

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών

Τμήμα Ι (Α – ΚΑΣ)

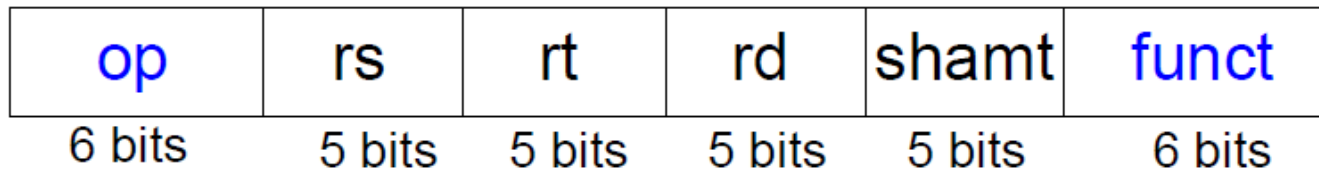
Παραδείγματα Διαγράμματα Χρονισμού

Μάριος Κόνιαρης

Instruction Formats

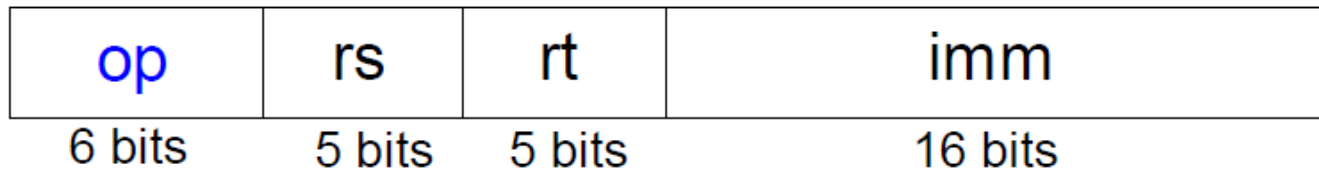
R-Type

add, sub, and, or, slt

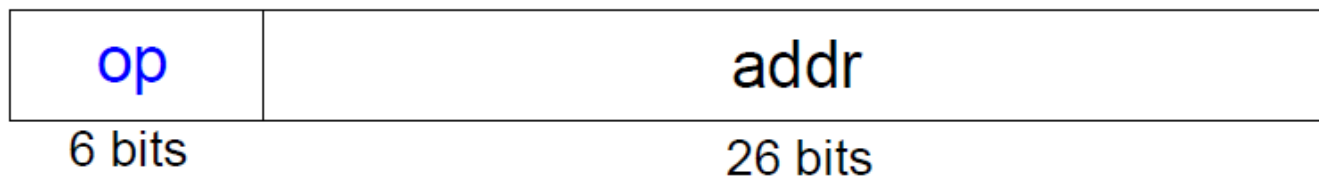


I-Type

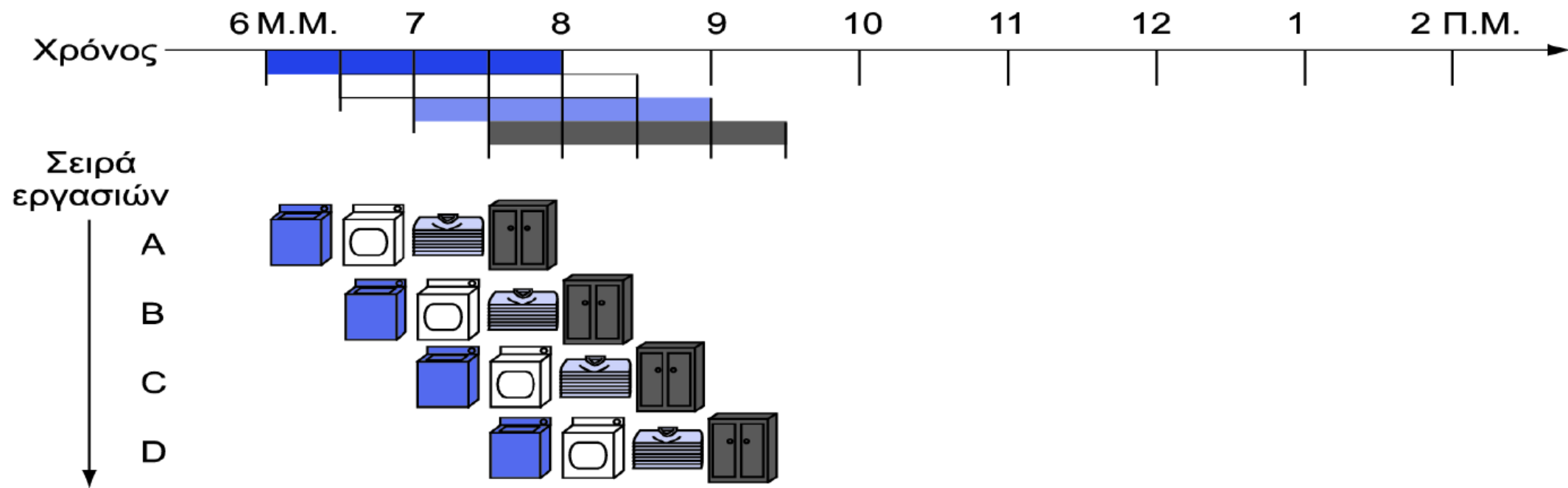
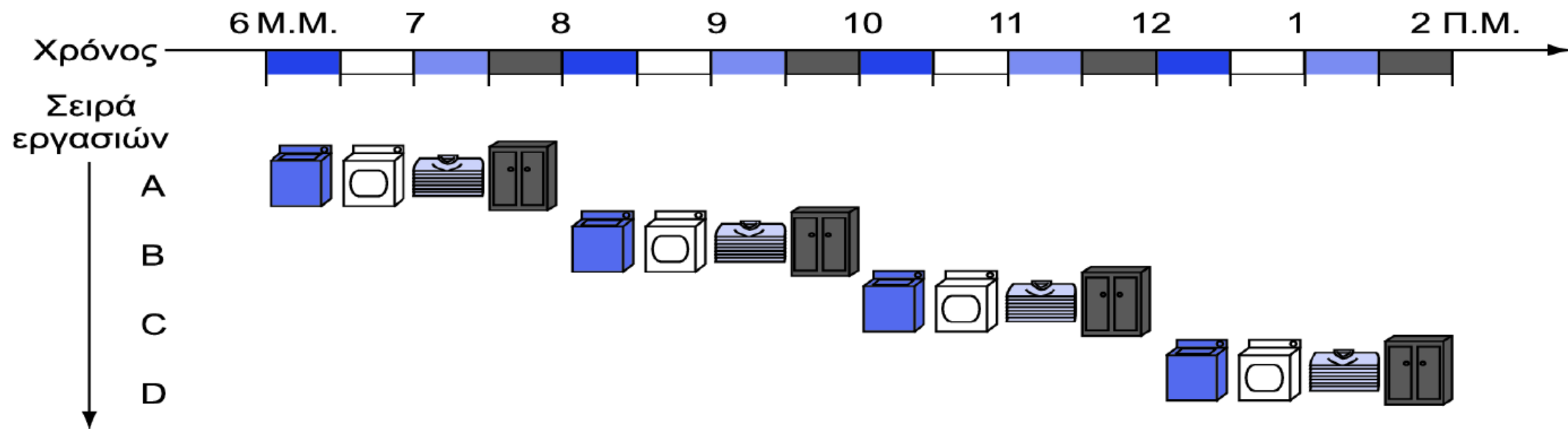
lw, sw, beq



