

BİLGİSAYAR MİMARİSİ



Feza BUZLUCA
İstanbul Teknik Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

<http://www.akademi.itu.edu.tr/buzluca>
<http://www.buzluca.info>



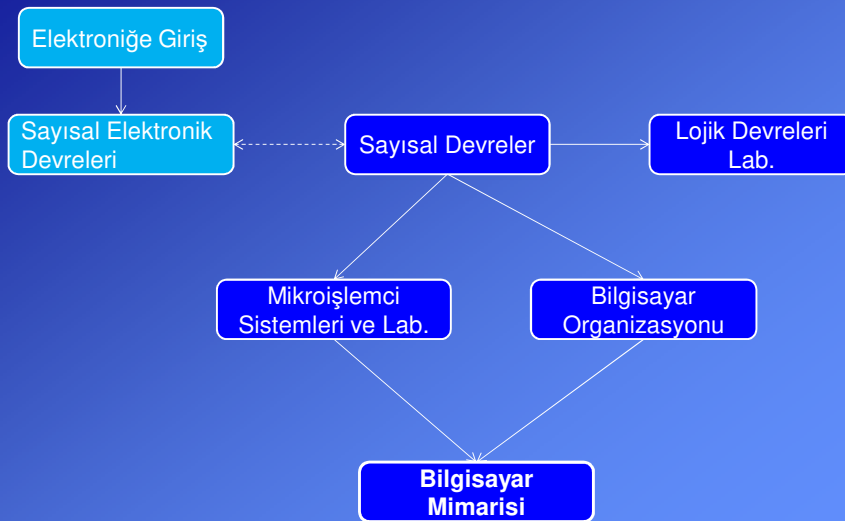
Bilgisayar Mimarisi Ders Notlarının Creative Commons lisansı Feza BUZLUCA'ya aittir.

Lisans: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.tr>

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.tr>



1.0 İTÜ Bilgisayar Mühendisliği Bölümündeki donanım derslerinin bağlantıları



1.1. Bilgisayar mimarisini neden öğrenmek gerekir?

Kaynak: *IEEE/ACM Bilgisayar Konulu Ders Programları 2013*,
Hazırlayan: The Joint Task Force on Computing Curricula
of the IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Computer Society
and ACM (Association for Computing Machinery)

- Bilgisayar/bilişim dünyasında çalışan profesyoneller, bilgisayarı programları bir sihir sonucu çalıştıran kapalı bir kutu gibi görmemeliler.
- Bilgisayar mimarisini, bilgisayar mühendisliğinin temel konularından biridir ve bir bilgisayar mühendisi işini iyi yapabilmek için bu konuda (en azından) pratik bilgiye sahip olmalıdır.
- **Donanım çözümleri** üretmek için bilgisayar mimarisini öğrenmek gereklidir.
- **Yüksek performanslı yazılımlar** geliştirebilmek için paralellik, hız, gecikme gibi konuları bilgisayar mimarisini çerçevesinde öğrenmeleri gereklidir.
- **Uygun bir bilgisayar sistemi seçebilmek** için çeşitli donanım birimlerinin özelliklerini ve sistem üzerindeki etkilerini bilmek gerekir.
Örneğin; MİB'in saat işareti hızı, bir komutun çevrim sayısı, bellek boyu, ortalama bellek erişim süresi gibi.

Dersin Amacı:

1. Bilgisayar sistemlerinin donanım tasarımlarını öğrenmek
2. İşlemci yapısı, hızı, bellek kapasitesi gibi seçenekleri değerlendirerek belli bir sorunu çözmek (yürüteceğimiz projeyi gerçekleştirmek) için uygun bilgisayar sistemlerini seçebilmek
3. Büyük veya adanmış (*embeded*) sistemler için kaliteli yazılım geliştirebilmek.

Konular:

- İş hattı (*Pipeline*)
 - Komut iş hattı (*Instruction pipeline*), komut düzeyinde paralellik
 - İş hattındaki sorunlar ve çözümleri
- Giriş/Çıkış Organizasyonu (*Input/Output Organization*)
 - El sıkışma
 - Merkezi işlem birimi (MİB) - bellek arası veri aktarımı
- Kesme (*Interrupt*)
 - Vektör, öncelik, iç içe kesmeler
- Doğrudan Bellek Erişimi (*Direct Memory Access - DMA*)
- Bellek Organizasyonu
 - Cep bellek (*Cache memory*)
 - Görüntü bellek (*Virtual Memory*)
- Disk dizileri, RAID: (Redundant Array of Independent/Inexpensive Disks)
- Çok işlemcili ve çok çekirdekli sistemler (*Multiprocessor and multicore systems*)
 - Cep bellek tutarlılığı (*Cache coherency*)
- Kayan Noktalı Sayılar (*Floating Point Numbers*)

1.2. Bir bilgisayar sisteminin katmanlı modeli:

Komut kümesi mimarisi (ISA) bir bilgisayar donanımının, alt düzey programcıya (sistem programlarına) görünen yüzüdür.

ISA, makine dili komutları, programcıya görünen saklayıcıları ve işlemcinin doğal veri yapılarını içerir.

1.3 Merkezi İşlem Birimi (The Central Processing Unit - CPU)

1.3.1 MİB'lerin sınıflandırılması

Çeşitli özelliklerine göre değişik gruplara ayırmak mümkündür.

