



BİLECİK ŞEYH EDEBALI  
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK  
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü  
Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**İKİ GRUPLU DİFÜZYON TEORİSİ YARDIMIYLA KRİTİK  
NÜKLEER EBATININ TESPİTİ**

**Murat KOÇAK  
Yüksek Lisans**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Ali İhsan GÖKER**

**BİLECİK, 2019  
Ref. No.:10312473**



BİLECİK ŞEYH EDEBALI  
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK  
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü  
Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**İKİ GRUPLU DİFÜZYON TEORİSİ YARDIMIYLA  
KRİTİK NÜKLEER EBATININ TESPİTİ**

**Murat KOÇAK  
Yüksek Lisans**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Ali İhsan GÖKER**

**BİLECİK, 2019**



BİLECİK ŞEYH EDEBALI  
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK**

**SEYH EDEBALI UNIVERSITY**

**Graduate School of Sciences  
Department of Energy System Engineering**

**DETERMINATION OF THE CRITICAL NUCLEAR SIZE  
VIA THE TWO GROUP DIFFUSION THEORY**

**Murat KOÇAK  
Master's Thesis**

**Thesis Advisor  
Prof. Dr. Ali İhsan GÖKER**

**BİLECİK, 2019**



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS**  
**JÜRİ ONAY FORMU**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 18/11/2019 tarih ve 70-1 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 03/12/2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Murat KOÇAK'ın "İki Gruplu Difüzyon Teorisi Yardımıyla Kritik Nükleer Reaktör Ebatının Tespiti" başlıklı tez çalışması Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

**JÜRİ**

**ÜYE**  
**(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Ali İhsan GÖKER**

**ÜYE : Prof. Dr. Ferhunde ATAY**

**ÜYE : Doç. Dr. Arslan ÜNAL**

**ONAY**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun  
.../.../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

**İMZA/ MÜHÜR**

## **TEŐEKKÖR**

Tez çalıőmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan ilgisini ve önerilerini göstermekten kaçınmayan çok değerli ve kıymetli Danıőman hocam Sayın Prof. Dr. Ali ihsan GÖKER Bey'e sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

## **BEYANNAME**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada, tez içindeki tüm verileri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun olarak sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu Üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmada kullanılmadığını beyan ederim.

...../12/ 2019

**MURAT KOÇAK**

# İKİ GRUPLU DİFÜZYON NÖTRON TEORİSİ YARDIMIYLA KRİTİK NÜKLEER REAKTÖR EBATININ TESPİTİ

## ÖZET

Fosil yakıtların haricinde kesintisiz güç kaynağı olarak kullanılabilen tek enerji kaynağı nükleer enerjidir. Nükleer enerjinin açığa çıkarılması ise nükleer reaktörlerde gerçekleşen fisyon reaksiyonuyla meydana gelmektedir. Fisyon reaksiyonunun kontrol altında tutulabilmesi ise kritiklik şartının sağlanmasına bağlıdır. Bu çalışmada, fisyon reaksiyonunu tetikleyen nötronlar düşük enerjili termal nötronlar ve yüksek enerjili hızlı nötronlar olmak üzere iki ayrı grup halinde değerlendirilmiştir. Bunun sonucunda ortaya çıkan iki gruplu nötron difüzyon teorisi iki gruplu kritiklik denklemine yol açar. Verilen bir reaktör kompozisyonu için kritikliği sağlayan reaktör ebatı iki gruplu kritiklik denklemini numerik olarak çözerek tespit edilmiştir. Bu yolla, küresel geometride çekirdek yarıçapı, yansıtıcı kalınlığı ve ekstrapolasyon uzunluğundaki değişimlerin kritik reaktör ebatı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Nükleer Enerji, Fisyon, Kritiklik, Nötron Difüzyon

## **DETERMINATION OF THE CRITICAL NUCLEAR SIZE VIA THE TWO GROUP DIFFUSION THEORY**

### **ABSTRACT**

The only known energy source that can be used as a continuous power source except fossil fuels is the nuclear energy. Exploitation of the nuclear energy takes place via the fission reaction that takes place inside the nuclear reactors. Being able to keep the fission reaction under control depends on satisfying the criticality condition. In this work, the neutrons that trigger the fission reaction have been regarded as two different groups that are low energy thermal neutrons and high energy fast neutrons. Two group neutron diffusion theory that arises as a result of this yields two group criticality equations. The reactor size that satisfies the criticality condition for a given reactor composition has been determined by solving the two group criticality equations numerically. In this way, the effects of the changes in the core radius, the reflector thickness and the extrapolation length on the critical reactor size in spherical geometry have been investigated in detail.

**Keywords:** Nuclear Energy, Fission, Criticality, Neutron Diffusion

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
<b>TEŞEKKÜR .....</b>	
<b>BEYANNAME.....</b>	
<b>ÖZET .....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>II</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>III</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ.....</b>	<b>V</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....</b>	<b>VII</b>
<b>1.ENERJİ NEDİR? .....</b>	<b>1</b>
1.1.Enerji Kavramı .....	1
1.2. Alternatif Enerji Nedir? .....	1
1.3. Alternatif Enerji Kaynakları .....	2
1.3.1. Solar Enerjisi .....	2
1.3.2. Rüzgar Enerjisi .....	3
1.3.3. Biyokütle Enerjisi .....	5
1.3.4.Hidroelektrik Enerjisi .....	6
1.3.5 Jeotermal Enerji .....	7
1.3.6. Hidrojen Enerjisi.....	9
<b>2. ATOM ENERJİSİ .....</b>	<b>11</b>
2.1.Füzyon.....	12
2.2.Fisyon Reaksiyon .....	14
2.3. Fisyon Zinciri .....	17
2.4.Fisyon Kritikliği .....	19
2.5.Nükleer Reaktör Çeşitleri .....	19
2.5.1.Hafif su reaktörü .....	19
2.5.2.Bançlı su reaktörü.....	20
2.5.3. Kaynar su reaktörü.....	21
2.5.4.Gaz soğutmalı reaktörler .....	22
2.5.5.Üretken Reaktörler.....	23
2.5.6.Küçük modüler reaktörler (SMR).....	24
2.5.7. Rus Ekolü Reaktörler.....	24

<b>3.İKİ GRUPLU DİFÜZYON HESAPLAMASI.....</b>	<b>28</b>
3.1. 2 gruplu difüzyon teorisi ve çözümü.....	28
3.2. Sonuçlar ve tartışma .....	32
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>38</b>
<b>ÖZ GEÇMİŞ.....</b>	<b>.....</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa No</b>
Şekil 1.1.	Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Haritası.....3
Şekil 1.2.	2018 Türkiye Enerji İstatistik Raporu .....5
Şekil 1.3.	Türkiye'nin Biyokütle Potansiyeli.....6
Şekil 1.4.	HES Örneği.....7
Şekil 1.5.	Türkiye'de nano tektonik-volkanik etkinliği ve jeotermal alanlar.....9
Şekil 1.6.	Hidrojen Pili.....9
Şekil 2.1.	Nükleer Tesis.....12
Şekil 2.2.	Füzyon Reaksiyon.....13
Şekil 2.3.	Füzyon Örneği Güneş.....14
Şekil 2.4.	Fisyon Reaksiyonu.....15
Şekil 2.5.	Nükleon başına bağlanma enerjisi.....15
Şekil 2.6.	Nükleer Fisyon.....17
Şekil 2.7.	Kontrol çubukları.....18
Şekil 2.8.	PWR çalışma diagramı.....20
Şekil 2.9.	Kaynar su reaktörü.....21
Şekil 2.10:	Gaz soğutmalı reaktör blok diyagramı .....22
Şekil 2.11.	FBR tipi reaktör prototipi .....23
Şekil 2.12.	KLT-40S SMR tipi reaktör.....24
Şekil 2.13.	Çernobil Faciasının meydana geldiği RBMK tipi reaktör santrali.....25
Şekil 2.14.	VVER-1200 tasarımı nükleer reaktör simülasyonu .....26
Şekil 2.15.	NGS yapılacak olan Akkuyu Çalışma Sahası .....27
Şekil 3.1.	$\mu=2.4$ ve $\nu=2.4$ için 7. denklemin sağ ve sol taraflarının $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği .....32
Şekil 3.2.	$\mu=1.8$ ve $\nu=2.4$ için 7. denklemin sağ ve sol taraflarının $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği .....32
Şekil 3.3.	$\mu=1.2$ ve $\nu=2.4$ için 7. denklemin sağ ve sol taraflarının $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği .....33
Şekil 3.4.	$\mu=1.2$ ve $\nu=1.8$ için 7. denklemin sağ ve sol taraflarının $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği .....33
Şekil 3.5.	$\mu=1.2$ ve $\nu=1.2$ için 7. denklemin sağ ve sol taraflarının $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği .....34

<b>Şekil 3.6.</b>	$\mu=2.4$ ve $\nu=2.4$ için 7. denklemin sağ ve sol taraflarının $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği .....	35
<b>Şekil 3.7.</b>	$\mu=1.8$ ve $\nu=2.4$ için 7. denklemin sağ ve sol taraflarının $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği .....	35
<b>Şekil 3.8.</b>	$\mu=1.2$ ve $\nu=2.4$ için 7. denklemin sağ ve sol taraflarının $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği .....	36
<b>Şekil 3.9.</b>	$\mu=1.2$ ve $\nu=1.8$ için 7. denklemin sağ ve sol taraflarının $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği .....	36
<b>Şekil 3.10.</b>	$\mu=1.2$ ve $\nu=1.2$ için 7. denklemin sağ ve sol taraflarının $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği .....	37

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

H	: Hidrojen
He	: Helyum
PV	: Fotovoltaik
U	: Uranyum
Pu	: Plutonyum
Th	: Toryum
MeV	: Milyon Elektrovolt
m/sn	: Metre bölü saniye
k	: kritiklik
J/kg	: Joule bölü kilogram
H <sub>2</sub> O	: Su
Kg	: Kilogram
$\gamma$	: Gama
RES	: Rüzgar Enerji Santrali
HES	: Hidroelektrik Enerji Santrali
MTA	: Maden Teknik Arama
LWR	: LightWaterReactor
MTEP	: Milyon Ton Eşdeğer Petrol
PWR	: PressizeWaterReactor
BWR	: BoilingWaterReactor
AGR	: Advanced GasReactor
FBR	: FastBreederReactor
VVER	: Voda-VodyaniEnergeticheskyReactör
SMR	: Küçük Modüler Nükleer Güç Reaktörü
VVER-1000	: Voda-VodyaniEnergetichesky Reactör-1000
VVER-1200	: Voda-VodyaniEnergetichesky Reactör-1200
VVER-91	: Voda-VodyaniEnergetichesky Reactör-91
VVER-92	: Voda-VodyaniEnergetichesky Reactör-92
RBMK	: Hafif Su Soğutmalı Grafit Yavaşlatıcı Reaktör
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
SSCB	: Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği

AA	:Anadolu Ajansı
NGS	:Nükleer Güç Santrali
HESSİAD	: Hidroelektrik Santralleri Sanayi İşadamları Derneği
TÜREB	: Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği

## 1.ENERJİ NEDİR?

### 1.1.Enerji Kavramı

Enerji, uygulanan bir kuvvetin sonucu olarak maddenin yapabileceği iş kapasitesidir. Sayı ve birim kullanılarak belirtilen büyüklük ve türetilmiş bir fonksiyondur. Bu tanım; tek başına bir varlık olarak düşünülmemelidir, biçimlenmiş bir maddenin ya da sistemin bir özelliği olarak düşünülmelidir.

Enerji bir modelden başka bir modele aktarılabilir. Enerji transferinin iki yolu vardır. Birincisi iş, ikinci yolu ise ısıdır. Eğer model üzerinde çevre iş yaparsa, modele enerji aktarır. Açık olmayan bir modelin içinde enerji bir biçimden öteki biçime kaybolmadan dönüşebilir. Mesela kâinat açık olmayan bir model örneğidir. Bu sebepten kâinat var olduğundan bugüne kadar enerjinin miktarı değişime uğramamıştır. Bu durum enerjinin korunumu yasası olarak adlandırılır (Çamdalı, 2018).

Enerji yoktan var edilemez, üretilemez lakin biçim değiştirir. Bir durumdan diğer duruma dönüşür.

1970’lerden sonra ortaya çıkan fosil yakıt krizi; dünya genelinde enerjinin ne kadar önemli olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır. 2000’li yıllara gelindiğinde fosil yakıtların yerine kullanılacak enerji çeşitleri yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu sonuçlar alternatif enerji sistemlerini meydana getirir (Yergin, 2011).

### 1.2. Alternatif Enerji Nedir?

1970’lerin ortalarında petrol buhranında sanayide ilerlemiş devletler teknolojileri ve sanayi mamulleri satışları aracılığıyla, basit olamayan bir şekilde fosil yakıt kaynaklarına sahip değilken, ağır olmayan bir sıkıntı ile bağımsızlıklarından taviz vermeden atlatmışlar ve benzer bir duruma yeniden düşmemek sebebiyle enerjide bağımsız duruma ulaşmanın metotlarını araştırmışlardır. Petrol, kömür ve hidrolik potansiyele dayanmayan, bilim literatüründe Alternatif Enerji Kaynakları ismi ile isimlendirilen, yeni enerji kaynakları geliştirmişlerdir (Ünalın, 2017).

“ Alternatif enerji, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının, 4 Ekim 2005 tarih ve 25956 sayılı Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren *Yenilenebilir Enerji Kaynak Belgesi Verilmesine İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Yönetmelik*’in “Tanımlar” başlıklı dördüncü maddesinde, *Yenilenebilir enerji kaynakları: Hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal, biokütle, biyogaz, dalga, akıntı enerjisi ve gelgit gibi fosil olmayan enerji*

*kaynaklarını ifade eder biçiminde tanımlanmaktadır.* ” (Resmi Gazete, 2005).

### **1.3. Alternatif Enerji Kaynakları**

Alternatif Enerji Kaynakları genel olarak 7 grup olarak ele alınmıştır;

- 1.Solar Enerjisi
- 2.Rüzgâr Enerjisi
- 3.Biyokütle Enerjisi
- 4.Hidroelektrik Enerjisi
- 5.Jeotermal Enerjisi
- 6.Hidrojen Enerjisi
- 7.Atom Enerjisi

#### **1.3.1. Solar Enerjisi**

Solar enerji, Güneş enerjisi olarak da adlandırılmaktadır. Güneş dünyamızdan kabaca hesaba göre; 150 milyon kilometre uzaklıkta bulunan ve yüzeyinin sıcaklık değeri 5000 dereceden fazladır. Güneş, dünyamızın dâhil olduğu galaksi sistemi olan güneş sisteminin enerji kaynağıdır. Solar enerjisi; hiçbir şekilde yararlı olmayan gaz salınım durumuna sebep olmadığından, direk olarak güneş ışığında oluşan kirli olmayan bir enerji kaynağıdır. Güneşin yaklaşık olarak onda dokuzunu oluşturan H gazının çekirdekleri ile He çekirdekleri oluşturmaktadır. Güneşte meydana gelen reaksiyonlar sonucunda meydana gelen enerjinin bir miktarı dünyamıza ulaşan ışınım adını verdiğimiz enerjidir. Bu meydana çıkan ışınım enerjisinin günümüzde panel olarak nitelendirdiğimiz solar enerjisi panelleri ile elektrik enerjisine çevrilmesine solar panel sistemi olarak tanımlanmaktadır (Karamanav, 2007).

Solar enerjisi, yenilenemez olmaması, hava, ortam ve daha başka kirliliğe mahal vermemesinden ötürü kirli olmayan bir enerji kaynağıdır. Güneşten dünyamıza ulaşan enerjinin en önemli esası sınırlı olmamasıdır (Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, 2019).

*“ Paramı güneşe ve güneş enerjisine yatırırdım. Ne büyük bir güç kaynağı! Umarım bunu ele almak için petrol ve kömürün bitmesini beklemeyiz.”* 1931 Thomas Edison (T.C. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 2016).



soğumanın tesiri altında kalır. Farklı soğuma ve ısınma ile meydana gelen kuvvetler, hava hareketlerinden sorumlu olur. Hava kütlesi olduğu yerden ve durumdan daha fazla ısınırsa atmosferin yukarısı yönüne yükselir ve boş kalan alana hacimce farklı değerde olmayan soğuk hava kütlesi yerleşir. Hava bu formda yer değiştirmesi vakasına rüzgâr adı verilir (Yerebakan, 2001). Rüzgârı meydana getiren hava kütlelerinin akımının sahip olduğu enerji rüzgâr enerjisidir. Güneşten Dünyamıza ulaşan enerjinin cüzi bir kısmı rüzgar enerjisine dönüşür.

Rüzgâr enerji santrallerinin temel ve esas unsuru durumunda bulunan rüzgar türbinleri, havanın hareket durumundaki kinetik enerji formunu ilk olarak mekanik enerjiye ardından elektrik enerjisine çevirir ( T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2019).

