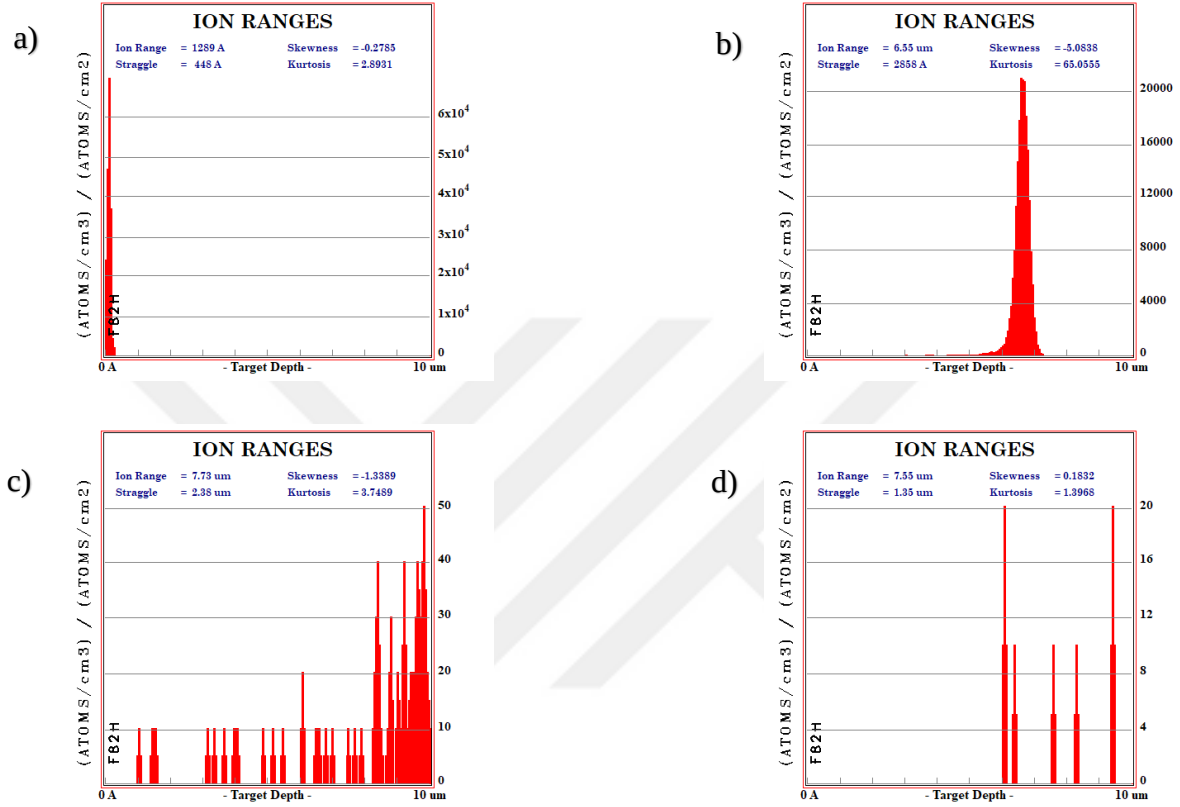
Şekil 4. 4: Xenon iyonunun 1.2 MeV enerji ile Derinlik ve Y eksenini Grafiği

4.1.2. İyon Aralıkları

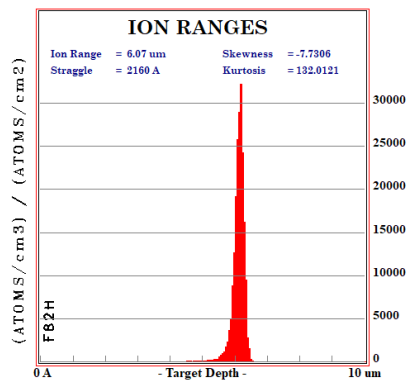
İyon aralıkları belirli bir derinlikte iyonların konsantrasyonunu detaylandıran bir grafik sağlayarak derinlik ve y eksenini verilerini daha da detaylandırmaktadır. İyon aralıklarının durumunu anlamak ve gerçek iyon konsantrasyonlarını veya iyon yoğunluğu dağılımını elde etmek için, $(\text{Atom}/\text{cm}^3)/(\text{Atom}/\text{cm}^2)$ Y eksenini birimleri, yoğunluk dağılımını $(\text{Atom}/\text{cm}^3)$ elde etmek için doz $(\text{Atom}/\text{cm}^2)$ ile çarpılmalıdır.

Sonuçlara dayanarak, iyonizasyon, 20 keV ile 3,5 MeV'de gönderilen iyonların 2 boyutlu derinlik-konsantrasyon profilleri Şekil (4. 5, 4. 6, 4. 7, 4. 8)'de gösterilmektedir. En düşük H (20 keV) ve en yüksek H (1,5 MeV) iyon konsantrasyonunun sırasıyla 0,1289 μm (1289 Å) ve 7,75 μm 'de bulunduğu fark edilmiştir. Bu, iyonize olmuş H (20 keV) atomunun, malzemenin daha yüzeysel katmanlarında yer alacağını, H (1,5 MeV) atomunun ise kısa aralıklar ile malzemenin iç yüzeyinde, belli aralıklar ile daha yüksek bir konsantrasyon elde edeceğini göstermektedir.

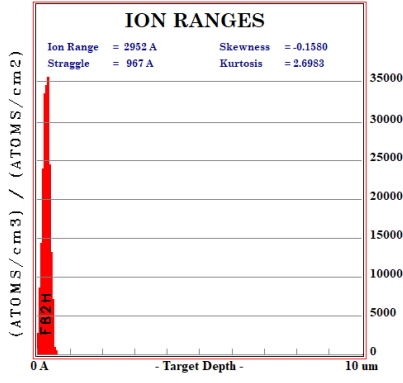
Benzer şekilde diğer alaşımları ile birlikte karşılaştıracak olursak, F82H ile birlikte aynı iyonların en düşük ve yüksek değerlere sahip olduğunu görürüz. Sonuçlara ve enerji dağılımlarına dayanarak, çok az farkla da olsa CLAM alaşımına gönderilen, H (1,5 MeV) iyonlarının, alana daha çok temas ettiğini söylemek mümkündür.



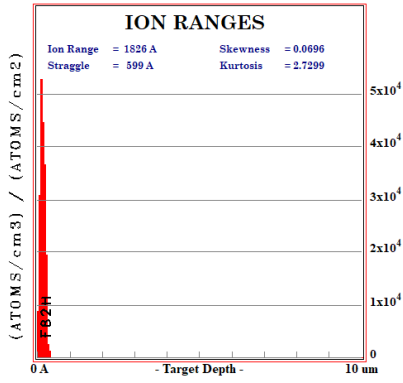
Şekil 4. 5: Hidrojen iyonunun, a) 20 keV, b) 1 MeV c) 1,5 MeV, d) 2 MeV enerjileri ile İyon Aralıkları Grafikleri



Şekil 4. 6: Helyum iyonunun İyon Aralıkları Grafiği



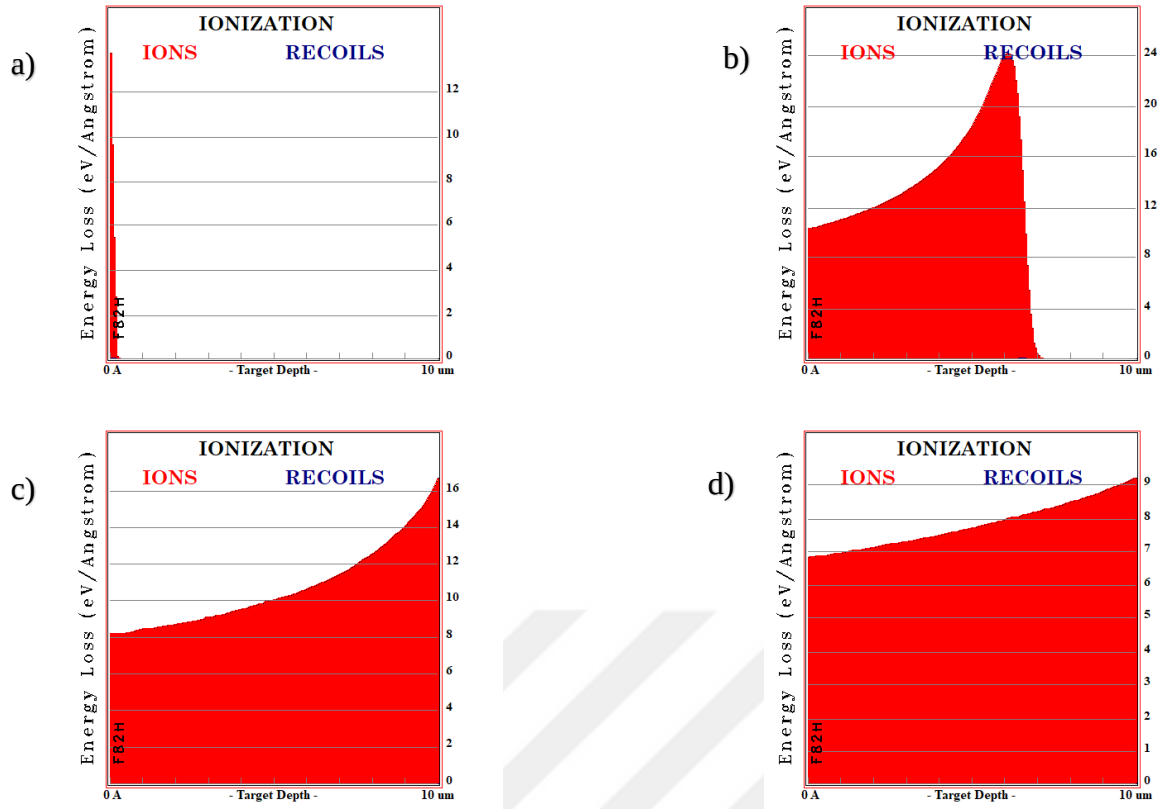
Şekil 4. 7: Kripton iyonunun İyon Aralıkları Grafiği



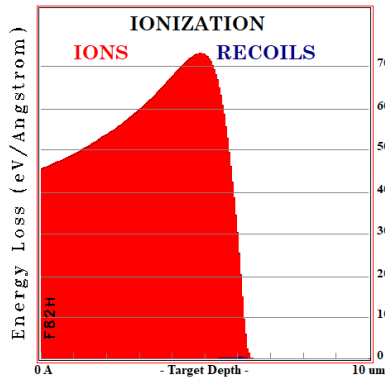
Şekil 4. 8: Xenon iyonunun İyon Aralıkları Grafiği

4.1.3. İyonizasyon

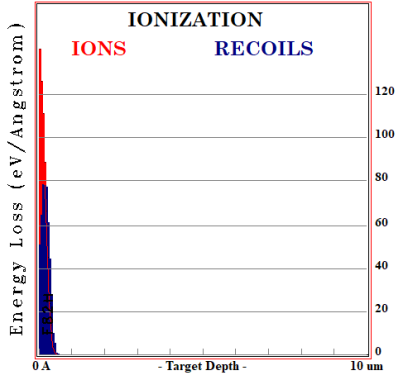
İyonizasyon grafiği, iyonların elektronik enerji kayıplarını veya iyonların hedef elektronlardan kaynaklanan kayıplarını eV/Angström cinsinden detaylandırır. Şekil (4. 9, 4. 10, 4. 11, 4. 12)'de, kırmızı alan, hedef iyon elektronlarından kaynaklanan kayıpları ayrıntılarıyla göstermektedir. Bu kayıplar sırasıyla en az H (2 MeV)' de 9 eV/Angström, en çok Xe'de 145 eV/Angström olarak görülür. Grafiğin mavi alanı ise geri tepme hedef atomlarından kaynaklanan elektronik kayıpları detaylandırır. Geri tepen atomlar, hedef elektronların göreceli hareketinden önemli ölçüde daha yavaş olduğundan, bu kayıplar için toplam etkileşimler daha azdır. Öyle ki, sadece Kr ve Xe'de geri tepen elektronları yani mavi alanı görmekteyiz. Bu iki hedef iyon haricinde diğer iyonizasyon durumları çok daha az kayba sahiptir. Bu durumlar diğer alaşımlar içinde geçerlidir.



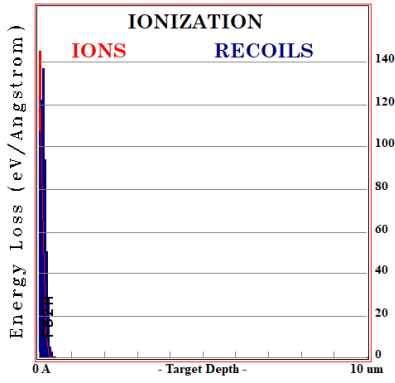
Şekil 4. 9: Hidrojen iyonunun, a) 20 keV, b) 1 MeV c) 1,5 MeV, d) 2 MeV enerjileri ile İyonizasyon Grafikleri



Şekil 4. 10: Helyum iyonunun İyonizasyon Grafiği



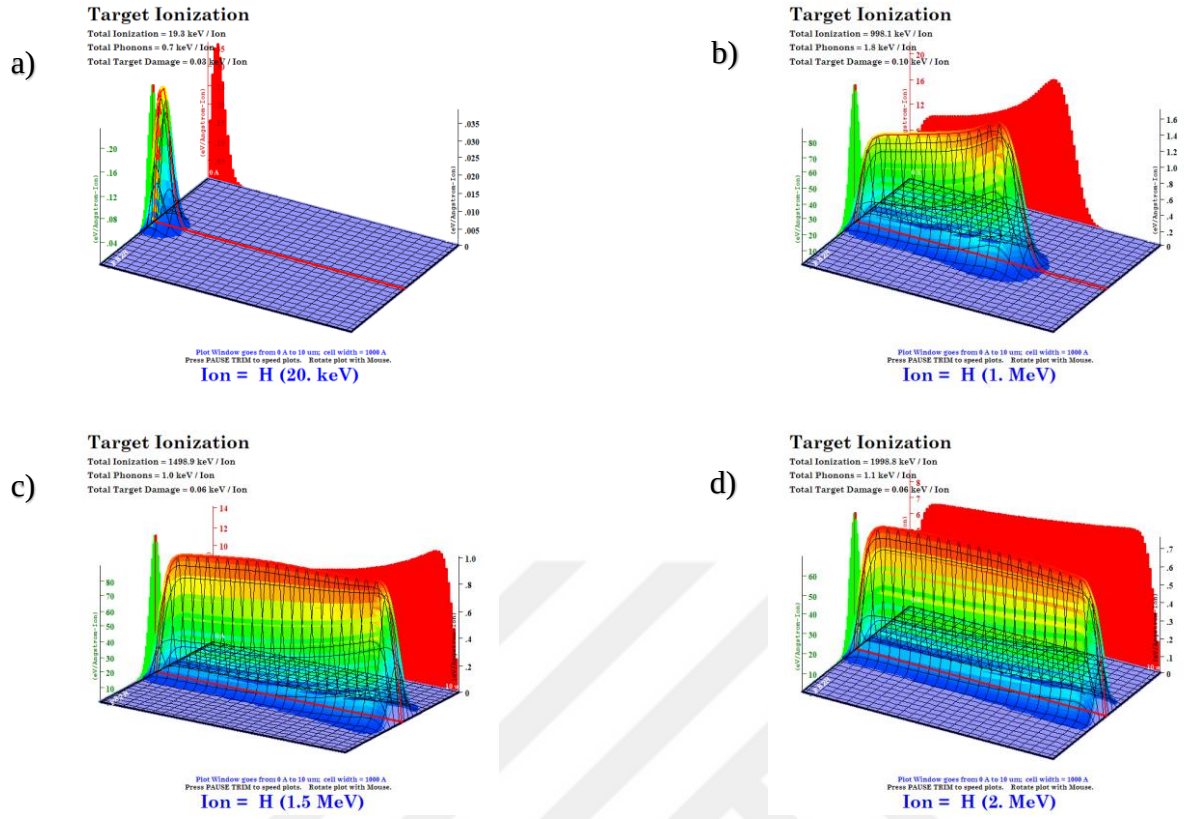
Şekil 4. 11: Kripton iyonunun İyonizasyon Grafiği



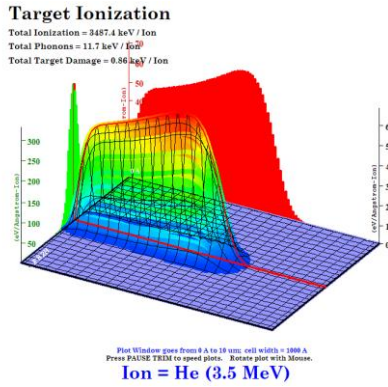
Şekil 4. 12: Xenon iyonunun İyonizasyon Grafiği

4.1.4. Hedef İyonizasyon (3B)

Bu bölümde hedef iyonizasyon grafiğinin 3 boyutlu olarak gösterimi, Şekil (4. 13, 4. 14, 4. 15, 4. 16)'da yer almaktadır. Toplam iyonizasyona baktığımızda, tüm iyonların gönderilen enerjilerinde, toplam iyonlaşmasında kısmi olarak bir kayıp yaşanmıştır. Bu kayıpların bir bölümü titreşim, bir bölümü ise hedef hasarı olarak karşımıza çıkmaktadır. En çok bölünen enerji Xe ve Kr'de görülmektedir. Oransal olarak baktığımızda en az kayba H (2 MeV) sahiptir. Oluşan durumlar diğer alaşımlar ile karşılaştırıldığında benzer sonuçlar alınmıştır.

