



ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ

6η αναμνηστική έκδοση

John L. Hennessy | David A. Patterson

## ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Μια ποσοτική προσέγγιση



Μεταφράση – Επιστημονική Επιμέλεια: Δημήτρης Γκιζόπουλος  
Κρήνη, Ελίνα και Καλλιόπεια Γρατσιάνη-Αβραάμ

Διαφάνειες διδασκαλίας του πρωτότυπου βιβλίου μεταφρασμένες στα Ελληνικά  
μετάφραση και επιστημονική επιμέλεια:  
Δημήτρης Γκιζόπουλος, Πανεπιστήμιο Αθηνών

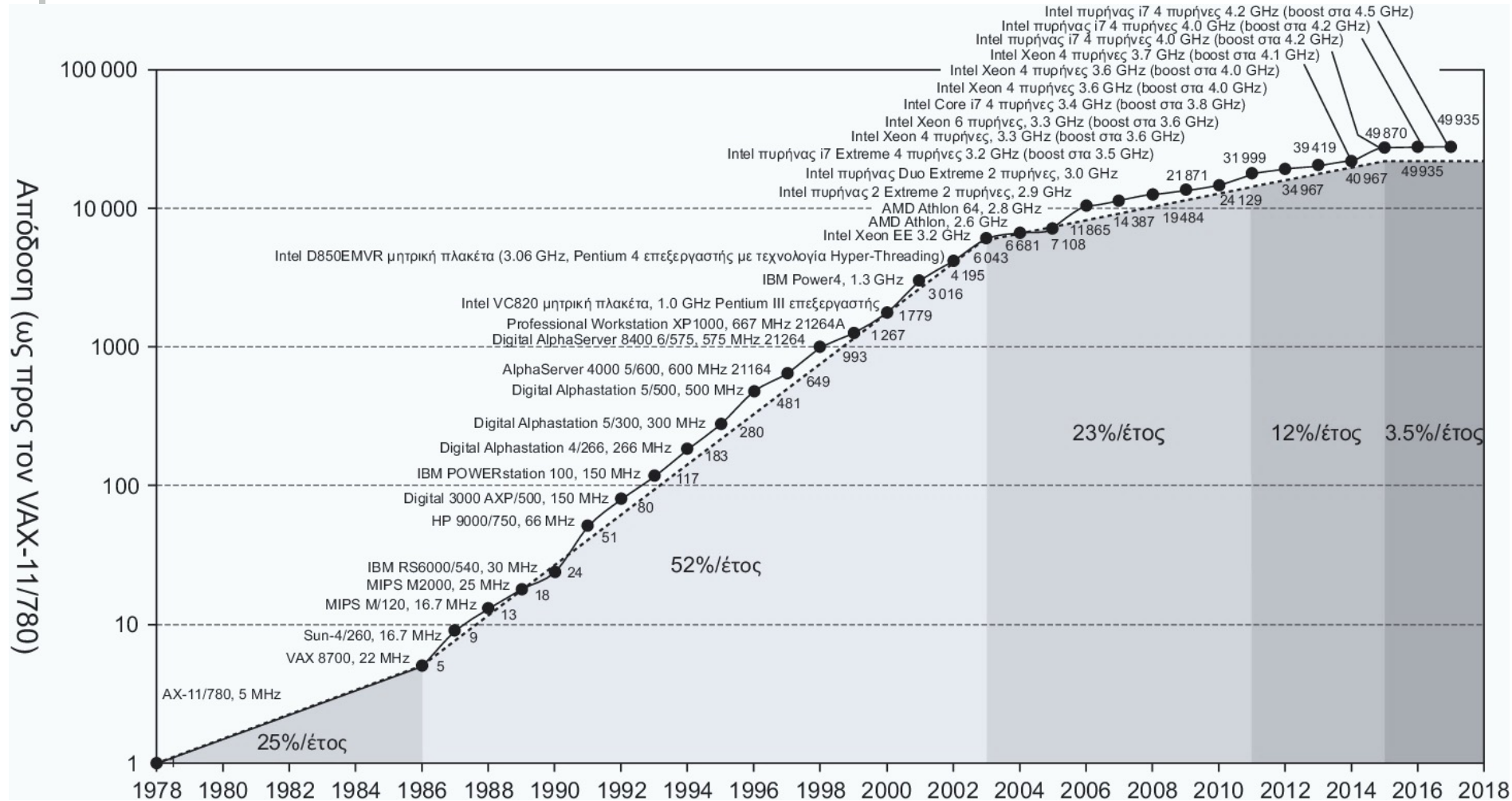
## Κεφάλαιο 1

# Τα βασικά της ποσοτικής σχεδίασης και ανάλυσης

# Τεχνολογία υπολογιστών

- Βελτιώσεις απόδοσης:
  - Βελτιώσεις στην τεχνολογία ημιαγωγών
    - Χαρακτηριστικό μέγεθος, ταχύτητα ρολογιού
  - Βελτιώσεις στις αρχιτεκτονικές υπολογιστών
    - Επιτεύχθηκαν με τους μεταγλωττιστές γλωσσών υψηλού επιπέδου και το Unix
    - Οδήγησαν στις αρχιτεκτονικές RISC
  - Μαζί έκαναν εφικτή την δημιουργία:
    - Υπολογιστών μικρών διαστάσεων
    - Γλωσσών προγραμματισμού που εστιάζουν στην παραγωγικότητα μέσω διαχείρισης/διερμηνείας (managed/interpreted programming languages)