Rüzgâr türbini (Aerojenaratör) olarak isimlendirilen ve elektrik üretiminde faydalanılan ilk cihazlar, 1890'ların başlarında Danimarka'da icra edilmiştir. 1960'lı yıllarda rüzgâr türbinleri üç kanatlı olarak dizayn edilmeye başlanmıştır (DanishWindHistory, 1999).

Rüzgârdan üretilen elektrik enerjisi için en önemli nüanslardan birisi rüzgâr hızıdır. Üretilen enerji yaklaşık olarak rüzgâr hızının küpü ile doğru orantılıdır (Ağçay, 2007).

Rüzgâr enerjisi doğada bulunabilen ücretsiz denilebilecek bir enerji kaynağıdır. Komplike bir sistem olmadığı için bakım onarım maliyetleri yüksek değildir. Alternatif ve kirlili olmayan bir enerji kaynağı olmasından dolayı, çevreye zararı hemen hemen yoktur (Kökey, 2018). Rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi dönüşüm sistemlerinin faaliyete geçirilmesi için uzun senelere gerek yoktur. Rüzgâr enerjisinin kurulum aşamasında maliyetinin düşük olmaması, depolama unsurunun yüksek olmaması en önemli avantajlı olmayan yönleridir (Dündar, 2018).

IEA analizlerine göre 2040'lı yıllardan sonra dünya genelinde tüketilen elektrik enerjisinin yüzde 18'lik kısmının rüzgâr enerjisinden imal olunacağı öngörülmektedir (IEAE, 2013).

Şekil 1,2'de gösterildiği gibi Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (TÜREB)'nin altı ayda bir yayımladığı rapora göre 2018 yılında 497 MW kurulu güç ile Türkiye'nin toplam rüzgâr kurulu gücü 7369 MW'a ulaşmıştır(TÜREB,2018). Ülkemizde sayıca

251 tane olmak üzere; 75 tanesi lisanssız olan RES vardır. Faal şekilde üretim yapan RES'lerin, kurulu gücü yaklaşık 7,000 MW'tır (Türkiye Elektrik İletişim A.Ş., 2019).



Şekil 1.2.2018 Türkiye Enerji İstatistiki Raporu

### 1.3.3. Biyokütle Enerjisi

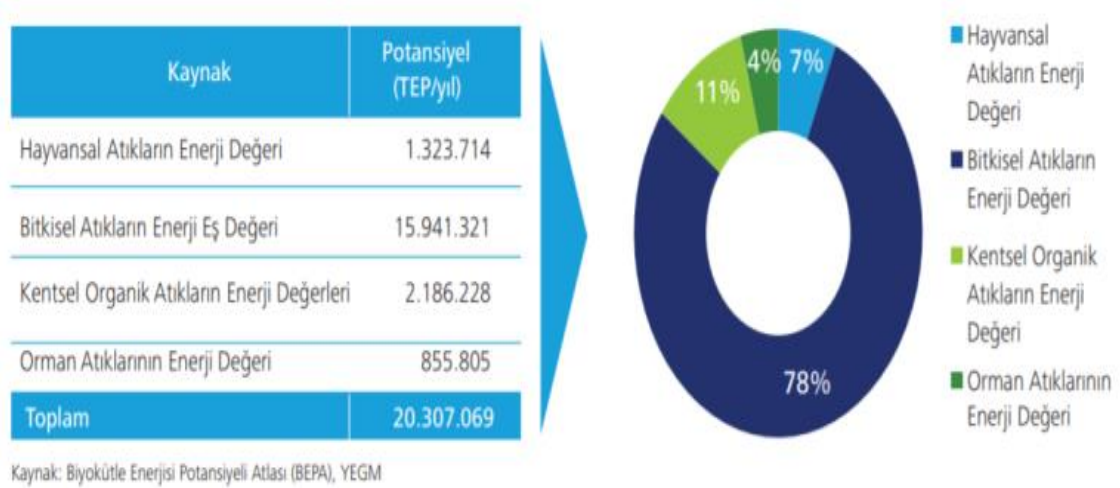
“ 5346 sayılı yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanıma İlişkin Kanunda; biyokütle organik atıkların yanı sıra bitkisel yağ atıkları, tarımsal hasat atıkları dâhil olmak üzere, tarım ve orman ürünlerinden ve bu ürünlerin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünlerden elde edilen kaynaklara verilen ad olarak tanımlanmıştır. ” (RESMİ GAZETE, 10.05.2005)

Günümüzde günlük yaşamda kullandığımız atık, kâğıt, meyve-sebze, kuruyemiş, odun, çay vb. hemen hemen her evsel atık için biyokütle kaynağı diyebiliriz. (Sütçü ve Akkurt, 2018).

Anaerobik mayalanma neticesinde, yüzde 50 ila yüzde 80 arasında (metan), yüzde 20 ila yüzde 50 arasında (karbon dioksit) ve çok minimum oranda hidrojen, karbon monoksit, azot, oksijen ve hidrojen sülfür bulunan gaz karışımı meydana getirmektedir. Bu oluşan gaz ise biyogaz olarak isimlendirilmektedir. Bu işlem sonucunda ortaya çıkan enerji ise biyokütle enerjisi tanımı ile isimlendirilmektedir (Speece, 1996).

Ülkemizin biyokütle atık toplamı tahminen 8,6 MTEP ve elde edilecek biyogaz ise yaklaşık 2 MTEP olabileceği düşünülmektedir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı,

2009). Şekil 1,3’de ülkemize ait biyokütle enerji potansiyelinin hayvansal atıkların, bitkisel atıkların, kentsel organik atıkların yüzdeler olarak ve MTEP cinsinden değeri verilmiştir.



**Şekil 1.3.** Türkiye’nin Biyokütle Potansiyeli

Elektrik, ısı, yakıt elde etmek amacıyla kullanılan biyokütle kaynakları; tercih edilen termal ve biyolojik çevrimden kimyasal forma dönüştürülme metoduyla istenilen enerji formunda üretimi sağlanmaktadır (Saraçoğlu, 2010).

#### 1.3.4.Hidroelektrik Enerjisi

Hidroelektrik santraller (HES) akar durumdaki suyun gücünü elektrik enerjisine çevirir. Akar durumdaki su, bulundurduğu enerji miktarının düzeyini suyun akış ve düşüş hızı belirler. Düşük olamayan bir düzeyden düşürülen su, yüksek miktarda enerji bulundurur. Kanal veya borudaki su, türbinlerin istikametine akar ve türbinlerin dönmesine neden olur. Jeneratöre bağlanan türbin şaftları gerekli mekanik enerji sağlandıktan sonra, jeneratörler vasıtasıyla elektrik enerjisi elde edilir (Filikvd, 2007).

Gaz salınımı yapmaması, yenilenebilir ve ulaşılabilir kaynaklara sahip olmaları, yakıt giderlerinin çok çok düşük maliyetlerde olması, tesislerin yerli imkânlarla kuruluyor olabilmesi ve işsizliği çözüm noktasında istihdam sağlama olanaklarına sahip olmalarından, doğaya hiçbir zararlarının bulunmamasından, turizme zemin hazırlamasından dolayı tercih edilen sistemlerdir (Erdoğan vd, 2009).

Dünya genelindeki elektrik enerjisinin hemen hemen yüzde yirmisi HES’ler vasıtasıyla üretilmektedir. Ülkemizde ise sayıca 150 taneden fazla faaliyet gösteren

HES mevcuttur (DEKTMK, 2007). Şekil 1,4'de ülkemizde aktif bir şekilde üretim yapan bir HES örneği gösterilmiştir.

Ülkemizde 2019 senesinin ilk iki çeyrek periyodunda hidroelektrikten elde edilen enerji miktarı (geçen seneye oranla % 63,5 fazlalaşarak) 53,7 milyar kWh ile HES'lerden elektrik enerjisi elde etme oranı %35,5 yükselmiştir (HESİAD, 2019).



**Şekil 1.4.** HES örneği

### **1.3.5 Jeotermal Enerji**

Jeo ve termal sözcükleri, İngilizcede yer ve ısı anlamına gelen geo ve thermal kelimelerinden türetilmiştir (Ataman, 2007). Jeotermal enerji; yerin altından çıkan sıcaklık değeri yüksek olan sudan ve buhardan sağlanan enerji olarak tarif edilebilir

Jeotermal enerji, yeryüzünün bazı özlerinde toplanmış ısının meydana getirdiği, sıcaklıkları her an yerel atmosferik ortalama sıcaklıktan fazla olduğu durumun ve etrafında olağan yer altı ve yer üzerindeki sulara oranla gereğinden fazla erimiş mineral, farklı tuz ve gazların dâhil olduğu soğuk olmayan su ve buhar olarak tarif edilebilir (Çetin, 2014).

Devletlere ve bölgelere göre farklı sınıflandırma bulunmasına karşın jeotermal enerji sıcaklık değerine göre kabaca 3 grupta değerlendirilebilir.

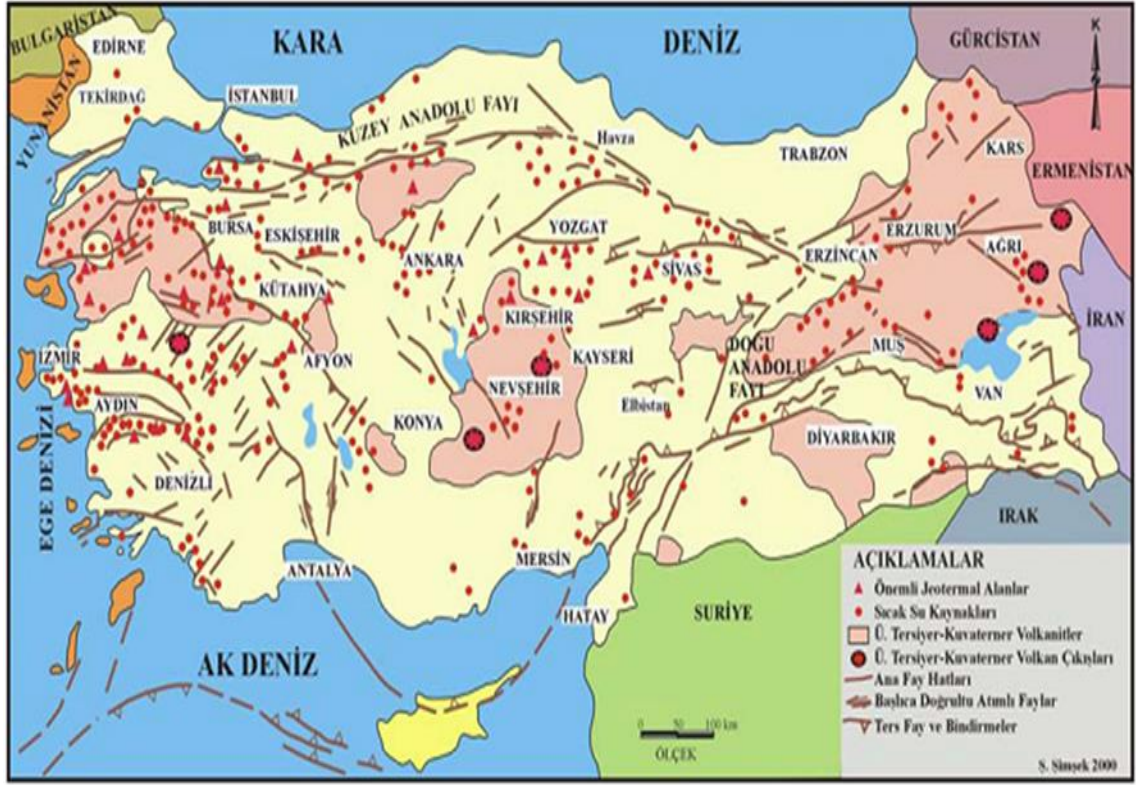
- Düşük sıcaklığa sahip alanlar
- Orta sıcaklığa sahip alanlar
- Yüksek sıcaklığa sahip Alanlar (Mertoğlu vd, 1994).

Düşük sıcaklığa sahip alanlar 20 derece ile 70 derece arasında, orta sıcaklığa sahip alanlar 70 derece ile 150 derece, yüksek sıcaklığa sahip alanlar 150 derece ve üstündeki ısı değerlerine sahiptir.

Ülkemizde jeotermal sular ile alakalı ilk çalışmalar 1962 senesinde MTA tarafından başlatılmıştır. O zamandan beri sağlanan analiz veri sonuçları, ülkemizin jeotermal elektrik güç gizili yaklaşık olarak 4500 MWe iken jeotermal ısıtma gizili ise 31500 MWt'dir (Hepbaşlı ve Çanakçı, 2003; Dağdaş, 2004). Şekil 1,5'de ülkemize ait jeotermal alanların nanotektonik ve volkanik etkinlikleri harita üzerinde gösterilmiştir.

Jeotermal enerjinin elektrik enerjisi sağlamada, ısıtma, sera ısıtması, sanayi alanında, termal su maksadıyla turizm ve sağlık sektöründe faydalanma amaçları oldukça fazladır.

Jeotermal enerji de ortama ve havaya gaz salınımı olmaması, yakıt giderinin bulunmaması, işletme ve idame giderlerinin düşük olması, ithalata bağlı imkânlarla ihtiyaç duymadan tesis kurulabilmesi ve idame ettirilmesi yönüyle jeotermal enerji tesisleri dezavantajlı olmayan tesislerdir (Serpen ve Kıvanç, 2019).



### 1.3.6. Hidrojen Enerjisi

Hidrojen enerjisi, gaz halindeki hidrojen elementinin gaz elementinin işleme tabi tutulması ve tahviliyle meydana gelen enerji kaynağıdır. Naturel olmamasına karşın, devam ettirilebilir ve alternatif enerji kaynaklarına dâhil edilebilir (Ağaçbiçer, 2019).

Doğada sonlu olmayan ölçüde bulunan, yanma özelliği hasebi ile yüksek rantabilitesine sahip Hidrojen atomu dünyamızda mevcut olduğu için alternatif enerji kaynağı olarak sayılabilir (Ültanır, 1997).



**Şekil1.6.** Hidrojen Pili

Günümüzde üretim zorluğu sebebiyle yaygın kullanımı olmayan hidrojen enerjisi ilerleyen tarihlerde ısı ve yakıt pili kullanımı için en büyük alternatif adaylar arasındadır (Çomak, 2019). Şekil 1,6'da günümüzde pil olarak kullanılan bir hidrojen pili örneklendirilmiştir.

Günümüzde, hidrojenin öteki yakıtlardan hemen hemen üç kat daha pahalı olmamasından dolayı, tercih edilme noktasında ilk sıralara yükselmesinin maliyetinin minimize edecek teknolojik yeniliklere göre şekilleneceğini işaret etmektedir (Güvendiren ve Öztürk, 2005).

## 2. ATOM ENERJİSİ

Atom enerjisi, nükleer enerji olarak da tarif edilmektedir. Nükleer sözcüğü; Fransızca nucleer “çekirdekle ilgili” sözcüğünden alıntıdır. Latince “nucleus” sözcüğünden türetilmiştir. Bu sözcük Latince nux, nuc özelliklede ceviz kelimesinden türetilmiştir.

Bir elementin en küçük yapı taşı olarak tarif edilen atom, çekirdek ve çevresinde bulunan elektronlardan oluşur. Atom enerjisi, atomların parçalanması sonucunda meydana çıkan ısı enerjisini, buhar olarak kullanarak elektrik enerjisine çeviren sistemlerden elde edilir (Eskin, 2018). Şekil 2.1’de atom enerjisinden elektrik üretimi yapan bir nükleer tesis örneği resim olarak verilmiştir.

Nükleer enerji, atomlar arasında meydana gelen nükleer tepkimeler sonucu ortaya çıkmaktadır. Nükleer tepkimeler neticesinde kimyasal tepkimelere göre devasa bir ısı enerjisi meydana gelmektedir. 1 kg uranyumun yanması sonucu 0.87 gr madde enerjiye dönüşmektedir. Bu kütle yaklaşık  $7.8 \times 10^{13}$  J/kg enerji meydana gelir. Bu rakam göreceli olarak çok küçük görünmektedir. Oysa fosil yakıtların 1 kg yanması sonucu ortaya çıkan enerji  $5 \times 10^7$  J/kg’dır. Yani nükleer yakıt fosil yakıtlara göre  $1,5 \times 10^6$  kat daha fazla enerji sağlamaktadır (Polatoğlu, 2016).

Atom enerjisi iki metot kullanılarak elde edilir. Bu metotlar; fisyon ve füzyondur. Atom enerjisi, 1700 yılların sonuna doğru Uranyumun keşfi ile başlayan ve 1930’lu yılların ortalarına doğru atomun parçalanması ile Dünyanın ilgisini çekmeye başlamıştır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2019).

50’ li yıllardan bu yana, nükleer fisyon prensibi ile üç nesil teknoloji geliştirilmiştir. İlk yakıtta, yakıt olarak natürel uranyum, moderatör olarak grafit, soğutucu olarak da karbondioksit gazı kullanılmıştır. İkinci tepkimede yakıt olarak zenginleştirilmiş uranyuma geçilmiş, yavaşlatıcı olarak da grafit ya da su kullanılmış ve soğutucu unsur da su olmuştur (Kaya, 2012).