- Operand sayılarına göre:
 - Sıfır operandlı (*Zero operand/address machines*) makineler
 - Yığın yapılı makine (*Stack machine*) olarak da adlandırılır.
 - Bir adresli makineler (*Accumulator machines*)
 - İki operandlı/adresli makineler (Saklayıcı-saklayıcı, saklayıcı-bellek, bellek-bellek)
 - Üç operandlı makineler
- Komut yapıları, sayıları ve adresleme kiplerine göre:
 - CISC (*Complex Instruction Set Computer*)
 - RISC (*Reduced Instruction Set Computer*)
- Komut ve veri belleklerine göre:
 - Von Neumann mimarisi
 - Harvard mimarileri

1.3.1.1 Komut yapıları, sayıları ve adresleme kiplerine göre:

- a) CISC (*Complex Instruction Set Computer*)
- b) RISC (*Reduced Instruction Set Computer*)

CISC:

Amaç:

- Derleyicilerin işini kolaylaştırmak: Makine dili yüksek düzeyli dillere yaklaşıp.
- Programların performansını arttırmak: Yetenekli komutlar ile daha kısa programlar yazmak mümkün olur.

Temel özellikleri:

- Çok sayıda komut (100 -250)
- Karmaşık komutlar ve adresleme kipleri (dolaylı adresleme ile bellek erişimi)
- Doğrudan bellek üzerinde işlem yapan komutlar
- Mikroprogramlı denetim birimi

Bu özelliklerin yan etkileri:

- Farklı uzunluklarda komutlar. Çözmek ve önceden bellekten okumak (*prefetch*) daha zordur.
- Bazı komutlar çok az kullanılır.
- İşlemcilerin içyapıları karmaşıktır.

Bkz. Ek A: Örnek CISC işlemci
MC 68000

RISC:

Yüksek düzeyli programlama dilleri ile yazılmış olan programların CISC makinelerde derlenmesi ile elde edilen kodlar incelendiğinde aşağıdaki noktalar belirlenmiştir:

- Çok sayıda atama ($A = B$) yapılmaktadır.
- Erişilen veri tipleri çoğunlukla yerel ve basit (dizi, matris olmayan) verilerdir.
- Makine dili programlarda en büyük yükü alt program çağruları oluşturmaktadır. Geri dönüş adresi, parametre aktarımı, yerel değişkenler, yığın (bellek) kullanımı
- Alt programların büyük çoğunluğu (%98) 6 ya da daha az parametre aktarmaktadır.¹
- Alt programların büyük çoğunluğu (%92) 6 ya da daha az yerel değişken kullanmaktadır.¹
- Alt program çağırma derinliği büyük çoğunlukla (%99) 8'den daha azdır.²

İncelenen programlardan elde edilen bu veriler dikkate alınarak merkezi işlem birimlerinin performanslarını arttırmak amacıyla daha az bellek erişimi yapan ve birazdan açıklanacak olan özelliklere sahip olan RISC işlemciler tasarlanmıştır.

1. Andrew S. Tanenbaum, Implications of structured programming for machine architecture, Communications of the ACM, Vol.21, No.3 (1978), pp. 237 - 246
2. Yuval Tamir and Carlo H. Sequin, "Strategies for Managing the Register File in RISC," IEEE Transactions on Computers Vol. C-32(11) pp. 977-989, 1983.

RISC Özellikleri:

Değişik özelliklere sahip RISC işlemciler bulunmakla birlikte aşağıdaki özellikleri ortaktır:

- Az sayıda komut vardır (yaklaşık 30), komutların işlevleri basittir.
- Az sayıda , basit adresleme kipi (örneğin 3 adet)
- Sabit uzunlukta komut yapısı (komut çözme işi kolaydır)
- Komutlar bellek üzerinde işlem yapmazlar, işlemler iç saklayıcılarda yapılır.
- Belleğe sadece yazma/okuma işlemleri için erişilir (*load-store architecture*).
- Tek çevrimde alınıp yürütülebilen komutlar (komut iş hattı (*pipeline*) sayesinde)
- Devrelendirilmiş (*hardwired*) denetim birimi.

Diğer Özellikler:

Aşağıdaki özelliklerin bazıları tüm RISC'lerde bulunmayabilir, bazıları ise CISC MIB'lerde de bulunabilir. Ancak bunlar RISC'ler için özellikle önemlidir.

- Çok sayıda saklayıcı (128-256) (*register File*)
- Kesişimli (*overlapped register window*) saklayıcı penceresi
- Komutlar için optimize edilebilen iş hattı
- Harvard mimarisi

Bkz. Ek B:
RISC işlemciler

CISC ve RISC işlemci örnekleri:

- CISC:
VAX, PDP-11, Intel x86 until Pentium, Motorola 68K.
- RISC:
MIPS, SPARC, Alpha, HP-PA, PowerPC, i860, i960, ARM, Atmel AVR
- Karışık (*Hybrid*) (Dış kabuğu CISC özellikleri göstermektedir ancak iç çekirdeği RISC yapısındadır: Pentium, AMD Athlon.

Günümüzdeki durum:

RISC işlemciler bazı CISC özellikleri tasarımlarına katarken bazı CISC işlemciler de RISC özellikleri içermektedir.

Sonuç olarak güncel bazı RISC tasarımları, örneğin PowerPC, "saf" bir RISC değildir.

Benzer şekilde bazı CISC işlemciler de, örneğin Pentium II ve sonrası, "saf" CISC tasarımlar değildir ve RISC işlemcilerin bazı özelliklerini taşımaktadırlar.

RISC işlemcilerin kullanıldığı ürünlere ilişkin örnekler:

- ARM:
 - Apple iPod , Apple iPhone, iPod Touch, Apple iPad.
 - Palm and PocketPC PDA, smartphone
 - RIM BlackBerry smartphone/email device.
 - Microsoft Windows Mobile
 - Nintendo Game Boy Advance
- MIPS:
 - SGI computers, PlayStation, PlayStation 2
- Power Architecture (IBM, Freescale (eski Motorola SPS)):
 - IBM supercomputers, midrange servers and workstations,
 - Apple PowerPC-tabanlı Macintosh
 - Nintendo Gamecube, Wii
 - Microsoft Xbox 360
 - Sony PlayStation 3
- Atmel AVR:
 - BMW otomobillerde denetçi olarak kullanılıyor.

