

# Άσκηση εφ' όλης της ύλης (1, 2, 3, 4)

- Η άσκηση αγγίζει σημαντικό μέρος της ύλης που έχουμε συζητήσει σε όλο το εξάμηνο (Κεφάλαια 1, 2, 3, 4).



# Εκφώνηση (1) – software



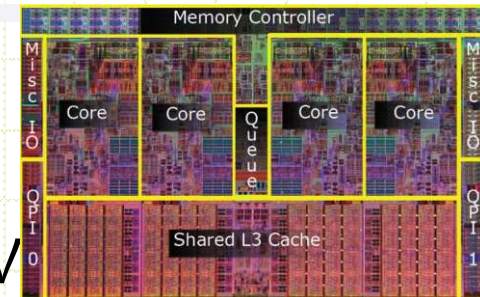
- Δεδομένα για το λογισμικό (software). Ένα πρόγραμμα Π περιέχει την ακόλουθη μίξη εντολών και εκτελεί συνολικά  $4 \times 10^9$  δυναμικές εντολές.

| Κατηγορία                    | Συχνότητα | Πλήθος        |
|------------------------------|-----------|---------------|
| Ακέραιες αριθμητικές/λογικές | 28%       | 1 120 000 000 |
| Φορτώσεις                    | 26%       | 1 040 000 000 |
| Αποθηκεύσεις                 | 13%       | 520 000 000   |
| Διακλαδώσεις                 | 10%       | 400 000 000   |
| Άλματα                       | 3%        | 120 000 000   |
| Κινητής υποδιαστολής         | 20%       | 800 000 000   |
| Σύνολο                       | 100%      | 4 000 000 000 |



# Εκφώνηση (2) – microarchitecture

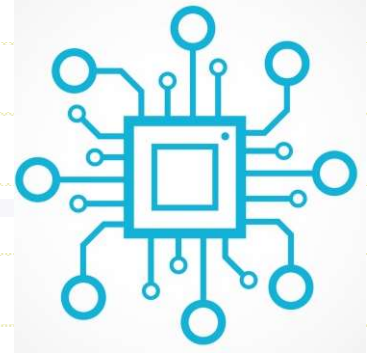
- Δεδομένα για το υλικό (hardware). Το πρόγραμμα Π πρόκειται να εκτελεστεί σε δύο διαφορετικούς μικροεπεξεργαστές RISC-V P1, P2. Ο πίνακας περιέχει χαρακτηριστικά στοιχεία για τους δύο επεξεργαστές.



| Επεξεργαστής MIPS    | P1 | P2  |
|----------------------|----|-----|
| CPI Ακεραίων         | 1  | 1   |
| CPI Φορτώσεων        | 1  | 1.2 |
| CPI Αποθηκεύσεων     | 1  | 1.1 |
| CPI Διακλαδώσεων     | 1  | 1.3 |
| CPI Αλμάτων          | 1  | 2   |
| CPI Κιν.Υποδιαστολής | 5  | 5   |



# Εκφώνηση (3) – technology



- Δεδομένα για την τεχνολογία κατασκευής των δύο μικροεπεξεργαστών.

| Επεξεργαστής           | P1                  | P2                  |
|------------------------|---------------------|---------------------|
| Ρυθμός ρολογιού        | 1 GHz               | 3 GHz               |
| Τάση λειτουργίας       | 0.9 V               | 1.1 V               |
| Χωρητικό φορτίο        | 0.035 $\mu\text{F}$ | 0.045 $\mu\text{F}$ |
| Εσοδεία κατασκευής     | 0.94                | 0.88                |
| Κόστος πλακιδίου       | 30 000 ευρώ         | 30 000 ευρώ         |
| Διάμετρος πλακιδίου    | 20 cm               | 20 cm               |
| Επιφάνεια κύβου (τσιπ) | 2 cm <sup>2</sup>   | 4 cm <sup>2</sup>   |



