

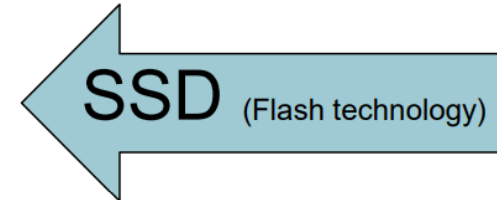
Κεφάλαιο 5

Ιεραρχία της μνήμης

Η ευφυΐα είναι η σύζυγος,
η φαντασία είναι η ερωμένη και
η μνήμη είναι η υπηρέτρια.
-- Βίκτωρ Ουγκώ

Τεχνολογίες μνήμης

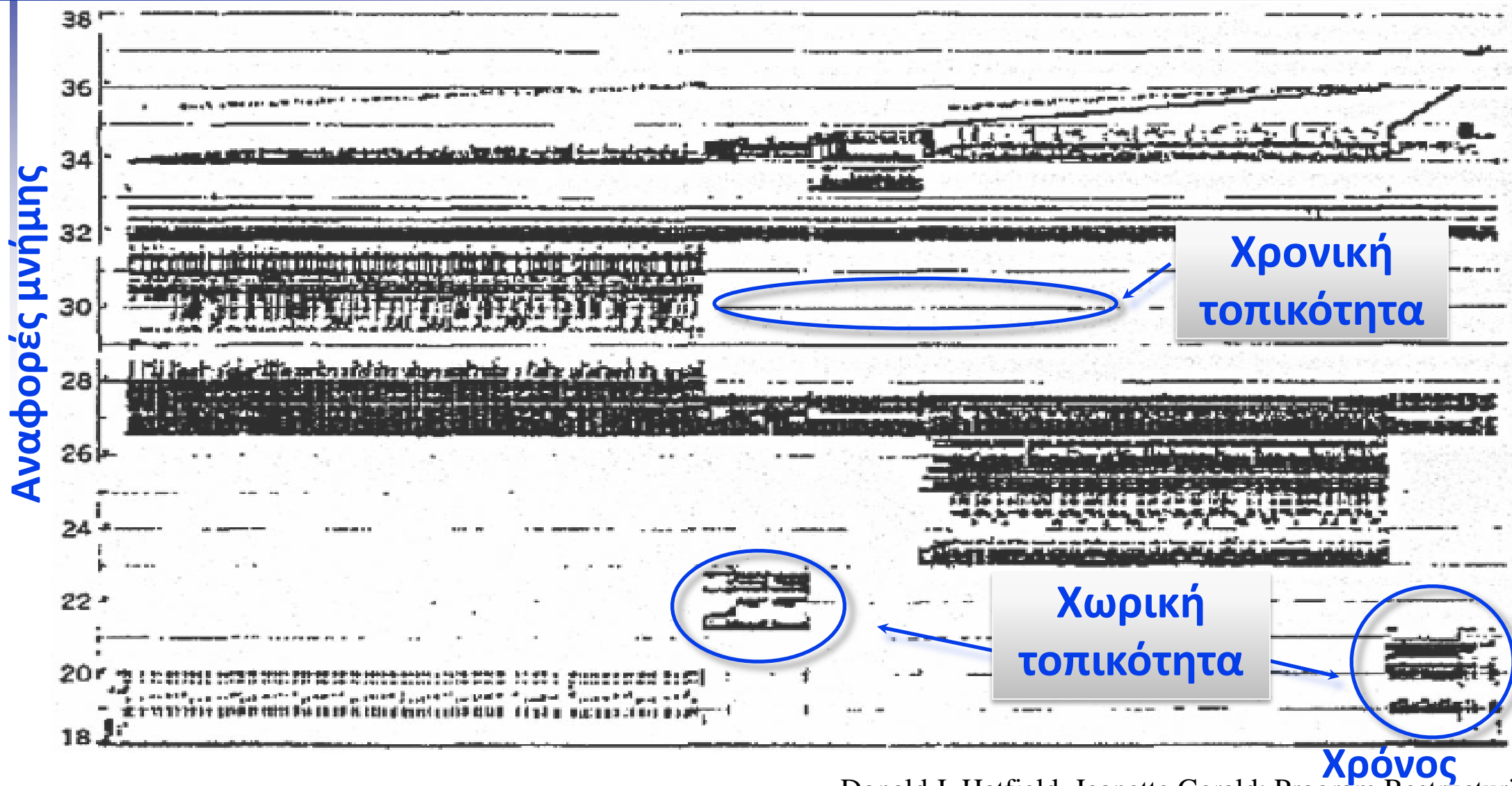
- Στατική RAM (Static RAM - SRAM)
 - 0.5ns - 2.5ns, \$400 - \$1000 ανά GB
- Δυναμική RAM (Dynamic RAM - DRAM)
 - 50ns - 70ns, \$10 - \$20 ανά GB
- Μαγνητικός δίσκος
 - 5ms - 20ms, \$0.07 - \$0.1 ανά GB
- Ιδανική μνήμη ->
 - Χρόνος προσπέλασης → **SRAM**
 - Χωρητικότητα και κόστος/GB → **Δίσκος**



Τοπικότητα Αναφοράς (locality)

- Τα προγράμματα προσπελάζουν ένα **μικρό** μέρος του χώρου δ/νσεών τους κάθε φορά
- **Χρονική τοπικότητα (temporal locality)**
 - Αντικείμενα που προσπελάστηκαν **πρόσφατα** είναι πιθανό να προσπελαστούν **πάλι σύντομα**
 - π.χ., εντολές σε ένα βρόχο, μεταβλητές επαγωγής (induction variables)
- **Χωρική τοπικότητα (spatial locality)**
 - Αντικείμενα **κοντά** σε αυτά που προσπελάστηκαν πρόσφατα είναι πιθανόν να προσπελαστούν **σύντομα**
 - π.χ., προσπέλαση ακολουθίας εντολών, δεδομένα πινάκων...

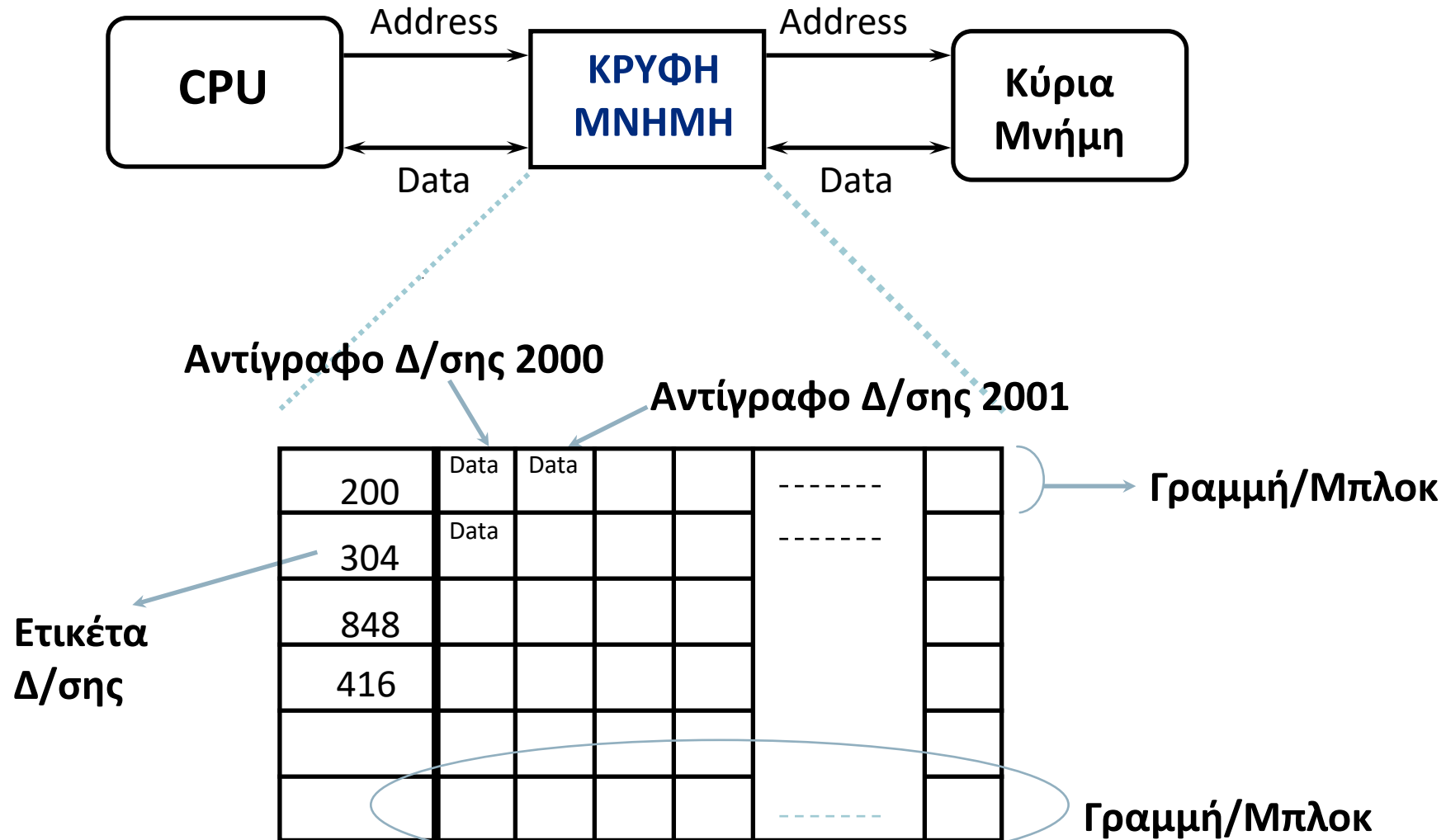
Σχηματισμοί αναφοράς στη Μνήμη



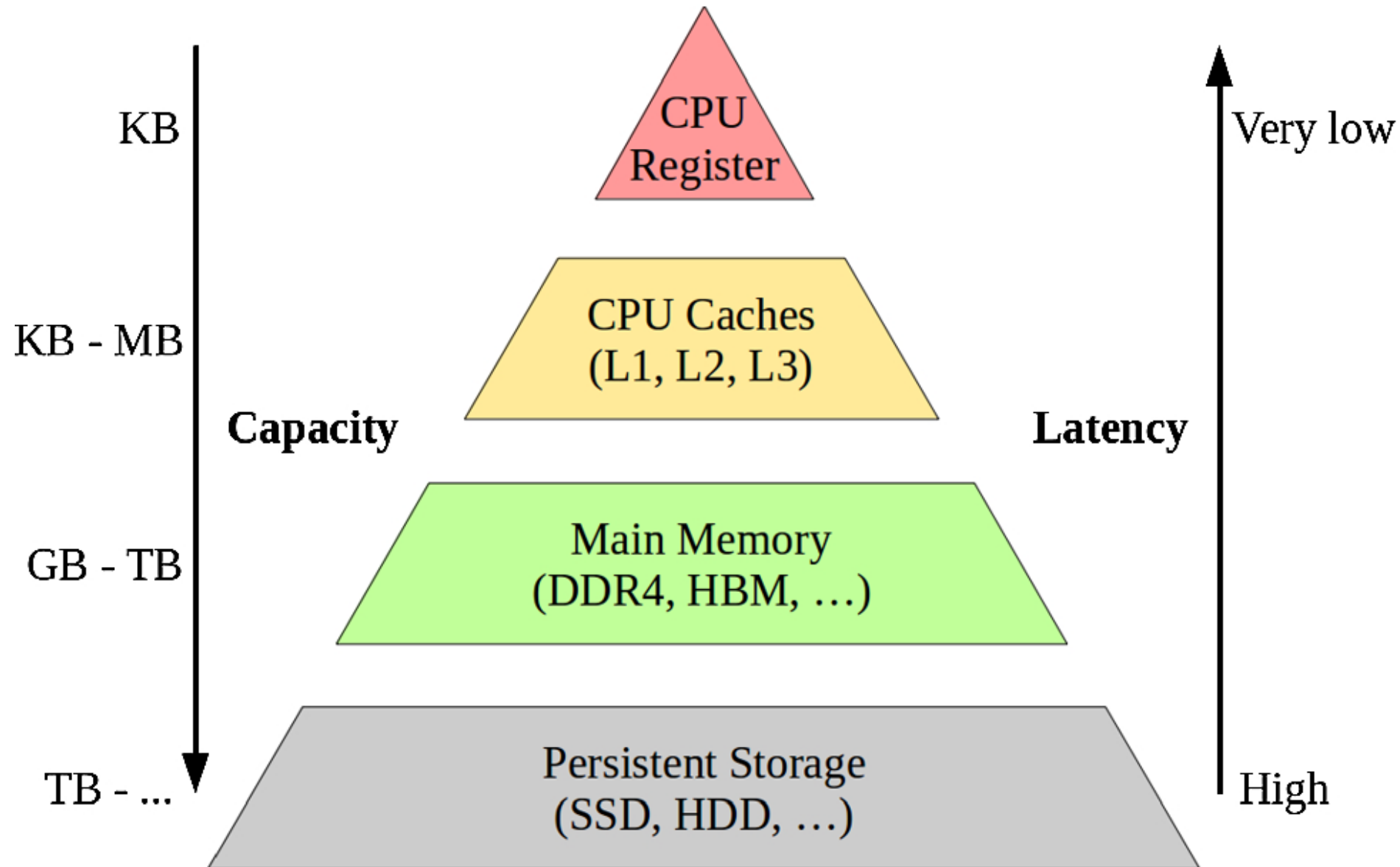
Εκμετάλλευση της τοπικότητας

- Ιεραρχία μνήμης
- Αποθήκευσε τα πάντα στο δίσκο
- Αντίγραψε τα πρόσφατα προσπελασθέντα (και τα κοντινά τους) αντικείμενα από το δίσκο σε μια μικρότερη μνήμη DRAM
 - Κύρια μνήμη
- Αντίγραψε τα πιο πρόσφατα προσπελασθέντα (και τα κοντινά τους) αντικείμενα από τη DRAM σε μια μικρότερη μνήμη SRAM
 - Κρυφή μνήμη (cache) προσαρτημένη στη CPU