**Şekil 2.1**Nükleer Tesis

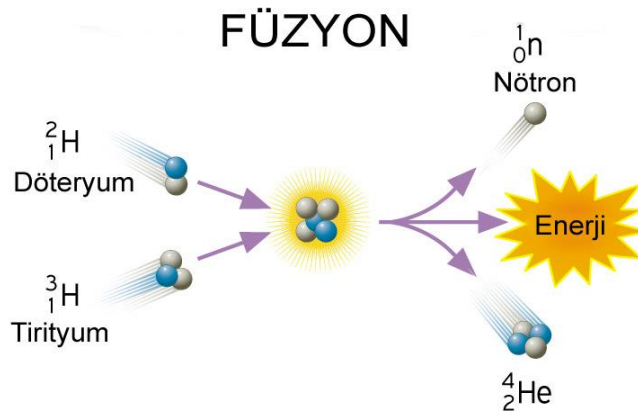
### **2.1.Füzyon**

Füzyon sözcüğü, anlamı itibariyle en genel tanımı birleşmedir. Doğadaki atomlar sıklıkla elektron yörüngelerinde sahip oldukları elektronları paylaşarak kararlı veya daha kararlı halde bulunma hedefiyle diğer atomlarla birlikte bulunurlar. Atomların bir araya gelmesiyle moleküller oluşur.

Kimyasal reaksiyonların tersine atomların merkezinde bulunan diğer atoma ait kısımların kendi aralarında ve dışarıdan gelen tesirlerle buldukları durumdan başka bir duruma geçmeleri ile çekirdek tepkimesi meydana gelir. Bu tepkime sonucunda proton adedinde artış ve azalma oluyorsa, başka bir elementin sahibi olduğu bir atom meydana gelir. Farklı iki atom çekirdeğinin bir araya gelerek daha hafif olmayan bir çekirdek oluşmasına füzyon denir (TAEK, 2019).

Çekirdeksel füzyon, çekirdeksel kaynaşma ya da füzyon; iki ağır olmayan elementin çekirdeksel tepkimeler neticesinde bir araya gelerek daha ağır bir element meydana getirmesidir. Nükleer tepkimesi olarak isimlendirilen bu reaksiyon neticesinde çok büyük miktarda enerji oluşur. Bahsi geçen tepkimeler ile meydana getirilebilecek en ağır element Fe'dir. Tepkimede bulunan atomlar; Şekil 2.2'ye göre

Hidrojen veizotopları Detryum ve Trityum gibi atom numaraları yüksek olamayan elementlerde çok büyük miktarda enerji meydana gelir (Hakan vd, 2015).

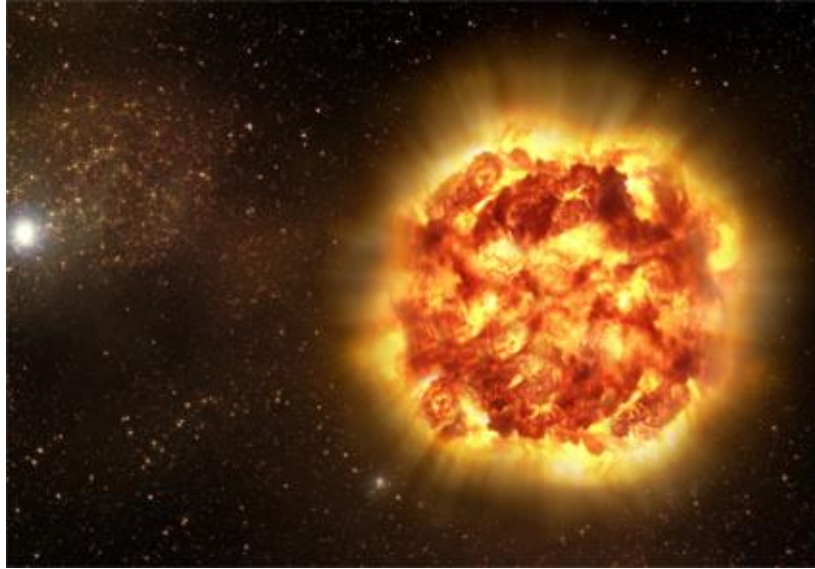


Şekil 2.2. Füzyon Reaksiyon

Şekil 2.3’de resim olarak verilmiş olan Güneşin, enerji kaynağı füzyondur. Füzyon reaksiyonları, güneşte sürekli ve yapay olmayan şekilde meydana gelmektedir. Güneş tarafından gönderilen ısı ışık ve H çekirdekleri bir araya gelerek He halini alır. Bu durum gerçekleşirken kütlede meydana gelen pozitif olmayan değişim

“Kütlenin enerji eşitliği formülü olan enerji eşittir kütle çarpı ışık hızının karesi denkleminde” (Akın ve Biltekin, 2018).

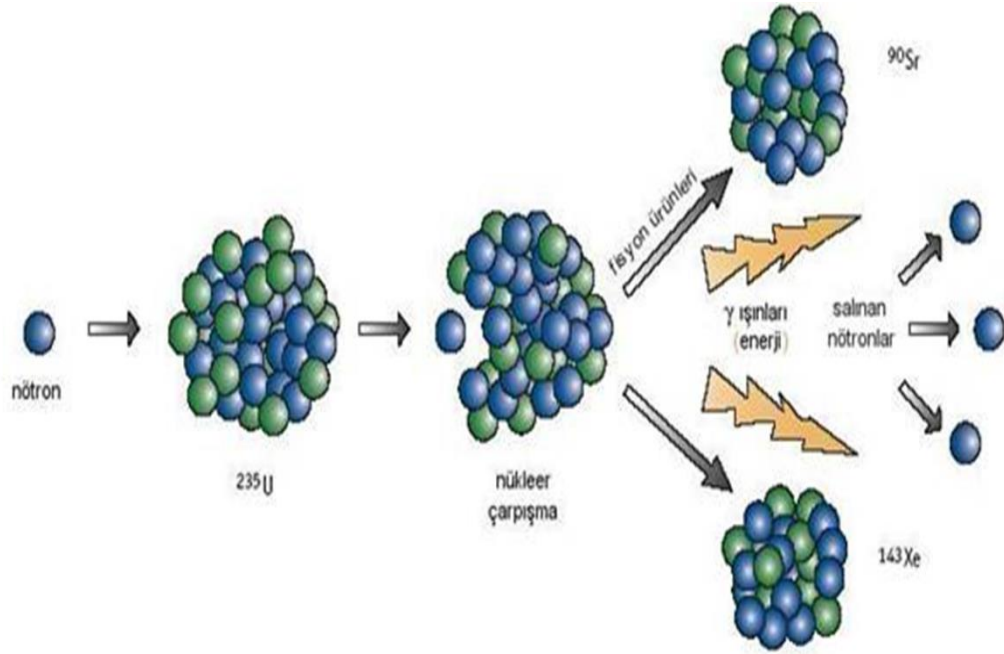
Kabaca hesaplanacak olursa güneş yaklaşık olarak saniyede 0,55 milyar ton H’ni 0,55 milyar ton He atomuna dönüştürdüğü sonucunun ortaya çıktığı görülmektedir. (Ocak, 2014). Kalan 4.000.000 ton gaz ise enerjiye çevrilir. Bu eylemin uzun senelerce devam ettiği ve her tepkimede güneşte ortaya çıkan pozitif olmayan istikametteki değişim, bireylerin beyinlerinde bu enerjinin ne zaman sonlanacağı sorusunu sordurmuştur. Lakin araştırma neticeleri güneşte ortaya çıkan bu pozitif olmayan değişimin sahip olduğu kütleyle oranlandığında çıkan çok düşük olduğu saptanmış ve güneşin çok daha uzun yıllar varlığını devam ettireceği kanısı ortaya çıkmıştır.



**Şekil 2.3.** Füzyon Örneği Güneş

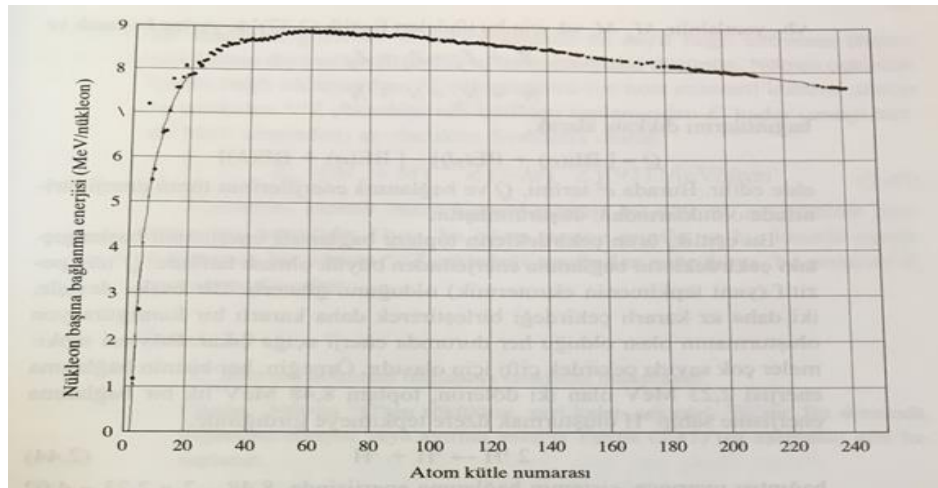
## 2.2.Fisyon Reaksiyon

Fisyon, kısaca çekirdek reaksiyonu olarak da ifade edilebilir. Nötron, proton, düşük enerjili olmayan fotonlar gibi çekirdek parçacıkları ile gerçekleşebilir. Fisyon bir nötronun, Uranyum gibi hafif olmayan bir madde atomunu tarafından soğurulması sonucunda kararlı olmayan daha ufak iki ve üzeri sayıda aynı olmayan çekirdeğe bölünmesidir (Yıldız, 2016). Reaksiyon sonucunda meydana gelen atomlara fisyonmamulleri diyebiliriz. Fisyon mamullerinin bir kısmı radyoaktiftir. Fisyon reaksiyon sonucunda en az iki adet nötron ve çok fazla miktarda enerji açığa çıkar (Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, 2019). Bu tepkimeler sonucunda ortaya çıkan enerji kimyasal tepkimelerden kat kat fazladır. Şekil 2.4'de ifade edildiği gibi; fisyonmamulü olan parçacıkların tamamının kütlelerinin toplamı, esas çekirdeğin külesinden daha azdır, oluşan bu fark radyasyon enerjisi formunda meydana gelir (Görür, 2006).



Şekil 2.4. Fiyon Reaksiyon

Otto Han ile FirtzStrassman yaptıkları uygulamalarda Uranyuma yüksek hıza sahip nötronlarla yaptırdıkları reaksiyon bombalaması sonucunda Baryum ortaya çıktığını deneyimlediler. Daha sonra 1939 yılında “İngiliz Nature Dergisi” yayınında bu olayın Meitnerin şahsı tarafından nükleer fiyon olarak adlandırıldığını duyurdu (Aczel, 2012).



Şekil 2.5. Nükleon Başına Bağlanma Enerjisi (Lamarsh ve Baretta, 2001).

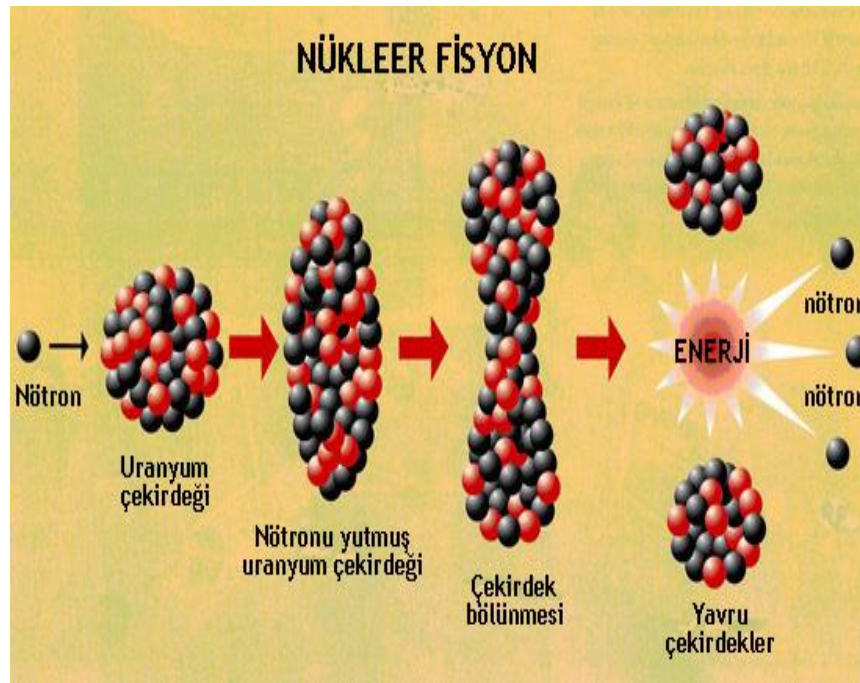
Fisyon vakasının açıklanmasında yararlanılan yöntemlerden birisi sıvı damlası yöntemidir. Bu yöntem kütle eksilmesini, çekirdeğin sahip olduğu nükleonları birbirine bağlayan kuvvet ile protonlar arasındaki itme kuvveti (coulomb) arasındaki denge ile açıklar. Çekirdek içerisinde bazı etkilere maruz kalarak etkileşen nötron ve protonlar; bunların kütle toplamı nükleer sıvının damlası olarak varsayılan çekirdeğin kütlesi olarak ele alınabilir, nükleer kuvvetler tarafından bir arada tutulur (Basdevantvd, 2005).

Şekil 2.5 de ifade edildiği üzere nükleon başına bağlanma enerjilerinin, yaklaşık olarak 50'den büyük olan A değerleri için, artan atom kütle numarası ile azaldığı görülmüştür. Bu olay bize hafif olmayan bir çekirdeğin fisyonammaruz kaldığında, daha kararlı bir diziliminin ortaya çıktığı manasını verir. Sonuç olarak hafif olmayan ve kararlı yapıya sahip olmayan çekirdeklerin dışarıdan etki olmadan kendiliğinden fisyon uğraması beklenebilir. Bu tür fisyonlar da vuku bulabilir. Bu olay çok sık meydana gelmez. Fisyonun nükleer reaktörde fayda sağlayacak yoğunlukta ve sıklıkta meydana gelmesi için, çekirdeğe enerji verilmelidir. Bu durum çekirdek içindeki nükleonlar arasında çekme kuvveti olmasından ve sistemin iki parçaya bölünmeye başlayabileceği noktaya kadar çekirdeğin şeklini bozmaya ihtiyaç duymasından kaynaklanmaktadır. Bu enerji kritik fisyon enerjisi olarak adlandırılır (Lamarsh ve Baretta, 2015).

Cirit enerjisi veya uyarılma enerjisi olarak da tabir edilen bu enerjinin çekirdeğe aktarılması ile fisyonun başladığını söyleyebiliriz. Uyarılma enerjisinin çekirdeğe aktarılması yöntemlerden birisi ve en önemlisi nötron soğurulmasıdır (Ocak,2015 c).

$^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  dışındaki çoğu ağır çekirdeğe gelen nötronun bağlanma enerjisi kritik enerji için yeterli değerde değildir. Nötronun fisyonu başlatabilmesi için biraz enerjiye sahip olması gerekir. Çekirdeğe aktarılan bağlanma enerjisi aktivasyon enerjisinden küçük değilse fisyon yapılır ve kütle numarasına göre hafif veya ağır olmayan ağırlıkta iki çekirdek, bağlanma enerjisine göre de iki ve üzerinde sayıda nötron açığa çıkar (Korkmaz,2009).Fisyon neticesinde yayımlanan nötronların yüzde yüze yakın bir kısmı fisyonun ortaya çıktığı anda yayımlanır. Bu nötronlar ani nötronlar olarak adı konur. Fisyon adedince yayımlanan birden oluşmuş ve gecikmiş nötronların ortalama sayısı, gelen nötron enerjisi artış gösterdikçe yavaşça artış gösterir. Fisyon neticesinde oluşan enerji; fisyonmamullerinin sahip oldukları enerjidir ve bu enerjinin tamamı ısıdır. Fisyon olmayı oluştuktan sonra oluşan gecikmiş nötronların ve fisyon anında oluşan ani nötronların enerjileri ile  $\gamma$  ışınlarının enerjileri nükleer sistemden

kaçmadıkları için geri kazanılır. Filyon nötronların çoğunluğu reaktörü ortamda bırakıp gitmediklerinden dolayı filyon yapabilme yeteneğine sahip bir çekirdek tarafından soğurularak başka bir filyon tepkime başlar. Ortamda filyon neticesinde kalan nötron filyon dışı bir tepkime ile Uranyum veya Pu izotopları ile beraber soğurulmasıyla her soğurmada  $\gamma$  radyasyonu üretilir. Tüm bu  $\gamma$  enerjisi yeniden elde edilebilir. Filyon adedince yeniden elde edilen enerji 200 MeV olur (Keleş, 2003).