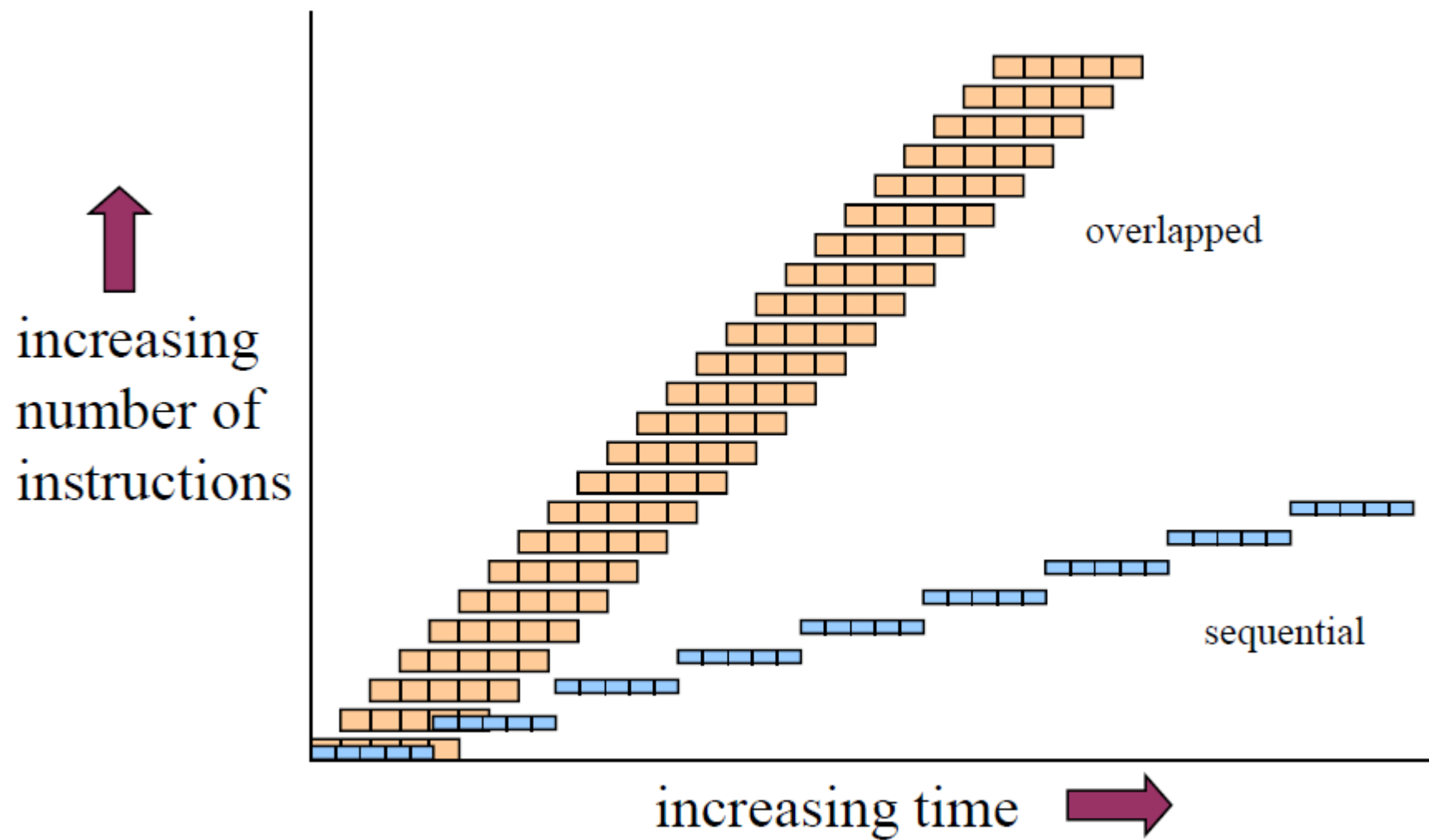
J-Type



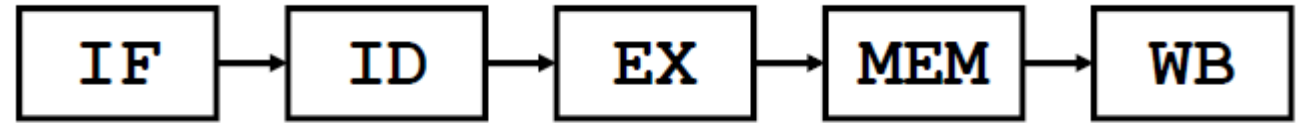
Pipeline



Throughput

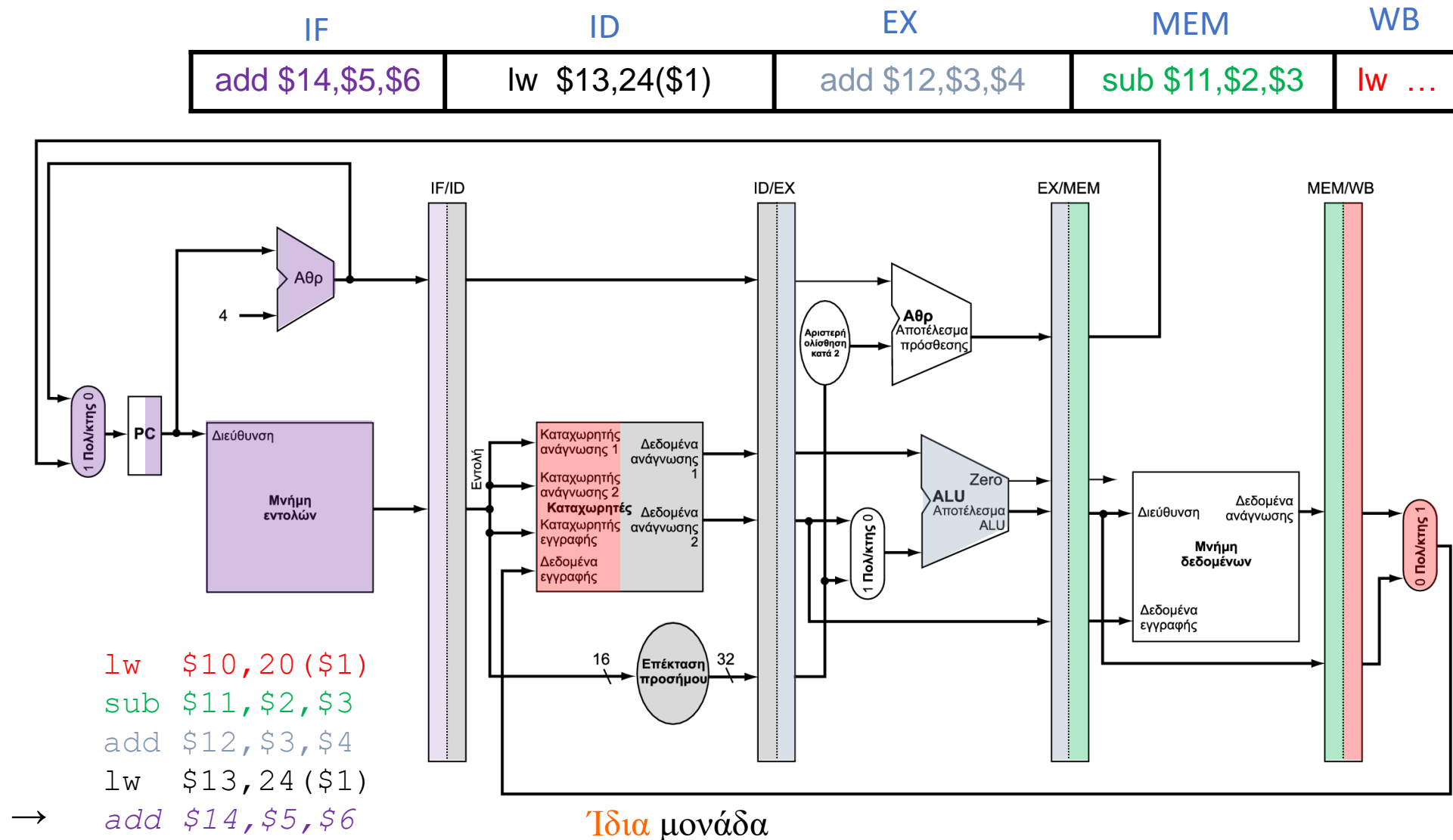


MIPS Pipeline



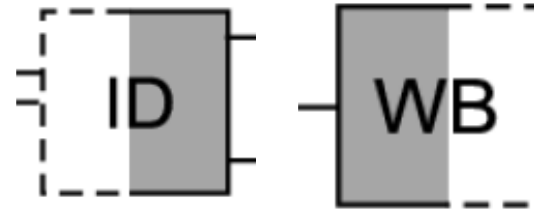
1. **IF** Instruction fetch from memory (προσκόμιση εντολής από τη μνήμη)
2. **ID**: Instruction decode & register read (αποκωδικοποίηση εντολής & ανάγνωση καταχωρητών)
3. **EX**: Execute operation or calculate address (εκτέλεση λειτουργίας ή υπολ δ/νσης)
4. **MEM**: Access memory operand (προσπέλαση τελεστέου μνήμης)
5. **WB**: Write result back to register (επανεγγραφή αποτελέσματος σε καταχωρητή)

Example - Cycle #5



- χρησιμοποιείται από διαφορετικές /διαδοχικές εντολές
- σε διαφορετικούς / διαδοχικούς κύκλους

Hazards



- **structural** → resource is busy
 - stalling
 - read & write to registers during same cycle
 - ... adding hardware resources

- **data** → data dependency between instructions ... wait for previous
 - stalling
 - data-flow *backwards* in time – **Forwarding**
 - reordering instructions (Static /Dynamic)

```
add $7, $12, $15 # put result in $7
sub $8, $7, $12  # use $7
and $9, $13, $7  # use $7 again
```

- **control** → branching - flow of execution depends on previous instruction
 - stalling
 - branch prediction
 - branch delay slots

Stall: Freeze the pipeline – insert an instruction which does nothing.



Let's try

```
lw    $10, 20($1)
sub    $11, $2, $3
add    $12, $3, $4
lw    $13, 24($1)
add    $14, $5, $6
```

hazards ?

structural

data

control

Let's try

```
lw    $10, 20($1)
sub    $11, $2, $3
add    $12, $3, $4
lw     $13, 24($1)
add    $14, $5, $6
```

hazards ?