# Απόδοση μονού επεξεργαστή



# Τρέχουσες τάσεις στην αρχιτεκτονική

- Δεν μπορεί να συνεχιστεί η μόχλευση της παραλληλίας επιπέδου εντολής (Instruction-Level parallelism – ILP)
  - Η βελτίωση της απόδοσης του μονού επεξεργαστή τελείωσε το 2003
- Νέα μοντέλα για απόδοση:
  - Παραλληλία επιπέδου δεδομένων (data-level parallelism – DLP)
  - Παραλληλία επιπέδου νήματος (Thread-level parallelism – TLP)
  - Παραλληλία επιπέδου αιτήματος (Request-level parallelism – RLP)
- Αυτά απαιτούν ρητή αναδόμηση της εφαρμογής

# Κατηγορίες υπολογιστών

- Προσωπική φορητή συσκευή (Personal Mobile Device – PMD)
  - π.χ. smart phones, tablets
  - Έμφαση στην ενεργειακή αποδοτικότητα (energy efficiency) και την εκτέλεση σε πραγματικό χρόνο (real-time)
- Επιτραπέζια υπολογιστική (Desktop Computing)
  - Έμφαση στη σχέση τιμής και απόδοσης
- Διακομιστές (Servers)
  - Έμφαση στη διαθεσιμότητα (availability), κλιμάκωση (scalability), διεκπεραιωτική ικανότητα (throughput)
- Συστοιχίες (Clusters) / Υπολογιστές κλίμακας αποθήκης (Warehouse Scale Computers)
  - Χρήση για «Λογισμικό ως Υπηρεσία» (“Software as a Service – SaaS”)
  - Έμφαση στη διαθεσιμότητα και τη σχέση τιμής και απόδοσης
  - Υποκατηγορία: Υπερυπολογιστές (Supercomputers), έμφαση: απόδοση κινητής υποδιαστολής και γρήγορα εσωτερικά δίκτυα
- Διαδίκτυο πραγμάτων (Internet of Things)/ Ενσωματωμένοι υπολογιστές (Embedded Computers)
  - Έμφαση: τιμή

# Παραλληλία

- Κατηγορίες παραλληλίας στις εφαρμογές:
  - Παραλληλία επιπέδου δεδομένων (Data-Level Parallelism – DLP)
  - Παραλληλία επιπέδου εργασίας (Task-Level Parallelism – TLP)
- Κατηγορίες αρχιτεκτονικής παραλληλίας:
  - Παραλληλία επιπέδου εντολής (Instruction-Level Parallelism – ILP)
  - Διανυσματικές αρχιτεκτονικές (Vector architectures)/Μονάδες επεξεργασίας γραφικών (Graphic Processor Units – GPUs)
  - Παραλληλία επιπέδου νήματος (Thread-Level Parallelism)
  - Παραλληλία επιπέδου αιτήματος (Request-Level Parallelism)

# Ταξινόμηση του Flynn

- Ένα ρεύμα εντολών, ένα ρεύμα δεδομένων (single instruction stream, single data stream – SISD)
- Ένα ρεύμα εντολών, πολλά ρεύματα δεδομένων (single instruction stream, multiple data streams – SIMD)
  - Διανυσματικές αρχιτεκτονικές (vector architectures)
  - Επεκτάσεις πολυμέσων (multimedia extensions)
  - Μονάδες επεξεργασίας γραφικών (graphics processor units)
- Πολλά ρεύματα εντολών, ένα ρεύμα δεδομένων (multiple instruction streams, single data stream – MISD)
  - Δεν υπάρχει εμπορική υλοποίηση
- Πολλά ρεύματα εντολών, πολλά ρεύματα δεδομένων (multiple instruction streams, multiple data streams – MIMD)
  - Ισχυρής σύζευξης (tightly-coupled) MIMD
  - Χαλαρής σύζευξης (loosely-coupled) MIMD

# Ορισμός αρχιτεκτονικής υπολογιστών

- “Παλιά” όψη της αρχιτεκτονικής υπολογιστών:
  - Σχεδίαση της αρχιτεκτονικής συνόλου εντολών (Instruction Set Architecture – ISA)
  - δηλαδή αποφάσεις που αφορούν:
    - καταχωρητές, διευθυνσιοδότηση μνήμης, τρόπους διευθυνσιοδότησης, τελεστέους εντολών, διαθέσιμες λειτουργίες, εντολές ελέγχου ροής, κωδικοποίηση εντολών
- “Πραγματική” αρχιτεκτονική υπολογιστών:
  - Συγκεκριμένες απαιτήσεις της μηχανής στόχου
  - Σχεδίαση για μεγιστοποίηση της απόδοσης εντός περιορισμών: κόστος, ηλεκτρική ισχύς, και διαθεσιμότητα
  - Συμπεριλαμβάνει: ISA, μικροαρχιτεκτονική, υλικό



# Αρχιτεκτονική συνόλου εντολών

- Κατηγορία αρχιτεκτονικής συνόλου εντολών (class of ISA)
  - Καταχωρητές γενικού σκοπού (general-purpose registers)
  - Καταχωρητή-μνήμης (register-memory) έναντι φόρτωσης-αποθήκευσης (load-store)
- Καταχωρητές της RISC-V
  - 32 γεν. σκοπού,  
32 κιν. υποδ.