1.3.1.2. MİB'lerin komut ve veri belleklerine göre gruplanması

a) Von Neumann Mimarisi:

Komutlar ve veriler aynı bellekte yer alır.

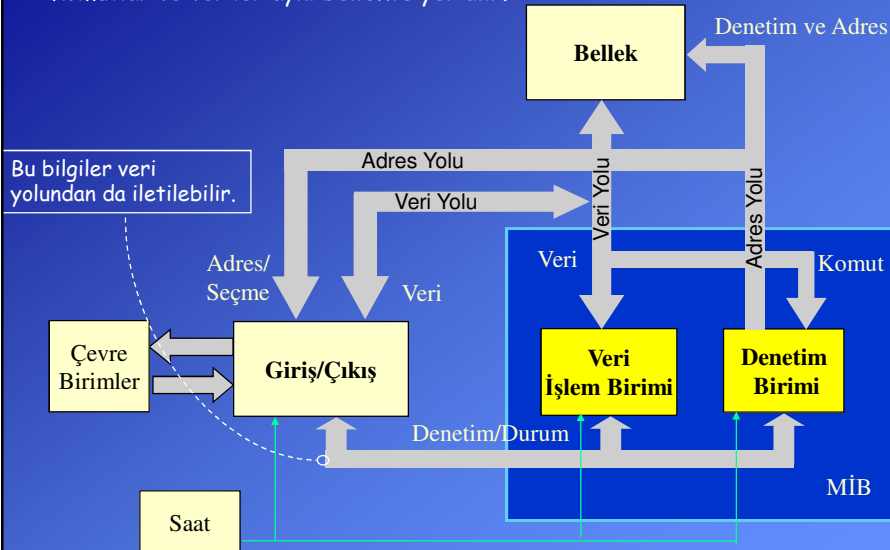
b) Harvard Mimarisi :

Komutlar ve veriler farklı belleklerde yer alırlar.

Adres ve veri yolları farklıdır, böylece aynı anda komut ve operand erişimi yapılabilir.

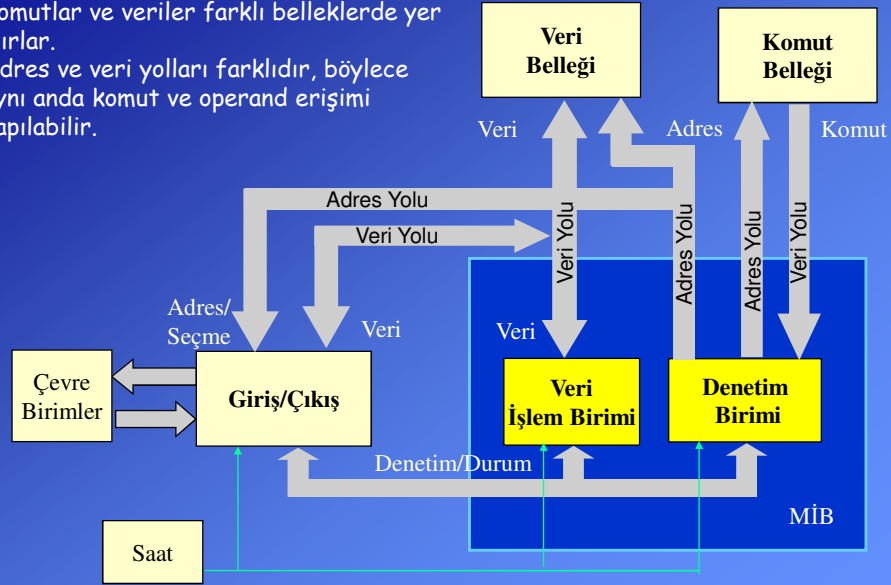
Von Neumann Mimarisi: John von Neumann (1903 - 1957)

Komutlar ve veriler aynı bellekte yer alır.



Harvard Mimarisi: İsim: Harvard Mark I , Harvard Üniversitesi

Komutlar ve veriler farklı belleklerde yer alırlar.
Adres ve veri yolları farklıdır, böylece aynı anda komut ve operand erişimi yapılabilir.

**1.3.2 Merkezi İşlem Birimi İç Yapısı:**• **Veri İşleme Birimi (Data Processing Unit) :**

Veriler üzerinde işlemler yapılır ve veriler MİB içinde saklanır.

Saklayıcılar, aritmetik-lojik birim (*Arithmetic and logic unit - ALU*), kayan noktalı işlem birimi, veri işleme iş hattı gibi bölümlerden oluşur.

• **Denetim Birimi (Control Unit) :**

Komutları çözer ve yorumlar. Veri işleme birimini oluşturan elemanlara gerekli denetim işaretlerini gönderir.

MİB'in ve bilgisayarın çalışmasını yöneten birimdir.