~~structural~~

~~data~~

~~control~~

Let's try

```
add $s0, $s1, $s2
sw  $s0, 12( $s4)
```

add	IF	ID	EX	MEM	WB	
sw		IF	ID	EX	MEM	WB

hazards ?

identify

solutions

Let's try

```
add $s0, $s1, $s2
sw  $s0, 12($s4)
```

add	IF	ID	EX	MEM	WB	
sw		IF	ID	EX	MEM	WB

hazards ?

identify

data hazard \$s0 → written by add at the end of WB stage
→ sw needs that value during the MEM stage

solutions

- the result of the add is computed in add's ALU stage
- can be forwarded, available to sw in MEM stage

Let's try

```
sw    $s0, 12( $s4)
add   $s0, $s1, $s2
```

sw	IF	ID	ALU	MEM	WB	
add		IF	ID	ALU	MEM	WB

hazards ?

identify

solutions

Let's try

```
sw    $s0, 12( $s4)
add   $s0, $s1, $s2
```

sw	IF	ID	ALU	MEM	WB	
add		IF	ID	ALU	MEM	WB

hazards ?

~~#identify~~

sw instruction does not modify the \$s0

~~#solutions~~

Let's try

hazards ?

```
lw    $2,100($3)
sub   $2,$2,$5
sw    $2,100($3)
sub   $3,$3,$6
sub   $1,$1,$7
```

Κύκλος	1	2	3	4	5	6	7
Εντολή 1	IF	ID	EX	MEM	WB		
Εντολή 2		IF	ID	EX	MEM	WB	
Εντολή 3		
...							

Διάγραμμα χρονισμού

Διάγραμμα χρονισμού

lw	\$2,100(\$3)
sub	\$2, \$2, \$5
sw	\$2, 100(\$3)
sub	\$3, \$3, \$6
sub	\$1, \$1, \$7

[illegible]

Διάγραμμα χρονισμού

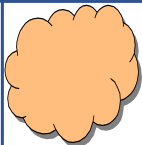
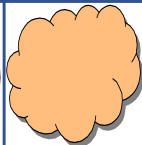
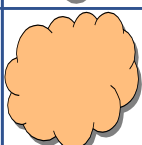


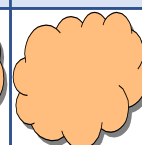
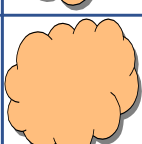
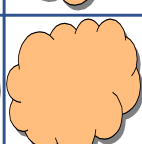
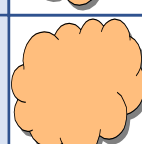
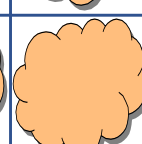
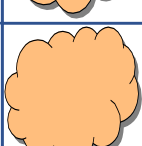

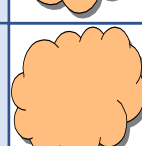
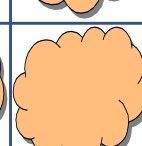
read-after-write hazard

lw	\$2, 100(\$3)
sub	\$2, \$2 , \$5
sw	\$2 , 100(\$3)
sub	\$3, \$3, \$6
sub	\$1, \$1, \$7

[illegible]

Διάγραμμα χρονισμού

lw	\$2,100(\$3)
sub	\$2,\$2,\$5
sw	\$2,100(\$3)
sub	\$3,\$3,\$6
sub	\$1,\$1,\$7

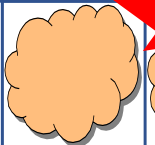
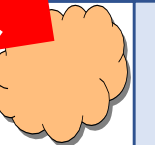

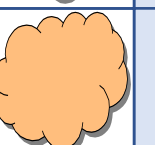
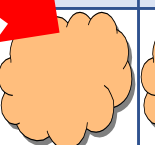
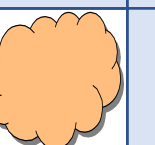

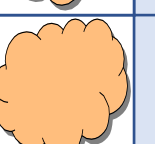

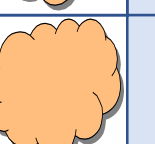


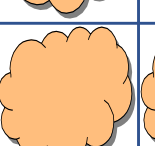

Κύκλος	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
lw \$2,100(\$3)	IF	ID	EX	MEM	WB								
sub \$2,\$2,\$5		IF	ID			EX	MEM	WB					
sw \$2,100(\$3)			IF			ID			EX	MEM	WB		
sub \$3,\$3,\$6						IF			ID	EX	MEM	WB	
sub \$1,\$1,\$7									IF	ID	EX	MEM	WB

?

?

Διάγραμμα χρονισμού

lw	\$2,100(\$3)
sub	\$2,\$2,\$5
sw	\$2,100(\$3)
sub	\$3,\$3,\$6
sub	\$1,\$1,\$7

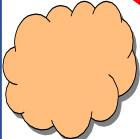
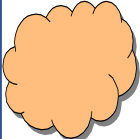
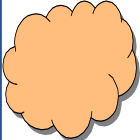
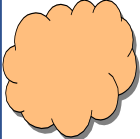
Κύκλος	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
lw \$2,100(\$3)	IF	ID	EX	MEM	WB								
sub \$2,\$2,\$5		IF	ID			EX	MEM	WB					
sw \$2,100(\$3)			IF			ID			EX	MEM	WB		
sub \$3,\$3,\$6						IF			ID	EX	MEM	WB	
sub \$1,\$1,\$7									IF	ID	EX	MEM	WB

?

