

# Ενσωματωμένα συστήματα, εφαρμογές τους και σχεδιασμός συστήματος σε ολοκληρωμένο κύκλωμα (system-on-chip)

Δρ. Λάμπρος Μπισδούνης



Συντονιστής έργων  
Γενική Διεύθυνση Έρευνας & Ανάπτυξης  
INTRACOM TELECOM A.E.

Επισκέπτης καθηγητής (Π.Δ. 407/80)  
Τμήμα Μηχανικών Η/Υ,  
Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Σεπτέμβριος 2007

# Εισαγωγή

---

- Η ετερογένεια των σημερινών ηλεκτρονικών συστημάτων, θέτει τους μηχανικούς αντιμέτωπους με νέα προβλήματα όταν καλούνται να προδιαγράψουν, προσομοιώσουν, σχεδιάσουν και βελτιστοποιήσουν τέτοια σύνθετα συστήματα.
- Οι υλοποιήσεις των συστημάτων αυτών τυπικά αποτελούνται από μέρη λογισμικού, προγραμματιζόμενα ή ειδικού σκοπού μέρη υλικού και υποσυστήματα επικοινωνίας και μνήμης.
- Κατά το σχεδιασμό ενσωματωμένων συστημάτων απαιτείται συνήθως εξισορρόπηση μεταξύ του κόστους και των επιδόσεων τους. Για τη βελτιστοποίησή τους θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διάφορα μη συγκρίσιμα και συχνά ανταγωνιστικά μεγέθη, όπως κόστος, απόδοση, κατανάλωση ενέργειας, αξιοπιστία κλπ.
- Γι' αυτό απαιτείται αρκετή προσπάθεια και εργαλεία αυτοματοποίησης σχεδιασμού ώστε να διαχειριστεί κανείς την πολυπλοκότητα των σημερινών ενσωματωμένων συστημάτων και να διενεργήσει τους σωστούς χειρισμούς ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις της αγοράς.

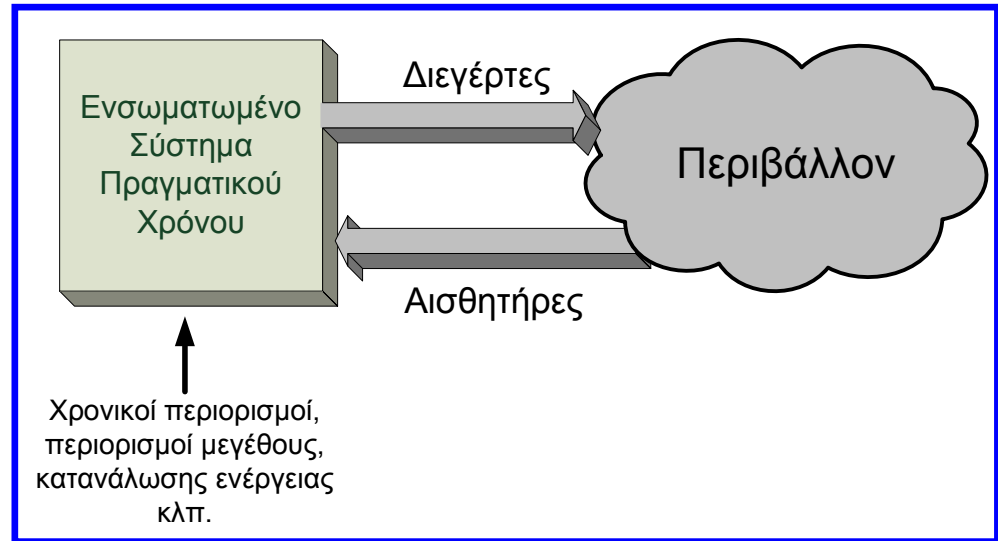
# Τι είναι ενσωματωμένο σύστημα;

---

- Ενσωματωμένο σύστημα είναι κάθε συσκευή η οποία περιλαμβάνει ένα προγραμματιζόμενο στοιχείο, αλλά δεν αποτελεί υπολογιστή γενικού σκοπού.
- Ένα ενσωματωμένο σύστημα:
  - ✓ αποτελείται από ένα ή περισσότερα προγραμματιζόμενα στοιχεία που περιβάλλονται από στοιχεία υλικού ειδικού σκοπού καθώς και από άλλα περιφερειακά στοιχεία.
  - ✓ και αλληλεπιδρά συνεχώς με το περιβάλλον του μέσω αισθητήρων (με την ευρύτερη έννοια του όρου).