Καταχωρ.	Όνομα	Χρήση	Διατήρηση από
x0	zero	σταθερά 0	Δ.Ε.
x1	ra	δ/νση επιστροφής	καλούντα
x2	sp	δείκτης στοίβας	καλούμενο
x3	gp	καθολικός δείκτης	
x4	tp	δείκτης νήματος	
x5-x7	t0-t2	προσωρινοί	καλούντα
x8	s0/fp	αποθηκευμένος/ δείκτης πλαισίου	καλούμενο

Καταχωρ.	Όνομα	Χρήση	Διατήρηση από
x9	s1	αποθηκευμένος	καλούμενο
x10-x17	a0-a7	ορίσματα	καλούντα
x18-x27	s2-s11	αποθηκευμένοι	καλούμενο
x28-x31	t3-t6	προσωρινοί	καλούντα
f0-f7	ft0-ft7	προσωρινοί Κ.Υ.	καλούντα
f8-f9	fs0-fs1	αποθηκευμένοι Κ.Υ.	καλούμενο
f10-f17	fa0-fa7	ορίσματα FP	καλούμενο
f18-f27	fs2-fs21	αποθηκευμένοι Κ.Υ.	καλούμενο
f28-f31	ft8-ft11	προσωρινοί Κ.Υ.	καλούντα

# Αρχιτεκτονική συνόλου εντολών

- Διευθυνσιοδότηση μνήμης
  - RISC-V: διευθυνσιοδότηση ανά byte, ευθυγραμμισμένες (aligned) προσπελάσεις ταχύτερες
- Τρόποι διευθυνσιοδότησης (addressing modes)
  - RISC-V: μέσω καταχωρητή (register), άμεσος (immediate), μετατόπισης (displacement) (βάση+σχετική απόσταση – base+offset)
  - Άλλα παραδείγματα: αυτόματης αύξησης (autoincrement), μέσω δείκτη (indexed), σχετική ως προς τον PC (PC-relative)
- Τύποι και μεγέθη τελεστών
  - RISC-V: 8-bit, 32-bit, 64-bit

# Αρχιτεκτονική συνόλου εντολών

- Λειτουργίες
  - RISC-V: μεταφορά δεδομένων, αριθμητικές, λογικές, ελέγχου, κινητή υποδιαστολή
  - Δείτε την Εικόνα 1.5 του βιβλίου
- Εντολές ελέγχου ροής
  - Χρήση περιεχομένου καταχωρητών (RISC-V) έναντι bit κατάστασης (status) (x86, ARMv7, ARMv8)
  - Διεύθυνση επιστροφής σε καταχωρητή (RISC-V, ARMv7, ARMv8) έναντι της στοίβας (x86)
- Κωδικοποίηση
  - Σταθερή (RISC-V, ARMv7/v8 εκτός από τα «συμπαγή» σύνολα εντολών τους) έναντι μεταβλητού μεγέθους (x86)