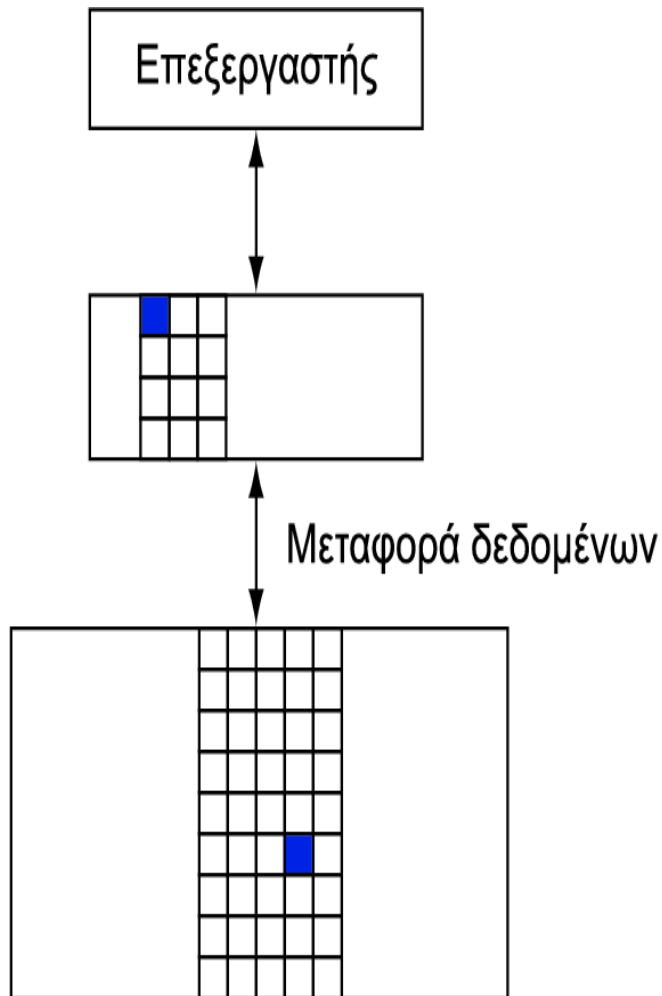
Κρυφή μνήμη



Ιεραρχία Μνήμης



Επίπεδα ιεραρχίας μνήμης



- **Μπλοκ - block (Γραμμή - line):** μονάδα αντιγραφής
 - Μπορεί να περιέχει πολλές λέξεις
- **Αν τα δεδομένα βρίσκονται στο ανώτερο επίπεδο:**
 - **Ευστοχία (hit):** προσπάθεια ικανοποιείται από το ανώτερο επίπεδο
 - **Λόγος_ευστοχίας (hit ratio):** ευστοχίες/προσπελάσεις
- **Αν τα δεδομένα απουσιάζουν:**
 - **Αστοχία (miss):** το μπλοκ αντιγράφεται από το χαμηλότερο επίπεδο
 - **Απαιτούμενος χρόνος: ποινή αστοχίας (miss penalty)**
 - **Λόγος_αστοχίας (miss ratio):**
 - $\text{αστοχίες/προσπελάσεις} = 1 - \text{Λόγος_ευστοχίας}$

Κρυφή μνήμη (cache memory)

- Κρυφή μνήμη (cache memory)
 - Το επίπεδο της ιεραρχίας μνήμης που είναι πλησιέστερα στη CPU
- Δεδομένες προσπελάσεις X_1, \dots, X_{n-1}, X_n

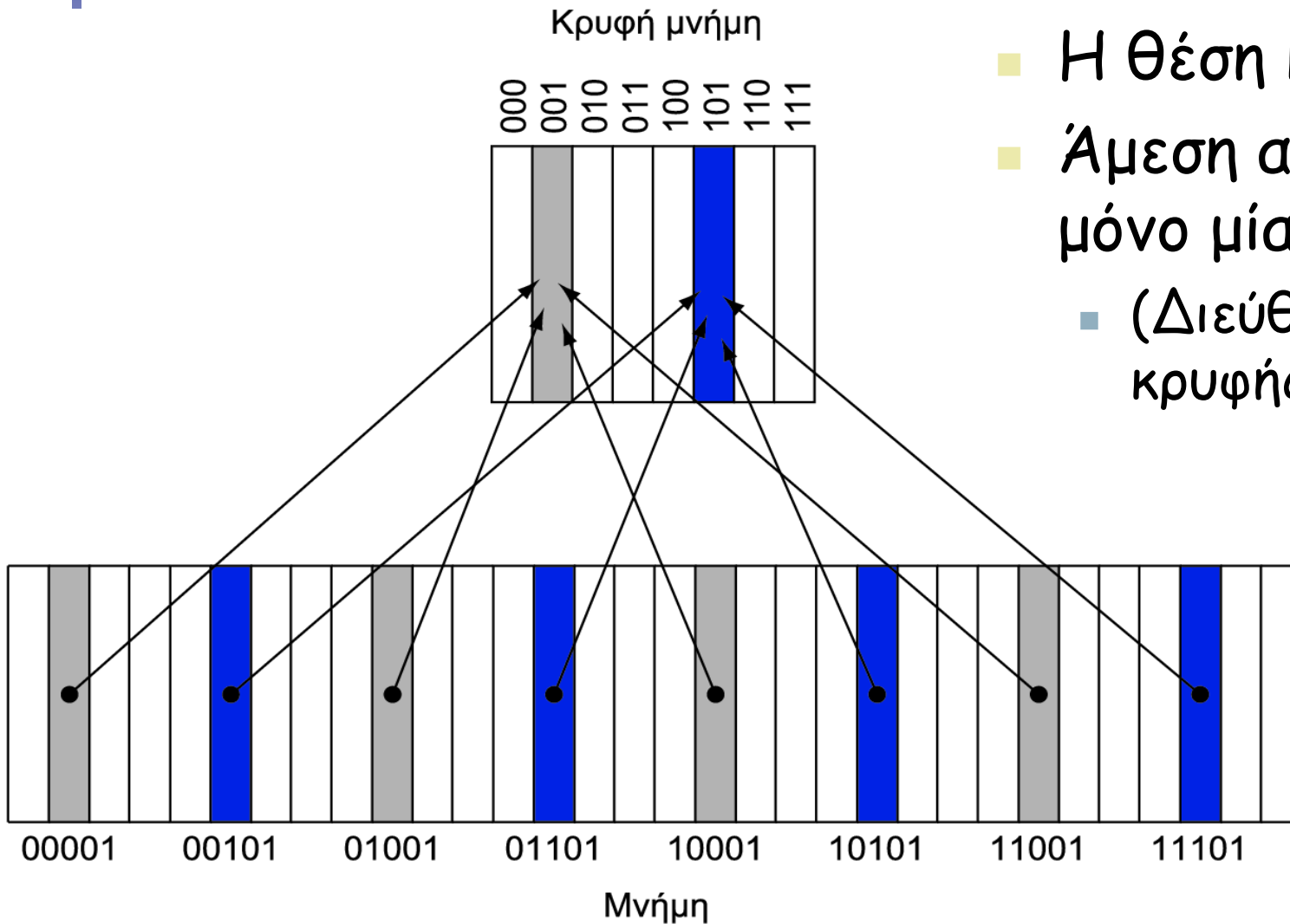
X_4
X_1
X_{n-2}
X_{n-1}
X_2
X_3

X_4
X_1
X_{n-2}
X_{n-1}
X_2
X_n
X_3

- Πώς γνωρίζουμε αν τα δεδομένα είναι παρόντα;
- Πού κοιτάζουμε;

α. Πριν από την αναφορά στο X_n β. Μετά από την αναφορά στο X_n

Κρυφή μνήμη άμεσης απεικόνισης



- Η θέση καθορίζεται από τη διεύθυνση
- Άμεση απεικόνιση (direct mapping): μόνο μία επιλογή
 - $(\text{Διεύθυνση μπλοκ}) \bmod (\# \text{Μπλοκ κρυφής μνήμης})$

Πλήθος μπλοκ είναι δύναμη του 2
Χρήση των bit χαμηλής τάξης της διεύθυνσης

ΕΤΙΚΕΤΕΣ και έγκυρα bit

- Πώς γνωρίζουμε ποιο συγκεκριμένο μπλοκ βρίσκεται σε μια θέση της κρυφής μνήμης;
 - Αποθήκευση της δ/νσης του μπλοκ μαζί με τα δεδομένα
 - Στη πραγματικότητα, χρειάζονται μόνο τα bit υψηλής τάξης
 - ονομάζονται ετικέτα (tag)
- Και αν δεν υπάρχουν δεδομένα σε μια θέση;
 - Έγκυρο (valid) bit: 1 = παρόντα, 0 = όχι παρόντα
 - Αρχικά 0

Παράδειγμα κρυφής μνήμης

- 8 μπλοκ, 1 λέξη/μπλοκ, άμεσης απεικόνισης
- Αρχική κατάσταση

Αριθμοδείκτης	V	Ετικέτα	Δεδομένα
000	N		
001	N		
010	N		
011	N		
100	N		
101	N		
110	N		
111	N		

Παράδειγμα κρυφής μνήμης

Δ/νση λέξης	Δυαδική δ/νση	Ευστοχία/αστοχία	Μπλοκ κρυφής μνήμης
22	10 110	Αστοχία	110

Αριθμοδείκτης	V	Ετικέτα	Δεδομένα
000	N		
001	N		
010	N		
011	N		
100	N		
101	N		
110	Y	10	Mem[10110]
111	N		

Παράδειγμα κρυφής μνήμης

Δ/νση λέξης	Δυαδική δ/νση	Ευστοχία/αστοχία	Μπλοκ κρυφής μνήμης
26	11 010	Αστοχία	010

Αριθμοδείκτης	V	Ετικέτα	Δεδομένα
000	N		
001	N		
010	Y	11	Mem[11010]
011	N		
100	N		
101	N		
110	Y	10	Mem[10110]
111	N		

Παράδειγμα κρυφής μνήμης

Δ/νση λέξης	Δυαδική δ/νση	Ευστοχία/αστοχία	Μπλοκ κρυφής μνήμης
22	10 110	Ευστοχία	110
26	11 010	Ευστοχία	010

Αριθμοδείκτης	V	Ετικέτα	Δεδομένα
000	N		
001	N		
010	Y	11	Mem[11010]
011	N		
100	N		
101	N		
110	Y	10	Mem[10110]
111	N		

Παράδειγμα κρυφής μνήμης

Δ/νση λέξης	Δυαδική δ/νση	Ευστοχία/αστοχία	Μπλοκ κρυφής μνήμης
16	10 000	Αστοχία	000
3	00 011	Αστοχία	011
16	10 000	Ευστοχία	000

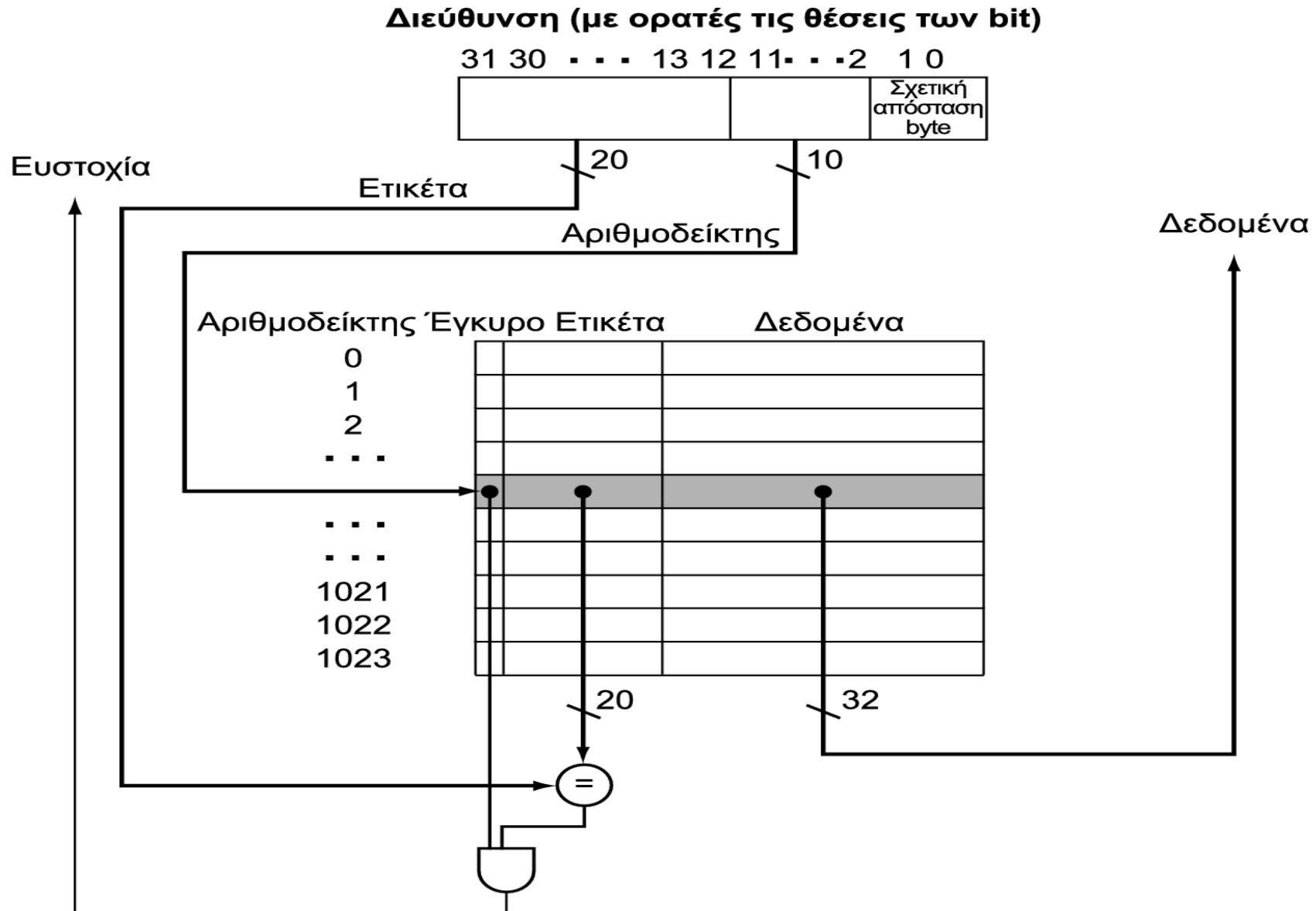
Αριθμοδείκτης	Υ	Ετικέτα	Δεδομένα
000	Υ	10	Mem[10000]
001	N		
010	Υ	11	Mem[11010]
011	Υ	00	Mem[00011]
100	N		
101	N		
110	Υ	10	Mem[10110]
111	N		

Παράδειγμα κρυφής μνήμης

Δ/νση λέξης	Δυαδική δ/νση	Ευστοχία/αστοχία	Μπλοκ κρυφής μνήμης
18	10 010	Αστοχία	010

Αριθμοδείκτης	Υ	Ετικέτα	Δεδομένα
000	Υ	10	Mem[10000]
001	N		
010	Υ	10	Mem[10010]
011	Υ	00	Mem[00011]
100	N		
101	N		
110	Υ	10	Mem[10110]
111	N		