Şekil 2.6. Nükleer Filyon

### 2.3. Filyon Zinciri

$^{235}\text{U}$  filyon icra edebilme özelliğine sahiptir lakin çekirdekler hızlı olamayan yani 1 eV'tan daha düşük enerjili nötronlarla bombardımana tabi tutulursa filyon icra etmeye meyilli hale gelir (Demirkol, 2005). Klasik filyon reaksiyonlarında filyonmamulü çifti kripton ve baryum atomlarından teşekkül eder. (Tykva ve Sabol, 1995).

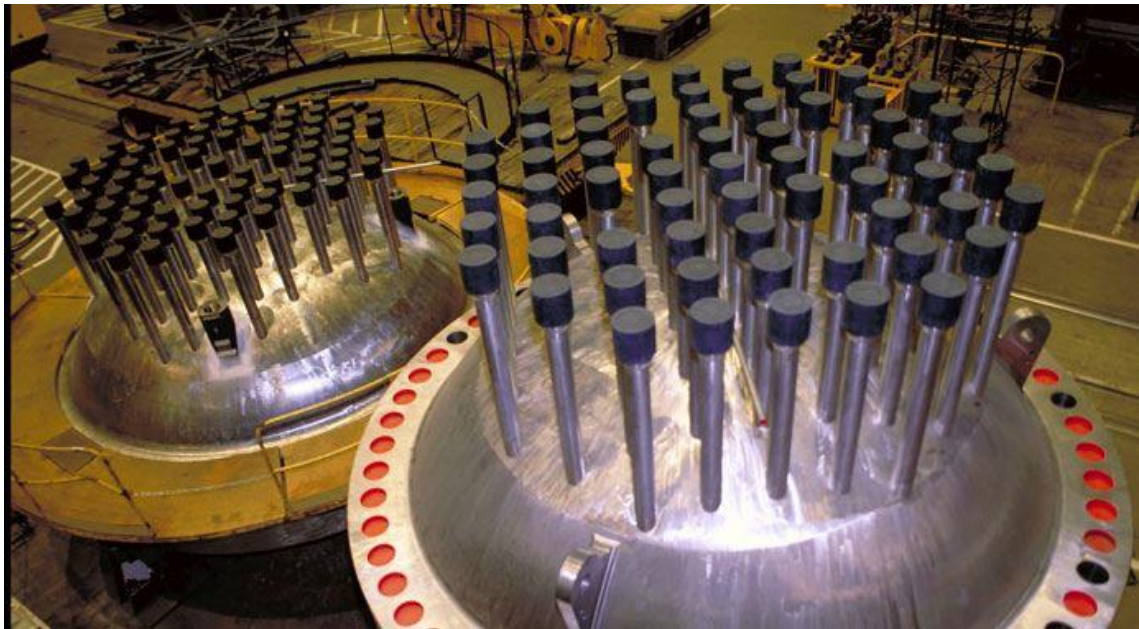
Bir filyonreaksiyonunda meydana getirilen nötronların hepsi başka filyonvakalarını aktif etmek maksadıyla kullanılabilirler bu durumdarahat bırakılan daha çok nötron daha çok filyonvakasının sebebidir ve bu durumun bu şekilde sürmesiyle filyon zinciri oluşur. Ancak bir filyontepkimesinde ortaya çıkan nötronların

enerjileri (1 MeV) veya hızları ( $\sim 107$  m/s)  $^{235}\text{U}$ 'un daha çok fisyonuna nedenolusturmak sebebiyle çok yüksektir. Bundan dolayı; bu nötronlar özellikle termal enerjilere (1 eV'un çok daha aşağısına) yavaşlatılmak zorundadır (Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, 2019).

$^{235}\text{U}$ 'dan tahminen on kat daha fazla “ **nötron yakalama tesir kesitine** ” sahip atom çekirdekleri örnek verilecek olursak kadmiyum ve bor, modeldeki nötron akısını hafifletecek bazı gereçlere gereksinim vardır. Bu gereçlerden üretilen çubuklar, zincir reaksiyonu tavsatmak ve tevkif etmek amacıyla nükleer reaktöre sokulur; çubuklar tekrar çıkarılarak zincir reaksiyon tekrar startlanır ve süratlendirilir (Demirkol, 2017).

Bazı nötronlar  $^{235}\text{U}$  eliyle emilerek fisyon reaksiyon oluşturmaz. Bazı durumlarda nötronlar “**leakage**” gerçekleştirebilir. Yani reaksiyon ortamında hiçbir madde çekirdeğiyle etkileşime girmeyerek ortamı bırakabilirler.

Bor, gümüş vb. nötron yutucugereçlerden üretilen kontrol çubukları (Şekil 2,7 nükleer reaktöre ait bir kontrol çubuğu örneğiverilmiştir.) ihtiyaç halindenötronsayısını azaltarak fisyonutavsatmak ya da reaktördeki güç dengesini kritiklik olarak istenilen durum ve düzeyde tutmak amacıyla kullanılır (TAEK, 2019).



Şekil 2.7. Kontrol Çubukları

## 2.4.Fisyon Kritikliği

Nükleer enerjinin meydana gelmesi fisyon zinciri ile olur. Fisyon sonucu yayımlanan nötronlar hafif enerjiye sahip fisil nötronlarla veya belli bir uyarılma enerjisine sahip nötronlarla fisyon yapmaya devam eder ve oluşan bu fisyon zinciri çoğaltma faktörü ile ifade edilir ( Sarıgöl, 2018). Bu değer fisyon nötronların sayısının bir önceki fisyon nötronların sayısına oranıdır ve nicel olarak  $k$  ile formüle edilir. Fisyon tepkime; kontrol altına alınabilmesi için kritiklik şartının yerine getirilmesine bağlıdır.

“ $k$ ” değerinin 1’in altına düştüğü kondisyonlar kritiklik-altı olarak adlandırılır, fisyonların adedi zamanla azalır. “ $k$ ” değerinin 1’in üzerinde olduğu kondisyondafisyonların adedi bir sonraki fisyonda artış göstererek devam eder ve meydana çıkan enerji süre geçtikçe artar ve bu fisyon zinciri süper-kritik olarak ifade edilir. “ $k$ ” değerinin 1 olduğu kondisyon sistemin kritikliğinin sağlandığı ve istenilen haldir.

## 2.5.Nükleer Reaktör Çeşitleri

Kritiklik şartının yerine getirilmesi demek fisyon zincir reaksiyonun kontrol edilmesi demektir ve bu durumun bu şekilde sürdürülmesi üzerine tasarılan sistemler nükleer reaktör olarak isimlendirilir (Dayday, 2011).

Nükleer reaktörler yakıtmodaratörler veya diğer adı ile termal veya hızlı reaktörler olarak nötron enerji durumuna göre çeşitlendirilebilir. Lakin nükleer reaktör için en uygun çeşitlendirme soğutucu temel alınarak yapılan çeşitleme daha uygun olacaktır, sebebi ise yaygın görüşün nükleer reaktörlerde en önemli kritiğin soğutucu olduğu yönündedir.

### 2.5.1.Hafif su reaktörü

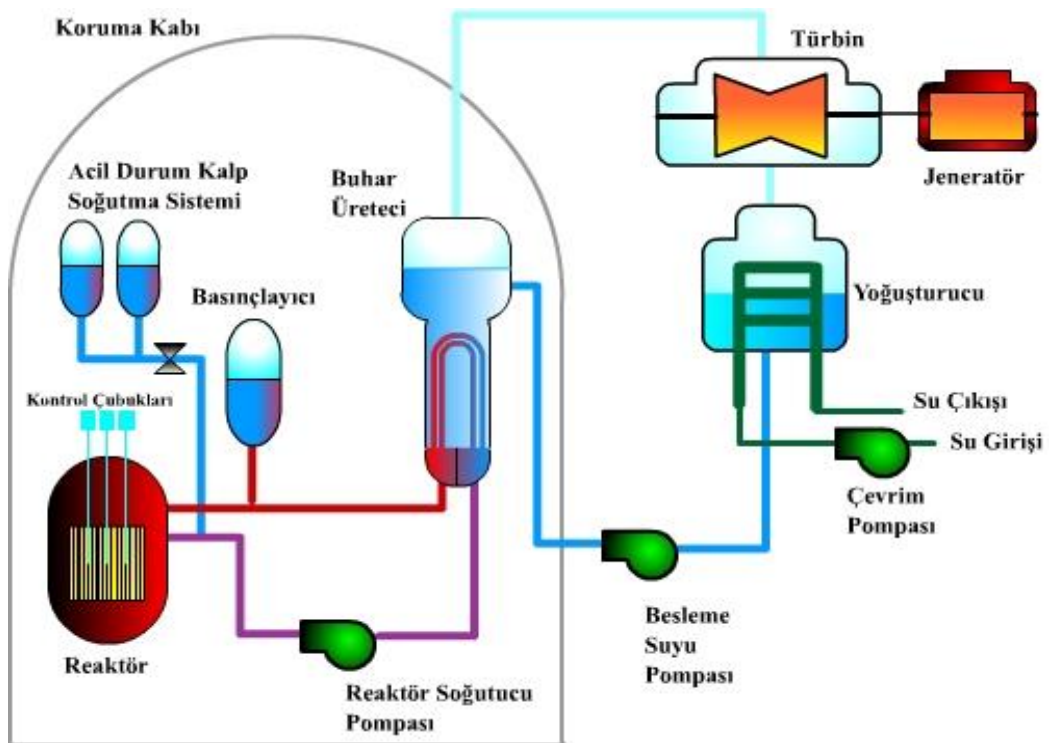
Hafif su ilk olarak reaktör çekirdeğinde, reaktör yakıtlarından ısıyı emerek, basınçlandırma birimiyle basınç değerini yükseltir, bu durum ilk döngüdür. Daha sonraki döngü de; enerjisi yüksek seyyal buhar üretici, vazifesini yerine getiren ısı dönüştürücüsüyle su buhar haline getirilir, üretilen buharla türbin-jeneratör düzeneği kullanılarak elektrik elde edilir (Tahsin, 1963). En son ki döngüde ise; türbine enerjisini ileten seyyal buhar-su karışımı formuna dönüşür. Bu formda soğutma kuleleri ya da öteki bir yoğuşturucuyla soğutulularak büsbütün sıvı formuna dönüştürülerek sisteme yeniden katılır.

$H_2O$  mükemmel bir yavaşlatıcıdır. Maliyetinin pahalı olmaması, ulaşılabilirliği zor olmadığı için elektrik üretiminde en çok tercih edilen reaktör çeşididir. Tesiste kullanılacak olan  $H_2O$  buharı yüksek basınç altında meydana getirildiği için, bu reaktör yüksek basınç altında işlem görür. Bu reaktörler LWR (LightWaterReactor) olarak isimlendirilir (Benedict vd., 1981;Eral, 2011).

İki adet hafif-su reaktör çeşitlemesi mevcuttur. Basınçlı su reaktörü PWR (Pressize WaterReactor) ve kaynar su reaktörü BWR (BoilingWaterReactor). Bu iki çeşitleme ile dünya genelinde oldukça ucuz maliyet ile enerji üretilmektedir (Yıldırım, 2018).

### 2.5.2.Basınçlı su reaktörü

Bu reaktör tiplerinde soğutucu ve yavaşlatıcı olarak kullanılan su, reaktör içerisinde kaynamadığından dolayı, gerekli olan buhar reaktör dışarısından karşılanır. Şekil 2,8’da ifade edildiği üzere; basınç değeri yüksek olan pompalar ile su ilk sistemde dolaştırılır ve ısı dönüştürücüler ile ikinci sisteme transferi sağlanır. Elde edilen buhar sistemde elektrik enerjisi üretilmesi amacıyla jeneratör türbinine gönderilir.



Şekil 2.8.PWR çalışma diyagramı

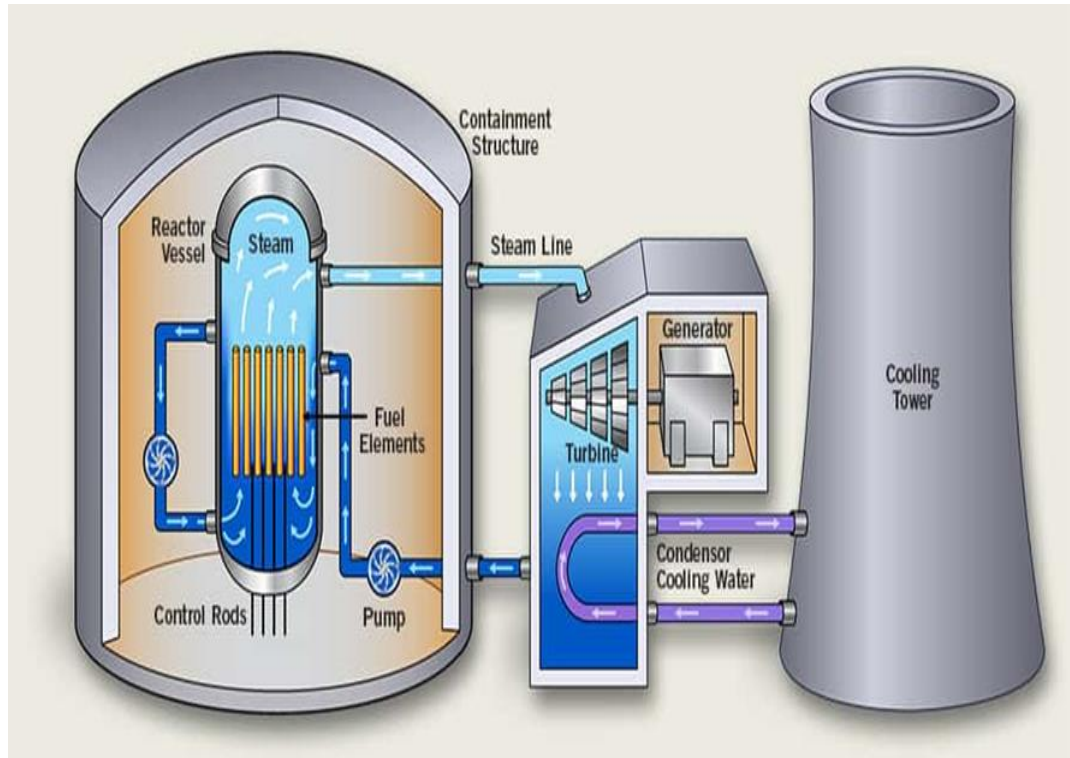
$^{235}\text{U}$  %2,5 ile %3,5 oranıyla zenginleştirilmeye tabi tutulan ve sonucunda elde edilen yakıtın, moderatör ve yavaşlatıcı tercihinin hafif su olduğu ve dünya genelinde en çok tercih edilen reaktör çeşididir (Angelo, 2004).

### 2.5.3. Kaynar su reaktörü

Kaynar su reaktörü (BoilingWaterReactor, BWR) çeşitli Avrupa ülkeleri, ABD, Japonya olmak üzere dünyada en çok tercih edilen reaktör çeşitlerindedir. (Yüksel, 2010).

Bu reaktör tiplerinin şekil 2.9'da gösterildiği üzere;PWR'lerden farklı olarak ikincil soğutma devresinin bulunmaması ve suyun daha düşük sıcaklık altında kaynamasıdır.

BWR'ler de, PWR'ler de olduğu gibi yakıt durumunda zenginleştirilmiş uranyum tercih edilmiştir. BWR ler dünyadaki öteki dizaynlar arasında PWR'lerden sonra en çok rağbet gören reaktör çeşitleridir (Associations, 2017). Daha düşük basınç altında kaynatılan su sonucunda elde edilen buhar, sistemde elektrik enerjisi elde edilmesi amacıyla PWR'lerde olduğu gibi jeneratör türbinine gönderilir.



