

BLM4021 Gömülü Sistemler

Doç. Dr. Ali Can KARACA

ackaraca@yildiz.edu.tr

Yıldız Teknik Üniversitesi – Bilgisayar Mühendisliği



Sunum 4 – ARM mikrodenetleyicileri ve özellikleri

- ARM mikroişlemcileri genel bilgilendirme
- ARM ailesi
- Mimarisi
- Komut Seti
- Pipeline yapısı

Ders Materyalleri



Gerekli Kaynaklar:

- Derek Molloy, Exploring Raspberry Pi: Interfacing to the Real World with Embedded Linux, Wiley, 2016.
- M. Wolf, Computers as Components: Principles of Embedded Computing System Design, Elsevier, 2008.

Yardımcı Kaynaklar:

- P. Membrey, D. Hows, Learn Raspberry Pi 2 with Linux and Windows 10, Apress, 2015.
- Ali Saidi, The ARM architecture slide.
- A. Turan Özcerit, Endüstriyel Gömülü Bilgisayar Sistemler, Sakarya Üniversitesi.
- O. Urhan, Gömülü Sistem Lisansüstü Ders Notları, 2018.
- V. Weawer, ECE 471 Embedded Systems Lecture 3, 2020.

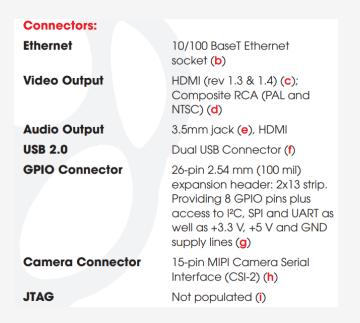
Laboratuvar Kitimiz: Raspberry Pi Rev 2 Model B (UK)



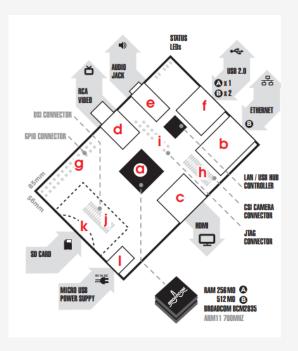
The Raspberry Pi is a small, powerful and lightweight **ARM** based computer which can do many of the things a desktop PC can do.

The powerful graphics capabilities and HDMi video output make it ideal for multimedia applications such as media centres and narrowcasting solutions. The Raspberry Pi is based on a **Broadcom BCM2835** chip. -> datasheet

Specifications			
Chip	Broadcom BCM2835 SoC (a)		
Core architecture	ARM11		
CPU	700 MHz Low Power ARM1176JZFS Applications Processor		
GPU	Dual Core VideoCore IV® Multimedia Co-Processor		
	Provides Open GL ES 2.0, hardware-accelerated OpenVG, and 1080p30 H.204 high-profile decode		
	Capable of 10 pixel/s, 1.5G texel/s or 24GFLOPs with texture filtering and DMA infrastructure		
Memory	512MB SDRAM		
Operating System	Boots from SD card, running a version of the Linux operating system		
Dimensions	85.6 x 53.98 x 17mm		
Power	Micro USB socket 5V, 1.2A (I)		
	ARMv6A mimarisine sahip.		

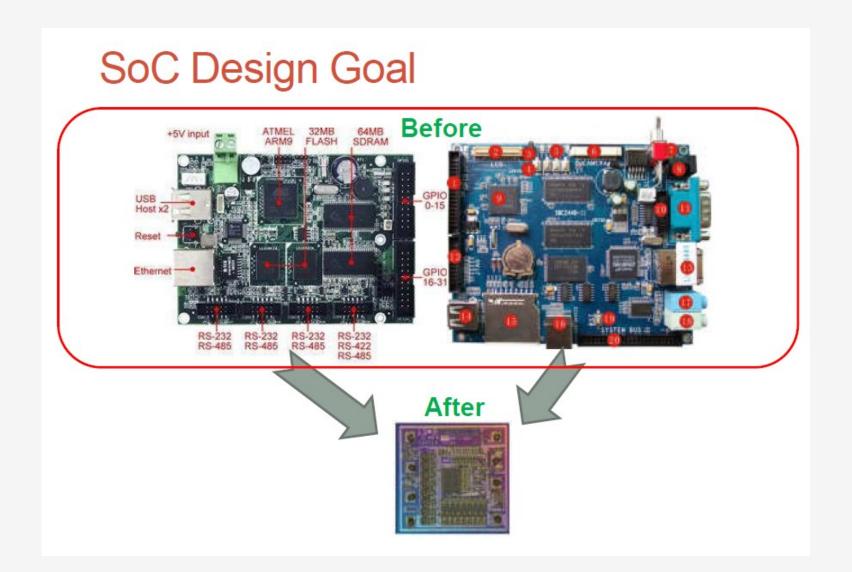






What was SoC (System On Chip)?