?

lw	\$2,100(\$3)
sub	\$2, \$2, \$5
sw	\$2, 100(\$3)
sub	\$3,\$3,\$6
sub	\$1,\$1,\$7

Διάγραμμα χρονισμού (προώθηση)

Κύκλος	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
lw \$2 , 100 (\$3)	IF	ID	EX	MEM	WB								
sub \$2 , \$2 , \$5		IF	ID		EX	MEM	WB						
sw \$2 , 100 (\$3)			IF		ID	EX	MEM	WB					
sub \$3 , \$3 , \$6					IF	ID	EX	MEM	WB				
sub \$1 , \$1 , \$7						IF	ID	EX	MEM	WB			

Let's try

Rep:

```
lw  $2, 100($3)
sub $2, $2, $5
sw  $2, 100($3)
sub $3, $3, $6
sub $1, $1, $7
bne $1, $0, Rep
```

Exit:

Χωρίς Προώθηση

\$1: 500 , \$7: 5

- Διάγραμμα χρονισμού / πιθανά hazards
- Πόσοι κύκλοι απαιτούνται συνολικά για να ολοκληρωθεί ο βρόχος (όλες οι επαναλήψεις)

Let's try

Rep:

```
lw $2, 100($3)
```

```
sub $2, $2, $5
```

```
sw $2, 100($3)
```

```
sub $3, $3, $6
```

```
sub $1, $1, $7
```

```
bne $1, $0, Rep
```

Exit:

Χωρίς Προώθηση

\$1: 500, \$7: 5

















- Διάγραμμα χρονισμού / πιθανά hazards
- Πόσοι κύκλοι απαιτούνται συνολικά για να ολοκληρωθεί ο βρόχος (όλες οι επαναλήψεις)
- # $x = 5$; (500, 495, 490, ..., 5, 0)
- $500 / 5 = 100$ επαναλήψεις

Διάγραμμα χρονισμού

Κύκλος	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
lw \$2,100(\$3)													
sub \$2,\$2,\$5													
sw \$2,100(\$3)													
sub \$3,\$3,\$6													
sub \$1,\$1,\$7													
bne \$1,\$0, Rep													
lw \$2,100(\$3)													

Κύκλος	14	15	16	17	18	19	20
lw \$2,100(\$3)							
sub \$2,\$2,\$5							
sw \$2,100(\$3)							
sub \$3,\$3,\$6							
sub \$1,\$1,\$7							
bne \$1,\$0, Rep							
lw \$2,100(\$3)							



























Διάγραμμα χρονισμού

Κύκλος	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
lw \$2,100(\$3)	IF	ID	EX	MEM	WB								
sub \$2,\$2,\$5		IF	ID			EX	MEM	WB					
sw \$2,100(\$3)			IF			ID			EX	MEM	WB		
sub \$3,\$3,\$6						IF			ID	EX	MEM	WB	
sub \$1,\$1,\$7									IF	ID	EX	MEM	WB
bne \$1,\$0, Rep										IF	ID		
lw \$2,100(\$3)													

Κύκλος	14	15	16	17	18	19	20
lw \$2,100(\$3)							
sub \$2,\$2,\$5							
sw \$2,100(\$3)							
sub \$3,\$3,\$6							
sub \$1,\$1,\$7							
bne \$1,\$0, Rep	EX	MEM	WB				
lw \$2,100(\$3)			IF	ID	EX	MEM	WB

?

Διάγραμμα χρονισμού

Κύκλος	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
lw \$2,100(\$3)	IF	ID	EX	MEM	WB								
sub \$2,\$2,\$5		IF	ID			EX	MEM	WB					
sw \$2,100(\$3)			IF			ID			EX	MEM	WB		
sub \$3,\$3,\$6						IF			ID	EX	MEM	WB	
sub \$1,\$1,\$7									IF	ID	EX	MEM	WB
bne \$1,\$0, Rep										IF	ID		
lw \$2,100(\$3)													

Κύκλος	14	15	16	17	18	19	20
lw \$2,100(\$3)							
sub \$2,\$2,\$5							
sw \$2,100(\$3)							
sub \$3,\$3,\$6							
sub \$1,\$1,\$7							
bne \$1,\$0, Rep	EX	MEM	WB				
lw \$2,100(\$3)			IF	ID	EX	MEM	WB

Σε ποιο κύκλο αρχίζει να εκτελείται η 2^η επανάληψη ?

- 99 επαναλήψεις -- 99×15 .
- 100^η επανάληψη - 16.

Συνολικά $99 \times 15 + 16 = 1501$ για εκτέλεση

Let's try

Rep:

```
lw  $2, 100($3)
sub $2, $2, $5
sw  $2, 100($3)
sub $3, $3, $6
sub $1, $1, $7
bne $1, $0, Rep
```

Exit:

ΜΕ Προώθηση

\$1: 500 , \$7: 5

- Διάγραμμα χρονισμού / πιθανά hazards
- Πόσοι κύκλοι απαιτούνται συνολικά για να ολοκληρωθεί ο βρόχος (όλες οι επαναλήψεις)

Let's try

Rep:

```
lw  $2, 100($3)
sub $2, $2, $5
sw  $2, 100($3)
sub $3, $3, $6
sub $1, $1, $7
bne $1, $0, Rep
```



























Exit:

ΜΕ Προώθηση

\$1: 500, \$7: 5









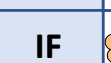



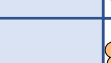













- Διάγραμμα χρονισμού / πιθανά hazards
- Πόσοι κύκλοι απαιτούνται συνολικά για να ολοκληρωθεί ο βρόχος (όλες οι επαναλήψεις)
- # $x - = 5$; (500, 495, 490, ..., 5, 0)
- $500 / 5 = 100$ επαναλήψεις







Διάγραμμα χρονισμού

CC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
lw	IF	ID	EX	M	WB															
sub		IF	ID			EX	M	WB												
sw			IF			ID			EX	M	WB									
sub						IF			ID	EX	M	WB								
sub									IF	ID	EX	M	WB							
bne										IF	ID			EX	M	WB				
lw																IF	ID	EX	M	WB

[illegible]







Διάγραμμα χρονισμού

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
lw	IF	ID	EX	M	WB															
sub		IF	ID			EX	M	WB												
sw			IF			ID			EX	M	WB									
sub						IF			ID	EX	M	WB								
sub									IF	ID	EX	M	WB							
bne										IF	ID			EX	M	WB				
lw																IF	ID	EX	M	WB

CC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
lw	IF	ID	EX	M	WB															
sub		IF	ID		EX	M	WB													
sw			IF		ID	EX	M	WB												
sub					IF	ID	EX	M	WB											
sub						IF	ID	EX	M	WB										
bne							IF	ID	EX	M	WB									
lw											IF	ID	EX	M	WB					

?