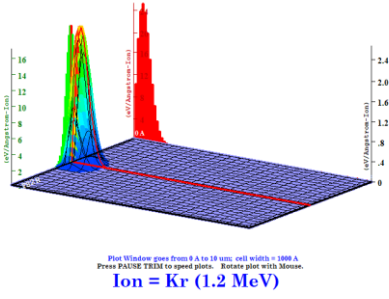


Şekil 4. 13: Hidrojen iyonunun, a) 20 keV, b) 1 MeV c) 1,5 MeV, d) 2 MeV enerjileri ile Hedef İyonizasyon (3B) Grafikleri



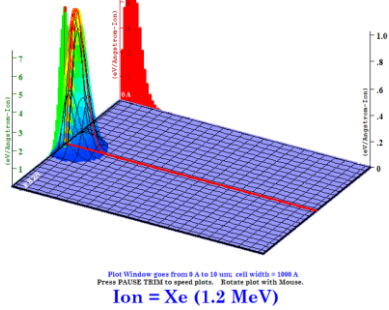
Şekil 4. 14: Helyum iyonunun Hedef İyonizasyon (3B) Grafiği

Target Ionization
 Total Ionization = 599.1 keV / Ion
 Total Phonons = 547.7 keV / Ion
 Total Target Damage = 53.16 keV / Ion



Şekil 4. 15: Kripton iyonunun Hedef İyonizasyon (3B) Grafiği

Target Ionization
 Total Ionization = 526.6 keV / Ion
 Total Phonons = 618.6 keV / Ion
 Total Target Damage = 59.75 keV / Ion



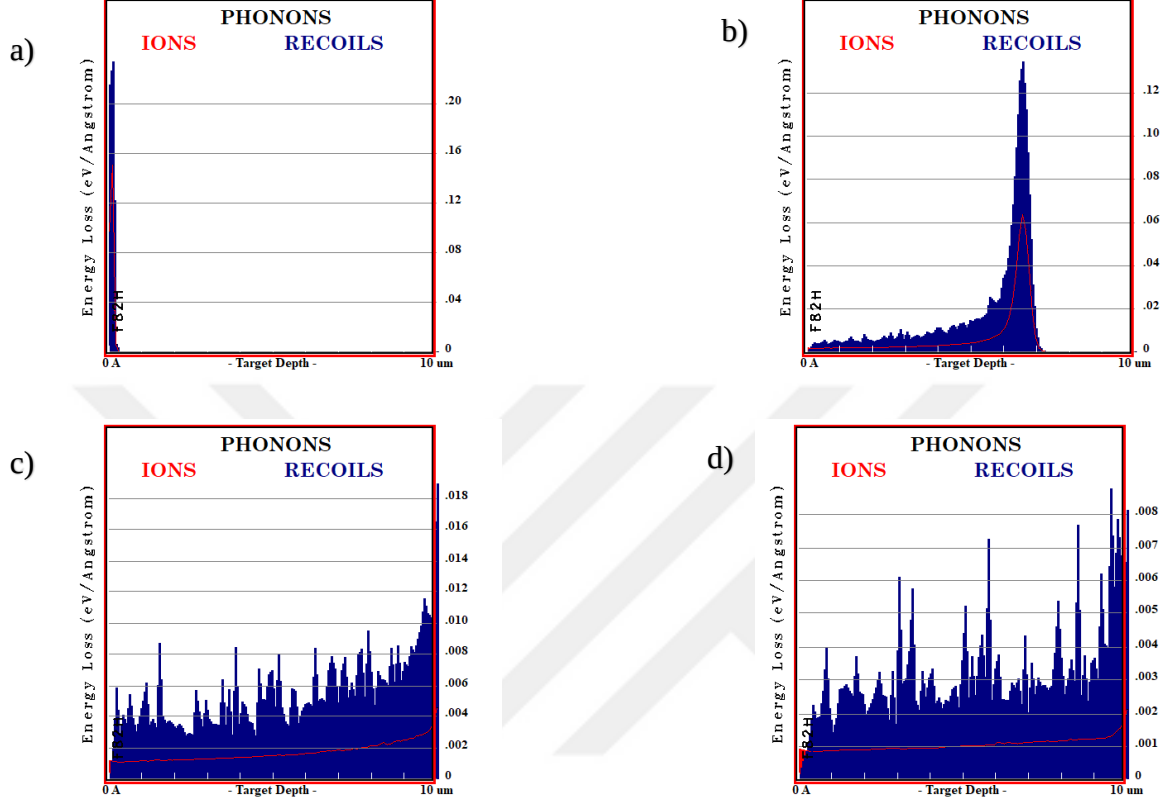
Şekil 4. 16: Xenon iyonunun Hedef İyonizasyon (3B) Grafiği

4.1.5. Titreşimler

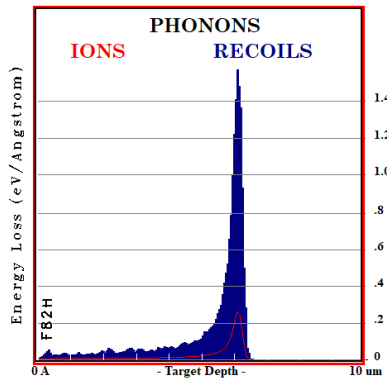
Şekil (4. 17, 4. 18, 4. 19, 4. 20)'de, hedef malzemedeki fononlar nedeniyle iyonlarının çarpmasından kaynaklanan enerji kaybını ve fonon (titreşim) üretimini detaylandırmaktadır. Fononlar, bir atom veya molekül kafesinin toplu salınımı veya titreşimi veya bir kristaldeki atom titreşimlerinde depolanan enerji olarak tanımlayabiliriz. Belirli bir etkileşim için, aktarılan enerji, yer değiştirme enerjisinden veya bir hedef atomu kafes bölgesinden hemen orijinal konumuna geri dönmeyecek kadar uzaklaştırmak için gereken minimum enerjiden daha azsa daha sonra orijinal yerine dönecek ve bir fonona aktarılan geri tepme enerjisini serbest bırakacaktır. Her durumda da fononların büyük bir kısmı, doğrudan çarpan iyonlardan üretilen fononlara karşı geri tepen atomlardan üretilir.

Bununla birlikte, katedilen mesafeye bakılmaksızın en yüksek tepe fonon üretimi Xe, en düşük ise H (2 MeV)'dir. İyonların hiçbirisi hedef malzemenin geri tepen atomlarından daha büyük değildir; fakat kısmen de olsa H ve He iyonlarında gözlemleyebiliriz.

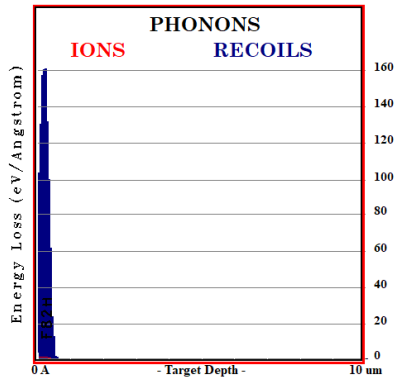
Titreşim üretimi H (1,5 MeV) ve H (2 MeV)'de $10\ \mu\text{m}$ 'yi aşmış olup, H (20 keV), Kr ve Xe'de derinlik olarak çok düşük kalmıştır. Oluşan durumlar diğer alaşımlar ile karşılaştırıldığında benzer sonuçlar alınmıştır.



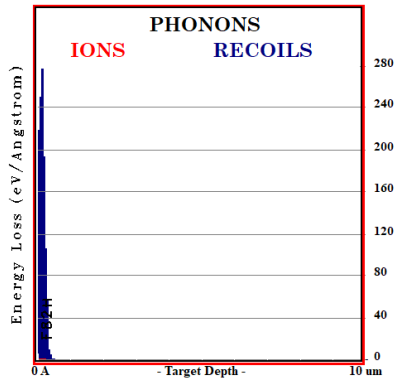
Şekil 4. 17: Hidrojen iyonunun, a) 20 keV, b) 1 MeV c) 1,5 MeV, d) 2 MeV enerjileri ile Titreşim Grafikleri



Şekil 4. 18: Helyum iyonunun Titreşim Grafiği



Şekil 4. 19: Kripton iyonunun Titreşim Grafiği



Şekil 4. 20: Xenon iyonunun Titreşim Grafiği

4.1.6. Çarpışma Olayları (Hedef Yer Değiştirmeler, Hedef Boşluklar, Yedek Çarpışmalar) ve Toplam Yer Değiştirmeler (3B)

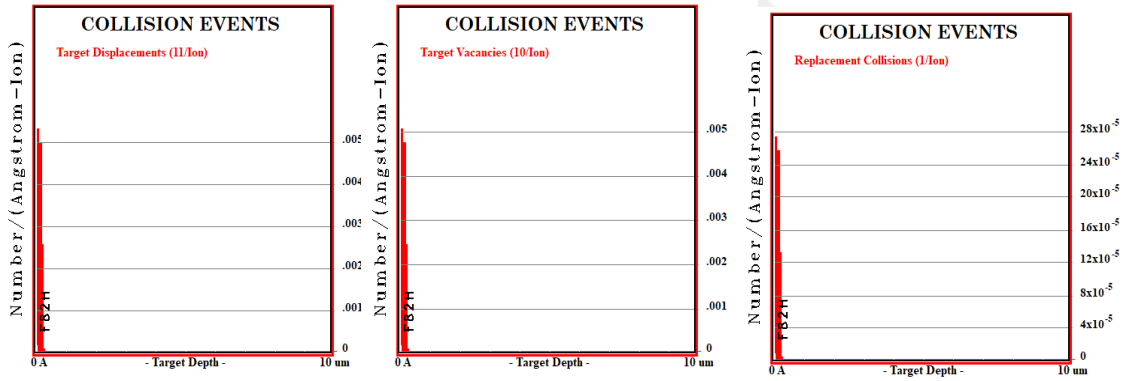
Çarpışma olayları, hareketli atomun aynı hedef atomla çarpıştığı ve o atomun yer değiştirme enerjisinden daha büyük miktarda enerji aktardığı ve kafes (lattice) alanından dışarı hareket ettirmek için yeterli enerjiye sahip olmadığı özel bir çarpışma türüdür. Bu nedenle, orijinal hareketli atom hedef atomun yerini alır, hedef atom hareket eder ve iki atom aynı atomik tür olduğu için nihai hasarı yoktur. İki atom yer değiştirir, ancak aynı tür oldukları için tespit edilebilir bir değişiklik yoktur. Hedef boşluğunun oluşturulması, hem iyon / hedef atom çarpışmalarından hem de geri tepme / hedef atomlarının çarpışma basamaklarından kaynaklanır.

Şekil (4. 21, 4. 22, 4. 23, 4. 24, 4. 25, 4. 26, 4. 27, 4. 28, 4. 29, 4. 30, 4. 31, 4. 32, 4. 33, 4. 34)'de, Yer değiştirme = Boşluklar + Yerine Geçen Parçacıklar gibi bir formül geçerli olabilir, çıkan grafiklerde de bunu görebiliriz. Örneğin, Şekil (4. 21)'de, birinci grafikte, toplam hedef yer değiştirmelerini gösterir. Bu, hedef kafes (lattice) bölgelerini parçalayan

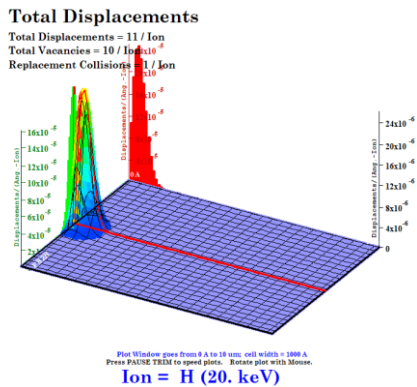
atomların sayısıdır. İkinci grafik, alaşımdaki boşlukları gösterir. Bu ise, yer değiştirmeler eğrisinden daha düşüktür ve daha az boş yer olduğunu gösterir. Üçüncü grafik ise değişen atomları gösteren grafiklerdir.

Çarpışma olayları, oluşan yapıya, derinlik (mikrometre) ve çarpışmalar (sayı/Angström-iyon) açısından bakar. Şekil 4. 27, hedef yer değiştirme grafiğinde 9/iyon ile yani bir 2 MeV enerjili H iyon başına 9 hedef yer değiştirmesiyle en düşük veriyi vermektedir. Hedef boşluklar, hedef yer değiştirmelerde ki veri ile eş olup yedek çarpışmalar yaşanmamıştır.

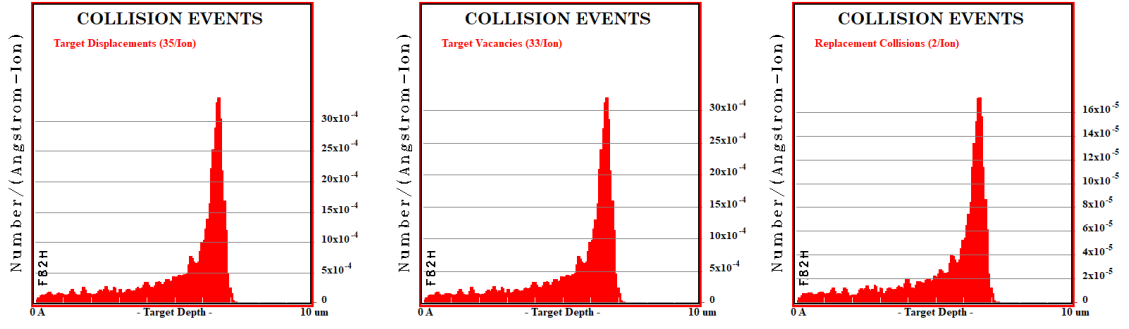
Şekil 4. 31’de Şekil 4. 27’e kıyasla binlerce kat daha çarpışma olayı sonucu 21 981 hedef yer değiştirmesi olmuştur ve yaklaşık %5 yedek çarpışma olayı yaşanmıştır. Zirve çarpışma olayları, yüksek enerjili iyonların yüksek oranı nedeniyle H (2 MeV), Kr’ye göre daha büyük bir çarpışma ile hedefte daha derinlerde meydana geldiği görülmüştür. Oluşan durumlar diğer alaşımlar ile karşılaştırıldığında benzer sonuçlar alınmıştır.



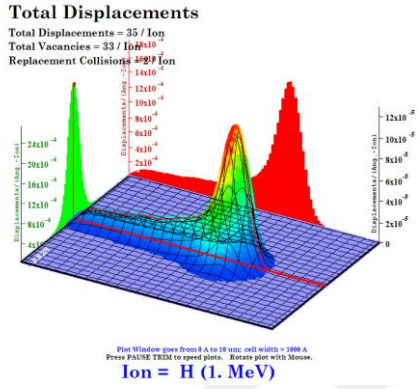
Şekil 4. 21: Hidrojen (20 keV) iyonunun Çarpışma Olayları Grafiği



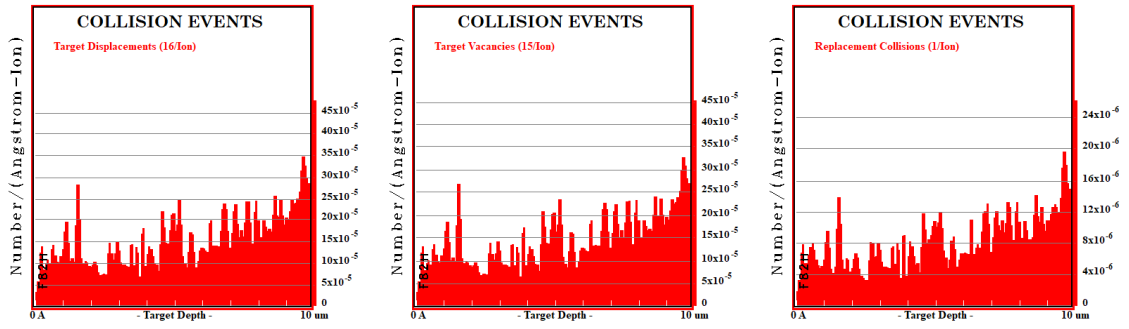
Şekil 4. 22: Hidrojen (20 keV) iyonunun Toplam Yer Değiştirmeler Grafiği (3B)



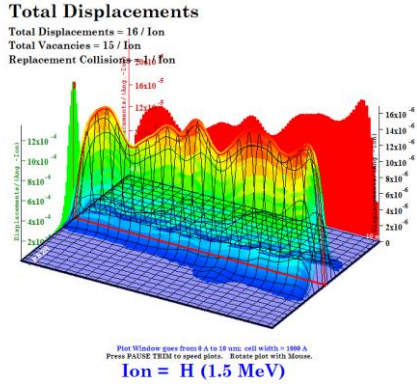
Şekil 4. 23: Hidrojen (1 MeV) iyonunun Çarpışma Olayları Grafiği



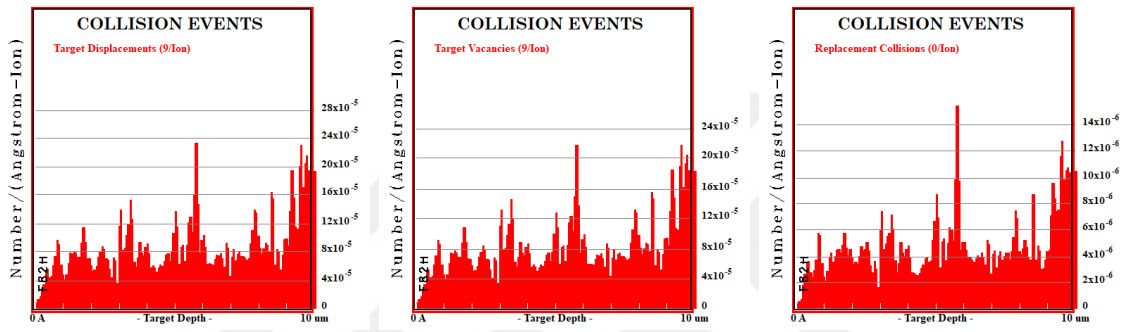
Şekil 4. 24: Hidrojen (1 MeV) iyonunun Toplam Yer Değiştirmeler Grafiği (3B)