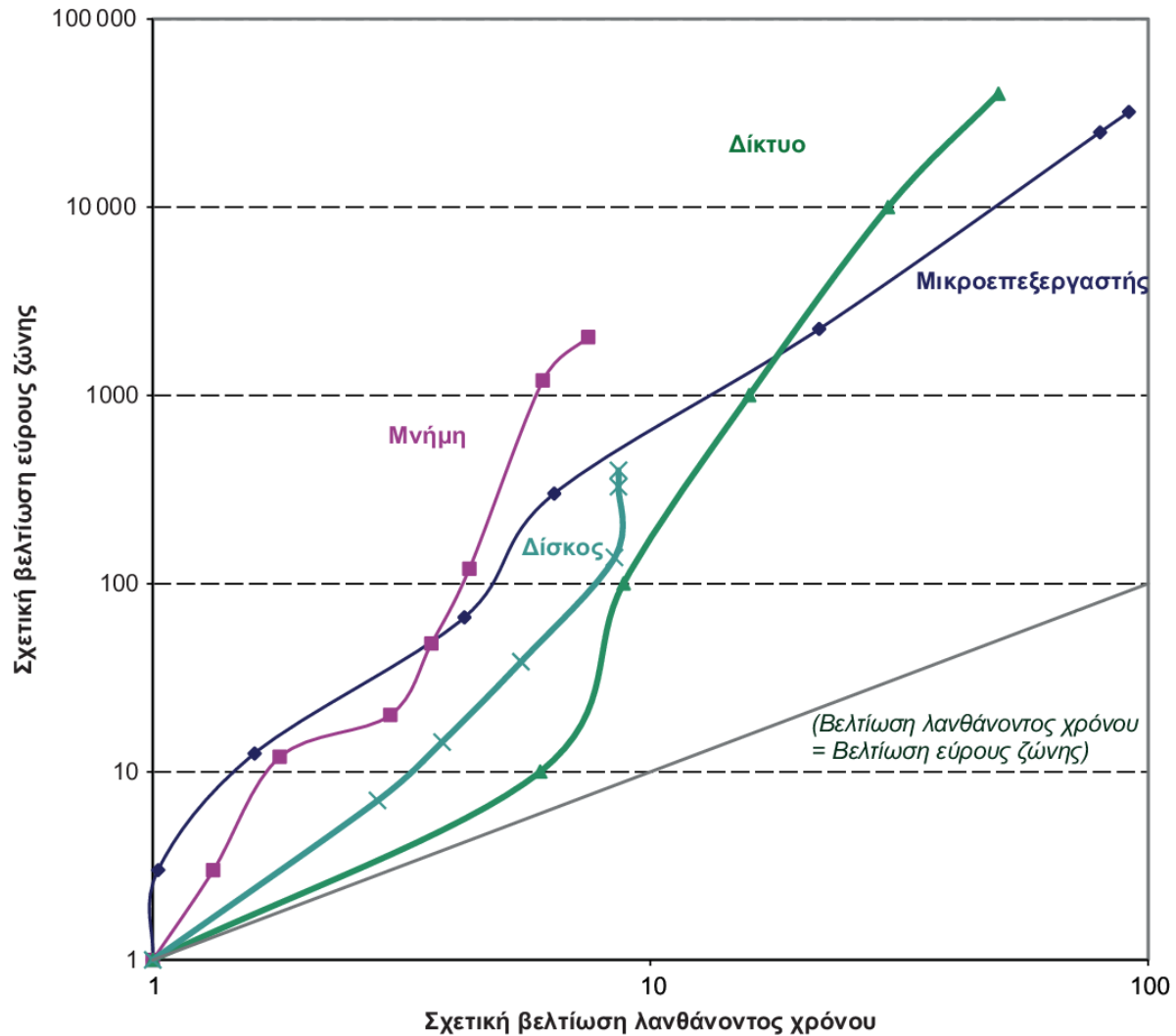
# Τάσεις της τεχνολογίας

- Τεχνολογία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (νόμος του Moore)
  - Πυκνότητα τρανζίστορ: 35%/έτος
  - Μέγεθος τσιπ: 10-20%/έτος
  - Συνολική ολοκλήρωση: 40-55%/έτος
- Χωρητικότητα DRAM: 25-40%/έτος (μειώνεται)
  - 8 Gb (2014), 16 Gb (2019), ενδεχομένως όχι στα 32 Gb
- Χωρητικότητα Φλας (flash): 50-60%/έτος
  - 8-10X φθηνότερη/bit από την DRAM
- Χωρητικότητα μαγνητικού δίσκου: πρόσφατα μειώθηκε σε 5%/έτος
  - Αυξήσεις χωρητικότητας μπορεί να μην είναι πλέον εφικτές, ίσως αύξηση από τις 7 στις 9 πλάκες (platters)
  - 8-10X φθηνότερος/bit από την Φλας
  - 200-300X φθηνότερος/bit από την DRAM

# Εύρος ζώνης και λανθάνων χρόνος

- Εύρος ζώνης (bandwidth) ή διεκπεραιωτική ικανότητα (throughput)
  - Συνολικό έργο που γίνεται σε δεδομένο χρόνο
  - 32,000-40,000X βελτίωση για τους επεξεργαστές
  - 300-1200X βελτίωση για τη μνήμη και τους δίσκους
- Λανθάνων χρόνος (latency) ή χρόνος απόκρισης (response time)
  - Χρόνος ανάμεσα στην έναρξη και την ολοκλήρωση ενός συμβάντος
  - 50-90X βελτίωση για τους επεξεργαστές
  - 6-8X βελτίωση για τη μνήμη και τους δίσκους

# Εύρος ζώνης και λανθάνων χρόνος



Πλήρως λογαριθμικό διάγραμμα με ορόσημα εύρους ζώνης και λανθάνοντος χρόνου

# Τρανζίστορ και καλωδίωση

- Χαρακτηριστικό μέγεθος (feature size)
  - Ελάχιστο μέγεθος ενός τρανζίστορ ή ενός αγωγού σε οποιαδήποτε διάσταση  $x$  ή  $y$
  - 10 μικρόμετρα (microns -  $\mu\text{m}$ ) το 1971 στα 0.016 microns (16 νανόμετρα – nm) το 2017
  - Η απόδοση των τρανζίστορ κλιμακώνεται γραμμικά
    - Η καθυστέρηση των αγωγών δεν βελτιώνεται με το χαρακτηριστικό μέγεθος!
  - Η πυκνότητα της ολοκλήρωσης κλιμακώνεται τετραγωνικά