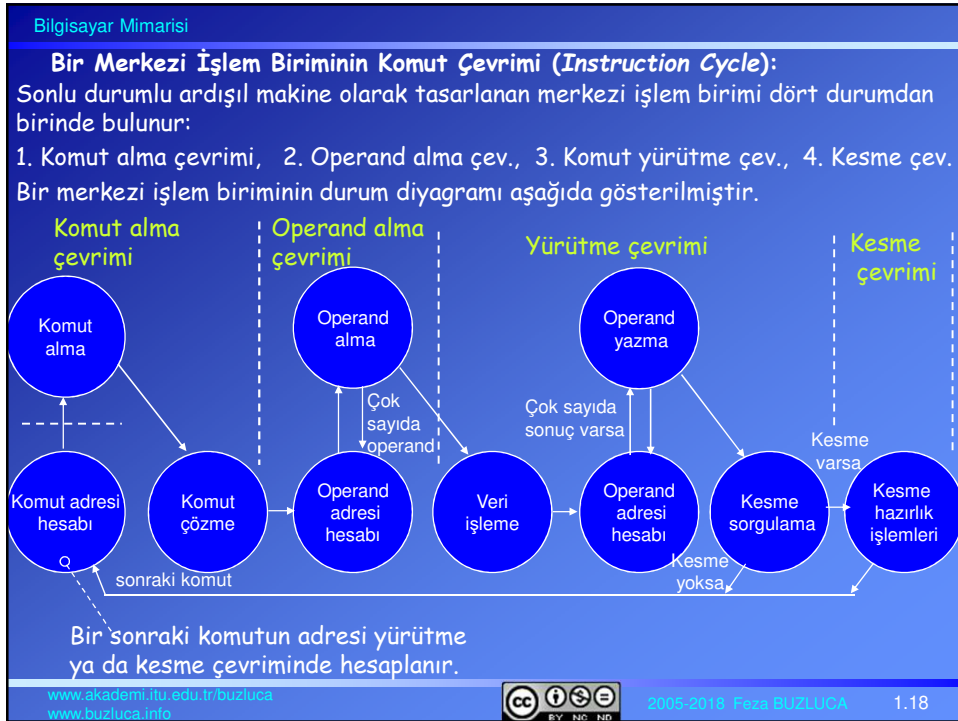
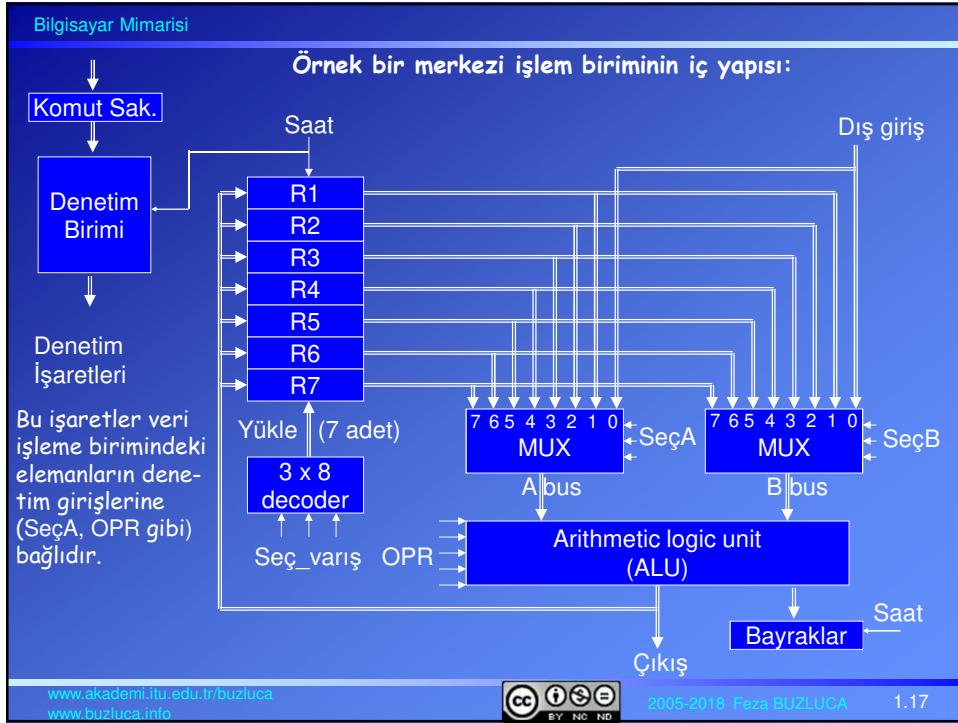
Bir sonlu durumu makine olarak tasarlanır. Durum bilgileri için "Bir Merkezi İşlem Biriminin Çalışma Döngüsünü" inceleyiniz: komut alma, operand alma, vd.

Bir eşzamanlı ardışıl sayısal devre olarak gerçekleştirilebilir (Devrelendirilmiş (*hardwired*)).

Ya da mikroprogramlı olarak gerçekleştirilir.

Hatırlatma: Mikroprogramlı denetim birimlerinde, makine dili komutlar daha alt düzeydeki mikrokomutlardan oluşan mikroprogram parçalarına dönüştürülürler.

Örnek bir merkezi işlem biriminin iç yapısı yansı 1.17'da gösterilmiştir.



1.4 Bilgisayarların Evrimi

Bilgisayar evriminin özellikleri:

İşlemci hızının artışı, devre tümleştirmedeki artış, elemanların boyutlarındaki küçülme, bellek boyutlarındaki büyüme, G/Ç kapasitesi ve hızındaki artış.

İşlemci hızındaki artışın nedenleri:

- **Malzemedeki gelişme:**
Mikroişlemcilerdeki elemanların küçülmesi; bu küçülme elemanlar arası uzaklığı da azaltmakta ve hızlanmayı sağlamaktadır.
- **Yapısal (organizational) gelişme:**
İş hattı gibi paralel işlem tekniklerinin kullanımı, çok sayıda ALU, çok sayıda paralel işlemci içeren tasarımlar
Cep bellekler (cache memories)

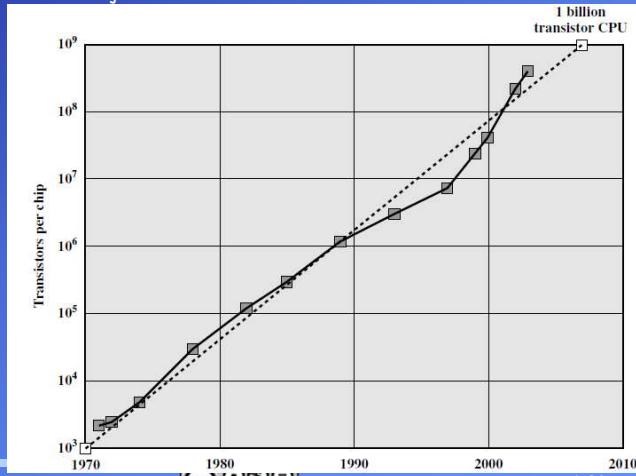
Bu derste özellikle yapısal gelişmeler ele alınacaktır.

