

Ερώτημα 1

Το πλήθος επαναλήψεων του βρόγχου εξαρτάται εξ' ολοκλήρου από την εντολή στην γραμμή 8:

**addi \$t9, \$t9, -4**

Επομένως, και αφού  $(0x400)_{16} = 1024_{10}$ , ο βρόχος θα επαναληφθεί  $1024/4 = 256$  φορές. Το διάγραμμα χρονισμού για την 1<sup>η</sup> επανάληψη (μέχρι και την εκτέλεση της γραμμής 1 του 2<sup>ου</sup> loop) δίνεται παρακάτω.

Έχω χρωματίσει με **κόκκινο** τους κινδύνους τύπου **RAW**, με **πράσινο** τους κινδύνους **WAW** και με **κίτρινο** τους κινδύνους **WAR**. Οι κίνδυνοι **RAW** και **WAW** αντιμετωπίζονται με stall (στην περίπτωση που δεν έχουμε προώθηση, στα στάδια MEM και WB, ενώ όταν έχουμε προώθηση, μόνο στο στάδιο MEM). Οι κίνδυνοι τύπου **WAR** δεν χρήζουν αντιμετώπιση.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
lw \$t1, 0(\$t2)	F	D	X	M	W																					
lw \$t3, 0(\$t1)		F	D	-	-	X	M	W																		
add \$t4, \$t3, \$t3			F	-	-	D	-	-	X	M	W															
lw \$t5, 100(\$t3)						F	-	-	D	X	M	W														
add \$t6, \$t5, \$t4									F	D	-	-	X	M	W											
sw \$t6, 0(\$t2)										F	-	-	D	-	-	X	M	W								
addi \$t2, \$t2, 4													F	-	-	D	X	M	W							
addi \$t9, \$t9, -4																F	D	X	M	W						
bnez \$t9, LOOP																	F	D	-	-	X	M	W			
(2nd Loop) lw \$t1, 0(\$t2)																			-	-		F	D	X	M	W

Επομένως, απαιτούνται συνολικά 26 κύκλοι ρολογιού για να ολοκληρωθεί η 1<sup>η</sup> επανάληψη. Και αφού συνολικά θα γίνουν 256 επαναλήψεις, οι πρώτες 255 θα χρειαστούν  $255 \cdot 21 = 5.355$  κύκλοι, ενώ η τελευταία άλλους 23, δηλαδή τελικά **5.378** κύκλοι ρολογιού.

Ερώτημα 2

Το ζητούμενο διάγραμμα χρονισμού, με τις προωθήσεις κυκλωμένες, είναι:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
lw \$t1, 0(\$t2)	F	D	X	M	W														
lw \$t3, 0(\$t1)		F	D	-	X	M	W												
add \$t4, \$t3, \$t3			F	-	D	-	X	M	W										
lw \$t5, 100(\$t3)					F	-	D	X	M	W									
add \$t6, \$t5, \$t4							F	D	-	X	M	W							
sw \$t6, 0(\$t2)								F	-	D	X	M	W						
addi \$t2, \$t2, 4										F	D	X	M	W					
addi \$t9, \$t9, -4											F	D	X	M	W				
bnez \$t9, LOOP												F	D	X	M	W			
(2nd Loop) lw \$t1, 0(\$t2)															F	D	X	M	W

Επομένως, απαιτούνται συνολικά 19 κύκλοι ρολογιού για να ολοκληρωθεί η 1<sup>η</sup> επανάληψη. Και αφού συνολικά θα γίνουν 256 επαναλήψεις, οι πρώτες 255 θα χρειαστούν  $255 \cdot 14 = 3.570$  κύκλοι, ενώ η τελευταία άλλους 16, δηλαδή τελικά **3.586 κύκλοι ρολογιού**.