Υποδιαίρεση της διεύθυνσης



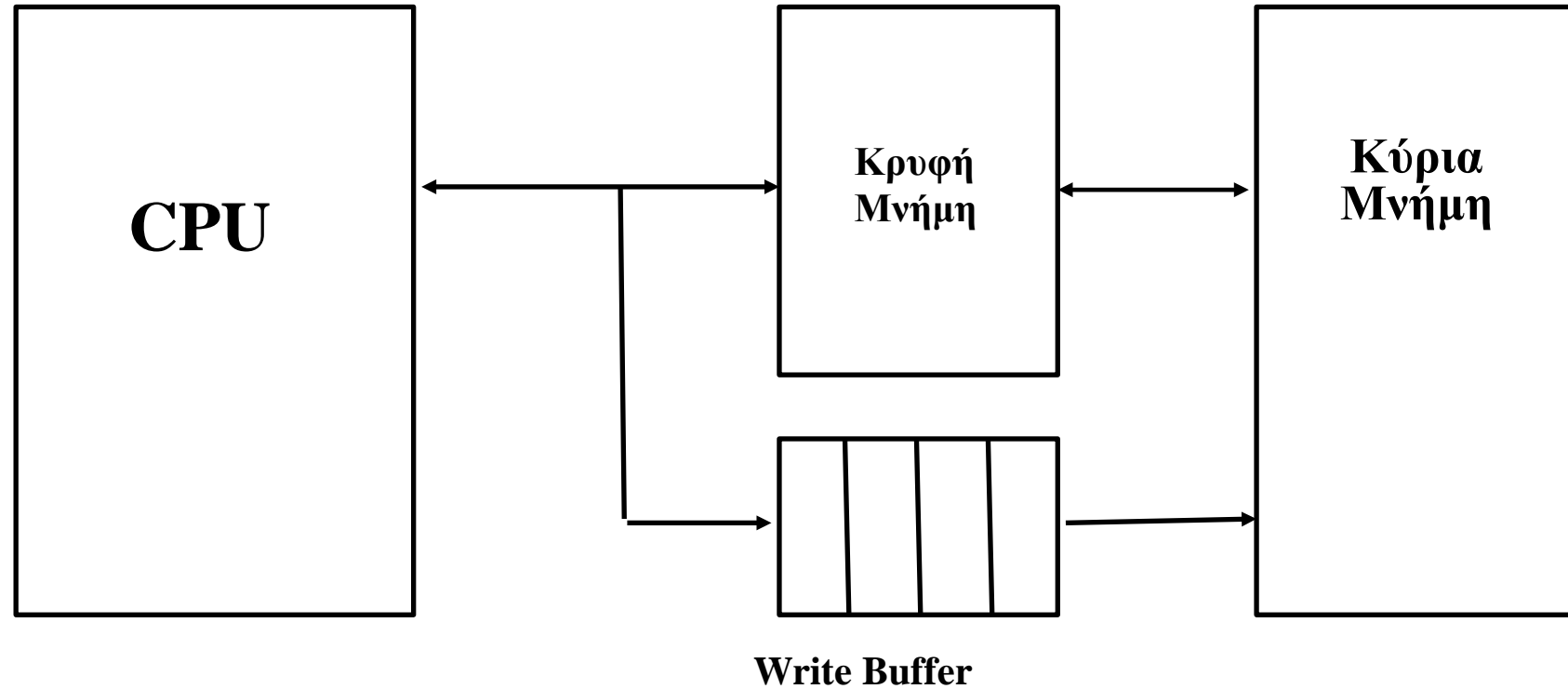
Αστοχίες κρυφής μνήμης

- Σε περίπτωση ευστοχίας, η CPU συνεχίζει κανονικά
- Σε περίπτωση αστοχίας
 - Καθυστερεί η διοχέτευση της CPU
 - Προσκομίζει το μπλοκ από το επόμενο επίπεδο της ιεραρχίας
 - Αστοχία κρυφής μνήμης **εντολών**
 - Επανεκκίνηση προσκόμισης εντολής
 - Αστοχία κρυφής μνήμης **δεδομένων**
 - Ολοκλήρωση προσπάθειας δεδομένων

Ταυτόχρονη εγγραφή (write through):

- Σε ευστοχία εγγραφής δεδομένων, θα μπορούσε να γίνει μόνο ενημέρωση του μπλοκ στην κρυφή μνήμη
 - Αλλά τότε η κρυφή μνήμη και η μνήμη θα είναι ασυνεπείς
- **Ταυτόχρονη εγγραφή:** ενημέρωσε και τη κύρια μνήμη
- Αλλά έχει αποτέλεσμα οι εγγραφές να διαρκούν περισσότερο
 - π.χ., αν το βασικό CPI είναι ίσο με 1, το 10% των εντολών είναι αποθηκεύσεις, και η εγγραφή στη μνήμη διαρκεί 100 κύκλους
 - Πραγματικό $CPI = 1 + 0.1 \times 100 = 11$
- Λύση: προσωρινή μνήμη εγγραφής (write buffer)
 - Κρατά δεδομένα που περιμένουν να γραφούν στη μνήμη
 - Η CPU συνεχίζει αμέσως
 - Καθυστερεί στην εγγραφή μόνο αν η προσωρινή μνήμη εγγραφής είναι ήδη γεμάτη

Ταυτόχρονη εγγραφή



Ετερόχρονη εγγραφή (Write back)

- Σε ευστοχία εγγραφής δεδομένων, ενημέρωσε **μόνο** το μπλοκ στην κρυφή μνήμη
 - Παρακολουούθησε αν κάθε μπλοκ είναι «ακάθαρτο» (dirty)
- Όταν ένα «ακάθαρτο» μπλοκ αντικαθίσταται
 - Γράψε το πίσω στη μνήμη
 - Μπορεί να χρησιμοποιήσει μια προσωρινή μνήμη εγγραφής ώστε να αντικατασταθεί το μπλοκ που θα διαβαστεί πρώτο

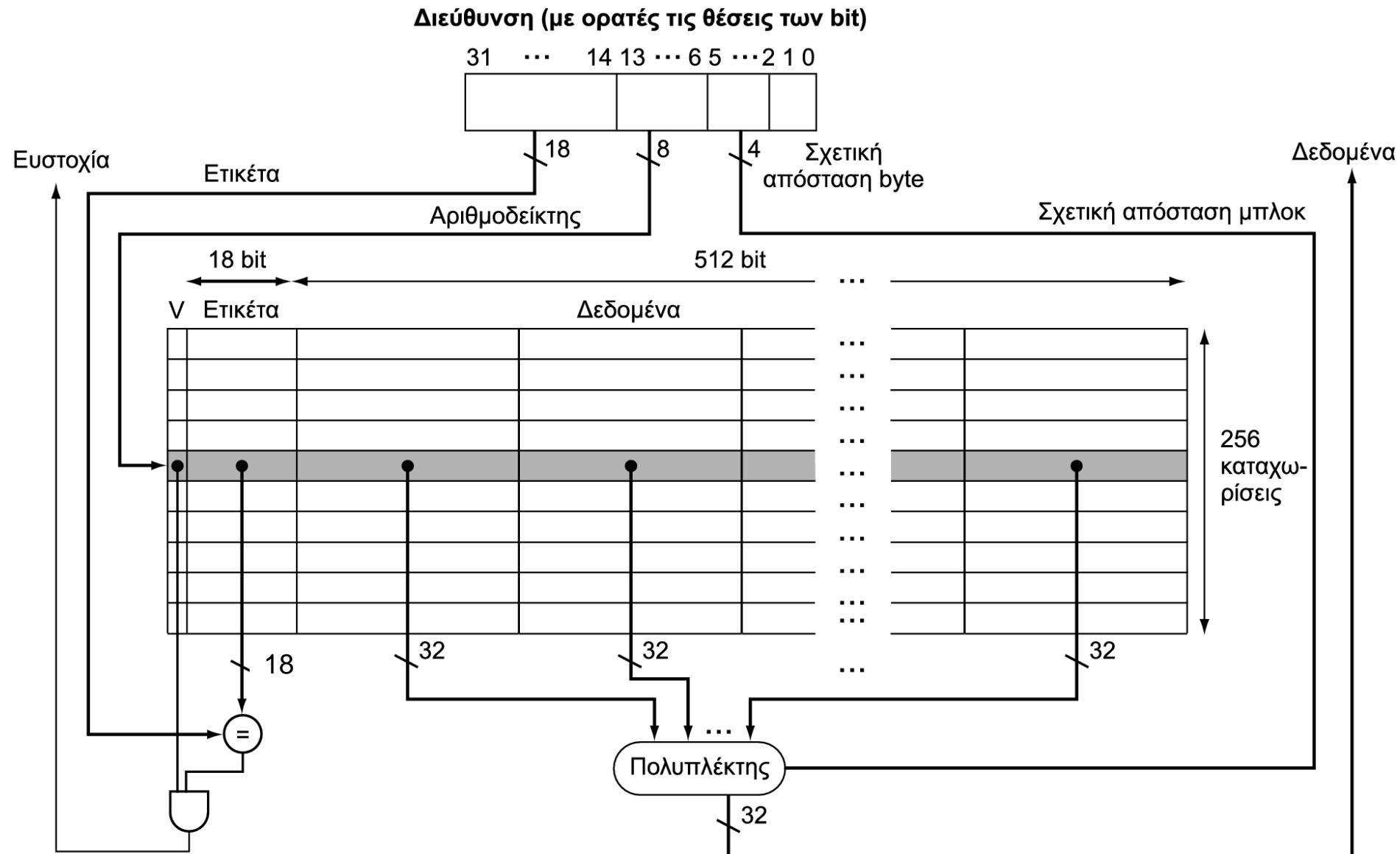
Κατανομή εγγραφών

- Write allocation
- Τι πρέπει να γίνει σε αστοχία εγγραφής;
- Εναλλακτικές για **ταυτόχρονη εγγραφή**
 - Κατανομή σε αστοχία (allocate on miss): προσκόμιση του μπλοκ
 - Εγγραφή από γύρω (write around): όχι προσκόμιση του μπλοκ
 - Αφού τα προγράμματα συχνά γράφουν ένα ολόκληρο μπλοκ πριν το διαβάσουν (π.χ., απόδοση αρχικών τιμών)
- Για την **ετερόχρονη εγγραφή**
 - Συνήθως γίνεται προσκόμιση του μπλοκ

Παράδειγμα: Intrinsity FastMATH

- Ενσωματωμένος επεξεργαστής MIPS
 - Διοχέτευση 12 σταδίων
 - Προσπέλαση εντολής και δεδομένου σε κάθε κύκλο
- Διαιρεμένη (split) κρυφή μνήμη: ξεχωριστή I-cache και D-cache
 - Η κάθε μία των 16KB: 256 μπλοκ x 16 λέξεις ανά μπλοκ
 - D-cache: ταυτόχρονη ή ετερόχρονη εγγραφή
- Ρυθμοί αστοχίας SPEC2000
 - I-cache: 0.4%
 - D-cache: 11.4%
 - Σταθμισμένος μέσος όρος: 3.2%

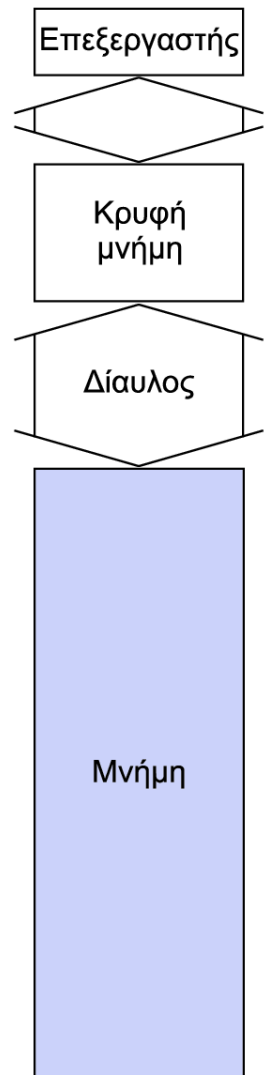
Παράδειγμα: Intrinsic FastMATH



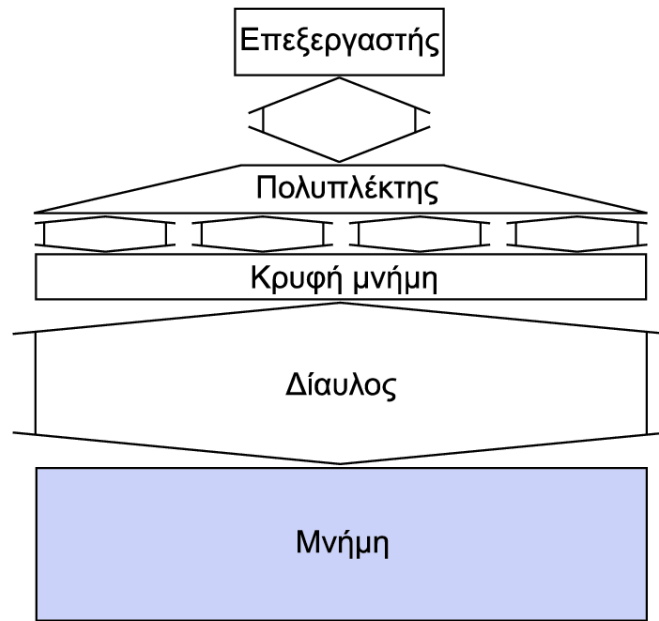
Κύρια μνήμη με κρυφές μνήμες

- Χρήση DRAM για κύρια μνήμη
 - Σταθερό πλάτος (π.χ., 1 λέξη)
 - Συνδέεται με δίαυλο σταθερού πλάτους που χρησιμοποιεί ρολόι
 - Το ρολόι του διαύλου είναι τυπικά πιο αργό από της CPU
- Παράδειγμα ανάγνωσης μπλοκ κρυφής μνήμης
 - 1 κύκλος διαύλου για μεταφορά της διεύθυνσης
 - 15 κύκλοι διαύλου ανά προσπέλαση DRAM
 - 1 κύκλος διαύλου ανά μεταφορά δεδομένων
- Για μπλοκ των 4 λέξεων, και DRAM πλάτους 1 λέξης
 - Ποινή αστοχίας = $1 + 4 \times 15 + 4 \times 1 = 65$ κύκλοι διαύλου
 - Εύρος ζώνης (bandwidth) = $16 \text{ byte} / 65 \text{ κύκλοι} = 0.25 \text{ byte/κύκλο}$