Διάγραμμα χρονισμού



















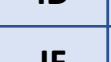
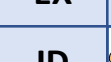




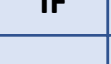
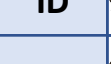
CC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
lw	IF	ID	EX	M	WB															
sub		IF	ID		EX	M	WB													
sw			IF		ID	EX	M	WB												
sub					IF	ID	EX	M	WB											
sub						IF	ID	EX	M	WB										
bne							IF	ID	EX	M	WB									
lw											IF	ID	EX	M	WB					

Σε ποιο κύκλο αρχίζει να εκτελείται η 2^η επανάληψη ?







- 99 επαναλήψεις -- 99×10 .
- 100^η επανάληψη - 11.

Συνολικά $99 \times 10 + 16 = 1001$ για εκτέλεση

Διάγραμμα χρονισμού

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
lw	IF	ID	EX	M	WB															
sub		IF	ID			EX	M	WB												
sw			IF			ID			EX	M	WB									
sub						IF			ID	EX	M	WB								
sub									IF	ID	EX	M	WB							
bne										IF	ID			EX	M	WB				
lw																IF	ID	EX	M	WB

1501

CC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
lw	IF	ID	EX	M	WB															
sub		IF	ID		EX	M	WB													
sw			IF		ID	EX	M	WB												
sub					IF	ID	EX	M	WB											
sub						IF	ID	EX	M	WB										
bne							IF	ID	EX	M	WB									
lw											IF	ID	EX	M	WB					

1001

Let's try

```
LOOP: LW    $t0, 0($t3)
      ADDI   $t2, $t0, 0
      LW     $t1, 4($t3)
      ADD    $t2, $t2, $t1
      SW     $t2, 0($t3)
      ADD    $t2, $t0, $t0
      SW     $t2, 128($t3)
      ADDI   $t3, $t3, 8
      SUBI   $t9, $t9, 4
      BNEZ   $t9, LOOP
```

EXIT:

Χωρίς / Με Προώθηση

\$t9 = 256

- Διάγραμμα χρονισμού / πιθανά hazards
- Πόσοι κύκλοι απαιτούνται συνολικά για να ολοκληρωθεί ο βρόχος (όλες οι επαναλήψεις)

Let's try

```
LOOP: LW    $t0, 0($t3)
      ADDI  $t2, $t0, 0
      LW    $t1, 4($t3)
      ADD   $t2, $t2, $t1
      SW    $t2, 0($t3)
      ADD   $t2, $t0, $t0
      SW    $t2, 128($t3)
      ADDI  $t3, $t3, 8
      SUBI  $t9, $t9, 4
      BNEZ $t9, LOOP
```

EXIT:



branch if t9==0

Χωρίς / Με Προώθηση

\$t9 = 256

- Διάγραμμα χρονισμού / πιθανά hazards
- Πόσοι κύκλοι απαιτούνται συνολικά για να ολοκληρωθεί ο βρόχος (όλες οι επαναλήψεις)
- # x - = 4; (256, 252, 248, ..., 4, 0)
- 256 / 4 = 64 επαναλήψεις

Let's try

```
LOOP: LW    $t0, 0($t3)
      ADDI   $t2, $t0, 0
      LW     $t1, 4($t3)
      ADD    $t2, $t2, $t1
      SW     $t2, 0($t3)
      ADD    $t2, $t0, $t0
      SW     $t2, 128($t3)
      ADDI   $t3, $t3, 8
      SUBI   $t9, $t9, 4
      BNEZ   $t9, LOOP
```

EXIT:

Χωρίς / Με Προώθηση

\$t9 = 256

- Διάγραμμα χρονισμού / πιθανά hazards
- Πόσοι κύκλοι απαιτούνται συνολικά για να ολοκληρωθεί ο βρόχος (όλες οι επαναλήψεις)
- # x - = 4; (256, 252, 248, ..., 4, 0)
- $256 / 4 = 64$ επαναλήψεις

Διάγραμμα χρονισμού

[illegible]

Διάγραμμα χρονισμού

[illegible]

Συνολικά $63 \times 23 + 24 = 1473$ για εκτέλεση

[illegible]

? Διάγραμμα χρονισμού (Με προώθηση)

[illegible]

Διάγραμμα χρονισμού (Με προώθηση)

[illegible]

Διάγραμμα χρονισμού (Με προώθηση)

Συνολικά **63 × 15 + 16 = 961** για εκτέλεση

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
LW \$t0, 0(\$t3)	IF	ID	EX	M	WB																			
ADDI \$t2, \$t0, 0		IF	ID	-	EX	M	WB																	
LW \$t1, 4(\$t3)			IF	-	ID	EX	M	WB																
ADD \$t2, \$t2, \$t1					IF	ID	-	EX	M	WB														
SW \$t2, 0(\$t3)						IF	-	ID	EX	M	WB													
ADD \$t2, \$t0, \$t0								IF	ID	EX	M	WB												
SW \$t2, 128(\$t3)									IF	ID	EX	M	WB											
ADDI \$t3, \$t3, 8										IF	ID	EX	M	WB										
SUBI \$t9, \$t9, 4											IF	ID	EX	M	WB									
BNEZ \$t9, LOOP												IF	ID	EX	M	WB								
LW \$t0, 0(\$t3)																IF								

Διάγραμμα χρονισμού (Με προώθηση)

καλύτερη απόδοση τροποποιώντας τον κώδικα ?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
LW \$t0, 0(\$t3)	IF	ID	EX	M	WB																			
ADDI \$t2, \$t0, 0		IF	ID	-	EX	M	WB																	
LW \$t1, 4(\$t3)			IF	-	ID	EX	M	WB																
ADD \$t2, \$t2, \$t1					IF	ID	-	EX	M	WB														
SW \$t2, 0(\$t3)						IF	-	ID	EX	M	WB													
ADD \$t2, \$t0, \$t0								IF	ID	EX	M	WB												
SW \$t2, 128(\$t3)									IF	ID	EX	M	WB											
ADDI \$t3, \$t3, 8										IF	ID	EX	M	WB										
SUBI \$t9, \$t9, 4											IF	ID	EX	M	WB									
BNEZ \$t9, LOOP												IF	ID	EX	M	WB								
LW \$t0, 0(\$t3)																IF								

