



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

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.

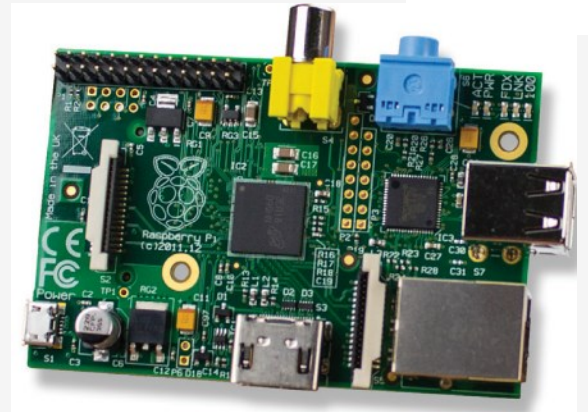
Yardımcı Kaynaklar:

- 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. Weaver, 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.264 high-profile decode

Capable of 1Gpixel/s, 1.5Gtexel/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.

Connectors:

Ethernet

10/100 BaseT Ethernet socket (b)

Video Output

HDMI (rev 1.3 & 1.4) (c);
Composite RCA (PAL and NTSC) (d)

Audio Output

3.5mm jack (e), HDMI

USB 2.0

Dual USB Connector (f)

GPIO Connector

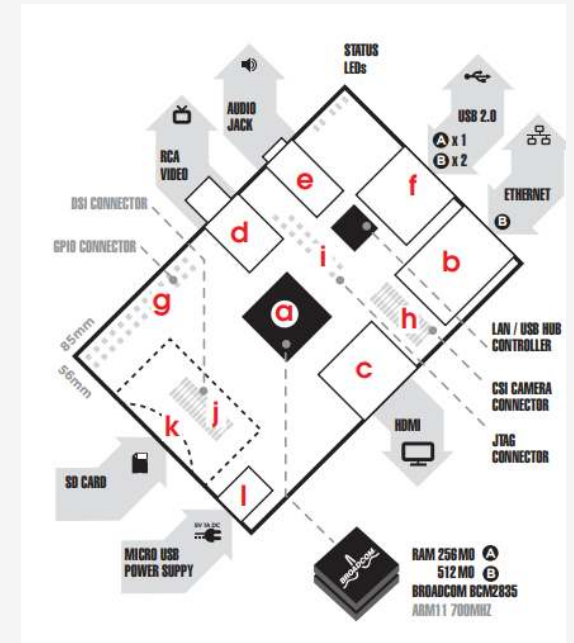
26-pin 2.54 mm (100 mil) expansion header: 2x13 strip. Providing 8 GPIO pins plus access to I²C, SPI and UART as well as +3.3 V, +5 V and GND supply lines (g)

Camera Connector

15-pin MIPI Camera Serial Interface (CSI-2) (h)

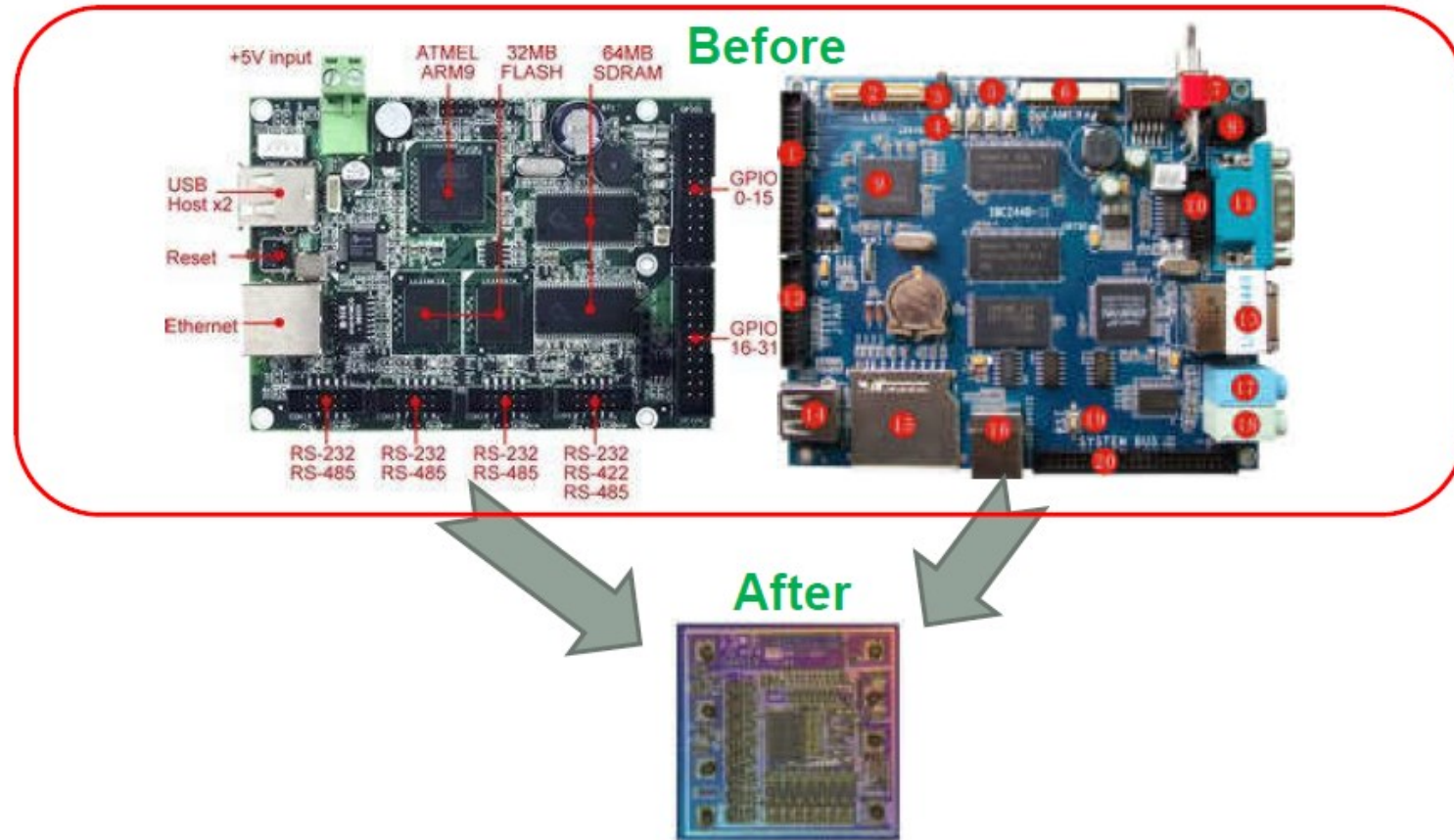
JTAG

Not populated (i)

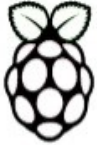








What was SoC (System On Chip)?

SoC Design Goal



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

						
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

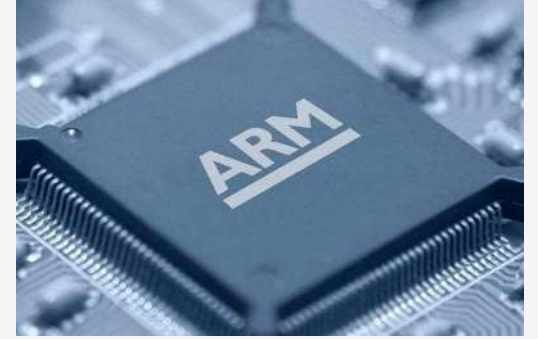
ARM Tarihçesi



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).

