

T.C.
SİNOP ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİSİPLİNLERARASI NÜKLEER ENERJİ VE ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM
DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**NÖTRON ETKİLEŞİMLİ HİDROJEN İYONLARININ ZİRCALOY YAKIT
ZARFLARINDA YAYILIMI VE HİDRİT/DİSLOKASYON
OLUŞUMLARINA BAĞLI MALZEME HASARI**

YAZAR
FAHRETTİN HOCAOĞLU

DANIŞMAN
DOÇ. DR. TURGAY KORKUT

SİNOP – 2019

TEZ KABUL

Yazarın adı soyadı tarafından hazırlanan “NÖTRON ETKİLEŞİMLİ HİDROJEN İYONLARININ ZİRCALOY YAKIT ZARFLARINDA YAYILIMI VE HİDRİT/DİSLOKASYON OLUŞUMLARINA BAĞLI MALZEME HASARI” başlıklı bu çalışma, 09.07.2019 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak, jürimiz tarafından **YÜKSEK LİSANS tezi** olarak kabul edilmiştir.

Başkan Doç. Dr. Turgay KORKUT
Sinop Üniversitesi
Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi
Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü



Üye Doç. Dr. Hatun KORKUT
Sinop Üniversitesi
Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi
Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü



Üye Dr. Öğrt. Üyesi Bünyamin AYGÜN
Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi
Meslek Yüksekokulu



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.

Fahrettin HOCAOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	i
SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
ÇİZELGELER LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	x
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. Temel Parçacıklar	4
2.2. Temel İyonize Işınım Çeşitleri	4
2.2.1. Alfa (α) Işınımı	4
2.2.2. Beta (β^+ / β^-) Işınımı	5
2.2.3. Gama (γ) Işınımı	6
2.3. Parçacıkların Maddeyle Olan Etkileşimleri	6
2.3.1. Yüklü Parçacıkların Maddeyle Olan Etkileşimleri	6
2.3.2. Fotonların Maddeyle Olan Etkileşimleri	6
2.3.3. Nötronların Maddeyle Olan Etkileşimleri	8
2.3.4. Tesir Kesit Kavramı	9
2.4. Parçacıkların Malzeme Hasarı	10
2.4.1. Parçacıkların Madde İçindeki Menzilleri	11

2.4.2. Parçacıkların Maddede Oluşturdukları Zarar Mekanizması	12
2.4.3. Madde İçerisindeki Safsızlıkların Difüzyon Hareketi	12
2.5. Reaktör Bütünlüğünde Yakıt Zarflarının Önemi	13
2.5.1. Reaktörler ve Zirkonyum Alaşımı Yakıt Zarfları	14
2.5.2. Zircaloy Yakıt Zarflarının Maruz Kaldığı Reaksiyonlar	16
2.5.3. Zirkonyum – Su Etkileşiminin Difüzyon Mekanizması	20
3. MATERYAL VE YÖNTEM	22
3.1. H ⁺ menzillerinin hesaplanmasında takip edilen yöntem ve aşamaları	22
3.1.1. Zircaloy-4 zarf yüzeyi H ⁺ akışı ve zarf boyunca saçılımı	22
3.1.2. Hidrit halkası varlığında zircaloy-4 zarf yüzeyi H ⁺ akışı ve zarf boyunca saçılımı	24
3.2. Hesaplama ve analizlerde kullanılan kodlar	24
4. BULGULAR	27
5. TARTIŞMA	32
6. SONUÇ	34
KAYNAKLAR	35
ÖZGEÇMİŞ	38

SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ

α	alfa parçacığı
β	beta ışını
γ	gama ışını
b	barn
Bkz.	Bakınız
Cd	Kadmiyum
-e	elektron
+e	pozitron
FLUKA	FLUktuierende KAskade (Nükleer Similasyon Kodu)
H	hidrojen
H+	hidrojen iyonu
I-131	radyoaktif iyod, kütle numarası 131
ρ	yoğunluk
Kr-85	radyoaktif kripton gazı izotopu, kütle numarası 85
keV	kilo elektron volt
LET	Linear Energy Transfer (Doğrusal Enerji Kaybı)
LOCA	Loss of Coolant Accident (Soğutucu Akışkan Kaybı Kazası)
MeV	mega elektron volt
MTR	Malzeme Test Reaktörü
n°	nötron
O	oksijen

+p	proton
PWR	Pressurized Water Reactor (Basınçlı Su Reaktörü)
R	Yarıçap
S	Stopping power (durdurma gücü), S
SRIM	Stopping and Range of Ions in Matter (İyonların Menzili ve Madde İçinde Durdurulması – iyonların madde içerisindeki hareketini inceleyen bir nükleer kod)
TRIM	TRansport of Ions in Matter (Madde İçi İyon Taşınımı - SRIM kodunun bir modülü)
UO ₂	uranyum oksit
Xe-133	radioaktif zenon gazı izotopu, kütle numarası 133
Zr	zirkonyum
ZrH ₂	zirkonyum hidrit
ZrO ₂	zirkonya, zirkonyum oksit

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Nükleer çekirdekler bozunum grafiği	5
Şekil 2.2. Fotonların maddeyle olan etkileşimleri	7
Şekil 2.3. Atom numaraları ve enerji değerlerine göre foton etkileşim eğilimleri	8
Şekil 2.4. Nötron tesir kesit seçimi	10
Şekil 2.5. Değişik parçacıkların madde içindeki menzilleri	11
Şekil 2.6. Parçacıkların maddenin kafes yapısı içindeki davranışları	12
Şekil 2.7. Kütle transferi ve n°difüzyon analogisi	13
Şekil 2.8. H ₂ infilakların neden olduğu örnekler	14
Şekil 2.9. Nükleer yakıt ve çevre arasındaki bariyerler	15
Şekil 2.10. Zirkonyum alaşım yakıt çubukları demeti	16
Şekil 2.11. Zirkonyum cevheri ve metali	16
Şekil 2.12 Zircaloy zarfta zirkonya halkası oluşumu	18
Şekil 2.13. Zircaloy zarfta hidrit halkası oluşumu.....	19
Şekil 2.14. Zirkonyum – su reaksiyonlarında sıcaklığa bağlı H ₂ oluşumu	19
Şekil 2.15. Zirkonyumun suyla olan etkileşimleri	20
Şekil 3.1. PWR yakıt hücresi kesiti	23
Şekil 3.2. Hidrit halkası varlığında PWR yakıt hücresi kesiti	24
Şekil 3.3. FLUKA parçacık transport kodu	25
Şekil 3.4. SRIM kodu TRIM modülü ara yüzü	25
Şekil 3.5. SRIM modülü örnek iyon transferi analizi	26
Şekil 4.1. ZrH ₂ halkası yokluğunda zarf yüzeyinde oluşan enerjiye bağlı H ⁺ akısı.....	27
Şekil 4.2. Hidrit halkası yokluğunda yakıt zarfı boyunca H ⁺ yayılımı (0-31 µm arası derinlik)	28
Şekil 4.3. Hidrit halkası yokluğunda yakıt zarfı boyunca H ⁺ yayılımı (0-57 µm arası derinlik)	28
Şekil 4.4. Hidrit halkası yokluğunda yakıt zarfı boyunca H ⁺ yayılımı (0-570 µm arası derinlik)	29
Şekil 4.5. ZrH ₂ halkası durumunda zarf yüzeyinde oluşan enerjiye bağlı H ⁺ akısı	29

Şekil 4.6. Hidrit halkası durumunda zarf içi H ⁺ yayılımı (0-60 µm arası derinlik)	30
Şekil 4.7. Hidrit halkası durumunda zarf içi H ⁺ yayılımı (0-570 µm arası derinlik)	31



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 2.1. Zirkonyum ve bazı reaksiyon bileşiklerinin temel özellikleri	17
Çizelge 2.2. Zircaloy-2 ve zircaloy-4 alaşım oranları	17
Çizelge 2.3. Zr ve H ₂ O etkileşimleri	18
Çizelge 3.1. Hidrit oluşum durumuna göre yakıt çubuğu geometri değerleri	23
Çizelge 5.1. Hidrit halkası varlığında H ⁺ menzil kayması	33



ÖZET

NÖTRON ETKİLEŞİMLİ HİDROJEN İYONLARININ ZİRCALOY YAKIT ZARFLARINDA YAYILIMI VE HİDRİT/DİSLOKASYON OLUŞUMLARINA BAĞLI MALZEME HASARI

Yakıt zarfının bütünlüğünün sağlanmasıyla reaktörün bütünlüğünün sağlanması arasında adeta doğrudan bir ilişki vardır. Yakıt zarfları reaktör çalışma şartlarında değişik etkilere maruz kalmaktadır. Yakıt zarflarının ömrünü belirleyen bu etkilerden belki de en önemlisi yakıt zarflarında zirkonyum hidrit (ZrH_2) oluşumudur.

Mevcut araştırmalarda, ZrH_2 oluşumunda H iyonlarının Zr metali içerisinde ilerlemesinin stres, sıcaklık, konsantrasyon gradientleri altında sadece difüzyon etkisiyle olduğu varsayılmaktadır. Yoğun nötron (n) akısının ve radyoaktif etkileşimlerin olduğu reaktörde ZrH_2 oluşumunda H iyonlarının nötron çarpışmaları neticesinde Zr içerisine bombardımanı etkisinin literatürde pek yer almadığı görülmektedir. Nötron çarpışmaları etkisiyle Zr içerisinde ilerleyen H iyonlarının kat ettiği mesafenin, normal madde difüzyonu şeklinde görülen hidrit oluşum mesafesi ve zirkonyum oksit (zirconia) oluşum mesafesi içerisinde kalması durumunda bile H iyonlarının nötron etkileşimi sonucu zarfta kat ettiği mesafenin ve yol boyunca neden olabileceği hidrit kümelerinin zarf üzerindeki olası olumsuz etkilerinin en doğru ve en iyi şekilde belirlenmesinde oldukça önemli olabileceği değerlendirilmektedir.

Belirtilen etkilerin hesaplanabilmesi ve analizlerin yapılabilmesi için üretilen nötronların su tarafından yavaşlatılırken ürettikleri H iyonlarının enerji değerlerinin bir radyasyon transport koduyla (FLUKA) tespit edilerek bir başka koda (SRIM) girdi teşkil etmesi ve böylece zircaloy-4 zarfa bombardıman edilen bu değişik enerjilerdeki H iyonlarının malzemedeki transferinin takip edilmesiyle gerekli analizlerin tamamlanması işbu çalışmanın konusunu teşkil etmektedir.

Anahtar Kelimeler: hidrit, zirconia, zircaloy zarf, hidrojen iyon transferi

ABSTRACT

NEUTRON INDUCED HYDROGEN ION PROPAGATION INTO ZIRCALOY CLADDING AND MATERIAL DEGRADATION DUE TO HYDRIDE/DISLOCATION FORMATION

There is a direct relationship between the integrity of the fuel cladding and the integrity of the nuclear reactor. Fuel claddings are faced with various impacts in reactor normal operation conditions. One of the most important of those effects that is responsible from the operational lifetime of the claddings is zirconium hydride (ZrH_2) formation.

In current researches it is assumed that in ZrH_2 formation, the propagation of H ions in Zr metal is done mostly by the effect of material diffusion under the stress, temperature and concentration gradients. In a reactor where dense n^0 fluxes and radioactive interactions are observed, the role of the n^0 -H ion collisions in the formation of ZrH_2 where H ions are bombarded into Zr material, is not considered much. Even if the distance taken by the H ions induced by the n^0 collisions propagating into the Zr material, is smaller than the distances where the hydride and zirconia are formed, the ranges of H ions into the Zr where hydride loops are formed may still be worth to analyse in order to determine the negative impacts on the cladding more precisely.

In order to calculate the effects and make the proper analysis, the energy values of H ions produced by the neutrons during moderation in water are calculated first by the help of a nuclear code, say FLUKA and the outputs of it will be inputs to another code for example the SRIM code and as a result the H ions at various energies bombarded to zircaloy-4 cladding will be traced and analysed thus making the scope of herein this research.

Key Words: hydride, zirconia, zircaloy cladding, hydrogen ion transfer

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecinde derslerini takip ettiğim, değerli bilgi ve fikirlerinden istifade ettiğim tüm hocalarımla ve akademisyenlerimizin her birine teşekkürlerimi bildiririm. Tez konularını karşılıklı değerlendirerek tez konumla ilgili bazı pürüzlerin giderilmesinde, yöntem ve yaklaşımların tespitinde ve bazı detayları netleştirmemde danışmanlığına başvurduğum, böylece fikirlerinden, bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim değerli danışman hocam Doç. Dr. Turgay KORKUT'a da özellikle teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca uzun yıllar nükleer sektörde çalışan değerli arkadaşım Dr. Aydın KARAHAN'la yaptığımız sektörün problemleriyle ilgili sohbet ve değerlendirmeler tez sürecinde ilham verici olmuştur. Öte yandan çok arzuladığım doktora çalışmamı yapabilmek için öncelikle yüksek lisans ve tez çalışması yapmak konusunda beni ikna eden ve zorlayan iş arkadaşım Zeliha TOPAL' a da teşekkür ediyorum.

Aynı zamanda bir başka işte çalışmanın da verdiği özellikle de zaman yönetimindeki zorlukları aşmamda kendi program ve imkanını zorlayarak bana esnek zaman imkanı da sağlayan değerli danışman hocam Doç. Dr. Turgay KORKUT'a gösterdiği kolaylık, ilgi ve anlayışı için bir kez daha insani duygular çerçevesinde teşekkürlerimi sunuyorum. Umarım uzun yıllar sonra tekrar tenefüs ettiğim bu akademik çevre ve üniversite, değerli akademisyenlerimizin de desteğiyle somut meyvelerini verecek ve yine umuyorum ki tüm değerli akademisyen ve hocalarımla, ulusal ve uluslararası çalışmalar yapmak konusunda da güç, cesaret ve ilham kaynağı olacaktır.

Ayrıca burada adını anmadığım, yüksek lisans ve tez sürecinde destek ve yardımlarını esirgememiş tüm değerli arkadaşlarıma ve aileme de en içten teşekkürlerimi sunarım.