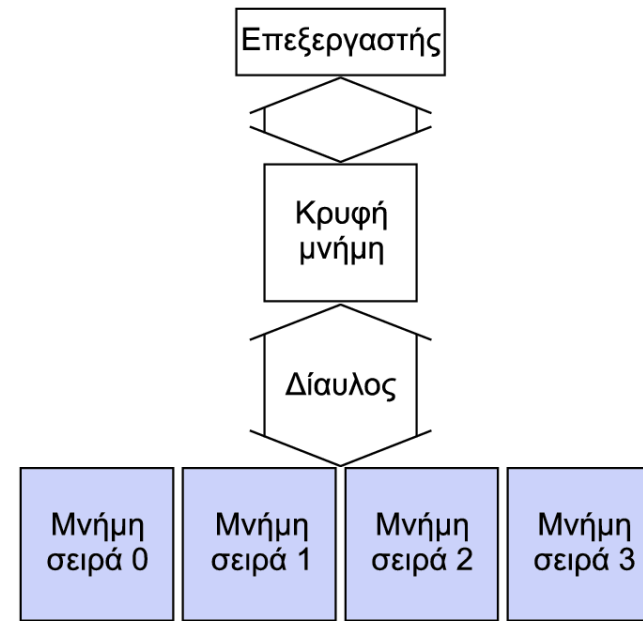
Αύξηση 'εύρους ζώνης' μνήμης



α. Οργάνωση μνήμης εύρους μίας λέξης



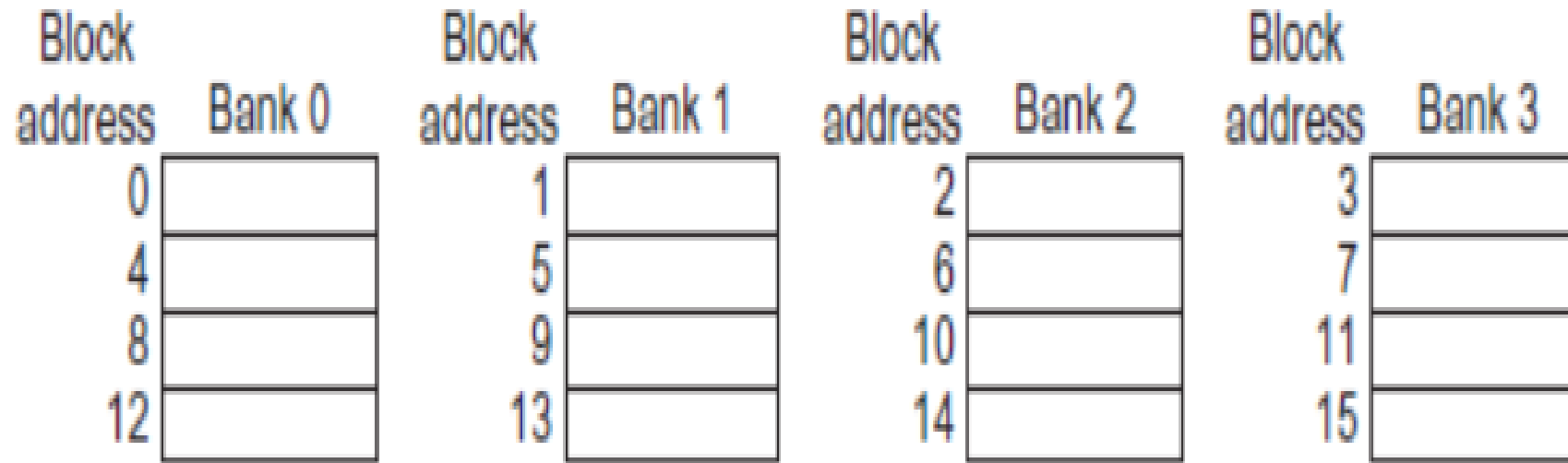
β. Οργάνωση μνήμης μεγάλου εύρους



γ. Πλεκτή οργάνωση μνήμης

- Μνήμη πλάτους 4 λέξεων
 - Ποινή αστοχίας = $1 + 15 + 1 = 17$ κύκλοι διαύλου
 - Εύρος ζώνης = $16 \text{ byte} / 17 \text{ κύκλοι} = 0.94 \text{ B/κύκλο}$
- «Πλεκτή» (interleaved) μνήμη με 4 σειρές (banks)
 - Ποινή αστοχίας = $1 + 15 + 4 \times 1 = 20$ κύκλοι διαύλου
 - Εύρος ζώνης = $16 \text{ byte} / 20 \text{ κύκλοι} = 0.8 \text{ B/κύκλο}$

Πλεκτή οργάνωση μνήμης



- ARM Cortex-A8 cache: 1-4 banks for L2
- Intel i7 cache:
 - 4 banks for L1
 - 8 banks for L2

Μέτρηση απόδοσης κρυφής μνήμης

- Συστατικά του χρόνου CPU
 - Κύκλοι εκτέλεσης προγράμματος
 - Περιλαμβάνει το χρόνο ευστοχίας κρυφής μνήμης
 - Κύκλοι καθυστέρησης (stall) μνήμης
 - Κυρίως από αστοχίες κρυφής μνήμης
- Με απλουστευτικές παραδοχές:

Memory stall cycles=

$$= \frac{\text{Memory accesses}}{\text{Program}} \times \text{Miss rate} \times \text{Miss penalty}$$

$$= \frac{\text{Instructions}}{\text{Program}} \times \frac{\text{Misses}}{\text{Instruction}} \times \text{Miss penalty}$$

Μέσος χρόνος προσπέλασης

- ο χρόνος ευστοχίας είναι σημαντικός για την απόδοση
- Μέσος χρόνος προσπέλασης μνήμης (Average memory access time - **AMAT**)
 - $AMAT = \text{Χρόνος ευστοχίας} + \text{Ρυθμός αστοχίας} \times \text{Ποινή αστοχίας}$
- Παράδειγμα
 - CPU με ρολόι του 1 ns,
 - χρόνος ευστοχίας = 1 κύκλος,
 - ποινή αστοχίας = 20 κύκλοι, ρυθμός αστοχίας = 5%
 - $AMAT = 1 + 0.05 \times 20 = 2\text{ns}$
 - 2 κύκλοι ανά εντολή

Παράδειγμα απόδοσης κρυφής μνήμης

- Ρυθμός αστοχίας κρυφής μνήμης εντολών (I-cache) = 2%
 - Ρυθμός αστοχίας κρυφής μνήμης δεδομένων (D-cache) = 4%
 - Ποινή αστοχίας = 100 κύκλοι
 - Βασικό CPI (ιδανική κρυφή μνήμη) = 2
 - οι εντολές load & store είναι το 36% των εντολών
-
- Κύκλοι αστοχίας ανά εντολή:
 - I-cache: $0.02 \times 100 = 2$
 - D-cache: $0.36 \times 0.04 \times 100 = 1.44$
 - Πραγματικό CPI = $2 + 2 + 1.44 = 5.44$
 - Η ιδανική CPU είναι $5.44/2 = 2.72$ φορές ταχύτερη

Συσχετιστικές κρυφές μνήμες

- Πλήρως συσχετιστική (fully associative)
 - Κάθε μπλοκ μπορεί να πάει σε οποιαδήποτε περιοχή της κρυφής μνήμης
 - Απαιτεί ταυτόχρονη αναζήτηση όλων των καταχωρίσεων
 - Συγκριτής σε κάθε καταχώριση (ακριβό)
- Συσχετιστική συνόλου n -δρόμων (n -way set associative)
 - Κάθε σύνολο περιέχει n καταχωρίσεις
 - ο αριθμός μπλοκ καθορίζει το σύνολο
 - (Αριθμός μπλοκ) modulo (#Συνόλων στη κρυφή μνήμη)
 - Ταυτόχρονη αναζήτηση όλων των καταχωρίσεων ενός δεδομένου συνόλου
 - n συγκριτές (λιγότερο ακριβό)

- Για μια κρυφή μνήμη με 8 καταχωρίσεις

Μπλοκ Ετικέτα Δεδομένα

Συσχετιστική συνόλου δύο δρόμων

Συσχετιστική συνόλου τεσσάρων δρόμων

Συσχετιστική συνόλου οκτώ δρόμων (πλήρως συσχετιστική)

[illegible]

Παράδειγμα συσχετιστικότητας

- Σύγκριση κρυφών μνημών με 4 μπλοκ
 - Άμεσης απεικόνισης, συσχετιστική συνόλου 2 δρόμων, πλήρως συσχετιστική
 - Ακολουθία προσπελάσεων μπλοκ: 0, 8, 0, 6, 8
- Άμεσης απεικόνισης

Δ/νση μπλοκ	Αριθμοδεί- κτης κρυφής μνήμης	Ευστοχία/ αστοχία	Περιεχόμενα κρυφής μνήμης μετά την προσπέλαση			
			0	1	2	3
0	0	miss	Mem[0]			
8	0	miss	Mem[8]			
0	0	miss	Mem[0]			
6	2	miss	Mem[0]		Mem[6]	
8	0	miss	Mem[8]		Mem[6]	

Παράδειγμα συσχετιστικότητας

■ Συσχετιστική συνόλου 2 δρόμων

Δ/νη μπλοκ	Αριθμο-δείκτης κρυφής μνήμης	Ευστοχία/αστοχία	Περιεχόμενα κρυφής μνήμης μετά την προσπέλαση			
			Set 0		Set 1	
0	0	miss	Mem[0]			
8	0	miss	Mem[0]	Mem[8]		
0	0	hit	Mem[0]	Mem[8]		
6	0	miss	Mem[0]	Mem[6]		
8	0	miss	Mem[8]	Mem[6]		

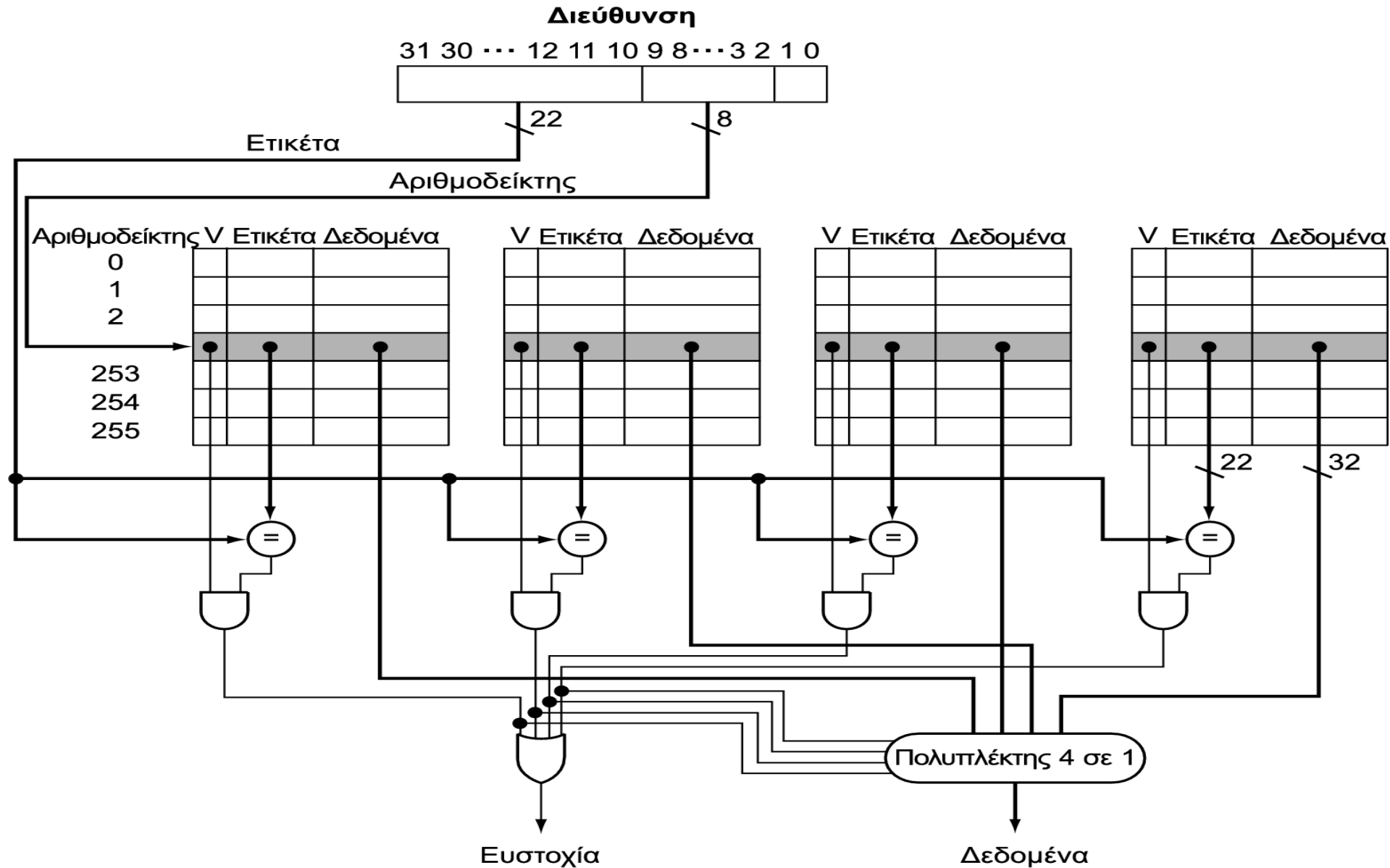
■ Πλήρως συσχετιστική

Δ/νη μπλοκ		Ευστοχία/αστοχία	Περιεχόμενα κρυφής μνήμης μετά την προσπέλαση			
0		miss	Mem[0]			
8		miss	Mem[0]	Mem[8]		
0		hit	Mem[0]	Mem[8]		
6		miss	Mem[0]	Mem[8]	Mem[6]	
8		hit	Mem[0]	Mem[8]	Mem[6]	

Πόση συσχετιστικότητα;

- Αυξημένη συσχετιστικότητα μειώνει το ρυθμό αστοχίας
 - Αλλά με μειούμενα οφέλη όσο αυξάνεται
- Προσομοίωση συστήματος με κρυφή μνήμη δεδομένων (D-cache) 64KB, μπλοκ των 16 λέξεων, μετροπρ/τα SPEC2000
 - 1 δρόμου: 10.3%
 - 2 δρόμων: 8.6%
 - 4 δρόμων: 8.3%
 - 8 δρόμων: 8.1%

Οργάνωση κρυφής μνήμης - συσχετιστικής συνόλου 4-δρόμων



Πολιτική αντικατάστασης

- Άμεση απεικόνιση: καμία επιλογή
- Συσχετιστική συνόλου:
 - Προτίμησε τη μη έγκυρη καταχώριση, αν υπάρχει.
 - Αλλιώς, διάλεξε ανάμεσα στις καταχωρίσεις του συνόλου
- Λιγότερο πρόσφατα χρησιμοποιημένη (Least-recently used - LRU)
 - Διάλεξε αυτή που δεν χρησιμοποιήθηκε για το μεγαλύτερο διάστημα
 - Απλή για 2δρόμων, διαχειρίσιμη για 4δρόμων, υπερβολικά δύσκολη από εκεί και πέρα
- Τυχαία
 - Δίνει περίπου την ίδια απόδοση με την LRU για μεγάλη συσχετιστικότητα

Πολυεπίπεδες κρυφές μνήμες

- **Κύρια κρυφή μνήμη (L-1)** συνδέεται με τη CPU
 - Μικρή, αλλά γρήγορη
- **Η κρυφή μνήμη δευτέρου επιπέδου (L-2 cache)** εξυπηρετεί αστοχίες της κύριας κρυφής μνήμης
 - Μεγαλύτερη, πιο αργή, αλλά και πάλι ταχύτερη από τη κύρια μνήμη
- Η κύρια μνήμη εξυπηρετεί αστοχίες της κρυφής μνήμης L-2
- Μερικά συστήματα υψηλών επιδόσεων περιλαμβάνουν και κρυφή μνήμη L-3

Παράδειγμα πολυεπίπεδης κρυφής μνήμης

- Δίνονται
 - Βασικό CPU CPI = 1, ρυθμός ρολογιού = 4GHz (Άρα: Κύκλος = 0.25ns)
 - Ρυθμός αστοχίας = 2%
 - Χρόνος προσπέλασης κύριας μνήμης = 100ns
- Μόνο με μία κύρια κρυφή μνήμη (L-1)
 - Ποινή αστοχίας = $100\text{ns} / 0.25\text{ns} = 400$ κύκλοι
 - Πραγματικό CPI = $1 + 0.02 \times 400 = 9$

Παράδειγμα (συνεχ.)