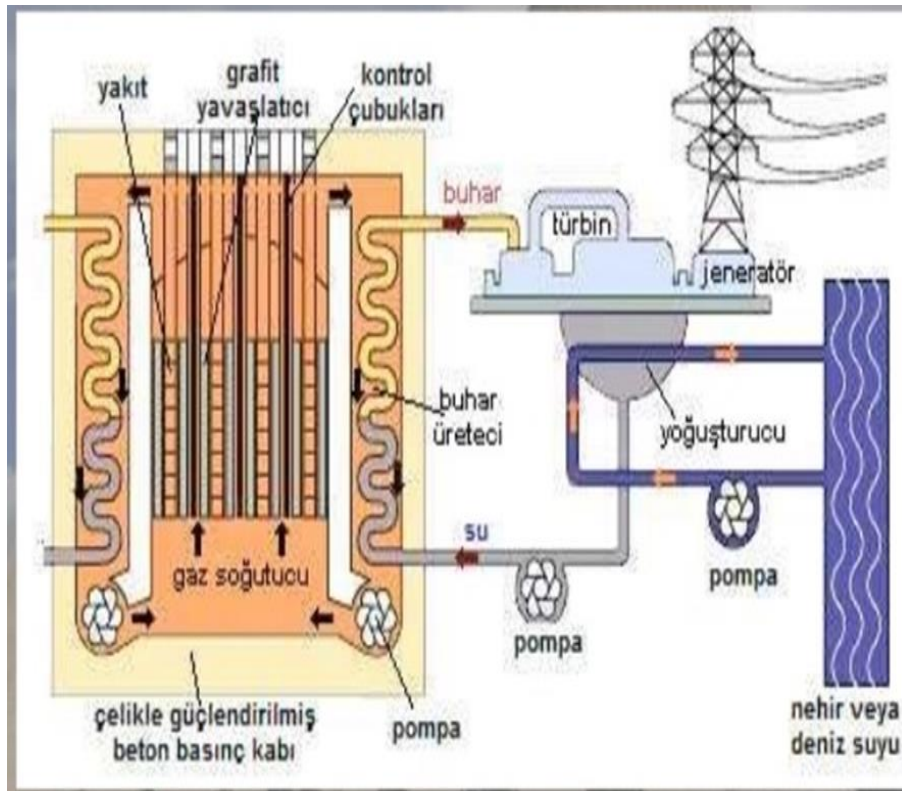
Şekil 2.9. Kaynar Su Reaktörü

#### 2.5.4. Gaz soğutmalı reaktörler

ABD’de, 2.Dünya Harbi’nin ardından militarist hedeflerle  $^{238}\text{U}$ ’un  $^{239}\text{Pu}$  dönüştürülmesini sağlamak üzere, naturel uranyum kullanan grafit yavaşlatıcı, reaktör üretilmiştir (Lamarsh ve Baratta, 2013).

Bu sistemlerde soğutucu olarak karbondioksit, moderatör olarak grafit tercih edilmiştir. İki çeşit olarak tasarlanan gaz soğutmalı reaktörler, AGR ( Advanced GasReactor ) yakıt olarak zengin hale getirilmiş Uranyum, MAGNOX tiplerinde ise natürel uranyum kullanılır. Şekil 2.10’da gaz soğutmalı reaktöre ait blok diyagramı verilmiştir.

AGR’ler, İngiltere’de faaliyet gösteren, yavaşlatıcı tercihi grafit ve moderatör tercihi ise karbondioksit olan “II. Nesil” gaz soğutmalı reaktör çeşitlerindedir. AGR, metal formunda natürel uranyumun tercih seçildiği MAGNOX reaktöründen revize edilmiştir (Stacey, 2007).



Şekil 2.10. Gaz soğutmalı reaktör blok diyagramı

Soğutucusununun pahalı olmaması, farklı yakıt dönüşümlerine kolaylığı (Th, Pu), yüksek verim gibi nedenler gaz soğutmalı reaktörlerin avantajları arasında sayabiliriz (Öngü, 2014).

### 2.5.5.Üretken Reaktörler

Bu reaktör çeşitleri; hızlı reaktör olarak da etiketlendirilebilir. FBR (FastBreederReactor) tip reaktörler Fransa, Rusya, Japonya vb. devletlerde faaliyet göstermektedir.

FBR çeşitlerinin BWR, PWR, VVER gibi reaktör çeşitlerinden farklı olarak termal nötronlarca yerine getirilen reaksiyonlara alternatif; hızlı reaktör olarak tasarlanarak kinetik enerjili nötronları kullanmak üzerinedir. Hızlı reaktörler yerine getirilen her fisyon adına termal reaktörden daha çok nötron oluşturur. Meydana çıkan nötronlardan  $^{238}\text{U}$  ve  $^{239}\text{Th}$ ;  $^{239}\text{Pu}$  ve  $^{235}\text{U}$  dönüşümleri sebebiyle faydalanılır. Üretilen yeni bölünebilir maddelerden reaktörde yakıt olarak faydalanılır.

FNR, natürel uranyumdan öteki reaktörlere kıyasla 60 kat daha fazla enerjiye sahip olmak sebebiyle üretilmiştir, öte taraftan, yakıt zenginleştirme işlemi ucuz olamayan bir işlem olmasından ötürü, bu reaktörlerin inşa etme ve idame ettirme durumu ekonomik olarak pahalıdır (Associations, 2019-b).



Şekil 2.11. FBR tipi reaktör prototipi

### 2.5.6.Küçük modüler reaktörler (SMR)

SMR'ler, tesislerde imal edilebilir yapıda ve nükleer tesisalanına devisa olamayan kara yük taşıtları ya da trenle nakledilebilir özellikte modüler teknoloji ile planlanmış ve dizayn edilmiş, 300MW(e) kapasite erişimi ile elektrik üretebilen nükleer reaktör şeklinde tanımlanmaktadır (IEAE, 2014).

SMR'ler için tahmin edilen faaliyete geçme zamanı olarak 2025 yılından sonraki zamanlar öngörülmektedir. Rusya'da ki şekil 2.12'de simülasyonu gösterilen KLT-40S adlı SMR geliştirme sürecinde olan örneklerindedir (Agency, 2016).



Şekil 2.12. KLT-40S SMR tipi reaktör

### 2.5.7.Rus Ekolü Reaktörler

Batı ve ABD'nin yanı sıra SSCB ve tesiri altındaki devletler tarzlarına özel tasarımlar ile reaktör çeşitleri geliştirmiştir. Bunlar; RBMK ve VVER tipleridir (TBMMOB Fizik Mühendisleri Odası, 2011-a).

#### 2.5.7.1. RBMK

İsmi Rusçadan almıştır ve “büyük güçlü kaynama reaktörü” anlamında kullanılmaktadır.

Moderatör tercihi su, yavaşlatıcı tercihi grafiten yana planlanıp imal edilmiştir. Yavaşlatıcının grafit seçilmesinden ötürü BWR çeşidi reaktörden çok daha büyüktür (Başoğlu, 2017).

RBMK,Ukrayna, Litvanya, Rusya gibi ülkelerde azımsanmayacak sayıda imal olunmuş reaktör çeşididir. 1986 tarihindeki Çernobil faciasının vuku bulduğu reaktör çeşidi RBMK'dır (Çetiner, 2019). Şekil 2.13'de RBMK reaktör tipine sahip nükleer tesis örneği verilmiştir. Bu yüzden bazı güvensizlikler bu reaktör çeşidi ile alakalı dimağlarda soru işareti bırakmaktadır.



Şekil 2.13.Çernobil Faciasının meydana geldiği RBMK tipi reaktör santrali

### 2.5.7.2.VVER reaktörleri

VVER Rusçada “ **voda-vodyani energetichesky reaktör** ” kelimelerinin baş harflerinin kısaltmasıdır. Mana olarak su ile soğutan ve su ile yavaşlatandır.

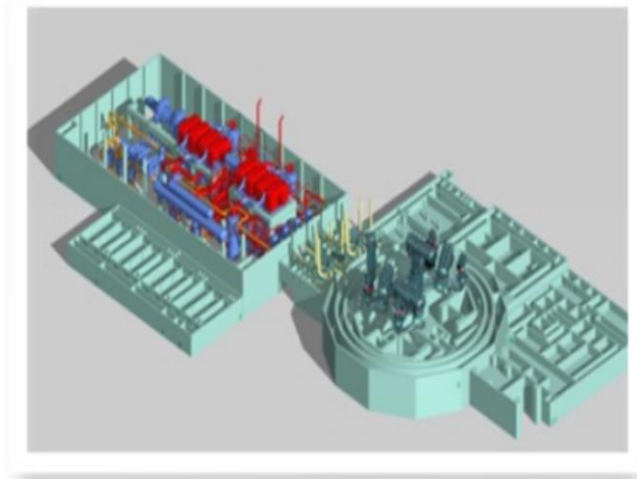
VVER reaktörlerinde moderatör ve yavaşlatıcılarda su tercih edilmiştir.Elektrik üretmek maksadıyla kurulmuş tesislerdir. (TBMMOB Fizik Mühendisleri Odası, 2011-b).

VVER günümüze kadar gelen süreçte 3 nesil olarak üretilmiştir. 1.nesil VVER'ler güvenlik, soğutma, yangın gibi eksiklerinin olması sebebiyle 1990'lı tarihlerin başında kapatılmaya başlanmış ve sonuncusu “**2006 yılında**” Bulgaristan'da

faaliyeti sonlandırılmıştır. 2.nesil VVER'ler de 1.nesil VVER'ler de ki güvensizlik kriteri baz belirlenerek tasarlanmıştır. Almanya'da bulunan 2.nesil VVER'ler kapatılmış. Finlandiya'da konumlandırılmış bu reaktör tiplerinin ise güvenlik kriterleri geliştirilmiştir.

3.nesil VVER'ler VVER-1000'in bunların geliştirilen sistemleri VVER-91 ve VVER-92 olarak adlandırılmıştır. VVER-91'ler Finlandiya ve SSCB ile tasarlanmış, VVER-92'ler güvenlik sistemleri sadeleştirilmiş batılı ülkelerin işbirliği ile tasarlanmıştır.

Akkuyulanına inşasına karar kılınan 4 tane nükleer reaktör, VVER-1200 çeşidi Şekil 2.14'de simülasyonu örneklendirilmiş yeni kuşak nükleer reaktördür (Nükleer Enerji Proje Uygulama Dairesi Başkanlığı, 2018).



**Şekil 2.14.** VVER -1200 tasarımı nükleer reaktör simülasyonu

VVER-1200 reaktör misalleri ilk kez Rusya Federasyonu'nda 2008 senesinde üretilmiştir.

Türkiye Cumhuriyeti ile Rusya Federasyonu Hükümetleri arasında "12 Mayıs 2010 tarihinde imzalanan *Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti ile Rusya Federasyonu Hükümeti arasında Türkiye Cumhuriyetinde Akkuyu Sahasında Bir Nükleer Güç Santralinin Tesisine ve İşletimine Dair İşbirliğine İlişkin Anlaşma (Hükümetler Arası Anlaşma)* ile Akkuyu sahasında 4 ünite 1200 MWe VVER-1200 tipi nükleer santral kurulmasını öngörmektedir." (Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, 2018).



**Şekil 2.15** NGS yapılacak olan Akkuyu Çalışma Sahası

### 3.İKİ GRUPLU DİFÜZYON HESAPLAMASI

#### 3.12 gruplu difüzyon teorisi ve çözümü

$R$  yarıçapına sahip küresel geometriye sahip bir nükleer reaktör çekirdeğindeki nötron akısı  $\phi = nu$  ile ifade edilebilir. Burada  $n$  nötron yoğunluğu  $u$  ise nötron hızıdır. Reaktörün çekirdeğinin içinde nötronlar

$$J_r = -D \frac{d\phi}{dr} \quad (1)$$

şeklinde verilen Fick kanununa uygun şekilde difüzyona yani yayılmaya tabidirler. Burada  $D$  difüzyon katsayısıdır. Fick kanununu süreklilik denkleminde yerine yazarsak denge denklemlerine ulaşırız. Bu çalışmada nötronları termal ve hızlı nötronlar olarak 2 gruba ayıracağız. Termal nötronlar enerjileri 0.25 eV civarında olan nötronlara karşılık gelirken, bunun üzerinde enerjiye sahip tüm nötronları hızlı nötronlar olarak kategorize edeceğiz. Hızlı grup için denge denklemi

$$D_1 \nabla^2 \phi_1 - \Sigma_{1s} \phi_1 - \Sigma_{1a} \phi_1 + \lambda \Sigma_{1f} \phi_1 + \nu \Sigma_{2f} \phi_2 = 0 \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. Buradaki terimler sırasıyla kaçak, saçılma yoluyla alt gruba indirgeme, emilme, hızlı fisyon ve termal fizyona karşılık gelir.  $\phi_1$  hızlı nötron akısı,  $\phi_2$  ise termal nötron akısını temsil ederken  $\lambda$  fisyon reaksiyonu başına oluşan nötron sayısını göstermektedir.  $\Sigma$  değerleri ise bu süreçler için makroskopik kesit alanlardır. Termal nötronlar için denge denklemi ise

$$D_2 \nabla^2 \phi_2 - \Sigma_{2a} \phi_2 + \Sigma_{1s} \phi_1 = 0 \quad (3)$$

olaraktan yazılır. Buradaki terimler de yine kaçak, emilme ve hızlı gruptan elastik olmayan çarpışma ile aşağı inen nötronlara karşılık gelmektedir. Burada dikkat çekmek istediğimiz husus, termal grupta fisyon kaynağı olmayıp tek nötron kaynağının hızlı gruptan aşağı inen nötronlar olmasıdır.

$R$  yarıçapına sahip bir nükleer reaktör çekirdeği ve onun etrafını saran  $T$  kalınlığındaki bir yansıtıcı tabakası arasındaki sınırdaki nötron akı ve akımının sürekliliğini sağlayan denklemler (Lewis, 1984 ve Marchuk, 1986)

$$\phi_{1c} = \phi_{1r}$$

$$\phi_{2c} = \phi_{2r}$$

$$-D_{1c}\nabla\phi_{1c} = -D_{1r}\nabla\phi_{1r}$$

$$-D_{2c}\nabla\phi_{2c} = -D_{2r}\nabla\phi_{2r} \quad (4)$$

ile verilir. Burada  $D_{1r,2r}$  hızlı ve termal nötronların çekirdekdeki difüzyon katsayılarını,  $D_{1c,2c}$  ise hızlı ve termal nötronların yansıtıcıdaki difüzyon katsayılarını gösterir. Çekirdekdeki hızlı ve termal nötron akıları ise sırasıyla

$$\phi_{1c} = A \frac{\sin \mu r}{r} + C \frac{\sinh \nu r}{r} = AX + CY$$

$$\phi_{2c} = AS_1 \frac{\sin \mu r}{r} + CS_2 \frac{\sinh \nu r}{r} = AS_1X + CS_2Y \quad (5)$$

denklemleriyle verilir. Bu denklemlerde  $\mu^2$  ve  $\nu^2$  sırasıyla ana bükülme ve alternatif bükülme olarak adlandırılmaktadır ve  $\nu^2 = \mu^2 + b$  ilişkisiyle bağlantılıdır.  $b$  sabiti  $\lambda$  ve kesit alanlara bağlı pozitif bir sayıdır. Dolayısıyla her zaman  $\nu \geq \mu$ .

Yansıtıcıdaki hızlı ve termal nötron akıları ise

$$\phi_{1r} = F \frac{\sinh\left(\frac{R+T-r}{L_{1r}}\right)}{r} = FZ_1$$

$$\phi_{2r} = G \frac{\sinh\left(\frac{R+T-r}{L_{2r}}\right)}{r} + S_3 F \frac{\sinh\left(\frac{R+T-r}{L_{1r}}\right)}{r} = GZ_2 + S_3 FZ_1 \quad (6)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemlerde,  $L_{1r,2r}$  hızlı ve termal nötronların yansıtıcıdaki difüzyon uzunluğudur.  $S_1$ ,  $S_2$  ve  $S_3$  ise eşleşme katsayılarıdır. Bu ifadeleri 1. denklemde yerine koyup matris şeklinde yazarsak

$$\begin{pmatrix} X & Y & -Z_1 & 0 \\ S_1 X & S_2 Y & -S_3 Z_1 & -Z_2 \\ D_{1c} X' & D_{1c} Y' & -D_{1r} Z_1' & 0 \\ D_{2c} S_1 X' & D_{2c} S_2 Y' & -D_{2r} S_3 Z_1' & -D_{2r} Z_2' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ C \\ F \\ G \end{pmatrix} = 0 \quad (7)$$

ile karşı karşıya geliriz. Burada  $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z_1'$ ,  $Z_2'$  birinci türevi temsil etmektedir. Bu, 4 bilinmeyenli ( $A, C, F$  ve  $G$ ) 4 lineer cebirsel denklemdir. Burada sıradan çözüm ( $A=C=F=G=0$ ) haricinde bir çözüm elde etmenin tek yolu

$$\begin{vmatrix} X & Y & -Z_1 & 0 \\ S_1 X & S_2 Y & -S_3 Z_1 & -Z_2 \\ D_{1c} X' & D_{1c} Y' & -D_{1r} Z_1' & 0 \\ D_{2c} S_1 X' & D_{2c} S_2 Y' & -D_{2r} S_3 Z_1' & -D_{2r} Z_2' \end{vmatrix} = 0 \quad (8)$$

şartının sağlanmasıdır. Bu ifadede ilk sütunu  $X$ , ikinciye  $Y$ , üçüncüyü  $Z_1$  ve dördüncüyü  $Z_2$  ile böldükten sonra üçüncü satırı  $D_{1c}$  ve dördüncü satırı  $D_{2c}$  ile bölmek determinantın değerini değiştirmez. Böylece

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ S_1 & S_2 & -S_3 & -1 \\ \alpha & \beta & -\rho_1 \gamma & 0 \\ S_1 \alpha & S_2 \beta & -\rho_2 S_3 \gamma & -\rho_2 \delta \end{vmatrix} = 0 \quad (9)$$

ifadesini elde ederiz. Burada

$$\alpha = \frac{X'}{X}, \quad \beta = \frac{Y'}{Y}, \quad \gamma = \frac{Z_1'}{Z_1}, \quad \delta = \frac{Z_2'}{Z_2}, \quad \rho_1 = \frac{D_{1r}}{D_{1c}} \text{ ve } \rho_2 = \frac{D_{2r}}{D_{2c}} \text{ temsiline}$$

sahiptir.