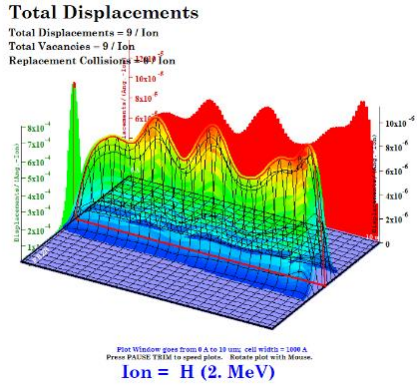
Şekil 4. 25: Hidrojen (1,5 MeV) iyonunun Çarpışma Olayları Grafiği



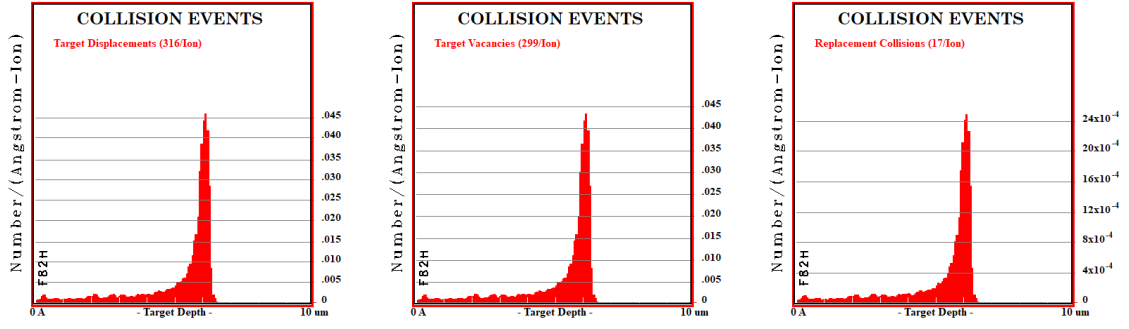
Şekil 4. 26: Hidrojen (1,5 MeV) iyonunun Toplam Yer Değiştirmeler Grafiği (3B)



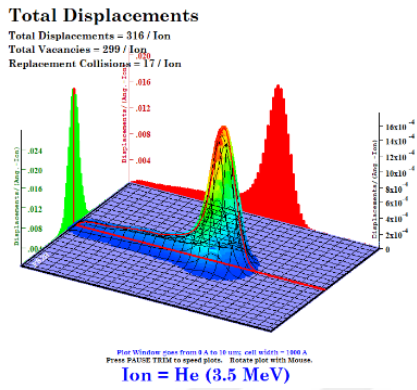
Şekil 4. 27: Hidrojen (2 MeV) iyonunun Çarpışma Olayları Grafiği



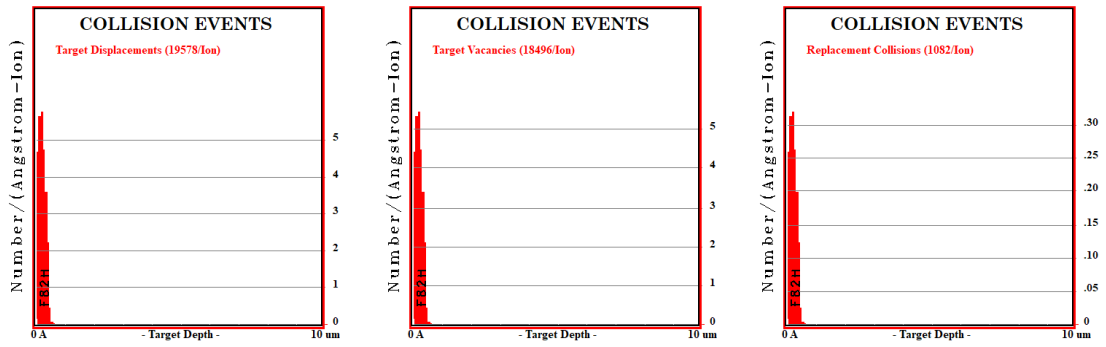
Şekil 4. 28: Hidrojen (2 MeV) iyonunun Toplam Yer Değiştirmeler Grafiği (3B)



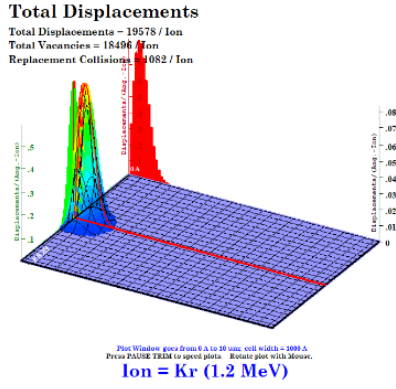
Şekil 4. 29: Helyum iyonunun Çarpışma Olayları Grafiği



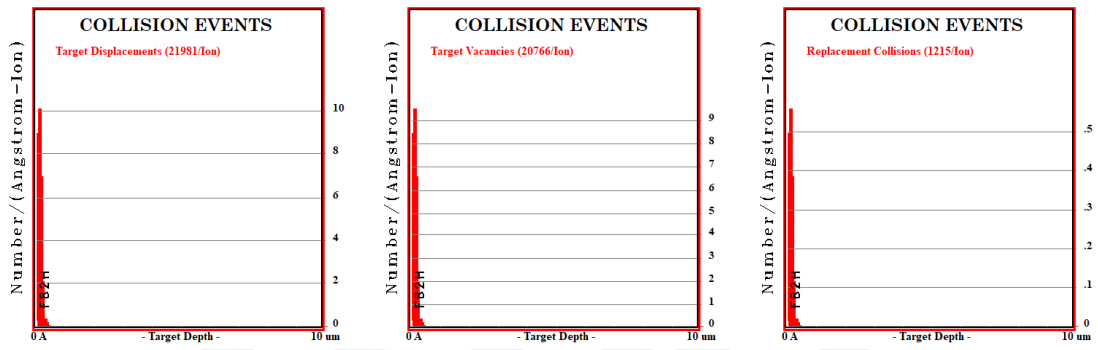
Şekil 4. 30: Helyum iyonunun Toplam Yer Değiştirmeler Grafiği (3B)



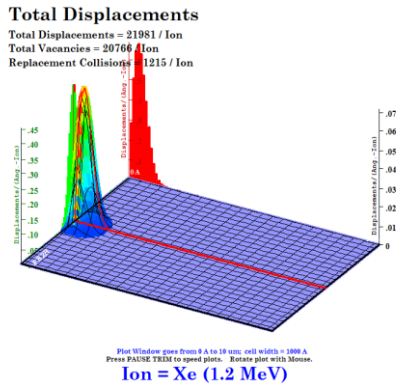
Şekil 4. 31: Kripton iyonunun Çarpışma Olayları Grafiği



Şekil 4. 32: Kripton iyonunun Toplam Yer Değiştirmeler Grafiği (3B)



Şekil 4. 33: Xenon iyonunun Çarpışma Olayları Grafiği



Şekil 4. 34: Xenon iyonunun Toplam Yer Değiştirmeler Grafiği (3B)

5. SONUÇ

Günümüzde enerji olmazsa olmazlarımızdan biridir ve bu zorunluluk durumu büyük bir endişe ile tartışılmaktadır. Enerjiye olan bağımlılığımız bize bu alanın sıkıntılarından kurtaracak yeni kaynaklar oluşturmamızı birinci öncelik olarak sunmaktadır. Bu endişelerden kurtulmak ve önümüzdeki yıllarda daha yüksek hayat olanakları yakalamak için nükleer enerjiye yönelme bir mecburiyettir. Nükleer enerji bilindiği üzere fisyon ve füzyon olaylarına temel atmıştır. Füzyon ve fisyon, nükleer bağlanma enerjisine bağlı olarak, atomları bir araya getirerek veya parçalayarak enerjinin serbest bırakıldığı nükleer reaksiyonlardır. Daha yüksek bağlanma enerjisine sahip olduklarından, uranyum gibi ağır atomlar bölündüğünde veya hidrojen gibi hafif atomlar birleştiğinde daha kararlı atomlar oluştururlar.

Nükleer fisyon santralleri yıllardır kullanılmaktadır fakat radyoaktif atıklar ve kaza riskleri nedeniyle tartışılmaya açıktır. Nükleer füzyon enerjisi ise bu kaygıları ve tartışmaları ortadan kaldırabilecek yegâne enerjidir.

Füzyon, Güneş'te kendiliğinden meydana gelen temel enerji üreten reaksiyondur. Orada hidrojen atomları bir araya gelerek helyum ve demire kadar diğer ağır elementleri oluşturur. Füzyon reaktörlerindeki birincil yakıtlar, hidrojenin farklı izotopları olan döteryum ve trityumdur. Bir D-T reaksiyonu, son ürün olarak bir helyum-4 ve bir nötron verir ve 17.6 MeV enerji serbest bırakır. Füzyon reaksiyonlarında oluşan helyum-4, plazmada kalır ve çarpışmalar yoluyla ısınmasına katkıda bulunur. Helyumdan plazma ısıtması, nötronlardan kaynaklanan enerji kaybından daha büyük olduğunda, plazma tutuşmaya ulaşmış demektir. Artık harici ısıtmaya ihtiyaç yoktur ve plazma kendi kendini idame ettirir.

Bu tezde hedef alınan alaşımların, yoğunluğu en fazla olan demir, nükleon başına en büyük bağlanma enerjisine sahiptir ve enerji üreten reaksiyonları ya füzyona ya da fisyonla ayırır. Demirden daha küçük çekirdekler füzyon yoluyla enerji üretir ve demirden daha büyük çekirdekler fisyon yoluyla enerji üretir.

Füzyon, bol yakıt kaynaklarından dolayı sınırsız miktarda enerji sağlayabilme gücüne sahiptir. Enerji üretimi için tek sefer için birkaç gram yakıt gerekir ve D-T reaksiyonlarında üretilen enerji neredeyse gram başına 100 MWh'dır. Döteryumun yakıt rezervlerinin en az binlerce yıl sürdüğü ve ucuz ve nispeten kolay bir şekilde

çıkarılabildiği görülmektedir. Trityum diğer yakıt bileşimidir, Dünya'da yeterince bulunma imkânı kısıtlıdır. Ancak Dünya'da bol bulunan bir element olan lityumdan üretilmesi sağlanabilir.

Füzyon çalışması yapmak, enerji alanına büyük ölçüde yardımcı olacaktır. Nüfus ve yaşam standardı yükseldikçe enerji talebi de artmaktadır. Fosil yakıtların arzı sınırlıdır ve iklim değişikliğine de katkıda bulunurken, yenilenebilir enerjinin güvenilirlik ve hacimle ilgili sorunları vardır. Füzyonun başlıca faydaları, ülkeleri ve kurumları füzyona yatırım yapmaya yöneltmiştir. Araştırma maliyetli ve zaman alıcıdır, ancak sonuçlar geleneksel yöntemlerin birçok dezavantajı olmadan neredeyse sınırsız miktarda enerji yaratarak enerji alanında devrim yaratabilir.

Enerji üretimi henüz gerçekleşmese de füzyon reaktörlerinin yapılarından birincil duvar bu çalışmada ana unsur olarak bulunmaktadır. Birincil duvar ya da ilk duvar ITER Tokamak reaktöründe plazmayı gören duvar olup blanketin yapısında bulunur. Birincil duvar bölümlere ayrılmak istense ilk olarak, sert ve erime noktası yüksek olan elementlerden ardından yüksek mekanik özelliklere, ısı ve elektriksel iletkenliğin yüksek olduğu malzemelerden ve son olarak SRIM/TRIM Monte Carlo Kodu kullanılarak simülasyonları yapılan F82H, JLF-1, Eurofer-97 ve CLAM alaşımlarının gönderilen hidrojen (20 keV-1 MeV-1,5 MeV-2 MeV), helyum, kripton ve xenon iyonlarının hedef üzerinde oluşturduğu etkileri incelenmiştir.

Yapılan çalışmada; derinlik, iyon aralıkları, iyonizasyon, titreşim, çarpışma olayları, toplam yer değiştirmeler ve oluşan boşlukların hedef malzemeler üzerinde füzyon reaksiyonları dolayısı ile birincil duvar yapısındaki durumları hakkında bilgi sahibi olunmuştur.

Derinlik ve Y eksenli grafiğinde geri tepen iyonların dağılım profili ve hedef atomların yolu arasındaki çarpışmaları ifade etmekte olup her malzemede de hidrojen iyonun 2 MeV'de lateral bir şekilde yoluna devam ettiği gözlemlenmiştir.

İyon kontrasyonunu, dağılımı, çarpıklık ve basıklığı ele alan iyon aralıkları göstergesi Derinlik ve Y eksenli grafiğinin daha da ayrıntılandırılmıştır. Bu sayede F82H alaşımına gelen iyonlar diğer alaşımlara göre daha az alana tesir ettiği görülmüştür. Diğer grafiklerde gerçekleşen çarpışmalar, oluşan boşluklar, yeri değişen atomlar vs. bulgulara anlatılmıştır.

Elde edilen bulgulara dayanarak, incelenen 4 farklı birincil duvar materyalinin içerisinde F82H alaşımının diğer malzeme türlerine göre daha gelecek vaat eden materyal olduğu

söylenebilmektedir. Altı çizilmesi gereken nokta, dikkate alınan malzemelerin içeriği ve konsantrasyonu birbirine çok yakın olmasından dolayı sonuçların benzer olduğu ve diğer alaşım türlerinin de alternatif materyaller olarak değerlendirilebileceğinin yanında malzemeler üzerinde oluşan olaylar bize, reaksiyonlar sonucu özyapısal durumlar hakkında fikir sahibi olmamızı sağlamıştır.



KAYNAKÇA

- Abdou, M. (2017, September). Tritium fuel cycle, tritium inventories and physics and technology R&D challenges for: 1) enabling the startup of DEMO and future power plants and 2) attaining tritium self-sufficiency in fusion reactors. In *13th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-13)*.
- Anderson, C. & Aldhous, P. 1990. Fusion's turn again? Nature, 344,6267, <https://www.nature.com/nature/volumes/344/issues/6267>
- Aymar, R. A. (1995). ITER Interim Design Report, July 1995 (unpublished). *Google Scholar ITER JCTand Home Teams (presented by G. Janeshitz), Plasma Phys. Control. Fusion*, 37, A19. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/079/28079967.pdf
- Barabash, V., Akiba, M., Mazul, I., Ulrickson, M., & Vieider, G. (1996). Selection, development and characterisation of plasma facing materials for ITER. *Journal of Nuclear Materials*, 233, 718-723. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(96\)00323-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(96)00323-6)
- Batra, I. S., Dey, G. K., Kulkarni, U. D., & Banerjee, S. (2003). Precipitation in a Cu–Cr–Zr alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 356(1-2), 32-36. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00852-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00852-3)
- Bradshaw, A. M., Hamacher, T., and Fischer, U. Ekim 2011. Is nuclear fusion a sustainable energy form. *Fusion Eng. Des.*, vol. 86, no. 9–11, pp. 2770– 2773. doi: 10.1016/j.fusengdes.2010.11.040
- Butterworth, G. J. & Forty, C. B. A. 1992. A survey of the properties of copper alloys for use as fusion reactor materials, *J. Nucl Mater*, 189 237-6. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(92\)90381-T](https://doi.org/10.1016/0022-3115(92)90381-T)
- Cadarache, France: ITER. (2021a). Fusion fuels, Erişim: 12.12.2021, <https://www.iter.org/sci/fusionfuels>,
- Cadarache, France: ITER. (2021b). Magnets. Erişim: 16.12.2021, <https://www.iter.org/mach/magnets>,
- Cadarache, France: ITER. (2021c). Blanket. Erişim: 17.12.2021, <https://www.iter.org/mach/blanket>
- Cadarache, France: ITER. (2021d). Cryostat. Erişim: 17.12.2021, <https://www.iter.org/mach/cryostat>,
- Cadarache, France: ITER. (2021e). Divertor. Erişim: 17.12.2021, <https://www.iter.org/mach/divertor>
- Cadarache, France: ITER. (2021f). In a few lines, Erişim: 17.12.2021, <https://www.iter.org/proj/inafewlines>
- Cadarache, France: ITER. (2021g). Vacuum vessel, Erişim: 12.12.2021, <https://www.iter.org/mach/vacuumvessel>
- Cadarache, France: ITER. (2021h). Tokamak, Erişim: 19.12.2021, <https://www.iter.org/mach/Tokamak>
- Chine. Eylül-Ekim, 2017. le nouveau géant du nucléaire, *Revue générale nucléaire*, n°5. <https://www.fun-mooc.fr/asset-v1:ParisSaclay+71005+session01+type@asset+block/rgn2017-5.pdf>

