

Modern Bilgisayar Mimarisi

~ Bilgisayar Organizasyonu Destekli ~

Cengiz UĞURKAYA
Osman ALİEFENDİOĞLU

~ Editör ~

Toros Rifat ÇÖLKESEN



Papatya Bilim

© **PAPATYA YAYINCILIK EĞİTİM**

Ankara Caddesi, Prof. Fahreddin Kerim Gökay Vakfı İşhanı Girişi
No: 11/6, Cağaloğlu (Fatih) / İstanbul

Tel : (+90 212) 527 52 96 (+90 532) 311 311 0
Faks : (+90 212) 527 52 97
e-mail : admin@papatyabilim.com.tr
Web : www.papatyabilim.com.tr
Dağıtım : TDK Bilim – www.tdk.com.tr

Modern Bilgisayar Mimarisi: Bilgisayar Organizasyonu Destekli – C. Uğurkaya, O. Aliefendioğlu

1. Basım Ocak 2026

Editör : Toros Rifat ÇÖLKESEN
Yayın Danışmanı : Cengiz UĞURKAYA
Üretim : Necdet AVCI
Pazarlama : Mustafa DEMİR
Satış : TDK Bilim www.tdk.com.tr
Sayfa Düzenleme : Papatya ve Kelebek Tasarım
Basım ve Ciltleme : UMUT Kağıt San. ve Tic. Ltd. Şti. (Sertifika No: 45162)
Güngören / İstanbul

© Bu kitabın her türlü yayın hakkı yayınevine aittir. Yayınevinden yazılı izin alınmaksızın alıntı yapılamaz, kısmen veya tamamen hiçbir şekil ve teknikle çoğaltılamaz, basılamaz, yayımlanamaz! Kitabın, tamamı veya bir kısmının fotokopi makinası, ofset vs. gibi teknikle çoğaltılması hem çoğaltan hem de bulunduranlar için yasadışı bir davranıştır.

Uğurkaya, Cengiz; Aliefendioğlu, Osman

Modern Bilgisayar Mimarisi / Editör: Toros Rifat Çölkesen – İstanbul: Papatya Bilim, 2026

xviii, 420 s. ; 24 cm

Kaynakça ve dizin var.

ISBN: 978-625-6701-12-0

Sertifika No: 11218

1. Bilgisayar Organizasyonu 2. Bellek Yönetimi 3. Biyolojik Bilgisayarlar 4. RISC 5. CISC

Title

*Bu kitabımızı;
teknolojiye olan bitmeyen merakıyla
bizlere ilham veren,
genç yaşta kaybettiğimiz
Döne oğlu sevgili Hayri Çölkesen
amcamızın anısına
ithaf ediyoruz*

Sıkça Karıştırılan Kavram Çiftleri

İşlemci (CPU/MİB): Program komutlarını alıp çözen ve yürüten merkezi donanım birimidir.

Mikroişlemci: İşlemci işlevlerini tek bir yonga üzerinde gerçekleştiren fiziksel birimdir.

Çekirdek (Core): İşlemci içinde yer alan, bağımsız komut yürütme birimidir.

Çekirdek (Kernel): İşletim sisteminin en alt ve ayrıcalıklı yazılım katmanıdır.

Mimari: Sunulan soyut yapı ve davranış özellikleridir.

Organizasyon: Mimarinin donanımda nasıl gerçekleştirildiğidir.

Komut Kümesi : İşlemcinin yazılımla konuştuğu komut kümesidir.

Mikro-mimari: Bu komutların donanım içinde nasıl yürütüldüğünü tanımlar.

Frekans (Clock Rate): İşlemcinin saat işaretinin birim zamandaki çevrim sayısıdır.

Yürütme Zamanı (Execution Time): Kodun bitmesi için geçen gerçek süredir.

Gecikme (Latency): Bir işlemin veya erişimin başlaması için geçen süredir.

Bant Genişliği (Bandwidth): Birim zamanda taşınabilen veri miktarıdır.

Paralellik: Birden fazla işlemin fiziksel olarak aynı anda yürütülmesidir.

Eşzamanlılık (Concurrency): Birden fazla işlemin zaman paylaşımıyla yürütülmesidir.

Süreç (Process): Kendi adres alanına sahip çalışan program örneğidir.

İş Parçacığı (Thread): Aynı süreç içinde paylaşımlı kaynaklarla çalışan yürütme birimidir.

Kullanıcı Modu: Sınırlı donanım erişimine sahip çalışma kipidir.

Çekirdek Modu: Donanım kaynaklarına tam erişim sağlayan ayrıcalıklı kipidir.

Cep Bellek (Cache): İşlemciye çok yakın, küçük ve çok hızlı bellek birimidir.

Ana Bellek (RAM): Programların ve verilerin tutulduğu ana bellek alanıdır.

Sanallaştırma (Virtualization): Donanım kaynaklarının soyutlanarak birden fazla bağımsız sistem tarafından paylaşılmasıdır.

Emülasyon (Emulation): Farklı bir mimarinin yazılımla taklit edilmesidir.

Mantık: Soyut, kuramsal, algoritmik ve matematiksel bağlamda kullanılır.

Lojik: Donanım, devre, kapı ve fiziksel gerçekleştirim bağlamındadır.