# Ερώτημα 1 – Execution time



- Πόσο χρόνο διαρκεί η εκτέλεση του προγράμματος Π σε καθέναν από τους επεξεργαστές P1 και P2;

|    | Χρόνος  |
|----|---|
|    | $T = I \times \text{CPI} / f$   |
| P1 | $T_{P1} = 4 \times 10^9 \times [0.28 \times 1 + 0.26 \times 1 + 0.13 \times 1 + 0.10 \times 1 + 0.03 \times 1 + 0.20 \times 5] / (1 \times 10^9)$       |
| P2 | $T_{P2} = 4 \times 10^9 \times [0.28 \times 1 + 0.26 \times 1.2 + 0.13 \times 1.1 + 0.10 \times 1.3 + 0.03 \times 2 + 0.20 \times 5] / (3 \times 10^9)$ |

|    | Χρόνος   |
|----|--|
| P1 | $T_{P1} = 4 \times 10^9 \times 1.77 / (1 \times 10^9) = 7.08 \text{ sec}$  |
| P2 | $T_{P2} = 4 \times 10^9 \times 1.925 / (3 \times 10^9) = 2.57 \text{ sec}$ |

|    | Κύκλοι  |
|----|---|
| P1 | $C_{P1} = 4 \times 10^9 \times 1.77 = 7\,080\,000\,000$ κύκλοι  |
| P2 | $C_{P2} = 4 \times 10^9 \times 1.925 = 7\,700\,000\,000$ κύκλοι |





# Ερώτημα 2 – Time breakdown

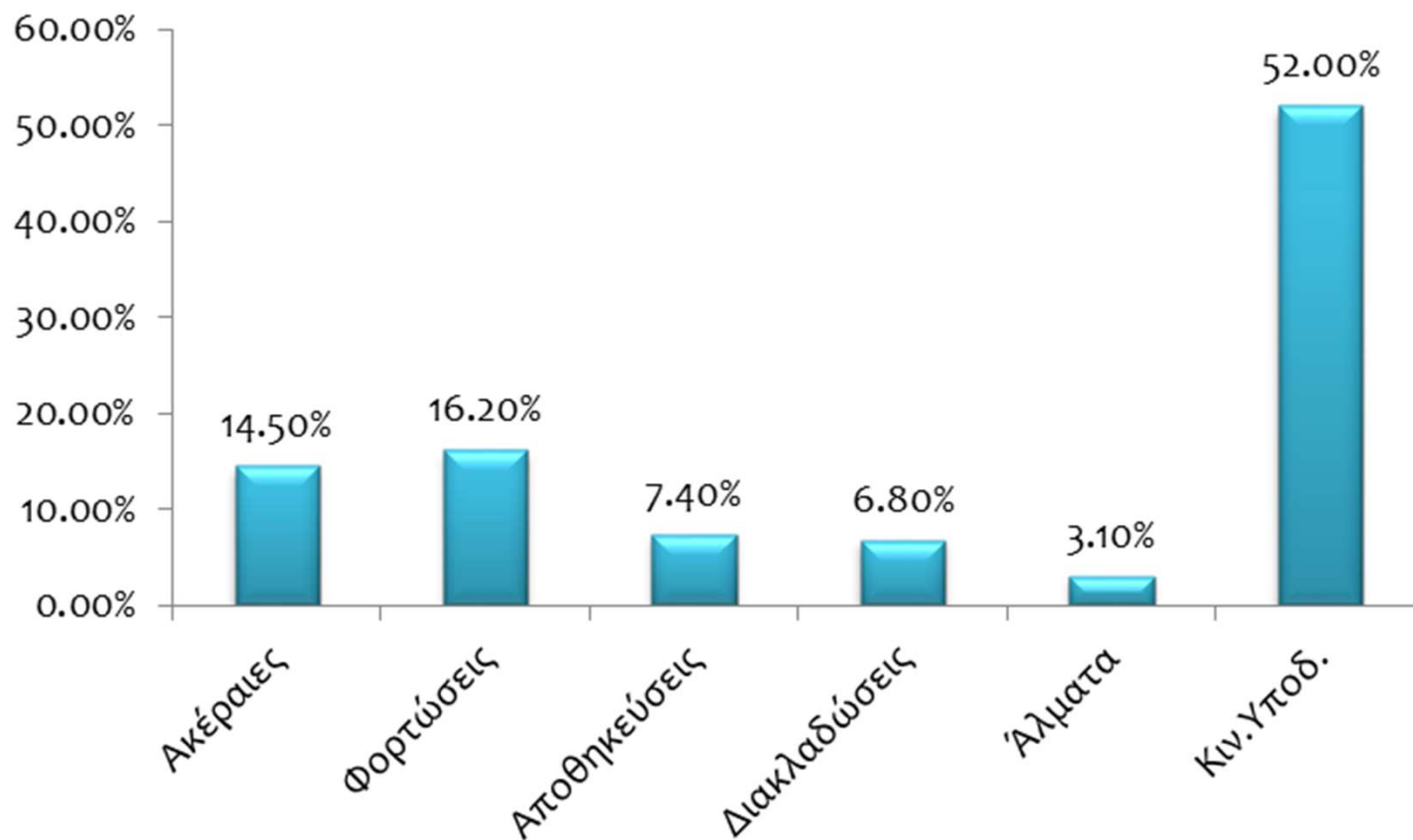


- Τι ποσοστό του χρόνου εκτέλεσης του Π στον P2 καταλαμβάνουν οι εντολές κάθε κατηγορίας;

