

Nükleer Reaktör Fiziğinin Temelleri

© Copyright 2021

Bu kitabın, basım, yayın ve satış hakları Akademisyen Kitabevi A.Ş.'ne aittir. Anılan kuruluşun izni alınmadan kitabın tümü ya da bölümleri mekanik, elektronik, fotokopi, manyetik kağıt ve/veya başka yöntemlerle çoğaltılamaz, basılamaz, dağıtılamaz. Tablo, şekil ve grafikler izin alınmadan, ticari amaçlı kullanılamaz. Bu kitap T.C. Kültür Bakanlığı bandrolü ile satılmaktadır.

ISBN

978-625-7354-72-1

Kitap Adı

Nükleer Reaktör Fizığının Temelleri

Editör

E. E. Lewis

Çeviri Editörü

Songül AKBULUT ÖZEN

Yayın Koordinatörü

Yasin DİLMEN

Sayfa ve Kapak Tasarımı

Akademisyen Dizgi Ünitesi

Yayıncı Sertifika No

47518

Baskı ve Cilt

Vadi Matbaacılık

Bisac Code

SCI051000

GENEL DAĞITIM

Akademisyen Kitabevi A.Ş.

Halk Sokak 5 / A

Yenişehir / Ankara

Tel: 0312 431 16 33

siparis@akademisyen.com

www.akademisyen.com

Nükleer Reaktör Fiziğinin Temelleri

(Fundamentals of Nuclear Reactor Physics)

E. E. Lewis

*Professor of Mechanical Engineering
McCormick School of Engineering and Applied Science
Northwestern University*

Çeviri Editörü

Doç. Dr. Songül AKBULUT ÖZEN

MART - 2021

Çeviri Kurulu

Bölüm 1	Nükleer Reaksiyonlar	Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇELİK	Giresun Üniversitesi Fizik Bölümü
Bölüm 2	Nötron Etkileşimleri	Dr. Öğr. Üyesi Ali TİFTİKÇİ	Sinop Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği
Bölüm 3	Nötron Enerji Dağılımları	Dr. Öğr. Üyesi Tayfun TANBAY	Bursa Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği
Bölüm 4	Güç Reaktörü Kori	Dr. Osman Şahin ÇELİKTEN	Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği
Bölüm 5	Reaktör Kinetiği	Prof. Dr. Necati ÇELİK	Gümüşhane Üniversitesi Fizik Mühendisliği
Bölüm 6	Nötronların Konumsal Difüzyonu	Dr. Hüseyin AYHAN	FIGES A.Ş. Nükleer Teknoloji Bölümü
Bölüm 7	Reaktörlerde Nötron Dağılımı	Dr. Mehmet TÜRKMEN	"University of Illinois at Urbana-Champaign Nuclear Plasma and Radiological Engineering, Talbot Laboratory"
Bölüm 8	Enerji Taşınımı	Doç. Dr. Songül AKBULUT ÖZEN	Bursa Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü
Bölüm 9	Reaktivite Geri Besleme	Dr. Öğr. Üyesi Senem ŞENTÜRK LÜLE	İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü
Bölüm 10	Uzun Dönem Kor Davranışı	Dr. Haluk ATAĞ	Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği
Ekler	Çeviri Kurulu		

Dizin/Index

Dil Redaksiyonu

Dr. Öğr. Üyesi Gül YILMAZ ÇAL
Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Türk Dili ve Edebiyatı Bölümü

Ön Söz

Bu kitap nükleer reaktör fiziğine giriş ders kitabı olarak planlandı. Nükleer enerji konusunda herhangi bir alt yapısı olmayan makine, elektrik ve diğer mühendislik dallarındaki üniversite öğrencileri tarafından kullanılabilecek başlı başına bir kaynak olması ile birlikte, reaktör teorisine giriş olarak üniversite nükleer mühendislik müfredatına uygun bir şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca profesyonel sorumlulukları nükleer reaktör fiziği ile aşinalık gerektiren çeşitli disiplinlerden mühendislere faydalı olması için de planlanmıştır.