# Βασικά χαρακτηριστικά ενσωματωμένων συστημάτων

- **Εξειδικευμένα** (application-specific).
- Περιλαμβάνουν τουλάχιστον ένα **προγραμματιζόμενο στοιχείο**.
- **Αλληλεπιδρούν** συνεχώς με το **περιβάλλον** τους.
- Λειτουργούν σε **πραγματικό χρόνο**, δηλ. πρέπει να ικανοποιούν εξωτερικούς χρονικούς περιορισμούς (deadlines).
- Πρέπει να ικανοποιούν **πρόσθετους περιορισμούς** που αφορούν κατανάλωση ενέργειας, βάρος, μέγεθος, κόστος, αξιοπιστία, ασφάλεια.



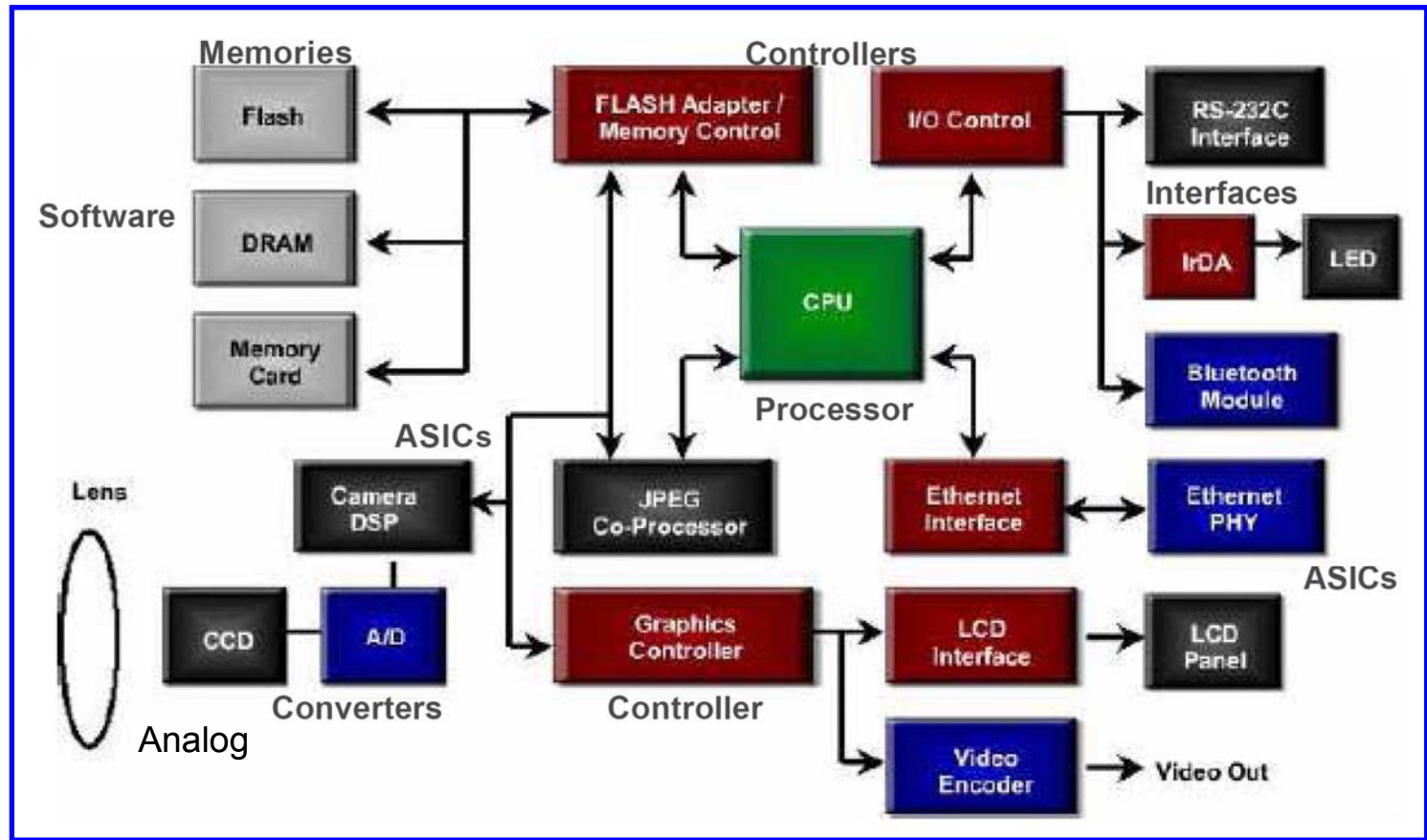
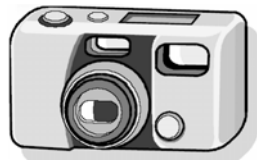
*Παρόν και μέλλον των  
υπολογιστικών συστημάτων !*

# Βασικά μέρη ενσωματωμένων συστημάτων

---

- **Ψηφιακά μέρη**: επεξεργαστές, μνήμες, ελεγκτές, δίαυλοι, κυκλώματα ειδικού σκοπού, περιφερειακά (κυκλώματα διασύνδεσης).
- Ενσωματωμένο **λογισμικό**.
- **Αναλογικά στοιχεία**: αισθητήρες, διεγέρτες.
- **Μετατροπείς**: Α/Ψ και Ψ/Α.