# Ηλεκτρική ισχύς και ενέργεια

- Πρόβλημα: εισαγωγή ηλεκτρικής ισχύος, απαγωγή θερμότητας
- Ισχύς θερμικής σχεδίασης (Thermal Design Power - TDP)
  - Χαρακτηρίζει την διατηρήσιμη κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος
  - Χρησιμοποιείται ως στόχος για την παροχή ισχύος και το σύστημα ψύξης
  - Μικρότερη από την μέγιστη ισχύ (που είναι 1.5X υψηλότερη), μεγαλύτερη από την μέση ισχύ
- Ο ρυθμός ρολογιού μπορεί να μειωθεί δυναμικά ώστε να περιοριστεί η κατανάλωση ισχύος
- Η ενέργεια ανά εργασία είναι συχνά καλύτερο μέτρο

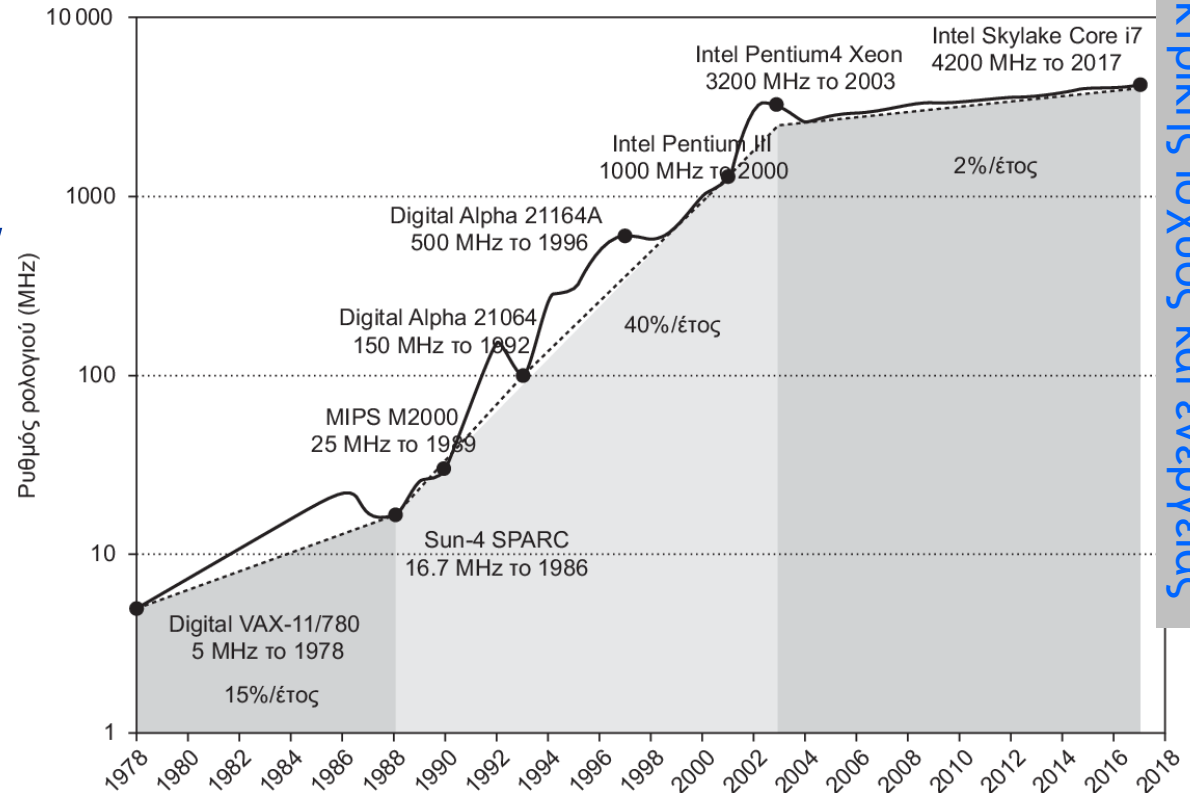


# Δυναμική ενέργεια και ισχύς

- Δυναμική ενέργεια
  - Τα τρανζίστορ αλλάζουν τιμή από 0 -> 1 ή από 1 -> 0
  - $\frac{1}{2} \times \text{Χωρητικό φορτίο} \times \text{Τάση}^2$
- Δυναμική ισχύς
  - $\frac{1}{2} \times \text{Χωρητικό φορτίο} \times \text{Τάση}^2 \times \text{Συχνότητα μεταβάσεων}$
- Η μείωση του ρυθμού ρολογιού μειώνει την ηλεκτρική ισχύ, όχι την ενέργεια