Ερώτημα 3

Η διάρκεια του κύκλου ρολογιού θα διαμορφωθεί με βάση το πιο χρονοβόρο στάδιο, εν προκειμένω, το MEM, δηλαδή 500ps. Εάν προσθέσουμε και την διάρκεια ανανέωσης των καταχωρητών μεταξύ των σταδίων, 20ps, **κάθε κύκλος ρολογιού** διαρκεί **520ps**.

Ερώτημα 4

Μας συμφέρει να σπάσουμε το στάδιο MEM σε δύο ίσα, διάρκειας 250ps το καθένα, όπου η προώθηση θα γίνεται στο MEM2. Πλέον, το πιο χρονοβόρο στάδιο είναι το EX, 340ps, επομένως η διάρκεια του κύκλου ρολογιού θα διαμορφωθεί με βάση αυτό. Προσθέτοντας και τα έξτρα 20ps για την ανανέωση των καταχωρητών, **η νέα διάρκεια ενός κύκλου ρολογιού είναι 360ps.**

Το διάγραμμα χρονισμού σε αυτή την περίπτωση θα είναι:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
lw \$t1, 0(\$t2)	F	D	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W																	
lw \$t3, 0(\$t1)		F	D	-	-	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W														
add \$t4, \$t3, \$t3			F	-	-	D	-	-	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W											
lw \$t5, 100(\$t3)						F	-	-	D	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W										
add \$t6, \$t5, \$t4									F	D	-	-	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W							
sw \$t6, 0(\$t2)										F	-	-	D	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W						
addi \$t2, \$t2, 4													F	D	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W					
addi \$t9, \$t9, -4														F	D	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W				
bnez \$t9, LOOP															F	D	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W			
(2nd Loop) lw \$t1, 0(\$t2)																		F	D	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W

Επομένως, απαιτούνται συνολικά 21 κύκλοι ρολογιού για να ολοκληρωθεί η 1<sup>η</sup> επανάληψη. Και αφού συνολικά θα γίνουν 256 επαναλήψεις, οι πρώτες 255 θα χρειαστούν  $255 \cdot 17 = 4.335$  κύκλοι, ενώ η τελευταία άλλους 20, δηλαδή τελικά **4.355 κύκλοι ρολογιού.**

Οι κύκλοι είναι σίγουρα περισσότεροι από το 2<sup>ο</sup> ερώτημα, αλλά εδώ ο κάθε ένας διαρκεί 360ps, ενώ στα ερωτήματα 1 και 2 διαρκεί 520ps. Επομένως, οι συνολικές διάρκειες είναι:

Ερώτημα	Χρόνος Κύκλου Ρολογιού (ps/cc)	Συνολικοί Κύκλοι Ρολογιού (cc)	Συνολική Διάρκεια (ps)
1: Κανονικός Κώδικας, Χωρίς Προωθήσεις, MEM	520	5.378	2.796.560
2: Κανονικός Κώδικας, Με Προωθήσεις, MEM	520	3.586	1.864.720
4: Κανονικός Κώδικας, Με Προωθήσεις, MEM1-2	360	4.355	1.567.800

Δηλαδή, βελτιώθηκε η επίδοση του επεξεργαστή με το σπάσιμο της MEM σε 2 μέρη.

Ερώτημα 5

Θέλουμε να «σπάσουμε» τα hazards που εμφανίζονται μεταξύ των γραμμών 1-2 (RAW), 2-3 (RAW), 4-5 (RAW), 5-6 (WAW), 8-9 (WAW). Μπορούμε να το πετύχουμε αναδιατάσσοντας τον κώδικα με αυτόν τον τρόπο (η sw της γραμμής 6 θα αλλάξει ελαφρώς μορφή λόγω της μετατόπισης της γραμμής 7):

```
1) lw $t1, 0($t2)
8) addi $t9, $t9, -4
2) lw $t3, 0($t1)
4) addi $t2, $t2, 4
7) lw $t5, 100($t3)
3) add $t4, $t3, $t3
5) add $t6, $t5, $t4
6) sw $t6, -4($t2)
9) bnez $t9, LOOP
```