- Τώρα προσθέτουμε και κρυφή μνήμη L-2
 - Χρόνος προσπέλασης = 5ns
 - Καθολικός ρυθμός αστοχίας προς κύρια μνήμη = 0,5%
- Αστοχία στην L-1 και ευστοχία στην L-2
 - Ποινή = $5\text{ns}/0.25\text{ns} = 20$ κύκλοι
- Αστοχία και στην L-1 και στην L-2
 - Επιπλέον ποινή = 400 κύκλοι
- $\text{CPI} = 1 + 0.02 \times 20 + 0.005 \times 400 = 3,4$
- Λόγος απόδοσης = $9/3,4 = 2,6$

Ζητήματα πολυεπίπεδων κρυφών μνημών

- Κύρια κρυφή μνήμη L-1
 - Εστιάζει στον ελάχιστο χρόνο ευστοχίας
- Κρυφή μνήμη L-2
 - Εστιάζει στο χαμηλό ρυθμό αστοχίας για να αποφύγει τις προσπελάσεις της κύριας μνήμης
 - ο χρόνος ευστοχίας έχει μικρότερη συνολική επίδραση
- Αποτελέσματα
 - Η κρυφή μνήμη L-1 είναι συνήθως μικρότερη από την περίπτωση μίας μοναδικής κρυφής μνήμης
 - Το μέγεθος μπλοκ της L-1 είναι μικρότερο από το μέγεθος μπλοκ της L-2

Προσπελάζοντας την Κρυφή Μνήμη

Διεύθυνση (10)	Διεύθυνση (2)	Επιτυχία/ Αποτυχία	# Μπλόκ Κρυφής Μνήμης
22	10110_{two}	miss	$(10\textcolor{teal}{1}10_{\text{two}} \bmod 8) = \textcolor{teal}{1}10_{\text{two}}$
26	11010_{two}	miss	$(11\textcolor{teal}{0}10_{\text{two}} \bmod 8) = \textcolor{teal}{0}10_{\text{two}}$
22	10110_{two}	hit	$(10\textcolor{teal}{1}10_{\text{two}} \bmod 8) = \textcolor{teal}{1}10_{\text{two}}$
26	11010_{two}	hit	$(11\textcolor{teal}{0}10_{\text{two}} \bmod 8) = \textcolor{teal}{0}10_{\text{two}}$
16	10000_{two}	miss	$(10\textcolor{teal}{0}00_{\text{two}} \bmod 8) = \textcolor{teal}{0}00_{\text{two}}$
3	00011_{two}	miss	$(00\textcolor{teal}{0}11_{\text{two}} \bmod 8) = \textcolor{teal}{0}11_{\text{two}}$
16	10000_{two}	hit	$(10\textcolor{teal}{0}00_{\text{two}} \bmod 8) = \textcolor{teal}{0}00_{\text{two}}$
18	10010_{two}	miss	$(10\textcolor{teal}{0}10_{\text{two}} \bmod 8) = \textcolor{teal}{0}10_{\text{two}}$
16	10000_{two}	hit	$(10\textcolor{teal}{0}00_{\text{two}} \bmod 8) = \textcolor{teal}{0}00_{\text{two}}$

Προσπελάζοντας την Κρυφή Μνήμη

Index	V	Tag	Data
000	N		
001	N		
010	N		
011	N		
100	N		
101	N		
110	N		
111	N		

Index	V	Tag	Data
000	N		
001	N		
010	N		
011	N		
100	N		
101	N		
110	Y	10 _{two}	Memory (10110 _{two})
111	N		

Προσπελάζοντας την Κρυφή Μνήμη

Index	V	Tag	Data
000	N		
001	N		
010	Y	11_{two}	Memory (11010_{two})
011	N		
100	N		
101	N		
110	Y	10_{two}	Memory (10110_{two})
111	N		

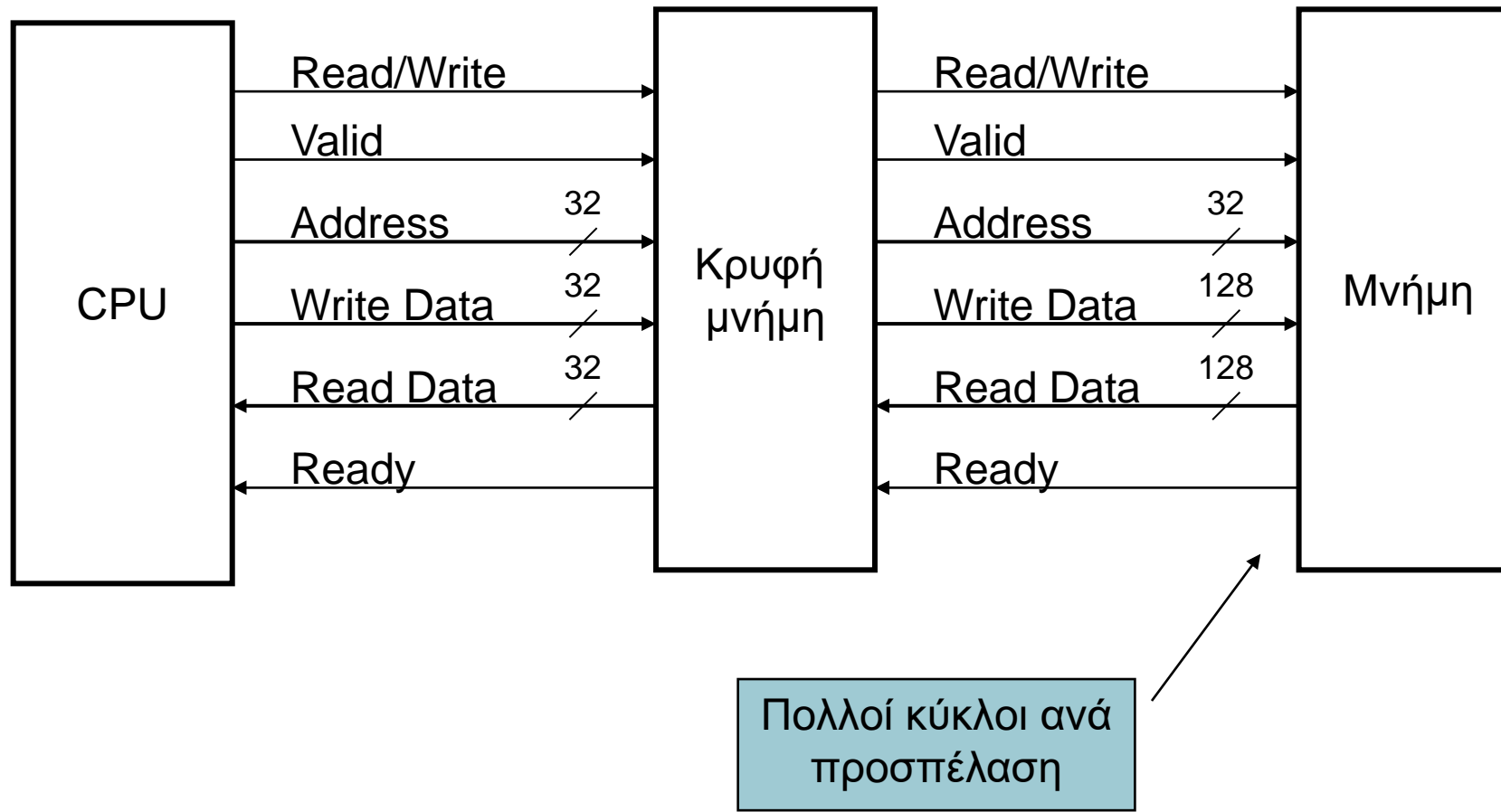
Index	V	Tag	Data
000	Y	10_{two}	Memory (10000_{two})
001	N		
010	Y	11_{two}	Memory (11010_{two})
011	N		
100	N		
101	N		
110	Y	10_{two}	Memory (10110_{two})
111	N		

Προσπελάζοντας την Κρυφή Μνήμη

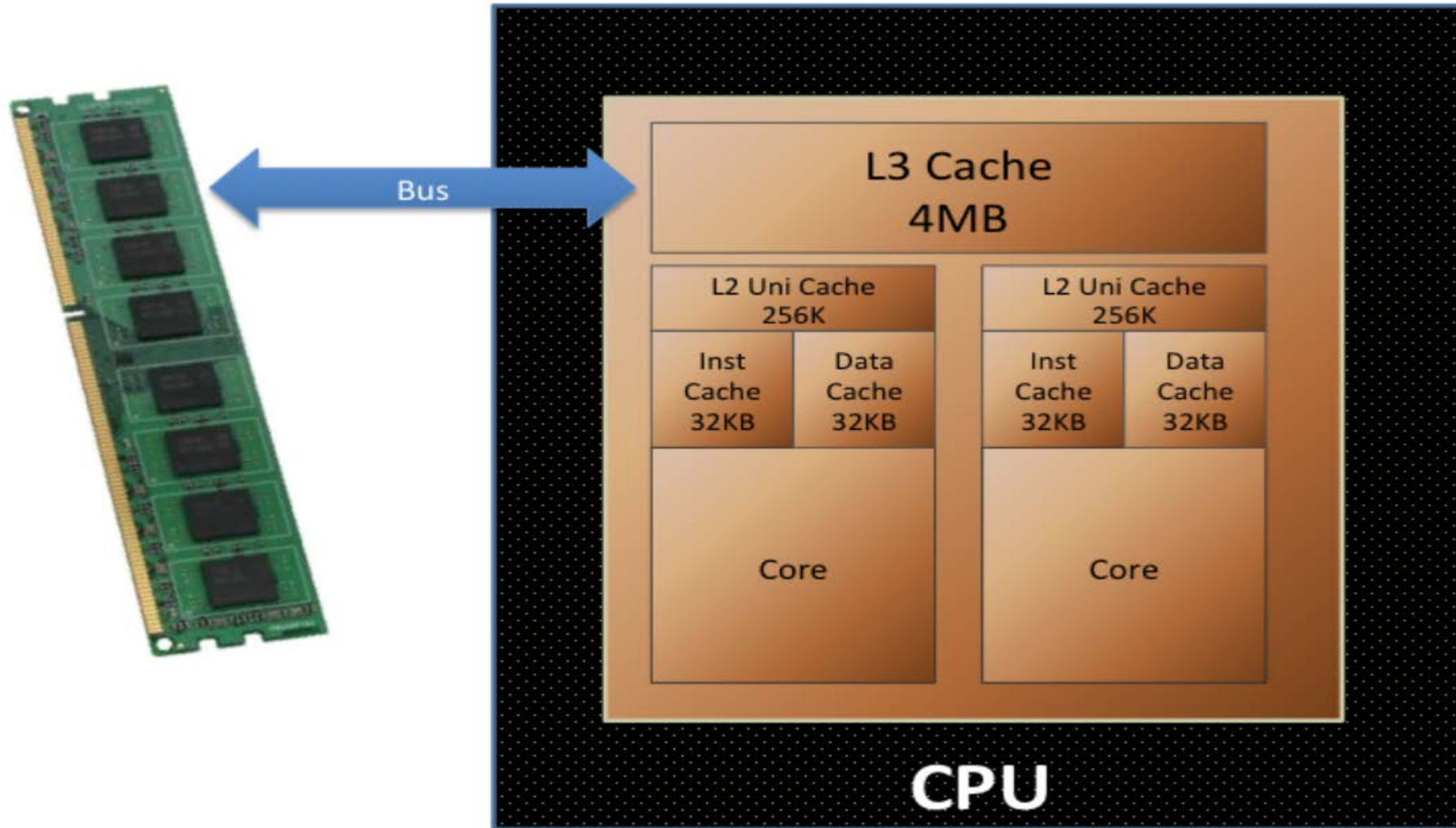
Index	V	Tag	Data
000	Y	10_{two}	Memory (10000_{two})
001	N		
010	Y	11_{two}	Memory (11010_{two})
011	Y	00_{two}	Memory (00011_{two})
100	N		
101	N		
110	Y	10_{two}	Memory (10110_{two})
111	N		

Index	V	Tag	Data
000	Y	10_{two}	Memory (10000_{two})
001	N		
010	Y	10_{two}	Memory (10010_{two})
011	Y	00_{two}	Memory (00011_{two})
100	N		
101	N		
110	Y	10_{two}	Memory (10110_{two})
111	N		