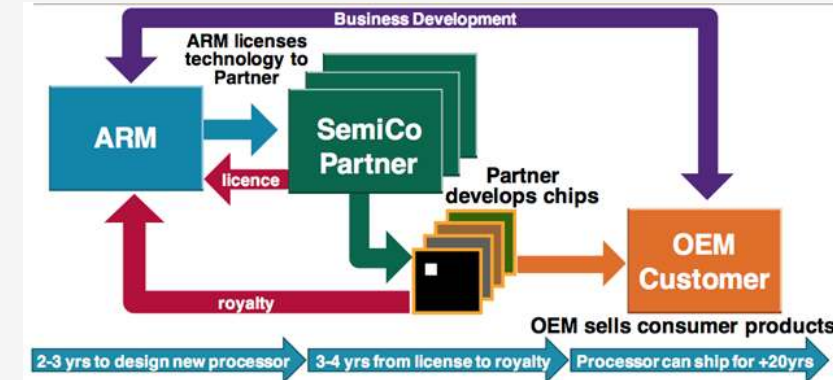


Yaptığı çip tasarımlarını lisans karşılığında çip üreten şirketlere satarak gelir modelini oluşturur.

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)

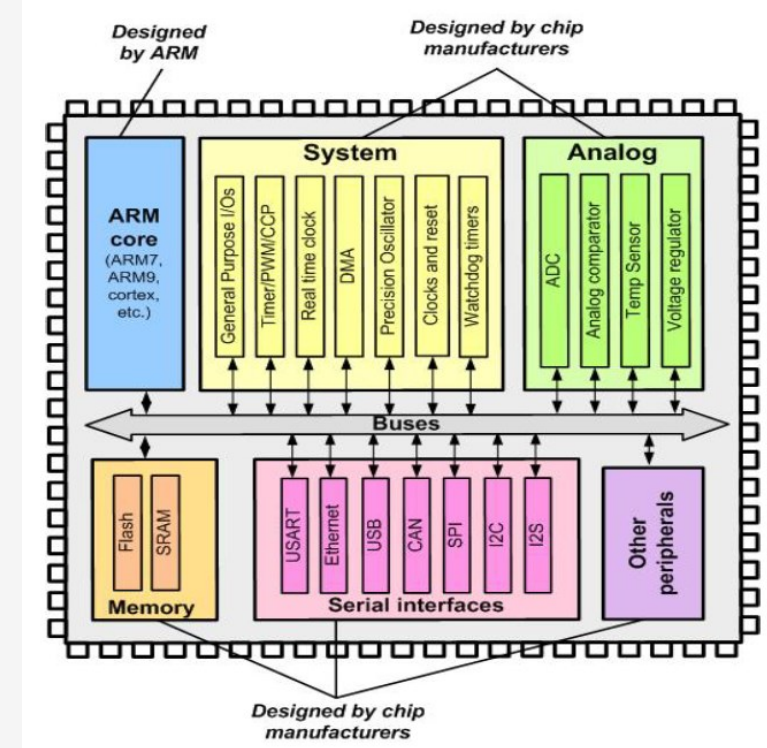
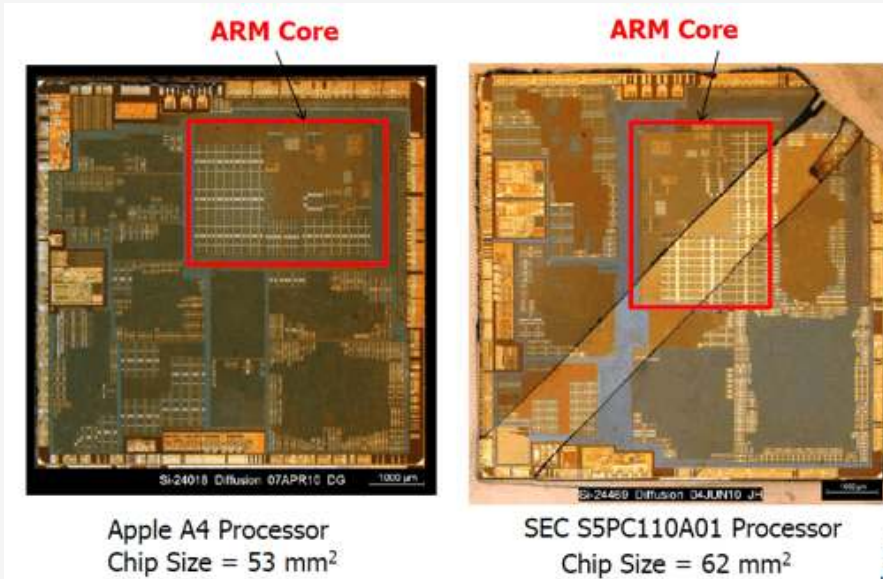
DMA: Direct Memory Access

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

iPhone 5 Teardown



<http://www.ifixit.com>

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

Apple Watch



- 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

Samsung Galaxy Gear



source: ifixit.com

- STMicroelectronics STM32F401B **ARM-Cortex M4** MCU with 128KB Flash

Samsung Gear Fit Fitness Tracker



source: ifixit.com

- STMicroelectronics **STM32F439ZI** 180 MHz, 32 bit **ARM Cortex-M4** CPU



Bazı Örnekler-2



Credit by Ali Saidi

ARM Mimari Versiyonları

ARM mimari versiyonlarında yanında «v» harfiyle belirtilir.

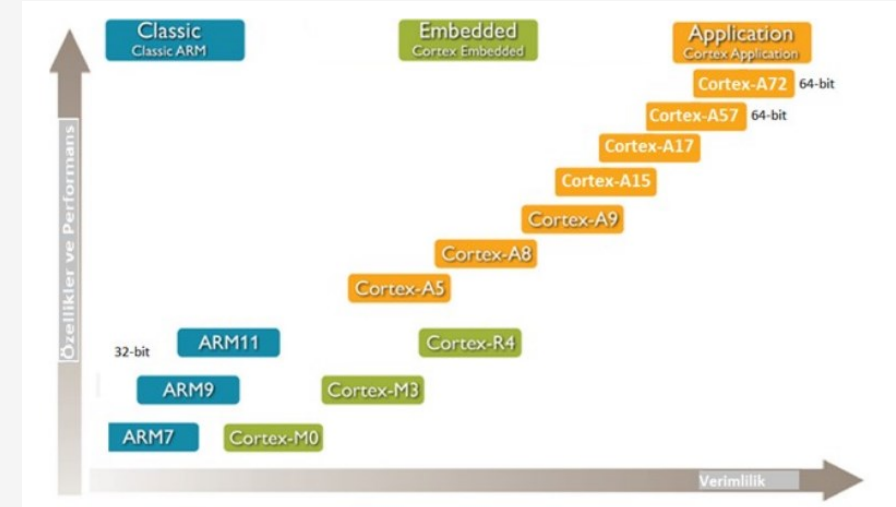
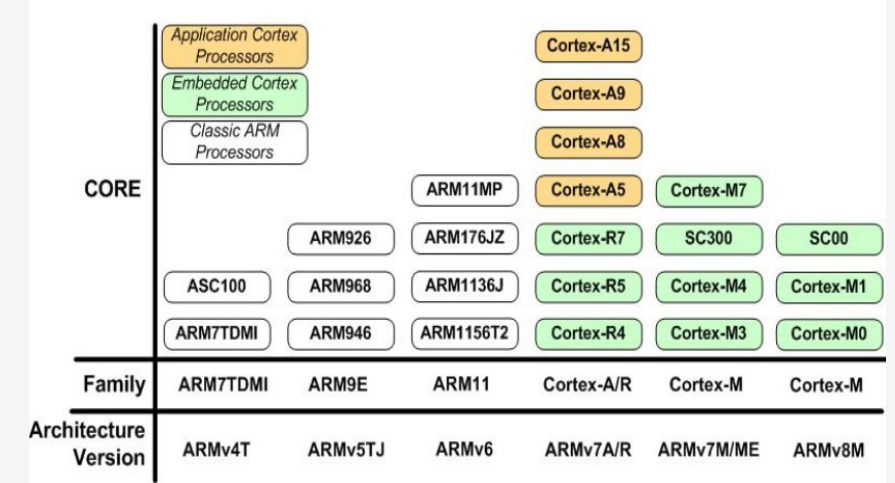
Örn: ARMv6, ARMv5...