Διάγραμμα χρονισμού (Με προώθηση)

καλύτερη απόδοση τροποποιώντας τον κώδικα ?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
LW \$t0, 0(\$t3)	IF	ID	EX	M	WB																			
ADDI \$t2, \$t0, 0		IF	ID	-	EX	M	WB																	
LW \$t1, 4(\$t3)			IF	-	ID	EX	M	WB																
ADD \$t2, \$t2, \$t1					IF	ID	-	EX	M	WB														
SW \$t2, 0(\$t3)						IF	-	ID	EX	M	WB													
ADD \$t2, \$t0, \$t0								IF	ID	EX	M	WB												
SW \$t2, 128(\$t3)									IF	ID	EX	M	WB											
ADDI \$t3, \$t3, 8										IF	ID	EX	M	WB										
SUBI \$t9, \$t9, 4											IF	ID	EX	M	WB									
BNEZ \$t9, LOOP												IF	ID	EX	M	WB								
LW \$t0, 0(\$t3)																IF								

καλύτερη απόδοση τροποποιώντας τον κώδικα ?

[illegible]

Διάγραμμα χρονισμού (Με προώθηση)

καλύτερη απόδοση τροποποιώντας τον κώδικα ?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
LW \$t0, 0(\$t3)	IF	ID	EX	M	WB																			
ADDI \$t2, \$t0, 0	↑	IF	ID	-	EX	M	WB																	
LW \$t1, 4(\$t3)	↑		IF	-	ID	EX	M	WB																
ADD \$t2, \$t2, \$t1	↑	↑			IF	ID	-	EX	M	WB														
SW \$t2, 0(\$t3)	↑	↑				IF	-	ID	EX	M	WB													
ADD \$t2, \$t0, \$t0	↑	↑						IF	ID	EX	M	WB												
SW \$t2, 128(\$t3)	↑	↑							IF	ID	EX	M	WB											
ADDI \$t3, \$t3, 8	↑	↑								IF	ID	EX	M	WB										
SUBI \$t9, \$t9, 4		↑									IF	ID	EX	M	WB									
BNEZ \$t9, LOOP												IF	ID	EX	M	WB								
LW \$t0, 0(\$t3)																IF								

Διάγραμμα χρονισμού

Συνολικά **63 × 13 + 14 = 833** για εκτέλεση

961

1473

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
LW \$t0, 0(\$t3)	IF	ID	EX	M	WB																			
ADDI \$t3, \$t3, 8		IF	ID	EX	M	WB																		
ADDI \$t2, \$t0, 0			IF	ID	EX	M	WB																	
LW \$t1, -4(\$t3)				IF	ID	EX	M	WB																
SUBI \$t9, \$t9, 4					IF	ID	EX	M	WB															
ADD \$t2, \$t2, \$t1						IF	ID	EX	M	WB														
SW \$t2, -8(\$t3)							IF	ID	EX	M	WB													
ADD \$t2, \$t0, \$t0								IF	ID	EX	M	WB												
SW \$t2, 120(\$t3)									IF	ID	EX	M	WB											
BNEZ \$t9, LOOP										IF	ID	EX	M	WB										
LW \$t0, 0(\$t3)														IF	ID	EX	M	WB						

Hazard Detection Pseudocode

```
if (ID/EX.Memread AND  
    ((ID/EX.RegisterRt = IF/ID.RegisterRs) OR  
    (ID/EX.RegisterRt = IF/ID.RegisterRt))) {  
    Stall the pipeline  
}
```

The Trouble with Loads

**// if the instruction in the execute phase is a load
// (the only instruction that reads memory), and
// if the register being written by the load is either
// of the source registers for the following instruction,
// stall the pipeline**

Let's try

```
Loop: lw $1, 0($2)
      addi $1, $1, 1
      sw $1, 0($2)
      addi $2, $2, 4
      sub $4, $3, $2
      bne $4, $0, Loop
```

Exit:

Χωρίς / Με Προώθηση

$\$3 = \$2 + 320$

- Διάγραμμα χρονισμού / πιθανά hazards
- Πόσοι κύκλοι απαιτούνται συνολικά για να ολοκληρωθεί ο βρόχος (όλες οι επαναλήψεις)

Let's try

```
Loop: lw $1, 0($2)
      addi $1, $1, 1
      sw $1, 0($2)
      addi $2, $2, 4
      sub $4, $3, $2
      bne $4, $0, Loop
```

Exit:

Χωρίς / Με Προώθηση

- Διάγραμμα χρονισμού / πιθανά hazards
- Πόσοι κύκλοι απαιτούνται συνολικά για να ολοκληρωθεί ο βρόχος (όλες οι επαναλήψεις)
- $\#x = 320 - 4*(i++)$; (316, 312, 308, ..., 0)
- $320/4 = 80$ επαναλήψεις

Διάγραμμα χρονισμού

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
L: lw\$1,0(\$2)	IF	ID	X	M	W																	
addi \$1,\$1,1		IF	ID	-	-	X	M	W														
sw \$1,0(\$2)			IF	-	-	ID	-	-	X	M	W											
addi \$2,\$2,4						IF	-	-	ID	X	M	W										
sub \$4,\$3,\$2									IF	ID	-	-	X	M	W							
bne \$4,\$0,L										IF	-	-	ID	-	-	X	M	W				
lw \$1,0(\$2)																		IF	ID	X	M	W

Διάγραμμα χρονισμού (Με προώθηση)