Devrelerin Tümleştirilmesi

Moore kanunu (Gordon Moore, Intel'in kurucularından): "Bir devre yongasına (chip) yerleştirilebilen transistor sayısı her yıl ikiye katlanmaktadır ve bu eğilim yakın gelecekte de devam edecektir". (1965)

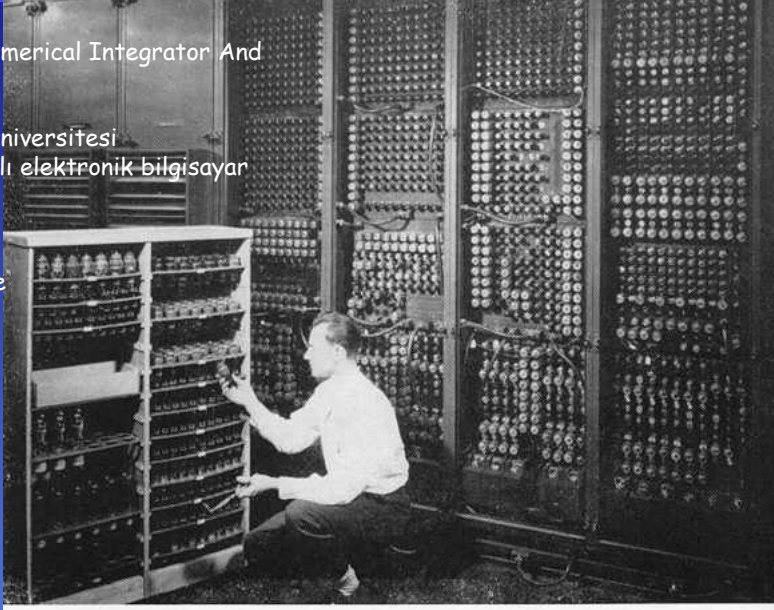
1970'lerden bir devre yongasına (chip) yerleştirilebilen transistor sayısı yaklaşık olarak her 18 ayda bir ikiye katlanmıştır.

Kaynak:
William Stallings,
Computer Organization and
Architecture, 8/e, Prentice
Hall, 2009



ENIAC 1946
(Electronic Numerical Integrator And
Computer),

Pennsylvania Üniversitesi
İlk genel amaçlı elektronik bilgisayar
30 ton
140 kW
5000
toplama/saniye



Replacing a bad tube meant checking among ENIAC's 19,000 possibilities.

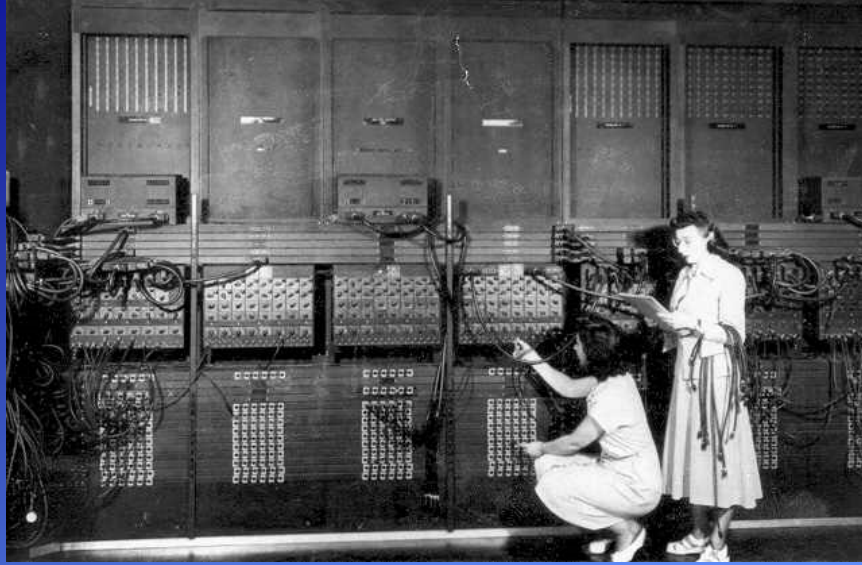
www.akademi.itu.edu.tr/buzluca
www.buzluca.info



2005-2018 Feza BUZLUCA

1.21

ENIAC'ın programlanması



Kaynak <http://www.library.upenn.edu/exhibits/>

www.akademi.itu.edu.tr/buzluca
www.buzluca.info



2005-2018 Feza BUZLUCA

1.22

Z3 (1941):

Konrad Zuse,
(1910-1995)

