

# Kuantum Hesaplama Kuramı

Ahmet evik

KUANTUM HESAPLAMA KURAMI

Ahmet Çevik  
Copyright © 2021

ISBN: 978-605-7744-41-8



© Tüm yayın hakları ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.'nindir. Yayıncının izni olmaksızın, hiçbir biçimde ve hiçbir yolla, bu kitabın içeriğinin bir bölümü ya da tümü yeniden üretilemez ve dağıtılamaz.

Genel Yayın Yönetmeni  
Burçin Armutlu

Grafik Uygulama  
Emrullah Öz

1. Basım Aralık 2021  
Salmat Basım Yayıncılık San. Tic. Ltd. Şti.  
Sertifika no: 47771

ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.  
Üniversiteler Mahallesi ODTÜ Küme Evleri No: 152  
ODTÜ Yerleşkesi Çankaya-Ankara  
Tel: (312) 480 15 97-480 15 98  
Faks: (312) 480 15 99  
Sertifika no: 52658  
E-posta: [odtuyayincilik@odtuyayincilik.com.tr](mailto:odtuyayincilik@odtuyayincilik.com.tr)  
İnternet: [www.odtuyayincilik.com.tr](http://www.odtuyayincilik.com.tr)

*Sevgili anneme ve babama...*



# İçindekiler

Önsöz	vii
<b>1 Giriş</b>	<b>1</b>
1.1 Deterministik Sistemler . . . . .	4
1.2 Olasılıksal Sistemler . . . . .	6
1.3 Kuantum Sistemler . . . . .	8
1.4 Karmaşık Sayılar ve Lineer Cebir . . . . .	10
1.4.1 Tensör Çarpımlar . . . . .	18
<b>2 Temel Kuantum Teorisi</b>	<b>23</b>
2.1 Kubitler . . . . .	23
2.2 Dolanıklık . . . . .	31
2.3 Durum Evrilmesi . . . . .	34
2.4 Gözlemlenebilirler ve Ölçümler . . . . .	37
2.5 Yoğunluk Matrisleri ve Karışık Durumlar . . . . .	51
2.6 EPR Paradoksu . . . . .	53
2.7 Mantıksal Kapılar . . . . .	56
2.7.1 Tersinir Hesaplama . . . . .	58
<b>3 Kuantum Işınlanma</b>	<b>71</b>
3.1 Klonlanamazlık Teoremi . . . . .	72
3.2 Silinemezlik Teoremi . . . . .	73
3.3 Işınlanma Protokolü . . . . .	75
3.4 Süperyoğun Kodlama . . . . .	79
<b>4 Kuantum Algoritmaları</b>	<b>81</b>
4.1 Deutsch Algoritması . . . . .	82
4.2 Deutsch-Jozsa Algoritması . . . . .	90
4.3 Simon Algoritması . . . . .	94
4.4 Grover'in Arama Algoritması . . . . .	97

4.5	Shor Algoritması . . . . .	110
4.5.1	Kuantum Fourier Dönüşümü . . . . .	118
4.5.2	Faz Kestirimi . . . . .	136
<b>5</b>	<b>Kuantum Hata Düzeltmesi</b>	<b>141</b>
5.1	Klasik Hesaplama Hataları . . . . .	142
5.2	Kuantum Hataları . . . . .	145
<b>6</b>	<b>Hesaplama Modelleri ve Karmaşıklık Sınıfları</b>	<b>153</b>
6.1	Turing Makineleri . . . . .	154
6.2	Olasılıksal Turing Makineleri . . . . .	162
6.3	Kuantum Turing Makineleri . . . . .	163
6.4	Karmaşıklık Sınıfları . . . . .	168
6.5	Kuantum Sonlu Otomatlar . . . . .	173
6.5.1	Sonlu Otomatların Türevleri . . . . .	174
6.5.2	Kuantum Sonlu Otomat Modelleri . . . . .	175
	<b>Terimler Sözlüğü</b>	<b>181</b>
	<b>Kaynakça</b>	<b>187</b>
	<b>Dizin</b>	<b>191</b>