Laboratuvar Kitimiz: Raspberry Pi Rev 2 Model B (UK)



***		© (° 2		21 21 21 21 21 21 21 21 21 21 21 21 21 2		
Raspberry Pi	Modelo A	Modelo A+	Modelo B	Modelo B+	RPi V2 modelo B	RPi 3 modelo B
SoC	Broadcom BCM2835	Broadcom BCM2835	Broadcom BCM2835	Broadcom BCM2835	Broadcom BCM2836	Broadcom BCM2837
CPU	700MHz ARM1176JFZ-S	700MHz ARM1176JFZ-S	700MHz ARM1176JFZ-S	700MHz ARM1176JFZ-S	900MHz Quad-core ARM Cortex-A7	1.2Ghz Quad Cortex A53
GPU	VideoCore IV	VideoCore IV	VideoCore IV	VideoCore IV	250Mhz VideoCore IV	400Mhz VideoCore IV
RAM	256Mb	512Mb	512Mb	512Mb	1Gb	1Gb
USB	1	1	2	4	4	4
Video	RCA, HDMI	Jack, HDMI	RCA, HDMI	Jack, HDMI	Jack, HDMI	Jack, HDMI
Audio	Jack, HDMI	Jack, HDMI	Jack, HDMI	Jack, HDMI	Jack, HDMI	Jack, HDMI
Boot	Memoria SD	Memoria microSD	Memoria SD	Memoria microSD	Memoria microSD	Memoria microSD
Wireless	No tiene	No tiene	No tiene	No tiene	No tiene	802.11n / Bluetooth 4.1
Red Ethernet	No tiene	No tiene	Ethernet 10/100	Ethernet 10/100	Ethernet 10/100	Ethernet 10/100
Alimentación	5V / 2Amp	5V / 2Amp	5V / 2Amp	5V / 2Amp	5V / 2Amp	5V / 2,5Amp
GPIO	26 pines GPIO	40 pines GPIO	26 pines GPIO	40 pines GPIO	40 pines GPIO	40 pines GPIO
Tamaño	85,6 x 53,98 mm	65 x 56 mm	85,6 x 53,98 mm	85 x 56 x 17 mm	85 x 56 x 17 mm	85 x 56 x 17 mm
-						

ARM Tarihçesi



Acorn RISC Machines -> ARM (UK, Acorn Computers LTD, 1978)

1985 yılında ilk ticari işlemcisi olan ARM1'i geliştirmiştir.

1990 spin-off: ARM ismi Advanced RISC Machines olarak değiştirildi (Apple, Acorn, VLSI).

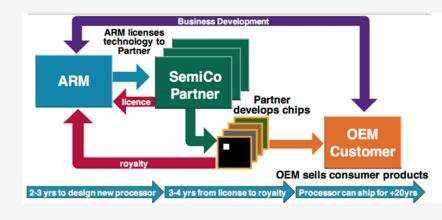


Yaptığı çip tasarımlarını lisans karşılığında çip üreten şirketlere satarak gelir modelini oluşturur.

ARM kendi başına silikon temelli bir çip üretmez tasarlar.

Pekçok firma ile iletişim kurarak onlara kendi çiplerini üretmeleri için çözümler sunar ve altyapı hazırlarlar.

Firmalar: STMicroelectronics, Texas Instruments, Samsung, Intel, Nvidia, Apple...



ARM tabanlı SoC (System On Chip)



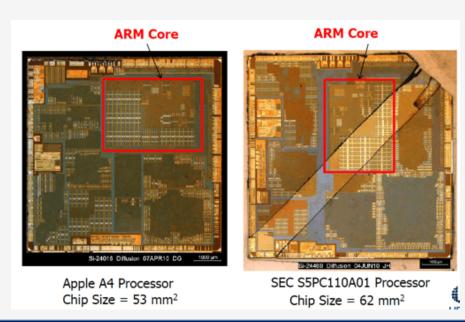
DMA: Direct Memory Access

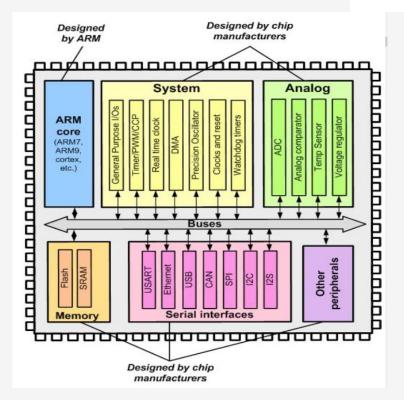
PWM: Pulse Width Modulation

USART/SPI/I2C: Serial Communication

ADC: Analog to digital converter

Örn:





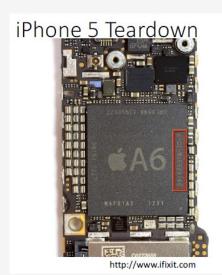
Neden ARM Tabanlı İşlemciler



- İyi MIPS/Watt oranına sahiptirler.
- Taşınabilir ve işlem gücü gerektiren cihazlar için idealdirler.
- 32-bit işlemciye sahiptirler.
- Özel donanımları ile hızlı matematik ve çarpım işlem kapasitesine sahiptir.
- Tek yonga üzerinde USB, Ethernet, CAN, I2C vb. gibi kompleks donanımları bulunur.
- PIC ve MSP430'a göre daha fazla kayıtlayıcı (register) kümesi vardır.
- SIMD'ye imkan verir.
- Pazarda pek çok üründe kullanılmaktadır ve kullanılması planlanmaktadır.

Bazı Örnekler





The A6 processor is the first Apple System-on-Chip (SoC) to use a custom design, based off the ARMv7 instruction set.



- Apple S1 Processor
 - 32-bit ARMv7-A compatible
 - # of Cores: 1
 - CMOS Technology: 28 nm
 - L1 cache 32 KB data
 - L2 cache 256 KB
 - GPU PowerVR SGX543







Bazı Örnekler-2





ARM Mimari Versiyonları



ARM mimari versiyonlarında yanında «v» harfiyle belirtilir.

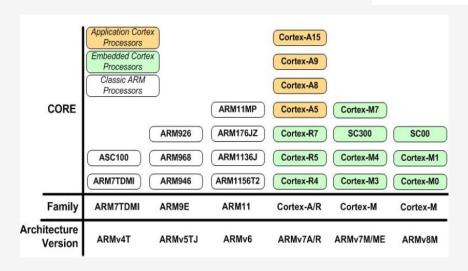
Örn: ARMv6, ARMv5...

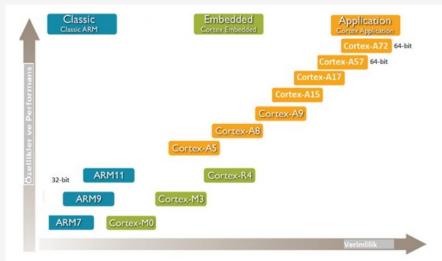
Her versiyonda yeni özellikler kazandırılmıştır ve işlem performansı artırılmıştır.

Şekilde görülmese de ARMv8 olan 64-bit işlemci versiyonları da vardır. >> Raspberry Pi 4

- v6 ve öncesi (v1-v6) mimarisi ARM7, ARM9 ve ARM11 isimleriyle başlar ve klasik ARM işlemcilerdir.
- v7 ve sonrası ise Gömülü ve Uygulama Cortex işlemcileri olarak isimlendirilmektedir.

M –> düşük güç tüketimi, R-> gerçek zamanlı çalışan sistemler





ARM Mimari Versiyonları



- ARMv1 : ARM1
- ARMv2 : ARM2, ARM3 (26-bit, status in PC register)
- ARMv3: ARM6, ARM7
- ARMv4 : StrongARM, ARM7TDMI, ARM9TDMI
- ARMv5 : ARM7EJ, ARM9E, ARM10E, XScale
- ARMv6: ARM11, ARM Cortex-M0 (Raspberry Pi A/B)
- ARMv7: Cortex A8, A9, A15, A7, Cortex-M3 (iPad, iPhone, Pandaboard, Beagleboard, Beaglebone, Pi2)
- ARMv8 : Cortex A50, A53, A57 (64-bit), Pi3

- Modern Cortex Processors
 - "Application" ARM Cortex-A
 - o "Real-time" ARM Cortex-R
 - "Micro-controller" ARM Cortex-M

Raspberry Pi içindeki işlemcinin Tam İsmi:

ARM1176JZF-S

- Thumb modu içerir.
- S Sentezlenebilir donanım dizaynı (FPGA, SoC)
- J Jazelle Java Hızlandırma Teknolojizi
- Z TrustZone
- F Vector Floating Point Coprocessor

ARM Mimari Versiyonları



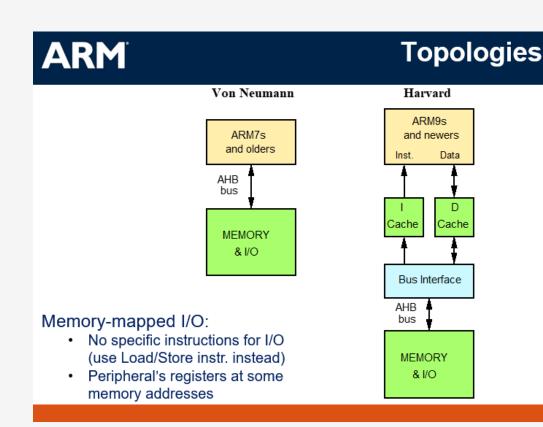
AHB:

Advanced High-Performance Bus

ARM9 ve sonrasında Harvard mimarisi ile Komut ve Veri Arabellekleri kullanılmıştır.

year	1995	1997	1999	2003
	ARM7	ARM9	ARM10	ARM11
Pipeline depth	three-stage	five-stage	six-stage	eight-stage
Typical MHz	80	150	260	335
mW/MHz ^a	0.06 mW/MHz	0.19 mW/MHz (+ cache)	0.5 mW/MHz (+ cache)	0.4 mW/MHz (+ cache)
MIPS ^b /MHz	0.97	1.1	1.3	1.2
Architecture	Von Neumann	Harvard	Harvard	Harvard
Multiplier	8×32	8×32	16×32	16×32

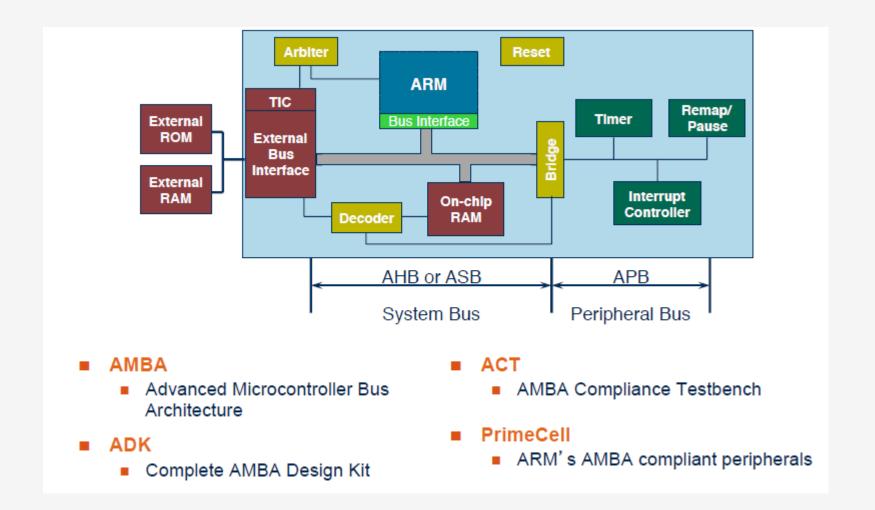
^a Watts/MHz on the same 0.13 micron process.



^b MIPS are Dhrystone VAX MIPS.

AMBA Bus

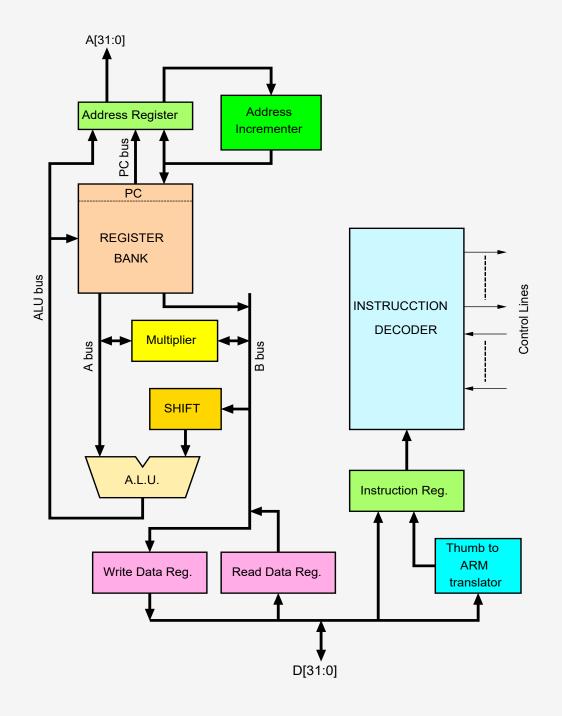




ARM7TDMI Block Diagram

ARM7 basitleştirilmiş mimarisi sağda verilmiştir.

- 16 adet 32-bitlik kaydediciye sahiptir.
- 3 aşamalı işhattı yapısı barındırır.
- Von Neumann mimarisindedir.
- Thumb modu ile 16-bit komutlar işleyebilir.
- 8x32 donanımsal çarpıcılar (MAC) blunur.
- Barrel shifter özelliği ile bit kaydırma işlemleri yapılabilir.