İlk genel amaçlı bilgisayar

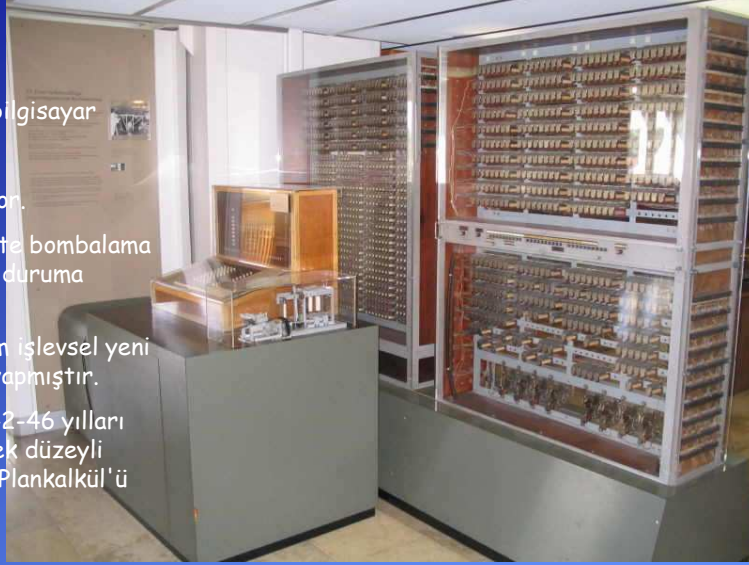
Elektromekanik

Röleler ile çalışıyor.

Orijinal Z3 1943'te bombalama sonucu çalışamaz duruma gelmiştir.

Zuse 1962'de tam işlevsel yeni bir Z3'ü baştan yapmıştır.

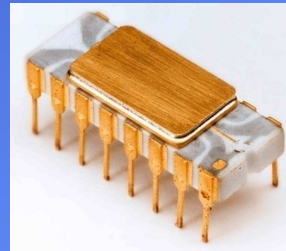
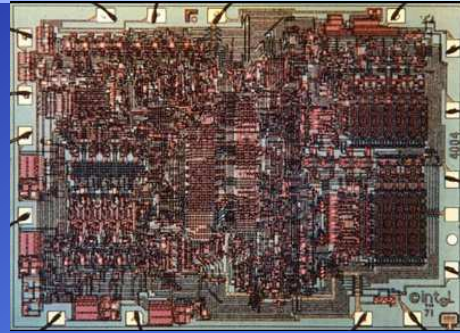
Konrad Zuse, 1942-46 yılları arasında ilk yüksek düzeyli programlama dili Plankalkül'ü tasarlamıştır.



İlk mikroişlemci:

Intel 4004

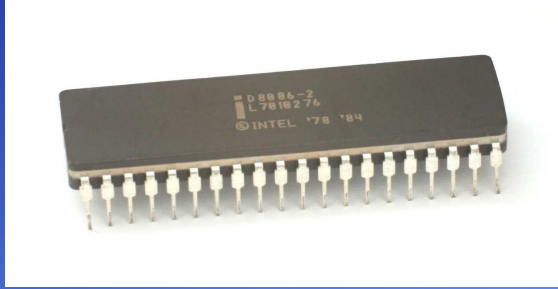
- 1971
- 4-bit veri işleme
- 2300 transistör
- Adreslenebilir bellek: 640 Byte
- 740 KHz
- 12 V



Kaynak <http://www.intel.com>

**x86 Ailesinin ilk elemanı:
Intel 8086**

- 1978
- 16 bit veri işleme
- 29000 transistör
- 3-10 MHz
- Adreslenebilir bellek: 1 MByte
- 5 V

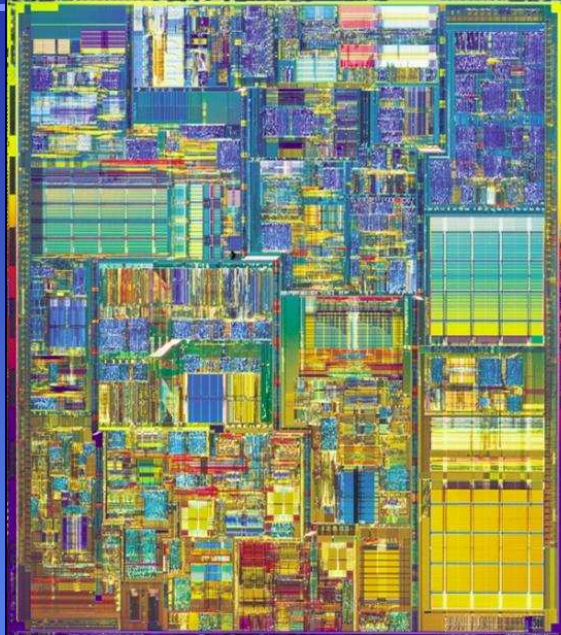


Bu resim Wikipedia'dan alınmıştır.

**Çok iplikli işlemciler:
Multithreading
(Hyper-threading)**

Intel Pentium4 + HT

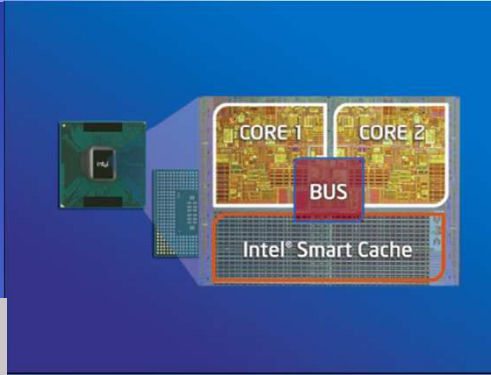
- 2003
- 32/64 bit veri
- 55 milyon transistör
- Adreslenebilir bellek: 64 GByte
- 3.4 GHz
- 1.2 V



Çok çekirdekli işlemciler: (Multicore Processors)

Intel® Core™ Duo

- 2006
- 64 bit veri
- 100 milyon transistör
- 2.66 GHz
- 1.5 V



Intel® Core™ i7-950 EE - 4960X

- 2013
- 4 GHz
- 6 adet çekirdek (core)
- 64 bit veri
- 64 GB bellek adresleme
- 1,5 MB L2, 15 MB L3 cep (cache) bellek

Bilgisayar Organizasyonu ve Mimarisindeki Gelişmeler

İşlemcilerin performanslarını arttırmak için üç yaklaşım bulunmaktadır:

1. İşlemcilerin donanım hızlarını arttırmak (Saat işareti hızı) (Problemler!)
2. Cep belleklerin (cache memories) boyutlarını ve hızlarını arttırmak
3. Bilgisayar organizasyonu ve mimarisinde yapısal iyileştirmeler yaparak programların daha verimli ve hızlı yürütülmesini sağlamak.