Σήματα διασύνδεσης



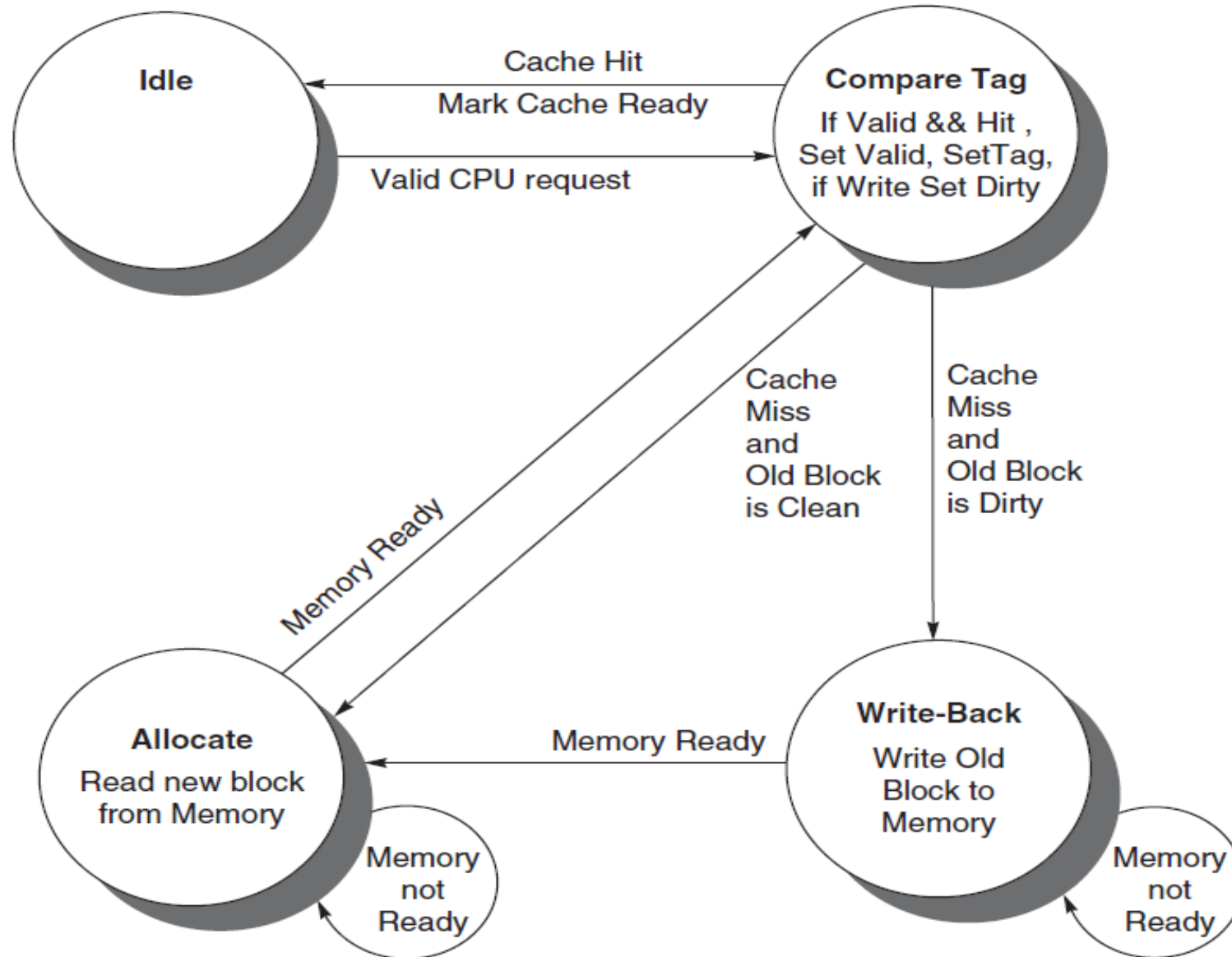
Κρυφή μνήμη 3 επιπέδων - i7-2620M CPU



Συσχετιστική οργάνωση συνόλου 8-δρόμων
Μέγεθος γραμμής: 64 byte

Καταστάσεις Κρυφής Μνήμης

Ετερόχρονη
εγγραφή

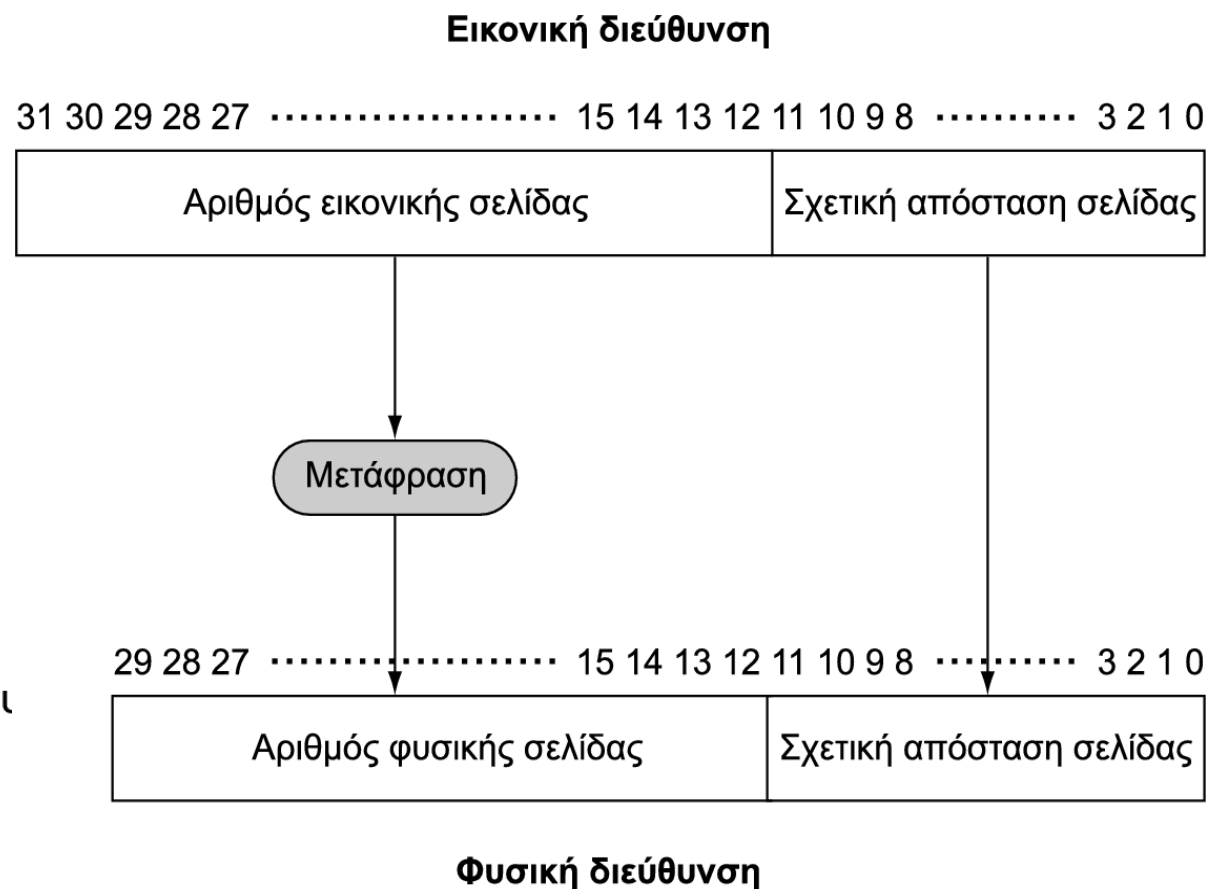
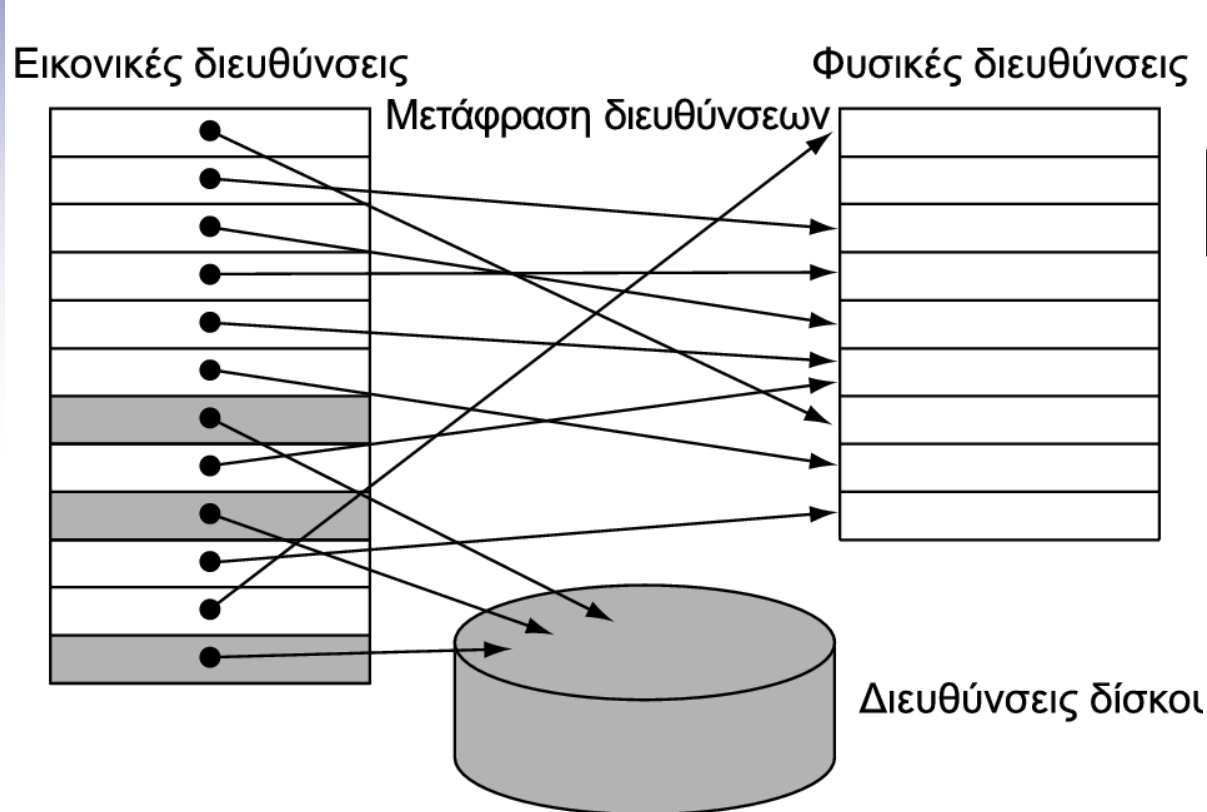


Εικονική μνήμη (virtual memory)

- Χρήση της κύριας μνήμης ως «κρυφής μνήμης» για τη δευτερεύουσα αποθήκευση (το δίσκο)
 - Διαχείριση από το υλικό της CPU και από το Λειτουργικό Σύστημα (ΛΣ)
- Τα προγράμματα μοιράζονται την κύρια μνήμη
 - Καθένα παίρνει έναν ιδιωτικό χώρο εικονικών διευθύνσεων που κρατάει τον κώδικα και τα δεδομένα του που χρησιμοποιούνται συχνά
 - Προστασία από άλλα προγράμματα
- Η CPU και το ΛΣ μεταφράζουν τις εικονικές δ/νσεις σε φυσικές δ/νσεις
 - Το «μπλοκ» εικονικής μνήμης λέγεται σελίδα (page)
 - Η «αστοχία» μιας μετάφρασης εικονικής μνήμης ονομάζεται σφάλμα σελίδας (page fault)

Μετάφραση διευθύνσεων

- Σελίδες σταθερού μεγέθους (π.χ., 4K)



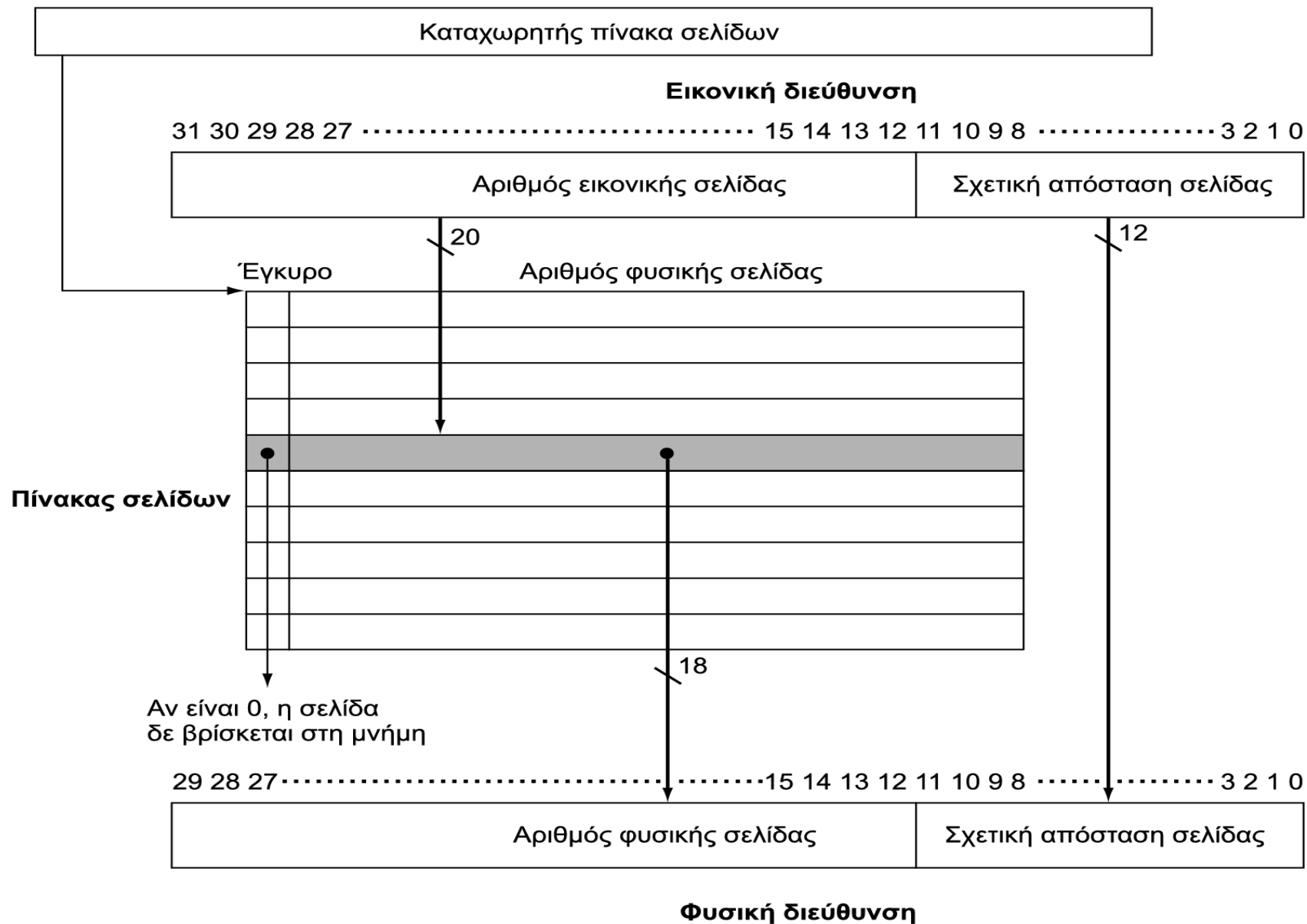
Ποινή σφάλματος σελίδας

- Σε περίπτωση σφάλματος, η σελίδα πρέπει να προσκομιστεί από το δίσκο
 - Διαρκεί εκατομμύρια κύκλους ρολογιού
 - Διαχείριση από τον κώδικα του ΛΣ
- Προσπάθεια ελαχιστοποίησης του ρυθμού σφαλμάτων σελίδας
 - Πλήρως συσχετιστική τοποθέτηση
 - «Έξυπνοι» αλγόριθμοι αντικατάστασης