6. denklemdaki determinanı açıp denklem haline getirirsek

$$\alpha = \frac{\rho_2 \delta C_1 + \rho_1 \gamma C_2 + \beta C_3}{C_1 + C_2 + C_3} \quad (10)$$

eşitliğini elde ederiz. Burada

$$C_1 = S_1(\rho_1 \gamma - \beta)$$

$$C_2 = S_2(\beta - \rho_2 \delta)$$

$$C_3 = S_3 \rho_2 (\delta - \gamma) \quad (11)$$

ile verilir. Ayrıca,  $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'_1$ ,  $Z'_2$  açık bir şekilde

$$X'(r) = \frac{\mu \cos \mu r}{r} - \frac{\sin \mu r}{r^2}$$

$$Y'(r) = \frac{\nu \cosh \nu r}{r} - \frac{\sinh \nu r}{r^2}$$

$$Z'_1(r) = \frac{-\frac{1}{L_{1r}} \cosh \frac{R+T-r}{L_{1r}}}{r} - \frac{\sinh \frac{R+T-r}{L_{1r}}}{r^2}$$

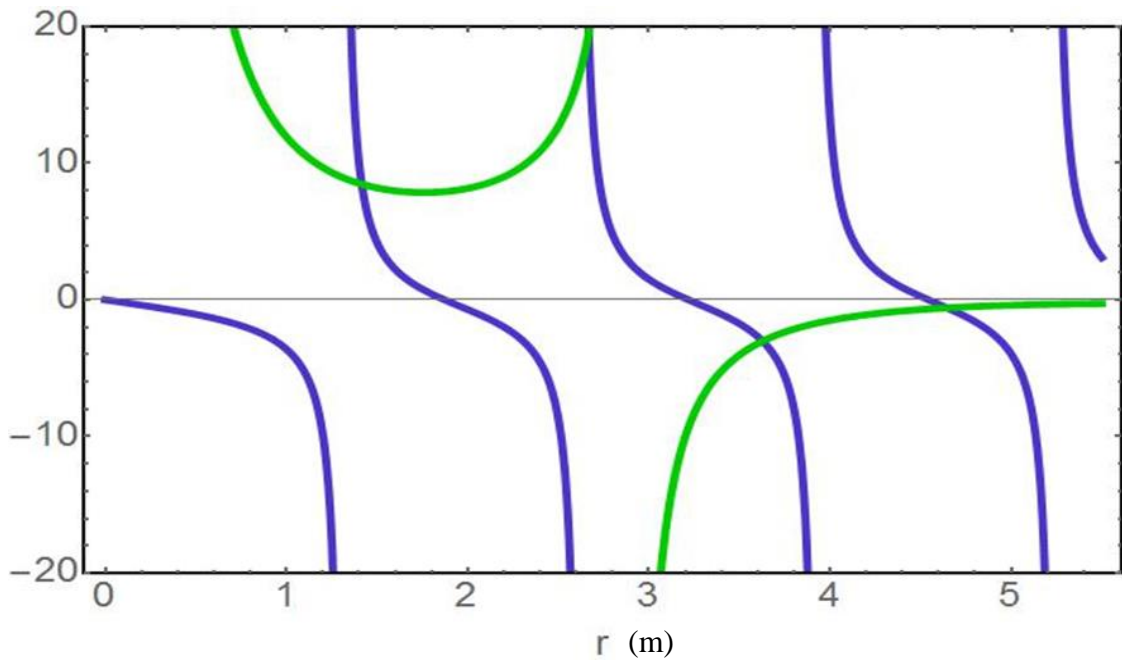
$$Z'_2(r) = \frac{-\frac{1}{L_{2r}} \cosh \frac{R+T-r}{L_{2r}}}{r} - \frac{\sinh \frac{R+T-r}{L_{2r}}}{r^2} \quad (12)$$

olarak yazılabilir. Bizim hesaplamamıza temel teşkil eden denklem 7'dir. Amacımız, verilen bir reaktör kompozisyonu için kritik yarıçap değerlerini tespit etmektir. Bunun için takip ettiğimiz metot 7. denklemin sağ ve sol tarafındaki ifadelerin  $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiğini çizmektir. Reaktör çekirdeğinin içinde kalan değerler bize kritik yarıçapı verecektir.

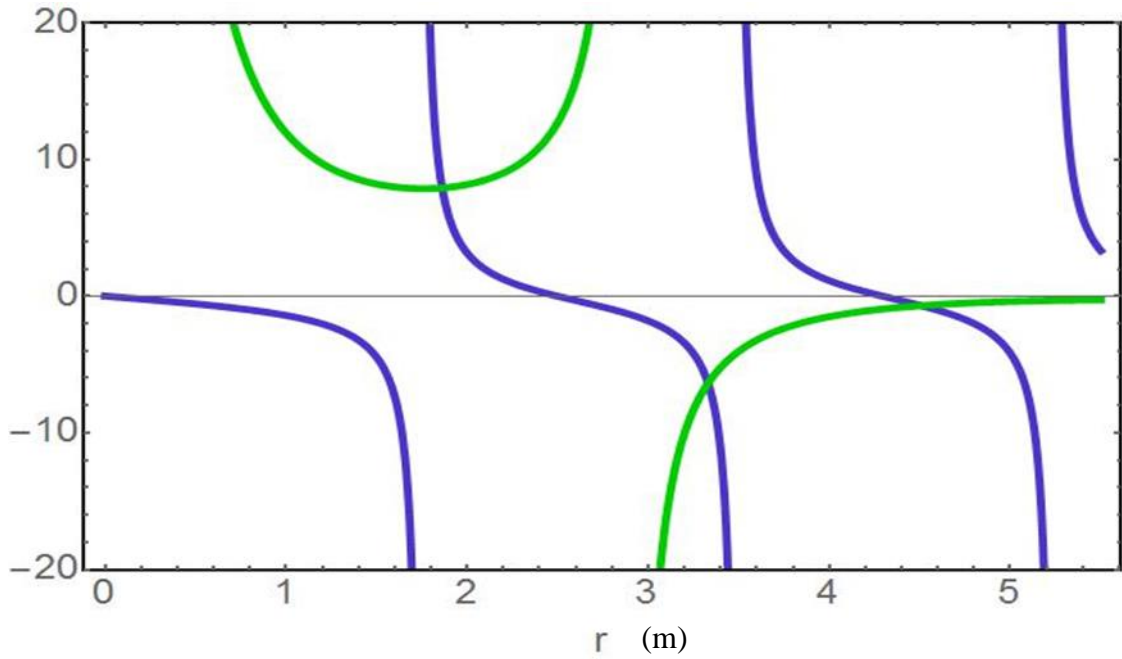
### 3.2. Sonuçlar ve tartışma

Kritik reaktör yarıçapını tespit edebilmek için  $R=5$  m,  $T=0.5$  m olarak ve katsayıları da  $\rho_1=1$ ,  $\rho_2=1$ ,  $S_1=1$ ,  $S_2=2$ ,  $S_3=3$  şeklinde sabitleyerek sayısal hesaplamaları gerçekleştirdik. Sayısal hesaplamalarımız yukarıda detaylı bir şekilde anlatıldığı üzere 7. denklemin sağ ve sol taraflarının  $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiğinin çizilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamaların ilk adımında difüzyon uzunluklarını  $L_{1r}=2$  m ve  $L_{2r}=1$  m alıp,  $\mu$  ve  $\nu$  değerlerini değiştirerek iki eğrinin kesişim noktalarının yani kritik yarıçapların nasıl davrandığını inceledik. Dikkat çekmek istediğimiz bir diğer husus  $\nu^2 = \mu^2 + b$  olduğu için hesaplamalarımızda seçtiğimiz  $\mu$  ve  $\nu$  parametreleri her zaman  $\nu \geq \mu$  şartını sağlamaktadır. Elde ettiğimiz sonuçlar şekil 3.1, şekil 3.2, şekil 3.3., şekil 3.4 ve şekil 3.5'te gösterilmiştir. Bu şekillerin hepsinde y ekseninin birimi  $m^{-1}$ 'dir.

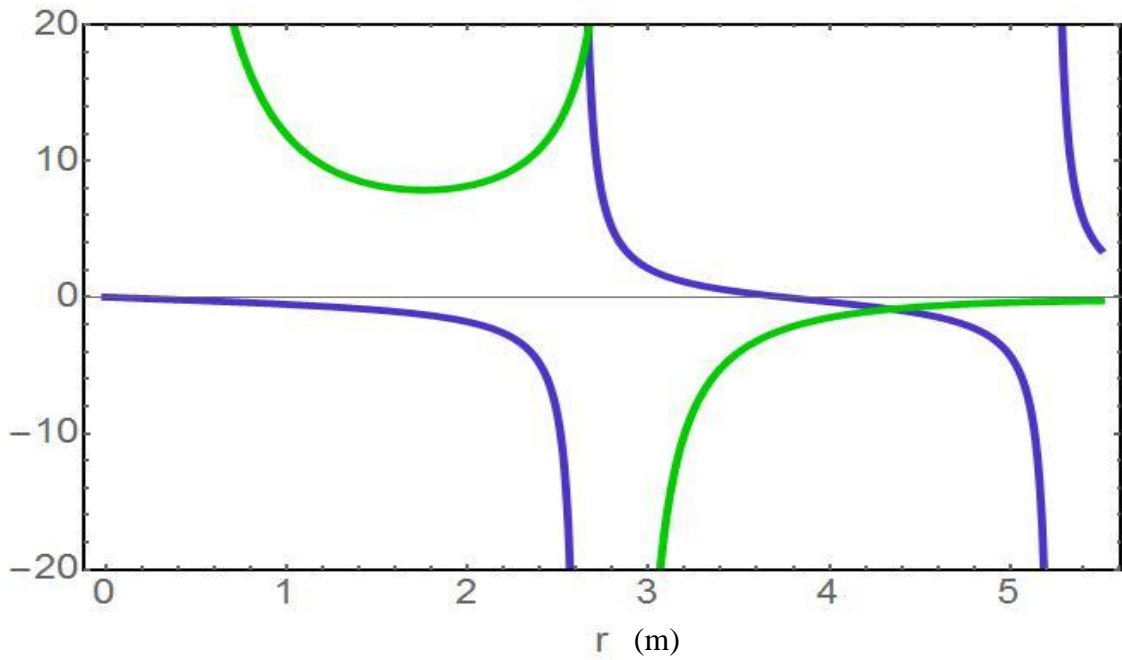
Şekil 1'de reaktörün içinde kritiklik şartını sağlayan 3 yarıçap varken,  $\nu$  sabitken  $\mu$  azaldıkça kritiklik şartını sağlayan yarıçap sayısının giderek azaldığı görülmektedir. Nitekim, şekil 3.2'de kritiklik şartını sağlayan yarıçap sayısı sayısı 3'e, şekil 3.3'de ise 2'ye düşmektedir. Bu hesaplamalar sırasında  $\nu$  sabit tutulmuştur. Öte yandan  $\mu$  sabitken,  $\nu$ 'nün azaltılması kritik yarıçap sayısını etkilemezken, kritik yarıçap değerlerini değiştirmektedir.



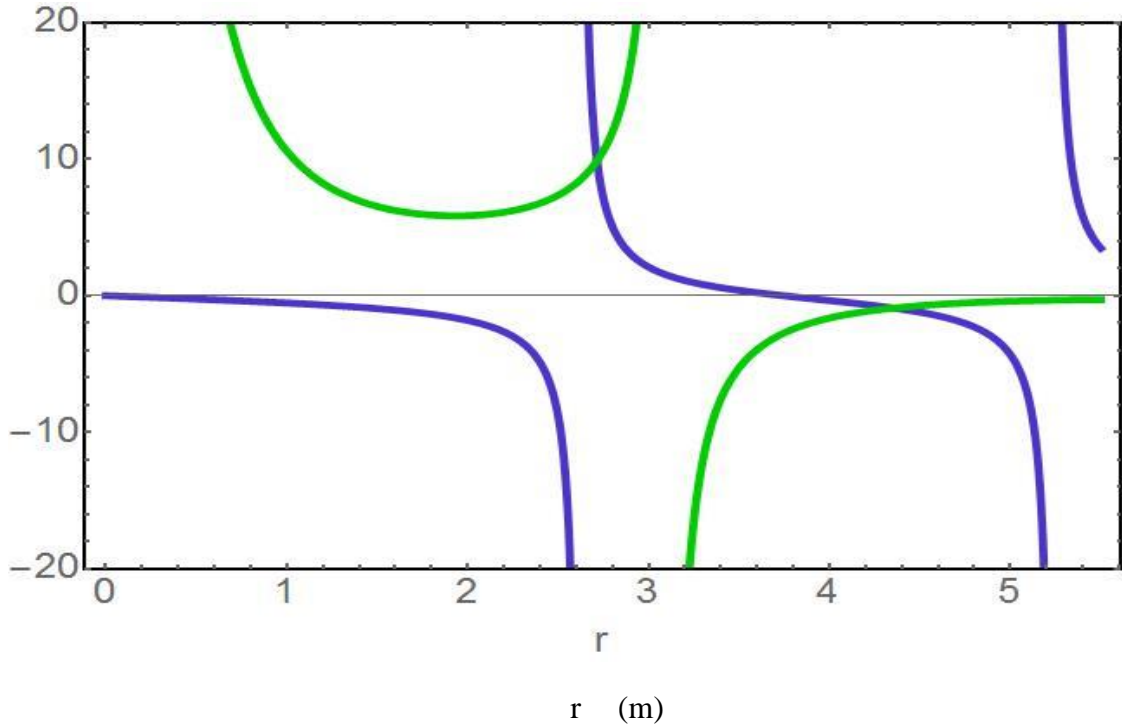
**Şekil 3.1:**  $\mu=2.4$  ve  $\nu=2.4$  için 7. denklemin sağ (yeşil eğri) ve sol taraflarının (mavi eğri)  $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği



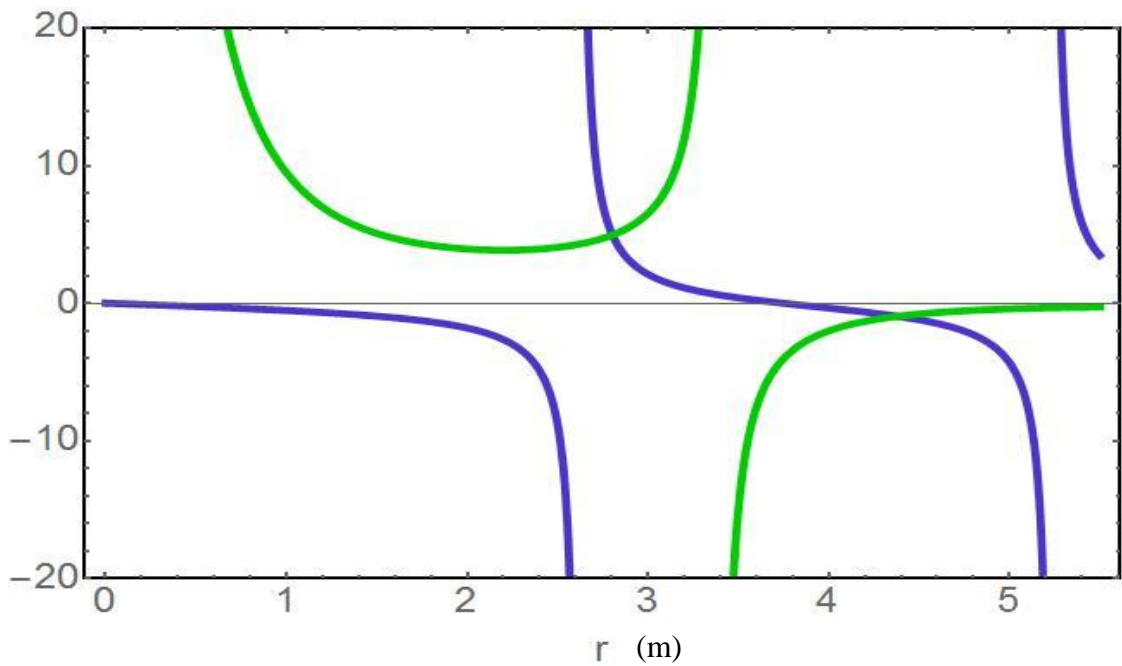
**Şekil 3.2:**  $\mu=1.8$  ve  $\nu=2.4$  için 7. denklemin sağ (yeşil eğri) ve sol taraflarının (mavi eğri) $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği.



