

# NÜKLEER ENERJİ

ATOMDAN ELEKTRİĞE  
SAĞLIKTAN SİLAHA



PMP, Dr. Ahmet EGE



**PMP, Dr. Ahmet EGE:** 1974 yılında Ankara'da dünyaya gelmiş; ilkokul-hazırlık-ortaokul eğitimini Özel Yükseliş Kolejinde, Özel Yüce Fen Lisesinde başladığı lise eğitimini ise Çankaya Lisesinde tamamlamıştır. Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği (İngilizce) Bölümünden 1998 yılında mezun olmuştur. 1999 yılında marka ve patent müşavirliği yapan özel bir firmada teknik çevirmen olarak görev yaptıktan sonra aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Nükleer Enerji Enstitüsünde başladığı yüksek lisans eğitimini 2001 yılında tamamlayarak yüksek mühendis unvanını almıştır. 2000 yılında Boğaziçi Üniversitesinde Sistem ve Kontrol Mühendisliği ile Makine Mühendisliği bölümlerinde yüksek lisansa kabul edilmiş olmakla birlikte makine mühendisliğindeki fark dersleri tamamlayarak buradaki öğrenimine 2001 yılında Hollanda'daki Delft Teknoloji Üniversitesi Fakülteler arası Reaktör Enstitüsüne (TUDELFT-IRI-Interfaculty Reactor Institute) araştırmacı olarak kabul edilmesi nedeniyle son vermiştir. Çakıl yataklı yüksek sıcaklık reaktörlerinin (HTR-High Temperature Pebble Bed Reactor) reaktör fiziği üzerine yaptığı çalışma 2003 yılında enstitü raporu olarak yayınlanmıştır. 2004 yılında Türkiye'ye dönerek Sağlık Bakanlığı ile Dünya Bankası projesinde yerel danışman ve çevirmen olarak görev almış aynı yılın sonunda da EÜAŞ Genel Müdürlüğünde göreve başlamıştır. EÜAŞ'ta Nükleer Santraller Daire Başkanlığının yanında Hidroelektrik Santraller Daire Başkanlığı, Araştırma Planlama Koordinasyon Daire Başkanlığı, Termik Santraller ve Maden Sahaları Daire başkanlıklarında mühendis, başmühendis, proje yöneticisi ve şube müdürü görevlerinde bulunmuştur. Doktora çalışmalarını daha etkin bir biçimde yürütebilmek amacıyla 2010 yılında University of Ontario Institute of Technology (UOIT)'de ziyaretçi araştırmacı statüsünde üç ay süre ile Kanada'da bulunmuştur. 2013 yılında ise Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi bölümünde doktora çalışmalarını tamamlamıştır. Aynı yıl EÜAŞ ile Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA-International Atomic Energy Agency) işbirliğiyle yapılan *Interregional Course on Fundamentals of Nuclear Reactor Technology and Related Fuel Cycles for Policy Makers* çalıştayının kurs direktörlüğünü gerçekleştirmiştir. Merkezi ABD'de bulunan Proje Yönetim Enstitüsünün (PMI-Project Management Institute) Profesyonel Proje Yöneticisi (PMP®-Project Management Professional) sınavını başarıyla geçerek 2016 yılında PMP unvanını almıştır. Ahmet EGE'nin 50'den fazla patent çevirisi, yerli ve yabancı hakemli dergi makaleleri, konferans bildirimleri, yüksek lisans ve doktora tezi dahil yayımlanmış ondan fazla eseri ile bir romanı (2017, Bir Düğün Bir Cenaze) ve bir tiyatro eseri (2019, Türk Aslan Pati) bulunmaktadır. TUDELFT IRI ve EÜAŞ'taki görevi süresince ülkemizdekilere ek olarak; ABD, Fransa, Belçika, Hollanda, Avusturya, İspanya, Güney Kore, Japonya, Çek Cumhuriyeti, Birleşik Arap Emirlikleri'ndeki çok sayıdaki eğitim ve toplantıya katılmış bunların bir kısmında Türkiye'yi temsil etmiştir. Yazar, hali hazırda EÜAŞ'taki görevine ek olarak Atılım Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünde Nükleer Enerji dersini vermekte ve Hukuk Fakültesindeki öğrenimini sürdürmektedir.