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



Credit by A. T. Özcerit

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
 - “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 Teknolojisi
- 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.

ARM family attribute comparison.

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

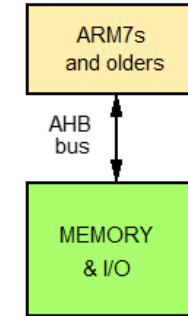
^a Watts/MHz on the same 0.13 micron process.

^b MIPS are Dhrystone VAX MIPS.

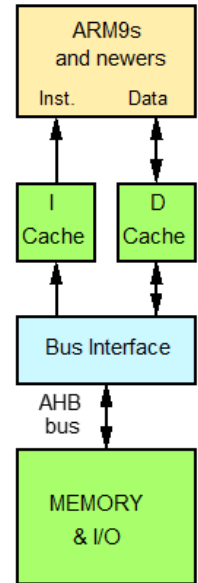
ARM

Topologies

Von Neumann



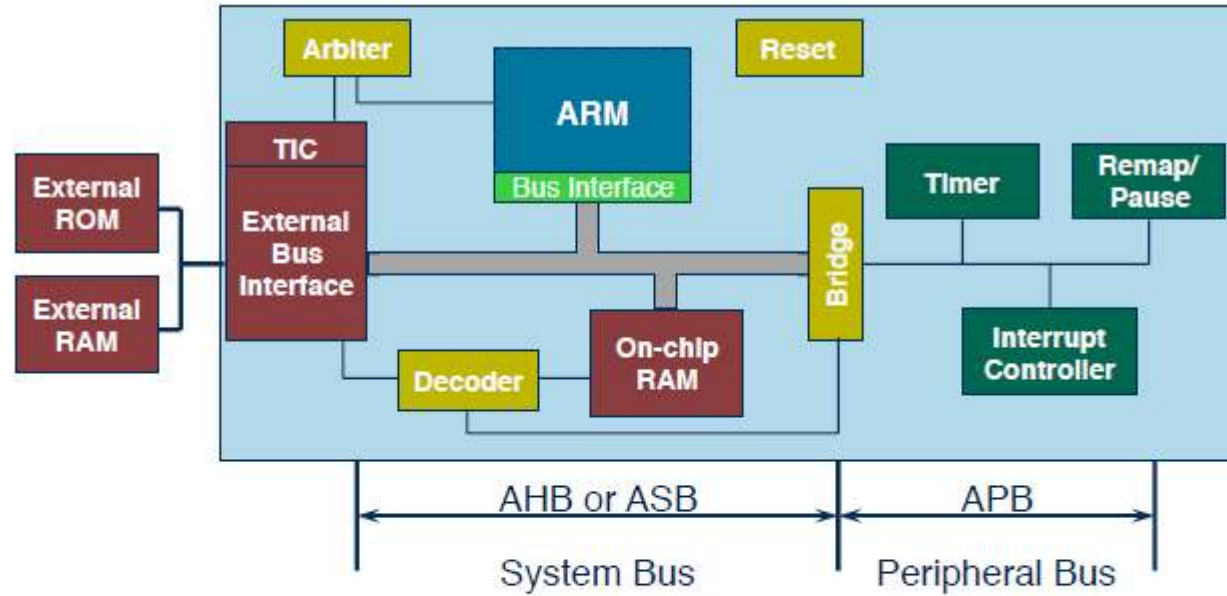
Harvard



Memory-mapped I/O:

- No specific instructions for I/O (use Load/Store instr. instead)
- Peripheral's registers at some memory addresses