**Şekil 3.3:**  $\mu=1.2$  ve  $\nu=2.4$  için 7. denklemin sağ (yeşil eğri) ve sol taraflarının (mavi eğri) $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği



**Şekil 3.4:**  $\mu=1.2$  ve  $\nu=1.8$  için 7. denklemin sağ (yeşil eğri) ve sol taraflarının (mavi eğri) $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği.

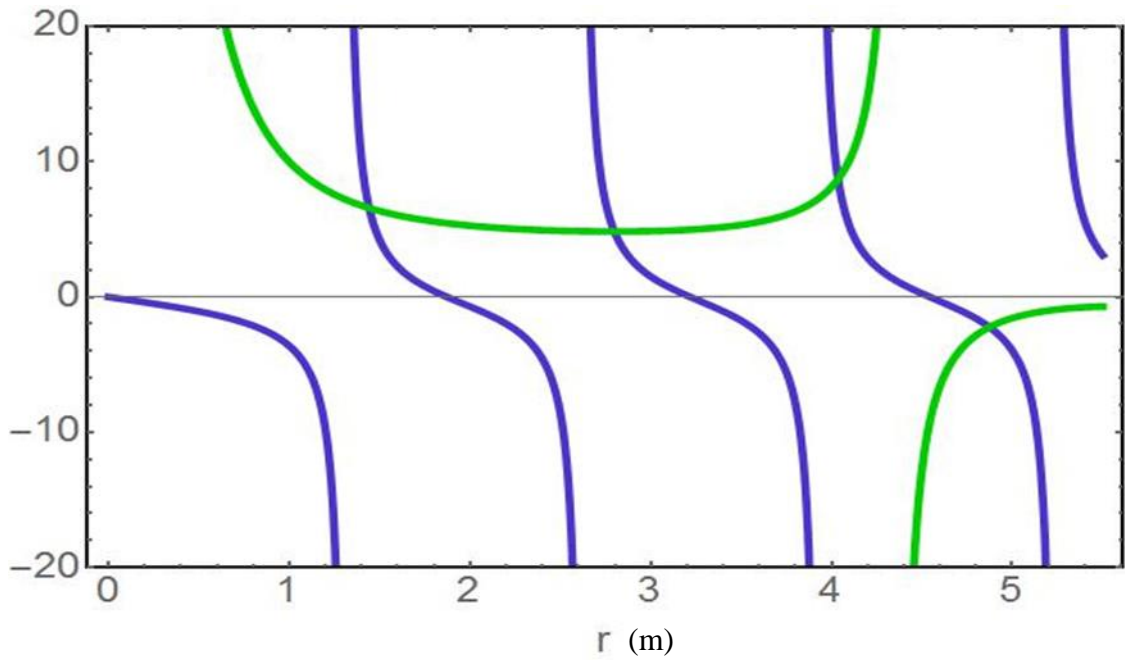


**Şekil 3.5:**  $\mu=1.2$  ve  $\nu=1.2$  için 7. denklemin sağ (yeşil eğri) ve sol taraflarının (mavi eğri) $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği.

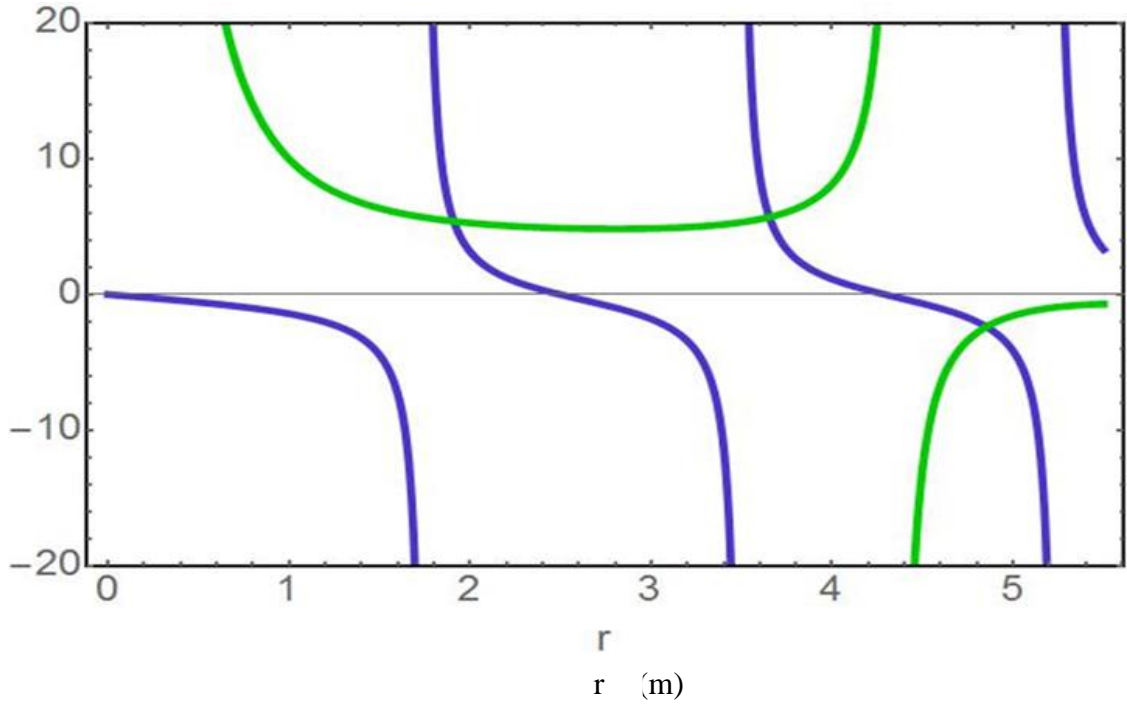
Bu sonuçların genelliğini tespit etmek için hesaplamalarımızı  $L_{1r}=2$  m ve  $L_{2r}=0.5$  m için aynı hesaplamaları tekrarladık. Sonuçlar şekil 3.6, şekil 3.7, şekil 3.8., şekil 3.9

ve şekil 3.10'te gösterilmiştir. Şekil 6'da yine şekil 1'de olduğu gibi reaktör içinde kritiklik şartını sağlayan 4 yarıçap varken,  $\nu$  sabitken  $\mu$  azaldıkça yine kritiklik şartını sağlayan yarıçap sayısı şekil 3.7'de önce 3'e sonra şekil 3.8'de 2'ye düşmektedir. Dolayısıyla genel davranış aynıdır. Son olarak,  $\mu$  sabitken  $\nu$ 'nün azalması daha önce olduğu gibi kritik yarıçap sayısını etkilemezken sadece değerlerini değiştirmektedir. Bu da şekil 3.9 ve şekil 3.10'da görülmektedir. Her iki durumda da kritik yarıçap sayısı değişmeyip 2 olarak kalmıştır. Dikkat çekmek istediğimiz son nokta reaktör çekirdek yarıçapı  $R=5$  m alındığı için bu çalışmada sadece çekirdek içinde kalan matematiksel çözümleri tespit ettik. Reaktör çekirdeği dışında kalan matematiksel çözümler fiziksel olmadığı için göz ardı edilmiştir.

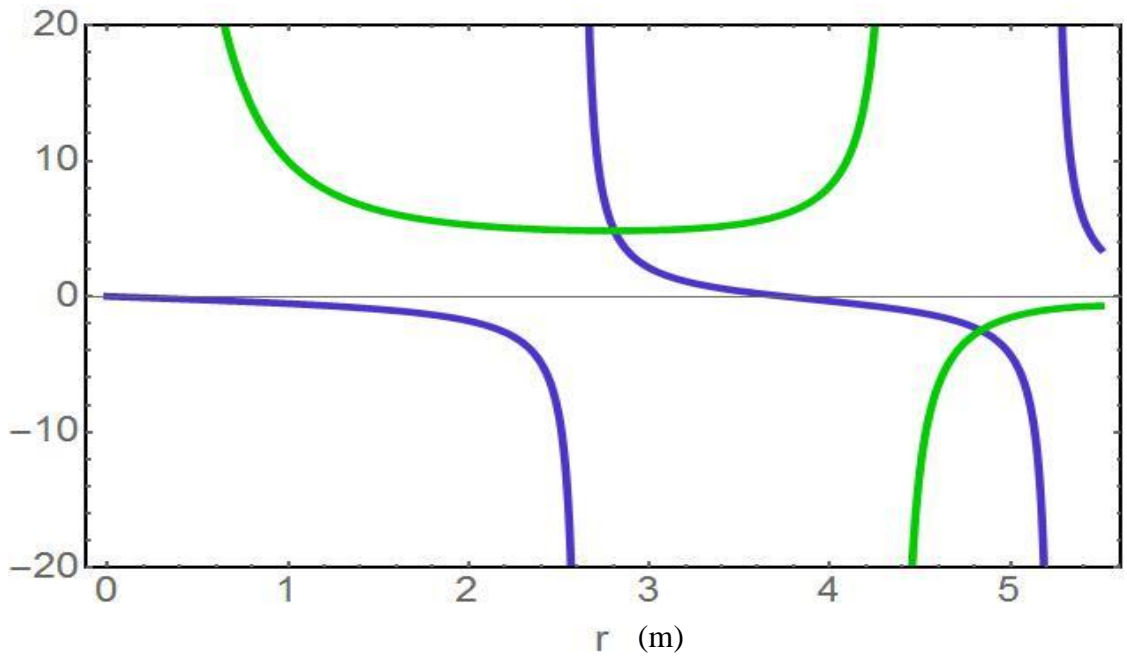
Böylece bu çalışmayla bir nükleer reaktör çekirdeğinde meydana gelen fisyon reaksiyonunun güvenli olarak seyredebilmesi için zaruri olan kritiklik şartını sağlayan yarıçap değerlerini gerçek bir duruma olabildiğince yakın bir model kullanarak tespit ettik. Bu çalışmanın reaktör güvenliği ve tasarımına ışık tutması dileklerimizizi sunuyoruz.



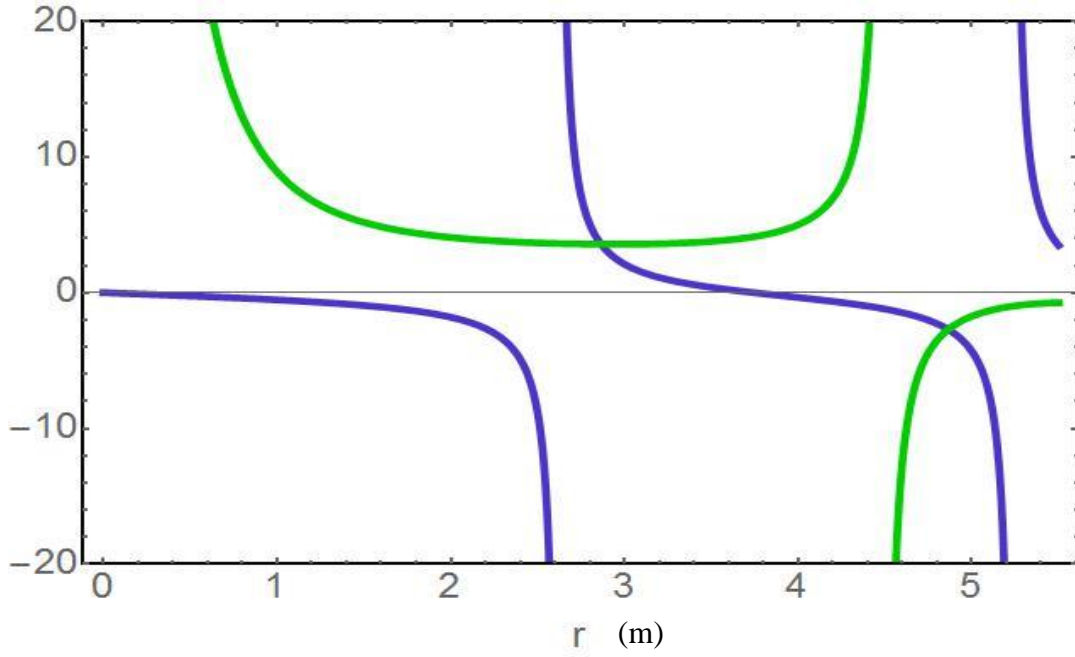
**Şekil 3.6:**  $\mu=2.4$  ve  $\nu=2.4$  için 7. denklemin sağ (yeşil eğri) ve sol (mavi eğri) taraflarının  $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği.



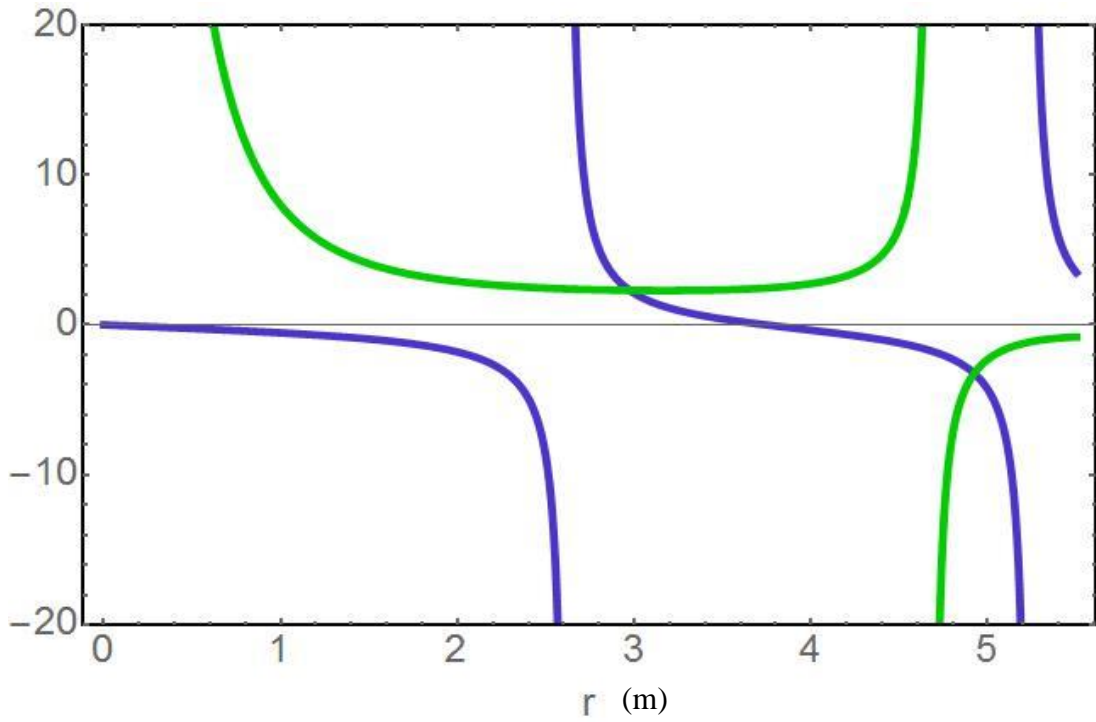
**Şekil 3.7:**  $\mu=1.8$  ve  $\nu=2.4$  için 7. denklemin sağ (yeşil eğri) ve sol (mavi eğri) taraflarının  $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği.



**Şekil 3.8:**  $\mu=1.2$  ve  $\nu=2.4$  için 7. denklemin sağ (yeşil eğri) ve sol taraflarının (mavi eğri)  $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği



**Şekil 3.9:**  $\mu=1.2$  ve  $\nu=1.8$  için 7. denklemin sağ (yeşil eğri) ve sol taraflarının (mavi eğri) $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği.