# NÜKLEER ENERJİ

Atomdan Elektriğe Sağlıktan Silaha

PMP, Dr. Ahmet Ege

Hece Yayınları: 533

Bilim ve Teknoloji

©Hece Yayınları

Birinci Basım

Şubat 2019

Kapak Tasarımı

[www.sarakusta.com.tr](http://www.sarakusta.com.tr)

Teknik Hazırlık

[www.hece.com.tr](http://www.hece.com.tr)

ISBN: 978-605-7547-19-4

Baskı

[www.dumat.com.tr](http://www.dumat.com.tr)

HECE Basın Yayın Reklamcılık San. Tic. Ltd. Şti.

Konur Sokak No: 39/1-2 Kızılay-Çankaya Ankara Yazışma: P.K. 79 Yenışehir Ankara T: (0

312) 419 69 13 F: (0 312) 419 69 14

e-posta: [hece@hece.com.tr](mailto:hece@hece.com.tr)

Sertifika No: 17672

# İÇİNDEKİLER

<b>Teşekkür</b>	/ 9
<b>Ön Söz</b>	/ 11
<b>Sembol Listesi</b>	/ 13
<b>Kısaltmalar</b>	/ 15
<b>1. Tarihsel Gelişim</b>	/ 19
1.1 Enerji Kullanımının Kısa Tarihçesi	/ 20
1.2 Nükleer Enerjinin Tarihine Yakından Bakış	/ 33
Atomcu Madde Kuramı	/ 33
Radyoaktivitenin Keşfi	/ 37
Bölünmenin Keşfi	/ 39
Manhattan Projesi	/ 40
1970-2000'ler Dönemi	/ 47
2000'den Günümüze Kadar Olan Dönem	/ 48
1.3 Günümüzde Kullanılan Enerji Kaynakları	/ 49
1.4 Bölüm Referansları	/ 54
<b>2. Enerjiyle İlgili Temel Kavramlar</b>	/ 59
2.1 Enerji Nedir?	/ 59
2.2 Enerji Türleri	/ 59
2.3 Evrendeki Temel Güçler	/ 63
2.4 Birincil ve İkincil Enerji Kaynakları	/ 66
2.5 Yenilenebilir ve Yenilenemez Enerji Kaynakları	/ 67
2.6 Sık Kullanılan Enerji ve Güç Birimleri	/ 67
2.7 Hidro-Karbon Yakıtların Yanması	/ 70
2.8 Yenilenebilir Enerji Ailesinden Elde Edilen Enerji	/ 72
2.9 Farklı Enerji Kaynaklarının Karşılaştırılması	/ 75
2.10 Bölüm Referansları	/ 80
<b>3. Elektrik Üretimiyle İlgili Temel Kavramlar ve Elektrik Üretim Teknolojileri</b>	/ 83
3.1 Temel Kavramlar	/ 83
3.2 Kömür Santralleri	/ 92
3.3 Doğal Gaz Kombine Çevrim Santrali (DGKÇS)	/ 97
3.4 Nükleer Enerji Santralleri (NES)	/ 101
3.5 Hidroelektrik Santraller (HES)	/ 104
3.6 Rüzgar Enerjisi Santralleri (RES)	/ 108
3.7 Güneş Enerjisi Santralleri (GES)	/ 110
3.8 Santral Karşılaştırmaları	/ 114
3.9 Bölüm Referansları	/ 118
<b>4. Atomun Yapısı, Nükleer Tepkimeler</b>	/ 123
4.1 Atom	/ 123
4.2 Temel Radyoaktif Bozunumlar ve Kavramlar	/ 129
4.3 Bölüm Referansları	/ 144