Konu ile ilgili baskıları devam etmekte olan pek çok kitap olmasına rağmen neden bu kitaba ihtiyaç duyulmuştur? Baskıları devam eden kitapların popüler olanları güzel yazılmıştır. Yayınlandıkları tarihte konunun temelleri zaten anlatılmıştır ve bugün hâlâ geçerlilikleri devam etmektedir. Fakat benim kanaatime göre, bugünün üniversite öğrencileri ve mühendisleri için reaktör fiziğine giriş, eski eserlerin tekrar gözden geçirilip belli başlı konulara odaklanılarak ve modern güç reaktörlerinin karakteristik özellikleri üzerinde durularak yapılmalıdır.

Geleneksel ders kitaplarına geleneksel olarak nükleer fizik ve nötron etkileşimleri ile başlanır nötron yavaşlatma ve homojen karışımlı materyallerin difüzyonu üzerine detaylı çalışmalar sunularak devam edilir. Çok önem arz eden bölünebilir sistemlerin zaman bağımlı davranışlarının analizleri bu kitapların son kısımlarında konu edilir. Fakat reaktör korunun kafes yapısına kritik bağımlılığının önemi üzerinde fazla durulmaz. Konunun mantıklı gelişmesi için bu sıralama bir dereceye kadar gereklidir. Lakin ben bu kitapta, hem üniversite eğitiminde hem de mühendislere faydalı olması için, daha detaylı analizleri ve ileri dereceli matematiksel yaklaşımları kitabın son kısmına bırakırken ilk kısımlarında genel değerlendirme yapmayı uygun buldum. Reaktör kinetiği konusunu öne almanın zincir reaksiyonlarının zaman bağımlı davranışlarının anlaşılması için daha avantajlı olacağını düşündüm. Ayrıntılı konumsal güç dağılımları, yansıtıcı tasarrufu ve nötron difüzyonu eşitliklerinin çözümüne bağlı diğer konuları ise daha ileri bölümlere bıraktım. Böylece, güç reaktörü kor bileşenleri konusunun öne alınmasıyla da nötronik ve ısı tasarımıların disiplinler arası yönleri vurgulanmıştır.

Bu kitaptaki(la) amacım, ileri nümerik simülasyonlarla elde edilen, yüksek doğruluklu sonuçlar için gerekli tekniklerin anlatımından ziyade, fiziksel olguları vurgulamaktır. Önceki kitapların (legacy text) yazıldıkları dönemlerde bilgisayarlar reaktör analizlerini kolaylaştıran güçlü birer alet olarak görülüyordu. Bundan dolayıdır ki, reaktör teorisi öğreniminde, sonlu diferansiyel tekniklerin programlanması, matris çözümü algoritmaları ve reaktörlerin fiziksel davranışlarının analizine paralel olan diğer nümerik metotlara vurgu yaparak çözüm arayışları kâğıt ve kalem ile

yapılabileceklerin ötesine taşınmıştır. Şimdilerde ise Mathcad veya MATLAB gibi gelişmiş programlama dilleri öğrencilere, soyut veya lineer eşitliklerin çözülmesi ve diferansiyel eşitliklerin integrallerinin alınması gibi bir giriş dersinde karşılaşılan yığınla problemin çözümünde, algoritmaları baştan yazmaksızın, kolaylık sağlamaktadır. Haliyle, kariyerimin çoğunluğunu adadığım, Reaktör Davranışlarının Nümerik Simülasyonu oldukça sofistike bir girişim olmuştur. Fakat benim görüşüm, reaktörlerin fiziksel davranışlarının temelleri kavranmadan, nümerik tekniklerin daha ileri seviye derslere bırakılması yerinde olacaktır. Aksi takdirde, reaktör tasarımında kullanılan sayısal (nümerik) yaklaşımlara verilecek öncelik, ilk başta kavranması gereken fiziksel olgulara yeterince vurgu yapılmamasına yol açacaktır.