Barrel Shifter



LSL: Logical Left Shift



Multiplication by a power of 2

LSR: Logical Shift Right



Division by a power of 2

ASR: Arithmetic Right Shift



Division by a power of 2, preserving the sign bit

ROR: Rotate Right



Bit rotate with wrap around from LSB to MSB

SYNTAX BINARY FORM X = 7; X=x<<1;</p> 00000111 7 X=x<<3;</p> 0111000 112 x=x<<2;</p> 1100000 192

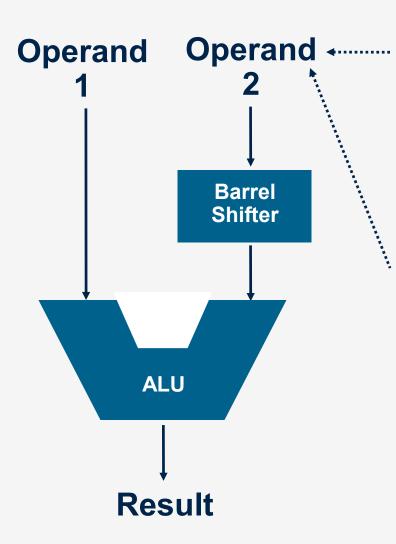
RRX: Rotate Right Extended



Single bit rotate with wrap around from CF to MSB

Barrel Shifter-2





Register, optionally with shift operation

- Shift value can be either be:
 - 5 bit unsigned integer
 - Specified in bottom byte of another register.
- Used for multiplication by a power of 2

Example: ADD R1, R2, R3, LSL #2 $(R2 + R3*4) \rightarrow R1$

Immediate value

- 8 bit number, with a range of 0-255.
 - Rotated right through even number of positions
- Allows increased range of 32-bit constants to be loaded directly into registers

ARM Pipeline Yapıları



Mikroişlemcilerde kullanılan en temel işhattı, 3 aşamalı pipelinedir.
 (MSP430, ARM7TDMI da bunu kullanır.)

Fetch-Decode-Execute

ARM7TDMI

Instruction Fetch

Thumb→ARM decode Reg Select

Reg Select

Reg Select

RESCUTE

Sorun: Her bir işlem uzun sürüyor bu da işlem hızını kısıtlıyor.

Çözüm: İş hattını 3 uzun aşama yerine 5 kısa aşamalı şekilde tasarlayalım.

Sonuc: 2 kat daha hızlı bir işlemci (~150 MHz)

Harvard mimarisine geçilmesiyle birlikte veri ve komut belleklerine bağımsız ulaşım sağlanabilir hale geldi.

ARM9TDMI ARM or Thumb **Inst Decode** Instruction Memory Shift + ALU Fetch Access Reg Reg Decode Read **FETCH** DECODE **EXECUTE** MEMORY WRITE

ARMv4T

Burada, komut setine erişim ve veriye erişim decode kısmında gecikmesiz ve paralel olarak yapılabildi.

ARM Pipeline Yapıları



ARM9 işhattı en düşük hızdaki elemanı (Decode) kadar hızlıydı.

ARM10'da İş hattının genel hızını arttırmak için Decode bölümü Issue ve Decode olmak üzere iki küçük parçaya ayrılmıştır.

Issue: komutu kısmen çözerken

Decode: Registerları okumaktadır.

+ Donanımsal çarpıcı eklenmiş (~300 MHz)

ARM11'de ise 8 aşamalı bir işhattı yapısına geçilmiştir.

Paralel yükleme/depolama ve aritmetik işhattı vardır.

1 GHz'e kadar işlemci hızı elde edilmektedir.

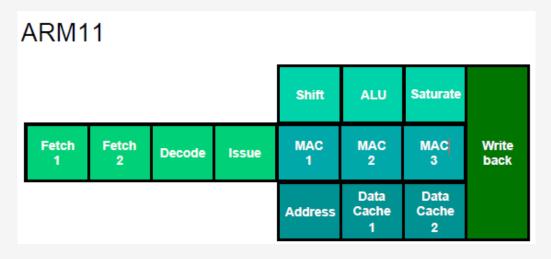
SIMD komutlara imkan sağlar.

ARMv5TE

ARM10

Branch Prediction	ARM or Thumb Instruction Decode	Reg Read	Shift + ALU	Memory Access	Reg Write
Instruction Fetch			Multiply	Multiply Add	vviite
FETCH	ISSUE	DECODE	EXECUTE	MEMORY	WRITE

ARMv6



ARM İşlemci Modları



User: Normal program çalışma modu.

FIQ: Yüksek hızlı veri transferi için hızlı interrupt. (Yüksek öncelikli)

IRQ: Genel amaçlı kesme durumu için kullanılır. (Düşük öncelikli)

Supervisor : İşletim sistemi için korumalı mod. (Yazılımsal kesme)

Abort: Sanal bellek ve/veya bellek koruma uygulamaları.

Undefined: Donanımsal yardımcı işlemcinin yazılım emülasyon desteği.

System: Özelleştirilmiş sistem görevleri çalıştırılır.

- Çalışma modları arasında geçiş soldaki durumlarda gerçekleşebilir.
- Çalışma modu değişimlerinde R13 ve R14 moda özel bir görev yapar.