| Κατηγορία            | Πλήθος εντολών | CPI | Πλήθος κύκλων | % κύκλων<br>(άρα χρόνου) |
|----------------------|----------------|-----|---------------|--------------------------|
| Ακέραιες             | 1 120 000 000  | 1   | 1 120 000 000 | 14.5%                    |
| Φορτώσεις            | 1 040 000 000  | 1.2 | 1 248 000 000 | 16.2%                    |
| Αποθηκεύσεις         | 520 000 000    | 1.1 | 572 000 000   | 7.4%                     |
| Διακλαδώσεις         | 400 000 000    | 1.3 | 520 000 000   | 6.8%                     |
| Άλματα               | 120 000 000    | 2   | 240 000 000   | 3.1%                     |
| Κινητής υποδιαστολής | 800 000 000    | 5   | 4 000 000 000 | 52.0%                    |
| Σύνολο               | 4 000 000 000  |     | 7 700 000 000 | 100.0%                   |



# Ερώτημα 2 – Time breakdown



# Ερώτημα 3 – Power



- Πόση ηλεκτρική ισχύ καταναλώνει κάθε επεξεργαστής;

|    | Ισχύς (Power)  |
|----|--|
|    | Ισχύς = Φορτίο χωρητικότητας x Τάση <sup>2</sup> x Ρυθμός ρολογιού |
| P1 | $0.035 \times 10^{-6} \times 0.9^2 \times (1 \times 10^9)$         |
| P2 | $0.045 \times 10^{-6} \times 1.1^2 \times (3 \times 10^9)$         |

|    | Ισχύς (Power) |
|----|---------------|
| P1 | = 28.35 Watt  |
| P2 | = 163.35 Watt |





# Ερώτημα 4 – Energy



- Πόση ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνει κάθε επεξεργαστής για την εκτέλεση του Π;

|    | Ενέργεια (Energy)         |
|----|---------------------------|
|    | Ενέργεια = Ισχύς x Χρόνος |
| P1 | 28.35 Watt x 7.08 sec     |
| P2 | 163.35 Watt x 2.57 sec    |

|    | Ενέργεια (Energy) |
|----|-------------------|
| P1 | 200.72 Joule      |
| P2 | 419.81 Joule      |



# Ερώτημα 5 – MIPS



- Τι ρυθμό εκτέλεσης εντολών (instructions per second – IPS) έχει κάθε επεξεργαστής για το πρόγραμμα Π;

|    | Ρυθμός εκτέλεσης εντολών                                  |
|----|---|
|    | Ρυθμός εντολών (Instructions Per Second) = Εντολές/χρόνος |
| P1 | $4 \times 10^9 / 7.08$                                    |
| P2 | $4 \times 10^9 / 2.57$                                    |

|    | Ρυθμός εκτέλεσης εντολών                       |
|----|--|
| P1 | 565 MIPS (Millions of Instructions per Second) |
| P2 | 1 556 MIPS                                     |



# Ερώτημα 6 – MFLOPS



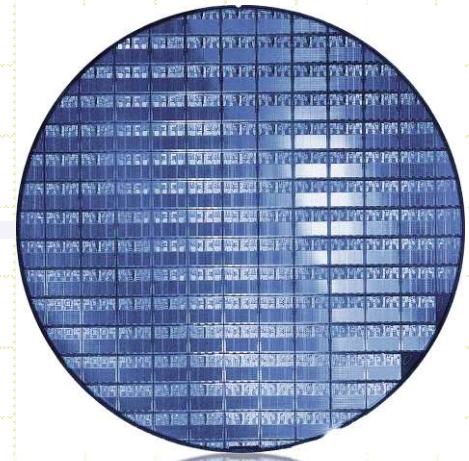
- Τι ρυθμό εκτέλεσης εντολών κινητής υποδιαστολής (floating point operations per second – FLOPS) έχει κάθε επεξεργαστής για το πρόγραμμα Π;