Bu bilgiler kitabın ilerleyen kısımlarında karşılaşılabilecek kavramların doğru bağlamda anlaşılmasını sağlamak amacıyla hazırlanmıştır!

İçindekiler

Önsöz	xv
Kitap Hakkında	xvi
Bölüm 1. Giriş: Bilgisayar Mimarisi ve Bilgisayar Organizasyonu	19
1.1. Bilgisayar Mimarisi ve Bilgisayar Organizasyonu Kavramları	19
1.2. Bilgisayar Mimarisi ve İşlemci Mimarisi Sınıflama Metodolojisi	20
1.2.1. Bilgisayar Mimarisi: Sistem Düzeyinde Sınıflama Yaklaşımı	21
1.2.2. İşlemci Mimarisi: Komut İşleme ve Donanım Açısından Yaklaşım	25
1.3. Dijital Mantık ve Boole Cebri	26
1.3.1. Lojik / Mantıksal Tasarım	26
1.3.2. Boole Cebri	28
1.4. Bilgisayar Sistemlerinin Katmanlı Yapısı	28
1.5. Bilgisayarın Ana Bileşenleri	30
1.6. Bilgisayar Mimarisini Bilmek ve Epistemolojik Temeller	31
1.6.1. Mimari: "Donanımı Anlayan Yazılım"	31
1.6.2. Organizasyon: "Gerçek Donanımın Davranışını Tahmin Etmek"	32
1.7. Bilgisayar Mimarilerinin Tarihsel Gelişimi	32
1.8. Bellek ve Saklama/Depolama Hiyerarşisine Genel Bakış	34
1.9. Modern Mimari Eğilimleri ve Gelecek Perspektifi	35
1.10. Taşbaskıdan Litografiye: Baskı Sanatından Nanoteknolojiye	37
1.11. Özet	39
1.12. Sorular	39
Bölüm 2. İşlemciler: Sınıflaması, Mimarileri ve Organizasyonu	41
2.1. Temel İşlemci Mimarileri	42
2.1.1. Bellek ve İşlem Birimi Bağlantısına Dayalı Sınıflama: Von-Neumann ve Harvard	42
2.1.2. Komut Yapısına Göre İşlemci Sınıflaması: RISC ve CISC	43
2.1.3. İşlemci Mimari Türlerinin Kesişimi: RISC, CISC, Harvard/Von Neumann	44
2.2. İşlemci Bileşenleri ve Organizasyonu	46
2.2.1. Aritmetik Mantık Birimi (ALU)	47
2.2.2. İşlemci Kontrol Birimi $\approx$ Processor Control Unit	48
2.2.3. Saklayıcılar $\approx$ Registers	50
2.2.4. Veri ve Adres Yolları	53
2.3. Bellek Hiyerarşisi ve Cep-Bellek (Cache Memory) Bellek Organizasyonu	54
2.4. İşlemci Performansını Etkileyen Faktörler	57

2.5. Gelişmiş İşlemci Mimarileri ve Tarihsel Süreç	59
2.6. Özet	61
2.7. Sorular	61
Bölüm 3. Komut Kümesi Mimarisi ISA	63
3.1. Bilgisayar Sistemlerinde Katmanlı Soyutlama Modeli ve ISA'nın Yeri	63
3.2. Komut Kümesi Mimarisi ISA Sınıflaması	65
3.2.1. Geleneksel Klasik ISA'lar	66
3.2.2. Modern (Basitleştirilmiş / RISC Tabanlı) ISA'lar	67
3.3. Modern ISA'lar: x86-64, ARM, RISC-V	68
3.3.1. x86-64 (AMD64 / Intel 64) ISA	68
3.3.2. ARM (Advanced RISC Machine) ISA	69
3.3.3. RISC-V ISA	71
3.4. ISA SIMD ve ISA Vektör Eklentileri	72
3.4.1. Vektör Eklentisi Komut Kümeleri	72
3.5. Klasik ISA Komut Türleri	74
3.6. Bellek Adresleme Modlar	76
3.6.1. Temel Adresleme Modları	77
3.6.2. Modern İşlemcilerde Modern Adresleme Modları	79
3.6.3. Adresleme Modlarının Performans ve Mikro-Mimari Etkileri	80
3.7. RISC ve CISC Komut Yapısı Karşılaştırılması	81
3.8. Özet	83
3.9. Sorular	83
Bölüm 4. Bellek Yönetim Birimi: Bellek Hiyerarşisi ve Sanal Bellek	85
4.1. Bellek Hiyerarşisi: Saklayıcılar, Cep Bellek ve Ana Bellek	86
4.1.1. Saklayıcılar $\approx$ Registers	86
4.1.2. Cep Bellek $\approx$ Cache Memory	87
4.1.3. Ana Bellek ve NVRAM $\approx$ Main Memory and NVRAM	89
4.2. Disk/Depolama Birimleri (SSD/HDD)	91
4.3. Doğrusal Bellek Yapısında Fiziksel Adres ve Sanal Adres	92
4.3.1. Fiziksel Bellek	92
4.3.2. Fiziksel Adres ve Sanal Adres	94
4.3.3. Fiziksel Bellekteki Doğrusallık Kırılmaları	94
4.3.4. NUMA Mimarisi ve Topolojisi	95
4.4. Sanal Bellek Yapısı	96
4.4.1. Sanal Bellek Oluşturmanın Amacı	96