<b>5. Nükleer Santraller</b>	/ 147
5.1 Nükleer Santrallerin Sınıflandırılması	/ 148
5.2 Nükleer Santrallerin Temel Bileşenleri	/ 152
5.3 Nükleer Santral Teknolojileri	/ 160
Basınçlı Su Reaktörü-Pressurized Water Reactor (PWR)	/ 161
Kaynar Su Reaktörü-Boiling Water Reactor (BWR)	/ 164
Basınçlı Ağır Su Reaktörü-Heavy Water Reactor (PHWR)	/ 166
Ticari İleri Su Soğutmalı Reaktörler	/ 168
Gaz Soğutmalı Termal Reaktör-Gas Cooled Thermal	/ 170
Reactor (GCTR)	/ 170
Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı Reaktör (High Temperature Gas Cooled Reactor-HTGR)	/ 171
5.4 Üretken Reaktörler	/ 174
Hızlı Üretken Reaktör (Fast Breeding Reactor)	/ 175
Termal Üretken Reaktör (Thermal Breeder Reactor)	/ 175
5.5 Nükleer Santral Nesilleri	/ 176
5.6 Nükleer Enerjinin Dünyadaki Durumu	/ 181
5.7 Bölüm Referansları	/ 186
<b>6. Nükleer Yakıt Çevrimi ve Atık Yönetimi</b>	/ 189
6.1 Uranyum	/ 189
6.2 Plütonyum	/ 195
6.3 Toryum	/ 197
6.4 Nükleer Yakıt Çevrimi	/ 199
6.5 Nükleer Atık Yönetimi	/ 209
6.6 Bölüm Referansları	/ 222
<b>7. Nükleer Teknolojiyi Diğerlerinden Farklı Kılan Hususlar</b>	/ 225
7.1 Teknik Farklılıklar	/ 225
7.2 İdari/Yönetimsel Farklılıklar	/ 232
7.3 Çevresel Etki Farklılıkları	/ 234
7.4 Ekonomik	/ 235
7.5 Sosyal	/ 236
7.6 Bölüm Referansları	/ 236
<b>8. Dünyada Nükleer Santral Projelerinde ve İşletmeciliğinde Yapılmış Tarihi Hatalar</b>	/ 237
8.1 Bataan Nükleer Santrali (Filipinler)	/ 237
8.2 Zwentendorf Nükleer Santrali (Avusturya)	/ 238
8.3 Kedo I ve II Nükleer Santralleri (Kuzey-Güney Kore, ABD, Japonya)	/ 239
8.4 Angra III Nükleer Santrali (Brezilya)	/ 240
8.5 Cernavoda Nükleer Santrali (Romanya)	/ 242
8.6 Atucha Nükleer Santrali (Arjantin)	/ 243
8.7 Belene Nükleer Santrali (Bulgaristan)	/ 244
8.8 Olkiluoto III Nükleer Santrali (Finlandiya)	/ 246
8.9 Watts Bar Nükleer Santrali (ABD)	/ 248
8.10 Bölüm Referansları	/ 248
<b>9. Radyasyonun Biyolojik Etkileri</b>	/ 253
9.1 Radyasyon Kaynakları	/ 257
9.2 Radyasyonun Biyolojik Etkileri	/ 275



<b>10. Nükleer Enerjinin Ekonomisi</b>	/ 289
10.1 Temel Ekonomik Kavramlar	/ 289
10.2 Elektrik Üretim Santrallerine Has Bazı Önemli Ekonomik Kavram ve Tanımlar	/ 293
10.3 Nükleer Enerjinin Ekonomisi	/ 299
10. 4 Çeşitli Karşılaştırmalar	/ 301
10.5 Nükleer Kazaların Santral Yapım Maliyetlerine Etkisi	/ 308
10.6 Bölüm Referansları	/ 310