**Şekil 3.10:**  $\mu=1.2$  ve  $\nu=1.2$  için 7. denklemin sağ (yeşil eğri) ve sol taraflarının (mavi eğri) $r$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği

## KAYNAKLAR

- Aczel, A.D. (2012). *Uranyum Savaşları-Nükleer Çağı Başlatan Bilimsel Rekabet*. Alfa Yayınları, İstanbul,54-70.
- Ağaçbiçer, G. (2010). *Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye Ekonomisine Katkısı ve Yapılan Swot Analizler*. Yüksek Lisans Tezi, **T.C. Çanakkale On sekiz Mart Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İktisat Anabilim Dalı**, Çanakkale.
- Ağçay, M. (2007). *Türkiye'nin Elektrik Enerjisi Arz Talep Dengesinin Tespiti, Üretim Projeksiyonuna Yönelik Rüzgar Elektrik Santrali Tasarımı RES' in Kurulum Maliyetlerinin ve Üretim Parametrelerinin Analizinin Matlab&Simulink İle Yazılan Programda Yapılması*, Bitirme Tezi-EMO Proje Yarışması, **Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü**, İstanbul.
- Akın, S. (2018). **FİZİK 2, MEB Hayat Boyu Öğrenme Genel Müdürlüğü Açıköğretim Daire Başkanlığı**, 23, Ankara.
- Angelo, J.A. (2004). *Nuclear Techonolgy*, Greenwood Pres, 272, 369, 370, 372.
- Anonim, (2014). *Nükleer Reaktör Teknolojileri*. <http://nukleerakademi.org/nukleer-enerji/nukleer-reaktor-teknolojileri/> (09.09.2019)
- Armay, T. (1963). *Atom Enerjisi ve Üretimi, Diğer Enerji Kaynaklarıyla Ekonomik Kıyaslama*, Elektrik Mühendisliği,6,73-74,204-215. (Milli Kütüphane Yer No:1962 SB 29)
- Associations W.N. (2019-a). NuclearPowerReactors, <http://www.worldnuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-powerreactors.aspx>. (12.10.2019)
- Associations W.N. (2019-b). NuclearPowerReactors, <http://www.worldnuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-powerreactors.aspx>. (12.10.2019).
- Associations, W.N.(2017). NuclearPowerReactors. <http://www.worldnuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-powerreactors.aspx>. ar su reaktörü, (13.09.2019)
- Ataman, A. (2007), *Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kaynakları*, Yüksek Lisans Tezi, **Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Kamu Yönetimi ve Siyaset Anabilim Dalı**, Ankara.
- Basdevant J. L.,Rich J. &Spiro M. (2005). *Fundamentals in NuclearPhysicsFromNuclearStructuretoCosmology*, SpringerScience+Business Media, Inc., **United States of America**,214-226
- Başoğlu, B. (2017).*Türkiye'de Termik Santraller*, **TMMOB Makina Mühendisleri Odası**, Ankara,120-122

### KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Benedict, M., Pigford, T., H., Levi, H., W. (1981), *Nuclear Chemical Eng.*, **McGraw-Hill Book Company**, USA; Eral, M. (2011), Nükleer Yakıt Teknolojisi I Ders Notları, İzmir
- Çamdalı, Ü. (2018). *Termodinamik ve Sosyal Sistemlerin Yakın Çevre İlişkilerindeki, Değişim ve Bir Sonuç-Bir Ümit. Ankara Üniversitesi SBF Dergisi* 67(2), 214.
- Çetin, A. (2014). *Ülkemizin Jeotermal Enerji Kapasitesi ve Yapılabilecekler, GÖNDER (Geleceği Önemseyenler Derneği).*
- Çetiner, M.A., (2011). *Chernobyl ve Fukushima Nükleer Reaktör Kazalarının Mukayesesi*, 21. *Yüzyıl dergisi*, 34
- Çomak, H. (2019). *21. Yüzyılda Hidrojen Enerjisi ve Önemi, IV. Ulusal Hidrojen Enerjisi Kongresi ve Sergisi 15-16 Ekim 2019*, Kocaeli, xxxiii
- Daniel Yergin, *The Quest: Energy, Security and the Remaking of the Modern World, The Penguin Press*, New York, s.13, (2001).
- Danish Wind History, (1999). *Danish Wind Turbine Manufacturers Association Wind Power*, Danimarka.
- Dayday N. (2011). *Nükleer Enerji ve Nükleer Santral Kazaları*, TASEM (Türk Asya Stratejik Araştırmalar Merkezi), [https://tasam.org/tr-TR/Icerik/2975/nukleer\\_enerji\\_ve\\_nukleer\\_santral\\_kazalari](https://tasam.org/tr-TR/Icerik/2975/nukleer_enerji_ve_nukleer_santral_kazalari), (12.09.2019).
- DEKTMK (Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi), Hidrolik Yenilenebilir Enerji Çalışma Grubu, (2007). *Hidrolik Enerji Alt Çalışma Grubu Raporu. Ankara*
- Demirkol, İ. (2005). *Hızlandırıcıya Dayalı Yeni Nesil Reaktörler. KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 23.
- Demirkol, İ. (2017). *Toryum ve uranyumun nötron yakalama ve eksitasyon fonksiyonlarının hesaplanması ve deneysel veriler ile kıyası. Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 6(2), 22-2
- Dündar, C. (2018). Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyelleri. **TÜBA-Rüzgâr Enerjisi Teknolojileri Çalıştayı ve Paneli (8 Mart 2018)**, Sunum Dokümanları, 15, Ankara.
- Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, (2019). *Güneş Enerjisi ve Teknolojileri, Ankara*, [http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/g\\_enj\\_tekno.aspx](http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/g_enj_tekno.aspx), (08.08.2019)
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2005). **04.10.2005 tarih ve 25956 sayılı Enerji Kaynak Belgesi Verilmesine İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Yönetmelik, Resmi Gazete, Ankara.** (08.08.2019)
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2017). **Dünya ve Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü, Ankara**

### KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2018). *Biyokütle*, <https://www.enerji.gov.tr/trTR/Sayfalar/Biyokutle>, **Ankara** (06.08.2019)
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2019). *Nükleer Enerji*, <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Nukleer-Enerji>, **Ankara** (10.10.2019).
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2019). *Rüzgar*, <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar>, **Ankara** (05.08.2019)
- Erdoğan H., Gümüş B. , Serhat Berat EFE , Cem KUTLU , Hasan BAYINDIR , Yurdagül BENTEŞEN YAKUT1, Ferhat ÇIRA , Ramazan ASLAN (2009). *Yoğunlaştırıcı Güneş Enerji Santralleri ve Ilısu HES'e Alternatif Olarak Güneydoğu Anadolu Bölgesine Uygulanabilirliği.5.Yenilebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildiri Kitabı*, Emo Yayın, Ankara(2009).
- Erdoğan, P. (1997). *Fotovoltaik Sistemler Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi, **İstanbul**.
- Eskin, M.C. (2018). *Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Çevreye ve Ekonomiye Etkisi.Uzmanlık Tezi*, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Strateji Geliştirme Başkanlığı, **Ankara**.
- Filik, Ü.B., Kurban, M., Aydın, G., Hocaoglu, F. O., (2007), *Eskişehir'deki Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Potansiyel Analizi,IV. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 31 Ekim – 2 Kasım, Gaziantep*.
- Görür, Ş. (2006). *Çevresel Radyoaktivite ile bu çevrede yaşayanlara ait dış örneklerdeki radyoaktivite arasındaki ilişkinin araştırılması*, **Yüksek Lisans Tezi**, Çukurova Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Adana.
- Günevdiren, M. & Öztürk, T. (2003). *Enerji Kaynağı Olarak Hidrojen ve Hidrojen Depolama* [http://www.mmo.org.tr/muhendismakina/arsiv/2003/agustos/makale\\_enerji](http://www.mmo.org.tr/muhendismakina/arsiv/2003/agustos/makale_enerji). Htm (10.08.2019).
- Heier, S. (1998), *Grid Integration of WindEnergy Conversion Systems*, **Wiley, Newyork**.
- Hepbaşı, A. & Çanakçı, C. (2003), *Geot - hermalDistrictHeating Applications in Turkey: A Case Study of İzmir - Balçova*, *Energy Conversion and Management*, 44; 1285-1301.
- HESİAD, (2019). *2019'da HES ile elektrik üretimi*, <http://www.hesiad.org.tr/test/2019/08/hesiad-heslerden-elektrik-uretimi-60-milyar-kwha-ulasti/> , (13.08.2019).

### KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- International Energy Agency (IAEA), (2014). *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*, IAEA, Austria.
- International Energy Agency (IAEA), (2013). *Technology Roadmap: Wind Energy-2013 Edition*,  
[https://www.iaea.org/publications/freepublications/publication/Wind\\_2013\\_Roadmap.pdf](https://www.iaea.org/publications/freepublications/publication/Wind_2013_Roadmap.pdf), (28.09.2016)
- J. R. Lamarsh, A. Baratta J. (2001). *Introduction to Nuclear Engineering*, 3. Baskı, New Jersey: Prentice Hall, 31.
- J. R. Lamarsh, A. Baratta J. (2015). *Introduction to Nuclear Engineering*, 3. Baskı, New Jersey: Prentice Hall, 74-108
- Karamanav, M. (2007). *Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Bilgisayar Eğitim Anabilim Dalı, Sakarya
- Kaya, İ. S. (2012). *Nükleer Enerji Dünyasında Çevre ve İnsan*. Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 2012-1(24)
- Keleş, S. (2003). *Ortalama Enerjisi 5 MeV Olan Bir Nötron Spektrumu Kullanarak  $^{232}\text{Th}$ 'nin Filyon Ürünlerinin Kütle Dağılımının Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Kendirli B.; Çakmak, B. (2009). *Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Sera Etkisinde Kullanımı*, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Ankara.
- Korkmaz, M.E. (2009). *Monte Carlo Yöntemi Kullanılarak Hızlandırıcı Güdümlü Sistemde Bazı Aktinidlerin Dönüşümü ve Enerji Elde Edilmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Kökey, İ. (2018). Türkiye'nin rüzgâr enerjisi teknolojileri, kabiliyetleri ve potansiyelleri ve finansman mekanizmaları bilgi notu. TÜBA Rüzgâr Enerjisi Teknolojileri Çalıştayı (8 Mart 2018), 3, Ankara
- Lewis E.E. ve Miller Jr. W.F. (1984) *Computational methods of neutron transport*, John Wiley & Sons, New York
- Marchuk G. ve Lebedev V. (1986) *Numerical methods in the theory of neutron transport*, Harwood Academic, New York,
- Mertoğlu, O. , Mertoğlu, M. ve Başarır, N. (1994). *Jeotermal Merkezi Isıtma Sistemlerinin Çevreye Müspet Katkısı, Teknolojisi ve Ekonomik Değerlendirmesi*. Jeotermal Uygulamalar Sempozyumu, (27-30 Eylül 1994), Pamukkale Üniversitesi. Denizli.

### KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- N. E. Agency, *Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment*, OECD, France, 2016 ,
- Nükleer Enerji Proje Uygulama Dairesi Başkanlığı. (2018). *Nükleer Santraller ve Ülkemizde Kurulacak Nükleer Santrale İlişkin Bilgiler*.[https://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2FBelge%2FNukleer\\_Santraller\\_ve\\_Ulkemizde\\_Kurulacak\\_Nukleer\\_Santrale\\_Iliskin\\_Bilgiler.pdf](https://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2FBelge%2FNukleer_Santraller_ve_Ulkemizde_Kurulacak_Nukleer_Santrale_Iliskin_Bilgiler.pdf), (14.10.2019)
- Ocak M. E. (2015). **Rydberg Atomları**, <http://www.bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/rydberg-atomlari> , (23.10.2019)
- Ocak M.E. (2019). *Güneş Enerjisinin Kaynağı Nedir?* , <http://www.bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/gunes-enerjisinin-kaynagi-nedir> , (10.09.2019)
- Öngü, S. (2014).*Nükleer Reaktörler, Yakıt Tipleri Ve Mersin Aküyü Nükleer Santrali. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Niğde.*
- Patel, Mukand R. (1999). *Wind and Solar Power System* , CRC Press, New York.
- Polatoğlu, A. (2016). *Türkiye’de Kurulması Planlanan Nükleer Santrallerde Kullanılacak Nükleer Yakıtların ve Atıkların Teknoekonomik Açından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi T.C. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalı, Elazığ.*
- Saraçoğlu, N. (2010). *Küresel iklim Değişimi, Biyoenerji ve Enerji Ormanlığı. Efil Yayınevi, 300, Ankara.*
- Sarıgül, T. (2018). *Nükleer Filyon Reaktörlerinde Neden Uranyum-235 İzotopu Kullanılır?* <http://www.bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/nukleer-filyon-reaktorlerinde-neden-uranyum-235-izotopu-kullanilir>.(10.09.2019)
- Serpen, U. ;Kıvanç Ateş, H. (2019). *Ülkemizde Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulamalarının Güncel Durumu, 14.Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17-20 Nisan 2019, İzmir.*
- Speece, R.E. (1996). *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater*, Arche Press, Tennessee.
- Stacey , W. M. (2010). *An Introduction to the Physics and Technology of Magnetic Confinement Fusion*, John Wiley & Sons, **Almanya.**
- Sütçü, M. & Akkurt, S. (2014). *Alternatif Hammadde Olarak Kağıt Sanayi Üretim Atağı Kullanarak Hafif Refrakter İzolasyon Tuğlası Geliştirilmesi. AKÜ FEMÜBİD 14(2014),505-512.*

### KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- T.C. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, (2016). *Yenilenebilir Enerji Sistemleri Prototip Projeler 2016/6*, **Kütahya**, <http://mf.dpu.edu.tr/index/sayfa/5105/proje-20166> (15.08.2016)
- TAEK, (2019). *Nükleer Enerjinin Temel Prensipleri*, **Ankara**, <http://www.taek.gov.tr/lisans-izin-islemleri/156-radyasyonguvenligi-kapsaminda-lisans-izin-islemleri/belgeler-formlar/func-startdown/436/> , (14.10.2019).
- TBMM, (2005). “*10.05.2005 tarih ve 5346 sayılı yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun* ”, **Resmi Gazete, Ankara**.
- TBMMOB Fizik Mühendisleri Odası(Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği), (2011-a). *Rus Tipi Reaktör Tasarımları: VVER ve RBMK Reaktörleri*.**Nükleer Enerji Raporu 2011, Aralık 2011, Ankara,22**
- TBMMOB Fizik Mühendisleri Odası(Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği), (2011-b). *Rus Tipi Reaktör Tasarımları: VVER ve RBMK Reaktörleri*.**Nükleer Enerji Raporu 2011, Aralık 2011, Ankara,22-23**
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK), (2019). *Atom, Filyon, Füzyon, Zincirleme Tepkime Reaksiyon Nedir?*,[https://www.taek.gov.tr/ogrenci/bolum1\\_02.html](https://www.taek.gov.tr/ogrenci/bolum1_02.html), (13.10.2019).
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, (2018). *Akkuyu Nükleer Santrali Lisanslaması*. <https://www.taek.gov.tr/tr/hizmetlerimiz/nukleer-guvenlik/lisans/akkuyu-nukleer-santrali-lisanslamasi.html>, (10.09.2019).
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, (2019). *Filyon Nedir, Filyondan Elektrik Enerjisi Nasıl Elde Edilir?*<https://www.taek.gov.tr/tr/sik-sorulan-sorular/136-nukleer-enerji-ve-nukleer-reaktorler-sss/932-filyon-nedir-filyondan-elektrik-enerjisi-nasil-elde-edilir.html>, (21.10.2019).
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, (2019). *Zincirleme Reaksiyon Nedir? Nasıl Kontrol Edilir?* , **Ankara**, <https://www.taek.gov.tr/tr/sik-sorulan-sorular/136-nukleer-enerji-ve-nukleer-reaktorler-sss/929-zincirleme-reaksiyon-nedir-nasil-kontrol-edilir.html>, (26.10.2019).
- Türkiye Elektrik İletim A.Ş., (Şubat2019).*Rüzgar Enerji Santrali*, <https://www.teias.gov.tr/> (19.08.2018).
- TÜREB ( Rüzgâr Enerjisi Birliği), (2018). 2018 Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu, <https://www.enerjiekonomisi.com/2018-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu-yayinlandi-ayrintilar-icin-tiklayiniz/5547/>(07.10.2019).
- Tykva, R.,&Sabol, J., (1995). *Low Level Environmental Radioactivity*, Basel Switzerland.

### KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Ültanır M.Ö. (1997). Hidrojenin yakıt olarak kullanımları ve özellikleri, Çevre ve Enerji Kongresi Bildiriler Kitabı s. 295-315.
- Ünalın, S. (2017). *Alternatif Enerji Kaynakları, (Ders Notları), Erciyes Üniversitesi, Kayseri.*
- Varınca, Kamil B.; Gönüllü, M. Talha (2016). *Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Bu Potansiyelin Kullanım Derecesi, Yöntemi ve Yaygınlığı Üzerine Bir Araştırma, I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi 21-23 Haziran 2006*
- Y. A. Hakan ve arkadaşları, (2015). *Nükleer Enerji Nükleer Süreç Kavramlarına, Sistemlerine, ve Uygulamalarına Giriş, Çeviri: NuclearEnergy An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 25-60.*
- Yerebakan, M. (2001), *Rüzgar Enerjisi, İstanbul Ticaret Odası Yayınları, İstanbul (2001).*
- Yıldırım A. (2018). *Basınçlı Su Reaktör Kabının FAVOR Kodu ile Yapısal Analizinin Yapılması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.*
- Yıldız, N. (2016). *Uranyum Toryum. TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara, 12-25.*
- Yüksel, M. (2010). *Nükleer Enerji ve Türkiye, Türk Asya Stratejik Araştırma Merkezi (TASEM), [https://tasam.org/tr-TR/Icerik/1261/nukleer\\_enerji\\_ve\\_turkiye](https://tasam.org/tr-TR/Icerik/1261/nukleer_enerji_ve_turkiye), (15.10.2019).*

## ÖZ GEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : MURAT KOÇAK  
Doğum Yeri ve Tarihi : ALTINDAĞ 08.02.1990

### Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi :KOCAELİÜNİVERSİTESİ  
ELEKTRONİKÖĞRETMENLİĞİ  
Bildiği Yabancı Diller : İNGİLİZCE  
Bilimsel Faaliyetleri : ADIM ADIM FİZİK GÜNLERİ VIII

### İletişim

Adres :İZMİT/KOCAELİ  
E-Posta Adresi : muratkocak06@icloud.com



**Tarih:03/12/2019**