AMBA Bus



■ AMBA

- Advanced Microcontroller Bus Architecture

■ ADK

- Complete AMBA Design Kit

■ ACT

- AMBA Compliance Testbench

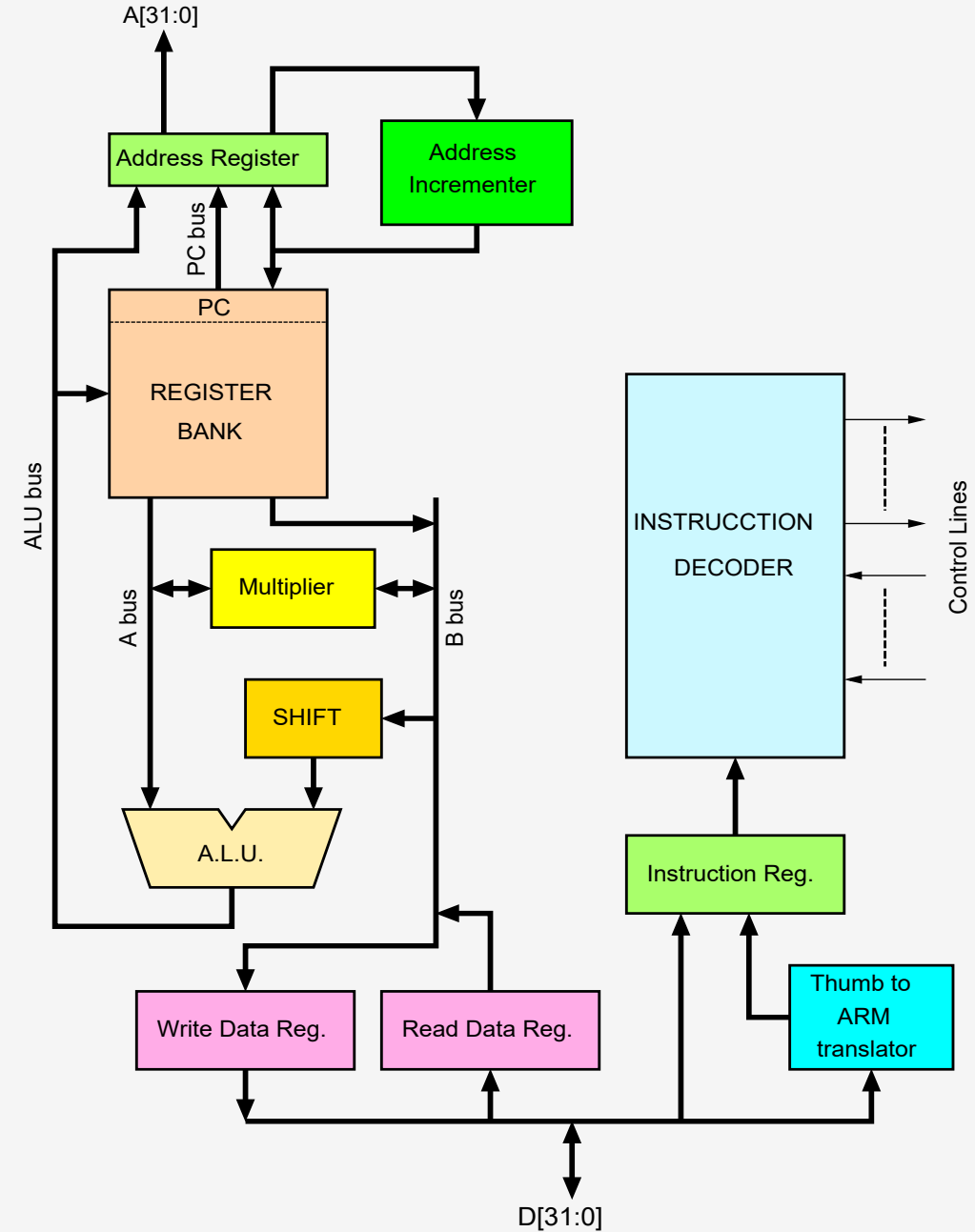
■ PrimeCell

- ARM's AMBA compliant peripherals

ARM7TDMI Block Diagram

ARM7 basitleştirilmiş mimarisi sağda verilmiştir.

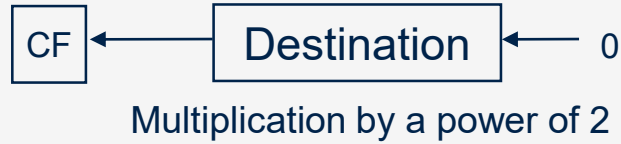
- 16 adet 32-bitlik kaydediciye sahiptir.
- 3 aşamalı işhattı yapısı barındırır.
- Von Neumann mimarisindedir.
- Thumb modu ile 16-bit komutlar işleyebilir.
- 8x32 donanımsal çarpıcılar (MAC) blunur.
- Barrel shifter özelliği ile bit kaydırma işlemleri yapılabilir.



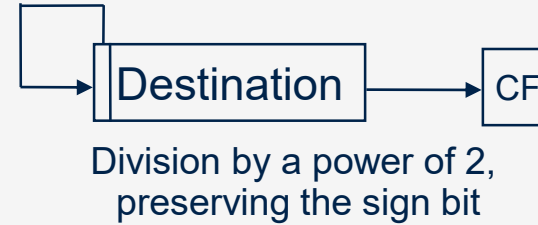
Barrel Shifter



LSL : Logical Left Shift



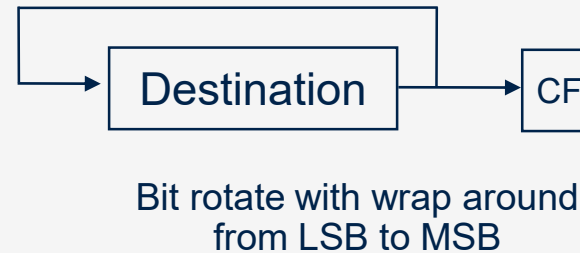
ASR: Arithmetic Right Shift



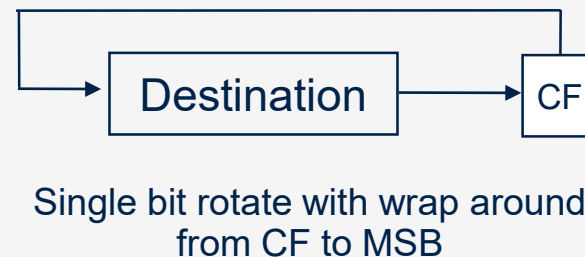
LSR : Logical Shift Right



ROR: Rotate Right



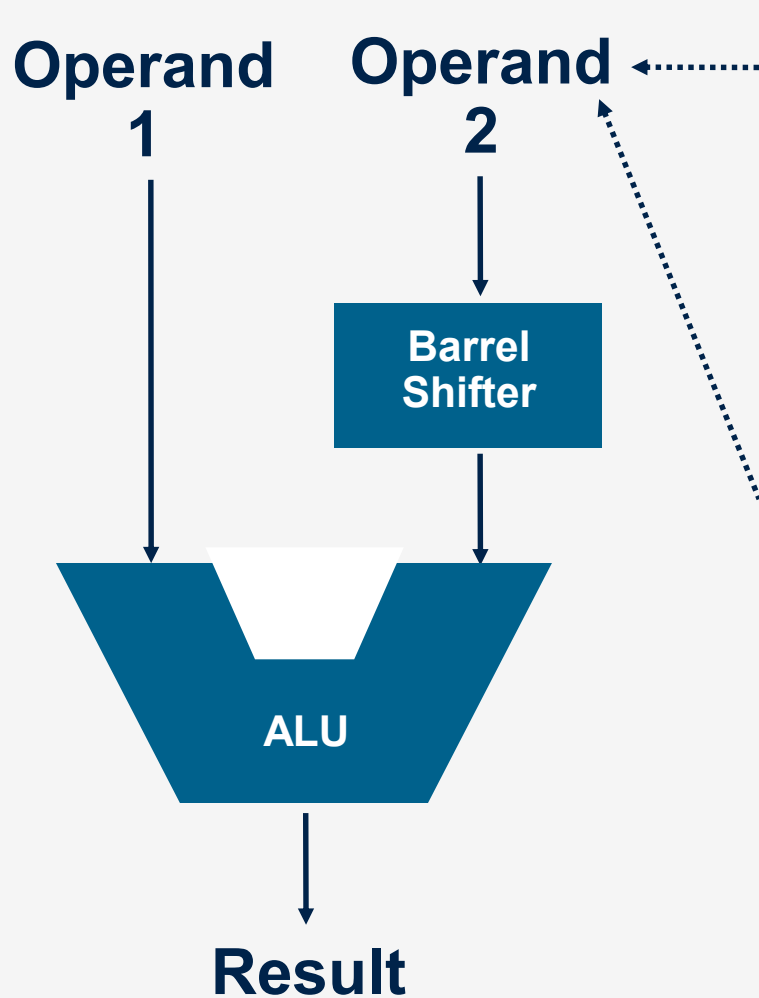
RRX: Rotate Right Extended



<< Shift Left

<u>SYNTAX</u>	<u>BINARY FORM</u>	<u>VALUE</u>
$x = 7;$	00000111	7
$x = x \ll 1;$	00001110	14
$x = x \ll 3;$	01110000	112
$x = x \ll 2;$	11000000	192

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

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

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

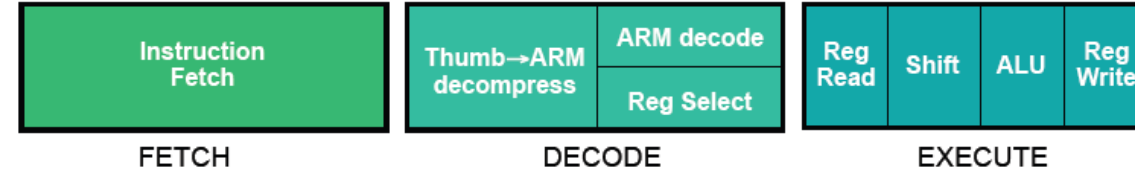
Sonuç: 2 kat daha hızlı bir işlemci (~150 MHz)