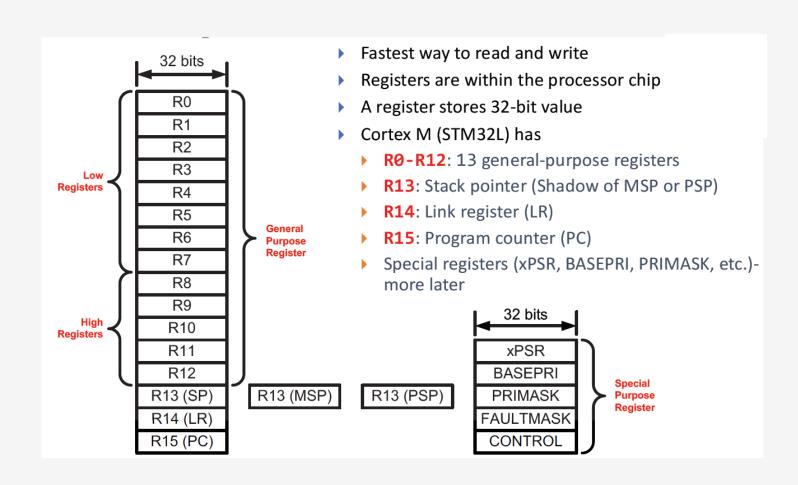
R13 -> Yığın Kaydedicisi R14 -> Link Kaydedicisi

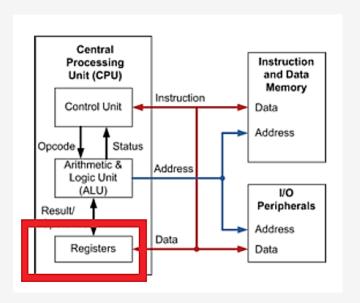
 Kullanıcının programları User modunda çalışır.

Credit by A. T. Özcerit

ARM Kaydedicileri

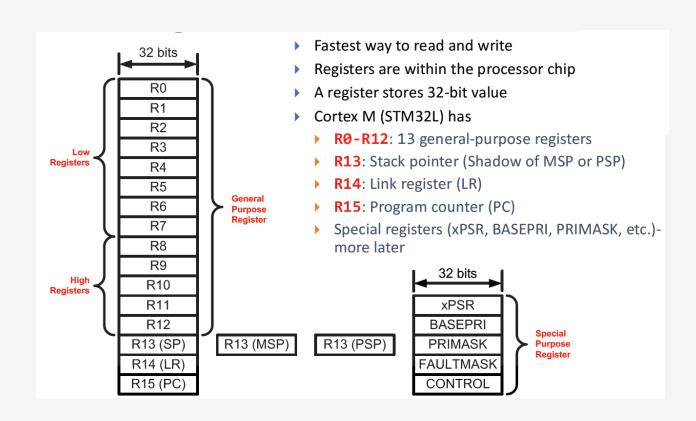


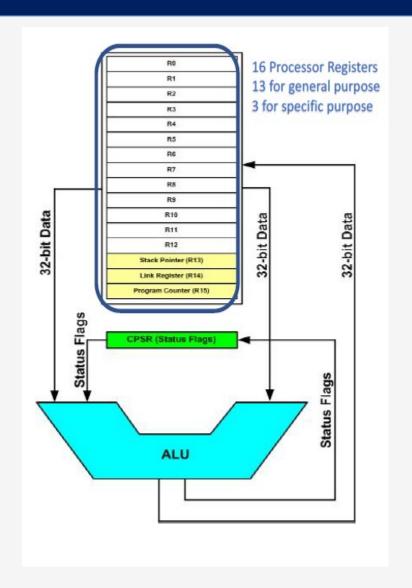




ARM Kaydedicileri



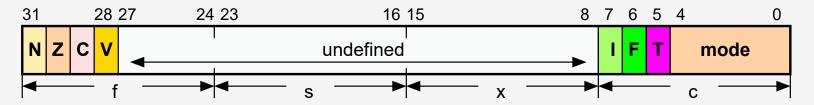




Credit by Farih Farahmand

Program Durum Kaydedicileri (CPSR)





- Condition code flags
 - N = Negative result from ALU
 - Z = Zero result from ALU
 - C = ALU operation Carried out
 - V = ALU operation oVerflowed
- Mode bits

10000	User
10001	FIQ
10010	IRQ
10011	Supervisor
10111	Abort
11011	Undefined
11111	System

Interrupt Disable bits.

I = 1: Disables the IRQ.

F = 1: Disables the FIQ.