Fahrettin HOCAOĞLU

1. GİRİŞ

M.Ö. 400'lü yıllarda Yunanlı filozof Democritus'un maddenin bölünemeyen en küçük parçası olarak ortaya attığı ve ilk defa dillendirdiği 'atomos' fikri, 1800'lerin başı Dalton Atom Modeli'yle tekrar insanlığın kafa yorduğu ve günümüzde de artık Democritus'un hayallerinin çok daha ötesine ulaştığı, günlük yaşamımızın bir parçası olmuştur. Süreç içerisinde insan, maddeyi daha iyi tanıyabilmek adına birçok atom modeli geliştirmiş ve birçok deney yapmıştır. Tüm bu çabalar sonucu geçtiğimiz yüzyılın başında özellikle de II. Dünya Savaşı yıllarını kapsayan kısa dönemde ciddi ilerlemeler olmuştur. (Bunch ve Hellemans, 2004; Williams, 2009; Evans, 1955; Lapp ve Andrews, 1972; Semat ve Albright, 1972; Moses vd., 1997)

Aslında 1932'de İngiliz fizikçi James Chadwick'in nötronu keşfetmesinden İtalyan fizikçi Enrico Fermi ve arkadaşlarının 1942'de ABD, Chicago'da Manhattan Projesi kapsamında ilk kontrollü fisyon reaksiyonlarını gerçekleştirmesine uzanan bu büyük ilerleme ancak 10 yıl gibi oldukça kısa bir sürede başarılabilmişti. Günümüzde ise birçok nükleer reaktör çeşidi olsa da tüm bu reaktörlerin kontrolünde hala aynı prensip kullanılmaktadır; nötron tutucu malzeme mekanizmalarıyla nötronları absorbe etmek, nötron sayısını, dolayısıyla fisyon reaksiyonlarının sayısını kontrol etmek. (Foderaro, 1971; Krane, 1987; Lamarsh, 1966; Liverhant, 1960)

Sovyet Rusya'sının ülkenin bilim şehri Obninsk'de 1954 yılında kurduğu 5 MW gücündeki nükleer reaktörü, tam yarım asır boyunca kesintisiz ve güvenli bir şekilde ticari amaçlar için elektrik üretmiş ve nükleer enerjinin barışçıl amaçlar için insanlığın hizmetinde güvenle kullanılacak bir enerji çeşidi olduğunu en iyi şekilde ispatlamıştır. Böylece bu tarihten bu yana nükleer enerjinin bu potansiyelini gören ülkeler bu nimetten yararlanmak istemiş ve ardı sıra birçok nükleer reaktörler inşa etmişlerdir. (Glasstone ve Sesonske, 1994; Wills, 1992; Murray, 1957; Isbin, 1963; Duderstadt ve Hamilton, 1975)

İnsanlığın artan enerji ihtiyacı karşısında Sanayi Devrimi öncesinden bu yana hidrokarbonların tüketilmesi dünyanın ortalama ısısını ortalama 1 °C artırmış ve bu da son 10.000 yılın en yüksek değeridir. İnsanoğlunun hem üstel bir şekilde artan enerji ihtiyacını karşılamak hem de tehlike çanları çalan dünyayı gelecek nesiller için tekrar yaşanabilir temiz bir halde bırakmak için bilim insanları nükleer enerjiyi güçlü bir araç olarak değerlendirmektedir. Nükleer enerjinin bu müstesna konumu ve nükleer

teknikteki gelişmeler onu geleceğin en önemli ve vazgeçilmez enerji üretim aracı yapmaktadır. Günümüzde ılımlanmış nötron teknolojisine dayalı nükleer reaktörler kullanılırken özellikle de yakın gelecekte üretken tip nükleer reaktörlerin sayısının arttığını göreceğiz. Hâlihazırdaki tüketime göre ticari değeri olan Uranyum rezervleri yaklaşık 100 yıl kadar yetecekken üretken reaktörlerin kullanımı durumunda ise bu süre insanlığın daha 1000 sene boyunca enerji ihtiyacını karşılayabilecek şekildedir. Bazı ülkelerin bunu görerek üretken reaktör inşaat çalışma ve araştırmalarını yapması şu an için yeni bir nükleer çağın sessiz habercisidir. Günümüzde çoğunluğu PWR olmak üzere hâlihazırda 452 adet ticari nükleer reaktör işletme halinde ve 54 adet ticari nükleer reaktör de inşaat halindedir. (IAEA, 2019; Judd, 1981; Villani, 1979; Cochran ve Tsoulfanidis, 1990; OECD-NEA ve IAEA , 1995)

Tüm bu reaktörlerde enerji üretimi, nükleer yakıt içerisindeki reaksiyonları kontrol ederek ve iyi bir nötron ekonomisi uygulayarak gerçekleştirilmektedir. Nükleer yakıt, reaktörlerde demetler şeklinde uzanan ve üretken reaktörler dışındaki günümüz tüm ticari reaktörlerinde Zirkonyum alaşımlarından yapılmış ve yakıt zarfı dediğimiz ve etrafında nötron ılımlayıcı maddenin ve yakıtta üretilen ısıyı alıcı akışkanın da bulunduğu reaktör içerisindeki silindirik yapılarda yer almaktadır. (El-Wakil, 1996; Knudsen ve Katz; Collier, 1996; Tong, 1997; Sesonske, 1973; Todreas ve Kazimi, 1989) Dolayısıyla reaktörün bütünlüğü, Zirkonyum alaşımı yakıt zarflarının bütünlüğüyle doğrudan ilintilidir. Yakıt zarfları nükleer ve kimyasal reaksiyonların ve fiziksel süreçlerin en yoğun yaşandığı, soğutucu ve ılımlayıcı akışkanın yoğun basınç ve sıcaklık etkilerine ve reaktör içerisinde yüksek radyasyona maruz kaldığı yapılardır. Bu etkiler zirkonyum alaşımı malzeme üzerinde korozif etkilere, malzeme içerisinde safsızlıklara, malzeme tanecik yapısında bozulmalara, kırılğan ve sünek bir yapı oluşturarak zamanla şartlara da bağlı olarak zirkonyum alaşımı yakıt zarfında malzeme hasarına, yakıt zarfı mukavemetinde azalmalara neden olabilmektedir. (Benedict ve Pigford, 1981; Ecker ve Drake, 1986; Skelland, 1985; Kays, 1994; Bird vd., 2002; Gebhart, 1971; El-Wakil, 1981)

Mevcut çalışmamızda nükleer endüstride en yaygın kullanılan zircaloy-4 zirkonyum alaşımı PWR yakıt zarflarında zamanla yakıt zarfının mukavemetinin azalmasında önemli bir faktör olan ZrH_2 oluşumu sürecinde H iyonlarının n° çarpışmaları neticesinde Zr alaşımı içerisine bombardımanı etkisi incelenmiştir. (Peruzzini ve Poli, 2002; Manfred, 2012; Economou, 1981; NERI, 2002) Birçok

çalışmada ZrH_2 oluşumunda H iyonlarının Zr metalde ilerlemesinin stres ve sıcaklık gradienti altında sadece difüzyon etkisiyle olduğu ele alınmaktadır ve ZrH_2 oluşumunda H iyonlarının n° çarpışmaları neticesinde Zr alaşım içerisine bombardımanı etkisi literatürde pek yer almamaktadır. (Viscaino vd., 2007; Jang ve Kim, 2017) Bu çalışmayla reaktörde moderasyona uğrayan nötronların Zircaloy-4 yüzeyinde oluşturdukları H iyonlarının en yaygın enerji değerleri FLUKA' da tespit edilerek SRIM koduna girdi teşkil etmiş ve Zircaloy-4 zarfı boyunca bombardıman edilen bu değişik enerjideki H iyonlarının malzemede oluşturduğu katışık yapının boyutu tespit edilmiştir.



2. GENEL BİLGİLER

2.1. Temel Parçacıklar

Madde birçok atom ve temel parçacıktan oluşmuştur. Gerçekte birçok atom altı parçacık vardır ve tüm bu parçacıklar belli özelliklerine göre gruplanmıştır. Buna göre temel parçacıkları leptonlar ve hadronlar grubu diye iki kısımda incelenmektedir. Elektron, pozitron ve nötrino grubu leptonlar olarak adlandırılırken, proton ve nötronlar da hadronlar grubu olarak incelenmektedir. İki grup arasındaki en önemli fark leptonlarda zayıf nükleer kuvvetlerin ve hadronlarda da temel olarak güçlü nükleer kuvvetlerin etkin olmasıdır. Nükleer mühendislikte en önemli parçacıklar elektron, proton, nötron, nötrino ve fotondur.

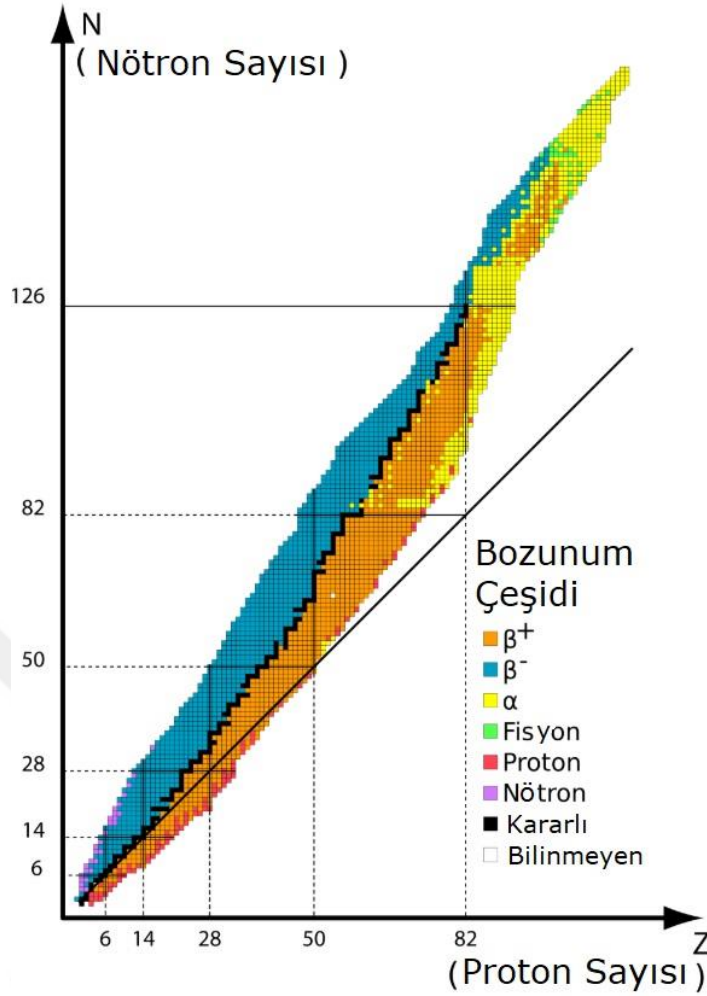
Elektron, durgun kütlesi $0,511 \text{ MeV}/c^2$ olup $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ yük değerine sahiptir. $-e$ ve $+e$ olmak üzere iki çeşit elektron vardır. Bunlar yüklerinin işaretleri farklı iki özdeş parçacıktır. Bir negatronla bir pozitron çarpıştığında $-e$ ve $+e$ yok olur ve buna mukabil iki foton oluşur. Oluşan fotonlara yok olma ışınımı denir. Protonlar $938,280 \text{ MeV}/c^2$ durgun kütlesine sahip olup elektron yük değerinde pozitif yüke sahiptir. Foton, bir elektromanyetik dalgaya eşlik eden bir enerji paketçisi olup sıfır kütle ve yüke sahiptir. Boşlukta da c ışık hızında hareket etmektedir. Belli şartlara göre hep parçacık hem de dalgacık özelliği gösterebilmektedir. Nötrino, foton gibi herhangi bir kütle veya yüke sahip değildir. Bir U-235 atomunun fisyonu sonucu açığa çıkan 207 MeV fisyon enerjisinin 12 MeV kısmından nötrinolar sorumludur. Fakat madde, nötrinoya karşı son derece ufak tesir kesiti gösterdiğinden bu enerjinin tamamı sisteme kazandırılmayan kaybolan enerjidir. Nötron, $939,573 \text{ MeV}/c^2$ durgun kütleli elektrik yükü olarak nötr olan ve çekirdek dışındayken yaklaşık 12 dakikalık bozunma ömrüne sahip ve nükleer mühendislikteki en önemli parçacıktır.

2.2. Temel İyonize Işınım Çeşitleri

2.2.1. Alfa (α) Işınımı

Şekil 2.1'de görüleceği üzere bazı ağır çekirdekler siyah kutucuklar şeklinde gösterilen kararlı nötron/proton yapısına yaklaşabilmek için alfa bozunumu yapmaktadır. Böylece sarı renkle gösterilen çekirdekler iki proton ve iki nötrondan oluşan $3727,409 \text{ MeV}/c^2$ kütlesinde bir He çekirdeği ışıması yaparak minimum enerji ve daha stabil bir potansiyel tercih etmektedir.





Şekil 2.1: Nükleer çekirdekler bozunum grafiği (Anonim, 2019. Bkz. Ref. 1)

2.2.2. Beta (β^+/β^-) Işınımı

Yine Şekil 2.1’de görüleceği üzere bazı ağır çekirdekler kararlı nötron/proton oranına ulaşabilmek için β^+ ışınımında olduğu gibi eğer nötron sayısı yetersizse proton-nötron dönüşümü; β^- ışınımında olduğu gibi eğer nötron sayısı fazlaysa da bu defa nötron-proton dönüşümü gerçekleştirerek çekirdek yapısındaki güçlü nükleer kuvvetleri çekirdek kararlılığını sağlayacak şekilde uyarlamaktadır. Buna göre Şekil 2.1’de turuncu ve mavi renkle gösterilen çekirdeklerin dağılım bölgesi oldukça anlamlı olup daha kararlı bir nötron-proton yapısına ulaşabilmek için bu bölgede sıralanan çekirdekler belirtilen ışınım ve geçişleri yapmak isteyecektir.

β^+ ışınımı:		β^- ışınımı:	
$p \rightarrow n^0 + e^+ + \bar{\nu}_e$	(2.2)	$n^0 \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$	(2.4)
${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_1 e^+ + \bar{\nu}_e$	(2.3)	${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_1 e^- + \bar{\nu}_e$	(2.5)

2.2.3. Gama (γ^0) Işınımı

Işınım yaparak kararlı bir nötron-proton yapısına ulaşan çekirdekler genellikle bir süre uyarılmış durumda kalır. Uyarılmış durumdan γ^0 fotonu yayınlayarak kararlı yapıya geçmektedir. γ^0 fotonlarının kaynağı çekirdek olduğundan yüksek enerjilere sahiptirler.



2.3. Parçacıkların Maddeyle Olan Etkileşimleri

Temel parçacıkların maddeyle olan etkileşimleri genelde iyonizasyonlara dolayısıyla made içerisinde bazı etkilere ve değişimlere neden olabilmektedir. Bu bağlamda bu etkileşimler temel olarak üç grup altında incelenebilmektedir.

- Yüklü parçacıkların maddeyle olan etkileşimleri
- Fotonların maddeyle olan etkileşimleri
- Nötronların maddeyle olan etkileşimleri

2.3.1. Yüklü Parçacıkların Maddeyle Olan Etkileşimleri

Yüklü parçacıklar maddeyle S , (stopping power) dediğimiz durdurma gücü etkisi çerçevesinde etkileşmektedir. S durdurma gücü yüklü parçacığın menzili boyunca yitirdiği enerjidir. Bir parçacığın iyonizasyonu yol boyunca oluşturduğu iyon çiftleriyle ilgilidir.