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

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

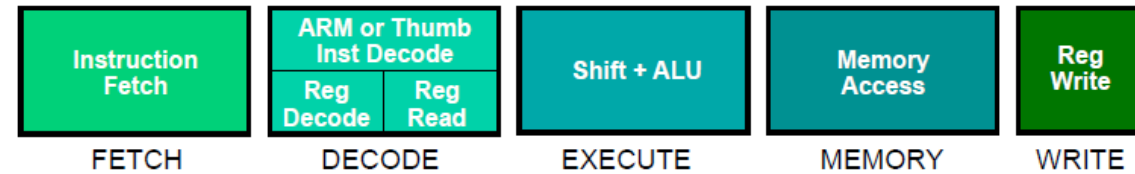
ARMv4T

ARM7TDMI



ARMv4T

ARM9TDMI



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.

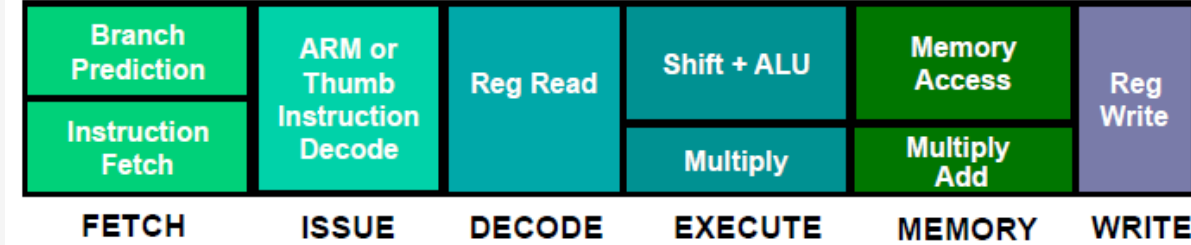
Paralel yükleme/depolama ve aritmetik işhattı vardır.

1 GHz'e kadar işlemci hızı elde edilmektedir.

SIMD komutlara imkan sağlar.

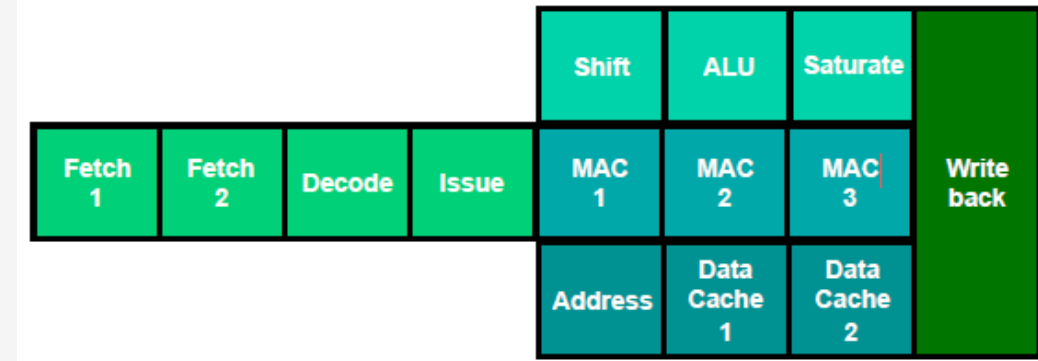
ARMv5TE

ARM10



ARMv6

ARM11



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.

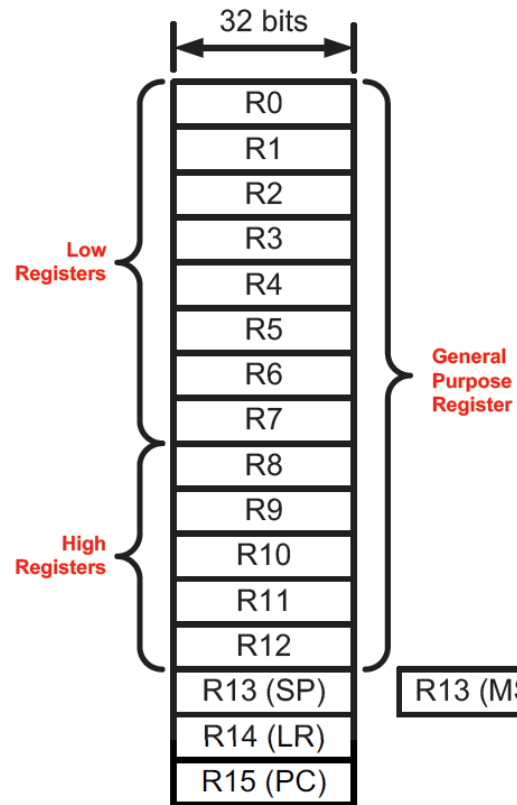
- Çalışma modları arasında geçiş soldaki durumlarda gerçekleşebilir.
- Çalışma modu değişimlerinde R13 ve R14 moda özel bir görev yapar.

R13 → Yığın Kaydedicisi

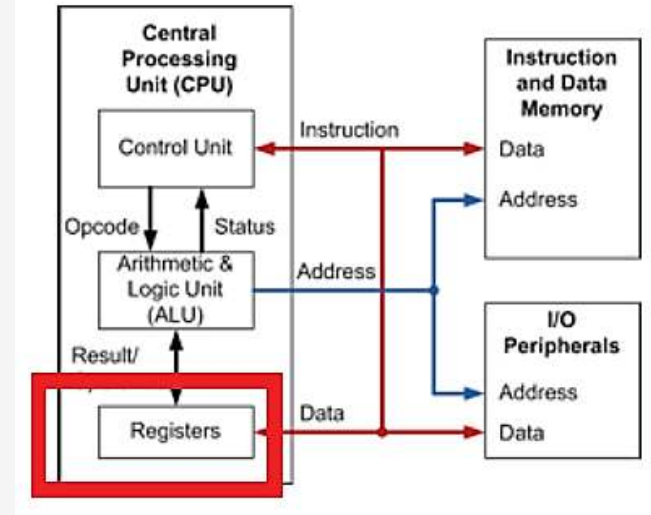
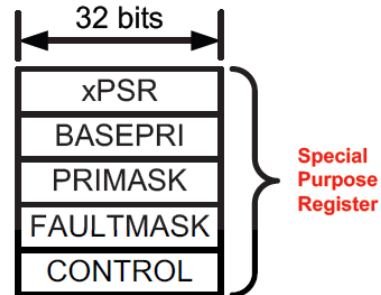
R14 → Link Kaydedicisi

- Kullanıcının programları User modunda çalışır.