<b>11. Nükleer Projelerin Yönetimi</b>	/ 311
11.1 Proje Yönetim Süreçleri	/ 313
11.2 Nükleer Santral Projelerini Farklı Kılan Hususlar	/ 319
11.3 Nükleer Santral Projelerinde Başlıca Paydaşlar	/ 323
11.4 Nükleer Santral Projelerinde Sözleşme Türleri	/ 324
11.5 Uluslararası Projeler	/ 325
11.6 Bölüm Referansları	/ 329

<b>12. Nükleer Kazalar</b>	/ 331
12.1 Nükleer ve Radyolojik Olayların/Kazaların Sınıflandırılması	/ 334
12.2 Windscale Kazası (İngiltere)-İnes 5	/ 338
12.3 Three Mile Island Kazası (ABD)-İnes 5	/ 342
12.4 Çernobil Kazası (Eski SSCB)-İnes 7	/ 347
12.5 Fukushima Daiichi (Japonya)-İnes 7	/ 355
12.6 Bölüm Referansları	/ 372

<b>13. Nükleer Enerjinin Askeri Alanda Kullanımı</b>	/ 375
13.1 Nükleer Silahların Tarihi	/ 375
13.2 Nükleer Silahlar	/ 384
13.3 Nükleer Güçle Çalışan Savaş Makineleri	/ 390
13.4 Bölüm Referansları	/ 394

<b>14. Nükleer Güvenlik Kültürü</b>	/ 397
14.1 Güvenlik Kültürü	/ 397
14.2 Nükleer Güvenlik Kültürü	/ 399
14.3 Nükleer Güvenlik Kültürünün Çeşitli Öğeleri	/ 402
14. 4 Bölüm Referansları	/ 404

<b>15. Türkiye’de Nükleer Enerji</b>	/ 405
15.1 Türkiye’nin Enerji Teknolojileriyle Tanışmasının Kısa Tarihi	/ 405
15.2 Türkiye’nin Nükleer Enerjiyle Tanışması ve Nükleer Santral Kurma Girişimleri Tarihi	/ 407
15.3 Dünya Karması-Türkiye Karşılaşması	/ 410
15.4 Nükleer Santral Kurma Teşebbüsleri Neden	/ 414
Başarısız Oldu?	/ 414
15.5 Bölüm Referansları	/ 416

<b>16. Sonuç ve Değerlendirme</b>	/ 417
-----------------------------------	-------

*Sevgili Anneciđime*  
*ve*  
*Canım kardeřim Egemen'e*

## TEŞEKKÜR

2015 yılının Haziran ayında üç sayfa taslak ile başlayan “Nükleer Enerji: Atomdan Elektriğe Sağlıktan Silaha” çalışması üç yılı aşan büyük bir emek gerektirdi. Ortaya çıkan birden fazla taslağı defalarca okuyarak eksiklikleri, hataları belirleyen ve görüşlerini paylaşan babam, Fizik Mühendisi, Kemal EGE’ye içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Kitabın “Radyasyonun Biyolojik Etkileri” adlı bölümünü titiz bir biçimde inceleyerek görüşlerini paylaşan, lise sıralarından beri yakın arkadaşım, Ankara Atatürk Eğitim ve Araştırma Hastanesi Nükleer Tıp Uzmanı Doç. Dr. Nilüfer YILDIRIM’a teşekkür ederim.

Türkiye’de yayıncılığın zor bir dönemden geçtiği bir zamanda çalışmamın kitap haline getirilmesi imkânını sağlayan Hece Yayıncılık Ltd. Şti. sahibi Sn. Ömer Faruk ERGEZEN’e teşekkürü borç bilirim.