- Day, C. & Giegerich, T. 2013. The direct internal recycling concept to simplify the fuel cycle of a fusion power plant. *Fusion Engineering and Design*, 88, 616-620, doi: 10.1016/j.fusengdes.2013.05.026
- Dobran, F. Eyl. 2012. Fusion energy conversion in magnetically confined plasma reactors. *Prog. Nucl. Energy*, vol. 60, pp. 89–116, doi: 10.1016/j.pnucene.2012.05.008
- Dubus, G. D. 2014. From Plain Visualisation to Vibration Sensing: Using a Camera to Control the Flexibilities in the ITER Remote Handling Equipment, Tampereen teknillinen yliopisto-Tampere University of Technology Tampere
- Emsley J. (1998). *The Elements* (3rd ed). Oxford University Press Inc., New York
- Esteban, G. A., Pena, A., Legarda, F. & Lindau, R. 2007. Hydrogen transport and trapping in ODS-EUROFER. *Fusion Engineering and Design* 82 2634-40, doi: 10.1016/j.fusengdes.2007.02.002
- Fernández, P., Lancha, A. M., Lapeña, J., Serrano, M., & Hernández-Mayoral, M. (2004). Reduced Antivation Ferritic/Martensitic Steel Eurofer 97 as Possible Structural Material for Fusion Devices. Metallurgical Characterization on As-Received Condition and after Simulated Services Conditions. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20572316>
- Ferraris, M., Salvo, M., Casalegno, V., Ciampichetti A., Smeacetto F. and Zucchetti M. 2008. Joining of machined SiC/SiC composites for thermonuclear fusion reactors. *J. Nucl Mater*, 375 410-415, doi: 10.1016/j.jnucmat.2008.02.020
- Garching, Germany: EUROfusion. 13.10.2017. Sticking nuclei together. <https://www.euro-fusion.org/2012/08/sticking-nuclei-together/>
- Garching, Germany: EUROfusion. FAQ. 16.12.2021. <https://www.euro-fusion.org/faq/how-are-alpha-particles-produced-and-how-dangerous-are-they>
- Garching, Germany: IPP- Max Planck Institute for Plasma Physics. 17.12.2021. Tokamak, Plasma boundary. <http://www.ipp.mpg.de/14917/plasmabegrenzung>,
- Garching, Germany: IPP-Max Planck Institute for Plasma Physics. 16.12.2021. Tokamak, Plasma discharge. <http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/pr/exptypen/Tokamak/plasmaentladungen/index>,
- Garching, Germany: IPP-Max Planck Institute for Plasma Physics. 12.12.2021. Wendelstein 7-X. <http://www.ipp.mpg.de/w7x>
- Glasstone, S. (1964). *Controlled nuclear fusion*. US Atomic Energy Commission, Division of Technical Information. <http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED107520.pdf>
- Hakso, H. (2018). Nuclear Fusion Energy And Comparison Of Tokamak And Stellarator Reactors. <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201805261943.pdf>
- Haynes, W. M. (Ed.). (2014). *CRC handbook of chemistry and physics*. CRC press. <https://www.google.com/books?hl=tr&lr=&id=bNDMBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=H9avslvDVC&sig=S2KIDHtHRReu6wDO-Q1GQjeV2L8>
- Haynes, W. M. (Ed.). (2014). *CRC handbook of chemistry and physics*. CRC press. <https://www.google.com/books?hl=tr&lr=&id=bNDMBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=H9avslvDVC&sig=S2KIDHtHRReu6wDO-Q1GQjeV2L8>
- Hirai, T., Barabash, V., Escourbiac, F., Durocher, A., Ferrand, L., Komarov, V., & Merola, M. (2017). ITER divertor materials and manufacturing challenges. *Fusion Engineering and Design*, 125, 250-255. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.07.009>
[https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(02\)02134-6](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(02)02134-6)

- Hughes, J. 2013. Introduction to Fusion Energy, IAP @ PSFC, 8.1.
https://library.psfc.mit.edu/catalog/online_pubs/iap/iap2013/hughes.pdf
- IAEA. (1992). ITER Conceptual Design Report. ITER Documentation Series.
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/064/22064645.pdf
- IL: Cryogenic Society of America, Inc. 17.12.2021. Supercritical fluids, Oak Park.
https://www.cryogenicsociety.org/resources/defining_cryogenics/supercritical_fluids/
- ITER. 2018. ITER- the way to new energy.
https://www.iter.org/doc/www/content/com/Lists/list_items/Attachments/635/IBF02.10.15.pdf
- Kano, S., Yang, H. L., Suzue, R., Matsukawa, Y., Satoh, Y., Sakasegawa, H., ... & Abe, H. (2016). Precipitation of carbides in F82H steels and its impact on mechanical strength. *Nuclear Materials and Energy*, 9, 331-337. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.09.017>
- Klimiankou, M., Lindau, R., & Möslang, A. (2003). HRTEM study of yttrium oxide particles in ODS steels for fusion reactor application. *Journal of crystal growth*, 249(1-2), 381-387.
- Klimstra, J., & Hotakainen, M. (2011). *Smart power generation*. Avain. http://www.4is-cnmi.com/presentations/Smart_Power_Generation_4th_edition.pdf
- Kohyama, A., Hishinuma, A., Gelles, D. S., Klueh, R. L., Dietz, W., & Ehrlich, K. (1996). Low-activation ferritic and martensitic steels for fusion application. *Journal of Nuclear Materials*, 233, 138-147. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(96\)00327-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(96)00327-3)
- Kurtz, R. J., Alamo, A., Lucon, E., Huang, Q., Jitsukawa, S., Kimura, A., ... & Rensman, J. W. (2009). Recent progress toward development of reduced activation ferritic/martensitic steels for fusion structural applications. *Journal of Nuclear Materials*, 386, 411-417.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.12.323>
- Lee, G. S. 2012. Korean Roadmap and International Collaboration for DEMO R&D.
http://www.kstar.nfri.re.kr/kstarweb/upload/kboard/K-DEMO_GSL_201302272.pdf
- Letcher, T. 2014. Future energy, 2nd ed. London: Elsevier.
- Li, H. L. (2012). Tensile Properties of JLF-1 Steel at Elevated Temperature. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 204, pp. 3872-3878). Trans Tech Publications Ltd.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.3872>
- Li, Y., Huang, Q., Wu, Y., Nagasaka, T., & Muroga, T. (2007). Mechanical properties and microstructures of China low activation martensitic steel compared with JLF-1. *Journal of Nuclear Materials*, 367, 117-121. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.03.012>
- London: World Nuclear Association. 13.10.2017. Nuclear fusion power. <http://www.worldnuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-fusion-power.aspx>,
- Loving, A. vd. 27.09.2013. Pre-conceptual design assessment of DEMO remote maintenance. *Fusion Engineering and Design*, 89, 2246- 2250, 2014. doi: 10.1016/j.fusengdes.2014.04.082
- Maisonnier, D. vd. Kasım 2005. The European power plant conceptual study. *Fusion Eng. Des.*, vol. 75 79, pp. 1173–1179. doi: 10.1016/j.fusengdes.2005.06.095
- Naseri, H. (2000). The relationship between energy and human development. In *IAOS Conf. on Statistics, Development and Human Rights, Session C-Pa 6e, Montreux*.
https://www.researchgate.net/publication/324835168_The_Relationship_between_Energy_and_Human_Development.
- New York: United Nations. 12.12.2021. World population projected to reach 9.7 billion by 2050, <http://www.un.org/en/development/desa/news/population/2015-report.html>

- Nozawa, T., Hinoki, T., Hasegawa, A., Kohyama, A., Katoh, Y., Snead, L. L., ... & Hegeman, J. B. J. (2009). Recent advances and issues in development of silicon carbide composites for fusion applications. *Journal of Nuclear Materials*, 386, 622-627. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.12.305>
- Nygren, R. E., Ulrickson, M. A., Tanaka, T. J., Youchison, D. L., Lutz, T. J., Bullock, J., & Hollis, K. J. (2006). ITER first wall Module 18—The US effort. *Fusion engineering and design*, 81(1-7), 387-392. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.06.362>
- R. Aymar, ITER: Executive Summary: Design Overview, *Fusion Eng. Des.*, vol. 55, no. 2–3, pp. 107–118, Jul. 2001. doi:10.1016/S0920-3796(01)00192-2
- Rebut, P-H. vd. 2000. ITER Outline Design Report and related documentation. <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/ITER-EDA-DS-18.pdf>
- Romanoski, G. R., Snead, L. L., Klueh, R. L., & Hoelzer, D. T. (2000). Development of an oxide dispersion strengthened, reduced-activation steel for fusion energy. *Journal of Nuclear Materials*, 283, 642-646. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(00\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(00)00137-9)
- Sánchez, J. 2014. Nuclear fusion as a massive, clean, and inexhaustible energy source for the second half of the century: Brief history, status, and perspective, *Energy Sci. Eng.*, vol. 2, no. 4, pp. 165 176. <https://doi.org/10.1002/ese3.43>
- Seward, G. P. 01.26.2009. Scientific American, How long will the world's uranium supplies last. <https://www.scientificamerican.com/article/how-long-will-global-uranium-deposits-last/>
- Silver, H., Luke S., Ting P., Barrett A., Tilton T., Karp G., Berwind T., Controlled Nuclear Fusion. 2014. <https://slidetodoc.com/controlled-nuclear-fusion-hannah-silver-spencer-luke-peter/>
- Smith, J. P., Johnson, W. R., Stambaugh, R. D., Trester, P. W., Smith, D., & Bloom, E. (1996). Utilization of vanadium alloys in the DIII-D radiative divertor program. *Journal of nuclear materials*, 233, 421-425. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/049/27049654.pdf
- Suri, A. K., Krishnamurthy, N. & Batra, I. S. 2010. Materials issues in fusion reactors. 23rd National Symposium on Plasma Science & Technology (PLASMA-2008), 208 (2010)-012001. doi: 10.1088/1742-6596/208/1/012001
- Tanabe, T. (Ed.). (2017). *Tritium: Fuel of fusion reactors*. Springer Japan. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-4-431-56460-7.pdf>
- Tanigawa, H., Hirose, T., Shiba, K., Kasada, R., Wakai, E., Serizawa, H., ... & Zinkle, S. J. (2008). Technical issues of reduced activation ferritic/martensitic steels for fabrication of ITER test blanket modules. *Fusion Engineering and design*, 83(10-12), 1471-1476. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.07.024>
- Taylor, T.S., Garofalo, A. M., Choi, M., Humphreys, D. A., Kinsey, J. E., Lao, L. L., Snyder, P. B., ... & Stangeby, P. C. (2012). A fast-track path to DEMO enabled by ITER and FNSF-AT. pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2012/cn197/cn197_Programme.pdf
- The Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety. 2017. Nuclear Fusion Reactors. https://www.irsn.fr/EN/Research/publications-documentation/Scientific-books/Documents/ITER-VA_web_non_imprimable.pdf
- Trinka, H., & Singh, B. N. (2003). Helium accumulation in metals during irradiation—where do we stand?. *Journal of Nuclear Materials*, 323(2-3), 229-242. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2003.09.00>
- U.S. Department of Energy Office of Nuclear Energy. 1994. Science and Technology Washington, D.C. 20585, The History of Nuclear Energy.

URL-1. 25.06.2017. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nuclear_fission_reaction.svg,

URL- 2. 2014. <https://ktwop.com/2014/08/16/its-coming-but-dont-invest-just-yet-in-mining-helium-3-on-the-moon/>

URL-3. 2021. <http://www.srim.org/>

URL-4. 2021. <https://www.mindat.org/element/Chromium>

URL-5. 2021. <https://www.mindat.org/element/Tungsten>

URL-6. 2021. <https://www.mindat.org/element/Manganese>

URL-7. 2021. <https://www.mindat.org/element/Vanadium>

URL-8. 2021. [https://www.mindat.org/element/ Silicon](https://www.mindat.org/element/Silicon)

URL-9. 2021. <https://www.mindat.org/element/Carbon>

URL-10. 2021. <https://www.mindat.org/element/Tantalum>

URL-11. 2021. [https://www.mindat.org/element/ Nitrogen](https://www.mindat.org/element/Nitrogen)

URL-12. 2021. <https://www.mindat.org/element/Iron>

Wan, Y. (2013). Road Map of Chinese Fusion Research and the First Chinese Fusion Reactor-CFETR. In *531st Wilhelm and Else Heraeus Seminar on 3D versus 2D in Hot Plasmas*. http://www.iek-yig.de/531stWEH/talks/I1_1_Wan.pdf

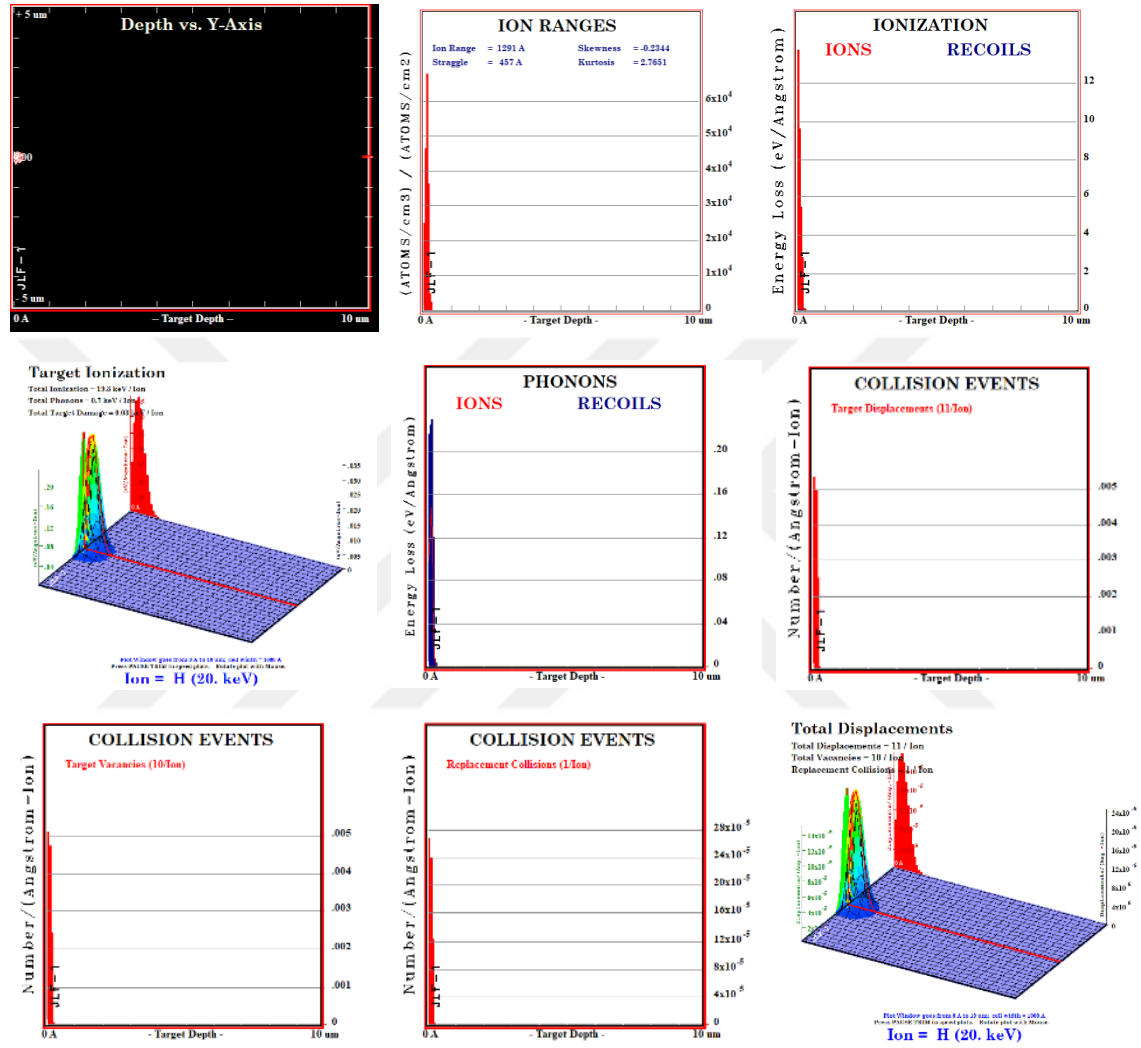
Ziegler, J.F., Biersack, J.P., Ziegler, M.D. 2008. SRIM-The Stopping and Range of Ions in Matter. doi: 10.1016/j.nimb.2010.02.091

Zinkle, S. J. (2005). Advanced materials for fusion technology. *Fusion engineering and design*, 74(1-4), 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.08.008>