|    | Ρυθμός εκτέλεσης εντολών κινητής υποδιαστολής                             |
|----|---|
|    | Ρυθμός εντολών (Floating Point Operations Per Second) = Εντολές ΚΥ/χρόνος |
| P1 | $0.2 \times 4 \times 10^9 / 7.08$   |
| P2 | $0.2 \times 4 \times 10^9 / 2.57$   |

|    | Ρυθμός εκτέλεσης εντολών κινητής υποδιαστολής                 |
|----|---|
| P1 | 113 MFLOPS (Millions of Floating Point Operations per Second) |
| P2 | 311 MFLOPS  |



# Ερώτημα 7 – Cost



- Πόσο κοστίζει κάθε τσιπ επεξεργαστή P1 και κάθε τσιπ επεξεργαστή P2;

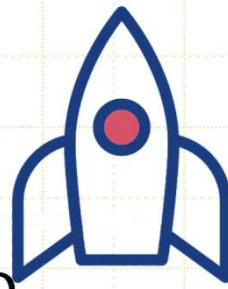
|    | Κόστος τσιπ  |
|----|--|
|    | Κόστος τσιπ = Κόστος πλακιδίου / (#Τσιπ ανά πλακίδιο x Εσοδεία)<br>#Τσιπ ανά πλακίδιο = Επιφάνεια πλακιδίου / Επιφάνεια τσιπ |
| P1 | $30\,000 / [ (\pi \times 10^2 \text{ cm}^2 / 2 \text{ cm}^2) \times 0.94 ]$ ευρώ   |
| P2 | $30\,000 / [ (\pi \times 10^2 \text{ cm}^2 / 4 \text{ cm}^2) \times 0.88 ]$ ευρώ   |

|    | Πλήθος «καλών» τσιπ   |
|----|---|
| P1 | $(\pi \times 10^2 \text{ cm}^2 / 2 \text{ cm}^2) \times 0.94 = 157 \times 0.94 = 147$ |
| P2 | $(\pi \times 10^2 \text{ cm}^2 / 4 \text{ cm}^2) \times 0.88 = 78 \times 0.88 = 68$   |

|    | Κόστος τσιπ |
|----|-------------|
| P1 | 203 ευρώ    |
| P2 | 434 ευρώ    |



# Ερώτημα 8 – Speedup



■ Αν δαπανηθεί επιπλέον hardware (με τεχνικές είδαμε στο Κεφάλαιο 4) ο επεξεργαστής P2 μπορεί να γίνει ακόμη ταχύτερος και το CPI των εντολών γίνεται αυτό που δείχνει ο παρακάτω πίνακας.

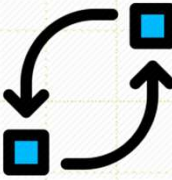
Πόση θα είναι η επιτάχυνση του προγράμματος Π;

| Επεξεργαστής MIPS    | P2  | P2* |
|----------------------|-----|-----|
| CPI Ακεραίων         | 1   | 1   |
| CPI Φορτώσεων        | 1.2 | 1.1 |
| CPI Αποθηκεύσεων     | 1.1 | 1.1 |
| CPI Διακλαδώσεων     | 1.3 | 1.2 |
| CPI Αλμάτων          | 2   | 2   |
| CPI Κιν.Υποδιαστολής | 5   | 4   |

|            | Χρόνος εκτέλεσης   |
|------------|--|
| P2         | 2.57 sec   |
| P2*        | $T_{P2*} = 4 \times 10^9 \times [0.28 \times 1 + 0.26 \times 1.1 + 0.13 \times 1.1 + 0.10 \times 1.2 + 0.03 \times 2 + 0.20 \times 4] / (3 \times 10^9) = 2.252 \text{ sec}$ |
| Επιτάχυνση | $2.57 / 2.252 = 1.14 \text{ φορές}$  |