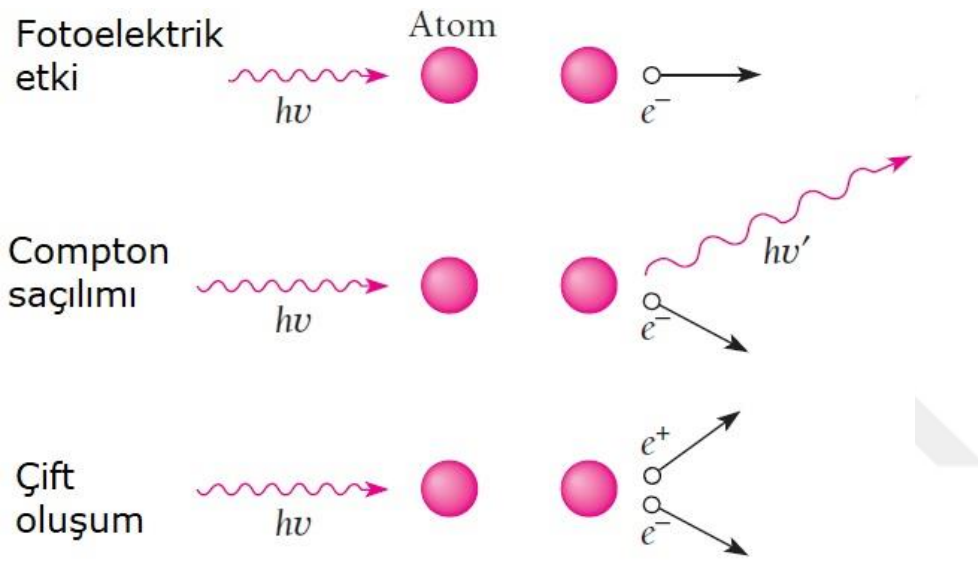
İyonize parçacıkların madde içinde ilerlerken uğradığı enerji kaybı ve katettiği mesafe LET, (Linear Energy Transfer) dediğimiz Doğrusal Enerji Kaybı ifadesiyle tanımlanmaktadır. Aşağıda verilen denklem madde içerisinde ilerleyen parçacıkların çarpışma ve radyasyon terimleri şeklinde lineer enerji kaybı sonucu katettikleri menzili vermektedir. LET değeri parçacığın kütlesi arttıkça artmaktadır. Örneğin 1 MeV'lik α parçacığı için suda LET değeri 90 keV/ μm iken bu değer 1 MeV'lik elektron için ancak 0,19 keV/ μm 'dir. (Lamarsh, 2001)

$$S = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{col} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} \quad (2.7)$$

2.3.2. Fotonların Maddeyle Olan Etkileşimleri

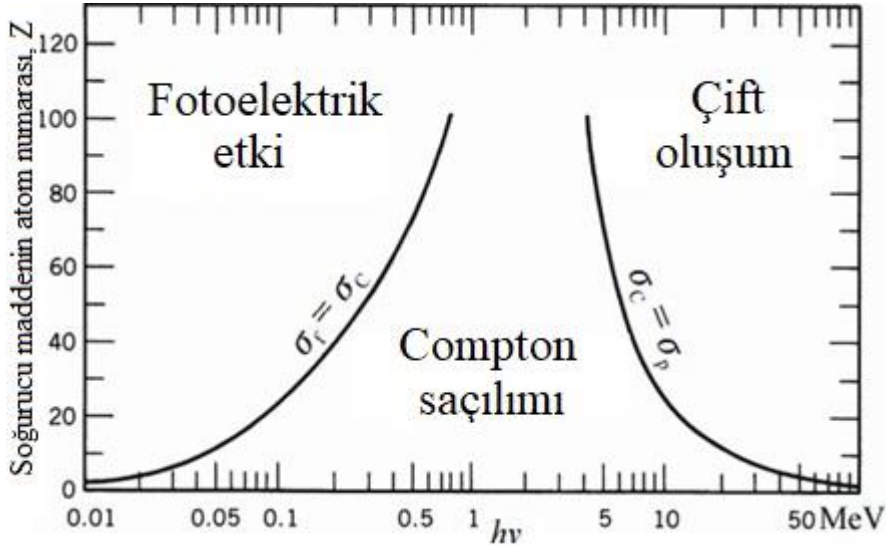
Fotonların maddeyle etkileşimleri ise Şekil 2.2.'de görüldüğü üzere üç farklı mekanizma şeklinde olmaktadır. Fotoelektrik etki dediğimiz olayda fotonlar bir atom

elektronuyla etkileşirken onu atomdan sökmekte ve foton da yok olmaktadır. Compton saçılımı dediğimiz etkide ise foton serbest bir -e ile etkileşirken foton da elektron da momentum korunumuna göre hareket etmektedir. Bir dış yörünge elektronu da gelen enerjetik bir foton enerjisine göre oldukça düşük enerjili olduğundan bu dış yörünge elektronları da serbest elektron hüviyetinde değerlendirilebilmektedir. Bir başka mekanizma da çift oluşum (pair production) dediğimiz olaydır. Bu durumda yeterli eşik enerjisine sahip (1.02MeV) enerjetik bir γ^0 (gama) fotonu ağır bir çekirdeğin potansiyel bariyerine çarptığında bir $-e$ (elektron) ve bir $+e$ (pozitron) şeklinde her biri en az 511 keV olan iki ayrı parçaya ayrılmaktadır.



Şekil 2.2. Fotonların maddeyle olan etkileşimleri (Beiser, 1994)

Fotonların maddeyle olan etkileşimlerinin eğilimlerine bakıldığında da Şekil 2.3.'teki gibi bir desen söz konusudur. Buna göre düşük enerjilerde ve yüksek Z atom numaralarında Fotoelektrik etkisi, orta enerjilerde Compton etkisi ve yüksek enerji yüksek atom numaralarında da çift-oluşum etkilerinin baskın olduğu gözlemlenmektedir. Compton olayı ışığın tanecikli bir yapıda olduğunu (foton olarak parçacık özelliği de taşıyabildiğini) göstermesi bakımından önemlidir. Bir elektronun durgun kütleinin $0,511 \text{ MeV}/c^2$ olduğu bilindiğinden bu durumda çift oluşum için de en az iki adet durgun elektron kütleisine eşdeğer 1,022 MeV enerjili bir fotona ihtiyaç duyulmaktadır. Bu etkileşimde oluşan pozitron hemen yok olduğundan bu olay (nükleer) yokoluş (annihilation) olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.3. Atom numaraları ve enerji değerlerine göre foton etkileşim eğilimleri (Krane, 1987)

2.3.3. Nötronların Maddeyle Olan Etkileşimleri

Yüklü parçacık etkileşimlerinden farklı olarak nötronların maddeyle olan etkileşimleri ise çekirdek etkileşimleri şeklinde olmaktadır. Nötronlar nötr parçacıklar olduklarından çekirdeklerle olan etkileşimi ancak güçlü nükleer kuvvetler şeklinde olmaktadır. Güçlü nükleer kuvvetlerin menzili ise çekirdek boyutlarıyla karşılaştırılabilecek mesafede olduğundan ve bir çekirdeğin boyutu da atom boyutuna göre oldukça ufak olduğundan nötronların çekirdeklerle reaksiyon olasılıkları nötron enerjilerine bağlı değişiklik göstermekle birlikte genel olarak çok düşüktür.

Bilindiği üzere tabiattaki tüm oluşum ve etkileşimler hep temel kuvvetler etkisiyle olmaktadır. Bu temel kuvvetler şunlardır:

- Kütleçekim kuvveti
- Zayıf nükleer kuvvetler
- Elektromagnetik kuvvetler
- Güçlü nükleer kuvvetler

Nötronun maddeyle güçlü nükleer kuvvetler şeklinde etkileşmesi olasılığı, nötron enerjisine bağlı olan ve tesir kesitleri dediğimiz olgu ile ifade edilmektedir. Örneğin U-235 izotopunun 0,0253 MeV (2200 m/s) enerjideki termal nötronlara karşı olan fisyon tesir kesit değeri 587b olup (1 barn = 10^{-24}cm^2) U-238 için bu enerjilerde herhangi bir fisyon söz konusu değildir. Nötron etkileşimi sonucu dolaylı iyonizasyon oluşmaktadır. Bu iyonizasyon sonucu birçok yüklü parçacık ve γ^0 (gama) ışınımı da

oluşmaktadır. Günümüz termal nükleer reaktörlerin birçoğunda termal nötronların U-235 izotopu için gösterdiği tesir kesitinin yüksek olması dolayısıyla iyi bir nötron ekonomisi ve kontrolü sağladığı için hafif zenginleştirilmiş yakıt kullanılmaktadır. Dolayısıyla termal reaktörlerde üretilen hızlı nötronların moderatör dediğimiz ılımlayıcıda enerjilerini kaybetmesi, yavaşlaması gerekmektedir. Bunun için de su gibi kütlesi nötronun kütlesine yakın bir madde kullanılmalı ki en az sayıda etkileşimle en fazla sayıda ılımlanmış nötron sisteme kazandırılabilsin. Nötronların maddeyle olan etkileşimleri sadece fisyon reaksiyonları şeklinde olmamaktadır.

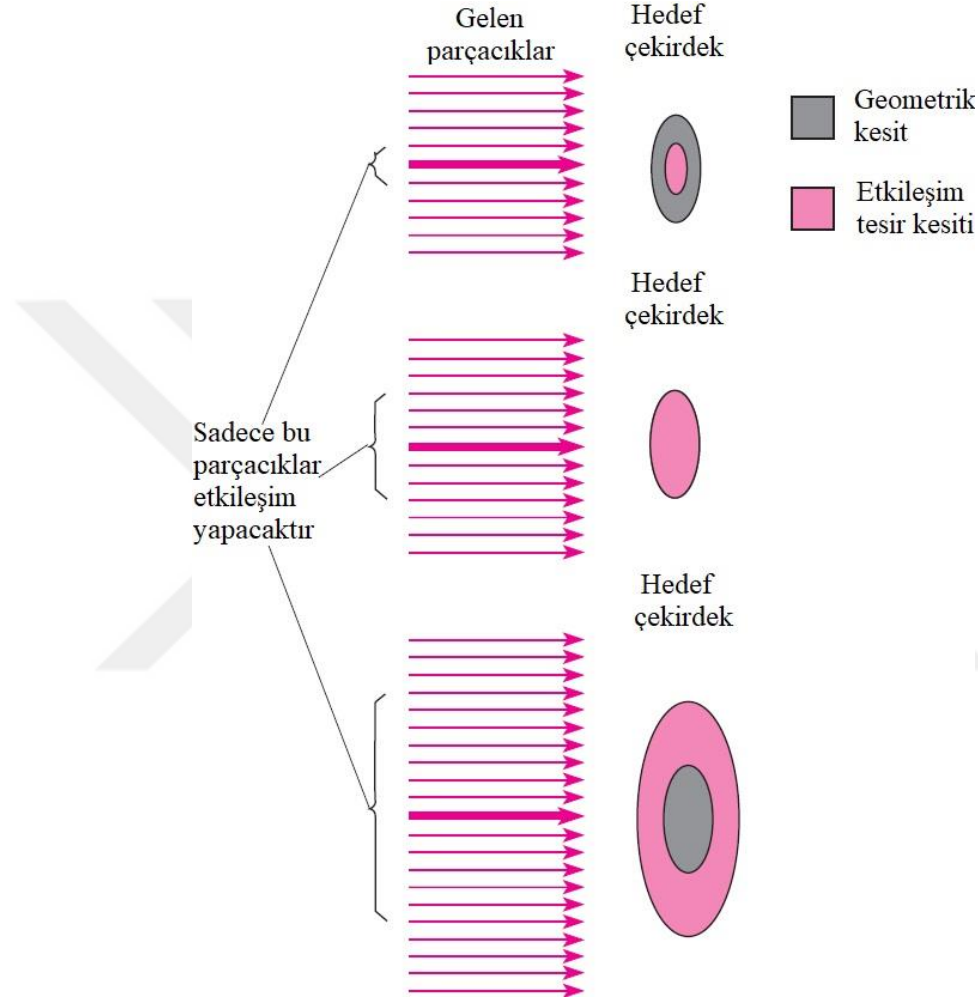
Aşağıda nötronların maddeyle olan etkileşim biçimleri verilmektedir:

- Elastik saçılma (n,n) – Bu etkileşimde nötron, temel enerji seviyesindeki bir çekirdekle elastik çarpışma yapmakta ve nötron çarpışma etkisiyle elastik olarak saçılmaktadır.
- Elastik olmayan saçılma (n,n') – Sonucunda çekirdeğin uyarıldığı ve nihayetinde γ^o ışınımı yaptığı etkileşimdir.
- Işınımsal kapma (n,γ) reaksiyonu – Bu reaksiyonda nötron çekirdek tarafından absorbe edilirken, soğurulurken, γ^o ışınımı yayınlanır. Reaktörde nötron yutulmasına neden olan ve istenmeyen reaksiyon biçimidir.
- Yüklü parçacık reaksiyonları (n,α) ve (n,p) – Yine nötron soğururken yüklü bir parçacık açığa çıkaran reaksiyonlardır.
- Nötron üreten reaksiyonlar ($n,2n$) ve ($n,3n$) – Reaktörlerde istenen reaksiyonlardır.
- Fisyon reaksiyonları – Bazı çekirdeklerle etkileşen nötronlar o çekirdeklerin parçalanmasına, fisyonu uğramasına neden olmaktadır ki nükleer enerjinin dayandığı temel prensibidir.

2.3.4. Tesir Kesit Kavramı

Bir çekirdeğin tesir kesiti, etkileşimin türüne ve gelen parçacığın enerjisine bağlıdır. Şekil 2.4'te de görüleceği üzere etkileşim tesir kesiti, görülen geometrik kesitten büyük ya da küçük olabilmektedir. Bu ilk bakışta sıra dışı gibi görünse de bunun quantum-mekaniksel bir izahı vardır. Buna göre hareket halindeki parçacıkların, belli şartlarda dalgacık tabiatına sahip gibi davrandığı de-Broglie tarafından ortaya konmuştu. Hangi şartlarda parçacık veya dalgacık olarak davranacağı ise tamamen de-

Broglie dalgasının boyutunun gelen parçacığın ve hedef çekirdeğin boyutlarıyla olan ilişkisine bağlıdır. Örneğin ^{113}Cd çekirdeğin geometriksel kesiti 1.06b iken termal nötron yakalama tesir kesiti ise 20.000b gibi oldukça yüksek bir değerdedir. Daha düşük enerjideki nötronlar de-Broglie'e göre daha çok dalga özelliği göstermekte ve böylece daha büyük alanlarda etkili olmaktadır.



Şekil 2.4. Nötronun tesir kesit seçimi (Beiser, 1994)

2.4. Parçacıkların Malzeme Hasarı

Parçacıkların maddeyle olan etkileşimleri sonucu malzemenin atom ve kristal yapısında malzeme hasarı olarak adlandırdığımız yapılar oluşmaktadır. Ortam şartlarına bağlı olarak bu hasar hızlı veya yavaş olabilmektedir. Özellikle yoğun parçacık etkileşiminin ve ışınımın olduğu reaktörlerde malzemenin zaman içerisindeki mukavemetinde azalma olabilmektedir. Mukavemetteki bu tesirin boyutu aynı zamanda etkileşimin menziline de bağlıdır.

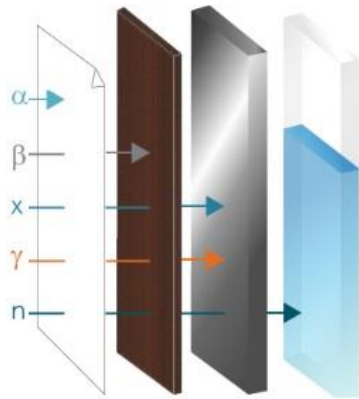
2.4.1. Parçacıkların Madde İçindeki Menzilleri

Şekil 2.5.'te görüleceği üzere iyonize parçacıkların ve farklı ışınımların madde içerisindeki LET mekanizmasından kaynaklı menzilleri de farklılık göstermektedir. Şekilde görüldüğü üzere α parçacıkları oldukça ince bir bariyer tarafından durdurulabilirken, γ° parçacıkları ise daha uzun mesafelere ihtiyaç duymakta ve n° ise örneğin bir H_2O ortamında neredeyse eşit kütleli bir parçacık olan $+p$ ile yaptığı kafa kafaya çarpışmalar neticesinde hemen modere edilebilmektedir. Reaktör uygulamalarında α ve β ışınımların menzilleri daha düşük olduğundan temel olarak nötronlara ve γ ışınımlarına karşı koruma yapılmaktadır. Hesaplamalarda her iki ışınım türü için temelde aynı diferansiyel yaklaşımlar kullanılmaktadır.

$$-\frac{dI(x)}{I(x)} = \mu dx \quad (2.8)$$

$$-\frac{dI(x)}{I(x)} = \Sigma_t dx \quad (2.9)$$

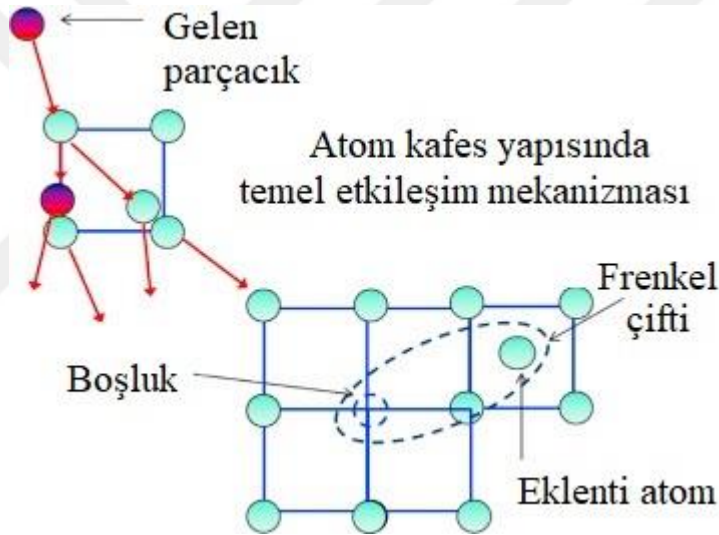
İlk denklemdeki $I(x)$ ifadesi gama demeti yoğunluğu iken diğer (2.9) nolu denklemde ise aynı şekilde malzeme içerisinde eriştiği x mesafesinde henüz herhangi bir etkileşime girmemiş nötron demetinin yoğunluğunu vermektedir. Aynı şekilde μ sönmülenme katsayısı da fotonların enerjisine ve soğurucu malzemenin özelliklerine bağlı olarak değişen aynı enerjiler için farklı malzemelerde farklı menzillere sebep olan bu durumda malzeme bağımlı bir faktördür. Makroskopik tesir kesiti Σ_t de nötronlar için analogik olarak γ° demetlerinde olan sönmülenme katasayısına karşılık gelmektedir. Buna göre Σ_t nötronların malzemede birim mesafede herhangi bir reaksiyon yapma ihtimali olup nötronun enerjisine ve malzemenin özelliğine bağlı olarak değişebilmektedir.