## ÖN SÖZ

“İnsan neden korkar?” Şüphesiz bu soruya verilebilecek en kolay ve en isabetli yanıt “bilmediği şeyden” olacaktır. İnsanlık gerçekten de tarih boyunca hep bilmediği şeylerden korkmuştur. En başta yıldırım ve gök gürültüsünden, volkanik faaliyetlerden, yerle göğün yeksan olduğu depremlerden ve daha bir çok doğal afetten... Buna karşın hem korktuğu hem de hayran olduğu bu afetlere hatta güneşe, aya ve yıldızlara, gökyüzüne tapınmıştır. Milyonlarca yıllık gelişiminde geldiği bugünkü noktada ise korktuğu her şeyi araştırmaya girişmiştir: dünyanın geçmişini, yerin tektonik yapısını, depremleri, hava hareketlerini ve fırtınaların oluş nedenlerini, evreni ve uzayı ve daha birçok fenomeni. Bilim ve teknoloji ile bütün bu olayları ve daha fazlasını giderek artan oranda anlamaya başlayan insanoğlu korkularından bütünüyle kurtulamamış olsa da artık kendine kesinlikle daha fazla güvenmektedir. Bununla beraber, Hiroşima ve Nagazaki’ya atıldığında, II. Dünya savaşını bitiren atom bombaları ile tanışıklığımızdan beri nükleer enerjiden korkmaya devam ediyoruz. İşte bu kitapla; atomdan radyoaktiviteye, nükleer teknolojinin en önemli ürünü olan nükleer santrallerden nükleer enerjinin ekonomisine kadar pek çok alanda, kişisel deneyimlerimi de harmanlayarak, okuru çok fazla derinliğe inip sıkmadan bilgilendirmeyi amaçladım. Nitekim, nükleer enerjiyi teknik olarak açıklarken aynı zamanda tarihsel gelişimini, diğer elektrik üretim teknolojilerinden farklı olan yönlerini anlatmak, herkes tarafından anlaşılabilir sonuçlarıyla bilim/teknoloji arasında bir köprü kurmak gerekiyordu.

*Nükleer Enerji: Atomdan Elektrikçe Sağlıktan Silaha*, diğer taraftan, nükleer enerjinin birçok farklı alanıyla ilgili bilgi vererek okurun konuya geniş bir perspektiften bakmasını sağlamaya yardımcı olmayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda gerek Hollanda’da Delft Teknoloji Üniversitesinde çalıştığım, gerekse misafir araştırmacı olarak Kanada, University of Ontario Institute of Technology’de bulunduğum dönemde gerekse de görevli olarak gittiğim ABD, Fransa, Belçika, Avusturya, İspanya, Güney Kore, Japonya, Çek Cumhuriyeti, Birleşik Arap Emirliklerinde ilk ağızdan edindiğim bilgileri paylaşmaya çalıştım. Buna ek olarak; çeşitli kongre, seminer ve eğitimlerde Afrika’dan Uzakdoğu’ya, Avrupa’dan Amerika’ya kadar geniş bir yelpazede karşılaştığım meslektaşlarımdan öğrendiklerimi de okura sunmaya çalıştım. Bunu yapmamın gerçekte birbiriyle iç içe geçmiş iki temel nedeni vardı: birincisi nükleer enerji alanında geniş bir perspektiften bakış açısı sağlayan Türkçe bir kaynağın olmayışı, olanların da daha çok çeviri eserler olması, ikincisi ise ülkemine bana yapmış olduğu yatırımı tekrar ülke insanlarına bilgi ve deneyim olarak geri döndürme arzusu. Her iki amacı da bir nebze olsun yerine getirebildiysem kendimi mutlu hissedeceğim.

Günümüzde nükleer enerjiye karşı olan insan sayısı yadsınamayacak kadar fazla ancak bu insanların neye karşı olduklarını akıl, bilim ve mantık çerçevesinde ortaya koymaları gerekir. Kitabı mümkün olduğunca tarafsız bir gözle yazmaya çalıştım. Bu şekilde nükleer enerjiye karşı çıkanlar için de taraftar olanlar için de kaynak olabilecek bir eser ortaya çıktığına inanıyorum.