# Ερώτημα 9 – Instr. Replacement

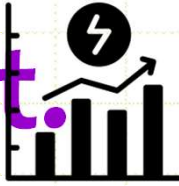


■ Στον νέο επεξεργαστή  $P2^*$  γίνεται προσπάθεια να επιταχυνθεί το πρόγραμμα  $\Pi$  μέσω αντικατάστασης κάποιων «αργών» εντολών κινητής υποδιαστολής με αντίστοιχες ακέραιες. Πόσες εντολές κινητής υποδιαστολής πρέπει να αντικατασταθούν με ακέραιες ώστε το πρόγραμμα να εκτελείται σε 2 sec;

|          | Επιθυμητός χρόνος εκτέλεσης   |
|----------|---|
| $P2^*$   | 2 sec   |
| $P2^*$   | $T_{P2^*} = 4 \times 10^9 \times CPI / (3 \times 10^9) = 2.0 \text{ sec}$ – άρα θέλουμε $CPI = 1.5$   |
| CPI      | $CPI = (0.28+k) \times 1 + 0.26 \times 1.1 + 0.13 \times 1.1 + 0.10 \times 1.2 + 0.03 \times 2 + (0.20 - k) \times 4$<br>(με $k < 0.20$ )<br>$1.5 = 0.28 + k + 0.286 + 0.143 + 1.20 + 0.06 + 0.80 - 4k$<br>$3k = 1.269$ ή $k = 0.423$ |
| Απάντηση | Δηλαδή οι εντολές κινητής υποδιαστολής πρέπει να αποτελούν το 20% – 42.3% των εντολών = – 22.3% (!)<br><b>Άρα το ζητούμενο δεν είναι εφικτό</b>   |



# Ερώτημα 10 – Energy per Instruct.



- Πόση ενέργεια καταναλώνεται για την εκτέλεση 1 εντολής της κάθε κατηγορίας στον επεξεργαστή P1;

| Εντολές          | Ενέργεια  |
|------------------|---|
| Ακεραίων         | $200.72 \text{ Joule} \times (1 / 7\,080\,000\,000) = 28 \text{ nJoule}$  |
| Φορτώσεων        | $200.72 \text{ Joule} \times (1 / 7\,080\,000\,000) = 28 \text{ nJoule}$  |
| Αποθηκεύσεων     | $200.72 \text{ Joule} \times (1 / 7\,080\,000\,000) = 28 \text{ nJoule}$  |
| Διακλαδώσεων     | $200.72 \text{ Joule} \times (1 / 7\,080\,000\,000) = 28 \text{ nJoule}$  |
| Αλμάτων          | $200.72 \text{ Joule} \times (1 / 7\,080\,000\,000) = 28 \text{ nJoule}$  |
| Κιν.Υποδιαστολής | $200.72 \text{ Joule} \times (5 / 7\,080\,000\,000) = 140 \text{ nJoule}$ |



# Ερώτημα 11 – Datacenter



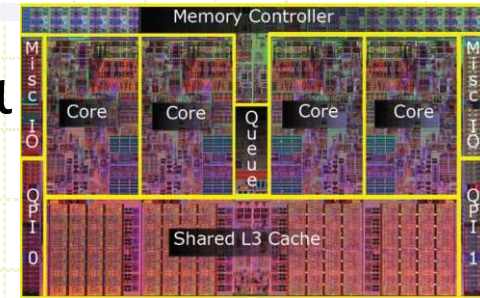
Υποθέστε ότι όλα τα τσιπ του επεξεργαστή P1 που κατασκευάζονται από ένα πλακίδιο και λειτουργούν σωστά και όλα τα τσιπ του P2 που κατασκευάζονται από ένα πλακίδιο και πάλι λειτουργούν σωστά «επιστρατεύονται» σε ένα κέντρο δεδομένων για να εκτελούν επαναλήψεις του προγράμματος Π (που αποδείχθηκε πολύ δημοφιλές!). Πόσες συνολικά εκτελέσεις του Π κατά τη διάρκεια μιας ημέρας μπορούμε να επιτύχουμε;

|   |  |
|---|--|
| Πλήθος «καλών» τσιπ P1 + P2                       | 147 + 68   |
| Χρόνος Π στο P1, P2                               | 7.08 sec, 2.57 sec   |
| Επαναλήψεις του Π σε κάθε τσιπ P1, P2 σε μία μέρα | $24 \times 60 \times 60 / 7.08 = 12\ 203$ εκτελέσεις @P1<br>$24 \times 60 \times 60 / 2.57 = 33\ 619$ εκτελέσεις @P2 |
| Συνολικές εκτελέσεις                              | $12\ 203 * 147 + 33\ 619 * 68 = 4\ 079\ 933$ εκτελέσεις / day  |