4.4.2. Sayfalama $\approx$ <i>Paging</i>	97
4.4.3. Dilimleme $\approx$ <i>Segmentation</i>	99
4.4.4. Sayfalama ve Dilimleme Birlikteliği	100
4.4.5. Bellek ve Disk İkiliğinde Yer-değiştirme $\approx$ <i>Swapping</i>	100
4.5. Bellek Yönetim Birimi (BYB) $\approx$ <i>Memory Management Unit (MMU)</i>	102
4.5.1. Bellek Yönetim Biriminin Temel Görevleri	102
4.5.2. Bellek Yönetim Biriminin İç Bileşenleri	104
4.6. Cep Bellek Organizasyonu	106
4.6.1. Doğrudan Erişimli Cep Bellek	107
4.6.3. Yarı Bağlantılı Cep Bellek	107
4.6.4. Cep Bellek Yer-değiştirme Politikaları $\approx$ <i>Cache Replacement Policies</i>	108
4.6.5. Cep Bellek Tutarlılığı $\approx$ <i>Cache Coherency</i>	109
4.7. Modern Bellek Teknolojileri: DDR5, HBM, NVRAM, Optane	111
4.7.1. DDR Bellek Teknolojisi (DDR1–DDR5)	111
4.7.2. HBM $\approx$ <i>High Bandwidth Memory</i>	112
4.7.3. NVRAM $\approx$ <i>Non-Volatile RAM</i>	113
4.7.4. Intel Optane	113
4.8. Özet	113
4.9. Sorular	114
Bölüm 5. Veri Aktarımı ve Giriş/Çıkış Birimleri Organizasyonu	115
5.1. Veri Aktarımına Giriş	115
5.1.1. İşlemci–Bellek–G/Ç İlişkisi	116
5.1.2. G/Ç Alt Sisteminin Temel İşlevleri	117
5.1.3. G/Ç Performans Ölçütleri $\approx$ <i>Latency, Throughput, Bandwidth</i>	118
5.2. Sistem Veri Yolları	119
5.2.1. Paralel ve Seri Veri Yolları	119
5.2.2. Adres, Veri ve Kontrol Hatları	121
5.2.3. Seri Veri Yollarında Hat Yapısı	122
5.2.4. Erişim Hakemliği ve Veri Yolu Çatışmaları	126
5.2.5. Geçmişten Günümüze Yaygın Kullanılan Arabirim Standartları	126
5.3. G/Ç Veri Aktarım Teknikleri	127
5.3.1. Yoklamalı G/Ç $\approx$ <i>Polling I/O</i>	127
5.3.2. Kesme Tabanlı G/Ç $\approx$ <i>Interrupt-Driven I/O</i>	128
5.3.3. Doğrudan Bellek Erişimi $\approx$ <i>Direct Memory Access (DMA)</i>	129
5.3.4. DMA Denetleyicisi ve Çalışma Şekli	130

5.4. Kesme Mekanizması	132
5.4.1. Kesme Türleri: Donanım ve Yazılım	132
5.4.2. Kesme Vektörü ve Kesme Hizmet Rutini	133
5.4.3. Kesme Önceliklendirme ve PIC/APIC Mimarisi	135
5.4.4. Kesme ve İstisna Farkı	136
5.5. Bellek Haritalı ve Port Adresli G/Ç	136
5.8. Özet	137
5.9. Sorular	137
Bölüm 6. Modern Veri Depolama Sistemleri ve RAID Mimarileri	139
6.1. Depolama Birimleri $\approx$ <i>Storage Units</i>	140
6.2. Sabit Diskler (HDD) ve Bileşenleri	142
6.2. Sabit Diskin Fiziksel Yapısı ve Verinin Yazılma Düzeni	144
6.2.1. Verinin Yazıldığı Plakalar	145
6.2.2. İzler $\approx$ <i>Tracks</i>	145
6.2.3. Sektörler $\approx$ <i>Sectors</i> 6.2.4. Silindir $\approx$ <i>Cylinder</i>	146
6.2.5. Okuma/Yazma Kafası $\approx$ <i>Read/Write Head</i>	148
6.2.6. Lojik Blok Adresleme $\approx$ <i>Logical Block Addressing (LBA)</i>	148
6.3. Katıhal Sürücüler $\approx$ <i>Solid State Drive (SSD)</i>	151
6.3.1. Katıhal Sürücü Tasarım Bileşenleri	151
6.3.2. SSD'lerde Verinin Yazılma Düzeni	153
6.3.3. NAND Hücre Tipine Göre SSD Türleri	154
6.4. Optik Diskler ve Manyetik Bantlar	155
6.4.1. Optik Disk Teknolojisinin Temelleri	155
6.4.2. Optik Disk Türleri: CD, DVD, Blu-ray	155
6.4.3. Manyetik Bant Teknolojisinin Temelleri	156
6.5. RAID Mimarileri	157
6.5.1. RAID Mimarisi Kavramının Temelleri ve Organizasyonu	157
6.5.2. RAID Düzeyleri ve Özellikleri	158
6.5.3. RAID Sistemlerinde Dikkat Edilmesi Gerekenler	159
6.6. Modern ve Alternatif Depolama Mimarileri	159
6.6.1. ZFS ve RAID-Z Türevi	160
6.6.2. Hata Düzeltme Kodlaması $\approx$ <i>Erase Coding (EC)</i>	161
6.7. Ağ Tabanlı Depolama Sistemleri	161
6.8.1. Ağa Bağlı Depolama Sistemi $\approx$ <i>Network Attached Storage (NAS)</i>	162
6.8.2. Depolama Alanı Ağı $\approx$ <i>Storage Area Network (SAN)</i>	162
6.8.3. Bulut Depolama $\approx$ <i>Cloud Storage</i>	163