# Παράδειγμα: Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή



# Ενσωματωμένο λογισμικό και ψηφιακά στοιχεία

---

- **Ενσωματωμένο λογισμικό:** λογισμικό που εκτελείται στους επεξεργαστές:
  - ✓ Προγράμματα εφαρμογών.
  - ✓ Λειτουργικό σύστημα (RTOS).
  - ✓ Προγράμματα οδήγησης περιφερειακών συσκευών.
- **Ψηφιακά στοιχεία υλικού:**
  - ✓ Προγραμματιζόμενοι επεξεργαστές.
  - ✓ Εξειδικευμένα στοιχεία υλικού που υλοποιούν κρίσιμες και απαιτητικές διεργασίες που δεν προσφέρονται για υλοποίηση με λογισμικό.
  - ✓ Επαναπροσδιοριζόμενα (reconfigurable) στοιχεία υλικού (π.χ. FPGA).

# Ψηφιακά στοιχεία ενσωματωμένων συστημάτων

---

- **Στοιχεία επεξεργασίας δεδομένων:**
  - ✓ Χρησιμοποιούνται για το μετασχηματισμό των δεδομένων.
  - ✓ Υλοποιούνται με προγραμματιζόμενους επεξεργαστές και κυκλώματα ειδικού σκοπού.
- **Στοιχεία αποθήκευσης δεδομένων:**
  - ✓ Χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση των δεδομένων.
  - ✓ Υλοποιούνται με στοιχεία μνήμης.
- **Στοιχεία επικοινωνίας:**
  - ✓ Χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ των επεξεργαστών, των κυκλωμάτων ειδικού σκοπού, των μνημών και των περιφερειακών συσκευών.
  - ✓ Υλοποιούνται συνήθως με διαύλους.
- **Περιφερειακά και ελεγκτές.**



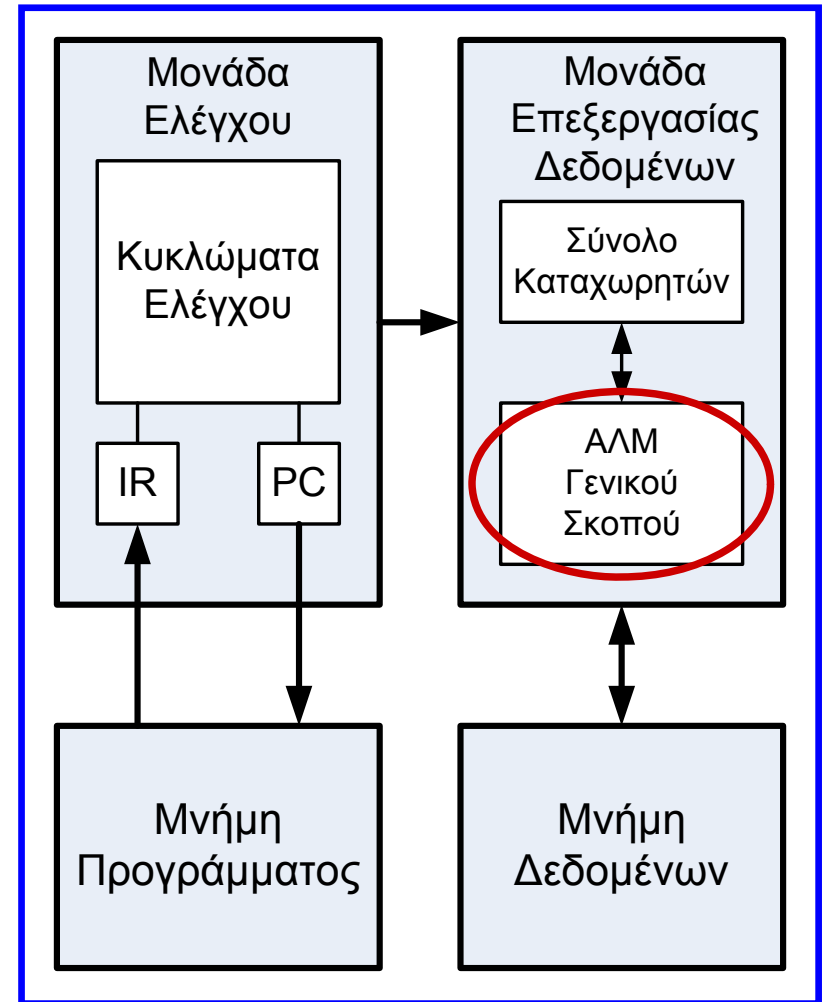
# Επεξεργαστές στα ενσωματωμένα συστήματα