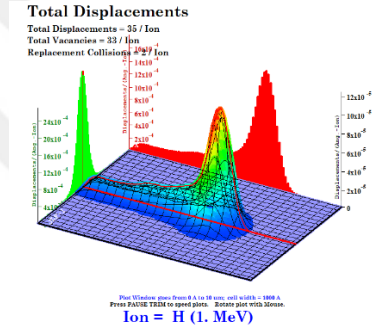
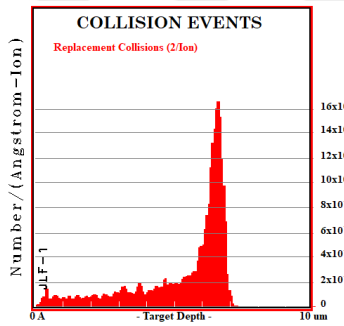
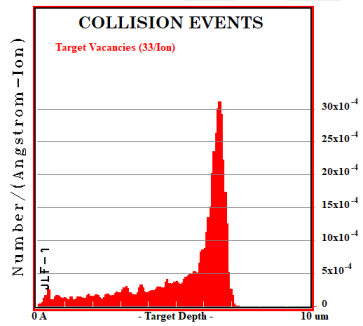
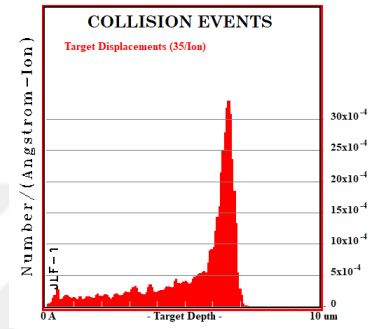
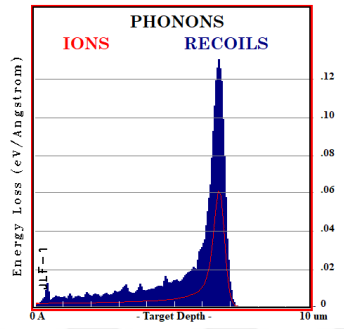
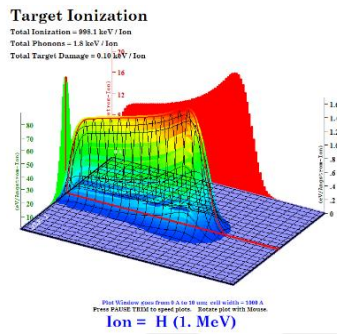
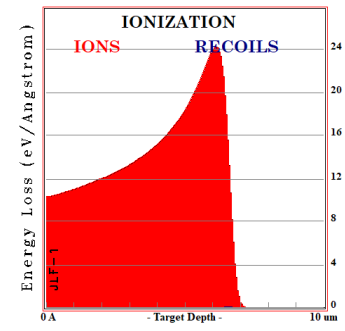
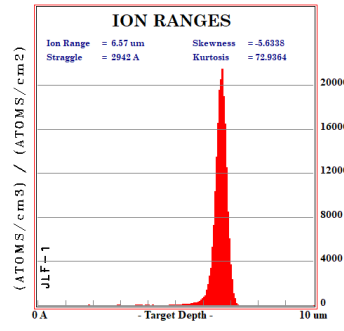
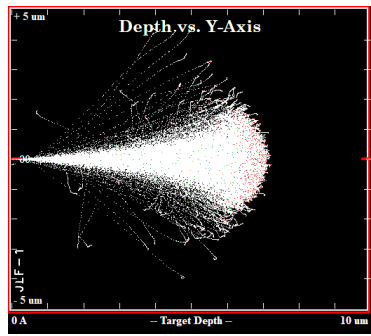
EKLER

JLF-1 ile Yapılan Simülasyonlar

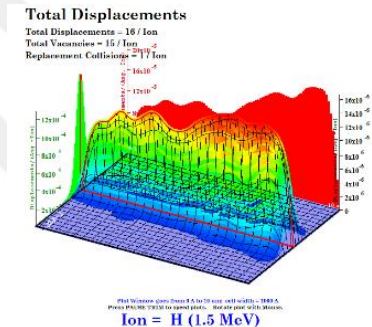
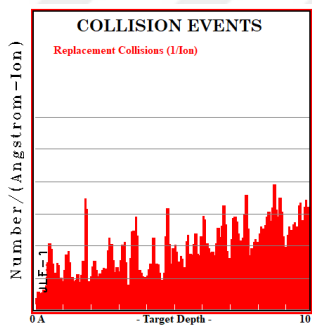
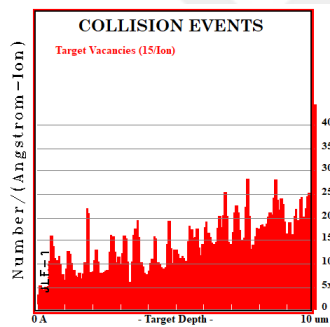
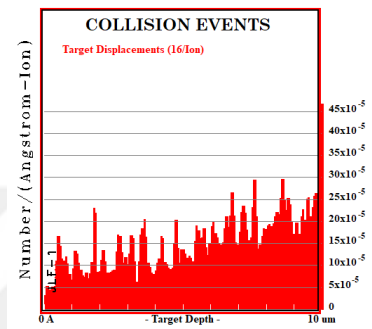
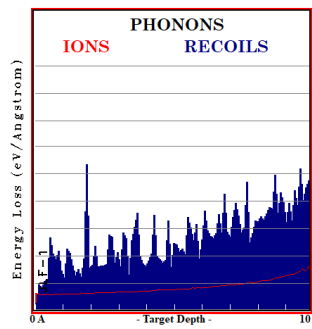
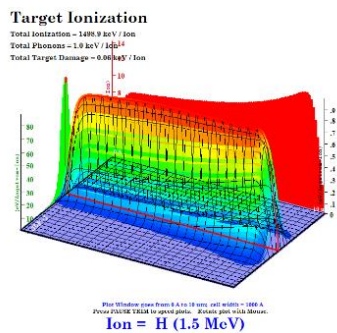
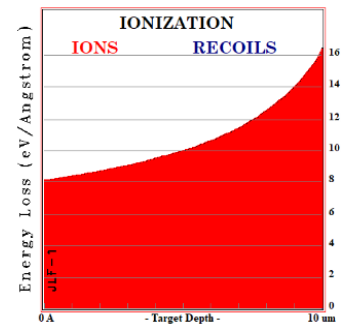
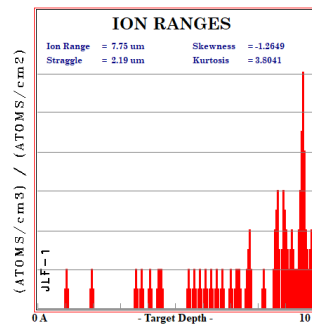
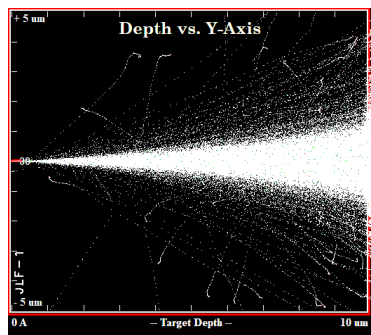
Hidrojen (20 keV)



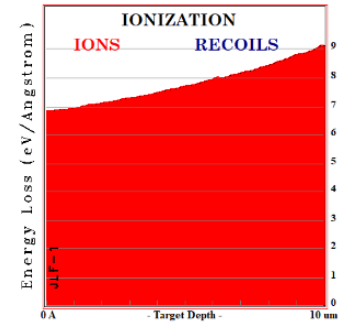
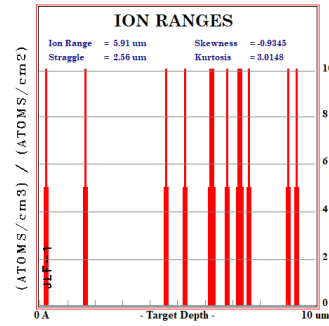
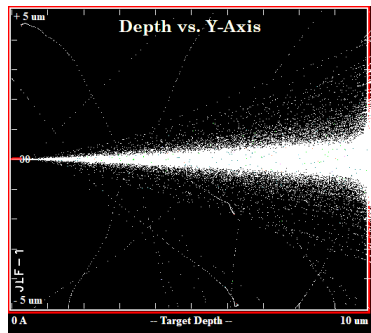
Hidrojen (1 MeV)



Hydrogen (1,5 MeV)

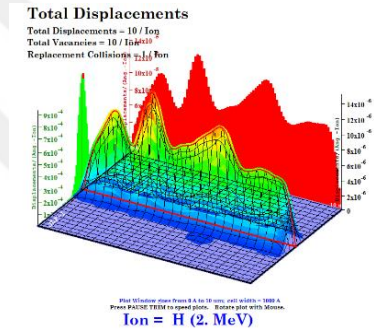
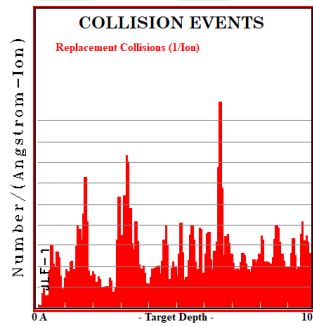
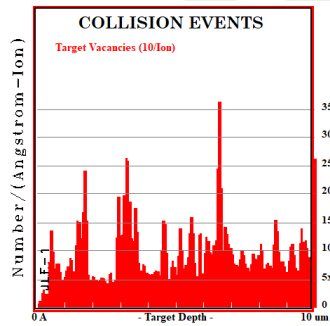
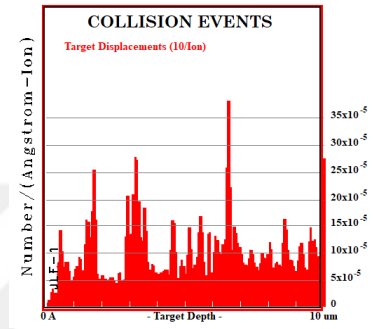
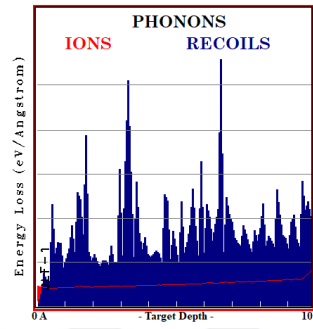
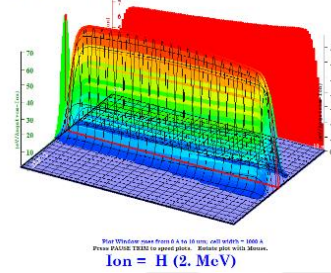


Hidrojen (2 MeV)

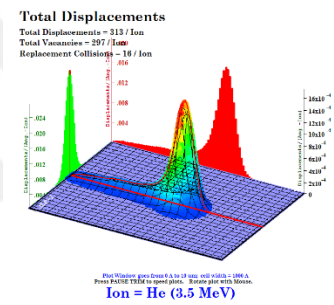
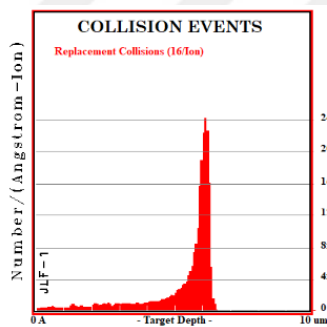
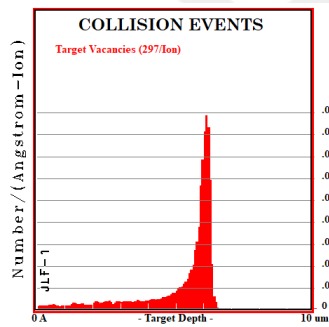
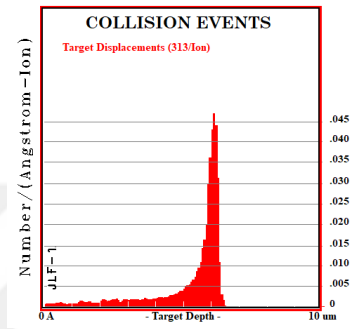
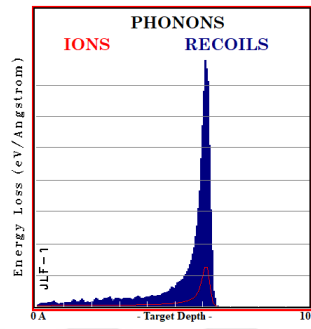
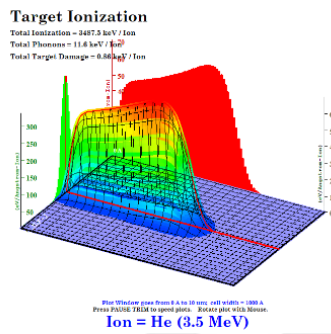
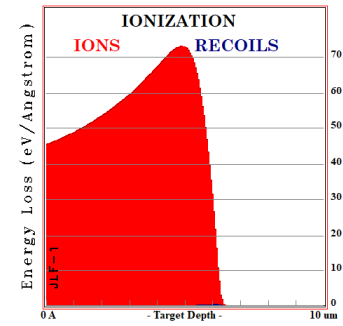
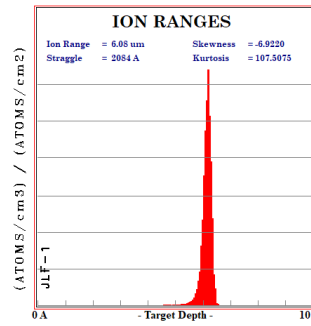
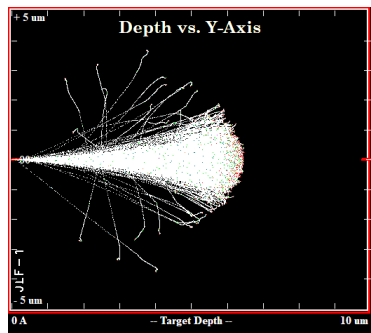


Target Ionization

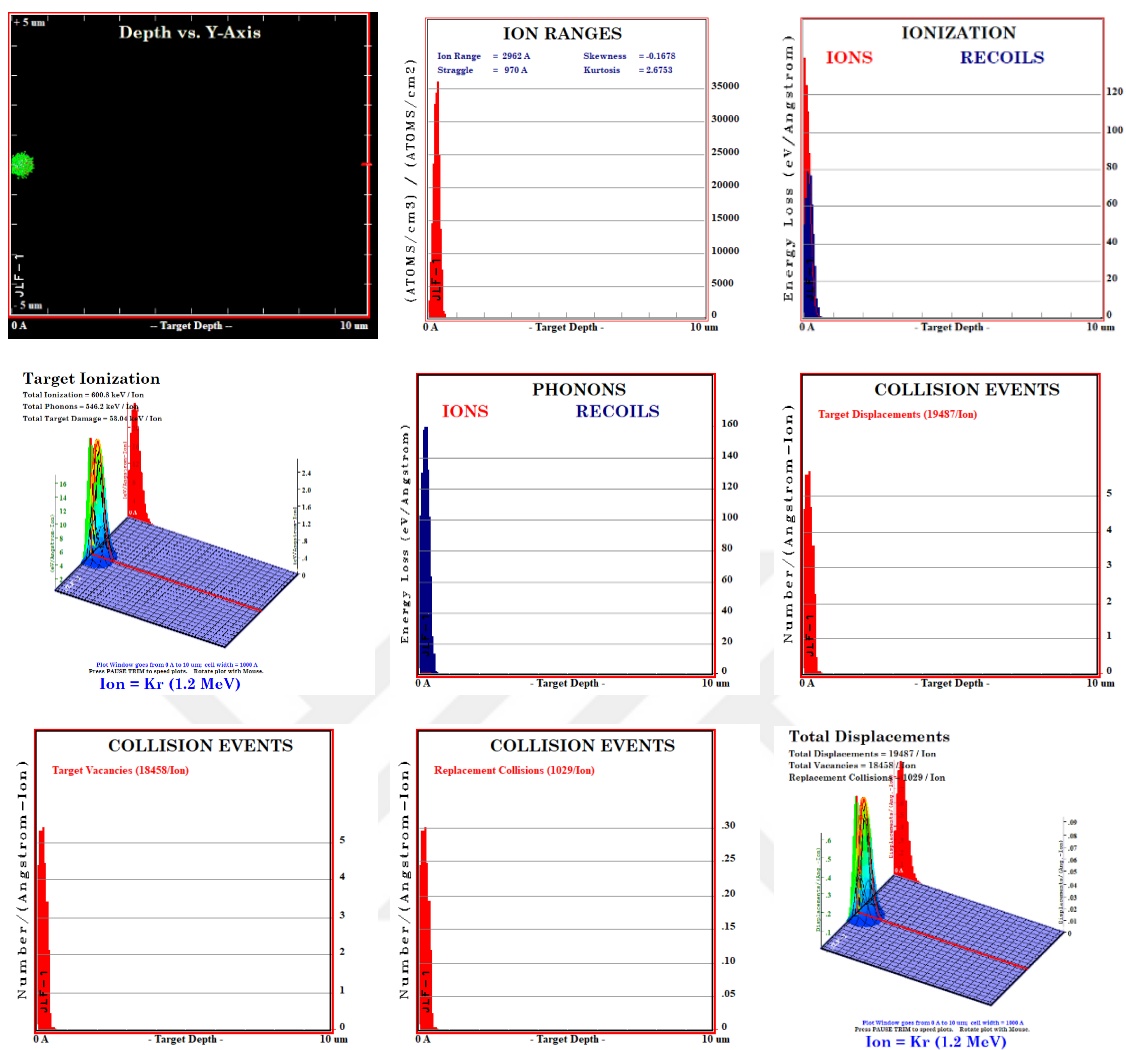
Total Ionization = 1095.0 eV / Ion
Total Phonons = 1.2 keV / Ion
Total Target Damage = 0.07 keV / Ion