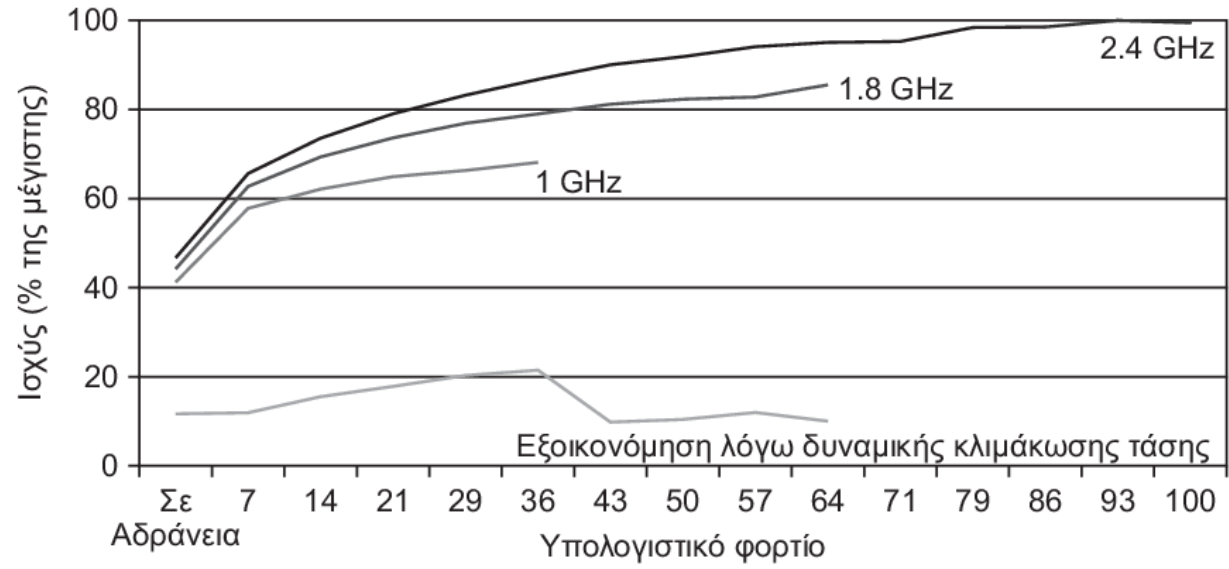
# Ηλεκτρική ισχύς

- Ο Intel 80386 καταναλώνει ~ 2 W
- Ο Intel Core i7 στα 3.3 GHz καταναλώνει 130 W
- Η θερμότητα πρέπει να απάγεται από ένα τσιπ διαστάσεων 1.5 x 1.5 cm
- Αυτό είναι το όριο για το τι μπορεί να ψυχθεί μέσω αέρα



# Μείωση της ηλεκτρικής ισχύος

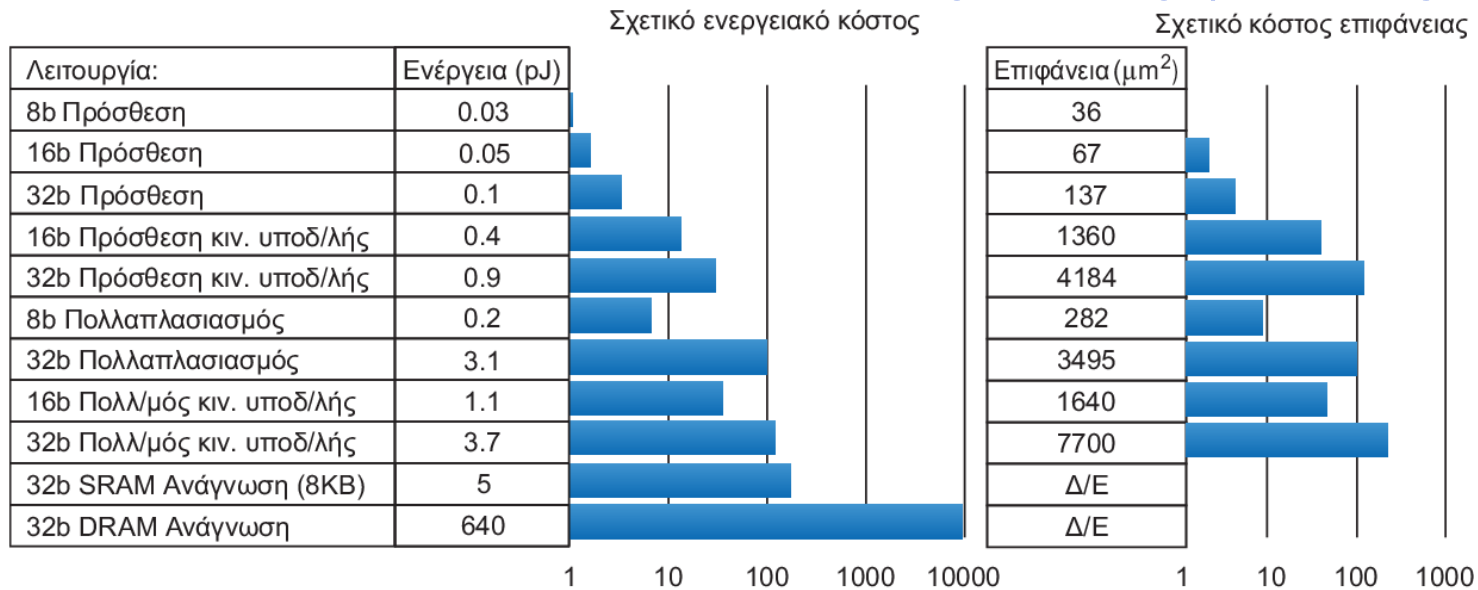
- Τεχνικές μείωσης ισχύος:
  - Μην κάνεις τίποτε σωστά
  - Δυναμική κλιμάκωση τάσης-συχνότητας (Dynamic Voltage-Frequency Scaling)