# Önsöz

Kuantum hesaplamayla ilk kez yüksek lisans eğitimim sırasında karşılaşmıştım. O dönemde, Atılım Üniversitesi'nin Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisiydim. Bölümümüzde çalışan fizik mezunu bir hocamın bu dersi açması için çok çabalamıştım ama maalesef ders açılmamıştı. Kendi kendime bu konuda İngilizce kitaplar alıp ancak kendim bir şeyler öğrenmeye çalıştım. Belli bir düzeye kadar öğrendikten sonra doktora eğitimi için yurt dışına gittim ve kuantum hesaplamayla ilgili çalışmam yarıda kaldı. Yıllar sonra tekrar kuantum hesaplama öğrenmeye karar verdim. Yakın gelecekte yer alacak bilgisayar teknolojisinin dayanacağı ilkeleri ve bu teknolojinin matematiksel kuramını bilmek istedim. Çeşitli kitaplardan, ders notlarından ve ders videolarından kuantum hesaplama öğrendim. Böylece kendim bazı notlar çıkarmaya başladım. ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde kuantum hesaplama dersinin açılmasını önerdikten sonra bölümde ilk kez böyle bir ders açıldı ve 2019'da kuantum hesaplama dersini vermeye başladım. Daha önce hiç kuantum fiziği dersi almadım. Ancak şuna inanıyorum: İnsanın okuyup anlayamayacağı bir şey yoktur. Bir konu ne kadar zor olursa olsun, işin arkasında bir matematik varsa, er ya da geç o konu mutlaka anlaşılabilir. Asıl zor olan, matematiğe, akla ve mantığa dayalı olmayan şeyleri anlamaya çalışmak. Fermat'ın Son Teoremi'ni kanıtlamak tam 358 yıl aldı. Ancak Platon'un *Menon* diyalogunda tartışılan "Erdem nedir?" sorusuna 2500 yıldır tam bir cevap bulunamadı. Yıllar önce almak isteyip alamadığım bu dersi şimdi kendim vermeye, hatta bunun kitabını yazmaya mazhar oldum. Tüm okurların bu hikâyemden esinlenip kendi hedeflerini gerçekleştirmesini diliyorum.

Bu kitap, en başta bilgisayar mühendisliği bölümü lisans son sınıf ya da yüksek lisansa yeni başlamış öğrenciler içindir. Bilgisayar bilimleriyle ilgilenen matematik ve fizik bölümü öğrencileri de bu kitaptan faydalanabilir. Böyle bir kitap hazırlamamdaki amaç, dünyada hızla gelişmekte olan kuantum bilgisayar teknolojisi ve kuantum hesaplama

alanıyla ilgili derli toplu Türkçe bir kaynak sunmaktır. Bu kitap sanırım, çeviri eserler sayılmazsa, ilk özgün Türkçe kuantum hesaplama kitabı olarak literatürde yerini almış olacaktır. Umuyorum ki bu çalışma, kuantum bilgisayarlara ve kuantum hesaplama meraklı olan birçok okurun bu konuyu kolayca öğrenmesine yardımcı olacaktır. Kuantum hesaplama kuramının “enerji alıp vermek” ya da “evrene bir takım mesajlar göndermek” gibi mistik şeylerle ilgisi yoktur. Günlük hayatta “kuantum” kelimesi çok sömürüldüğünden dolayı öncelikle bu kitabın mistisizmle ya da spiritüalizmle ilgisi olmadığını hemen belirtmeliyiz. Kuantum hesaplama, kuantum mekaniğinin bilgisayar biliminde ve algoritmik hesaplamalarda nasıl kullanıldığını inceleyen, lineer cebir kavramlarının doğrudan kullanıldığı bir bilim alanıdır. Kuantum hesaplama kuramı, teorik bilgisayar bilimi ve uygulamalı matematiğin konusudur.