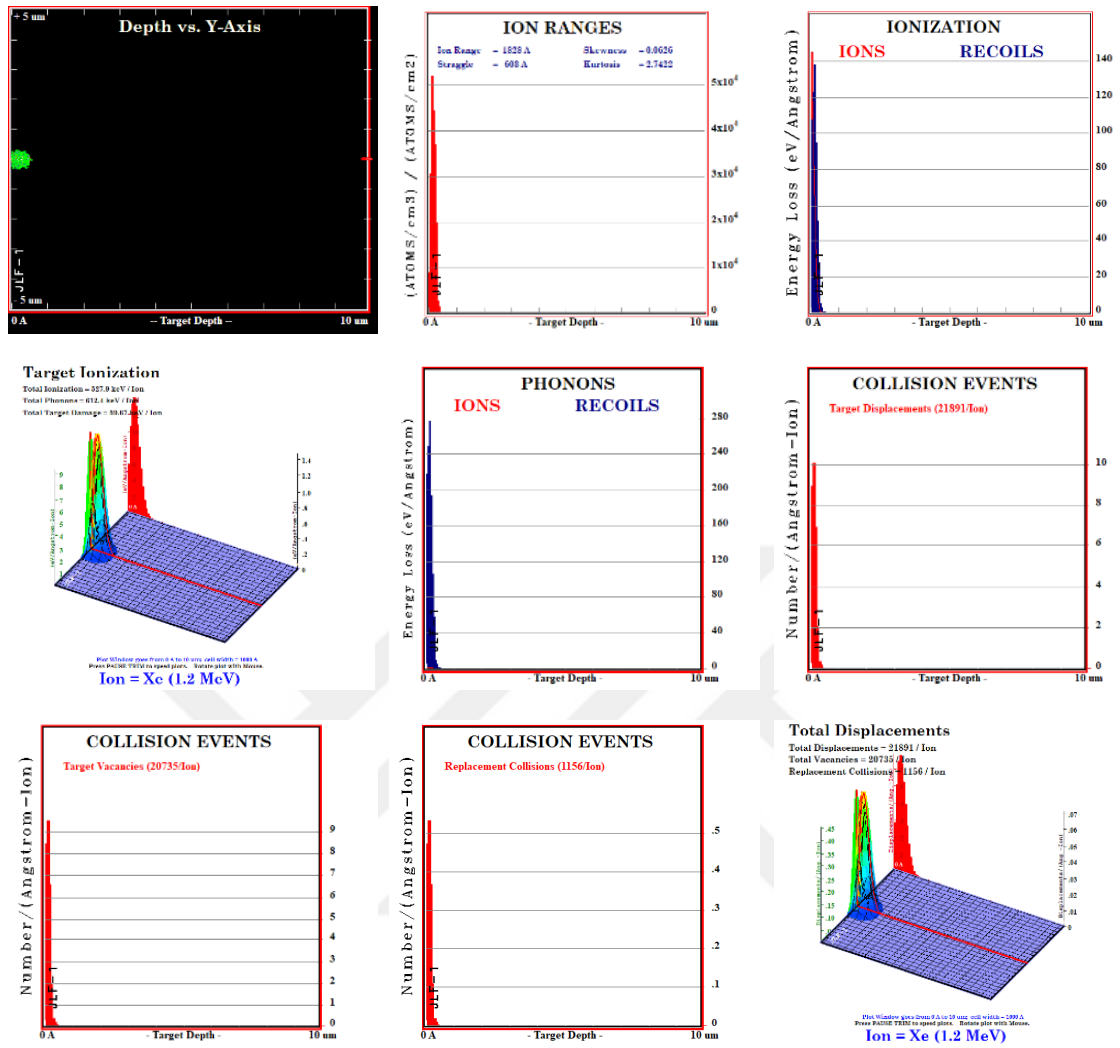
Helyum (3,5 MeV)



Krypton (1,2 MeV)

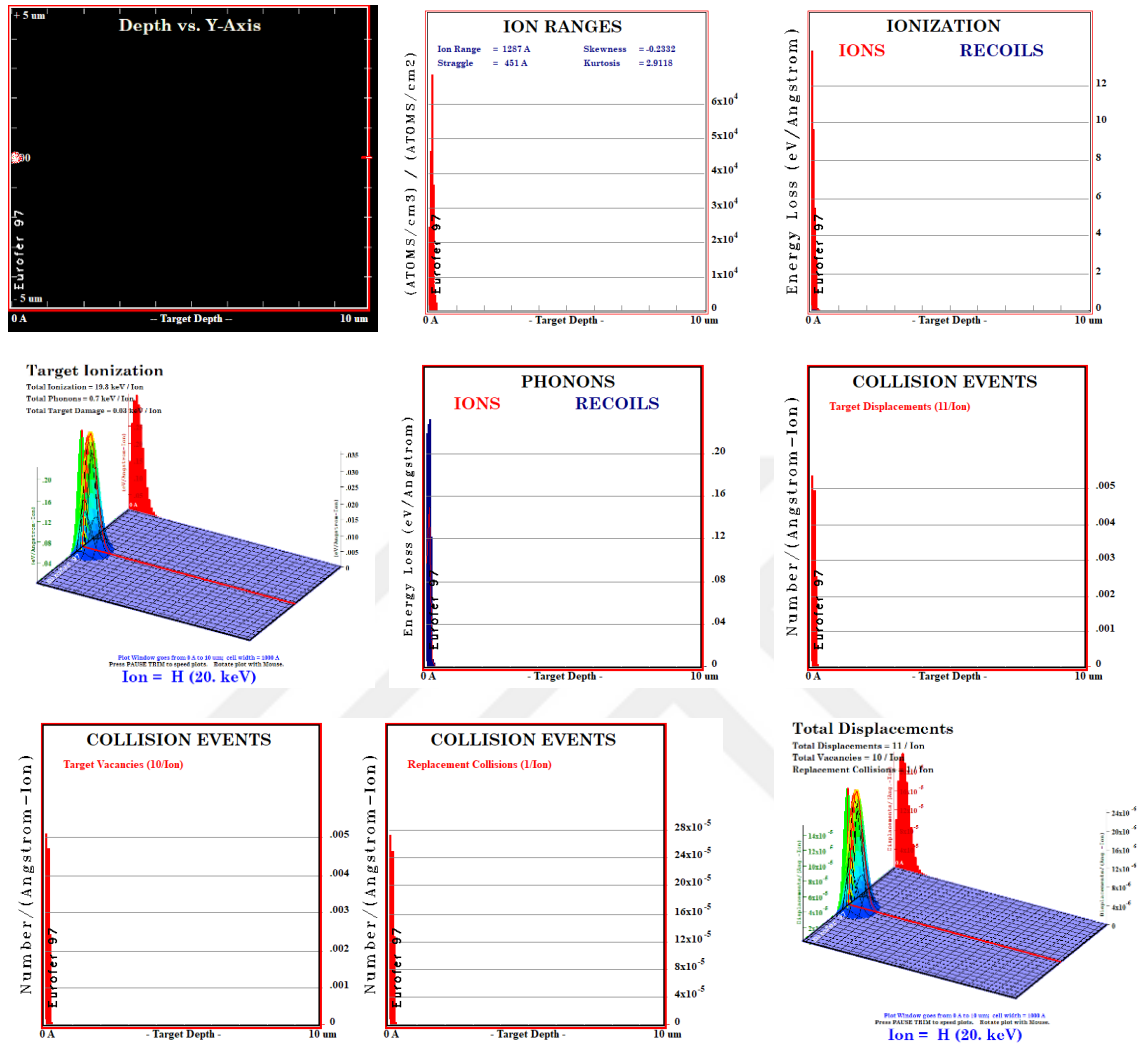


Xenon (1,2 MeV)

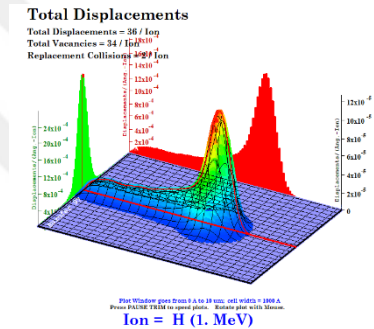
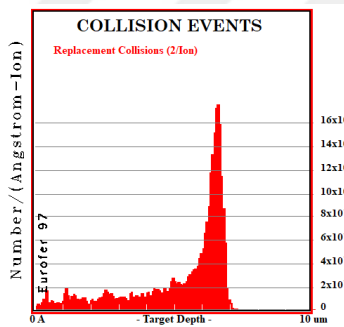
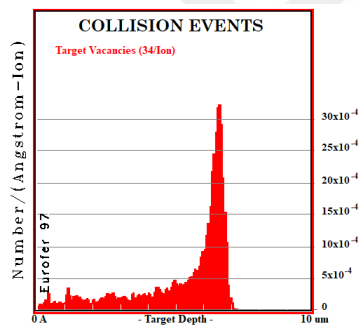
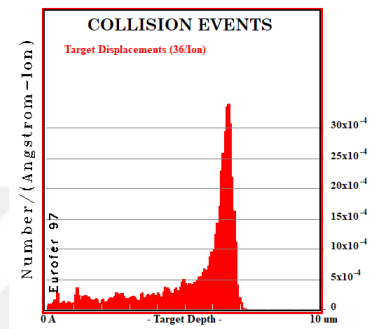
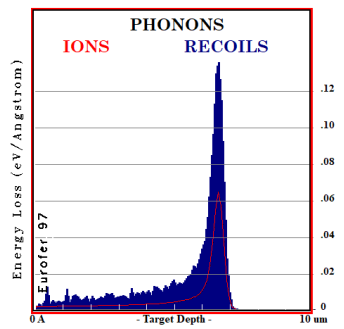
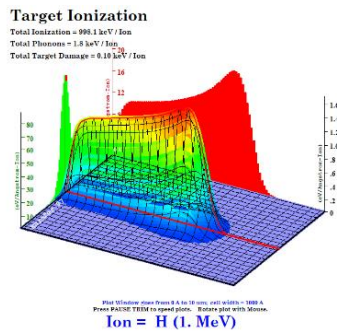
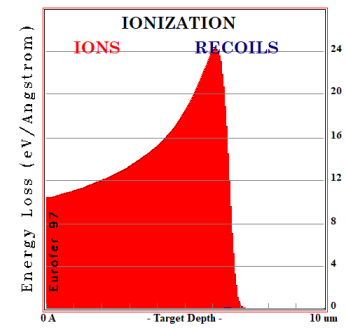
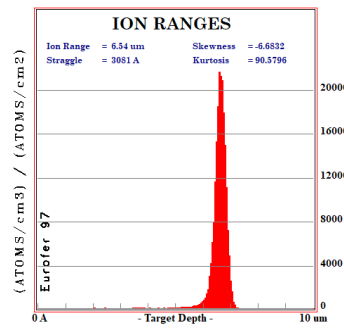
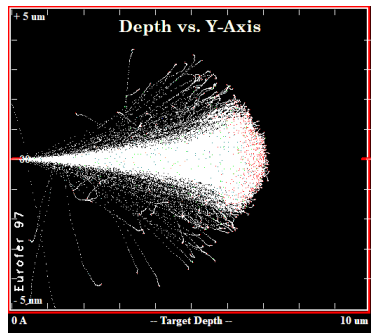


Eurofer-97 ile Yapılan Simülasyonlar

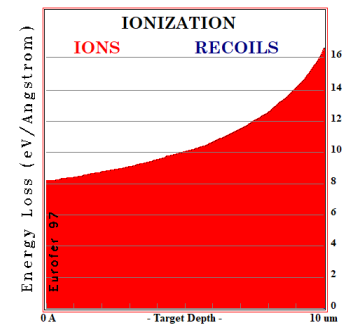
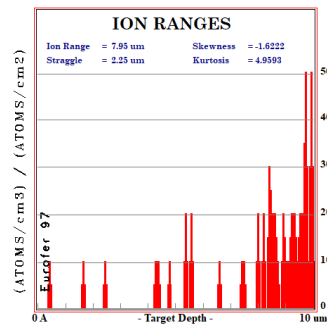
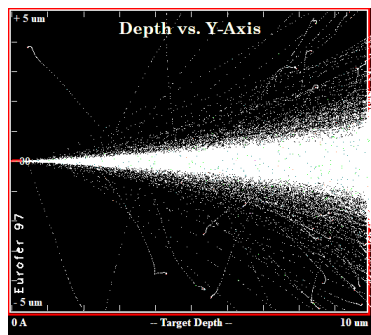
Hidrojen (20 keV)



Hidrogen (1 MeV)

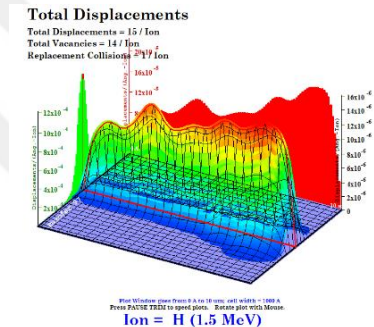
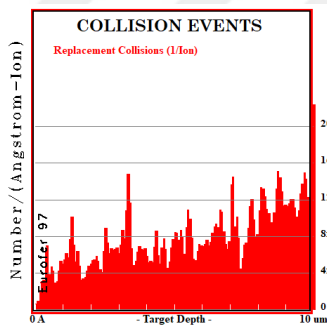
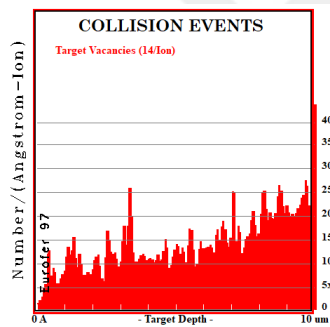
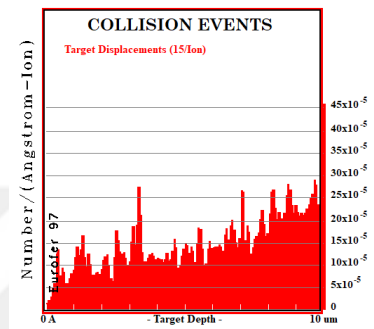
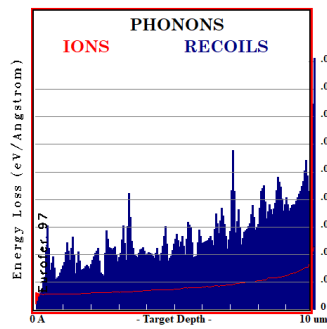
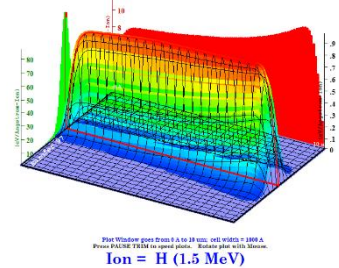


Hidrojen (1,5 MeV)

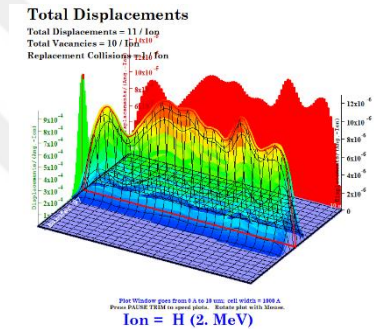
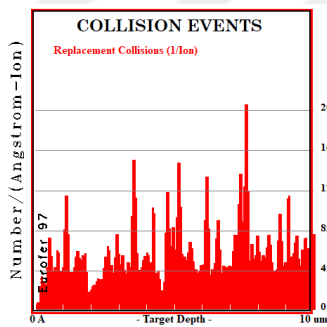
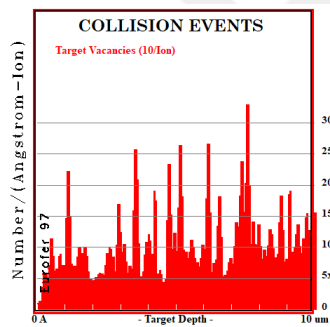
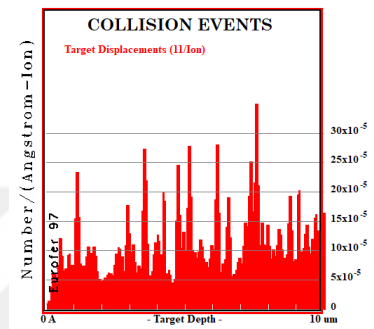
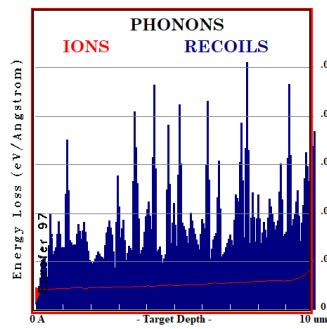
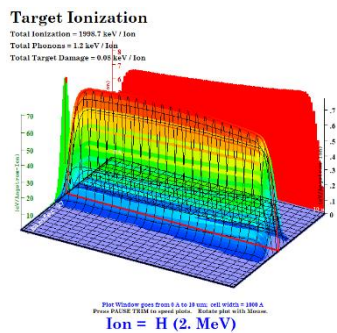
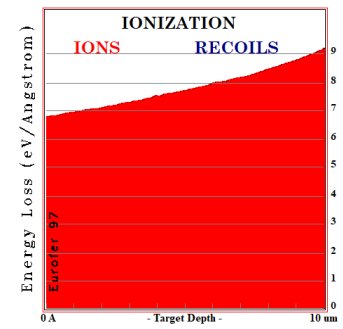
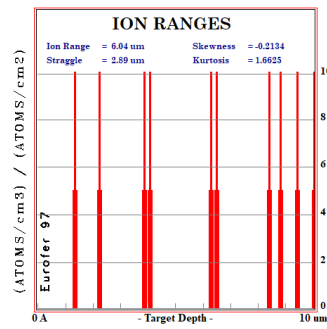
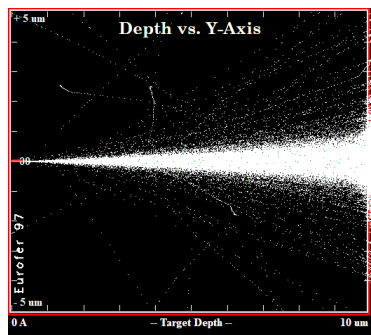


Target Ionization

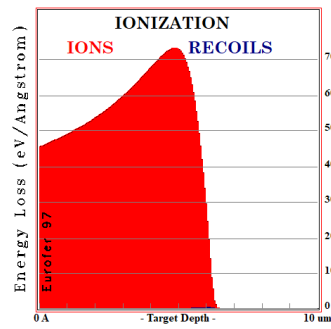
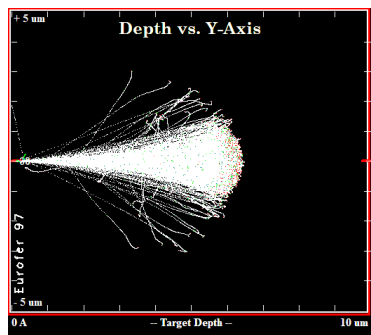
Total Ionization = 1095.7 keV / Ion
Total Phonons = 1.9 keV / Ion
Total Target Damage = 0.06 keV / Ion