6.8. Özet	165
6.9. Sorular	165
Bölüm 7. İşlemci Organizasyonu: İşlemci, Mikroişlemci ve Mikrodenetleyiciler	167
7.1. İşlemci, Mikroişlemci, Mikrodenetleyici ve İşlem Birimi Kavramları	168
7.1.1. İşlemci ve Mikroişlemci Arasındaki Fark	171
7.1.2. Mikrodenetleyici ve Mikroişlemci Arasındaki Fark	171
7.1.3. Modern İşlemci Mimari Bileşenleri	172
7.1.4. Diğer Özel İşlemci Türleri: DSP, GPU, APU, SoC ve FBGA	174
7.2. Kontrol Birimi Organizasyonu ve Veri-İşleme-Yolu	179
7.2.1. Veri-işleme-yolu Organizasyonu	179
7.2.2. Kontrol Birimi Organizasyonu	180
7.3. Komut Yürütme Aşamaları ve Pipeline Komut İşleme Organizasyonu	181
7.3.1. Komut Yürütme Aşamaları	182
7.3.2. Pipeline Yapıda Performansı Etkileyen Olumsuzluklar	183
7.4. Saklayıcılar ve Saklayıcı Dosyası Organizasyonu	185
7.5. ALU Organizasyonu ve Modern ALU Özellikleri	186
7.5.1. ALU Tasarım İlkeleri	187
7.5.2. Pipeline Mimaride ALU İlişkisi	188
7.6. Özet	188
7.7. Sorular	189
Bölüm 8. İşlemci Denetim Birimi	191
8.1. Denetim Biriminin Görevleri	192
8.2. Üretilen Tipik Kontrol İşaretleri Örneği	193
8.3. Sabit-devreli Denetim Birimi $\approx$ <i>Hardwired Control Unit</i>	194
8.4. Mikro-programlı Denetim Birimi	197
8.5. Modern Denetim Birimlerinde Pipeline Mimari Etkileşimi	200
8.7. Özet	201
8.8. Sorular	201
Bölüm 9. Pipeline Komut Yürütme Mimarisi ve İşlemci Performansı	203
9.1. Pipeline Yaklaşımının Temel Mantığı	203
9.1.1. Pipeline Aşamaları: Klasik 5-katmanlı Örnek	204
9.1.2. Pipeline Mimarini Getirdiği Kazanç: Hızlanma $\approx$ <i>Speedup</i>	206
9.2. Pipeline Yapıda Veri Bağımlılığı ve Sınırlamalar	208
9.2.1. Pipeline Mimarinin Sınırlamaları	210

9.3. Modern İşlemcilerde Pipeline Uygulamaları	211
9.3.1. Modern Pipeline Uygulamasında Süperskaler İşlemciler	212
9.3.2. Pipeline Mimarisinde Grafik İşlemciler	213
9.4. Yapay Zeka ve Derin Öğrenme Hızlandırıcılarında Pipeline Yapı	215
9.5. Dijital İşaret İşleme (DSP) Birimleri ve Pipeline Mimari	215
9.6. Modern İşlemcilerde Hızlanma Analiz Sonuçları	216
9.7. Pipeline Mimaride Dikkat Edilmesi Gerekenler	217
9.8. Özet	219
9.9. Sorular	219
Bölüm 10. Kesme Mekanizması: IRQ/NMI, Kesme Hizmet Rutini	221
10.1. Sistemlerde Kesme Mekanizması Gerekliliği	221
10.2. Kesme Mekanizması Yapısı	223
10.2.1. Kesme Mekanizması Bileşenleri ve İşlemci/Denetleyici Farkı	224
10.2.2. Maskelenebilir ve Maskelenemeyen Kesmeler	228
10.2.3. Kesme Vektör Tablosu	229
10.2.4. Kesme Sürecinde Öncelik Durumları	230
10.3. Kesmenin Tetiklenmesi ve Üretilmesi	231
10.3.1. Yazılım Kaynaklı Kesmeler	232
10.3.2. Donanım Kaynaklı Kesme	233
10.3.4. İç-içe Kesme: Kesme Süreci İçinde Yeni Kesme İsteği	233
10.4. Adım Adım Klasik Kesme Davranışı	234
10.5. Pipeline Mimarisi ile Kesme Etkileşimi	235
10.5.1. Hassas Kesme ve Belirsiz Kesme Kavramları	235
10.5.2. Kesme Gecikmesi ve Pipeline Derinliği	236
10.5.3. Mimari Örnekler: MIPS, ARM ve x86 Pipeline-Kesme Yönetimi	236
10.6. Kesme ile İstisna Arasındaki Farklar	237
10.7. Özet 10.8. Sorular	238
Bölüm 11. Mikrodenetleyici Mimarileri ve Organizasyonu	239
11.1. Mikrodenetleyici Mimarisinin Kavramsal Temeli	239
11.1.1. Donanım Organizasyonunun Temel Bileşenleri	240
11.1.2. Mimari Evrim ve Performans Eğilimleri	241
11.2. Mikrodenetleyicilerde Kesme Mekanizması	245
11.3. Yaygın Mikrodenetleyici Mimarileri: 8051, PIC, AVR, ARM, RISC-V	264
11.3.1. Intel 8051 Mikrodenetleyicisi	246
11.3.2. Microchip PIC Serisi Mikrodenetleyiciler	247