Intel mikroişlemcilerinin performans gelişimi sonraki yansıda gösterilmiştir.

Saat işaretinin hızının ve sayısal devrelerin yoğunluğunu artması sorunlara neden olmaktadır (yukarıdaki madde 1).

Güç: Yüksek hızlarda çalışan, yoğun devrelerde yüksek ısı üretilir ve bu ısıyı uzaklaştırmak zor olur (Güç engeli (The power wall) bkz. 1.30).

RC gecikmesi: Bir devrede transistörler arasında hareket eden elektronların hızları, metal bağlantıların dirençleri ve kapasitif etkileri ile sınırlanmaktadır.

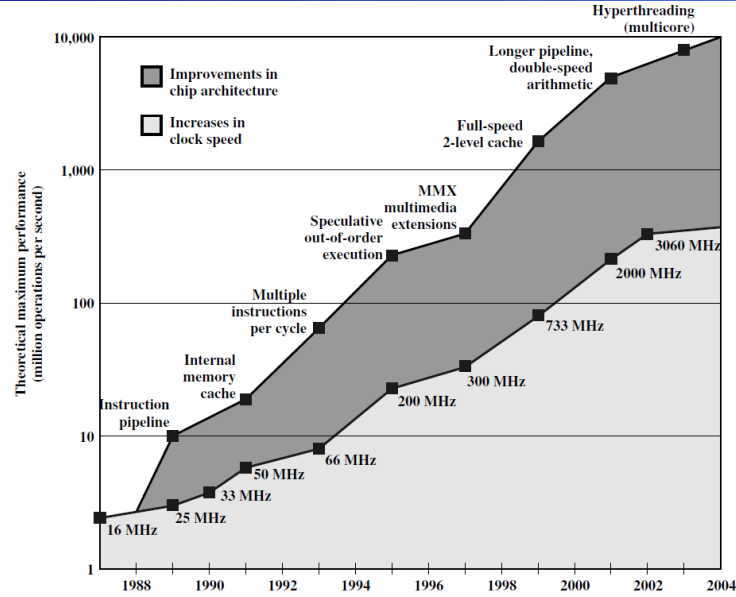
Yoğun devrelerde bağlantılar incelmekte bu da direnci arttırmaktadır. Bağlantıların yaklaşması ise aralarındaki kapasitif etkiyi güçlendirmektedir.

Bu nedenle işlemcilerin saat hızlarını arttırmak mümkün olmamaktadır.

Bellek gecikmesi: Ayrıca belleklerin hızları işlemcilerin hızlarından daha düşüktür. Bu durum işlemcilerin daha hızlı çalışmasını engellemektedir.

Intel Mikroişlemcilerinin Performansları:

Kaynak:
William Stallings,
Computer Organization
and Architecture, 8/e,
Prentice Hall, 2009



www.akademi.itu.edu.tr/buzluca
www.buzluca.info



2005-2018 Faza BUZLUCA 1.29

Güç Engeli (The Power Wall) *:

Transistör başına düşen dinamik güç (P), çalışma frekansı (f) ile çalışma geriliminin (V) karesinin çarpımı ile orantılıdır. ($P \sim V^2f$).

Gücü azaltmak için gerilim düşürülebilir ancak bu düşüş transistörlerin çalışma gerilimlerinin eşik değerleriyle sınırlıdır.

N aynı anda çalışan transistör sayısını göstermek üzere, bir tümleşik devrede oluşan toplam dinamik güç $P \sim Nf$ oranlığı ile ifade edilebilir.

Moore yasasına uygun olarak transistör sayısı ve aynı anda çalışma frekansı arttırılırsa tümleşik devrelerde **güç engeli** (power wall) adı verilen bir ısıl sınırı ulaşılır.

2003 yılında, işlemcilerdeki güç tüketimi tümleşik devre başına 200 W'ı geçmiştir. Bu güç tüketimi, kişisel bilgisayarlar için artık karşılanamayacak kadar pahalı olan soğutma teknolojilerini gerektirmeye başlamıştır.

Sektörde bir karar aşamasına gelinmiştir; mikroişlemcilerdeki transistör sayısındaki artışı azaltmak veya çalışma frekansındaki artışı azaltmak.

İkinci seçenek kabul edilmiştir; Moore yasası sürdürülmüş ama saat işaretindeki artıştan vaz geçilmiştir.