Şekil 2.5. Değişik parçacıkların madde içindeki menzilleri (Anonim, 2019. Bkz. Ref. 3)

2.4.2. Parçacıkların Maddede Oluşturdukları Zarar Mekanizması

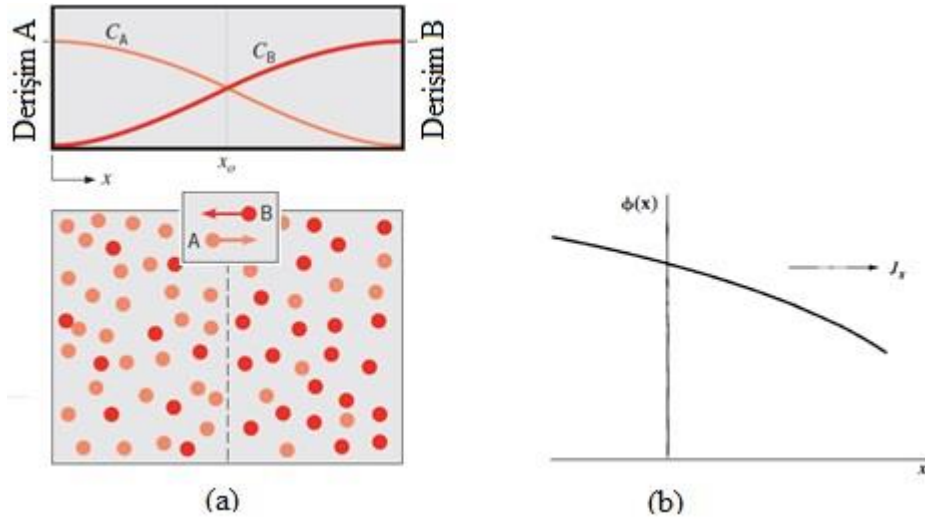
Parçacıkların maddeyle etkileşimleri, madde içerisinde atom kafesleri yapılarında yer alan atomların difüzyon ve bombardıman şeklinde kafes yapılarını oluşturan atomları yerinden sökmesi, geride vacancy dediğimiz boşluk yapıların oluşması veya interstitial yapı dediğimiz atomlar arasındaki kafes yapı içerisinde fazlalık yapı oluşturması şeklinde olmaktadır. (Bkz. Şekil 2.6.) Madde içerisinde ilerleyen parçacıklar çarpışmalar, iyonizasyonlar ve yapı içi transferler sonucu enerjilerini yitirerek yavaşlayıp sönümlenirken ilave atomların ve boşlukların sayısında da artış olmakta ve loop dediğimiz kümelenmeler oluşmaktadır. Örneğin zirkonyum yakıt zarflarına hidrojen iyonlarının dahiliyeti ve kümelenmesi şeklinde oluşan hidrit yapılar da zirkonyum özelliklerinde malzeme süreksizliğine dolayısıyla da zayıflıklara neden olabilmektedir.



Şekil 2.6. Parçacıkların maddenin kafes yapısı içindeki davranışları (Callister, 2001)

2.4.3. Madde İçerisindeki Safsızlıkların Difüzyif Hareketi

Bir ortamda sıcaklık veya konsantrasyon farkı varsa oluşan gradiyentin büyüklüğüne göre o ortamda ısı transferi ya da kütle transferi oluşmaktadır. Şekil 2.7.'de görüleceği gibi gerçekte reaktörlerde nötronların hareketi de bu konsantrasyon farkı neticesinde oluşan gradiyent doğrultusundadır. Bu noktada sıcaklık ya da konsantrasyon (derişim) gradiyenti ısı veya kütle transferi için gerekli olan sürdürücü potansiyeldir. Isı transferinde iletim (conduction) dediğimiz olgu kütle transferinde benzer analogiyle difüzyon olarak adlandırılmakta ve bu farklı süreçleri, parametreleri ve katsayıları değişik olan benzer diferansiyel denklemler yönetmektedir.



Şekil 2.7. Kütle transferi ve n° difüzyon analojisi
 (a) A ve B derişimleri arasında difüzyon farkından kaynaklı kütle transferi (Callister, 2001)
 (b) Nötron difüzyonu ve moderasyon (Lamarsh, 1966)

Fourier kanunu (Fourier's law) bir sistemdeki ısı transfer mekanizmasını yöneten en temel kanundur. Benzer şekilde Fick kanunu (Fick's law) da kütle difüzyonundan sorumludur. Gerçekte nötron transport denklemleri de Fick yasasından çıkmaktadır. Tabiat diferansiyel denklemleri aynı olan fakat birtakım katsayı ve parametreleri farklı olan bazı analogilerden oluşmuştur. Kütle transferi, ısı transferi ve nötron difüzyon mekanizmaları bunlardandır. Aşağıda sırayla ısı transferini yöneten Fourier yasası, kütle ve nötron difüzyonunu yöneten Fick kanunu denklemleri ve aralarındaki benzerlik görülmektedir.

$$q'' = -k \nabla T \quad (2.10)$$

$$\mathbf{J}_A^* = -CD_{AB} \nabla x_A \quad (2.11)$$

$$\mathbf{J} = -D \nabla \phi \quad (2.12)$$

Birçok durumda kartezyen koordinat sisteminde verilen denklemlerin verilen problemin uygun olduğu geometriye göre küresel veya silindirik koordinat sistemine göre uyarlanarak çözülmesi gerekebilmektedir.

2.5. Reaktör Bütünlüğünde Yakıt Zarflarının Önemi

Bir termal reaktörde Zirkonyum alaşımı yakıt zarflarının iflas etmesi, yakıtın ve fisyon ürünlerinin soğutucu akışkana karışmasına, reaktörün soğutma fonksiyonunu tam anlamıyla yerine getirememesine ve bunun sonucunda oluşabilecek yüksek sıcaklıklarda ya da yakıt zarfına bağlı olmayan LOCA gibi senaryolarda reaktör iç sıcaklığındaki

artışa bağlı olarak oluşabilecek ZrO_2 reaksiyonlarındaki hızlı artış ve yine buna bağlı olarak sisteme salınabilecek yüksek miktarda H_2 ve ilave ısı salınımı, reaktör bütünlüğünün bozulması riskini de beraberinde getirebilmektedir. Ne sebeple olursa olsun reaktörde H_2 birikmesi bir riski de beraberinde getirebilmektedir. Şekil 2.8.'de verilen Chernobil ve Fukushima deneyimlerine ait örneklerde yaşanan durum hidrojen sıkışmasına bağlı reaktör bütünlüğünün bozulması durumlarıydı. Normalde gerek normal işletme şartlarında gerekse de acil durum senaryolarında açığa çıkan H_2 devamlı surette Passive Autocatalytic H_2 Recombiner ve H_2 Burner dediğimiz sistemlerde bertaraf edilmektedir. Fakat hızlı ve büyük miktarda oluşan H_2 gazı durumunda ise bu sistemler yetersiz kalabilmektedir. Ayrıca sistemin susuz kalması sonucu sisteme su sağlanmasıyla Zr zarfların suyla oluşturacağı exothermic reaksiyonlar durumu daha da kötü yapabilmektedir.



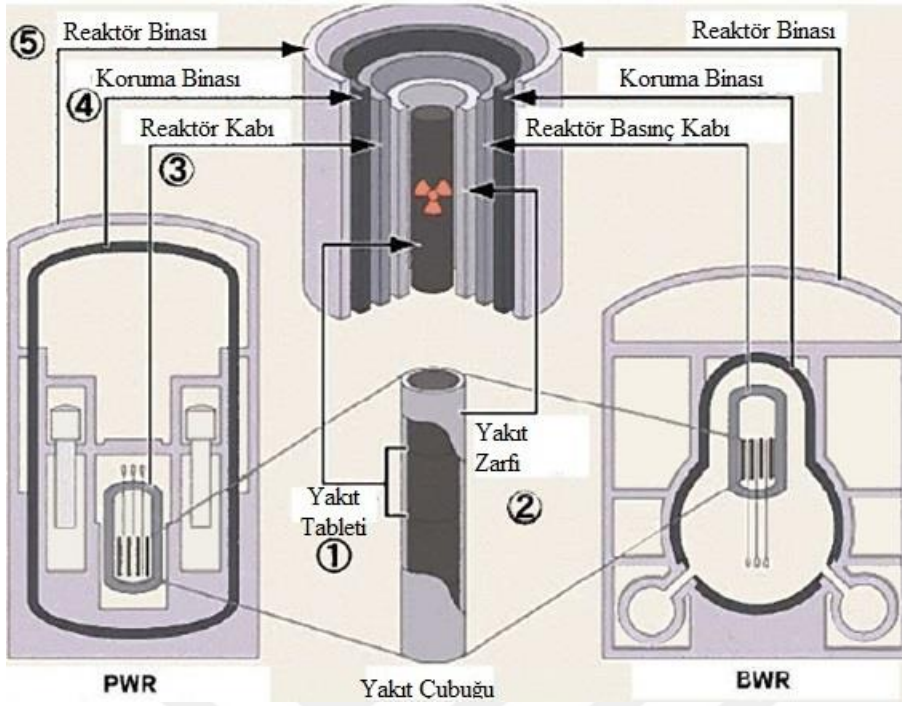
(a) Chernobyl

(b) Fukushima

Şekil 2.8. H_2 infilaklarının neden olduğu örnekler. (a) Chernobyl (b) Fukushima (Anonim, 2019. Bkz. Ref. 4 & 5)

2.5.1. Reaktörler ve Zirkonyum Alaşım Yakıt Zarfları

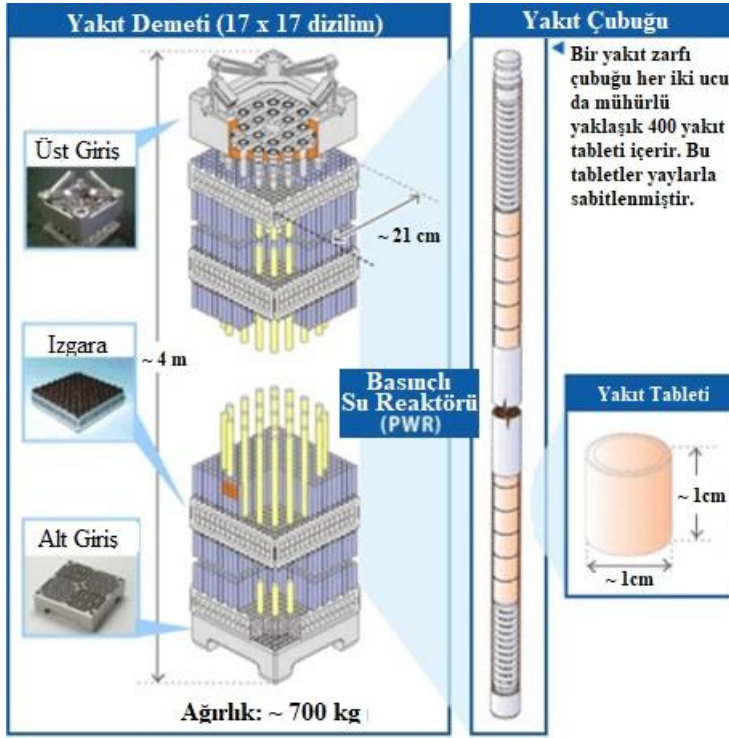
Şekil 2.9.'da reaktör yapısından yakıt kapsüllerine değin toplam beş adet fiziksel bariyer görülmektedir. Bu bariyerler içerisinde şemada 2 numara ile gösterilen yakıt zarfları görülmektedir. Buna göre yakıt zarfları fisyon ürünlerini zarf içinde tutarak nükleer yakıt ve çevre arasında önemli bir bariyerdir ayrıca nükleer yakıtta üretilen ısıyı soğutucu akışkana iletmesi anlamında da önemli bir görevi vardır. Bu yakıt zarfları günümüzdeki termal reaktörlerde daha çok zircaloy-4 dediğimiz bir zirkonyum alaşımından yapılmış olup Şekil 2.9.'da bu yakıt zarflarının reaktör içerisindeki konumu görülmektedir.



Şekil 2.9. Nükleer yakıt ve çevre arasındaki bariyerler (Anonim, 2019. Bkz. Ref. 6)

Ortalama bir reaktörde, örneğin 1100 MWe gücünde bir reaktörde yer alan tüm yakıt yaklaşık 157 adet 17x17 dizilime sahip zircaloy-4 yakıt zarfları içerisinde sıralanmış binlerce yakıt kapsülü şeklinde bulunmaktadır. Dolayısıyla bu çapta bir reaktörde yüzey alanı oldukça geniş bir şekilde sıralanmış sadece zirkonyum yakıt zarflarındaki zirkonyumun metalik ağırlığı yaklaşık 5 ton gelmektedir. Şekil 2.10.'da da zircaloy-4 yakıt zarflarının yakıt demetindeki konumu görülmektedir. Ayrıca çok düşük $\sigma_{\text{y}}/\sigma_{\text{t}}$ yakalama tesir kesitine sahip olmak gibi nükleer özellikleri dolayısıyla da reaktör nötron ekonomisinde oldukça önemli bir malzeme konumundadır.

Zirkonyum alaşım yakıt zarfları sürekli bir şekilde soğutucu akışkanın değişik korozif etkilerine maruz kalırken bir taraftan akışkanın sahip olduğu basınç değerleri dolayısıyla bazı mekanik etkilere de karşı koymaktadır. Tüm bunlardan başka bir diğer önemli etki de reaktör içerisinde yoğun bir nötron akısına ve radyasyonuna maruz kalması dolayısıyla zamanla zirkonyum yakıt zarflarında tüm diğer malzemelerde olduğu gibi malzeme yapısında bazı bozulmaların oluşmasıdır.



Şekil 2.10. Zirkonyum alaşım yakıt çubukları demeti (Anonim, 2019. Bkz. Ref. 7)

2.5.2. Zircaloy Yakıt Zarflarının Maruz Kaldığı Reaksiyonlar

Bilindiği üzere zirkonyum (Bkz. Şekil 2.11) nükleer endüstrisi için sahip olduğu mukavemet ve üstün nükleer özellikleri dolayısıyla vazgeçilmezdir. Reaktör içerisinde kullanılan yapı destek malzemelerinin reaktördeki nötron ekonomisi için düşük bir nötron yutma tesir kesitine sahip olması istenmektedir. (Bkz. Çizelge 2.1)



Şekil 2.11. Zirkonyum cevheri ve metali (Anonim, 2019. Bkz. Ref. 8 & 9)

Zirkonyum sahip olduğu üstün özelliklerinin yanında bazı istenmeyen ve işletme sürecinde dikkat edilmesini gerektiren bir takım zayıf yönlere de sahiptir. Zirkonyum suyla etkileşime girerek Hidrit (ZrH_2) ve Zirkonya (ZrO_2) yapıların oluşumuna da neden

olmaktadır. Hidrit yapılar metalde dayanımın azalmasına, sünekliğe ve kırılğan yapının artmasına neden olmaktadır. Zirkonya da temel olarak kırılğanlığın artmasına neden olurken ısı transferinde de azalmalara neden olduğu Çizelge 2.1.'de açıkça görülmektedir.

