



Εργασία 1 (υποχρεωτική) – Διοχέτευση

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ 2024 – 2025

(ΕΚΦΩΝΗΣΗ) ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ 15 ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ 2024

(ΠΑΡΑΔΟΣΗ ΣΤΟ ECLASS ΜΕΧΡΙ) **ΤΡΙΤΗ 3 ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ 2024**

Επώνυμο – Όνομα	Πατρώνυμο Μητρώνυμο	Αριθμός Μητρώου	Email
Κουλλόλλι Μικαέλα	Γκεζίμ - Ετλέβα	1115202100071	sdi2100071@di.uoa.gr
Παύλου Ανδρέας	Θεόδωρος - Γεωργία	1115202100223	sdi2100223@di.uoa.gr

Πληροφορίες για τις Υποχρεωτικές Εργασίες του μαθήματος

Οι υποχρεωτικές εργασίες του μαθήματος είναι **δύο**. Σκοπός τους είναι η κατανόηση των εννοιών του μαθήματος με χρήση αρχιτεκτονικών προσομοιωτών. Η πρώτη υποχρεωτική εργασία (αυτή) αφορά τη διοχέτευση (pipelining) και η δεύτερη θα αφορά τις κρυφές μνήμες (cache memories).

- Οι δύο εργασίες είναι υποχρεωτικές και η βαθμολογία του μαθήματος θα προκύπτει από το γραπτό (60%), την εργασία της διοχέτευσης (20%), και την εργασία των κρυφών μνημών (20%).
- Κάθε ομάδα μπορεί να αποτελείται **από 1 έως και 2 φοιτητές**. Συμπληρώστε τα στοιχεία των μελών της ομάδας στον παραπάνω πίνακα. Τα μέλη της ομάδας πρέπει να έχουν ισότιμη συμμετοχή και να γνωρίζουν τις λεπτομέρειες της υλοποίησης της ομάδας.
- Για την εξεταστική Σεπτεμβρίου δε θα δοθούν άλλες εργασίες. Τον Σεπτέμβριο εξετάζεται μόνο το γραπτό.
- Σε περίπτωση αντιγραφής θα μηδενίζονται όλες οι ομάδες που μετέχουν σε αυτή.
- Η παράδοση της **Εργασίας Διοχέτευσης** πρέπει να γίνει μέχρι τα **μεσάνυχτα της προθεσμίας ηλεκτρονικά** και **μόνο στο eclass από ένα μόνο μέλος της ομάδας** (να ανεβάσετε ένα μόνο αρχείο zip ή rar με την τεκμηρίωσή σας σε PDF και τον κώδικά σας). **Μην περιμένετε μέχρι την τελευταία στιγμή. Η εκφώνηση της εργασίας 2 των κρυφών μνημών θα αναρτηθεί αμέσως.**

Ζητούμενο

Υποθέστε ότι λειτουργείτε ένα κέντρο δεδομένων με 10 000 MIPS CPUs και σας ενδιαφέρει το **συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (total cost of ownership – TCO)** του κέντρου δεδομένων. Το TCO για ένα ημερολογιακό έτος ορίζεται απλουστευτικά για τις ανάγκες της άσκησης ως: **κόστος αγοράς των τσιπ των CPU + δαπάνη ενέργειας για την ετήσια λειτουργία όλων των CPU**. Κάθε 12 μήνες αγοράζετε καινούριες CPU και ανακυκλώνετε τις παλιές. Ως ετήσια **υπολογιστική απόδοση** για το κέντρο δεδομένων ορίζεται το πλήθος των πλήρων εκτελέσεων του ενός και μοναδικού προγράμματος που εκτελούν συνεχώς όλες οι CPU στο κέντρο δεδομένων στη διάρκεια ενός έτους. Το ζητούμενο είναι να βελτιστοποιήσετε (μεγιστοποιήσετε) τον λόγο:

Υπολογιστική Απόδοση προς Συνολικό Κόστος Ιδιοκτησίας

Το πρόγραμμα που εκτελούν συνεχώς για 24 ώρες κάθε μέρα όλες οι CPU στο κέντρο δεδομένων είναι ένα πρόγραμμα (που πρέπει να γράψετε σε assembly MIPS) το οποίο αναζητά σε έναν μη ταξινομημένο πίνακα 200 προσημασμένων ακεραίων αριθμών $A[i]$ ($i = 0, 1, \dots, 199$) την εξής πληροφορία: (α) πόσοι από τους αριθμούς του πίνακα είναι αρνητικοί (N), (β) πόσοι είναι θετικοί (P), (γ) πόσοι είναι ίσοι με το μηδέν (Z), (δ) πόσοι είναι άρτιοι (E), (ε) πόσοι είναι περιττοί (O). Τα A, N, P, Z, E, O να είναι μεταβλητές στο τμήμα δεδομένων του προγράμματός σας. Δεν πρέπει να δίνονται αριθμοί από την κονσόλα, ούτε και να εκτυπώνεται τίποτα σε αυτή.

Οι εναλλακτικές σχεδιάσεις CPU MIPS που εξετάζετε είναι:

(α) MIPSa: επεξεργαστής διαδρομής δεδομένων ενός κύκλου ρολογιού με ρολόι 50 MHz, κόστος 5 ευρώ, και ηλεκτρική ισχύ 20 watt

(β) MIPSb: επεξεργαστής με διοχέτευση πέντε σταδίων αλλά χωρίς προώθηση (μόνο ανίχνευση κινδύνων δεδομένων και προσθήκη καθυστερήσεων για τη σωστή εκτέλεση) και με προσέγγιση καθυστέρησης σε διακλάδωση (stall on branch) και επίλυση διακλαδώσεων στο στάδιο EX – το ρολόι του είναι 150 MHz, κοστίζει 8 ευρώ, και δαπανά ισχύ 35 watt

(γ) MIPSc: επεξεργαστής με διοχέτευση πέντε σταδίων, πλήρη προώθηση, και πρόβλεψη διακλάδωσης με 2-bit, BHT των 5 bit, και επίλυση στο στάδιο ID – το ρολόι του είναι 150 MHz, κοστίζει 12 ευρώ, και δαπανά ισχύ 45 watt

Και οι τρεις επεξεργαστές έχουν ιδανικό σύστημα μνήμης και συνεπώς προσπέλαση εντολών και δεδομένων σε έναν κύκλο ρολογιού. Το κόστος της ενέργειας ανά kWh (κιλοβατώρα) είναι 0.002 euro.

Ποια από τις τρεις CPU θα δώσει για το πρόγραμμα που γράψατε τον καλύτερο λόγο: Υπολογιστική Απόδοση προς Συνολικό Κόστος Ιδιοκτησίας;

Τεκμηρίωση

[Σύντομη τεκμηρίωση της λύσης σας **μέχρι 10 σελίδες ξεκινώντας από την επόμενη σελίδα** – μην αλλάζετε τη μορφοποίηση του κειμένου (**και παραδώστε την τεκμηρίωση σε αρχείο PDF**). Η τεκμηρίωσή σας πρέπει να περιλαμβάνει παραδείγματα ορθής εκτέλεσης του προγράμματος και σχολιασμό για την επίλυση του προβλήματος και την επίτευξη του ζητούμενου. Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε εικόνες, διαγράμματα και ό,τι άλλο μπορεί να βοηθήσει στην εξήγηση της δουλειάς σας.]

[ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ]

[ΚΩΔΙΚΑΣ]

Λίγα λόγια για τον συλλογισμό μας στην υλοποίηση του κώδικα. Πέρα από την σωστή λειτουργία του υλοποιήσαμε κάποια optimisations (unrolling , reordering) σε μια προσπάθεια μείωσης των hazards stalls στον Mipsb και κατ' επέκταση στην μείωση του CPI και των συνολικών κύκλων. Έτσι μπήκαμε σε μια διαδικασία να σκεφτούμε πως μπορούν να γίνουν οι υπολογισμοί με λιγότερες πράξεις - branches και πιο αποδοτικά εκμεταλλευόμενοι για παράδειγμα bitwise operations, χωρίς όμως να κάνουμε αρκετά περίπλοκο τον κώδικα (π.χ. 200 unrolls).

[ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΚΩΔΙΚΑ]

Registers									
Decimal									
\$0/zero	0	\$1/at	0	\$2/v0	0	\$3/v1	0	\$4/a0	2147615752
\$6/a2	0	\$7/a3	0	\$8/t0	1	\$9/t1	0	\$10/t2	0
\$12/t4	97	\$13/t5	86	\$14/t6	110	\$15/t7	4	\$16/s0	196
\$18/s2	0	\$19/s3	2147615756	\$20/s4	2147615760	\$21/s5	2147615764	\$22/s6	2147615768
\$24/t8	0	\$25/t9	1	\$26/k0	0	\$27/k1	0	\$28/gp	0
\$30/fp	0	\$31/ra	0	pc	0	lo	0	hi	0
									3221225216

ΤΟ ΤΡΕΞΑΜΕ ΣΤΟ QT MIPS

Για εκτέλεση σε QTSPIM χρειάζεται να αλλάξει το base address του array στην lui σε 0x1001

\$t3 : ΑΡΝΗΤΙΚΟΙ \$t5: ΠΕΡΙΤΤΟΙ \$t7: ΜΗΔΕΝΙΚΑ

\$t4: ΘΕΤΙΚΟΙ \$t6: ΑΡΤΙΟΙ

Οι counters γίνονται store στις αντιστοιχες θέσεις που έχουμε ορίσει στο data segment \$s3-\$s7 : καναμε store τους registers μετα την ολοκλήρωση των υπολογισμων.

[ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ]

[ΔΕΔΟΜΕΝΑ]

- 10 000 MIPS CPUs
- **TCO** = κόστος αγοράς των τσιπ των CPU + δαπάνη ενέργειας για την ετήσια λειτουργία όλων των CPU.
- **ετήσια υπολογιστική απόδοση** = πλήθος των πλήρων εκτελέσεων του ενός και μοναδικού προγράμματος που εκτελούν συνεχώς όλες οι CPU στο κέντρο δεδομένων στη διάρκεια ενός έτους.
- Το πρόγραμμα εκτελείται **συνεχώς για 24 ώρες** κάθε μέρα από όλες οι CPU.
- **κόστος της ενέργειας** ανά kWh (κιλοβατώρα) = 0.002 euro

[MIPSa]

[ΔΕΔΟΜΕΝΑ]

- Single Cycle
- **Clock Rate** = 50 MHz = $50 \cdot 10^6$ Hz
- **CPU_COST** = 5 euro
- **P** = 20 Watt = 0.02 kW

[CYCLE STATISTICS]

Cycle Statistics

Total Cycles:	1575
Instructions:	1575
CPI:	1
Data Hazard Stalls:	0
Control Hazard Stalls:	0

[ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ]

$$Rate = \frac{\text{υπολογιστική αποδοση}}{TCO}$$

$$(1) TCO = \text{κοστος CPU} \cdot \text{πληθος CPU} + \text{ετησιο κοστος ενεργειας} = 5 \cdot 10^4 + \text{ετησιο κοστος ενεργειας}$$

Για μια CPU:

$$\Rightarrow \text{ετησιο κοστος ενεργειας} = \text{ετησια καταναλωση ενεργειας} \cdot \text{κοστος κιλοβατωρας}$$

$$= P \cdot \text{ετησιες ωρες λειτουργειας} \cdot 0.002 = 0.02 \cdot 8760 \cdot 0.002 \Rightarrow$$

$$\text{ετησιο κοστος ενεργειας} = 0.3504 \text{ euro}$$

Συνολο

$$\text{συνολικο ετησιο κοστος ενεργειας} = 0.3504 \cdot 10000 = 3504 \text{ (2)}$$

Άρα, απο (2)

$TCO = 50000 + 3504 = 53504 \text{ euros}$
--

$$\text{Υπολογιστική αποδοση} = \text{πληθος ετησιων εκτελεσεων} = 10000 \cdot \text{πληθος εκτελεσεων μιας CPU}$$

Για μια CPU:

$$\text{εκτελεσεις} = \frac{\text{ετησιος χρονος λειτουργειας(sec)} }{T_{cpu} (Hz)}$$

$$T_{cpu} = \frac{CPI \cdot I}{CLOCK_{RATE}} = \frac{1 \cdot 1575}{50 \cdot 10^6} = 31,5 \cdot 10^{-6} \text{ sec}$$

$$\text{εκτελεσεις} = \frac{31556926}{31,5 \cdot 10^{-6}} = 1001807 \cdot 10^6$$

$$\text{συνολικες ετησιες εκτελεσεις} = 1001807 \cdot 10^6 \cdot 10^4 = 1001807 \cdot 10^{10} \Rightarrow$$