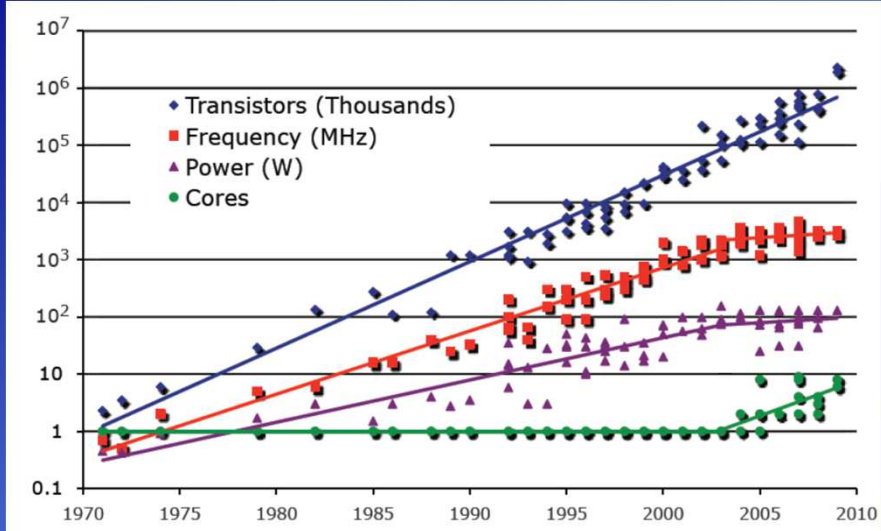
*Kaynak: T. M. Conte, E. P. DeBenedictis, P. A. Gargini, and E. Track, "Rebooting Computing: The Road Ahead," Computer, vol. 50, no. 1, pp. 20-29, Jan. 2017.

www.akademi.itu.edu.tr/buzluca
www.buzluca.info



2005-2018 Faza BUZLUCA 1.30

Mikroişlemcilerdeki Eğilimler:



Kaynak:

William Stallings, Computer Organization and Architecture, 10/e, Prentice Hall, 2015

www.akademi.itu.edu.tr/buzluca
www.buzluca.info



2005-2018 Feza BUZLUCA

1.31

MİB ile ana bellek arasındaki performans dengesi

Bilgisayar sistemlerinde farklı birimler arasındaki performans artışını dengelemek önemlidir.

Aksi durumda bir elemanın performansının düşük kalması diğer elemanların da verimli çalışmasını engelleyebilmektedir.

İşlemcilerin hızları bellek erişim sürelerindeki iyileşmeye göre çok daha hızlı gelişmiştir.

Örneğin; 3.2 GHz hızında çalışan dört çekirdekli bir Intel Core i7 işlemcisi, komutlar ve veriler için toplam 409.6 GB/s hızında bant genişliği kullanabilmektedir.

Buna karşın, DRAM teknolojisi ile oluşturulan bir ana bellek bunun sadece %6'sı kadar bir bant genişliği (25 GB/s) sağlayabilmektedir.

Aradaki bu açığı kapatmak için çeşitli teknikler uygulanmaktadır. Örneğin; cep bellek (cache memory), geniş veri yolları ile paralel bellek kullanımı gibi.

MİB ve ana bellek arasındaki hız farkının nasıl değiştiği bir sonraki yarıda gösterilmiştir.

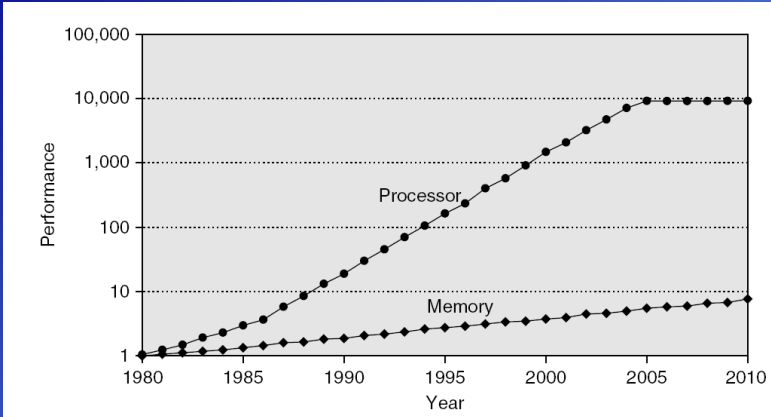
www.akademi.itu.edu.tr/buzluca
www.buzluca.info



2005-2018 Feza BUZLUCA

1.32

MİB ve ana bellek hızlarının zaman içinde değişimi



Tek işlemci

İşlemci eğrisi: Ortalama olarak saniyedeki bellek erişimi sayısındaki artış (bellek erişimleri arasındaki sürenin tersi) (tek işlemci)

Bellek eğrisi: DRAM tipindeki belleklere saniyede yapılabilen erişim sayısındaki artış (DRAM erişim gecikmesinin tersi)

Kaynak: Hennessy and Patterson, "Computer Architecture A Quantitative Approach", 5/e, MK, 2012.

Performans değerlendirme standartları

Saniyede yürütülen milyon adet komut (**MIPS** "Millions of instructions per second") ve saniyede yürütülen kayan noktalı işlem sayısı (**MFLOPS** "floating-point operations per second") işlemcilerin performansını değerlendirmek için yetersiz kalmaktadır.

Komut tiplerinin farklılığı (örneğin CISC-RISC farkı) nedeniyle farklı mimarilerdeki işlemcileri yürütülen komut sayısına göre değerlendirmek uygun değildir.

SPEC Performans Değerlendirme Programları: (<http://www.spec.org/>)

En yaygın kabul gören değerlendirme programları bir sanayi konsorsiyumu olan System Performance Evaluation Corporation (SPEC) tarafından sağlanmaktadır.

Yüksek düzeyli dillerle yazılan programlar içeren değerlendirme paketleri (*benchmark suit*) bilgisayar sistemlerinin değişik özelliklerinin (işlemci, grafik, sunucu, posta) değişik kullanım ortamlarında değerlendirilmesini sağlarlar.

İşlemcileri değerlendirmek için en yaygın kabul gören değerlendirme paketi **SPEC CPU2006**'dır.

Diğer paketlere örnekler:

- **SPECjbb2000 (Java Business Benchmark):** Sunucularda çalışan Java tabanlı elektronik ticaret uygulamalarını değerlendirmek için
- **SPECmail2001:** E-posta sunucularının değerlendirmek için

Diğer paketler için : <http://www.spec.org/>