Çizelge 2.1. Zirkonyum ve bazı reaksiyon bileşiklerinin temel özellikleri

	Zr	ZrO₂	ZrH₂
Isı iletimi	22 W/m.K	2,7 W/m.K	16 W/m.K
Özgül ağırlık	6,5 g/cm ³ (α -fazı) 6,1 g/cm ³ (β -fazı)	5,68 g/cm ³	5,56 g/cm ³
Erime sıcaklığı	1852 °C	2715 °C	800 °C
Tesir kesiti, σ_a	0,185 b (termal n°)		

Nükleer endüstrinin gelişimi sürecinde istenen özellikleri karşılayabilmek adına değişik zirkonyum alaşımları denenmiştir. Bunlar içerisinde belli başlıları aşağıdaki tabloda, Çizelge 2.2.'de görülmektedir. Dikkat çeken en temel fark nikel ve demir miktarıdır. Nikel içeriği dolayısıyla zircaloy-2 zarfları, nikel içermeyen zircaloy-4 zarflarına kıyasla çok ciddi H₂ tutma özelliğine sahiptir. Bu ise istenen bir durum değildir.

Çizelge 2.2. Zircaloy-2 ve zircaloy-4 alaşım oranları

%	Sn	Fe	Ni	Cr	Zr
Zircaloy-2	1,5	0,15	0,05	0,1	98,2
Zircaloy-4	1,5	0,2	-	0,1	98,2

Bir PWR'da soğutucu ve ılımlayıcı olarak su kullanılması zirkonyumun özellikle suyla yaptığı reaksiyonlarının incelenmesini gerekli kılmaktadır. Zirkonyum suyla hemen reaksiyon yapabilmekte ve bu reaksiyonlar yüksek sıcaklıklarda ciddi bir artış sergilemektedir. Suyla yaptığı temel reaksiyonlar sırayla radyoliz, zirkonya ve hidrit oluşumlarıdır. Çizelge 2.3.'te bu üç temel reaksiyon verilmektedir.

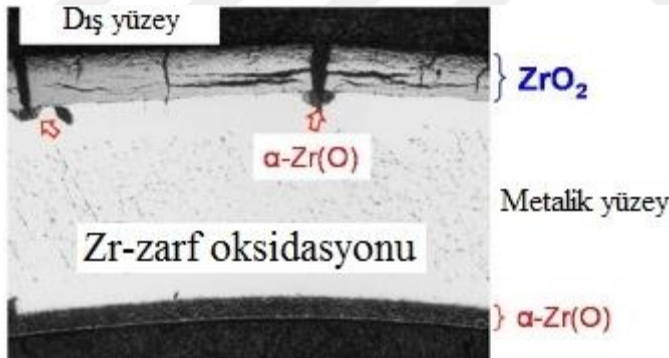
Radyolizde, reaktör içerisinde son derece radyoaktif olması, nötron akısının ve radyasyon etkisinin oldukça yüksek olması dolayısıyla su molekülleri arasındaki bağ radyoliz dediğimiz bu etkiler dolayısıyla kopmakta, serbest halde ve devamlı bir şekilde H₂ ve O₂ atom ve iyonları oluşmaktadır. İkinci reaksiyon, zirkonyumun oksijen iyonlarıyla yaptığı ve zircaloy yakıt zarfı çevresinde ZrO₂ oluşumuna neden olan

reaksiyonlardır. Bir diğer reaksiyon da aynı şekilde zirkonyumun H₂ atomlarıyla yaptığı ve asıl istenmeyen hidrit oluşumuna neden olan bir başka etkileşim çeşidir.

Çizelge 2.3. Zr ve H₂O etkileşimleri

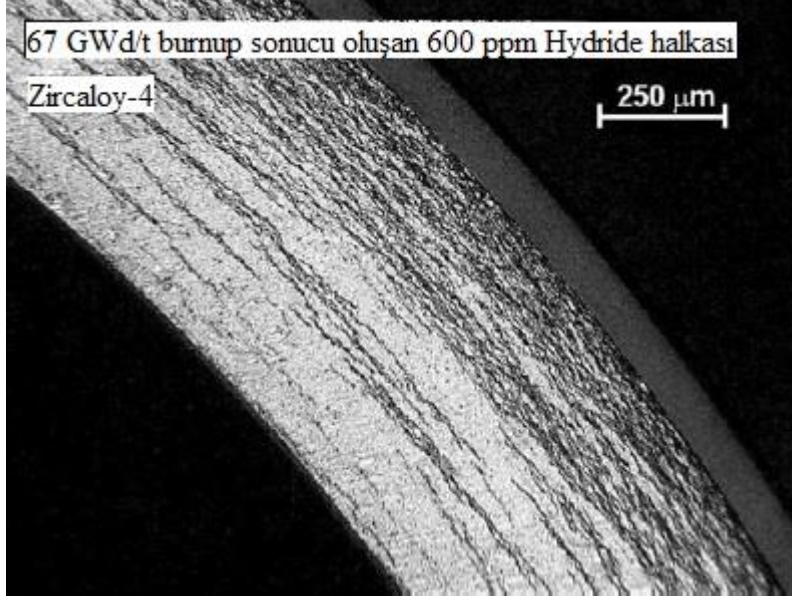
Radyasyon etkisi, radyoliz	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$
Zr - O ₂ etkileşimi, zirkonya	$\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$
Zr - H ₂ etkileşimi, hidrit	$\text{Zr} + \text{H}_2 \rightarrow \text{ZrH}_2$

Rektörde yakıt zarf bütünlüğünün muhafazası için yakıt kapsülü iç sıcaklığı 1900 °C'yi geçmemelidir. Herhangi bir LOCA (Loss Of Coolant Accident – Soğutucu Akışkan Kaybı Kazası) durumunda da yakıt zarfı sıcaklığı 1200°C altında tutulmalıdır. Yakıt peletlerimizi oluşturan UO₂ metalinin erime sıcaklığı 2760-2815°C'dir. Bu durumda yine güvenlik gerekçeleri dolayısıyla UO₂ işletme sıcaklığı < 2480°C (altında) tutulmalıdır. Yüksek sıcaklık, düşük UO₂ dayanımına neden olabilmekte, bu da fisyon gazı birikimi, yakıt genişmesi, zarf hasarı gibi problemleri beraberinde getirebilmektedir.



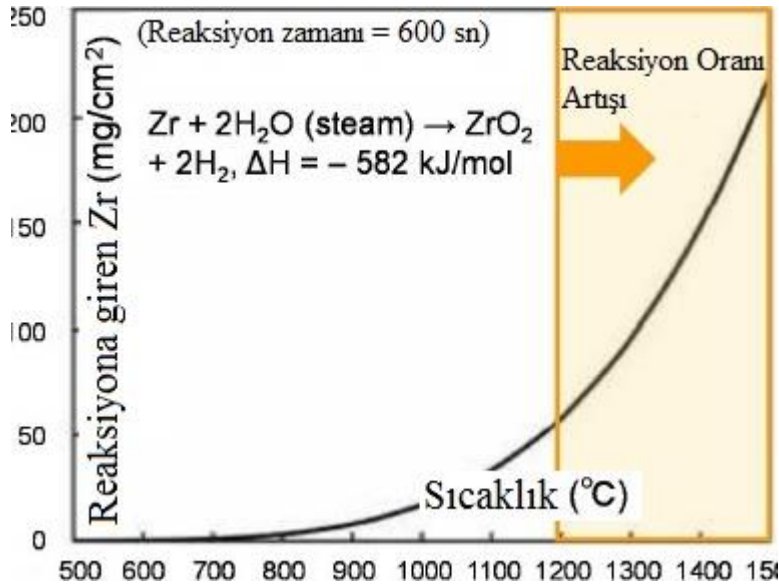
Şekil 2.12. Zircaloy zarfta zirkonya halkası oluşumu (Anonim, 2019. Bkz. Ref. 10)

Yakıt zarfında çatlak oluşumu sonucu birincil soğutucuya Kr-85 ve Xe-133 gibi radyoaktif fisyon gazları ile radyoaktif I-131 geçişi söz konusu olabilir. Bu durum birincil soğutucu ölçüm değerlerinde bir artış olarak kendini göstermektedir. Şekil 2.12.'de zircaloy kılıfta ZrO₂ tabakası ve Şekil 2.13'te de ZrH₂ tabakası oluşumu görülmektedir. Normalde ve genelde olan, H iyonlarının zircaloy madde boyunca Fick yasasına göre difüz etmesi ve buralarda istenmeyen hidrit birikimlerine neden olarak zarf malzemenin dayanım özelliklerinin kaybına neden olmasıdır.



Şekil 2.13. Zircaloy zarfta hidrit halkası oluşumu (Motta, 2012. Bkz. Ref. 36)

Verilen reaksiyonlarda özellikle de zirkonyumun O_2 ile yaptığı ZrO_2 reaksiyonlarında yüksek sıcaklıklarda ciddi bir artış eğilimi görülmektedir. Aşağıda Şekil 2.14’te iki farklı bölge dikkati çekmektedir. Buna göre özellikle de $800^\circ C$ üstündeki reaksiyon sıcaklıklarında ZrO_2 oluşumunda kaydadeğer artışların başladığı ve $1200^\circ C$ ’den sonra da zirkonyumun suyla olan reaksiyonlarında çok ciddi artış olduğu ve bu noktadan sonra da mukavemetini ve fonksiyonunu kaybedeceği ve oldukça fazla H_2 açığa çıkacağı görülmektedir.

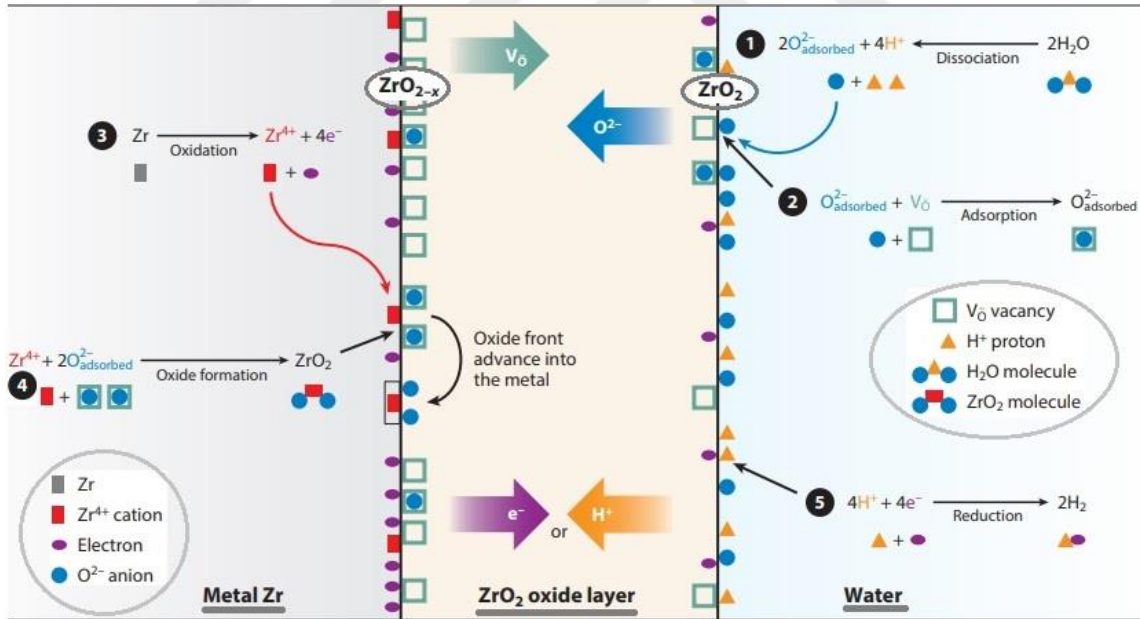


Şekil 2.14. Zirkonyum-su reaksiyonlarında sıcaklığa bağlı H_2 oluşumu (Anonim, 2019. Bkz. Ref. 10)

2.5.3. Zirkonyum - Su Etkileşiminin Difüzyf Mekanizması

Yukarıda bahsedilen H₂O, H iyonu, O iyonu ve Zr arasındaki etkileşimlerin mekanizmasını, cereyan eden korozyon oluşum ve madde içi difüzyon süreçleri Şekil 2.15.'te daha net görülebilmektedir. Buna göre radyoliz şeklinde oluşan H ve O iyonları zirkonyum içerisine difüz ederken hemen suyla zirkonyum arasında ZrO₂ tabakası oluşmaktadır. Bu tabaka kalınlığı zamanla artmaktadır. Ayrıca H iyonlarından bir kısmı H₂ gazı şeklinde sisteme geri dönerken iyonların bir kısmı da ZrO₂ yapı içerisine ve Zr metal içlerine difüz etmekte burada hidrit birikimine neden olmaktadır. Aşağıda Şekil 2.15.'te zirkonyumun suyla olan reaksiyonları ve örnek olarak oksijen konsantrasyonunda ZrO₂ oluşum süreci görülmektedir.

Nominal çalışma şartlarında zircaloy zarf bütünlüğü için en tehlikeli durum, içerisinde oluşan hidrit yapılarıdır. Sıcaklık ve gerilim gradientleri, yapı içerisinde homojen olmayan hidrit dağılımı vermektedir. Genelde Zr zarf iflası zarf üzerindeki en zayıf noktada oluşmaktadır. Dolayısıyla Zr zarfta lokal H içeriği, ortalama içeriğe göre iflası belirlemede önemlidir.



Şekil 2.15. Zirkonyumun suyla olan etkileşimleri (Motta, 2015. Bkz. Ref. 37)

Hidrit oluşumu hesaplamasında genellikle geleneksel teorik yöntemler, sadeleştirilmiş varsayımlar kullanılmaktadır. Ör; H iyonlarının Zr malzemede difüzyonu, stres gradiyenti altında geleneksel difüzyon denklemleriyle (2.11) ve hidrojen çekirdeklerin birbiriyle ve nötronlarla yaptıkları çarpışma etkileri ve kimyasal

etkileşimleri göz ardı edilerek değerlendirilmektedir. Zr malzemedeki iflasın neden olan genelde öbeklenmiş hidrit ve dislokasyon loop dediğimiz malzeme içi yer değiştirmiş atomik yapıların oluşturduğu zayıflıklardır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmayla fisyon nötronlarının suyla olan moderasyon etkileşimleri neticesinde zircaloy-4 yakıt zarfının hemen dış yüzeyinde oluşturdukları enerjetik H^+ iyonlarının yakıt zarfındaki menzilleri, böylece H^+ iyonlarının yakıt zarfında biriktiği mesafe ve bölgelerin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca reaktör pratiklerinde daha çok sıcaklık ve konsantrasyon gradiyenti etkisinde gerçekleşen hidrit tabaka kalınlıkları dikkate alındığında H^+ iyonlarının bombardımanı etkisiyle oluşan H^+ iyonu ilerlemelerinin bu difüzyon tabaka pratiklerine olan oranlarının da böylece görülebilmesi amaçlanmıştır.