Αρα,

$$\text{Υπολογιστικη αποδοση} = 1001807 \cdot 10^{10}$$

$$\Rightarrow \text{Rate} = \frac{1001807 \cdot 10^{10}}{53505} = 188 \cdot 10^9$$

[Mipsb]

[ΔΕΔΟΜΕΝΑ]

- Pipeline
- stall on branch on EX
- Clock rate = 150 MHz = $150 \cdot 10^6$ MHz
- Cpu cost = 8 euro
- P = 35 watt

[CYCLE STATISTICS]

Cycle Statistics		🔍	✕
Total Cycles:	1727		
Instructions:	1578		
CPI:	1.09442		
Data Hazard Stalls:	0		
Control Hazard Stalls:	149		

[ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ]

Ίδιες πράξεις με παραπάνω.....

Για μια CPU:

[Επώνυμο1 – Επώνυμο2]

$$\text{ετησιο κοστος ενεργειας} = 0.035 \cdot 8.760 \cdot 0.002 = 0.6132 \text{ euros}$$

Συνολικά:

$$\text{ετησιο κοστος ενεργειας} = 0.6132 \cdot 10000 = 6132$$

Αρα,

$$TCO = \text{ετησιο κοστος CPU} + \text{ετησιο κοστος ενεργειας} = 8 \cdot 10000 + 6132 = 86132 \text{ euros}$$

Συνολικές ετήσιες εκτελέσεις για μια CPU:

$$T_{cpu} = \frac{1.09 \cdot 1778}{150 \cdot 10^6} = 11.47 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{συνολικες εκτελεσεις} = \frac{31556926}{11.47 \cdot 10^{-6}} = 2751257 \cdot 10^6$$

Για όλες τις CPU:

$$\text{υπολογιστικη αποδοση} = \frac{31556926}{11.47 \cdot 10^{-6}} = 2751257 \cdot 10^{16}$$

Αρα,

$$Rate = \frac{2.751257 \cdot 10^{16}}{86132} = 319 \cdot 10^9$$

[Mipsc]

[ΔΕΔΟΜΕΝΑ]

- Pipeline , Full Forwarding, Branch Predictor 2 bits
- Clock Rate = 150 MHz = $150 \cdot 10^6$ HZ
- CPU_COST = 12 euro
- P = 45 Watt = 0.045 kW

[CYCLE STATISTICS]

Cycle Statistics	
Total Cycles:	1580
Instructions:	1578
CPI:	1.00127
Data Hazard Stalls:	0
Control Hazard Stalls:	2

[ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ]

$$Rate = \frac{\text{υπολογιστική απόδοση}}{TCO}$$

(1)

Ίδιες πράξεις με παραπάνω.....

Για μια CPU:

$$\text{Συνολική ενεργεια} = 45 \cdot \frac{8760}{1000} = 394.2$$

$$\text{Συνολικό κόστος ενεργειας} = 394.2 \cdot 0.002 = 0.7884$$

Συνολικά:

$$\text{Κόστος ενεργειας για όλες τις CPU} = 0.7884 \cdot 10000 = 7884 \text{ euro}$$

$$TCO = 120000 + 7884 = 127884$$

$$T_{cpu} = \frac{I \cdot CPI}{CLOCK_{RATE}} = \frac{1578 \cdot 1001}{150 \cdot 10^6} = 10,5305 \cdot 10^{-6}$$

Άρα,

$$\frac{\Omega_{ρεξ}}{T_{cpu}} = 2996859.07 \cdot 10^{10} \Rightarrow Rate = \frac{2.996859.07 \cdot 10^{10}}{127884} \approx 234 \cdot 10^9$$

[ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ]

Παρατηρούμε ότι,

$$Rate_{mipsb} > Rate_{mipsc} > Rate_{mipsa}$$

Επομένως όπως βλέπουμε ο MIPSb δίνει τον καλύτερο λογο με 188 δις εκτελέσεις τον χρόνο πάρολο που ο MIPSb έχει την υψηλότερη απόδοση και αυτο συμβαινει λόγω του υψηλού κόστος του (8 ευρώ). Άπο της άλλη πλευρά ο Mips1 έχει τη χαμηλότερη απόδοση και λογο υπολογιστικής απόδοσης / TCO.

