

Εικονική Μνήμη

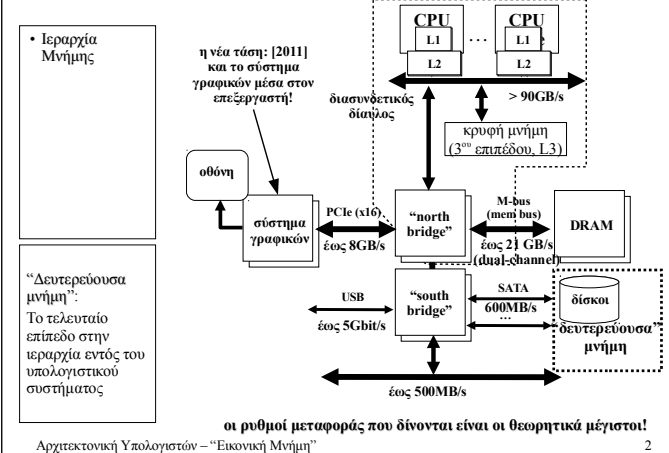
(και ο ρόλος της στην ιεραρχία μνήμης)

<http://mixstef.github.io/courses/comparch/>



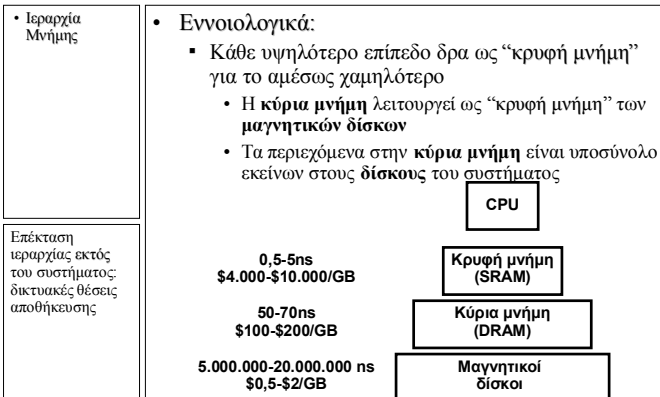
Μ.Στεφανιδάκης

Ιεραρχία Μνήμης

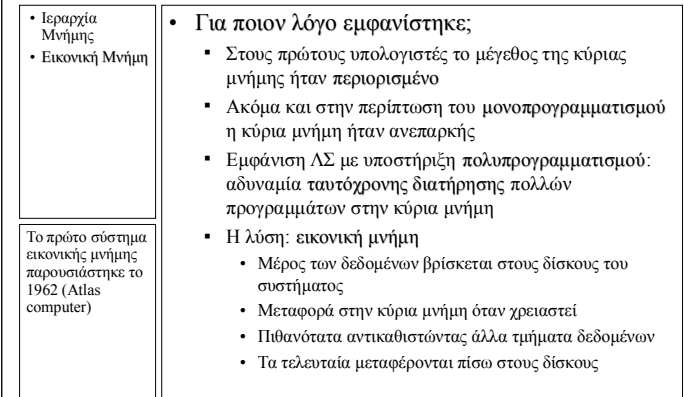


2

Επεκτείνοντας την Ιεραρχία Μνήμης



Εικονική μνήμη (virtual memory)



Πριν την εικονική μνήμη: overlays

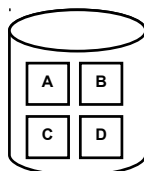
- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Η τεχνική των overlays απαιτούσε από τον προγραμματιστή να χειρίζεται τις λεπτομέρειες (π.χ. διευθύνσεις!) φόρτωσης και κλήσης των υποπρογραμμάτων!

Κύρια μνήμη

```
main( ) {
  swap-in(D)
  call D1
  swap-in(B)
  Call B2
}
```

δίσκος



- Καταλληλότερο για στατικά δεδομένα
 - υποπρογράμματα

Πριν την εικονική μνήμη: overlays

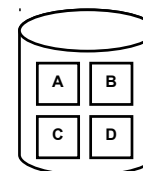
- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Η τεχνική των overlays απαιτούσε από τον προγραμματιστή να χειρίζεται τις λεπτομέρειες (π.χ. διευθύνσεις!) φόρτωσης και κλήσης των υποπρογραμμάτων!