Mevcut çalışmanın yürütülebilmesinde iki temel yaklaşımın olduğu değerlendirilmiştir. Bunlardan biri, çalışmanın bir MTR'de fiziksel deney şeklinde yapılması; diğeri ise TRIZ metodolojisinin de mevcut teknik imkan ve şartlara göre en uygun yöntem olarak işaret ettiği ve reaktördeki nötron, madde ve çekirdek gibi parçacıkların etkileşimini fiziksel gerçeklik noktasında veren bir Monte Carlo simülasyon kodu kullanılmasıdır. Buna göre çalışma kapsamında malzeme, geometri ve inceleme özel şartlarının belirlenmesi; reaktör içi nötron-parçacık etkileşimlerinin simüle edilmesi ve simülasyon sonucu elde edilen H^+ iyonlarının da malzemedeki menzillerinin belirlenmesi noktasında aşağıdaki çalışma planı uygulanmıştır:

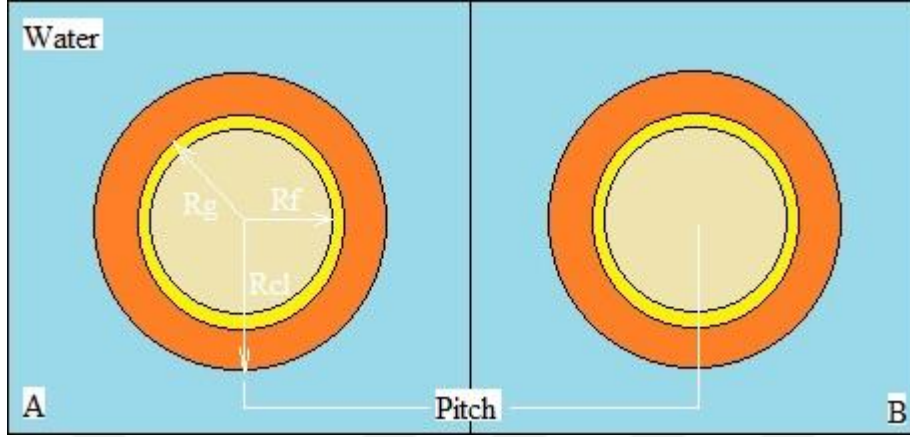
3.1. H^+ menzillerinin hesaplanmasında takip edilen yöntem ve aşamaları

Çalışmamız aşağıda verilen iki duruma göre kurgulanmıştır; yakıt zarfı üzerinde herhangi bir hidrit tabakası oluşumunun olmadığı yakıt çubuklarının reaktöre ilk yüklemesinin yapıldığı ve belli bir kullanım ömrü sonunda hidrit halkası oluşumunun görüldüğü ve hidrit halkası kalınlığının zarf kalınlığının 1/10 azami değerine ulaştığı bu her iki durum için H^+ iyonlarının yakıt zarfı malzemesi içerisindeki menzilleri ve dağılımı karakteristiği incelenmiştir.

3.1.1. Zircaloy-4 zarf yüzeyi H^+ akısı ve zarf boyunca saçılımı

%5 zenginleştirilmiş yakıt içeren ve alaşım içeriği Çizelge 2.12.'de verilen zircaloy-4 yakıt zarfı PWR yakıt çubuğu için Şekil 3.1.'de ve Çizelge 3.1.'de detayları verilen kesit geometride ortalama 2 MeV değerinde nötronlar FLUKA kodu yardımıyla şekilde gösterilen A yakıt hücresinde üretilmiş ve bu nötronların ortamdaki etkileşimler sonucu B yakıt hücresinde zircaloy-4 yakıt zarfı yüzeyinde oluşturdukları H^+ iyonlarının

enerjiye bağı akıları elde edilmiştir. Akının en yoğun olduğu enerji değerliklerindeki H^+ iyonları daha sonra SRIM koduna girdi teşkil ederek zircaloy-4 malzemedeki dağılımı ve menzili hesaplanmıştır.



Şekil 3.1. PWR yakıt hücresi kesiti

Şekilde pitch olarak verilen adlandırma yakıt çubukları hatve mesafesidir. Burada hesaplamamızın basitliği açısından iki komşu yakıt hücresi arasındaki etkileşim ele alınmıştır. Birçok yakıt çubuğundan oluşan daha karmaşık bir geometri tercih edilseydi; aynı ortalama nötron enerji değerleri, yakıt zarfı yüzeyinde yine bu çalışmada elde edilen enerji değerlerinde H^+ iyonları oluşturacağından, hesaplanan zircaloy-4 zarf içi menzilleri ve dağılım desenleri yine aynı olacaktır. Bu durumda güçlü akıdan kaynaklanan zircaloy-4 zarfta çok daha yoğun ZrH_2 ppm değerlerinin oluşması beklenirdi. Çalışmamız nötron bombardımanı etkisinde oluşan hidrit yapıların eriştiği maksimum derinliği dolayısıyla hidrit safsızlıklarının oluştuğu menzili ölçmeyi hedeflediğinden işbu çalışmada nötron akısı ve maruziyet süresinden kaynaklı hidrit yoğunluğu ppm değerlerin belirlenmesi mevcut çalışmanın kapsamı dışındadır.

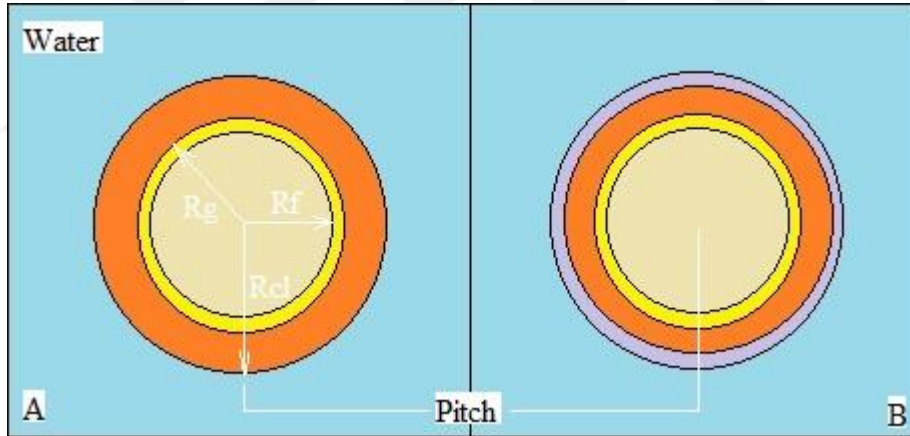
Çizelge 3.1. Hidrit oluşum durumuna göre yakıt çubuğu geometri değerleri

mm	Hidrit Yokluğunda	Hidrit Varlığında
Rf	4,095	4,095
Rg	4,178	4,178
Rcl	4,748	4,691
R_{ZrH₂}	-	4,748
Pitch	12,596	12,596

3.1.2. Hidrit halkası varlığında zircaloy-4 zarf yüzeyi H⁺ akısı ve zarf boyunca saçılımı

İkinci çalışmamızda belli bir kullanım ömrü sonunda yakıt çubuğu zircaloy-4 zarfında hidrit halkası oluşumunun görüldüğü ve hidrit halkası kalınlığının zarf kalınlığının 1/10 azami değerine ulaştığı durumda H⁺ iyonlarının yakıt zarfı malzemesi içerisindeki menzilleri ve dağılımı karakteristiği incelenmiştir.

Buna göre %5 zenginleştirilmiş yakıt içeren ve alaşım içeriği Çizelge 2.12.'de verilen zircaloy-4 yakıt zarflı PWR yakıt çubuğu için Şekil 3.2.'de ve Çizelge 3.1.'de detayları verilen kesit geometride ortalama 2 MeV değerinde nötronlar FLUKA kodu yardımıyla şekilde gösterilen A yakıt hücresinde üretilmiş ve bu nötronların ortamdaki etkileşimler sonucu B yakıt hücresinde zircaloy-4 yakıt zarfında ZrH₂ (zirkonyum hidrit) halkası yüzeyinde oluşturdukları H⁺ iyonlarının enerjiye bağlı akıları elde edilmiştir. Akının en yoğun olduğu enerji değerlerindeki H⁺ iyonları daha sonra SRIM koduna girdi teşkil ederek yakıt zarfındaki dağılımı ve menzili hesaplanmıştır.



Şekil 3.2. Hidrit halkası varlığında PWR yakıt hücresi kesiti

3.2. Hesaplama ve analizlerde kullanılan kodlar

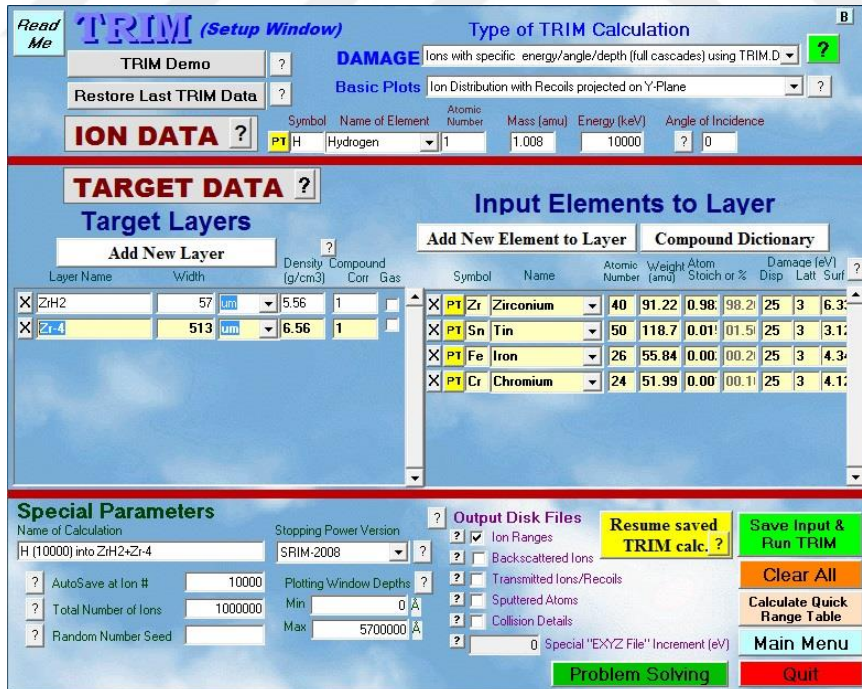
Nötronların H çekirdekleriyle, protonlarla, olan moderasyon etkileşimleri sonucu zircaloy-4 zarf yüzeyinde oluşturdukları H⁺ iyonlarının enerji değerleri FLUKA koduyla hesaplanmış ve en muhtemel enerji değerleri de iyonların madde içerisindeki hareketini inceleyen Şekil 3.3.'te verilen SRIM koduna girdi teşkil etmiştir. Bu çalışmalar her iki durum için; hem hidrit halkası varlığı durumu için hem de hidrit halkasının henüz oluşmadığı durum için tekrarlanmıştır.



Şekil 3.3. FLUKA parçacık transport kodu (www.fluka.org)

FLUKA parçacık transportunda ve parçacıkların maddeyle olan etkileşimini hesaplamakta kullanılan genel amaçlı Monte Carlo hesaplama yöntemini kullanan kapsamlı bir programdır. Monte Carlo yöntemi tekrarlı bir şekilde parçacıklar arası etkileşimlerdeki ve davranışlarındaki rastgelelikleri kullandığı için prensipte determinist bir yöntemdir ve örneklem sayısı yeterli düzeyde olduğunda gerçek dünyayı sınyabilen güçlü bir analiz programıdır.

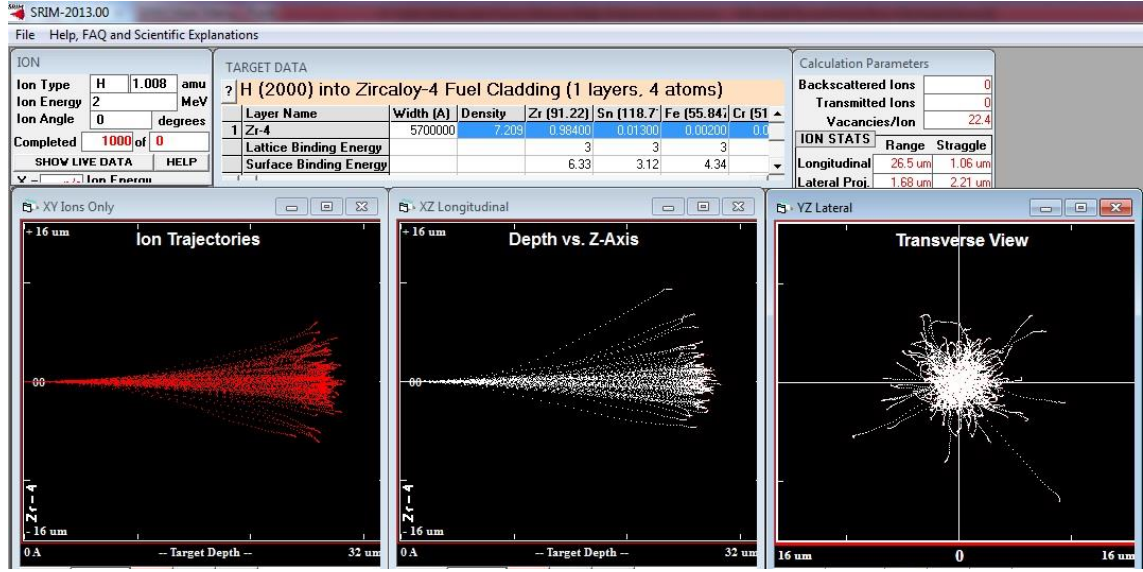
FLUKA ile değişik geometrilerde parçacıkların maddeyle olan etkileşimlerinde oldukça geniş bir enerji yelpazesinde nötron gibi hadron ve lepton grubu parçacıkları da içeren yaklaşık 60 kadar parçacığın madde içerisindeki transportunu incelemek mümkündür.



Şekil 3.4. SRIM kodu TRIM modülü ara yüzü

Şekil 3.4.'te TRIM modülünün ara yüzü verilen SRIM kodu ise özellikle enerjetik iyonların malzeme içerisinde durdurulmasının ve menzillerinin

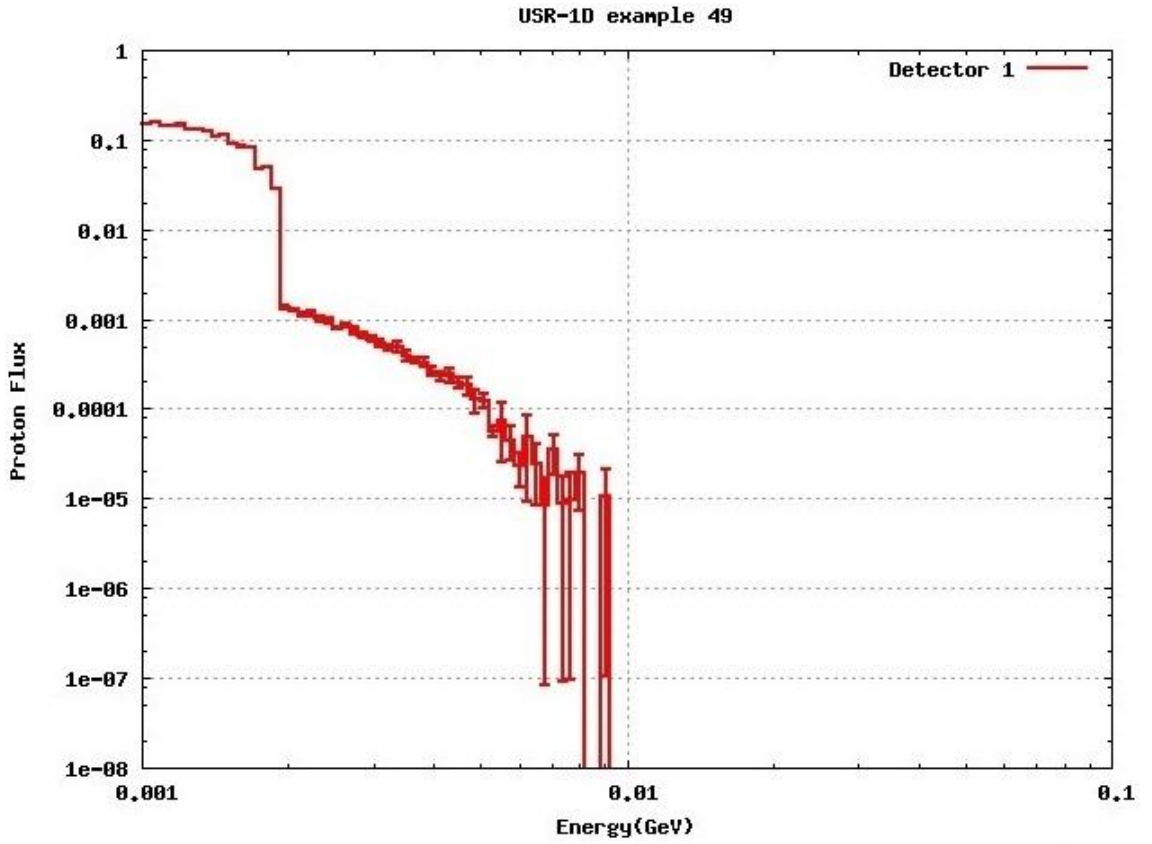
hesaplanabileceği bir programdır. SRIM koduyla, enerjetik iyonlar gerek katmanlı gerekse de alaşım yapıda bulunan maddede menzilleri boyunca ilerlerken aynı zamanda hedef atomlarda yer değiştirmelere neden olmak şeklinde malzeme hasarına neden olmaktadır. TRIM modülüyle Şekil 3.5.'te olduğu gibi tanımlanan malzeme ve verilen iyon enerji değerlerinde iyonların malzeme içerisindeki takibi yapılabilmekte ve menzilleri hesaplanabilmektedir.