11.3.3. Atmel AVR Mikrodenetleyicileri	249
11.3.4. ARM Cortex-M Serisi	250
11.3.5. RISC-V Mikrodenetleyicileri	252
11.4. Örnek Bir Mikrodenetleyici İncelmesi: 8051 Ailesi	253
11.4.1. 8051 Mikrodenetleyicisinin Genel Yapısı	254
11.4.2. 8051 Çevre Birimleri	254
11.4.3. 8051’de Kesme Mekanizması	255
11.4.4. 8051’in ISA’sı: Komut Kümesine Genel Bir Bakış	259
11.5. Özet	265
11.6. Sorular	266
Bölüm 12. Mimari Açından Motorola ve Intel Aileleri	267
12.1. Motorola İşlemcilerinin Genel Özellikleri	267
12.1.1. Motorola 68K Serisi İşlemciler ve Temel Özellikleri	268
12.1.2. Motorola 68K Mimari Ayrıntıları	269
12.1.3. Motorola 68K Serisi Sonrası Gelişmeler	270
12.1.4. Power PC İşlemcisi ve Sonrası	271
12.1.5. Motorola Akıllı Telefon İşlemcileri	271
12.2. Intel İşlemcilerinin Genel Özellikleri	272
12.2.1. Intel İşlemciler ve Temel Özellikleri	273
12.2.2. Intel Mimari Ayrıntıları	273
12.2.3. Pentium Serisinin Sonu ve Core Serisinin Başlangıcı	275
12.2.4. Intel Core i9-14900KS	275
12.3. Motorola ve Intel Ailelerin Karşılaştırılması	276
12.3.1. Motorola 68K ve Intel x86 Serilerin Karşılaştırması	276
12.3.2. Motorola ve Intel İşlemcilerinin Organizasyon Karşılaştırılması	277
12.4. Motorola ve Intel Dışında İşlemciler: ARM, MIPS, SPARC, Dec Alpha	280
12.4.1. ARM Mimarisi (Advanced RISC Machines)	280
12.4.2. MIPS Mimarisi	281
12.4.3. SPARC (Ölçeklenebilir İşlemci Mimarisi)	282
12.4.4. PowerPC $\approx$ IBM – Motorola – Apple	283
12.4.5. DEC Alpha	284
12.4.6. IBM z/Architecture $\approx$ Mainframe İşlemcileri	285
12.4.7. GPU Mimarileri $\approx$ NVIDIA, AMD	285
12.4.8. RISC-V	286
12.5. Özet	287
12.6. Sorular	288

Bölüm 13. Taşınabilir Cihaz Mimarileri	289
13.1. Gelişmiş Mobil İşlemci Türleri	291
13.2. Bellek ve Saklama Organizasyonu	292
13.2.1. LPDDR Bellekler $\approx$ <i>Low Power Double Data Rate Memory</i>	292
13.2.2. Cep (Cache) Bellek ve Hiyerarşi	293
13.2.3. Flash Saklama Birimi ve UFS/eMMC	294
13.3. Mobil Cihazlarda Enerji Verimliliği ve Güç Yönetimi	295
13.3.1. Dinamik Voltaj ve Frekans Ölçeklemesi (DVFS/AVFS)	295
13.3.2. Uyku ve Düşük Güç Modları	298
13.4. Taşınabilir Sistem İşlemci Mimarisi ARM	298
13.4.1. ARM (Advanced RISC Machines) ve RISC Felsefesi	298
13.4.2. ARM Mimarisi Temel Özellikleri	299
13.4.3. ARM Mimarisi Aileleri	304
13.5. “big.LITTLE” Çekirdek Yapısı ve Heterojen Tasarım	306
13.6. Özet	307
13.7. Sorular	308
Bölüm 14. Yapay Zeka için Bilgisayar Mimarileri / Donanımlar	309
14.1. Yapay Zeka Uygulamasının İşlem Süreci ve Paralellik Doğallığı	309
14.1.1. Derin Öğrenmede İleri Geçiş ve Geri Yayılım	310
14.1.2. Sinir Ağlarında Nöron İşlemleri	310
14.2. Yapay Zeka Uygulamaları Özel Donanım Birimleri	312
14.2.1. Grafik İşleme Birimi $\approx$ <i>Graphics Processing Unit (GPU)</i>	312
14.2.3. Tensör İşleme Birimi $\approx$ <i>Tensor Processing Unit (TPU)</i>	313
10.2.4. Sinirsel İşlem Birimi $\approx$ <i>Neural Processing Unit (NPU)</i>	314
14.2.5. GPU, TPU ve NPU Karşılaştırması	315
14.2.6. Vaka Analizi: Google TPU Mimarisi	315
14.3. Derin Öğrenme İşlem Akışı	316
14.4. Uç Yapay Zeka (Edge AI) ve Donanım Tabanlı Öğrenme	317
14.5. Tipik Bir Yapay Zeka Sunucu Sistemi	318
14.5.1. Büyük YZ Modellerinde GPU ve Hızlandırıcıların Rolü	319
14.6. Yapay Zeka Uygulaması Geliştirme Framework Altyapısı	320
14.6.1. Framework ile Mimari/Donanım İlişkisi	320
14.6.2. Yazılım Mimarisi ile Donanım Katmanları Arasındaki Etkileşim	320
14.6.3. Yapay Zeka Framework Türleri	321
14.7. Komple Yapay Zeka Bulutunda Gerekli Sunucu Türleri	324
14.7.1. Sunucu Sistemlerinin Üreticileri	324