Hidrogen (2 MeV)

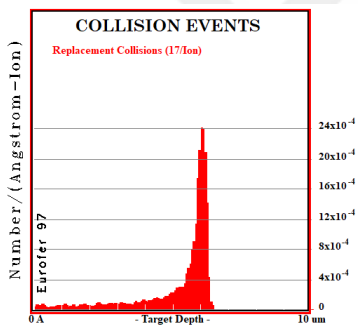
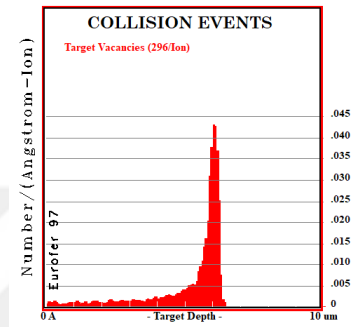
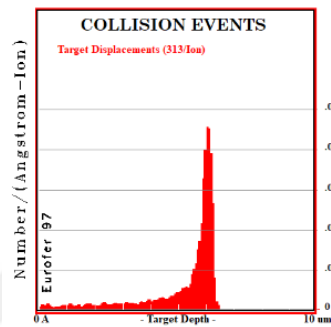
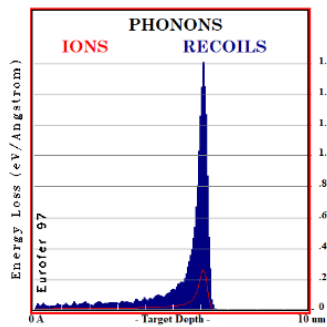
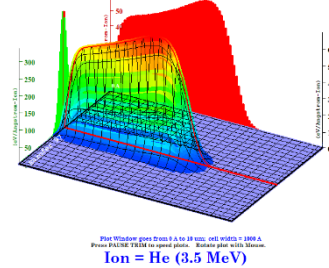


Helyum (3,5 MeV)



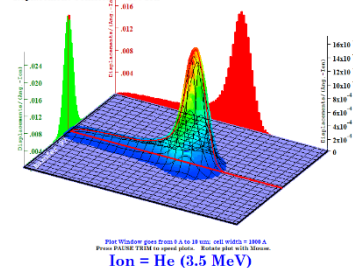
Target Ionization

Total Ionization = 3477.2 keV / Ion
 Total Fluences = 11.6 keV / Ion
 Total Target Damage = 0.89 kg / Ion

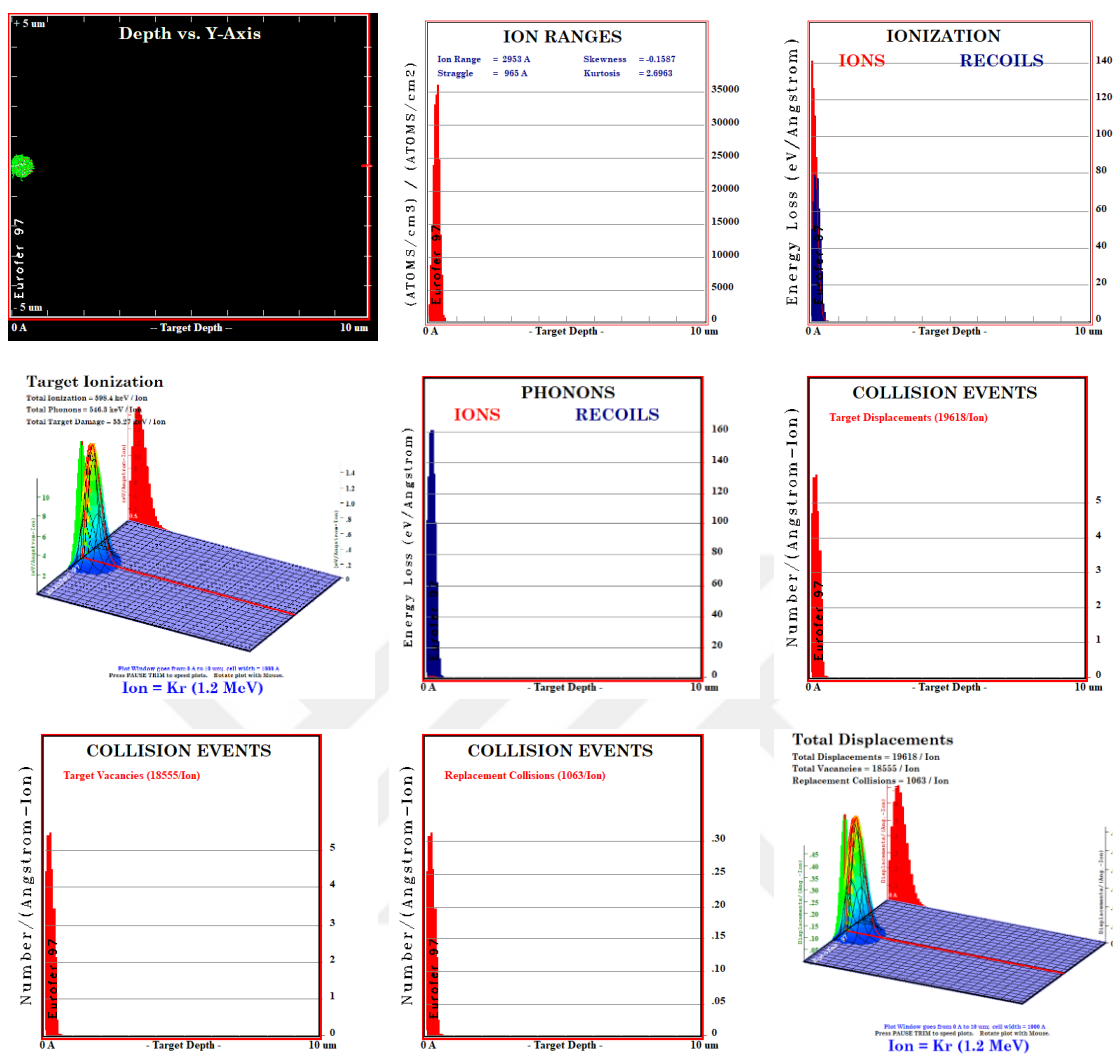


Total Displacements

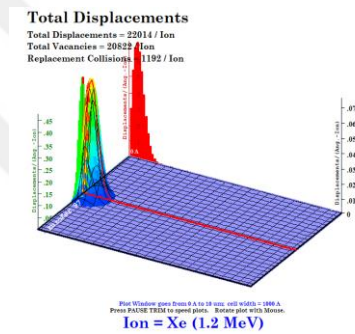
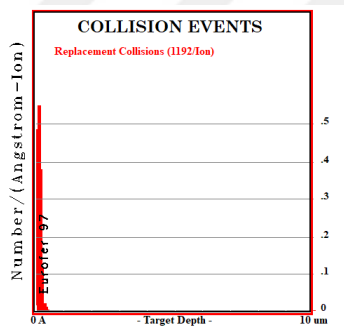
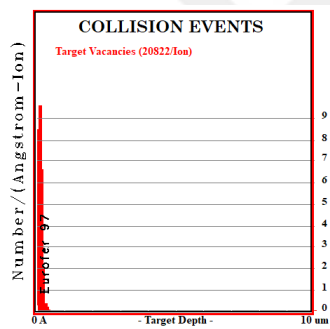
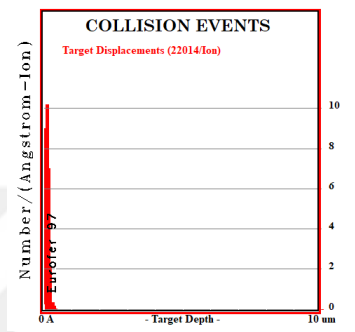
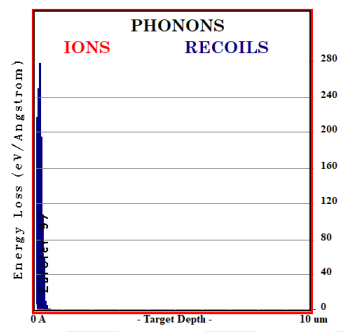
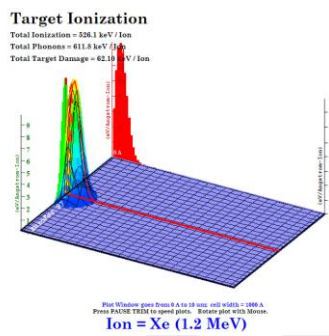
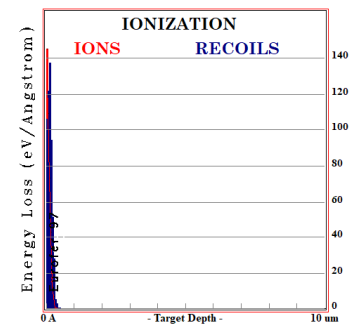
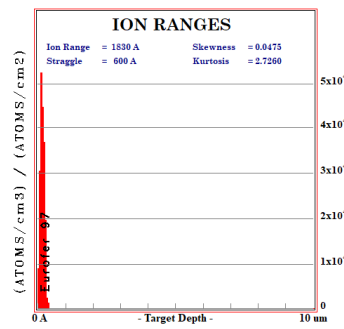
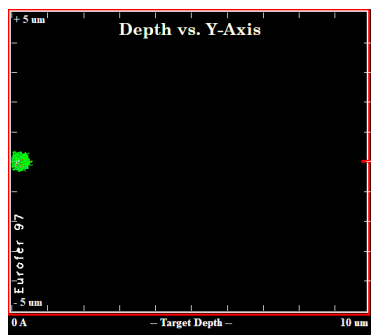
Total Displacements = 313 / Ion
 Total Vacancies = 296 / Ion
 Replacement Collisions = 17 / Ion



Krypton (1,2 MeV)

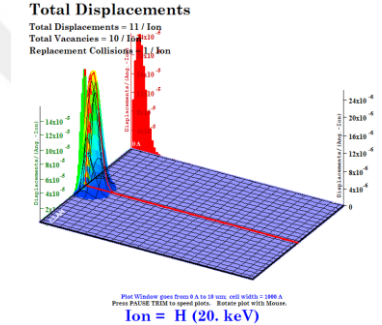
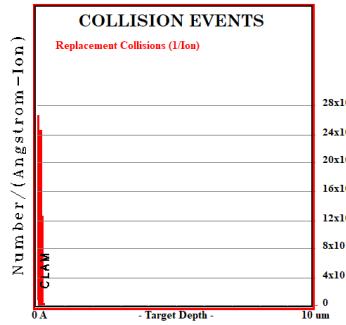
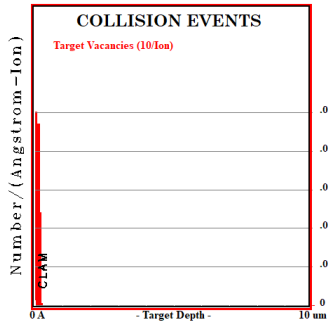
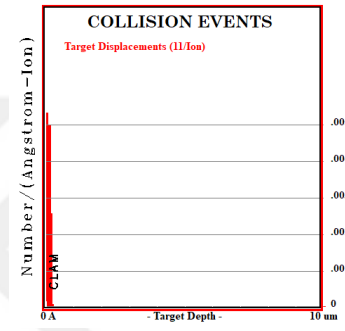
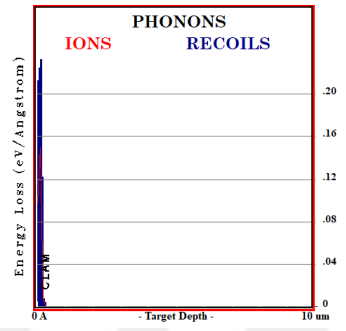
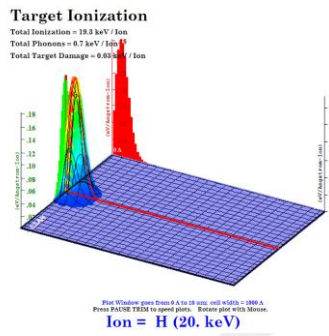
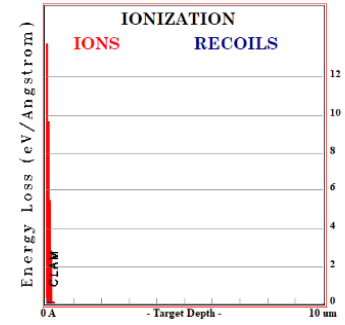
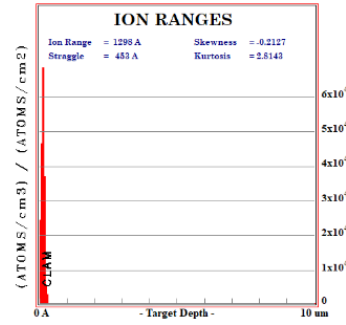
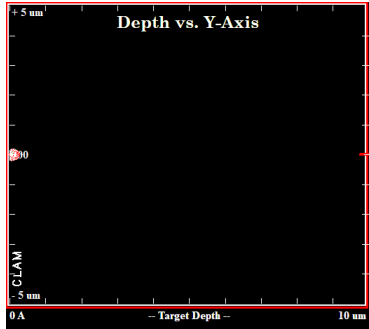


Xenon (1,2 MeV)

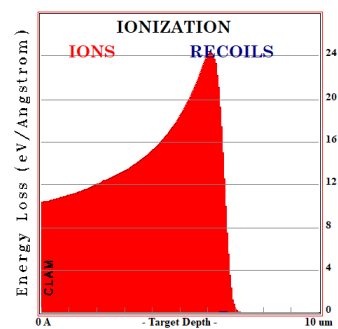
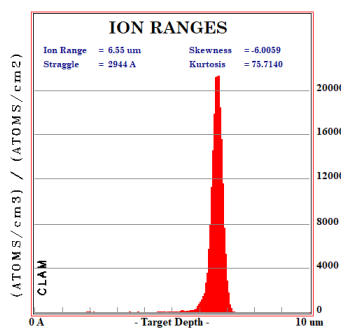
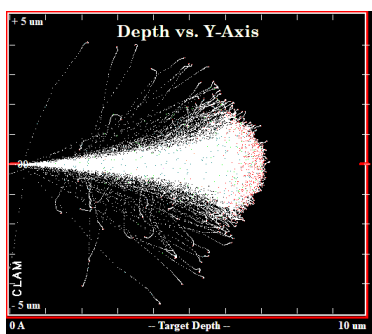


CLAM ile Yapılan Simülasyonlar

Hidrojen (20 keV)

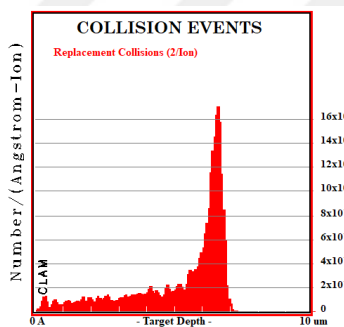
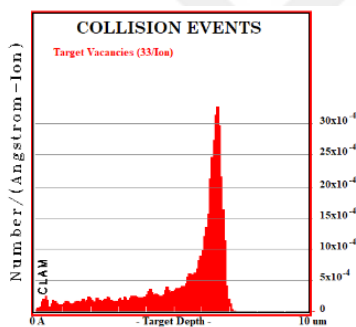
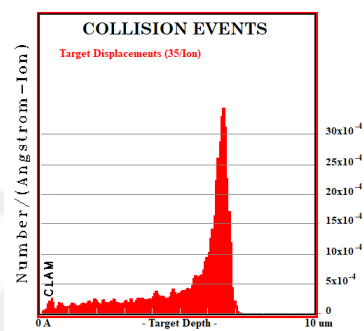
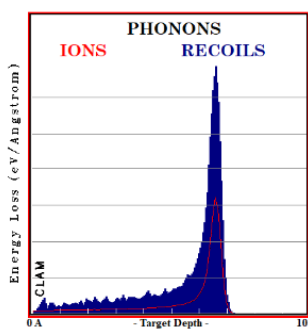
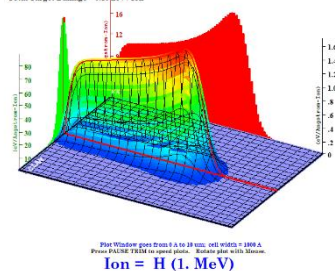


Hidrojen (1 MeV)



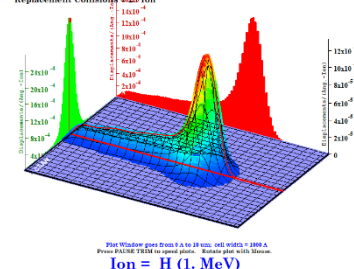
Target Ionization

Total Ionization = 999.1 keV/ion
Total Phonons = 1.8 keV/ion
Total Target Damage = 0.19 keV/ion

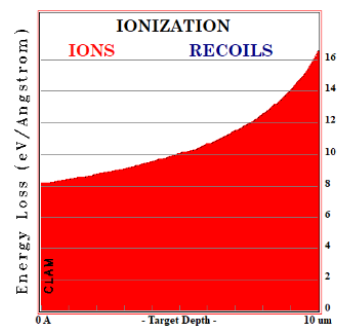
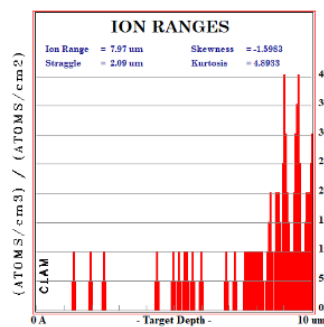
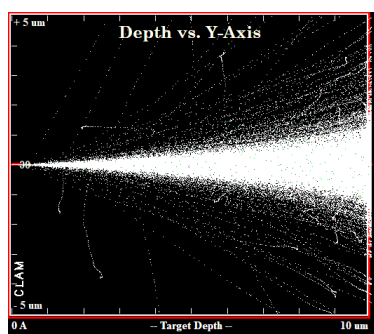