Yukarıda bahsedilen çerçevede bazı kısımları yeniden organize ederek ve konuya tekrar odaklanarak daha geniş bir okuyucuya sahip olmayı ve özellikle okuyucuların profesyonel gelişmelerinin ilerlemesinde, üniversitede okurken formal bir reaktör fiziği almayanlar dahil, bu kitabın daha faydalı olacağını ümit ediyorum. Bu kitapla amacım, zaman darlığı veya temel eksiklikleri olsa da çok fazla matematiksel açıklamaların olduğu bölümlerin kolayca okunabilmesi ve sonuçların, anlatılanların her aşamasının ayrıntısına girme gereksinimi duymadan, kabul edilmesiyle fiziksel bir kanıya varılmasıdır. Bu amaçla, sonuçların çoğu analitik formlarıyla birlikte, grafiksel olarak da sunulmuştur ve mümkün olduğu kadar öğrencilere bazı çağrışımlar yaptırın diye ana sınıf güç reaktörleri için temsili parametreler verilmiştir. Örnekler konu anlatımı şeklinde bütünleştirilmiş ve seçilmiş problemler her bölümün sonunda verilmiştir. Problemler biraz daha kapalı konuların anlaşılmasını sağlamakla birlikte bazı durumlarda konunun kapsamını genişletmektedir. Problemlerin çoğu analitik olarak veya bir hesap makinesi yardımıyla çözülebilir. Çoklu çözümler ve grafiksel sonuçların olduğu bazı durumlarda ExcellTM gibi elektronik tablo programının formül menüsü kullanılarak hesaplama işlemleri kolaylaştırılabilir. Seçilen problemler soyut veya diferansiyel eşitliklerin çözümü için daha önce bahsedilen ileri seviyede bilgisayar dilleri kullanmayı gerektirir. Bu problemler yıldız işareti ile belirtilmiştir.

Birçok arkadaş, iş ortağı ve öğrencilerin yardım ve destekleri olmasaydı bu kitabın hazırlanması son derece zor, hatta imkansız olurdu. Argonne National Laboratory Nükleer Enerji Bölümü çalışanlarının tavsiyeleri bu kitabın hazırlanışında çok değerlidir. Özellikle, Won Sik Yang reaktör parametreleri ve grafiklerin çizilmesi gibi pek çok konuda zamanından feragat ederek destek vermiş ve bütün taslağı düzelterek katkıda bulunmuştur. Roger N. Blomquist, Taek K. Kim, Chang-ho Lee, Giuseppe Palmiotti, Micheal A. Smith, Temitope Taiwo ve birçok kişi bu işe katkı sağlamıştır. Naval Reactors Programından Bruce M. Bingman ve onun iş arkadaşlarının çok makbule geçen yardımları olmuştur. Son olarak, Northwestern Üniversitesinden öğrencilerin geri bildirimleri bu kitap içerisinde ders notu serilerinin gelişmesinde çok yardımcı olmuştur. Bilhassa, Eşim Ann, aile içerisinde kendisine düşenden daha fazla görevi üstlenerek bir kitabı daha teşvik ve sabırla karşılamıştır.

Çeviri Editörünün Ön Sözü

Değerli Okurlarımız,

Enerji, ülkelerin ekonomik ve toplumsal gelişimlerinin vazgeçilmez girdisidir. Enerji kaynaklarına ve bu kaynaklardan elde edilen enerjiye erişim, ülkelerin gelişim düzeylerini olduğu kadar ekonomik ve ulusal güvenliklerini de doğrudan etkileyen, yaşamsal bir olgudur. Bunun yanı sıra kesintisiz, ödenebilir, temiz ve kaliteli enerjiye erişebilmek, tüm insanlar için, su ve hava kadar gerekli bir insanlık hakkıdır. Buna karşın hâlen dünyada elektrikten yoksun insan sayısı milyarları bulmaktadır.