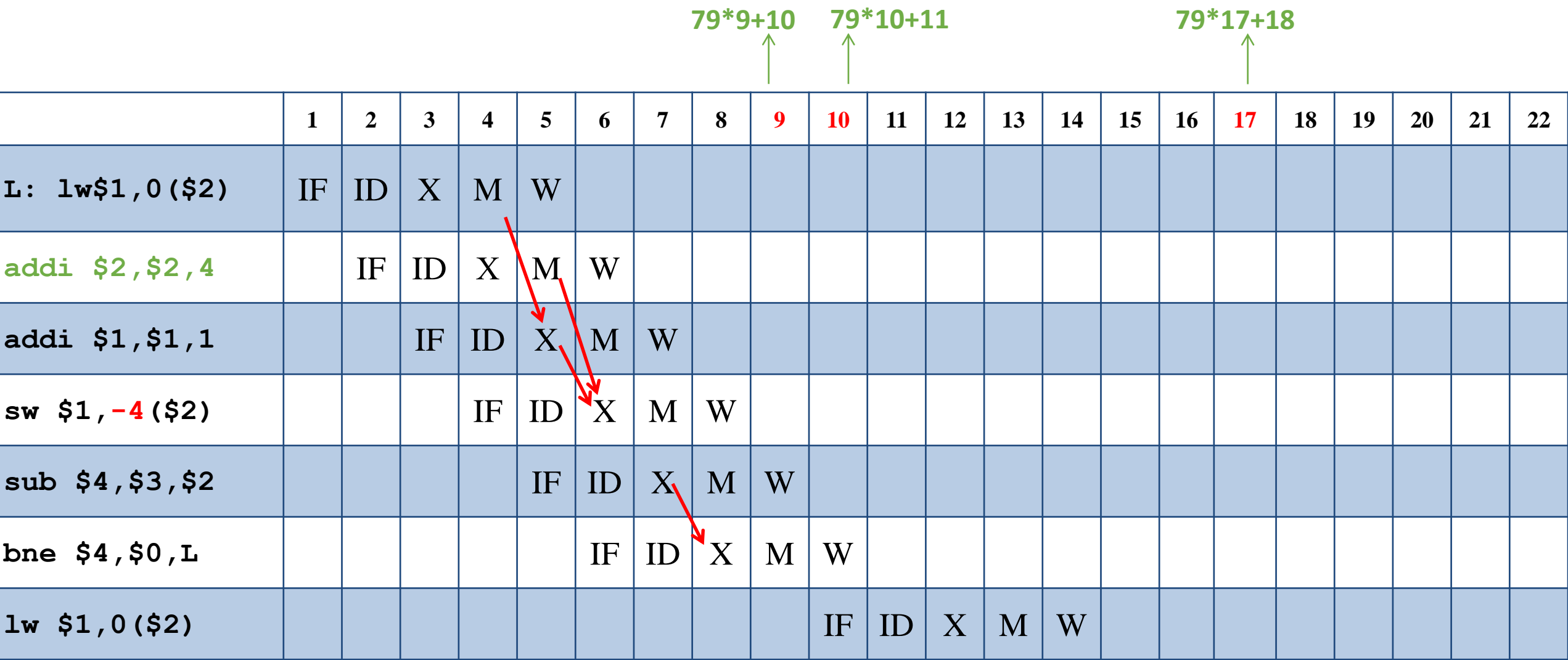
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
L: lw\$1,0(\$2)	IF	ID	X	M	W																	
addi \$1,\$1,1		IF	ID	-	X	M	W															
sw \$1,0(\$2)			IF	-	ID	X	M	W														
addi \$2,\$2,4					IF	ID	X	M	W													
sub \$4,\$3,\$2						IF	ID	X	M	W												
bne \$4,\$0,L							IF	ID	X	M	W											
lw \$1,0(\$2)											IF	ID	X	M	W							

Διάγραμμα χρονισμού (Με προώθηση)

καλύτερη απόδοση τροποποιώντας τον κώδικα ?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
L: lw\$1,0(\$2)	IF	ID	X	M	W																	
addi \$1,\$1,1		IF	ID	-	X	M	W															
sw \$1,0(\$2)			IF	-	ID	X	M	W														
addi \$2,\$2,4					IF	ID	X	M	W													
sub \$4,\$3,\$2						IF	ID	X	M	W												
bne \$4,\$0,L							IF	ID	X	M	W											
lw \$1,0(\$2)											IF	ID	X	M	W							

Διάγραμμα χρονισμού (Με προώθηση)



Let's try

```
addi $3,$0,100
add $1, $0, $0
Loop :addi $2,$1, $0
      sll $2, $2, 2
      lw $4, 400($2)
      muli $4, $4, 10
      add $4, $4, $2
      sw $4, 800($2)
      addi $1, $1, 1
      bne $1, $3, Loop
addi $2, $1, $0
```

Χωρίς / Με Προώθηση

- Διάγραμμα χρονισμού / πιθανά hazards
- Πόσοι κύκλοι απαιτούνται συνολικά για να ολοκληρωθεί ο βρόχος (όλες οι επαναλήψεις)

Let's try

```
addi $3,$0,100
add $1, $0, $0
Loop : addi $2,$1, $0
        sll $2, $2, 2
        lw $4, 400($2)
        muli $4, $4, 10
        add $4, $4, $2
        sw $4, 800($2)
        addi $1, $1, 1
        bne $1, $3, Loop
addi $2, $1, $0
```

Χωρίς / Με Προώθηση

- Διάγραμμα χρονισμού / πιθανά hazards
- Πόσοι κύκλοι απαιτούνται συνολικά για να ολοκληρωθεί ο βρόχος (όλες οι επαναλήψεις)
- # $x += 1$; (1,2,3, ..., 100)
- 100 επαναλήψεις

[illegible]

	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
addi \$3,\$0,100																												
add \$1, \$0, \$0	W																											
L: addi \$2,\$1, \$0	IF	ID	EX	M	W																							
sll \$2, \$2, 2		IF	ID	-	-	EX	M	W																				
lw \$4, 400(\$2)			IF	-	-	ID	-	-	EX	M	W																	
muli \$4, \$4, 10						IF	-	-	ID	-	-	EX	M	W														
add \$4, \$4, \$2									IF	-	-	ID	-	-	EX	M	W											
sw \$4, 800(\$2)												IF	-	-	ID	-	-	EX	M	W								
addi \$1, \$1, 1															IF	-	-	ID	EX	M	W							
bne \$1, \$3, L																		IF	ID	-	-	EX	M	W				
addi \$2, \$1, \$0																								IF				

καλύτερη απόδοση τροποποιώντας τον κώδικα ?

[illegible]

καλύτερη απόδοση τροποποιώντας τον κώδικα ?