Κύρια μνήμη

```
main( ) {
  swap-in(D) ←
  call D1
  swap-in(B)
  Call B2
}
```

δίσκος



- Καταλληλότερο για στατικά δεδομένα
 - υποπρογράμματα

Πριν την εικονική μνήμη: overlays

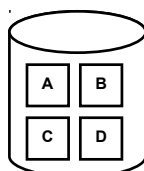
- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Η τεχνική των overlays απαιτούσε από τον προγραμματιστή να χειρίζεται τις λεπτομέρειες (π.χ. διευθύνσεις!) φόρτωσης και κλήσης των υποπρογραμμάτων!

Κύρια μνήμη

```
main( ) {
  swap-in(D) ←
  call D1
  swap-in(B) ←
  Call B2
}
```

δίσκος



- Καταλληλότερο για στατικά δεδομένα
 - υποπρογράμματα

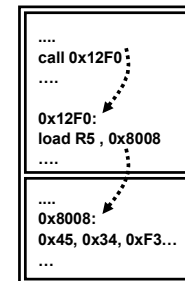
Χώρος διευθύνσεων προγράμματος

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Ποιες οι διευθύνσεις που δημιουργούσε ο μεταγλωττιστής; Τι συνέβαινε αν το πρόγραμμα δεν φορτωνόταν πάντοτε στον ίδιο χώρο μνήμης;

- Address Space
 - Εκτελούμενο πρόγραμμα στη μνήμη:
 - Διευθύνσεις κώδικα
 - Εντολές διακλάδωσης
 - Διευθύνσεις δεδομένων
 - Εντολές load-store
- Πριν την εικονική μνήμη:
 - Φυσικές διευθύνσεις
 - Άμεση αντιστοιχία με διευθύνσεις κύριας μνήμης

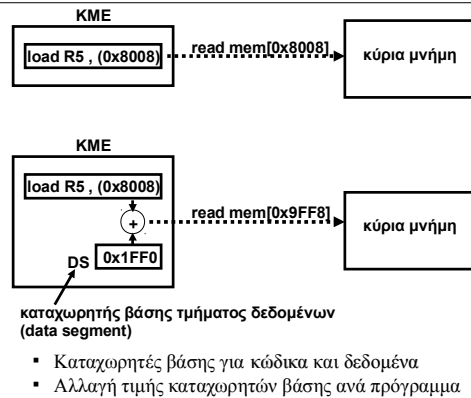
Κύρια μνήμη



Πολυπρογραμματισμός πριν την εικονική μνήμη

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Χρήση καταχωρητών βάσης (χωρίς άλλη υποστήριξη) σε χαμηλούς κόστους επεξεργαστές (π.χ. Intel 8086).
Διευκόλυνση τοποθέτησης προγραμμάτων οπουδήποτε στη μνήμη.



Μεταβαίνοντας σε εικονικές διευθύνσεις

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

• Το προηγούμενο σχήμα

- Εισήγαγε την αποσύνδεση των λογικών διευθύνσεων των προγραμμάτων από τις φυσικές διευθύνσεις κύριας μνήμης

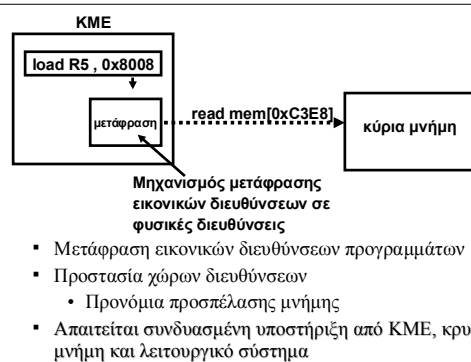
- Με απλή αντιστοιχία:
φυσική διεύθυνση = λογική διεύθυνση + καταχωρητής βάσης

- Απαιτείται υποστήριξη από το υλικό (ΚΜΕ)
- Το πρόγραμμα μπορεί να φορτωθεί σε οποιαδήποτε θέση μνήμης (relocation)
 - Δεν περιέχει αναφορές σε φυσικές διευθύνσεις
- Εισάγεται η έννοια των ξεχωριστών χώρων διευθύνσεων (κώδικα, δεδομένων...) ανά πρόγραμμα
 - χωρίς περαιτέρω υποστήριξη όμως!