Ülkemiz, yıllardan beri enerjide büyük oranda dışa bağımlı olan ve enerji sorunu giderek derinleşen bir ülke konumundadır. Buna paralel olarak nükleer enerji ve alternatif enerji kaynaklarına yönelim artmakta ve ciddi yatırımlar yapılmaktadır. Ülkemizin 2023 hedefleri doğrultusunda reaktör inşaa çalışmaları hız kazanmıştır. Bu konularda yetişmiş insan gücüne olan ihtiyaç ise, göz ardı edilemeyecek boyutlardadır. Bu çeviri eser, insan gücüne olan ihtiyacın şiddetli bir şekilde hissedilmeye başlandığı bu günlerde, Nükleer Enerji Mühendislikleri, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümlerinin Nükleer Enerji Anabilim Dalları, Makine Mühendisliği Bölümlerinin Enerji Anabilim Dalları ve Fizik Bölümlerinin Nükleer Fizik Anabilim Dallarında okutulan, Nükleer Enerji, Reaktör Teorisi, Reaktör Fiziği, Nükleer Mühendisliğe Giriş vb." derslere kaynaklık edecek ve anadilde öğrenmeyi teşvik edecek nitelikte bir kaynak olacaktır.

Son yıllarda artan üniversite sayıları ve yabancı dil yeterliliğinin henüz sağlanamamış olması gibi nedenlerle Türkçe eserlere duyulan ihtiyaç gün geçtikçe güçlü bir şekilde kendini hissettirmektedir. John R. Lamarsh ve Anthony J. Baratta'nın "Introduction to Nuclear Engineering" başlıklı "Nükleer Mühendisliğe Giriş" eseri ve Raymond L. Muray ve Keith E. Holbert'in "An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes" başlıklı "Nükleer Süreçlerin Kavramları, Sistemleri ve Uygulamalarına Giriş" eserleri dışında, nükleer mühendislik alanında Türkçeye çevrilen başka bir eser bulunmamaktadır. Çevirisini tamamlamış olduğumuz "Fundamentals of Nuclear Reactor Physics" "Nükleer Reaktör Fiziğinin Temelleri" başlıklı bu eserin diğerlerinden en önemli farkı, eski eserlerin tekrar gözden geçirilip belli başlı konulara odaklanılarak ve modern nükleer reaktörlerin karakteristik özellikleri üzerinde kuramsal olarak durularak hazırlanmış olmasıdır. Kitap tercüme edilirken daha önce Türkçeye çevrilen iki kitapta kullanılan kelimelerin Türkçe karşılıkları dikkate alınmış ve mümkün mertebe kelimelerin ortak anlamlandırılmasına özen gösterilmiştir. Böylelikle Türkçeye geçen ve tercümeden kaynaklı kelime kirliliğinin ve anlam kargaşasının önüne geçilmek amaçlanmıştır.

Ayrıca kitabın orijinalinde zaman zaman hatalara rastlanmış ve elimizden geldiğince düzeltilmiştir. Bu kitapta, diğer çeviri eserlerden farklı olarak, dizin kısmı orijinal kitaptaki index kısmı ile birlikte sunulmuştur. Bu şekilde kitabın okurlarına terimlerin İngilizce karşılıklarının da sunulması amaçlanmıştır.

Çeviri kurulunda bulunan ve ekip ruhuyla titizlikle konuyu ele alan tüm hocalarıma en içten teşekkürü bir borç bilirim. Bir diğer teşekkürü de dil redaksiyonunu titizlikle yürüten Dr. Öğr. Üyesi Gül YILMAZ ÇAL'a borçluyum. Ayrıca, kitabın lisansını alan, mizanpajını yapan ve eserin vücut bulmasında emek harcayan herkese minnettarım.

Azami dikkatin sağlanmasına rağmen, kitap içerisinde muhtelif yerlerde çeşitli hatalarla karşılaşılması olasıdır. İlgili hataları aşağıdaki adrese iletmenizden son derece memnuniyet duyacağım.