Πίνακες σελίδων (page tables)

- Αποθηκεύουν πληροφορίες τοποθέτησης
 - Πίνακας από καταχωρίσεις πίνακα σελίδων, δεικτοδοτείται από τον αριθμό εικονικής σελίδας
 - Καταχωρητής πίνακα σελίδων στη CPU δείχνει στον πίνακα σελίδων στη φυσική μνήμη
- Αν η σελίδα βρίσκεται στη μνήμη
 - Η καταχώριση του πίνακα σελίδων αποθηκεύει τον αριθμό φυσικής σελίδας
 - Και επιπλέον άλλα bit κατάστασης (αναφοράς, «ακάθαρτο», ...)
- Αν η σελίδα δεν βρίσκεται στη μνήμη
 - Η καταχώριση του πίνακα σελίδων μπορεί να αναφέρεται σε μια θέση στο δίσκο (swap space)

Μετάφραση με πίνακα σελίδων



Απεικόνιση σελίδων στην αποθήκευση

Αριθμός
εικονικής σελίδας

Πίνακας σελίδων
Φυσική σελίδα ή
διεύθυνση δίσκου

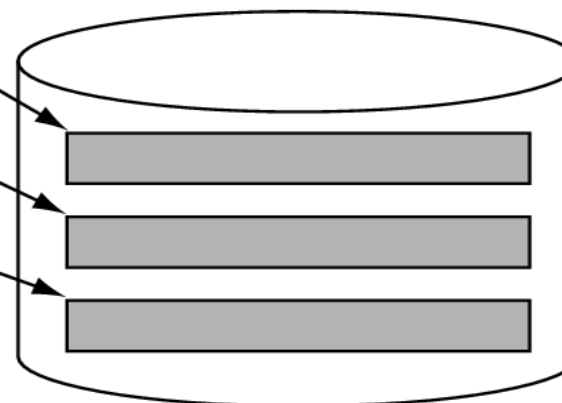
Έγκυρο

1	•
1	•
1	•
1	•
0	•
1	•
1	•
0	•
1	•
1	•
0	•
1	•

Φυσική μνήμη



Αποθήκευση δίσκου



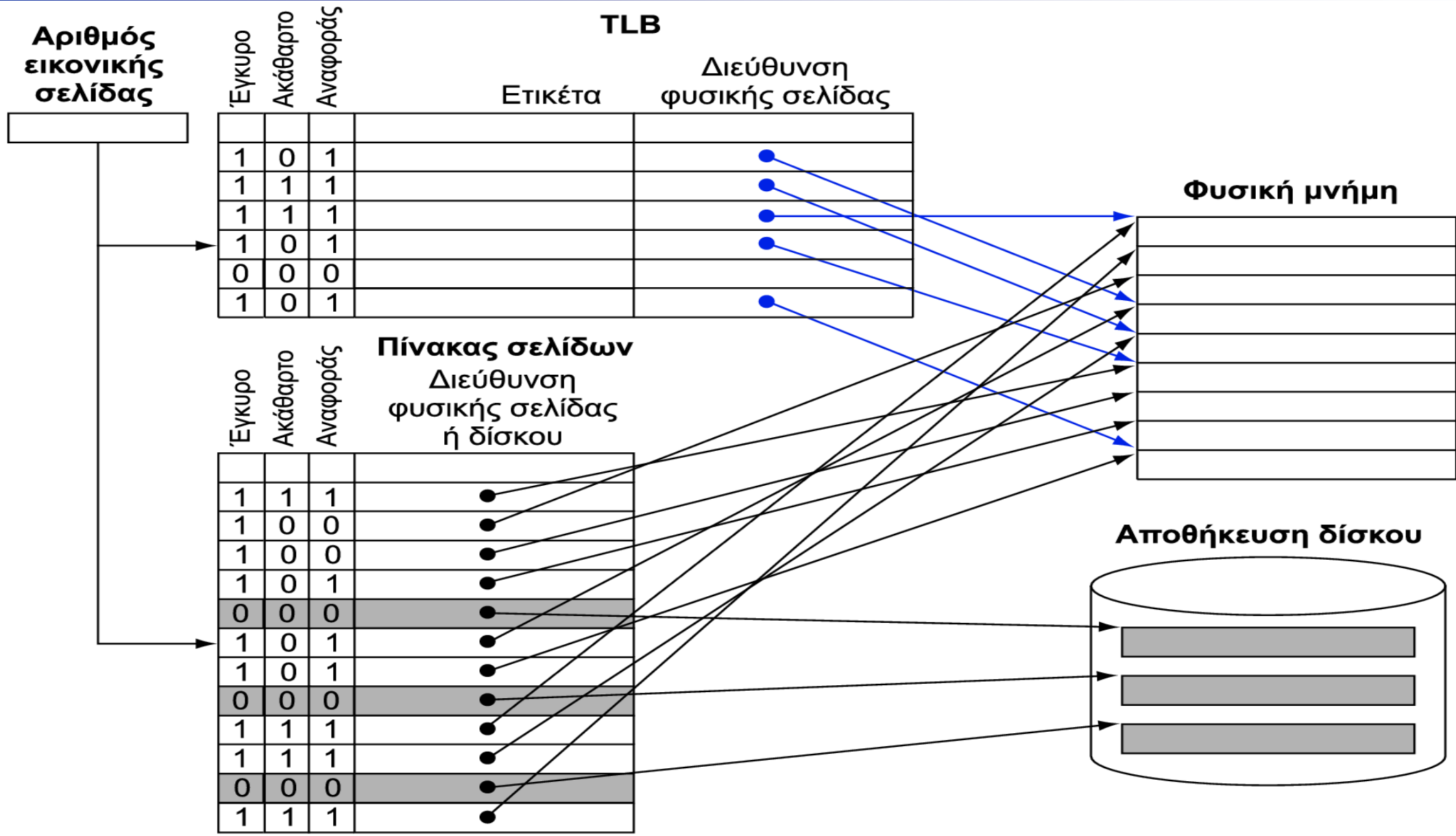
Αντικατάσταση και εγγραφές

- Για τη μείωση του ρυθμού σφαλμάτων σελίδας, προτιμάται η αντικατάσταση της λιγότερο πρόσφατα χρησιμοποιημένης σελίδας (least-recently used - LRU)
 - Το bit αναφοράς (reference bit - λέγεται και bit χρήσης, use bit) στην καταχώριση του πίνακα σελίδων γίνεται 1 στην προσπέλαση της σελίδας
 - Κατά περιόδους μηδενίζεται από το ΛΣ
 - Μια σελίδα με bit αναφοράς = 0, δεν έχει χρησιμοποιηθεί πρόσφατα
- Οι εγγραφές στον δίσκο διαρκούν εκατομμύρια κύκλους
 - Ένα πλήρες μπλοκ, όχι μεμονωμένες θέσεις
 - Η ταυτόχρονη εγγραφή (write through) δεν έχει νόημα
 - Χρήση μόνο ετερόχρονης εγγραφής (write-back)
 - Το «ακάθαρτο» bit στην καταχώριση του πίνακα σελίδας γίνεται 1 όταν γίνεται λειτουργία εγγραφής στη σελίδα

Γρήγορη μετάφραση με TLB

- Η μετάφραση δ/νσεων απαιτεί επιπλέον αναφορές στη μνήμη
 - Μία για τη προσπέλαση της καταχώρισης του πίνακα σελίδων
 - Έπειτα, για την πραγματική προσπέλαση μνήμης
- Αλλά η προσπέλαση των πινάκων σελίδων έχει ισχυρή «τοπικότητα»
 - Συνεπώς, χρήση μιας γρήγορης κρυφής μνήμης για καταχωρίσεις πίνακα σελίδων μέσα στη CPU
 - Λέγεται κρυφή μνήμη αναζήτησης μετάφρασης (Translation Look-aside Buffer - TLB)
 - Τυπικά: 16-512 καταχωρίσεις πίνακα σελίδων, 0.5-1 κύκλοι για ευστοχία, 10-100 κύκλοι για αστοχία, 0.01%-1% ρυθμός αστοχίας
 - Τις αστοχίες χειρίζεται το υλικό ή/και το λογισμικό συστήματος

Γρήγορη μετάφραση με TLB



Αστοχίες TLB

- Αν η σελίδα είναι στην μνήμη
 - Φόρτωσε την καταχώριση πίνακα σελίδων από τη μνήμη και ξαναπροσπάθησε
 - Μπορεί να γίνει διαχείριση στο υλικό
 - Μπορεί να γίνει πολύπλοκη σε σύνθετες δομές πινάκων σελίδων
 - Ή σε λογισμικό
 - Ειδική εξαίρεση (exception), με βελτιστοποιημένο χειριστή (handler)
- Αν η σελίδα δεν βρίσκεται στην μνήμη (σφάλμα σελίδας)
 - Το ΛΣ χειρίζεται τη προσκόμιση της σελίδας από το δίσκο, και την ενημέρωση του πίνακα σελίδων
 - Έπειτα, η CPU επανεκκινεί την εντολή που προκάλεσε το σφάλμα

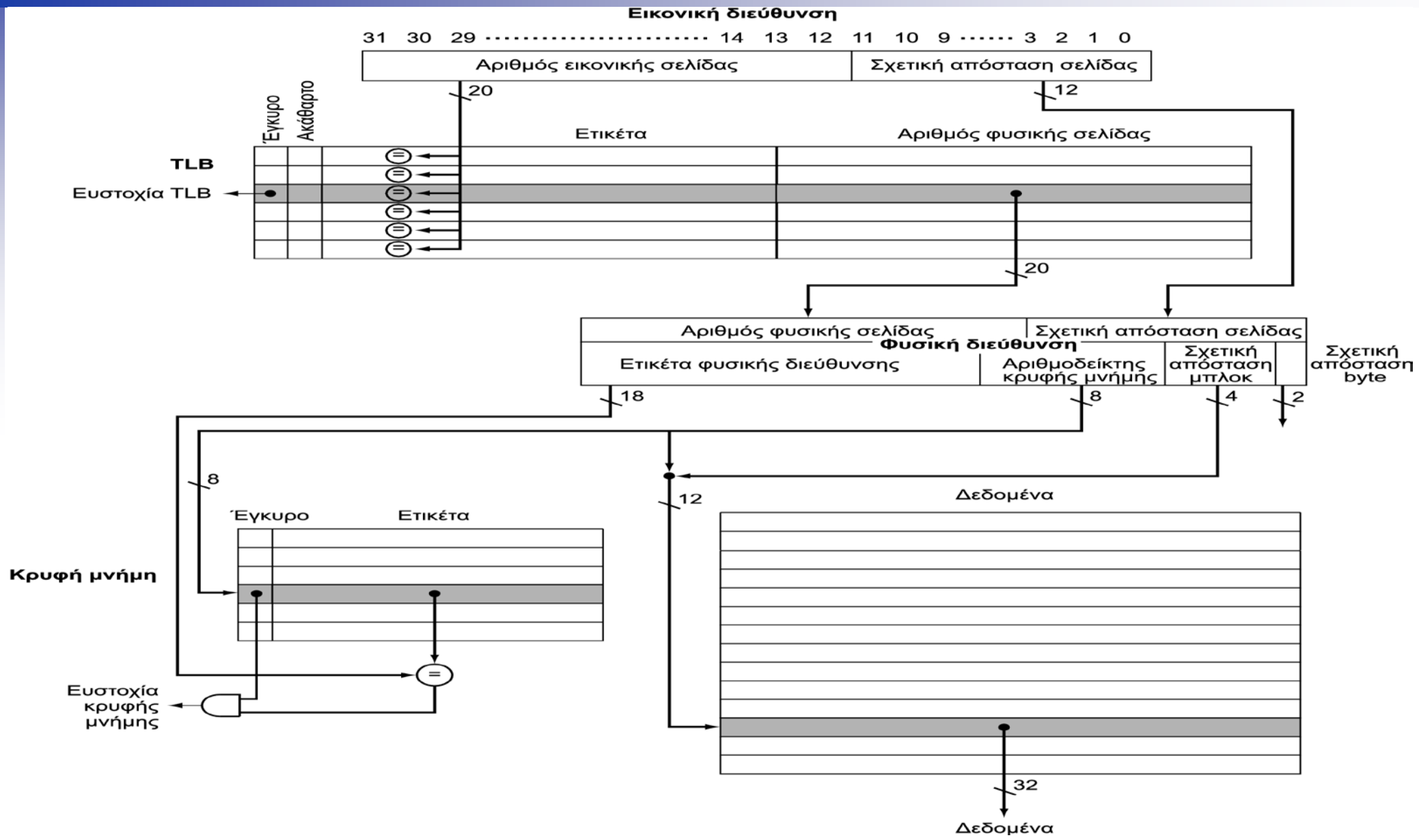
Χειριστής αστοχίας TLB

- Η αστοχία TLB σημαίνει:
 - Σελίδα παρούσα στη μνήμη, αλλά η καταχώριση πίνακα σελίδων δεν βρίσκεται στον TLB, ή
 - Σελίδα απύσα από την μνήμη
- Πρέπει να αναγνωριστεί η αστοχία TLB πριν γραφτεί νέα τιμή στον καταχωρητή προορισμού
 - Δημιουργία εξαίρεσης
- Ο χειριστής αντιγράφει την καταχώριση πίνακα σελίδων από τη μνήμη στον TLB
 - Έπειτα, επανεκκινεί την εντολή
- Αν η σελίδα είναι απύσα, θα συμβεί σφάλμα σελίδας

Χειριστής σφάλματος σελίδας

- Χρήση της εικονικής δ/νσης που προκαλεί το σφάλμα για εύρεση της καταχώρισης πίνακα σελίδων
- Εντοπισμός της σελίδας στο δίσκο
- Επιλογή σελίδας για αντικατάσταση
 - Αν είναι «ακάθαρτη», πρώτα γράφεται στο δίσκο
- Ανάγνωση και μεταφορά τής σελίδας στη μνήμη, και ενημέρωση πίνακα σελίδων
- Η διαδικασία γίνεται πάλι εκτελέσιμη
 - Επανεκκίνηση από την εντολή που προκάλεσε το σφάλμα