Το διάγραμμα χρονισμού σε αυτή την περίπτωση είναι:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
lw \$t1, 0(\$t2)	F	D	X	M	W											
addi \$t9, \$t9, -4		F	D	X	M	W										
lw \$t3, 0(\$t1)			F	D	X	M	W									
addi \$t2, \$t2, 4				F	D	X	M	W								
lw \$t5, 100(\$t3)					F	D	X	M	W							
add \$t4, \$t3, \$t3						F	D	X	M	W						
add \$t6, \$t5, \$t4							F	D	X	M	W					
sw \$t6, -4(\$t2)								F	D	X	M	W				
bnez \$t9, LOOP									F	D	X	M	W			
(2nd Loop) lw \$t1, 0(\$t2)												F	D	X	M	W

Επομένως, απαιτούνται συνολικά 16 κύκλοι ρολογιού για να ολοκληρωθεί η 1<sup>η</sup> επανάληψη. Και αφού συνολικά θα γίνουν 256 επαναλήψεις, οι πρώτες 255 θα χρειαστούν 255\*11 = 2.805 κύκλοι, ενώ η τελευταία άλλους 13, δηλαδή τελικά **2.818 κύκλοι ρολογιού**.

Ερώτημα 6

Μπορούμε να βελτιώσουμε ακόμα περισσότερο τον χρόνο, χρησιμοποιώντας τον βελτιωμένο κώδικα αλλά και σπάζοντας το στάδιο MEM σε 2 ίσα, όπως κάναμε στο 4<sup>ο</sup> ερώτημα. Το διάγραμμα χρονισμού για αυτή την περίπτωση είναι:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
lw \$t1, 0(\$t2)	F	D	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W														
addi \$t9, \$t9, -4		F	D	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W													
lw \$t3, 0(\$t1)			F	D	-	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W											
addi \$t2, \$t2, 4				F	-	D	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W										
lw \$t5, 100(\$t3)						F	D	-	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W								
add \$t4, \$t3, \$t3							F	-	D	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W							
add \$t6, \$t5, \$t4									F	D	-	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W					
sw \$t6, -4(\$t2)										F	-	D	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W				
bnez \$t9, LOOP												F	D	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W			
(2nd Loop) lw \$t1, 0(\$t2)															F	D	X	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	W

Επομένως, απαιτούνται συνολικά 20 κύκλοι ρολογιού για να ολοκληρωθεί η 1<sup>η</sup> επανάληψη. Και αφού συνολικά θα γίνουν 256 επαναλήψεις, οι πρώτες 255 θα χρειαστούν 255\*14 = 3.570 κύκλοι, ενώ η τελευταία άλλους 17, δηλαδή τελικά **3.587** κύκλοι ρολογιού.

Παραθέτουμε έναν συγκεντρωτικό πίνακα με τη συνολική διάρκεια κάθε ερωτήματος

Ερώτημα	Χρόνος Κύκλου Ρολογιού (ps/cc)	Συνολικοί Κύκλοι Ρολογιού (cc)	Συνολική Διάρκεια (ps)
1: Κανονικός Κώδικας, Χωρίς Προωθήσεις, MEM	520	5.378	2.796.560
2: Κανονικός Κώδικας, Με Προωθήσεις, MEM	520	3.586	1.864.720
4: Κανονικός Κώδικας, Με Προωθήσεις, MEM1-2	360	4.355	1.567.800
5: Βελτιωμένος Κώδικας, Με Προωθήσεις, MEM	520	2.818	1.465.360
6: Βελτιωμένος Κώδικας, Με Προωθήσεις, MEM1-2	360	3.587	1.291.320

Είναι προφανές πως η εκδοχή του ερωτήματος 6 (δηλαδή βελτιωμένος κώδικας, με προωθήσεις και MEM1, MEM2) είναι η πιο γρήγορη.