T Bit (Arch. with Thumb mode only)

T = 0: Processor in ARM state

T = 1: Processor in Thumb state

Never change T directly (use BX instead)

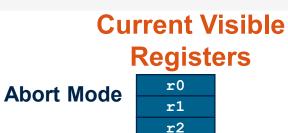
Changing T in CPSR will lead to unexpected behavior due to pipelining

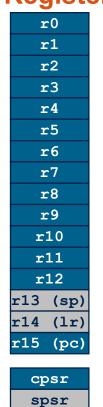
Tip: Don't change undefined bits.

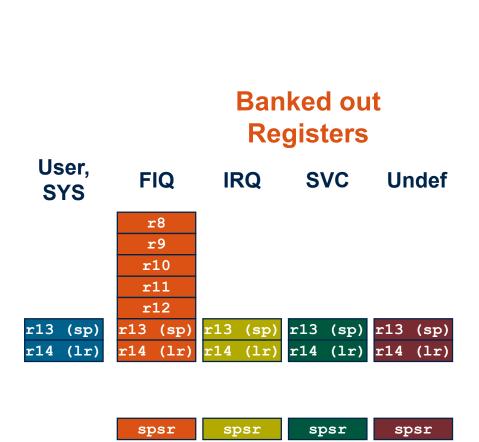
This allows for code compatibility with newer ARM processors

ARM Kaydedici Kümesi (Register Set)









Herhangi bir kesme geldiğinde:

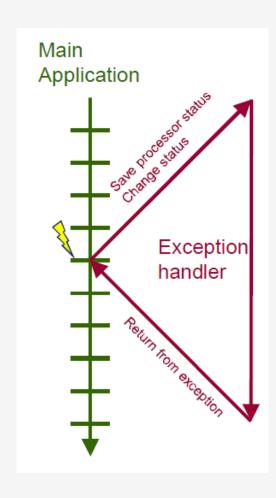
- 1- Yeni çalışma modunun R14'üne geri dönüş adresi saklanır.
- 2- CPSR değeri yeni çalışma modunun SPSR'sine kopyalanır.
- 3- CPSR yeni çalışma moduna göre güncellenir.
- 4- R15 (pc) ilgili kesme vektörü adresini yükleyerek kesme işlemi başlatılır.
- 5- İşlem bitince CPSR ve R14 geri yüklenir.

SPSR: Saved Program Status Register

CPSR: Current Program Status Register

Exception Handling Process





1. Save processor status

- Copies CPSR into SPSR <mode>
- Stores the return address in LR <mode>
- Adjusts LR based on exception type

2. Change processor status for exception

- Mode field bits
- ARM or Thumb state
- Interrupt disable bits (if appropriate)
- Sets PC to vector address

3. Execute exception handler

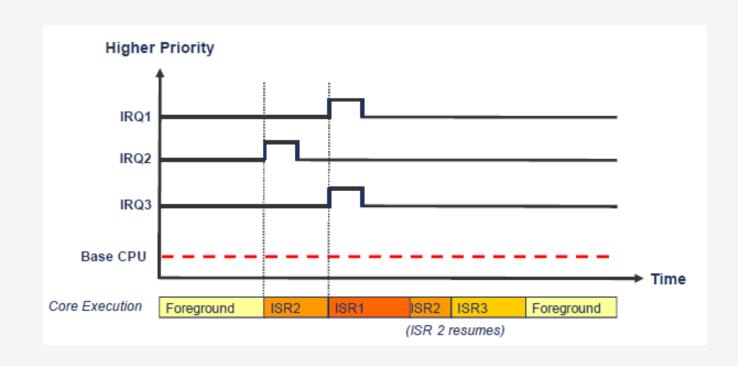
<users code>

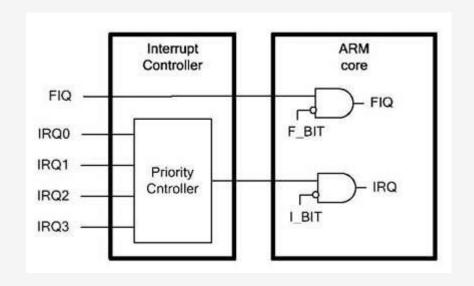
4. Return to main application

- Restore CPSR from SPSR_<mode>
- Restore PC from LR <mode>
- 1 and 2 performed automatically by the core
- 3 and 4 responsibility of software

Exception Handling Process







Thumb Modu



ARM tabanlı işlemcilerde iki tür komut seti bulunur: 1) Thumb komutları, 2) ARM komutları

ARM

- 32-bit instruction set
- 3-data address instructions
- 16 general purpose registers
- More regular binary encoding

THUMB

- 16-bit instruction set
- 2-data address instructions
- 8 general purpose registers
- Subset of ARM instructions
- Greater code density
- If used correctly, can lead to better performance/ power-efficiency

ARM:

```
MOV r3, #0
loop

SUBS r0, r0, r1

ADDGE r3, r3, #1

BGE loop

ADD r2, r0, r1

MOV r0, r3

MOV r1, r2
```