Şekil 3.5. SRIM modülü örnek iyon transferi analizi

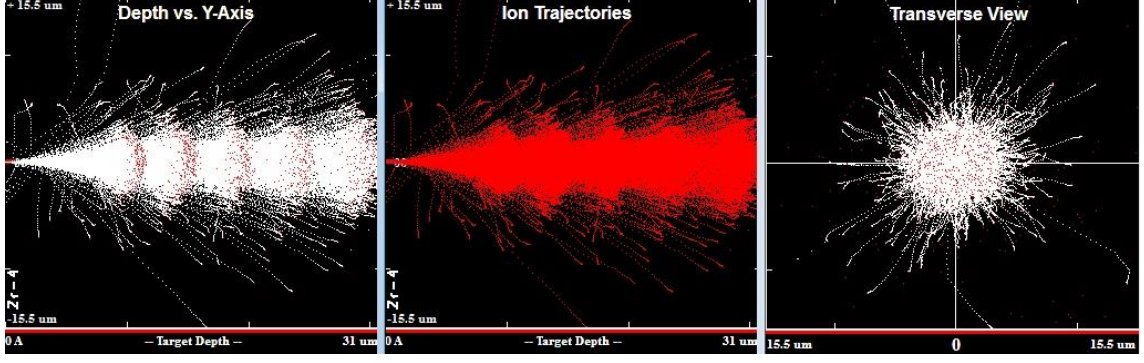
4. BULGULAR

FLUKA kodu yardımıyla Çizelge 3.1. ve Şekil 3.1.'de geometrik detayları verilen ikili yakıt hücresinde A. ile gösterilen ve %5 zenginleştirilmiş UO₂ yakıt içeren hücrede ortalama 2 MeV enerji değerindeki nötronların etkileşimleri takip edilerek B. yakıt hücresi yüzeyinde oluşan enerjiye bağlı H⁺ akısı Şekil 4.1.'deki gibi belirlenmiştir. Program tüm enerji değerlerinde yakıt zarfı yüzeyinde yaklaşık bir milyon H⁺ oluşturacak şekilde etkileşimler üretmiştir. Şekil 4.1.'de değişik enerjilerdeki bu iyonların akıları 1 (bir) değerine normalize edilerek oransal olarak verilmiştir.



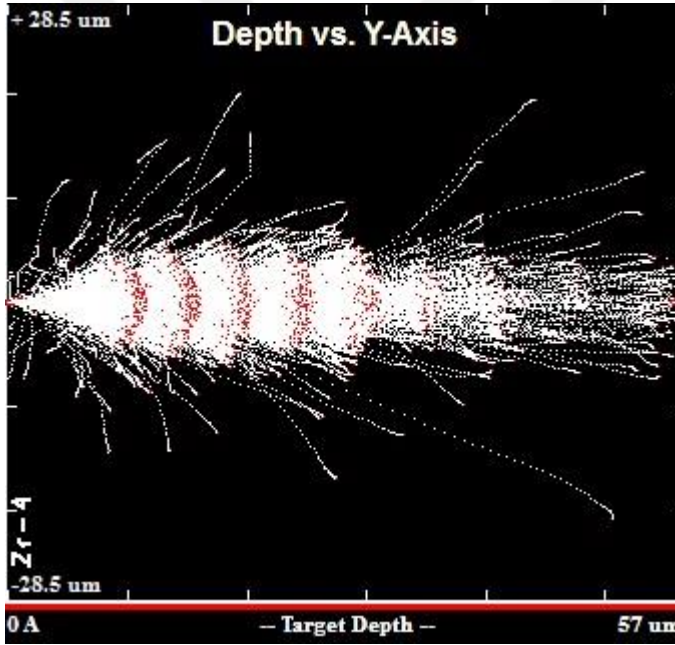
Şekil 4.1. ZrH₂ halkası yokluğunda zarf yüzeyinde oluşan enerjiye bağlı H⁺ akısı

H⁺ iyonları Şekil 4.1.'deki hakim enerji değerlerinde SRIM koduna girdi teşkil ettiğinde iyonların zircaloy-4 zarf boyunca yayılım karakteristiği ve menzilleri tespit edilmiştir. Şekil 4.2.'de yaklaşık %99,9 akının 1 MeV - 2MeV arası enerji değerlerine sahip iyonlardan oluştuğu ve 30µm kadar bir menzile sahip oldukları hesaplanmıştır. 1 MeV ile 2 MeV arasındaki enerji aralıklarında düzgün değişen akı değerlerinden dolayı Şekil 4.2'deki saçılımlar gerçekte sürekli (*continuum*) bir yapıdadır. Hesaplamanın kolaylığı için en muhtemel enerji değerlikli iyonlar SRIM'e girdi teşkil etmiştir.



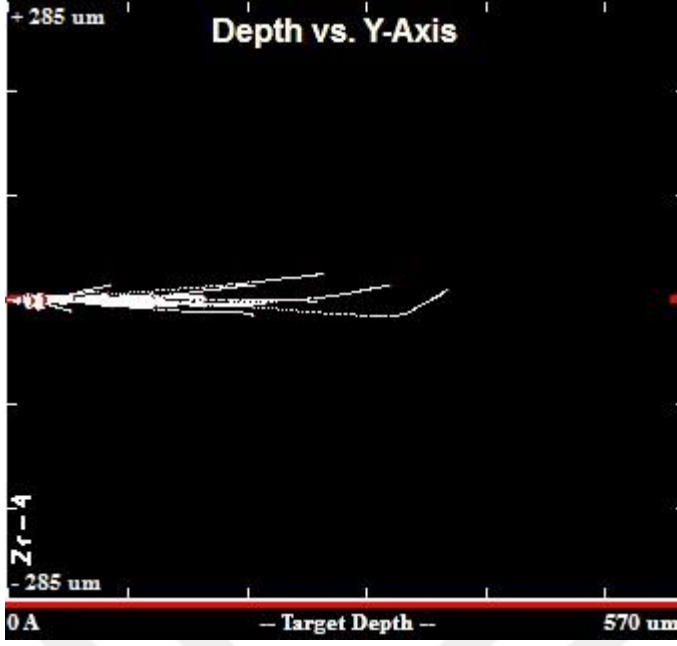
Şekil 4.2. Hidrit halkası yokluğunda yakıt zarfı boyunca H^+ yayılımı (0-31 μm arası derinlik)

Şekil 4.3.'te zircaloy malzemede 3 MeV'e kadar tüm H^+ akı değerlerini 57 μm 'lık menzile içerisinde görebilmekteyiz. Bu noktadan sonraki geri kalan H^+ akı değerleri tüm akının ancak yaklaşık %0,05 yüzdesine denk gelmektedir.



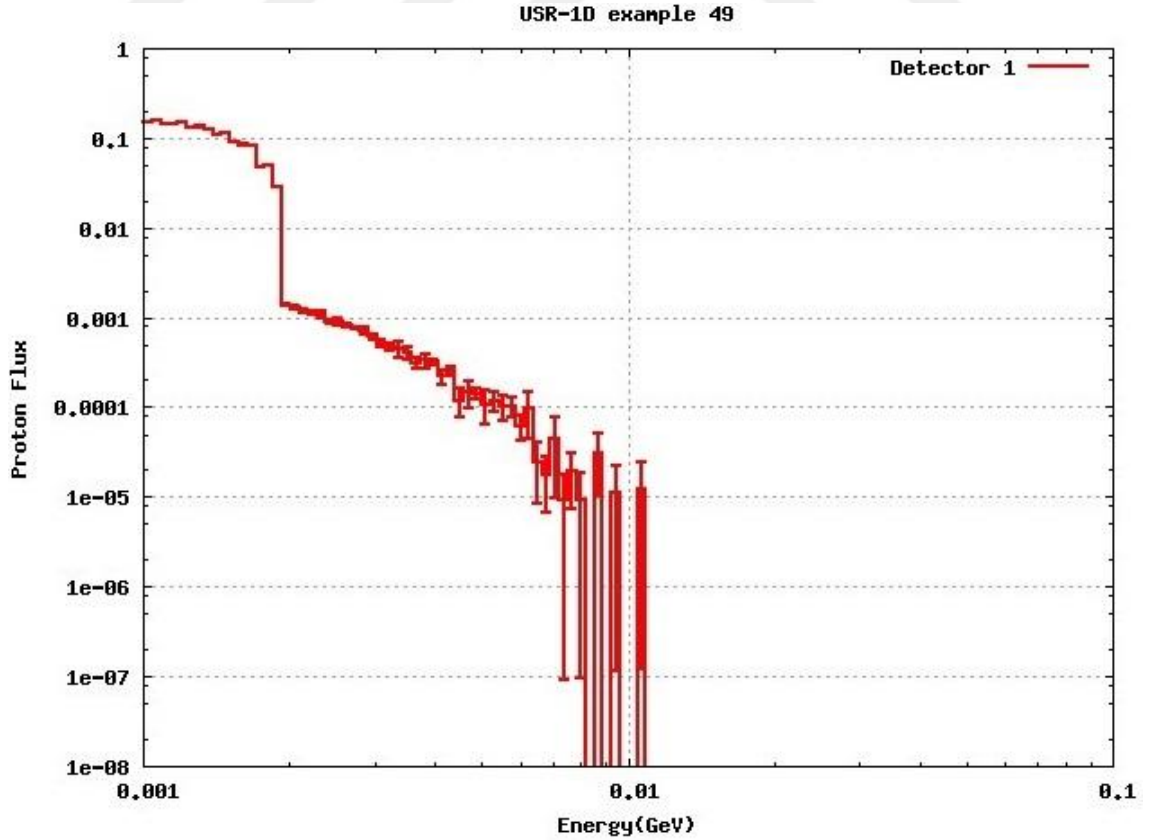
Şekil 4.3. Hidrit halkası yokluğunda yakıt zarfı boyunca H^+ yayılımı (0-57 μm arası derinlik)

Şekil 4.4.'te tüm enerji-akı değerlerinde zircaloy-4 malzeme içerisindeki H^+ yayılımı eğilimi görülmektedir. Şekil 4.4.'te net olmayan 0-31 μm ve 0-57 μm arasındaki yayılımların detayları yukarıda Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.'te verilmiştir. Şekil 4.4. aynı zamanda tüm enerjilerdeki akının yakıt zarfı kalınlığı olan 570 μm boyuncaki zarf kesitine göre olan yayılım eğilimi ve maksimum menzili görülmektedir.



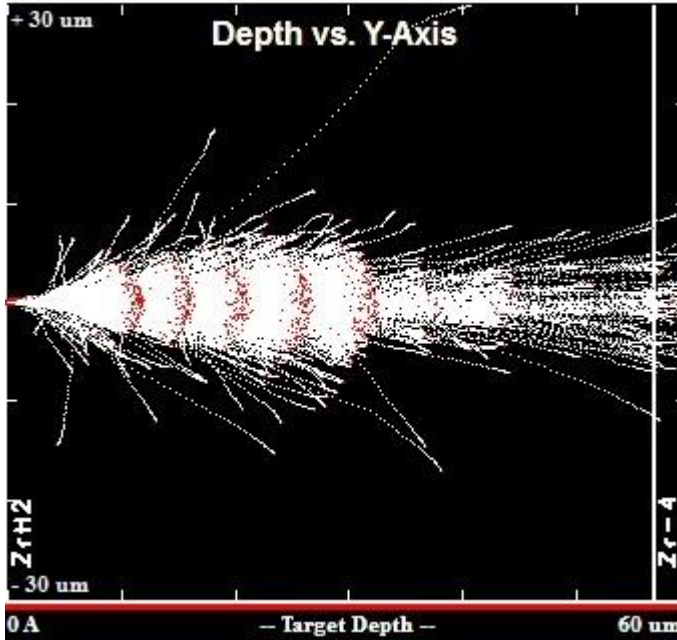
Şekil 4.4. Hidrit halkası yokluğunda yakıt zarfı boyunca H^+ yayılımı (0-570 μm arası derinlik)

Çalışmamızın bir diğer ikinci merak konusu Şekil 4.5.'te ZrH_2 halkası varlığında, değişik enerjilerdeki H^+ akı değerlerinin zircaloy-4 yakıt zarfındaki yayılımı ve menzili olmuştur.



Şekil 4.5. ZrH_2 halkası durumunda zarf yüzeyinde oluşan enerjiye bağlı H^+ akısı

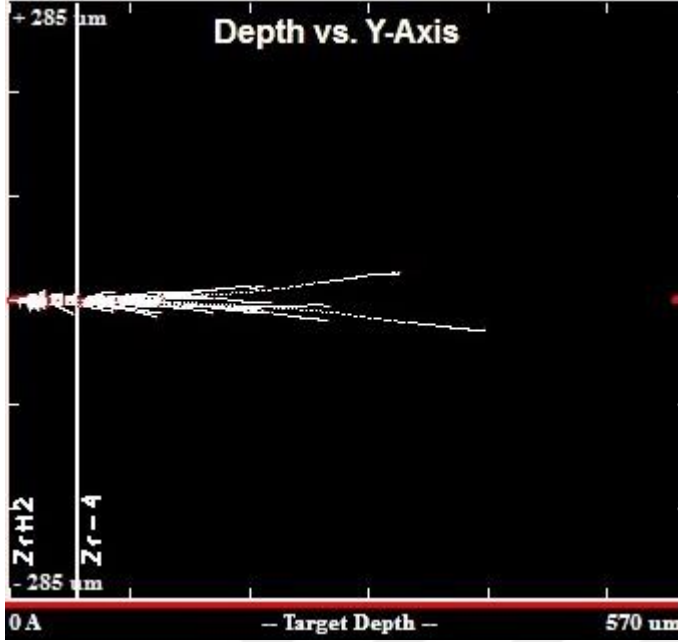
Reaktörlerde zircaloy-4 zarfta hidrit halkası oluşumu zamanla artan yanma (burn-up) neticesinde oluşmakta ve yakıt zarfı kalınlıklarının 1/10 değerine ulaşabilmektedir. Mevcut çalışmamızda zircaloy-4 yakıt zarfı kalınlığının 1/10 kısmı olan 57 μm yüzey kalınlığında bir hidrit halkası olduğu kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Bu amaçla FLUKA kodu yardımıyla Çizelge 3.1. ve Şekil 3.2.'de geometrik detayları verilen ikili yakıt hücresinde A. ile gösterilen ve %5 zenginleştirilmiş UO_2 yakıt içeren hücrede ortalama 2 MeV enerji değerindeki nötronların etkileşimleri takip edilerek B. yakıt hücresi yüzeyinde oluşan enerjiye bağlı H^+ akısı Şekil 4.5.'deki gibi belirlenmiştir. Program tüm enerji değerlerinde yakıt zarfı yüzeyinde yaklaşık bir milyon H^+ oluşturacak şekilde etkileşimler üretmiştir. Şekil 4.5.'de değişik enerjilerdeki bu iyonların akıları 1 (bir) değerine normalize edilerek oransal olarak verilmiştir.