Total Displacements

Total Displacements = 35 / ion
Total Vacancies = 33 / ion
Replacement Collisions = 2 / ion

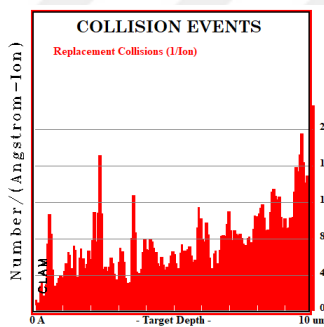
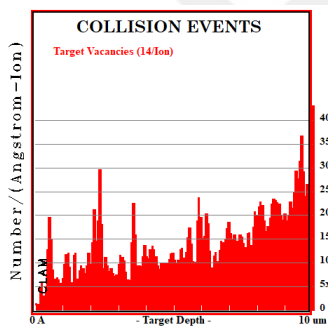
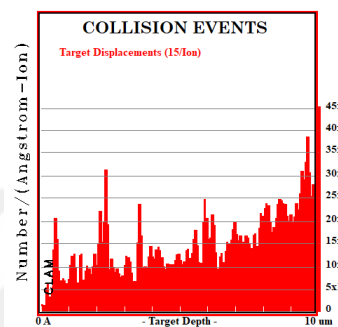
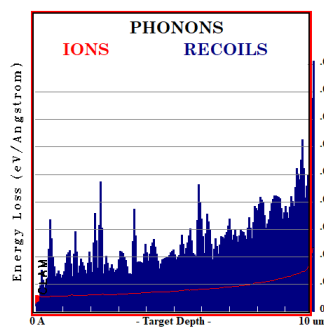
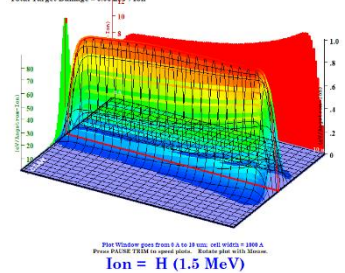


Hidrojen (1,5 MeV)



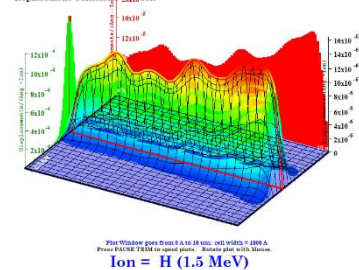
Target Ionization

Total Ionization = 1.095.0 Ion / Ion
Total Phonons = 1.0 keV / Ion
Total Target Damage = 0.00147 / Ion

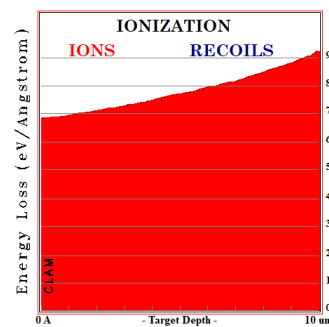
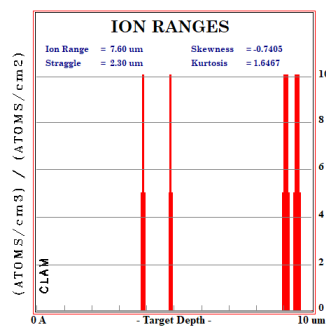
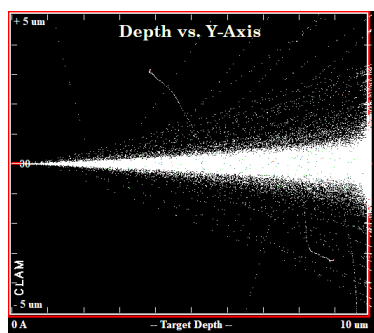


Total Displacements

Total Displacements = 15 / Ion
Total Vacancies = 14 / Ion
Replacement Collisions = 1 / Ion

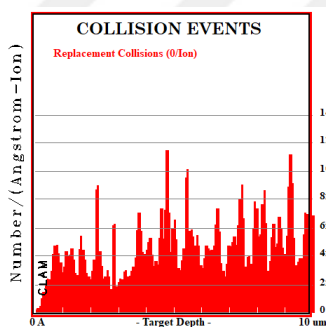
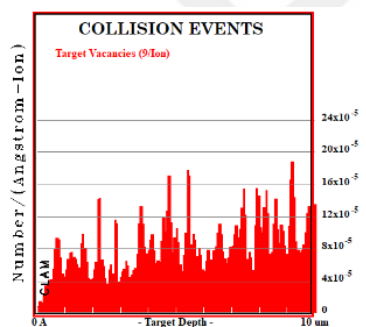
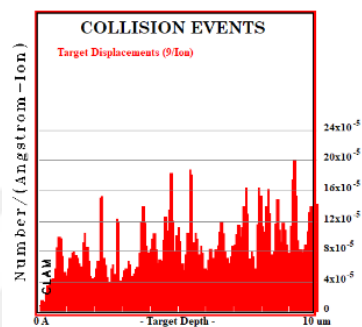
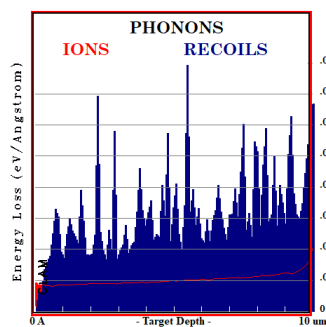
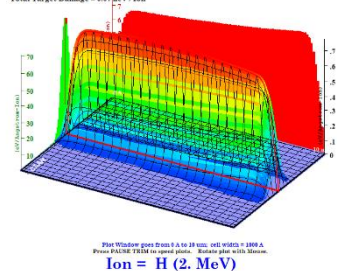


Hidrojen (2 MeV)



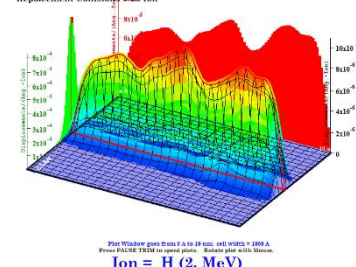
Target Ionization

Total Ionization = 1998.7 keV / Ion
Total Phonons = 1.1 keV / Ion
Total Target Damage = 6.07 keV / Ion

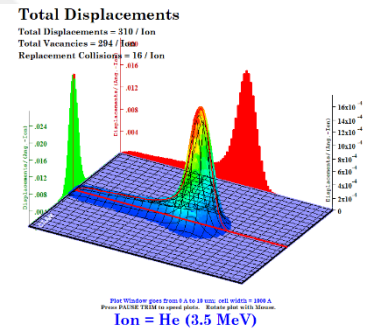
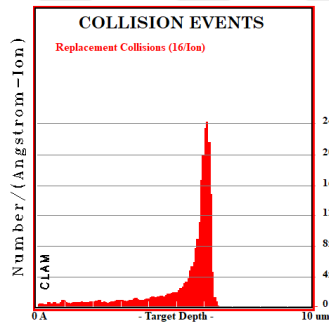
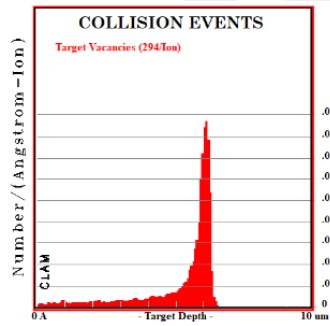
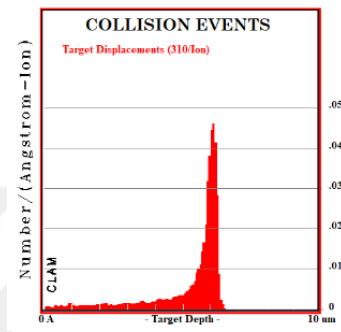
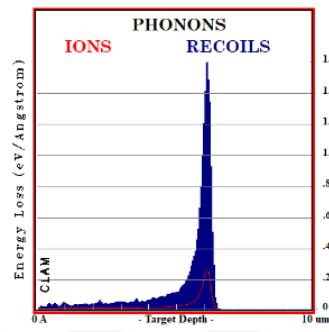
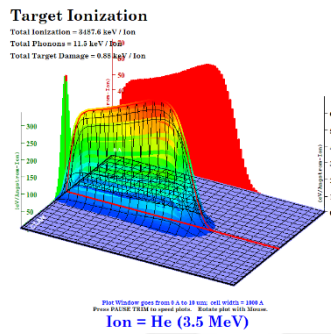
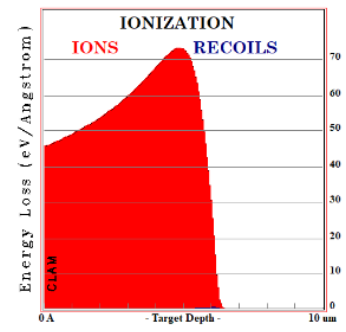
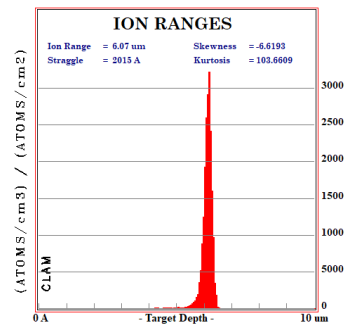
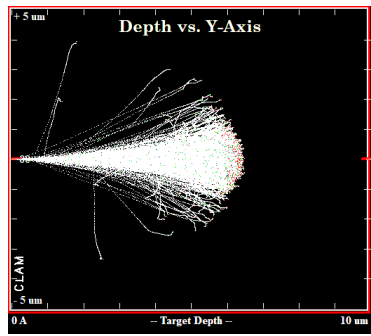


Total Displacements

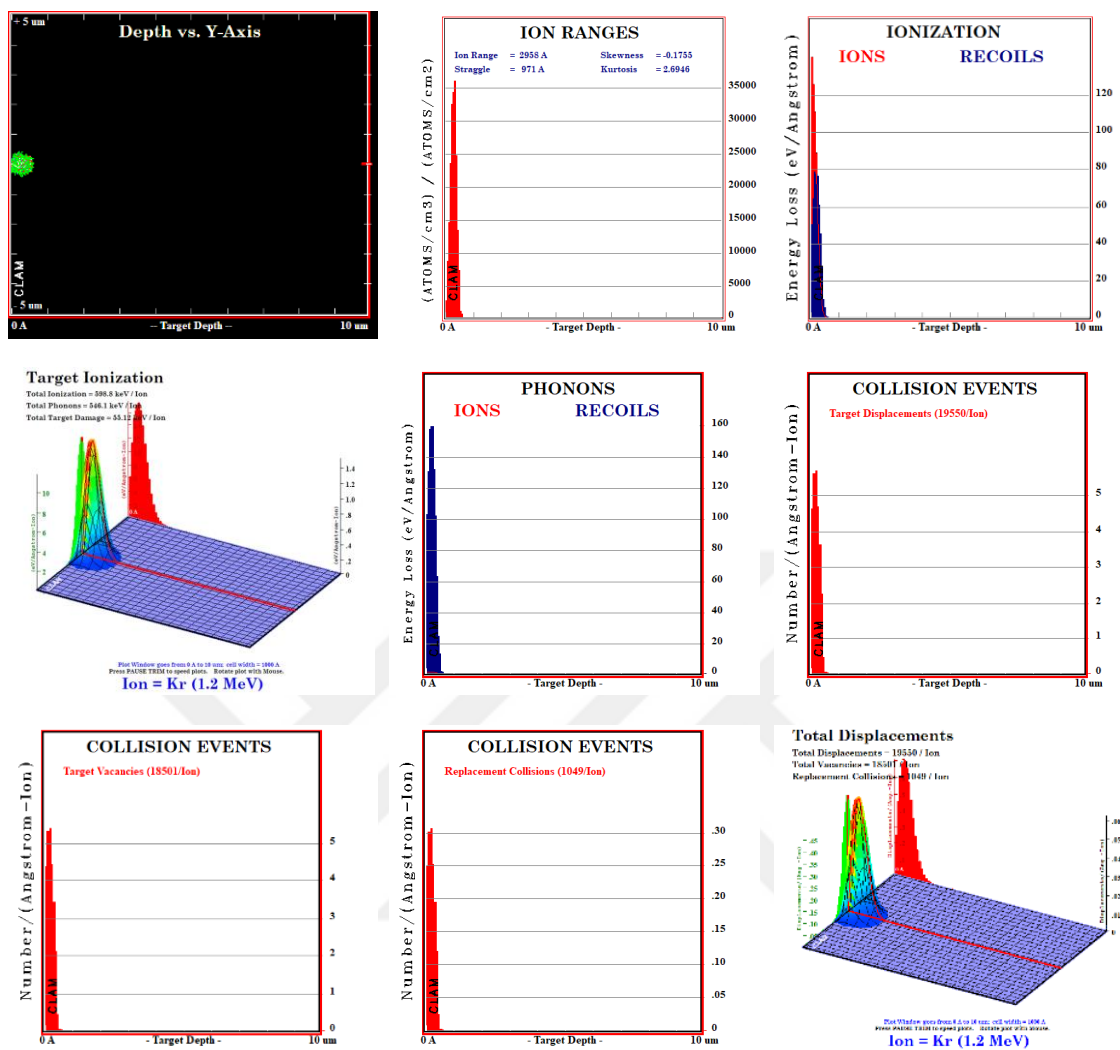
Total Displacements = 9 / Ion
Total Vacancies = 9 / Ion
Replacement Collisions = 0 / Ion



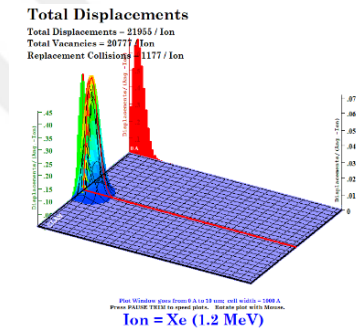
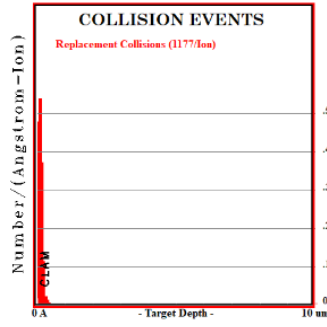
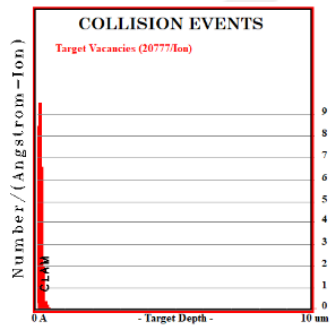
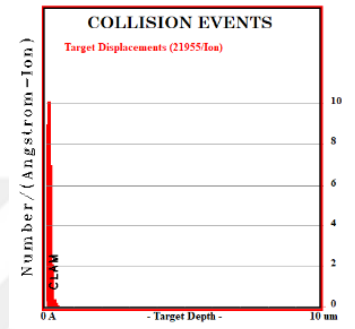
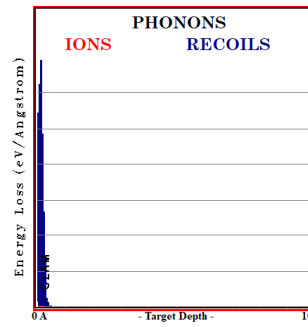
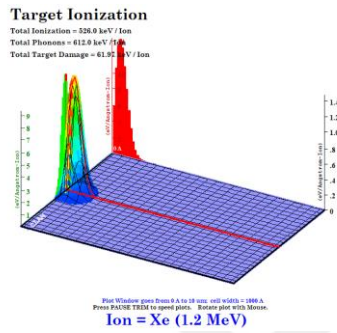
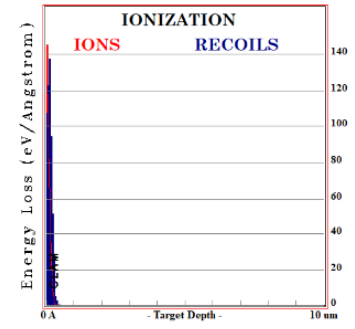
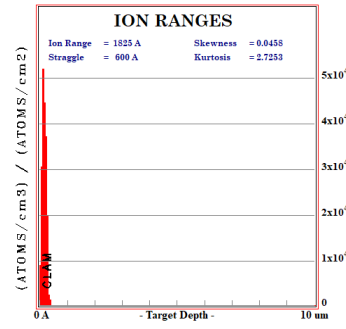
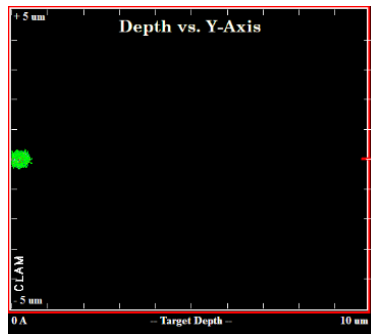
Helyum (3,5 MeV)



Krypton (1,2 MeV)



Xenon (1,2 MeV)



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Eyyüb POLAT

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Kolukısa Anadolu Lisesi, 2014

Lisans : Sinop Üniversitesi, 2019

Mesleki Deneyim

İş Yeri : İnönü Üniversitesi Turgut Özal Tıp Merkezi Eğitim ve
Araştırma Hastanesi Nükleer Tıp Birimi - Stajyer, 2017

İş Yeri : Türkiye Atom Enerjisi Kurumu- Stajyer, 2018