- Κατάσταση χαμηλής ισχύος για DRAM, δίσκους
- Υπερχρονισμός (overclocking), απενεργοποίηση πυρήνων

# Στατική ισχύς

- Στατική κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος
  - 25-50% της συνολικής ισχύος
  - Ρεύμα<sub>στατικό</sub> x Τάση
  - Κλιμακώνεται με τον αριθμό των τρανζίστορ
  - Για να μειωθεί: διακοπή παροχής ισχύος (power gating)



Οι τιμές της ενέργειας είναι από το *Computing's Energy problem (and what we can do about it)* του Mark Horowitz. ISSCC 2014  
 Οι τιμές της επιφάνειας είναι αποτέλεσμα αυτόματης σύνθεσης (automatic synthesis) με τη χρήση του Design compiler σε τεχνολογία 45nm της TSMC. Οι μονάδες κινητής υποδιαστολής χρησιμοποιούν την DesignWare Library.

# Τάσεις του κόστους

- Το κόστος μειώνεται μέσω της καμπύλης μάθησης
  - Εσοδεία (Yield)
- DRAM: η τιμή παρακολουθεί από κοντά το κόστος
- Μικροεπεξεργαστές: η τιμή εξαρτάται από τον όγκο
  - 10% μικρότερη τιμή για κάθε διπλασιασμό του όγκου

# Κόστος ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- Ολοκληρωμένο κύκλωμα

$$\text{Κόστος ολοκληρωμένου κυκλώματος} = \frac{\text{Κόστος κύβου} + \text{Κόστος δοκιμής κύβου} + \text{Κόστος συσκευασίας και τελικής δοκιμής}}{\text{Εσοδεία τελικής δοκιμής}}$$

$$\text{Κόστος κύβου} = \frac{\text{Κόστος πλακιδίου}}{\text{Κύβοι ανά πλακίδιο} \times \text{Εσοδεία κύβων}}$$

$$\text{Κύβοι ανά πλακίδιο} = \frac{\pi \times (\text{Διάμετρος πλακιδίου} / 2)^2}{\text{Επιφάνεια κύβου}} \times \frac{\pi \times \text{Διάμετρος πλακιδίου}}{\sqrt{2} \times \text{Επιφάνεια κύβου}}$$

- Τύπος Bose-Einstein:

$$\text{Εσοδεία κύβων} = \text{Εσοδεία πλακιδίων} \times 1 / (1 + \text{Ατέλειες ανά μονάδα επιφανείας} \times \text{Επιφάνεια κύβου})^N$$

- Ατέλειες ανά μονάδα επιφανείας = 0.016-0.057 ατέλειες ανά cm<sup>2</sup> (2010)
- N = συντελεστής πολυπλοκότητας διαδικασίας = 11.5-15.5 (40 nm, 2010)

# Φερεγγυότητα

- Αξιοπιστία μονάδας
  - Μέσος χρόνος έως την αστοχία (Mean time to failure – MTTF)
  - Μέσος χρόνος έως την επιδιόρθωση (Mean time to repair – MTTR)
  - Μέσος χρόνος μεταξύ αστοχιών (Mean time between failures – MTBF) =  $MTTF + MTTR$
  - Διαθεσιμότητα (Availability) =  $MTTF / MTBF$

# Μέτρηση της απόδοσης

- Τυπικά μέτρα απόδοσης:
  - Χρόνος απόκρισης (response time)
  - Διεκπεραιωτική ικανότητα (throughput)
- Επιτάχυνση (speedup) του X σε σχέση με τον Y
  - $\text{Χρόνος εκτέλεσης}_Y / \text{Χρόνος εκτέλεσης}_X$
- Χρόνος εκτέλεσης
  - Χρόνος ρολογιού τοίχου (Wall clock time): συμπεριλαμβάνει όλες τις επιβαρύνσεις του συστήματος
  - Χρόνος CPU: μόνο ο χρόνος υπολογισμού
- Μετροπρογράμματα (benchmarks)
  - Πυρήνες (kernels) (π.χ. Πολλαπλασιασμός πινάκων)
  - Προγράμματα-παιχνίδια (toy programs) (π.χ. ταξινόμηση)
  - Συνθετικά μετροπρογράμματα (π.χ. Dhrystone)
  - Σουίτες μετροπρογραμμάτων (π.χ. SPEC06fp, TPC-C)



# Αρχές σχεδίασης υπολογιστών

- Εκμετάλλευση παραλληλίας
  - π.χ. πολλοί επεξεργαστές, δίσκοι, σειρές μνήμης, διοχέτευση, πολλές λειτουργικές μονάδες
  