Şekil 4.6. Hidrit halkası durumunda zarf içi H^+ yayılımı (0-60 μm arası derinlik)

Şekil 4.6.'da 57 μm ZrH_2 halkası ve hemen akabinde Şekil 4.7.'de de 570 μm değerine kadar olan yakıt zarfı kalınlığı ve bu kesit boyunca da H^+ yayılımı ve değişik enerji değerlerindeki akılarda menzilleri görülmektedir. H^+ iyonları Şekil 4.5.'teki hakim enerji değerlerinde SRIM koduna girdi teşkil ettiğinde iyonların zircaloy-4 zarf boyunca yayılım karakteristiği ve menzilleri tespit edilmiştir. Şekil 4.6.'da yaklaşık %99,9 akının hidrit halkası varlığında da 1 MeV - 2MeV arası enerji değerlerine sahip iyonlardan oluştuğu ve 30 μm kadar bir menzile sahip oldukları hesaplanmıştır. Bu mesafenin tamamının ZrH_2 halkası bölgesine denk geldiği görülmüştür. 1 MeV ile 2

MeV arasındaki enerji aralıklarında düzgün değişen akı değerlerinden dolayı Şekil 4.6'daki saçılımlar gerçekte sürekli (*continuum*) bir yapıdadır. Hesaplamanın kolaylığı için en muhtemel enerji değerlikli iyonlar SRIM'e girdi teşkil etmiştir.



Şekil 4.7. Hidrit halkası durumunda zarf içi H⁺ yayılımı (0-570 µm arası derinlik)

Şekil 4.7.'de aynı zamanda tüm enerjilerdeki akının yakıt zarfı kalınlığı olan 570 µm boyuncaki zarf kesitine göre olan yayılım eğilimi ve maksimum menzili görülmektedir. Şekilde, detayı aynı zamanda Şekil 4.6.'da verilen 57 µm kalınlıktaki hidrit tabakası ve bu tabakaya denk gelen iyon transferi de verilmiştir.

5. TARTIŞMA

Bu çalışmayla Zircaloy-4 yakıt zarfında gerek herhangi bir hidrit tabakasının olmadığı gerekse de bir hidrit halkası varlığında reaktörde oluşan ortalama 2 MeV değerindeki nötronların daha çok ılımlanması etkisiyle yakıt zarfı yüzeyinde oluşturduğu enerjilere bağlı H^+ akıları hesaplanırken Şekil 4.1. ve Şekil 4.5.'te görüldüğü üzere ekseriyetle 1 MeV – 2 MeV aralığında gerçekleştiği gözlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, nötronların reaktörde ılımlanma (moderasyon) sürecinde H^+ iyonlarıyla (protonlarla) olan elastik saçılım çarpışmalarında gösterdiği enerji-momentum korunumlarından kaynaklı hesaplamalara tamamen uyumluluk gösterdiği görülmektedir. Aşağıda (5.1.) denkleminde genel olarak elastik çarpışmalar için verilen ortalama üleşik değerli enerji kaybına göre denklemde verilen α çarpışma parametresi H için 0 değerine sahip olduğundan denkleme göre oluşan H^+ değerleri ortalama enerji değerleri 1 MeV şeklindedir. Ayrıca her iki parçacığın kütleleri yaklaşık olarak eşit olduğundan kafa kafaya çarpışmalarda maksimum enerji transferi söz konusudur. Bu noktada H^+ akılarının büyük çoğunluğunun 2 MeV ve 1 MeV aralığında oluşması beklentilerimizle uyumlu olmuştur.

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{2} (1 - \alpha) \quad (5.1.)$$

Her iki çalışmada da, gerek hidrit halkası varlığında gerekse de herhangi bir hidrit oluşumun olmadığı her iki durumda da, oldukça benzer iyon saçılım desenleri ve menzilleri söz konusudur. Şekil 4.3. ve Şekil 4.6.'da oluşan iyon akılarının neredeyse tamamının (yaklaşık %99,95 oranında) verilen 57 μm 'lik hidrit tabakası sınırı içerisinde kaldığı görülmektedir. Bu kalınlık aynı zamanda zircaloy-4 zarf kalınlığının 1/10 değerine karşılık gelmektedir. Hesaplanan bu mesafenin aynı zamanda reaktör pratiklerinde uygulamalarında da karşılaşılan bir durum olduğunu görebilmekteyiz. Örneğin Şekil 2.13.'te reaktörde 67 GWd/t gibi yüksek bir burn-up sonucu oluşmuş aynı mertebe kalınlığında bir hidrit halkası görülmektedir.

Şekil 4.4. ve Şekil 4.7.'de tüm oluşan H^+ akısının tamamına yakınının gerek mevcut gerekse de oluşabilecek optimal hidrit tabakası içerisinde olduğu ve tamamının da zircaloy-4 zarf içerisinde kaldığı görülmektedir. Oluşan eser miktarda daha yüksek enerjili H^+ iyonlarının varlığı ise fisyon kaynaklı ve radyasyon kaynaklı radyoliz olarak değerlendirilebilir. Nitekim gerek ^{235}U gerekse de ^{238}U atomlarının her ikisi de 2 MeV nötronlar için 1b civarı oldukça düşük fisyon tesir kesitine sahiptirler. Bu, çok düşük

ihimal bile olsa yine de fisyon olasılığının olduğunu ve dolayısıyla da yüksek enerjili fisyon ürünlerinin oluşabileceğini ve bu enerjilerin daha yüksek enerjili H⁺ oluşumlarından sorumlu olabileceği aynı zamanda radyasyon kaynaklı diğer radyoliz etkileşimleri sonucu da yüksek enerjili H⁺ iyonlarının zarf yüzeyinde oluşabileceği değerlendirilmektedir.

Çizelge 5.1. Hidrit halkası varlığında H⁺ menzil kayması

μm (Boylamasına)	1 MeV	2 MeV	3 MeV	4 MeV	5 MeV
Zircaloy-4	10,4	29,0	53,7	85,2	121
ZrH₂ + Zircaloy-4	10,7	30,5	57,5	89,2	125

Şekil 4.1. ve Şekil 4.5'te görüleceği üzere hidrit halkası varlığı durumunda H⁺ iyonların enerjilere bağlı menzillerinde Çizelge 5.1.'de görüleceği üzere ufak artımlar dolayısıyla grafikte ufak bir kayma gözlemlenmiştir. Bu, hidrit halkası durumunda H⁺ iyonların daha düşük bir doğrusal enerji transferine sahip olduklarını göstermektedir.

Bu çalışmamızda işletme sürecinde yakıt zarfı yüzeyinde oluşan değişik enerjilerdeki H⁺ yapıların zarf içerisindeki yayılımları incelendiğinden işletme süreci dışındaki özel durumlar dikkate alınmamıştır. Bu yüzden yakıt zarfında ZrO₂ oluşumu ve H⁺ etkileşimlerine değinilmemiştir. Zirkonya oluşumunun Şekil 2.14.'te özellikle 800 °C üzeri sıcaklıklarda, dolayısıyla daha çok LOCA gibi akışkan kaybı ve ısı transfer özelliklerinin yitirildiği özel durumlarda etkin ve baskın olduğu, hidrit oluşumunun ise normal çalışma şartlarında etkin olduğu değerlendirildiğinden bu çalışmada sadece zarf ve zarf yüzeyinde hidrit halkası varlığı incelenmiştir.

6. SONUÇ

Bu çalışmamızda ortalama 2 MeV nötronların üretildiği reaktörde yer alan bir yakıt zarfının yüzeyinde gerek ılımlanma gerekse de diğer radyoliz etkiler neticesinde oluşan değişik enerjilerdeki H^+ iyonlarının yakıt zarfındaki yayılımı incelenmiştir. Kabulümüzün nispeten basit ve de yerinde olması elde edilen sonuçların gerçek reaktör uygulamalarıyla tutarlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu çalışmayla reaktörlerle ilgili bazı incelemelerin yerinde kabullerle yüksek bir doğrulukla simüle edilebileceği görülmüştür. Ayrıca H^+ akısının ekseriyetle 1 MeV ve 2 MeV aralığında olduğu da elastik çarpışa enerji/momentum dengesinden anlaşılmıştır..

Yakıt zarfı içerisinde oluşan H^+ akımının neredeyse tamamının 57 μm 'lik hidrit yapı içerisine denk geldiği ve bunun da yakıt zarfı kalınlığının 1/10 değerinde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca hidrit halkası oluşumunun H^+ iyonlarının yakıt zarfı içerisindeki hareket ve menziline doğrusal enerji transferinden kaynaklı ufak bir kayma dışında etkilemediği değerlendirilmiştir. Filyon ürünleri ve diğer radyasyon/radyoliz etkileri dolayısıyla az miktarda oluşan daha yüksek enerjili H^+ iyonları tamamen yakıt zarfı içerisinde kalmaktadır.

Bu çalışmanın, zirkonyum alaşımında hidrit incelemesi yapacak olan; hidrit oluşumu ve yakıt burn-up değeri arasında bir korelasyon oluşturmak isteyen araştırmacılara yardımcı olacağı umulmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Anonim, 2019. <https://pris.iaea.org/PRIS/> (Erişim tarihi: 19.05.2019)
2. Anonim, 2019. https://chem.libretexts.org/.../Nuclear_Magic_Numbers (Erişim tarihi: 19.05.2019)
3. Anonim, 2019. https://www.jaea.go.jp/04/turuga/jturuga/realtime/unchange_file/e_expln_3.html (Erişim tarihi: 19.05.2019)
4. Anonim, 2019. <https://www.chernobylwel.com/blog-detail/66/radiation-diary-i-from-atoms-to-radiation> (Erişim tarihi: 19.05.2019)
5. Anonim, 2019. <https://www.mprnews.org/story/2011/03/11/photos-japan-hawaii-earthquake-tsunami> (Erişim tarihi: 19.05.2019)
6. Anonim, 2019. <http://www.japc.co.jp/english/index.html> (Erişim tarihi: 19.05.2019)
7. Anonim, 2019. <http://www.nfi.co.jp/e/product/prod02.html> (Erişim tarihi: 19.05.2019)
8. Anonim, 2019. <https://www.naturepl.com/stock-photo-zircon-the-main-ore-of-zirconium-sample-from-kusunugu-malawi-image01346265.html> (Erişim tarihi: 19.05.2019)
9. Anonim, 2019. <https://theodoregray.com/Periodictable/Samples/040.22/index.s15.html> (Erişim tarihi: 19.05.2019)
10. Anonim, 2019. https://jolifukyu.tokai-sc.jaea.go.jp/fukyu/mirai/2009/5_2.html (Erişim tarihi: 19.05.2019)
11. Beiser, A., 1994. Concepts of Modern Physics, 5th ed. McGraw-Hill, New York, 83, 95, 441 546s.
12. Benedict, M., ve T. H. Pigford, 1981. Nuclear Chemical Engineering, 2nd ed. McGraw-Hill, New York
13. Bunch, B. ve Hellemans A. 2004. The History of Science and Technology, New York, 63, 484 776s.
14. Callister, W.D. Jr. 2001. Fundamentals of Materials Science and Engineering, 5th ed. John Wiley&Sons, New York, 105 901s.
15. Cochran, R. G. ve N. Tsoulfandis, 1990. The Nuclear Fuel Cycle: Analysis and Management. Lagrange Park: American Nuclear Society
16. Collier, G., 1996. Convective Boiling and Condensation, 3rd ed., Oxford University Press

17. Duderstadt, J., ve L. Hamilton, 1975. Nuclear Reactor Analysis. John Wiley, New York, 4 602s.
18. Eckert, E. R. G., ve R. M. Drake, Jr., 1986. Analysis of Heat and Mass Transfer. Hemisphere Pub. Washington, D.C.
19. El-Wakil, M. M., 1982. Nuclear Energy Conversion. La Grange Park, Ill.: American Nuclear Society
20. El-Wakil, M. M., 1981. Nuclear Heat Transport. La Grange Park, Ill.: American Nuclear Society
21. Evans, R. D., 1955. The Atomic Nucleus. McGraw-Hill . New York
22. Foderaro, A., 1971. The Elements of Neutron Interaction Theory. Cambridge, Mass. : MIT Press
23. Gebhart, B., 1971. Heat Transfer, 2nd ed. McGraw-Hill. New York
24. Glasstone, S., ve A. Sesonske, 1994. Nuclear Reactor Engineering, 4th ed. Chapman & Hall, New York
25. Incropera, F.P., Dewitt D.P. vd. 2002. Fundamentals of Heat and Mass Transfer 7th ed. John Wiley & Sons, 3 1050s.
26. Isbin, H. S., 1963. Introductory Nuclear Reactor Theory. New York
27. Judd, A. M., 1981. Fast Breeder Reactors: An Engineering Introduction. Pergamon Press, New York
28. Kaplan, I., Nuclear Physics, 2nd ed. Reading, Mass. : Addison-Wesley
29. Kays, W. M., 1994. Convective Heat and Mass Transfer, 3rd ed. McGraw-Hill. New York
30. Knudsen, J. G., ve D. L. Katz, 1958. Fluid Dynamics and Heat Transfer. McGrawHill . New York
31. Krane, K. S., 1987. Nuclear Physics, 3rd ed. New York: John Wiley, 6, 80 847s
32. Krane, K. S., 1995. Modern Physics, 2nd ed. New York: John Wiley
33. Lamarsh, J. R., 1966. Introduction to Nuclear Reactor Theory. Addison-Wesley, 5, 52, 100, 231, 548 783s.
34. Lapp, R. E. ve H. L. Andrews. 1972. Nuclear Radiation Physics, 4th ed. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall
35. Liverhant, S. E., 1960. Elementary Introduction to Nuclear Reactor Physics. Wiley. New York
36. Motta, A. T. ve Chen, L.Q. 2012. Hydride Formation in Zirconium Alloys. JOM, Vol. 64 (No: 12): sf. 1404.

37. Motta, A. T., Couet, A. ve Comstock, R.J. 2015. Corrosion of Zirconium Alloys Used for Nuclear Fuel Cladding. Annual Review of Materials Research, sf. 321.
38. Murray, R. L., 1957. Nuclear Reactor Physics. Prentice-Hallevars
39. Semat, H., and J. R. Albright, 1972. Introduction to Atomic and Nuclear Physics, 5th ed. Holt, Rinehart & Winston. New York
40. Serway, R. A., Moses, C. J., ve Moyer, C. A., 1990. Modern Physics, 3rd ed. Saunders, Philadelphia
41. Todreas, N. E., ve M. S. Kazimi, 1989. Nuclear Systems. Hemisphere Publishing . Washington, D.C.
42. Tong, L. S., 1997. Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow. Bristol: Taylor & Francis
43. Villani, S., 1979. Uranium Enrichment. Springer-Verlag, New York
44. Vizcaino, P., Banchik, A. D., Abriata, J. P. 2007. Hydrogen in Zircaloy-4: effects of the neutron irradiation on the hidrit formation. Journal of Materials Science, 5s.
45. Williams, H. S., 2009. A History of Science, 67 530s.
46. Wills, J. G., 1992. Nuclear Power Plant Technology

ÖZGEÇMİŞ

1. Kişisel Bilgiler

Ad Soyad	Fahrettin HOCAOĞLU
Doğum Tarihi	25.04.1978
Doğum Yeri	Razgrat
E-posta Adresi	f.hocaoglu@gmail.com

2. Eğitim Bilgileri

Lisans	Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği
Yüksek Lisans	Sinop Üniversitesi Disiplinlerarası Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri

3. İş Deneyimi

Mayıs 2007	Konuk Isı Ltd. AR-GE Mühendisi
Eylül 2010	Öztiryakiler A.Ş Soğuk Oda İmalat Müdürü
Ağustos 2014	Elektrik Üretim A.Ş Nükleer Mühendis
Mart 2017	EUAS International ICC Nükleer Mühendis