14.7.2. Yapay Zeka Sunucuları Ağ Topolojisi	325
14.7.3. Uygulama Sunucusu ile Model Sunucusu İlişkisi	326
14.8. Özet	327
14.9. Sorular	327
Bölüm 15. İşlemci Tasarımında En Alt Organizasyon Seviyesi	329
15.1. Kombinezonsal Devre Tasarımı	329
15.1.1. Örnek: 1-bitlik Toplayıcı Devresi Tasarımı	331
15.1.2. Örnek: Aritmetik Mantık Birim (ALU) Tasarımı	332
15.2. Ardışıl Mantıksal Devre Tasarımı	334
15.3. Mantıksal Devre Tasarımında Algoritmik Yaklaşım	337
15.4. Basit 4-bitlik İşlem Birimi Tasarımı	338
15.5. Özet 15.6. Sorular	345
Bölüm 16. Biyolojik Bilgisayarlar ve Yeni Nesil Bilgi İşleme Mimarileri	347
16.1. DNA, Protein ve Hücre Tabanlı Bilgi İşleme	349
16.1.1. DNA Tabanlı Bilgi İşleme	349
16.1.2. Protein Tabanlı Bilgi İşleme	351
16.1.3. Hücre Tabanlı Bilgi İşleme	352
16.1.4. Biyolojik Bilgisayar Yaklaşımlarının Karşılaştırılması	353
16.2. Biyolojik Bilgisayarların Mimari Yaklaşımı	353
16.2.1. Mimari Temel: Von Neumann Dışı Bir Yapı	353
16.2.2. Mimari Katmanlar	354
16.2.3. Biyolojik Donanım Bileşenleri	354
16.2.4. Mimari Özellikler ve Sistem Dinamikleri	355
16.2.5. Mimari Sınıflandırma Önerisi	355
16.3. Biyolojik Bilgisayarların Teknik Özellikleri	356
16.3.1. İşlem Hızı ve Paralellik	357
16.3.2. Hata Toleransı ve Kendini Onarma Özelliği	358
16.3.3. Enerji Verimliliği, Ölçeklenebilirlik ve Depolama Yoğunluğu	358
16.4. Olası Uygulama Alanları: Tıp, Yapay Zeka ve Nano-biyoteknoloji	359
16.4.1. Tıp ve Biyomedikal Uygulamalar	359
16.4.2. Yapay Zeka ve Biyomoleküler Hesaplama	360
16.4.3. Nano Sistemler ve Biyoentegre Teknoloji	361
16.5. Biyolojik Bilgisayar Proje Örnekleri	361
16.5.1. DNA Tabanlı Kanser Hücresi Algılayıcı Biyolojik Bilgisayar	362
16.5.2. CL1: İnsan Beyin Hücreleriyle Çalışan İlk Ticari Biyolojik Bilgisayar	363

16.5.3. DNA Tabanlı Moleküler Mantık Devreleri ile Kanser Tanısı	365
16.6. Biyolojik Bilgisayarlarda Etik, Biyogüvenlik ve Toplumsal Sorumluluk	367
16.7. Özet	368
16.8. Sorular	369
Bölüm 17. İşletim Sistemi ile Bilgisayar Mimarisi Etkileşimi	371
17.1 İşletim Sistemlerinin Genel Yapısı ve Mimarisi	372
17.1.1 İşletim Sisteminin Temel Bileşenleri	373
17.1.2 İşletim Sistemi Mimarisi Türleri	376
17.1.3. İşletim Sisteminin Donanım ile Etkileşim Noktaları	377
17.2. Bağlam Anahtarlama ve Saklayıcıların Korunması	378
17.3. Ayrıcalık Düzeyleri ve Halka Organizasyonu	379
17.4. Bellek Yönetim Birimi (MMU) ve Çeviri Önbellegi (TLB) Organizasyonu	380
17.5. Donanım Destekli Güvenlik	381
17.5.1 Mimari Yaklaşımlar	381
17.5.2 İşletim Sistemi Üzerindeki Etkiler	382
17.6. Özet	383
17.7. Sorular	383
Ek 1. RISC-V Assembly Laboratuvar Deneyleri	385
Deney 1. Toplama ve Çıkarma İşlemleri	387
Deney 2. Koşullu Dallanma ve Karar Yapısı	387
Deney 3. Döngü ve Sayaç Uygulaması	388
Deney 4. Dizi Üzerinde Toplama	388
Deney 5. Basit Giriş/Çıkış İşlemleri (Simülasyon Ortamında)	389
Deney 6. Sabit Sayıların Toplanması	390
Deney 7. Koşullu Dallanma	390
Deney 8. Döngü ile Sayı Sayma	391
Deney 9. Dizi Elemanlarının Toplanması	392
Deney 10. Faktöriyel Hesaplama	392
Deney 11. Klavyeden Girilen İki Sayıyı Karşılaştırma	393
Deney 12. Fibonacci Serisinin İlk 10 Elemanını Hesaplama ve Belleğe Yazma	394
Deney 13. Bir Sayının Asal Olup Olmadığını Belirleme	395
Deney 14. RISC-V ile İki Sayının OBEB (GCD) Hesaplanması	396
Kaynakça	399
Dizin	410