Çeviri Editörü

Doç. Dr. Songül AKBULUT ÖZEN

songul.akbulut@outlook.com

songul.akbulut@btu.edu.tr

İçindekiler

İçindekiler	v
Ön Söz.....	xi
Çeviri Editörünün Ön Sözü	xiii
1 Nükleer Reaksiyonlar.....	1
1.1 Giriş	1
1.2 Nükleer Reaksiyon Temelleri	2
Reaksiyon Denklemleri	3
Notasyon.....	4
Enerji Bilgisi.....	5
1.3 Bağlanma Enerjisi Eğrisi.....	7
1.4 Füzyon Reaksiyonları.....	8
1.5. Fiyon Reaksiyonları.....	10
Enerji Salımı ve Yayılımı	10
Nötron Çoğalması	12
Fiyon Ürünleri.....	13
1.6. Fiyon ve Doğurgan Maddeler	16
1.7. Radyoaktif Bozunma	18
Doğunluk Aktivitesi	20
Bozunma Zincirleri	21
2 Nötron Etkileşimleri	29
2.1. Giriş	29
2.2. Nötron Tesir Kesitleri.....	29
Mikroskopik ve Makroskopik Tesir Kesitleri	30
Çarpışmamış Akı	32
Nüklit Yoğunlukları	33
Zenginleştirilmiş Uranyum.....	35
Tesir Kesiti Hesaplama Örneği.....	36
Reaksiyon Tipleri.....	36
2.3. Nötron Enerji Aralığı	38

2.4. Tesir Kesitinin Enerji Bağımlılığı	40
Bileşik Çekirdek Oluşumu	41
Rezonans Tesir Kesitleri	42
Eşik Tesir Kesitleri	46
Fisyon Yapabilen Malzemeler	47
2.5. Nötron Saçılması	48
Esnek Saçılma	49
Yavaşlatma Azalması	50
Esnek Olmayan Saçılma	52
3. Nötron Enerji Dağılımları	57
3.1. Giriş	57
3.2. Nükleer Yakıt Özellikleri	58
3.3. Nötron Yavaşlatıcıları	61
3.4. Nötron Enerji Spektrumları	63
Hızlı Nötronlar	65
Nötron Yavaşlaması	66
Enerji Öz-Koruması	68
Termal Nötronlar	72
Hızlı ve Termal Reaktör Spektrumları	73
3.5. Enerji Üzerinden Ortalanmış Reaksiyon Hızları	73
Hızlı Tesir Kesiti Ortalamaları	75
Rezonans Tesir Kesiti Ortalamaları	78
Termal Tesir Kesiti Ortalamaları	79
3.6. Sonsuz Ortam Çoğalma Faktörü	81
4. Güç Reaktörü Kuru	85
4.1. Giriş	85
4.2. Kor Bileşenleri	85
Hafif Su Reaktörleri	88
Ağır Su Reaktörleri	91
Grafit-Yavaşlatıcılı Reaktörler	92
RBMK Reaktörleri	93
Hızlı Reaktörler	94
4.3. Hızlı Reaktör Kafesleri	94
4.4. Termal Reaktör Kafesleri	98
Dört Faktör Formülü	99
Basıncılı Su Reaktörü Örneği	108

5. Reaktör Kinetiği.....	115
5.1. Giriş	115
5.2. Nötron Denge Denklemleri.....	116
Sonsuz Büyüklükte Çoğaltıcı Olmayan Sistemler	116
Sonsuz Büyüklükteki Çoğaltıcı Sistemler	117
Sonlu ve Çoğaltıcı Sistemler	119
5.3. Çoğaltıcı Sistemlerin Davranışları.....	120
5.4. Gecikmiş Nötron Kinetiği	123
Kinetik Denklemler	124
Reaktivite Formülasyonu	126
5.5. Kademeli Reaktivite Değişiklikleri.....	126
Reaktör Periyodu.....	127
Ani Sıçrama Yaklaşımı	131
Çubuk Düşmesi.....	132
5.6. Reaktör Dinamiğine Giriş	133
6. Nötronların Konumsal Difüzyonu.....	139
6.1. Giriş	139
6.2. Nötron Difüzyon Denklemi	140
Konumsal Nötron Dengesi	140
Difüzyon Yaklaşımı	142
6.3. Çoğaltıcı Olmayan Sistemler-Düzlem Geometrisi	143
Kaynaksız Durum Örneği	143
Homojen (Üniform) Kaynak Örneği	144
6.4. Sınır Koşulları.....	145
Vakum Sınırları	146
Yansıtılmış Sınırlar	147
Yüzey Kaynakları ve Albedolar	147
Ara Yüzey Koşulları	148
Diğer Geometrilere Sınır Koşulları	149
6.5. Çoğaltıcı Olmayan Sistemler-Küresel Geometri.....	149
Nokta Kaynak Örneği	150
İki Bölge Örneği.....	151
6.6. Difüzyon Yaklaşımının Geçerliliği	153
Difüzyon Uzunluğu.....	154
Çarpışmamış Akı için Yeniden Değerlendirme	155