Εικονικές Διευθύνσεις

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Ο κύριος ρόλος της εικονικής μνήμης στα σημερινά υπολογιστικά συστήματα, με την άφθονη κύρια μνήμη, είναι η υποστήριξη και προστασία των εικονικών χώρων διευθύνσεων ανά πρόγραμμα



Η εικονική μνήμη (ξανά)

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

• Ποιος ο ρόλος της;

1. Η χρήση εικονικής μνήμης, πέρα από όση είναι πραγματικά διαθέσιμη
2. Η αντιστοίχιση εικονικών διευθύνσεων σε φυσικές και η διαχείριση των προνομιών προσπέλασης
 - Σημαντικότερο σήμερα!

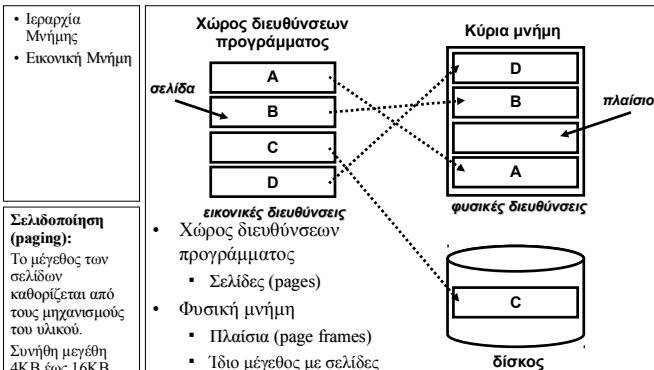
• Ποιος τη διαχειρίζεται;

- Διαχείριση από το λειτουργικό σύστημα
- Υποστήριξη από το υλικό (ΚΜΕ/κρυφή μνήμη)

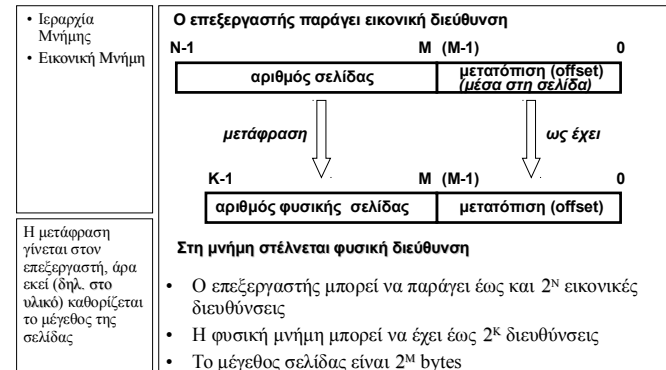
• Πώς υλοποιείται;

- Μετακίνηση τμημάτων μνήμης από/προς τους δίσκους
- Εκμετάλλευση αρχής τοπικότητας
 - Μερικά μέρη μόνο των προγραμμάτων είναι “ενεργά” κάθε στιγμή

Βασικό σχήμα Εικονικής Μνήμης



Σελίδες και εικονικές διευθύνσεις



Χαρακτηριστικά Σελίδων

- Ιεραρχία Μνήμης
 - Εικονική Μνήμη

- Σταθερό μέγεθος (4KB-16KB)
 - Για την προσπέλαση οποιασδήποτε θέσης μνήμης της σελίδας απαιτείται μία λέξη εικονικής διεύθυνσης (page+offset)
 - Ευκολία τοποθέτησης και αντικατάστασης σελίδων στην κύρια μνήμη
 - Βέλτιστο μέγεθος για μεταφορά από-προς δίσκο
 - Ενδεχομένως μέρος σελίδας μένει αχρησιμοποίητο

Σελιδοποίηση κατ'απαίτηση

- Ιεραρχία Μνήμης
 - Εικονική Μνήμη

- Οι σελίδες των προγραμμάτων (κώδικας-δεδομένα) βρίσκονται αρχικά μόνο στον δίσκο
 - Το ΛΣ τις σημειώνει ως “απουσες” από τη μνήμη
 - Όταν προσπελαστεί μια “απούσα” σελίδα, δημιουργείται ένα σφάλμα σελιδοποίησης (page fault)...
 - ...και το ΛΣ τη φορτώνει σε ένα πλαίσιο στη μνήμη
 - Ενδεχομένως εκτοπίζοντας πίσω στον δίσκο μια άλλη σελίδα από τη μνήμη
 - Η τελευταία σημειώνεται ως “απούσα”
 - Page faults: μεγάλο κόστος σε κύκλους αναμονής
 - 1-10Μκύκλοι
- Η μεγάλη επιβάρυνση για τη μετακίνηση των σελίδων από και προς τον δίσκο είναι καθοριστική για την απόδοση ενός συστήματος