Önsöz

Bilgisayar mimarisi, bir bilgisayar sisteminin yazılım tarafından nasıl görüldüğünü ve donanım kaynaklarının hangi ilkeler doğrultusunda sunulduğunu tanımlayan temel disiplindir. İşlemci mimarisi, komut kümesi yapıları, bellek hiyerarşileri, paralel yürütme mekanizmaları ve donanım–yazılım etkileşimi, modern bilgi işlem sistemlerinin performansını, güvenliğini ve ölçeklenebilirliğini doğrudan belirler.

Bu kitap, modern bilgisayar mimarisinin temel kavramlarını sistematik bir yaklaşımla ele alarak, mimari tasarım kararlarının işletim sistemi, performans ve güvenlik üzerindeki etkilerini açıklamayı amaçlamaktadır. Klasik mimari modellerden başlanarak pipeline yapıları, çok çekirdekli işlemciler, bellek yönetim mekanizmaları ve güncel işlemci mimarileri bütüncül bir çerçeve içinde incelenmiştir.

Bilgisayar mimarisi ile bilgisayar organizasyonu arasındaki kavramsal ayrım kitap boyunca özellikle vurgulanmıştır. Organizasyon, mimarinin donanım düzeyinde nasıl gerçekleştirildiğini ele alırken; mimari, bu gerçekleştirimin yazılım açısından sunduğu soyutlama ve davranış özelliklerini tanımlar. Bu ayrımın netleştirilmesi, sistem düzeyinde doğru analiz ve tasarım yapabilmenin temel koşullarından biridir.

Bu eser, bilgisayar ve yazılım mühendisliği öğrencileri ile bilgisayar sistemleriyle doğrudan çalışan araştırmacı ve uygulayıcılar için hazırlanmış olup okuyucuya modern bilgisayar sistemlerini teknik düzeyde değerlendirme ve yorumlama yetkinliği kazandırmayı hedeflemektedir.

Toros Rifat ÇÖLKESEN
İstanbul

Profesyonel düzeyde algoritma tasarlayıp geliştirebilmek, sistem mimarisi üzerine farkındalık ve bilgi gerektirir. Algoritma tasarımı, sistem mimarisinden bağımsız düşünülemez!
– T. R. Çölkesen

Kitap Hakkında

Bu kitap, bilgisayar mimarisini yalnızca donanım bileşenleri düzeyinde değil; işletim sistemi, performans, güvenlik ve güncel mimari eğilimlerle birlikte ele alan bütüncül bir başvuru kaynağı olarak tasarlanmıştır. Bu nedenle içerik, temel kavramlardan başlayıp ileri düzey mimari yapılara doğru adım adım ilerleyen bir yaklaşımla hazırlanmıştır.

Kitabın ilk bölümleri bilgisayar mimarisinin temel kavramlarını, tarihsel gelişimini ve mimari–organizasyon ayrımını ortaya koymayı amaçlamaktadır. Orta bölümlerde komut kümeleri, bellek hiyerarşisi, kesme mekanizmaları, G/Ç organizasyonu ve işlemci iç yapıları ayrıntılı biçimde ele alınarak klasik mimari bilgi omurgası oluşturulmuştur. İlerleyen bölümlerde ise çok çekirdekli sistemler, hızlandırıcılar, yapay zeka işlem birimleri, işletim sistemi etkileşimi ve donanım destekli güvenlik gibi güncel ve ileri konulara yer verilmiştir.

Temel mimari kavramlara hâkim okuyucular, kitaptaki bölümleri gereksinimlerine göre doğrudan okuyabilirler; ancak ders amaçlı kullanımda bölümlerin sıralı olarak izlenmesi önerilmektedir. Bölüm sonlarında verilen özet ve değerlendirme soruları, kavramların pekiştirilmesi ve sistem düzeyinde düşünme becerisinin geliştirilmesi amacıyla hazırlanmıştır.

Ek bölümde sunulan RISC-V assembly laboratuvar uygulamaları, mimari kavramların yalnızca teorik düzeyde kalmamasını sağlayarak, işlemci davranışlarının doğrudan gözlemlenmesine imkan verir. Bu ek bölüm özellikle mikroişlemci, gömülü sistemler ve bilgisayar mimarisi derslerinde uygulamalı çalışma yapmak isteyenler için tamamlayıcı bir kaynak niteliğindedir.

Kitap boyunca mimari terimler tutarlı biçimde kullanılmaya özen gösterilmiş, sıkça karıştırılan kavramlar özellikle ayrıştırılmış ve donanım–yazılım sınırı bilinçli olarak vurgulanmıştır. Bu yönüyle eser, okuyucuya bilgisayar sistemlerinin yalnızca “*nasıl çalıştığını*” değil, aynı zamanda “*neden bu şekilde tasarlandığını*” da göstermeyi hedeflemektedir.