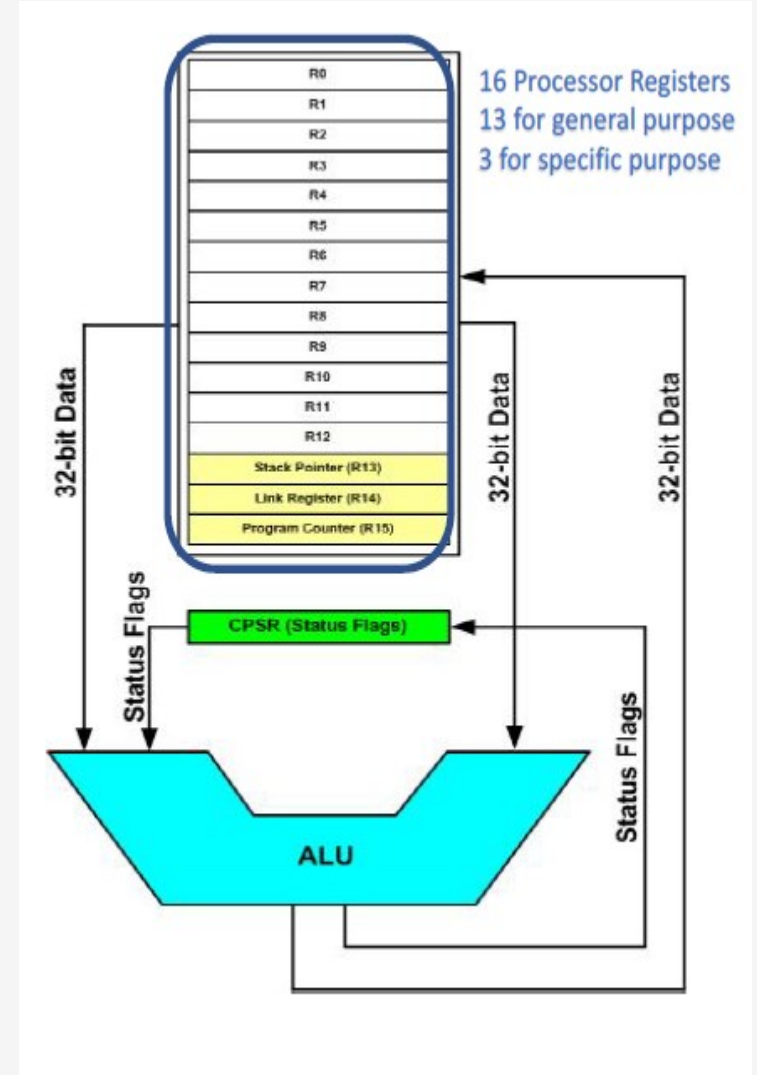
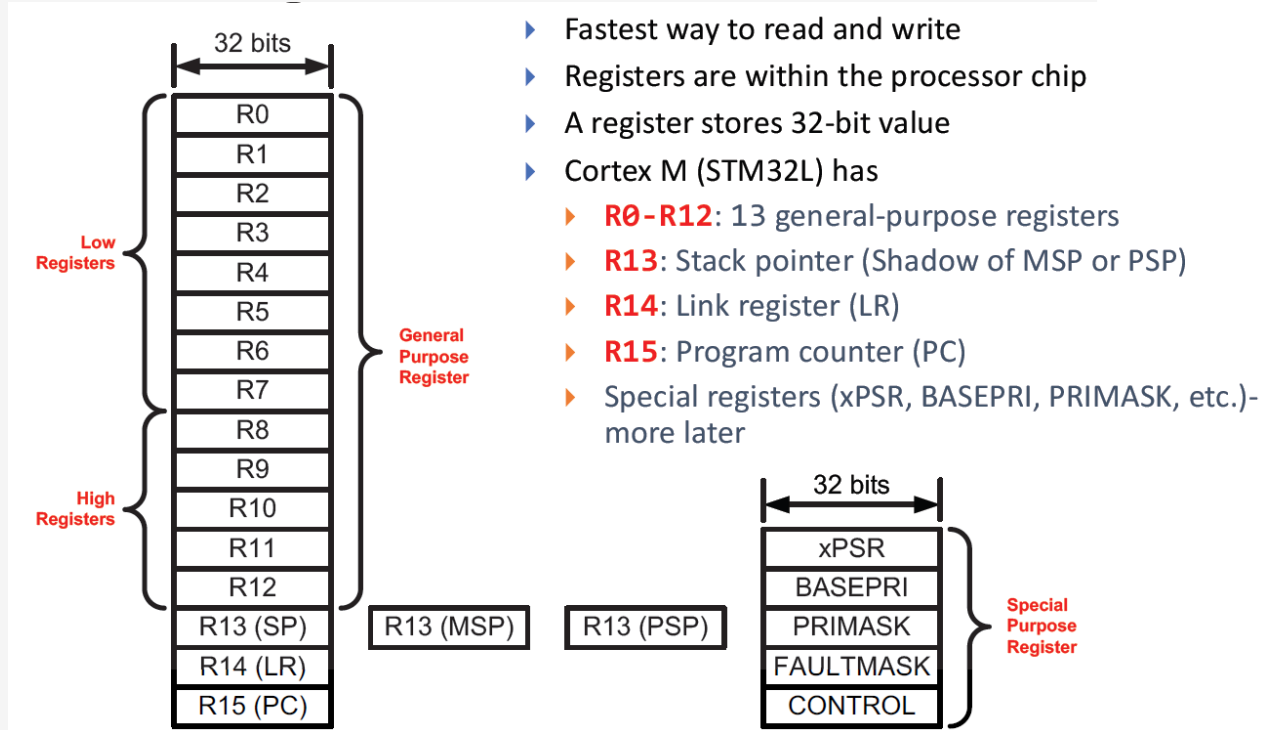
ARM Kaydedicileri



- ▶ Fastest way to read and write
- ▶ Registers are within the processor chip
- ▶ A register stores 32-bit value
- ▶ Cortex M (STM32L) has
 - ▶ **R0-R12**: 13 general-purpose registers
 - ▶ **R13**: Stack pointer (Shadow of MSP or PSP)
 - ▶ **R14**: Link register (LR)
 - ▶ **R15**: Program counter (PC)
 - ▶ Special registers (xPSR, BASEPRI, PRIMASK, etc.)- more later

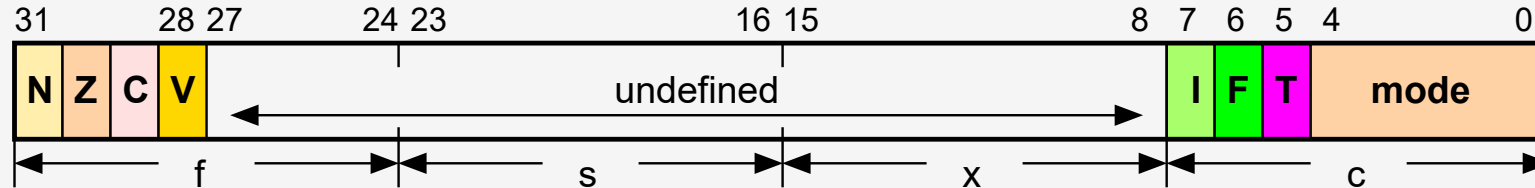


ARM Kaydedicileri



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)



Current Visible Registers

Abort Mode

r0
r1
r2
r3
r4
r5
r6
r7
r8
r9
r10
r11
r12
r13 (sp)
r14 (lr)
r15 (pc)
cpsr
spsr

Banked out Registers

User, SYS	FIQ	IRQ	SVC	Undef
	r8			
	r9			
	r10			
	r11			
	r12			
r13 (sp)	r13 (sp)	r13 (sp)	r13 (sp)	r13 (sp)
r14 (lr)	r14 (lr)	r14 (lr)	r14 (lr)	r14 (lr)
	spsr	spsr	spsr	spsr