Okurun en azından lineer cebir kavramlarıyla tanışık olduğunu varsaymak durumundayız. Kavramları hatırlatmak maksadıyla, lineer cebirle ilgili gerekli tüm konular Bölüm 1’de örneklerle beraber verildi. Okurun kuantum mekaniği bilmesi gerekmiyor. Elbette kuantum mekaniği bilmek büyük avantaj sağlayacaktır. Ancak kuantum mekaniğinin matematiksel altyapısını gereken düzeyde zaten kitabın en başından başlayarak Bölüm 2’nin sonuna kadar verdik. Hatta bunu bilgisayar bilimlerine uyarlayarak anlatmaya çalıştık. Tanımlarda kullanılan terimlerin her birinin İngilizce karşılığı parantez içinde yazıldı. Türkçe literatür henüz olgunlaşmadığı için terimlerin tek başına Türkçe yazılması, literatürden ve genel terminolojiden kopuk bir sunum olurdu.

Kitap toplamda altı bölümden oluşmakta. İlk iki bölüm, kuantum hesaplamanın ve kuantum mekaniğinin ana ilkeleriyle ilgili. Bu iki bölümde, kuantum hesaplamanın gerekli matematiksel altyapısından ve kuantum mekaniğinin en temel özelliklerinden bahsedeceğiz. Üçüncü bölüm, kuantum enformasyon literatürde yer almış teoremleriyle ve kuantum iletişim konusuyla ilgili olacaktır. Dördüncü bölüm, kitabın amacı doğrultusunda ana içeriği oluşturmaktadır. Bu bölümde literatürde bilinen kuantum algoritmalarını inceleyeceğiz. Kuantum algoritmaları klasik algoritmalarından çok farklı prensiplere göre çalıştığı için göreceğimiz algoritmalar, alışkın olduğumuz tarzdaki klasik algoritmalara benzemeyecektir. Kuantum algoritmaların hem çalışma şekli hem de tasarımı klasik algoritmalarından oldukça farklıdır. Beşinci bölüm, kuantum enformasyon literatüründe en çok çalışılan konulardan biri olan hata düzeltmesiyle ilgilidir. Kuantum hesaplamalar klasik hesaplamalara göre daha fazla çevresel etkenlere ve hataya maruz kaldığı için kuantum hata



düzeltilme kuramı literatürde önemli bir yere sahiptir. Kuantum hata düzeltilme kuramı tek başına bir kitap konusudur. Ancak biz, amacımız gereği, bu konunun sadece bir kısmını inceleyeceğiz. Altıncı bölüm özellikle teorik bilgisayar bilimine meraklı okurların ilgisini çekecek bir bölüm olarak görülebilir. Bu bölümde kuantum hesaplama modellerinden ve karmaşıklık sınıflarından bahsedeceğiz. Aynı bölümde kuantum otomatlar kuramını da ele alacağız.

## Teşekkür

Öncelikle, kuantum hesaplama dersinin bölümde açılması ve dersi vermem için bana sağladığı imkânlardan dolayı ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Halit Oğuztüzün'e çok teşekkür ederim. Eğer bu dersi vermeseydim bu kitabı yazma şansım olmazdı. Bununla beraber Jandarma ve Sahil Güvenlik Akademisi Başkanlığı'na gerekli görevlendirmemi sağladığı için teşekkürü borç bilirim. Kitabı detaylı şekilde incelemesi sonucunda oldukça faydalı öneri ve yorumları sayesinde bu eseri iyileştirmemi sağlayan ODTÜ Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Sadi Turgut'a, daha öncesinde kitapla ilgili yorumlarını ve düzeltmelerini esirgemeyen Prof. Dr. Cem Say'a, Doç. Dr. Abuzer Yakaryılmaz'a, Zeki Seskir'e, kitabın yayın süreciyle ilgilenen ODTÜ Yayıncılık Yönetim Kurulu Üyesi ve Fizik Bölümü Emekli Öğretim Üyesi Prof. Dr. Şakir Erkoç'a, süreç içinde gerekli yönlendirmeleri yapmış olan Doç. Dr. Aziz Fevzi Zambak'a, Burçin Armutlu'ya, Can Çiftçi'ye, metin düzeltmeleri için Figen Kıyak'a ve kapak tasarımı için Emrullah Öz'e teşekkür ederim. Ayrıca kitaba sponsor desteklerinden ötürü Bilim Ağacı Vakfı'na şükranlarımı sunarım. Son olarak, bu kitabı atfettiğim sevgili anneme ve babama hayat boyu yanımda olduklarından dolayı minnettarım.

Ahmet Çevik  
Kasım 2021, Ankara