Hazırlanması yıllara yayılan bu çalışmanın olası eksiklerinin giderilmesi ve daha da geliştirilmesine katkı sağlayacak her türlü yapıcı görüş ve öneri, memnuniyetle karşılanacaktır.

Papatya Bilim Yayınevi
Yayın Kurulu

Çok Kullanılan Kısaltmalar

ALU	: Aritmetik Mantık Birimi $\approx$ <i>Arithmetic Logic Unit</i>
API	: Uygulama Programlama Arayüzü $\approx$ <i>Application Programming Interface</i>
BIOS	: Temel Giriş/Çıkış Sistemi $\approx$ <i>Basic Input/Output System</i>
CPU/MİB	: Merkezi İşlem Birimi $\approx$ <i>Central Processing Unit</i>
CSR	: Denetim ve Durum Saklayıcıları $\approx$ <i>Control and Status Registers</i>
DMA	: Doğrudan Bellek Erişimi $\approx$ <i>Direct Memory Access</i>
DRAM	: Dinamik RAM $\approx$ <i>Dynamic Random Access Memory</i>
FPU	: Kayan Noktalı İşlem Birimi $\approx$ <i>Floating Point Unit</i>
GPU	: Grafik İşlem Birimi $\approx$ <i>Graphics Processing Unit</i>
ISA	: Komut Kümesi Mimarisi $\approx$ <i>Instruction Set Architecture</i>
L1/L2/L3	: Cep Bellek Hiyerarşileri $\approx$ <i>Cache Levels Hierarchies</i>
MMU	: Bellek Yönetim Birimi (BYB) $\approx$ <i>Memory Management Unit</i>
MPU	: Bellek Koruma Birimi $\approx$ <i>Memory Protection Unit</i>
MİB	: Merkezi İşlem Birimi $\approx$ CPU – İşlemci çekirdeği bağlamında
NPU	: Sinirsel İşlem Birimi $\approx$ <i>Neural Processing Unit</i>
OS	: İşletim Sistemi $\approx$ <i>Operating System</i>
RAM	: Rastgele Erişimli Bellek $\approx$ <i>Random Access Memory</i>
RISC	: Azaltılmış Komut Kümesi Bilgisayarı $\approx$ <i>Reduced Instruction Set Computer</i>
RISC-V	: Açık Kaynak RISC Komut Kümesi Mimarisi
RTOS	: Gerçek Zamanlı İşletim Sistemi $\approx$ <i>Real-Time Operating System</i>
SIMD	: Tek Komut Çoklu Veri $\approx$ <i>Single Instruction Multiple Data</i>
SIMT	: Tek Komut Çoklu İş Parçacığı $\approx$ <i>Single Instruction, Multiple Threads</i>
SoC	: Yonga Üzerinde Sistem $\approx$ <i>System on Chip</i>
SRAM	: Statik Rastgele Erişimli Bellek $\approx$ <i>Static Random Access Memory</i>
SYSCALL	: Sistem Çağrısı
TLB	: Çeviri Önbellegi $\approx$ <i>Translation Lookaside Buffer</i>
TPU	: Tensör İşlem Birimi $\approx$ <i>Tensor Processing Unit</i>
VM	: Sanal Makine $\approx$ <i>Virtual Machine</i>
VRF	: Vektör Saklayıcı Dosyası $\approx$ <i>Vector Register File</i>

Çok Kullanılan Terimler

Processor $\approx$ İşlemci
Core $\approx$ Çekirdek (İşlemci)
Instruction $\approx$ Komut
Opcode $\approx$ İşlem Kodu
Fetch $\approx$ Komut Alma
Decode $\approx$ Komut Çözme
Execute $\approx$ Yürütme
Out-of-Order Execution $\approx$ Sıra-dışı Yürütme
Main Memory $\approx$ Ana Bellek
Cache Memory $\approx$ Cep Bellek
Cache Coherence $\approx$ Cep Bellek Tutarlılığı
Memory Hierarchy $\approx$ Bellek Hiyerarşisi
Virtual Memory $\approx$ Sanal Bellek
Page Fault $\approx$ Sayfa Hatası
Operating System $\approx$ İşletim Sistemi
Kernel $\approx$ Çekirdek (Yazılım)
Privilege Level $\approx$ Yetki Seviyesi
Protection Ring $\approx$ Koruma Halkası
System Call (syscall) $\approx$ Sistem Çağrısı
Context Switch $\approx$ Bağlam Anahtarlama
Scheduler $\approx$ Zamanlayıcı
Interrupt $\approx$ Kesme
Interrupt Vector Table $\approx$ Kesme Vektör Tablosu
Exception $\approx$ İstisna
Multicore Processor $\approx$ Çok Çekirdekli İşlemci
Multithreading $\approx$ Çoklu İş Parçacığı
Accelerator $\approx$ Hızlandırıcı
Assembly Language $\approx$ Assembly Dili
Register $\approx$ Saklayıcı
General Purpose Register $\approx$ Genel Amaçlı Saklayıcı
Branch Instruction $\approx$ Dallanma Komutu