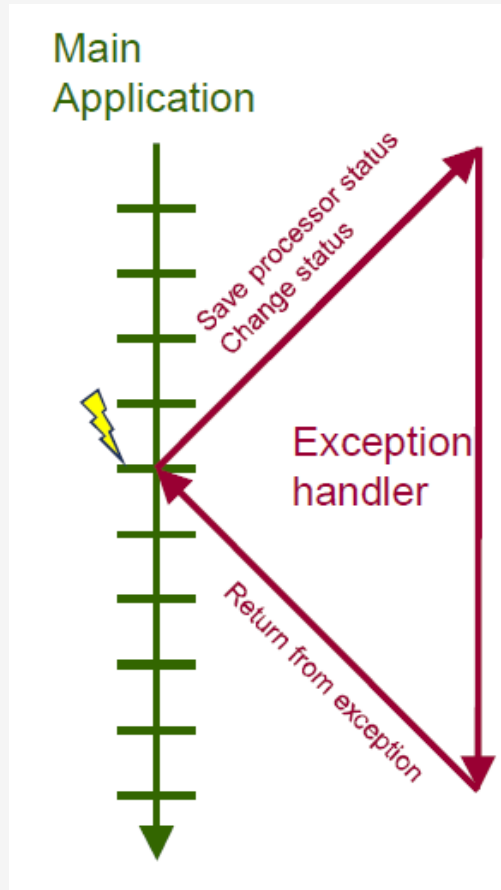
Herhangi bir kesme geldiğinde:

- 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

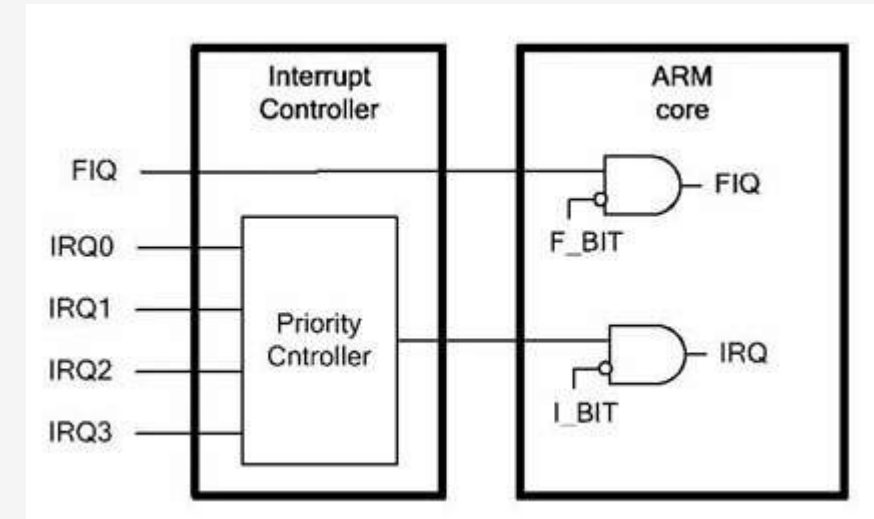
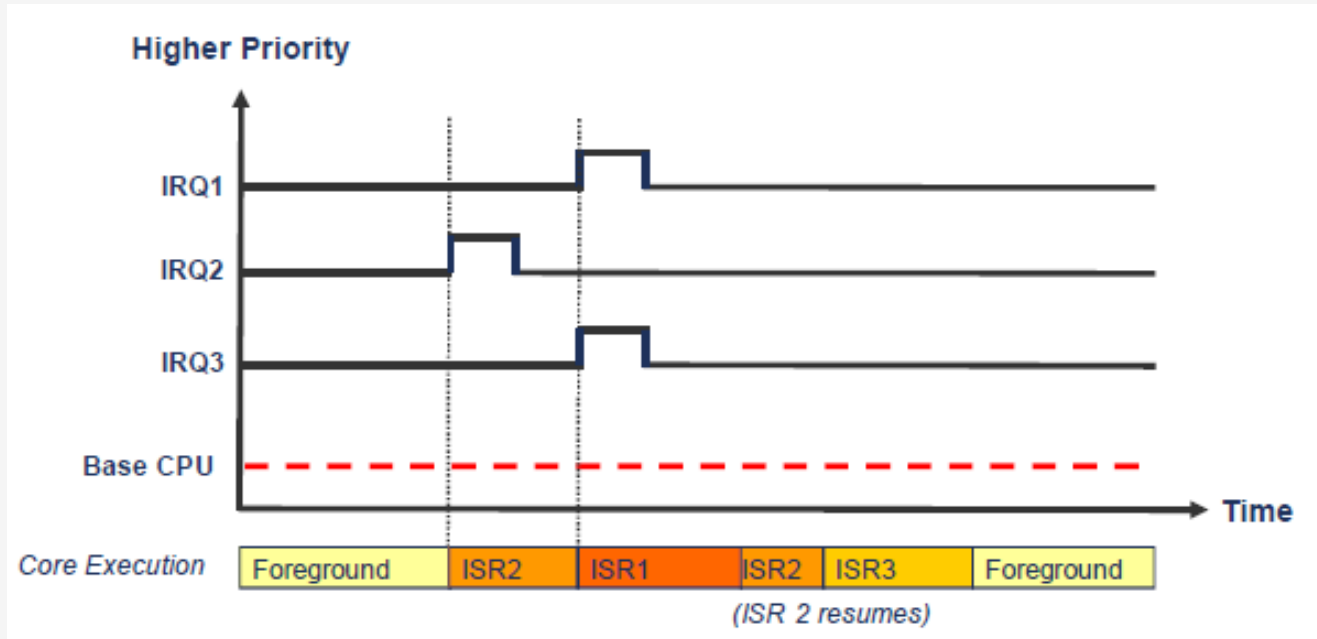
3. Execute exception handler

- `<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



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:

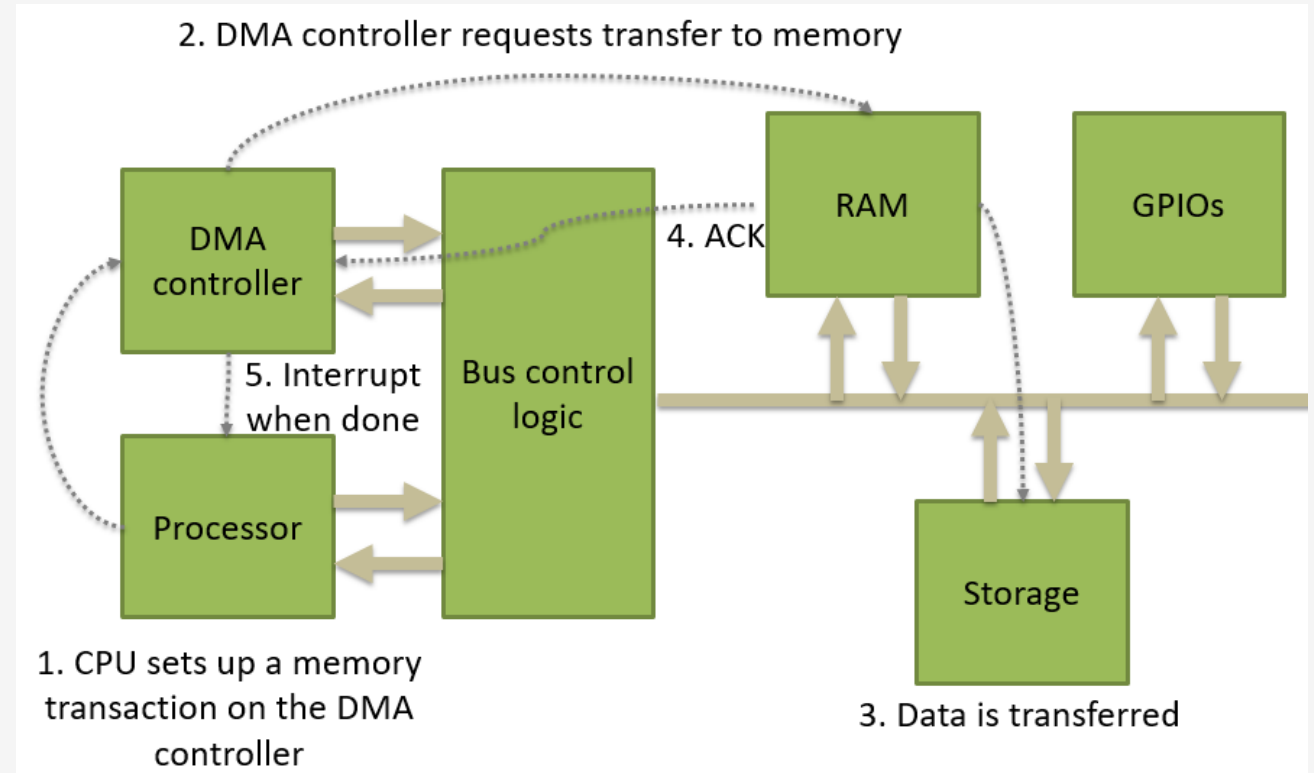
```
MOV r3, #0
loop
  ADD r3, #1
  SUB r0, r1
  BGE loop
  SUB r3, #1
  ADD r2, r0, r1
  MOV r0, r3
  MOV r1, r2
```

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.



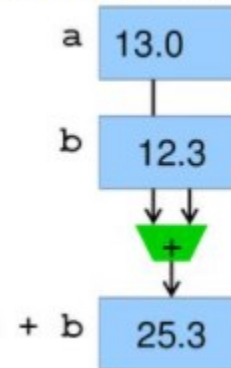
SIMD (Single Instruction Multiple Data)



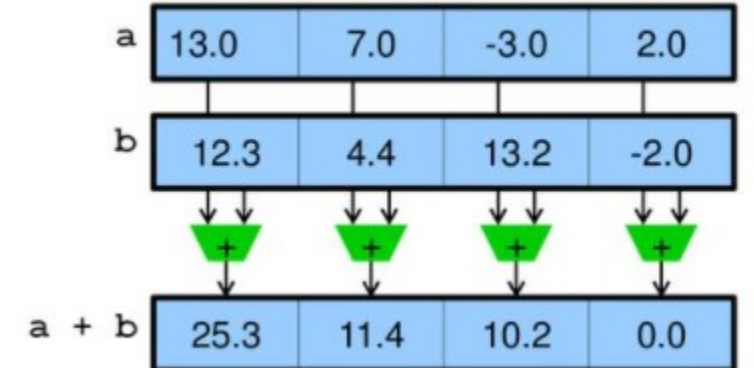
- İlk defa ARM11 ile birlikte ARM ailesine SIMD yeteneği kazandırıldı.
- VFPv2 floating point birimiyle (yardımcı işlem birimi) birçok veriyi aynı anda işleyen komutları içerir.
- Sinyal işleme uygulamalarında önemli hızlanma (x2) sağlar.

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

Scalar instruction



SIMD instruction



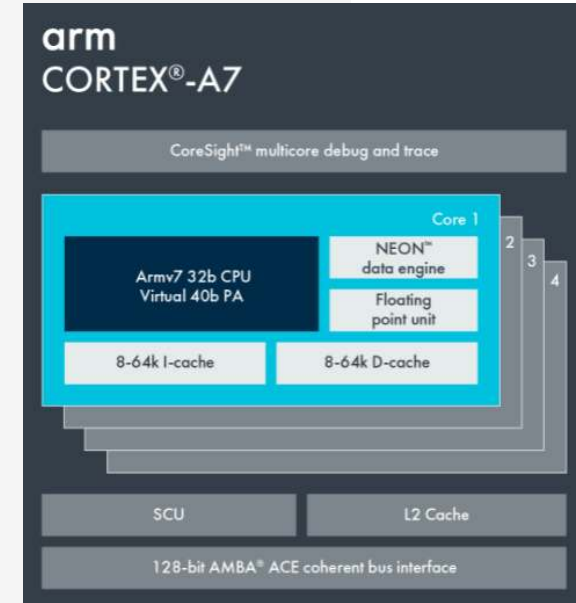
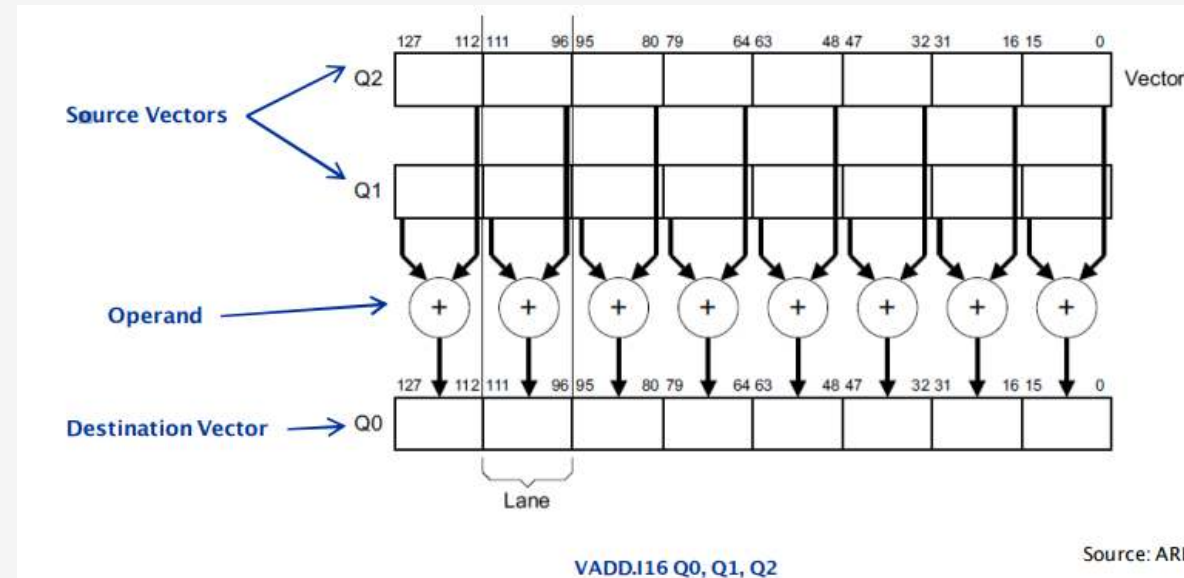
Neon – Advanced SIMD (ARMv7 ve sonrası)



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