Αλληλεπίδραση TLB και κρυφής μνήμης



Προστασία μνήμης

- Διεργασίες μπορεί να μοιράζονται μέρη του εικονικού χώρου δ/νσεών τους
 - Αλλά απαιτείται προστασία από εσφαλμένη προσπέλαση
 - Χρειάζεται βοήθεια από το ΛΣ
- Υποστήριξη υλικού για προστασία του ΛΣ
 - Προνομιούχος κατάσταση **επόπτη** (supervisor mode), λέγεται και κατάσταση λειτουργίας **πυρήνα** (kernel mode)
 - Προνομιούχες εντολές
 - οι πίνακες σελίδων και άλλες πληροφορίες κατάστασης είναι προσπελάσιμες **μόνο** σε κατάσταση λειτουργίας **επόπτη**
 - Κλήση συστήματος (system call exception, π.χ., syscall στο MIPS)

Η ιεραρχία μνήμης

- Κοινές αρχές ισχύουν σε όλα τα επίπεδα της ιεραρχίας μνήμης
 - Με βάση τις έννοιες των κρυφών μνημών
- Σε κάθε επίπεδο της ιεραρχίας
 - Τοποθέτηση μπλοκ
 - Εύρεση μπλοκ
 - Αντικατάσταση σε περίπτωση αστοχίας
 - Πολιτική εγγραφής

Τοποθέτηση μπλοκ

- Καθορίζεται από τη συσχετιστικότητα
 - Άμεσης απεικόνισης (συσχετιστική 1 δρόμου)
 - Μία επιλογή για τοποθέτηση
 - Συσχετιστική συνόλου n δρόμων
 - n επιλογές μέσα σε ένα σύνολο
 - Πλήρως συσχετιστική
 - οποιαδήποτε θέση
- Μεγαλύτερη συσχετιστικότητα μειώνει το ρυθμό αστοχίας
 - Αυξάνει την πολυπλοκότητα, το κόστος, και το χρόνο προσπάθειας

LRU vs Random

Ρυθμός αστοχίας για Συσχετιστική Συνόλου 2-δρόμων

Size	Random	LRU
16 KB	5.7%	5.2%
64 KB	2.0%	1.9%
256 KB	1.17%	1.15%

Αντικατάσταση

- Επιλογή καταχώρισης για αντικατάσταση σε περίπτωση αστοχίας
 - Λιγότερο πρόσφατα χρησιμοποιημένη (Least recently used - LRU)
 - Πολύπλοκο και ακριβό υλικό για υψηλή συσχετιστικότητα
 - Τυχαία
 - Παρόμοια απόδοση με την LRU, ευκολότερη στην υλοποίηση
- Εικονική μνήμη
 - Προσέγγιση της LRU με υποστήριξη υλικού

Πολιτική εγγραφής

- Ταυτόχρονη εγγραφή (write-through)
 - Ενημέρωση και του υψηλότερου και του χαμηλότερου επιπέδου
 - Απλοποιεί την αντικατάσταση, αλλά μπορεί να χρειαστεί προσωρινή μνήμη εγγραφής (write buffer)
- Ετερόχρονη εγγραφή (write-back)
 - Ενημέρωση μόνο του υψηλότερου επιπέδου
 - Ενημέρωση του χαμηλότερου όταν το μπλοκ αντικαθίσταται
 - Απαιτεί αποθήκευση περισσότερης κατάστασης
- Στην εικονική μνήμη
 - Μόνο η ετερόχρονη εγγραφή είναι εφικτή, με δεδομένο το μεγάλο λανθάνοντα χρόνο του δίσκου

Προέλευση των αστοχιών

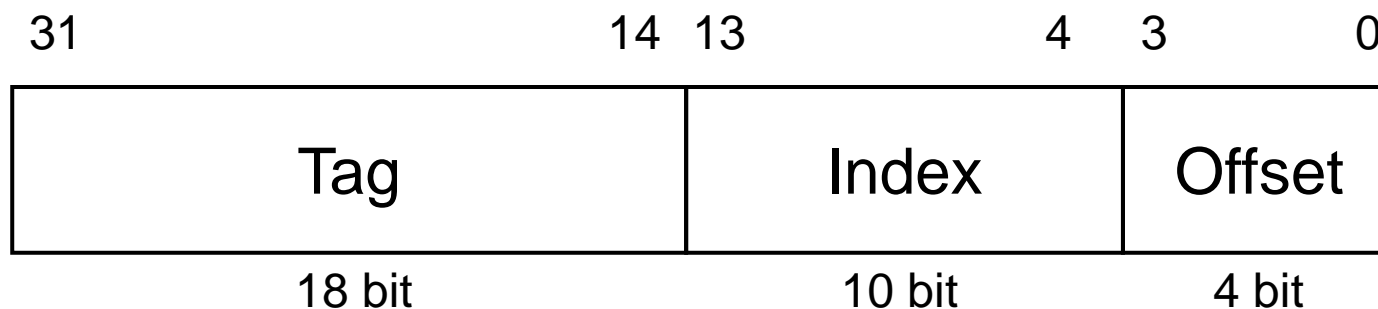
- Υποχρεωτικές αστοχίες (compulsory misses), λέγονται και ψυχρής εκκίνησης (cold start misses)
 - Πρώτη προσπάθεια σε ένα μπλοκ
- Αστοχίες χωρητικότητας (capacity misses)
 - Λόγω περιορισμένου μεγέθους της κρυφής μνήμης
 - Ένα μπλοκ που αντικαταστάθηκε προσπελάζεται αργότερα και πάλι
- Αστοχίες διένεξης (conflict misses), λέγονται και αστοχίες σύγκρουσης (collision misses)
 - Σε μία όχι πλήρως συσχετιστική κρυφή μνήμη
 - Λόγω ανταγωνισμού για τις καταχωρίσεις ενός συνόλου
 - Δεν θα συνέβαιναν σε μια πλήρως συσχετιστική κρυφή μνήμη με το ίδιο συνολικό μέγεθος

Συμβιβασμοί σχεδίασης κρυφής μνήμης

Σχεδιαστική αλλαγή	Επίδραση στο ρυθμό αστοχίας	Αρνητική επίπτωση στην απόδοση
Αύξηση μεγέθους κρυφής μνήμης	Μείωση των αστοχιών χωρητικότητας	Μπορεί να αυξήσει το χρόνο προσπέλασης
Αύξηση συσχετιστικότητας	Μείωση των αστοχιών διένεξης	Μπορεί να αυξήσει το χρόνο προσπέλασης
Αύξηση μεγέθους μπλοκ	Μείωση των υποχρεωτικών αστοχιών	Αυξάνει την ποινή αστοχίας.

Έλεγχος κρυφής μνήμης (παράδειγμα)

- Άμεση απεικόνιση, ετερόχρονη εγγραφή (write-back), κατανομή σε εγγραφή (write allocate)
 - Μέγεθος μπλοκ: 4 λέξεις (16 byte)
 - Μέγεθος κρυφής μνήμης: 1024 μπλοκ (16 KB)
 - Διευθύνσεις byte των 32 bit
 - Έγκυρο (valid) bit και «ακάθαρτο» (dirty) bit ανά μπλοκ
 - Ανασταλτική (blocking) κρυφή μνήμη
 - Η CPU περιμένει να ολοκληρωθεί η προσπάθεια



Πρόβλημα συνοχής κρυφής μνήμης

- Cache Coherence
- Έστω ότι **δύο** πυρήνες CPU μοιράζονται **έναν** φυσικό χώρο διευθύνσεων
 - Κρυφές μνήμες ταυτόχρονης εγγραφής (write-through)

Χρονικό βήμα	Συμβάν	Κρυφή μνήμη της CPU A	Κρυφή μνήμη της CPU B	Μνήμη
0				0
1	Η CPU A διαβάζει το X	0		0
2	Η CPU B διαβάζει το X	0	0	0
3	Η CPU A γράφει 1 στο X	1	0	1

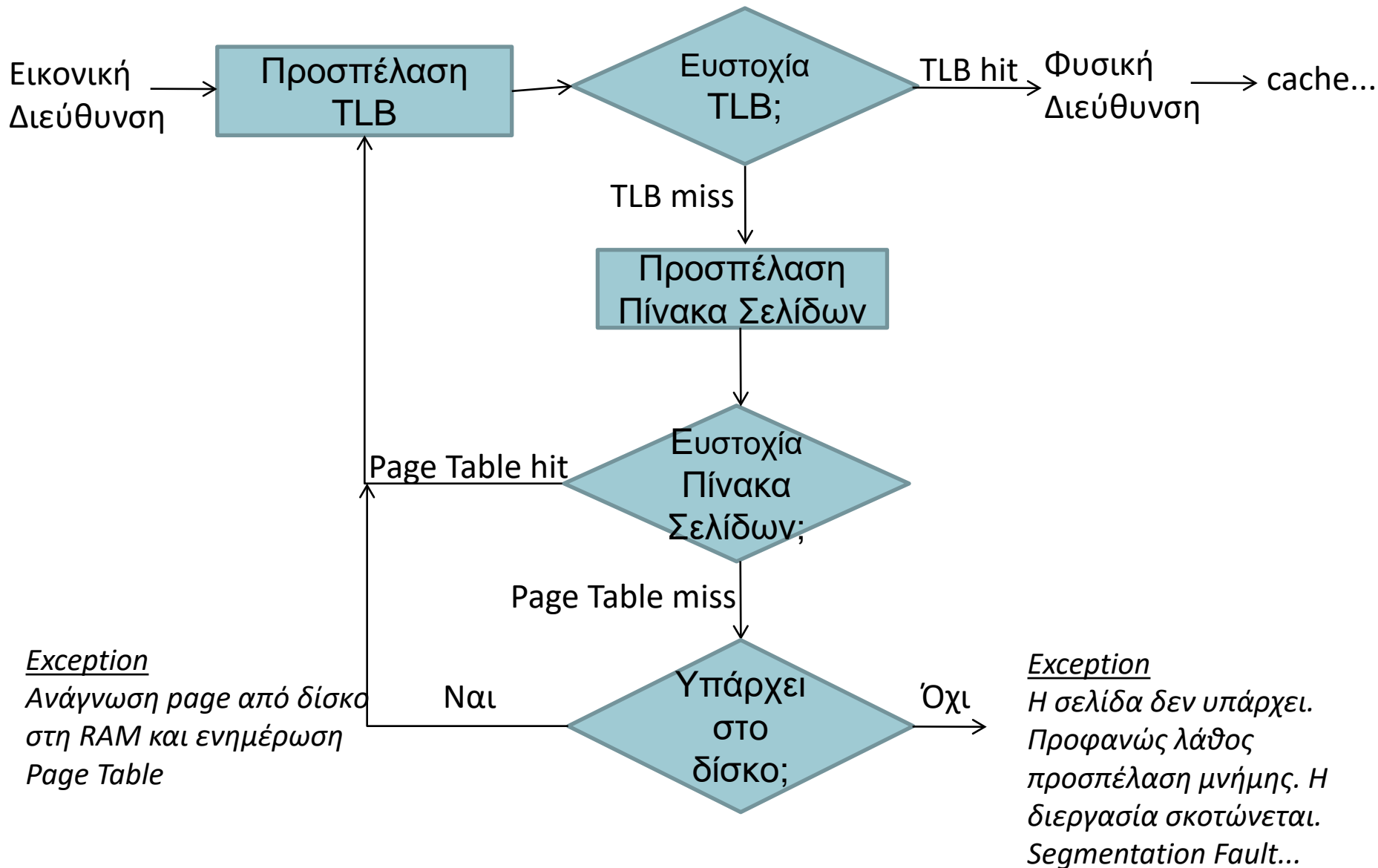
Ορισμός συνοχής

- Άτυπα: οι αναγνώσεις πρέπει να επιστρέφουν την πιο πρόσφατα γραμμένη τιμή
- Τυπικά:
 - ο P γράφει X , ο P διαβάζει X (χωρίς ενδιάμεσες εγγραφές)
 \Rightarrow η ανάγνωση επιστρέφει την τιμή που γράφηκε
 - ο P_1 γράφει X , ο P_2 διαβάζει X (αρκετά αργότερα)
 \Rightarrow η ανάγνωση επιστρέφει την τιμή που γράφηκε
 - ο P_1 γράφει X , ο P_2 γράφει X
 \Rightarrow όλοι οι επεξεργαστές βλέπουν τις εγγραφές με την ίδια σειρά
 - Καταλήγουν με την ίδια τελική τιμή για το X

Πρωτόκολλα συνοχής κρυφής μνήμης

- Λειτουργίες που εγγυώνται τη συνοχή
 - **Μετανάστευση** (migration) δεδομένων σε τοπικές κρυφές μνήμες
 - Μειώνει το εύρος ζώνης για την κοινόχρηστη μνήμη
 - **Αναπαραγωγή** κοινόχρηστων δεδομένων **μόνο για ανάγνωση**
 - Μειώνει τη διαμάχη για προσπέλαση
- Πρωτόκολλα κατασκοπίας (snooping)
 - Κάθε κρυφή μνήμη παρακολουθεί τις αναγνώσεις/εγγραφές στο δίαυλο
- Πρωτόκολλα βασισμένα σε κατάλογο
 - οι κρυφές μνήμες και η μνήμη καταγράφουν την κατάσταση των μπλοκ σε έναν κατάλογο (directory)

Ενέργειες Μετάφρασης Διευθύνσεων



TLB, Εικονική/κρυφή μνήμη, συνδυασμοί

TLB	Πίνακας σελίδων	Κρυφή μνήμη	
hit	hit	miss	Πιθανό
miss	hit	hit	Πιθανό
miss	hit	miss	Πιθανό
miss	miss	miss	Πιθανό
hit	miss	miss	Αδύνατο
hit	miss	hit	Αδύνατο
miss	miss	hit	Αδύνατο

Συμπερασματικές παρατηρήσεις

- Οι γρήγορες μνήμες είναι μικρές, οι μεγάλες μνήμες είναι αργές
 - Θέλουμε γρήγορες, μεγάλες μνήμες ☹
 - Η χρήση κρυφής μνήμης δίνει αυτήν την ψευδαίσθηση ☺
- Αρχή της τοπικότητας
 - Τα προγράμματα χρησιμοποιούν συχνότερα ένα μικρό μέρος του χώρου μνήμης
- Ιεραρχία μνήμης
 - κρυφή μνήμη L1 ↔ κρυφή μνήμη L2 ↔ ... ↔ μνήμη DRAM ↔ δίσκος
- Η σχεδίαση του συστήματος μνήμης είναι κρίσιμη για τους πολυεπεξεργαστές