7 komut ve her biri 4 byte

Toplam kod uzunluğu = 28 byte

THUMB:

```
MOV r3, #0
loop

ADD r3, #1
SUB r0, r1
BGE loop

SUB r3, #1
ADD r2, r0, r1
MOV r0, r3
MOV r1, r2
```

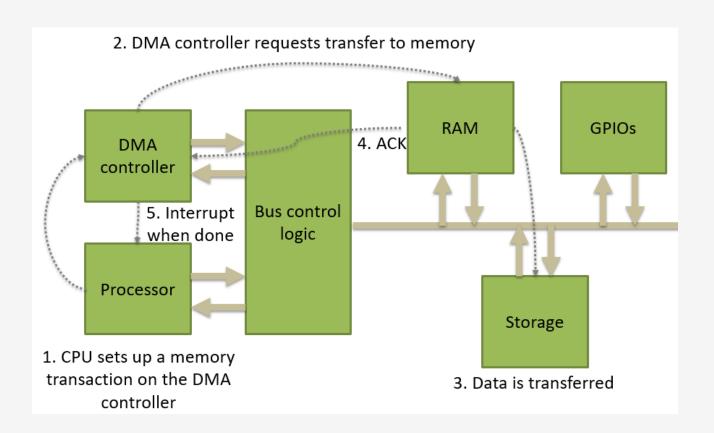
8 komut ve her biri 2 byte

Toplam kod uzunluğu = 16 byte

DMA (Direct Memory Access)



- DMA controller is connected to the internal I/O bus.
- Performs the functions that would normally be carried out by the processor when access main memory.
- If a DMA is used then the CPU only needs to configure the DMA. Whilst the transfer is taking place the CPU is then free to perform other operations.



SIMD (Single Instruction Multiple Data)

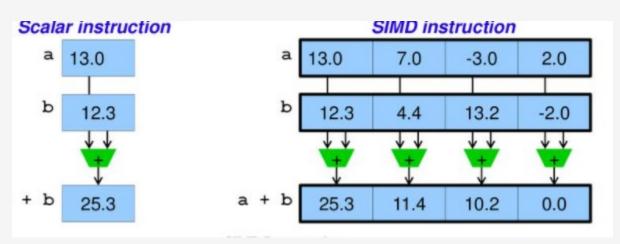


• İlk defa ARM11 ile birlikte ARM ailesine SIMD yeteneği kazandırıldı.

• VFPv2 floating point birimiyle (yardımcı işlem birimi) birçok veriyi aynı anda işleyen komutları içerir.

• Sinyal işleme uygulamalarında önemli hızlanma (x2) sağlar.

Raspberry Pi	ARM CPU	VFP version
Pi Zero		
Pi 1 A+	ARM1176JZFS	VFPv2
Pi 1 B+		
Pi 2 B	Cortex-A7	VFPv4
Pi 3 B	Cortex-A53	VFPv4



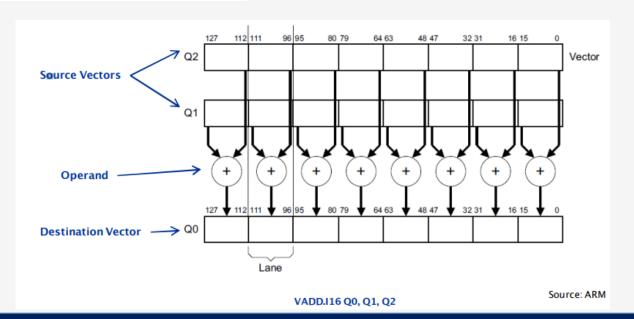
Neon – Advanced SIMD (ARMv7 ve sonrası)

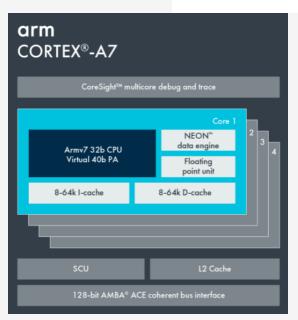


Neon™ is a "packed SIMD" processing unit

- ▶ 32, 64-bit wide registers
 - Dual-view as 16, 128-bit registers
- Registers are treated as vectors of elements of the same data type

Supports both signed and unsigned 8, 16, 32 and 64-bit integers and 32-bit IEEE 754 single precision floats





Neon – Advanced SIMD (ARMv7 ve sonrası)



The use of NEON™ shows 1.6-2.5x performance boost over ARM11 in complex video CODEC (MPEG4)

Audio processing FFT (used in AAC, voice recognition, etc.)

ARM11 (v6 SIMD)

15.2us

► ARM Cortex A8 (v7 NEON)

3.8us

▶ Both were hand-tuned assembly