Son olarak; çalışmaya meslektaşlarımdan, sınırlama olmaksızın başka dalda uzmanlığı bulunan ve konuya ilgi duyan herkesten gelecek her türlü yapıcı eleştiriye açık olduğumu özellikle belirtmek isterim. Yıkıcı eleştiri yapmak isteyenlere tavsiyem ise o tip eleştiriler için harcayacakları enerji ve zamanı, bu kitaptan daha iyisini ortaya çıkartmaya harcamaları olacaktır zira öyle bir çalışmayı ilk alkışlayan ve tebrik eden ben olurum.

PMP, Dr. Ahmet EGE  
Nükleer Enerji Yüksek Mühendisi  
Ankara, 6 Ekim 2018

# SEMBOL LİSTESİ

Simge/Sembol	Açıklama	Birimi
A	Kesit alanı	m <sup>2</sup>
C	Karbon atomu	
C	Fiyat	
°C	Celsius	
c	Işık hızı sabiti	2.997925x10 <sup>8</sup> m/s
D	Soğurulan doz	Gray (Gy)
e	Elektron yükü	1.6x10 <sup>-19</sup> C
E	Enerji	Joule (J)
F	Kuvvet	Newton (N)
f	Frekans	1/s
G	Güneş ışınlarının dünya üzerindeki ortalama akısı	174.7 W/m <sup>2</sup>
g	Yer çekimi sabiti	9.8 m/s <sup>2</sup>
H	Hidrojen atomu	
H	Biyolojik Eşdeğer Doz	Sievert (Sv)
h	Süre	saat
h	Düşü	metre (m)
h	Planck Sabiti	6.626x10 <sup>-34</sup> m <sup>2</sup> kg/s
I	Yatırım harcamaları	
i	Faiz oranı	%
M	İşletme ve Bakım giderleri	
m	Kütle	Kilogram (kg)
$\dot{m}$	Kütlesel debi	kg/s
N	Nitrojen atomu	
N	Avagadro sayısı	6.02 x 10 <sup>23</sup>
n	Faiz dönemi	gün, ay veya yıl
O	Oksijen Atomu	
P	Anapara	
P	Güç	Watt (W)
q	Elektriksel Yük	Coloumb (C)
r	Uzunluk	Metre (m)
S	Kükürt atomu	
U	Uranyum atomu	
V	Potansiyel farkı	Volt (V)
V	Hız	m/s

W Radyasyon/Doku Ağırlık faktörü

**Alt İndisler**

A	Avagadro	t	t yılı
e	Elektrik gücü	T	Doku
R	Radyasyon	th	Thermal (Isıl)



# KISALTMALAR

Kısaltma	Açıklama
AB	Avrupa Birliđi
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
akb	atomik kütle birimi
AC	Alternating Current
AEC	Atomic Energy Commission
AECL	Atomic Energy of Canada Ltd
ABWR	Advanced Boiling Water Reactor
ALARA	As Low AS Reasonably Achievable
ANAEM	Ankara Nükleer Eğitim ve Araştırma Merkezi
APR	Advanced Power Reactor
APWR	Advanced Pressurized Water Reactor
Ar-Ge	Araştırma Geliştirme
ARIS	Advanced Reactor Information System
ARN	Autoridad Regulatoria Nuclear Agency
ARS	Akut Radyasyon Sendromu
ASE	Atomstroyexport
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor
BAE	Birleşik Arap Emirlikleri
BWR	Boiling Water Reactor
BP	British Petroleum
CANDU	Canada Deuterium Uranium
CEA	Commissariat à l'énergie Atomique
CEO	Chief Executive Officer
CGN	China General Nuclear Power Group
CNAAA	Central Nuclear Almirante Alvaro Alberto
CNEA	Comisión Nacional de Energía Atómica
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CTBT	Complete Test-Ban Treaty
ÇNAEM	Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
DBT	Dijital Breast Tomosynthesis
DC	Direct Current
DGKÇS	Doğal Gaz Kombine Çevrim Santrali
DNA	Deoxyribonucleic Acid
DOE	Department of Energy
DSİ	Devlet Su İşleri
EBR	Experimental Breeder Reactor