# Εκφώνηση (4) – RISC-V CPU P3

- Θεωρήστε τώρα ότι το πρόγραμμα εκτελείται σε έναν νέο μικροεπεξεργαστή RISC-V P3, ο οποίος είναι πολύ απλός και σχεδιάζεται με διαδρομή δεδομένων ενός μεγάλου κύκλου ρολογιού (single-cycle datapath). Οι λανθάνοντες χρόνοι των μονάδων του υλικού του P3 φαίνονται στον πίνακα.



| Επεξεργαστής MIPS                                       | P3     |
|---|--------|
| Μνήμη εντολών   | 250 ps |
| Μνήμη δεδομένων   | 230 ps |
| Καταχωρητές   | 150 ps |
| ALU ακεραίων  | 180 ps |
| ALU κινητής υποδιαστολής                                | 450 ps |
| οι δύο ALU λειτουργούν παράλληλα στους καταχωρητές τους |        |





# Ερώτημα 12 – Χρόνος εκτέλεσης P3

- Σε πόσο χρόνο θα εκτελεστεί το πρόγραμμα στην νέα αυτή CPU P3;

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| Χρόνος κύκλου ρολογιού στον P3 | Μια εντολή load θα χρειαστεί: $250 + 150 + 180 + 230 + 150$ ps ή συνολικά 960 ps  |
|                                | Μια εντολή κινητής υποδιαστολής θα χρειαστεί: $250 + 150 + 450 + 150$ ps ή συνολικά 1000 ps   |
|                                | Συνεπώς η πιο αργή διαδρομή που καθορίζει και το ρολόι είναι 1000 ps των εντολών κιν.υποδιαστολής   |
| Χρόνος εκτέλεσης               | Το πρόγραμμα εκτελεί 4 000 000 000 εντολές και κάθε μία διαρκεί 1 κύκλο δηλαδή 1000 ps<br>Χρόνος = $4\,000\,000\,000 * 1000 * 10^{-12}$ sec = 4 sec |





# Ερώτημα 13 – Διοχέτευση στον P3

- Λαμβάνουμε την απόφαση να επανασχεδιάσουμε τον P3 ώστε να περιέχει διοχέτευση 5 σταδίων (στο στάδιο EX μπορεί να εκτελεστεί είτε μια ακέραια πράξη είτε μια πράξη κινητής υποδιαστολής).
- Πόση είναι η διάρκεια του κύκλου ρολογιού του νέου P3;

**Χρόνος ρολογιού P3 με διοχέτευση**

Ίσος με το μέγιστο στάδιο του pipeline. Στην περίπτωση του P3 αυτό είναι το EX με διάρκεια 450 ps.

- Πόση επιτάχυνση παρέχει για το συγκεκριμένο πρόγραμμα η νέα σχεδίαση με διοχέτευση; Θεωρήστε ότι δεν υπάρχουν καθυστερήσεις και κίνδυνοι και η εκτέλεση στη διοχέτευση γίνεται ιδανικά.

**Επιτάχυνση (speedup)**

Speedup (ideal pipeline vs. single-cycle) =  $1000 \text{ ps} / 450 \text{ ps} = 2.22$   
(το πλήθος εντολών είναι το ίδιο και το CPI ίσο με 1 και στις δύο σχεδιάσεις)



# Ερώτημα 14 – Κίνδυνοι στον P3

- Τώρα υποθέστε ότι η εκτέλεση στον P3 με διοχέτευση δεν είναι ιδανική και ότι το 15% των εντολών υφίσταται 1 κύκλο καθυστέρησης (stall) λόγω κινδύνων δεδομένων που δεν μπορούν να λυθούν με προώθηση, και επίσης ότι το 1/4 των διακλαδώσεων προβλέπονται εσφαλμένα και πληρώνουν 2 κύκλους καθυστέρησης επειδή η επίλυση των διακλαδώσεων γίνεται στο στάδιο EX.
- Πόση είναι τώρα η επιτάχυνση της σχεδίασης του P3 με διοχέτευση έναντι της απλής σχεδίασης ενός κύκλου;

**Επιτάχυνση  
(speedup)**

Speedup (real pipeline vs. single-cycle) =

$$= [1000 \text{ ps} \times 1] / [450 \text{ ps} \times (1 + 0.15 \times 1 + 0.10 \times 0.25 \times 2)] = \mathbf{1.85}$$

(το CPI λαμβάνεται εδώ υπόψιν αφού είναι 1 στη σχεδίαση ενός κύκλου αλλά 1.20 στη διοχέτευση λόγω των καθυστερήσεων)