6.7. Çoğaltıcı Sistemler.....	157
Kritik Altı Yakıt Demetleri	157
Kritik Reaktör.....	160
7. Reaktörlerde Nötron Dağılımı.....	167
7.1. Giriş	167
7.2. Zamandan Bağımsız Difüzyon Denklemi.....	167
7.3. Homojen Reaktörler.....	169
Sonlu Silindirik Kor	170
Reaktör Gücü	172
7.4. Nötronların Kaçması	174
İki Grup Yaklaşımı.....	174
Göç Uzunluğu	178
Nötron Kaçması ve Reaktör Tasarımı	179
7.5. Yansıtıcılı Reaktörler.....	180
Eksenel Yansıtıcı Örneği	181
Yansıtıcı Kazanımı ve Akı Düzleşmesi	184
7.6. Kontrol Zehirleri	186
Reaktivite Değeri	186
Kısmen Sokulmuş Kontrol Çubuğu	188
Kontrol Çubuğu Kümesi Sokulması	190
8. Enerji Taşınımı.....	199
8.1. Giriş	199
8.2. Kor Güç Dağılımı.....	199
Sonlu Silindirik Kor	200
Üniform Silindirik Kor Örneği	203
8.3. Isı Taşınımı.....	204
Isı Kaynağı Tanımlama	204
Kararlı Hâl Sıcaklıkları	205
Basıncılı Su Reaktörü Örneği.....	209
8.4. Termal Geçişler.....	211
Zamana Bağlı Yakıttaki Sıcaklık Geçiş Örneği.....	212
Zamana Bağlı Soğutucudaki Sıcaklık Geçişleri.....	213

9. Reaktivite Geri Besleme	221
9.1. Giriş	221
9.2. Reaktivite Katsayıları	211
Yakıt Sıcaklık Katsayısı.....	223
Yavaşlatıcı Sıcaklık Katsayısı.....	225
Hızlı Reaktör Sıcaklık Katsayıları.....	227
9.3. Birleşik Katsayılar	227
Ani Katsayı	228
İzotermal Sıcaklık Katsayısı	228
Güç Katsayısı.....	229
Sıcaklık ve Güç Kusurları.....	230
9.4. Fazlalık Reaktivite ve Durdurma Payı.....	230
9.5. Reaktör Geçiş Durumları	232
Reaktör Dinamiği Modeli	233
Geçiş Durumu Analizleri	234
10. Uzun Dönem Kor Davranışı	243
10.1. Giriş.....	243
10.2. Reaktivite Kontrolü.....	243
10.3. Filyon Ürünlerinin Birikim ve Bozunumu	245
Ksenon Zehirlemesi.....	247
Samaryum Zehirlemesi	250
10.4. Yakıt Tükenmesi	252
Filyon Yapabilen Nüklid Konsantrasyonları	252
Yanabilir Zehirler	255
10.5. Filyon Ürünü ve Aktinit Envanterleri	257
Ekler.....	263
A Faydalı Matematiksel Eşitlikler.....	265
Türev ve İntegraller	265
Belirli İntegraller.....	265
Hiperbolik Fonksiyonlar	266
Seri Açılımları.....	266
Kısmi İntegral	266
İntegralin Türevi.....	267

Birinci Derece Diferansiyel Denklemler	267
İkinci Derece Diferansiyel Denklemler	268
Farklı Koordinat Sistemlerinde ∇^2 ve dV	268
B Bessel Denklemi ve Fonksiyonları	269
C Nötron Dağılım Özelliklerinin Türetilmesi	273
D Yakıt Elamanı Isı Transferi	279
E Nükleer Veriler	283
Dizin/Index	287