Κρίσιμα σημεία στη σχεδίαση εικονικής μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

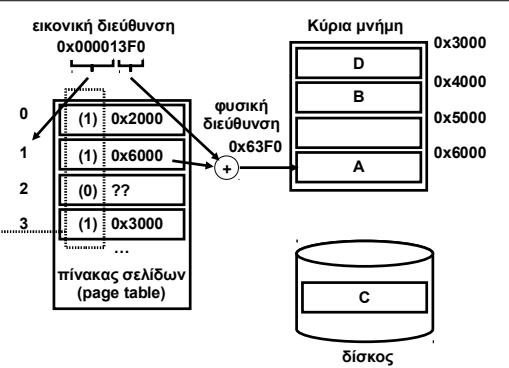
Ακόμα και μικρή μείωση στην εμφάνιση page faults μπορεί να έχει σημαντικό όφελος για την απόδοση του συστήματος

- Οι σελίδες πρέπει να έχουν ικανό μέγεθος
 - Για εξισορρόπηση του κόστους προσέλασης του δίσκου
- Η μείωση των page faults είναι επιβεβλημένη
 - Οι σελίδες τοποθετούνται οπουδήποτε μέσα στη μνήμη
 - Σχήμα ανάλογο των fully-associative κρυφών μνημών
- Η διαχείριση της εικονικής μνήμης γίνεται από λογισμικό (ΛΣ)
 - Μικρή επιβάρυνση συγκρινόμενη με χρόνο μετακίνησης σελίδων στους δίσκους
 - Δυνατότητα χρήσης πολυπλοκότερων αλγορίθμων για τοποθέτηση-αντικατάσταση σελίδων στη μνήμη
- Δεν είναι δυνατή η ενημέρωση στον δίσκο με κάθε εγγραφή νέων δεδομένων στη σελίδα

Μετάφραση εικονικών διευθύνσεων

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Presence bit:
βρίσκεται η σελίδα στην κύρια μνήμη;



Πίνακας σελίδων

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

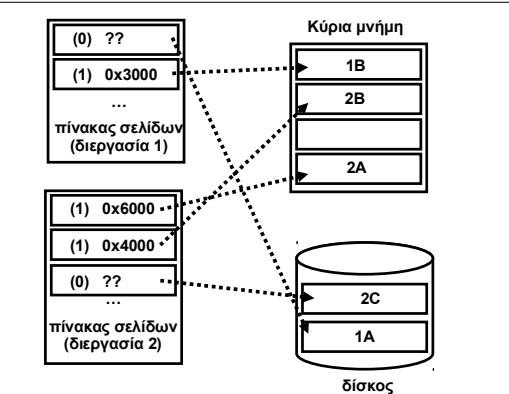
Τι συμβαίνει στην περίπτωση πολλαπλών προγραμμάτων;

- Πού βρίσκεται;
 - Στην κύρια μνήμη!
- Πόσες θέσεις διαθέτει;
 - Θεωρητικά: ίσες με τον μέγιστο αριθμό σελίδων
 - Για 2³⁰ σελίδες με 4 bytes ανά γραμμή, απαιτούνται 4MB
 - Πρακτικά: πίνακες πολλαπλών επιπέδων
 - Πιθανόν: σελιδοποίηση πινάκων (!)
 - Αρκεί να υπάρχει πάντα στη μνήμη ένα μέρος του πίνακα
- Ποια πρόσθετη πληροφορία χρειάζεται;
 - Βρίσκεται η σελίδα στη μνήμη; Έχει αλλάξει;
 - Αν όχι, σε ποιο σημείο του δίσκου είναι;
 - Συχνά η πληροφορία αυτή φυλάσσεται μέσα στον πίνακα σελίδων
 - Ποια σελίδα βρίσκεται σε κάθε πλαίσιο μνήμης;
 - Πόσο πρόσφατα χρησιμοποιήθηκε;
 - Δομές του ΛΣ για αλγόριθμο αντικατάστασης σελίδων