- Αρχή της τοπικότητας (locality)
  - Επαναχρησιμοποίηση δεδομένων και εντολών
  
- Εστίαση στη συνηθισμένη περίπτωση
  - Νόμος του Amdahl (Amdahl's Law)

$$\text{Χρόνος εκτέλεσης}_{\text{νέος}} = \text{Χρόνος εκτέλεσης}_{\text{παλιός}} \times \left( (1 - \text{Κλάσμα}_{\text{βελτίωσης}}) + \frac{\text{Κλάσμα}_{\text{βελτίωσης}}}{\text{Επιτάχυνση}_{\text{βελτίωσης}}} \right)$$

$$\text{Επιτάχυνση}_{\text{συνολική}} = \frac{\text{Χρόνος εκτέλεσης}_{\text{παλιός}}}{\text{Χρόνος εκτέλεσης}_{\text{νέος}}} = \frac{1}{(1 - \text{Κλάσμα}_{\text{βελτίωσης}}) + \frac{\text{Κλάσμα}_{\text{βελτίωσης}}}{\text{Επιτάχυνση}_{\text{βελτίωσης}}}}$$

# Αρχές σχεδίασης υπολογιστών

- Η εξίσωση της απόδοσης του επεξεργαστή

Χρόνος CPU = Κύκλοι ρολογιού CPU για ένα πρόγραμμα × Χρόνος κύκλου ρολογιού

$$\text{Χρόνος CPU} = \frac{\text{Κύκλοι ρολογιού CPU για ένα πρόγραμμα}}{\text{Ρυθμός ρολογιού}}$$

$$\text{CPI} = \frac{\text{Κύκλοι ρολογιού CPU για ένα πρόγραμμα}}{\text{Πλήθος εντολών}}$$

Χρόνος CPU = Πλήθος εντολών × Κύκλοι ανά εντολή × Χρόνος κύκλου ρολογιού

$$\frac{\text{Εντολές}}{\text{Πρόγραμμα}} \times \frac{\text{Κύκλοι ρολογιού}}{\text{Εντολή}} \times \frac{\text{Δευτερόλεπτα}}{\text{Χρόνος κύκλου}} = \frac{\text{Δευτερόλεπτα}}{\text{Πρόγραμμα}} = \text{Χρόνος CPU}$$

# Αρχές σχεδίασης υπολογιστών

- Διαφορετικοί τύποι εντολών έχουν διαφορετικά CPI

$$\text{Κύκλοι ρολογιού CPU} = \sum_{i=1}^n \text{Πλήθος εντολών}_i \times \text{CPI}_i$$

$$\text{Χρόνος CPU} = \left( \sum_{i=1}^n \text{Πλήθος εντολών}_i \times \text{CPI}_i \right) \times \text{Χρόνος κύκλου ρολογιού}$$

# Πλάνες και παγίδες

- Όλοι οι εκθετικοί νόμοι φτάνουν σε ένα τέλος
  - Κλιμάκωση Dennard (σταθερή πυκνότητα ηλεκτρικής ισχύος)
    - Σταμάτησε λόγω τάσης κατωφλίου (threshold voltage)
  - Χωρητικότητα δίσκου
    - 30-100% ανά έτος σε 5% ανά έτος
  - Νόμος του Moore (Moore's Law)
    - Πιο ορατός στη χωρητικότητα της DRAM
    - Το ITRS έπαψε να υπάρχει
    - Έμειναν μόνο τέσσερις κατασκευάστριες εταιρείες εξελιγμένων τσιπ λογικής
    - 11 nm, ίσως τα 3 nm να είναι το όριο

# Πλάνες και παγίδες

- Οι μικροεπεξεργαστές αποτελούν πανάκεια («ασημένια σφαίρα»)
  - Η απόδοση είναι πλέον φορτίο του προγραμματιστή
- Είναι το θύμα του νόμου του Amdahl
- Μοναδικό σημείο αστοχίας (single point of failure)
- Βελτιώσεις του υλικού που αυξάνουν την απόδοση, επίσης βελτιώνουν την ενεργειακή αποδοτικότητα, ή τουλάχιστον είναι ενεργειακά ουδέτερες
- Τα μετροπρογράμματα παραμένουν έγκυρα επ' αόριστον
  - Οι βελτιστοποιήσεις των μεταγλωττιστών στοχεύουν τα μετροπρογράμματα

# Πλάνες και παγίδες

- Ο μετρημένος μέσος χρόνος έως την αστοχία (MTTF) των δίσκων είναι 1.200.000 ώρες ή σχεδόν 140 χρόνια, άρα οι δίσκοι πρακτικά δεν αστοχούν ποτέ
  - Η τιμή του MTTF από τους κατασκευαστές υποθέτει αντικατάσταση σε τακτικά διαστήματα
- Η μέγιστη απόδοση συμβαδίζει με την παρατηρούμενη απόδοση
- Η ανίχνευση ελαττωμάτων μπορεί να μειώσει τη διαθεσιμότητα
  - Δεν είναι απαραίτητες όλες οι λειτουργίες για να είναι ορθή η εκτέλεση