Πίνακες σελίδων και πολλαπλά προγράμματα

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Κάθε διεργασία έχει τους δικούς της πίνακες σελίδων! Κατά την εναλλαγή διεργασιών αλλάζει και ο καταχωρητής-δείκτης στους πίνακες



Translation-Lookaside Buffer	
<ul style="list-style-type: none"> • Ιεραρχία Μνήμης • Εικονική Μνήμη 	<ul style="list-style-type: none"> • Το πρόβλημα με τους πίνακες σελίδων <ul style="list-style-type: none"> ▪ Βρίσκονται στην κύρια μνήμη ▪ Για κάθε προσπέλαση μνήμης απαιτείται μια δεύτερη! <ul style="list-style-type: none"> • Για τον πίνακα σελίδων • Μη αποδεκτή χρονική επιβάρυνση! • Translation-Lookaside Buffer (TLB) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Μικρή “κρυφή μνήμη” για πρόσφατες μεταφράσεις εικονικών διευθύνσεων <ul style="list-style-type: none"> • Μέσα στον επεξεργαστή • 16-512 θέσεις, 1-2 γραμμές του πίνακα σελίδων ανά θέση • Προσπέλαση < 1 κύκλο ρολογιού • Παρατηρούμενο Miss rate: 0.01% - 1% • Σε περίπτωση miss: ενημέρωση από ΛΣ ή από την ίδια την ΚΜΕ (page table walker)

Προσπέλαση μνήμης: η συνολική εικόνα

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Στο σχήμα η κρυφή μνήμη δέχεται φυσικές διευθύνσεις. Υπάρχουν αρχιτεκτονικές με εικονική κρυφή μνήμη ή συνδυασμό εικονικής-φυσικής κρυφής μνήμης

The diagram illustrates the memory access flow. It features a box labeled 'TLB' (Translation Lookaside Buffer) and a box labeled 'Κρυφή μνήμη' (Main Memory). A solid arrow labeled 'φυσική διεύθυνση' (Physical Address) points from the TLB to the Main Memory. A double-headed arrow labeled 'δεδομένα, cache hit' (Data, cache hit) connects the TLB and the Main Memory. A dashed arrow labeled 'εικονική διεύθυνση' (Virtual Address) points from the 'ΚΜΕ' (Kernel Memory Element) box to the TLB. A solid arrow labeled 'μετάφραση, TLB miss' (Translation, TLB miss) points from the 'ΚΜΕ' box to the 'Κρυφή μνήμη' box. Below the 'ΚΜΕ' box is a 'πίνακας σελίδων (στην κύρια μνήμη)' (Page Table in Main Memory). A solid arrow labeled 'δεδομένα, cache miss' (Data, cache miss) points from the 'Κρυφή μνήμη' box to the 'πίνακας σελίδων' box. The 'πίνακας σελίδων' box is connected to a 'δίσκος' (Disk) via an arrow labeled 'σελίδα, page fault' (Page, page fault).

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Εικονική Μνήμη”

22

Εικονική Μνήμη και Προστασία Προσπέλασης	
<ul style="list-style-type: none">• Ιεραρχία Μνήμης• Εικονική Μνήμη	<ul style="list-style-type: none">• Προστασία προσπέλασης σελίδων<ul style="list-style-type: none">▪ Με διαφορετικούς πίνακες σελίδων ανά διεργασία είναι αδύνατη η προσπέλαση “ξένων” σελίδων▪ Δικαιώματα προσπέλασης ανά σελίδα▪ User mode και Supervisor Mode<ul style="list-style-type: none">• Σε user mode δεν είναι δυνατή η προσπέλαση του TLB, του πίνακα σελίδων και των αντίστοιχων καταχωρητών συστήματος• Υπάρχουν αρχιτεκτονικές με περισσότερα από 2 επίπεδα προνομίων▪ Ελεγχόμενη προσπέλαση συναρτήσεων ΛΣ<ul style="list-style-type: none">• Call gates: ελεγχόμενη εκτέλεση συναρτήσεων ΛΣ από χρήση, στο επίπεδο όμως των προνομίων του χρήστη → δεν είναι δυνατή η προσπέλαση “ξένων” δεδομένων!