---

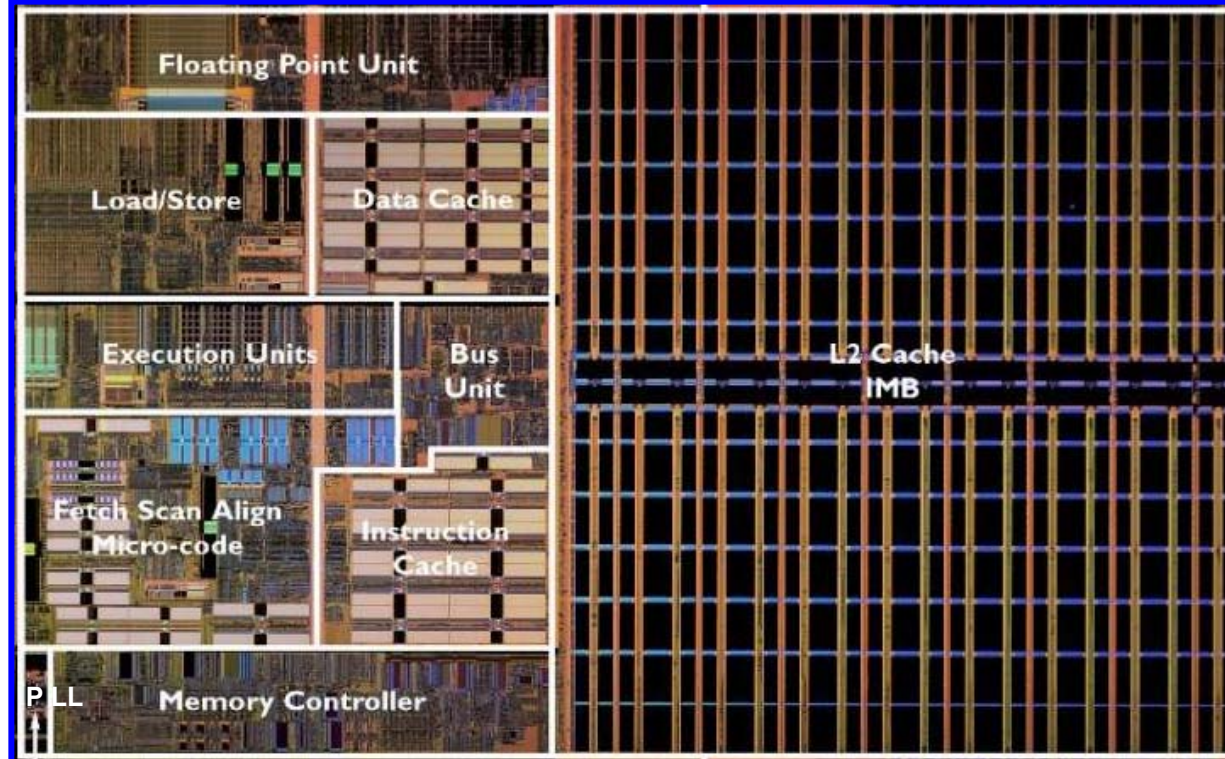
- Στα ενσωματωμένα συστήματα απαιτείται αποτελεσματικότητα όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, την απόδοση και το μέγεθος κώδικα.
- Γενικά, ο επεξεργαστής ενός ενσωματωμένου συστήματος εκτελεί ένα σύνολο αλγορίθμων και περιλαμβάνει μονάδες επεξεργασίας δεδομένων και ελέγχου.
- Είδη επεξεργαστών:
  - ✓ Επεξεργαστές γενικού σκοπού.
  - ✓ Application-specific processors (ASIPs).
  - ✓ Application-specific circuits (ASICs).

# Επεξεργαστές γενικού σκοπού

- Προγραμματιζόμενα στοιχεία υλικού που έχουν τη δυνατότητα εκτέλεσης μεγάλης κλίμακας εφαρμογών.
- Περιλαμβάνουν μνήμες προγράμματος και δεδομένων, μονάδα επεξεργασίας δεδομένων με **ΑΛΜ γενικού σκοπού**, και επαρκή αριθμό επεξεργαστών και μονάδα ελέγχου.
- Χαμηλό κόστος.
- Υψηλή ευελιξία.
- Χαμηλή απόδοση και υψηλή κατανάλωση ενέργειας.

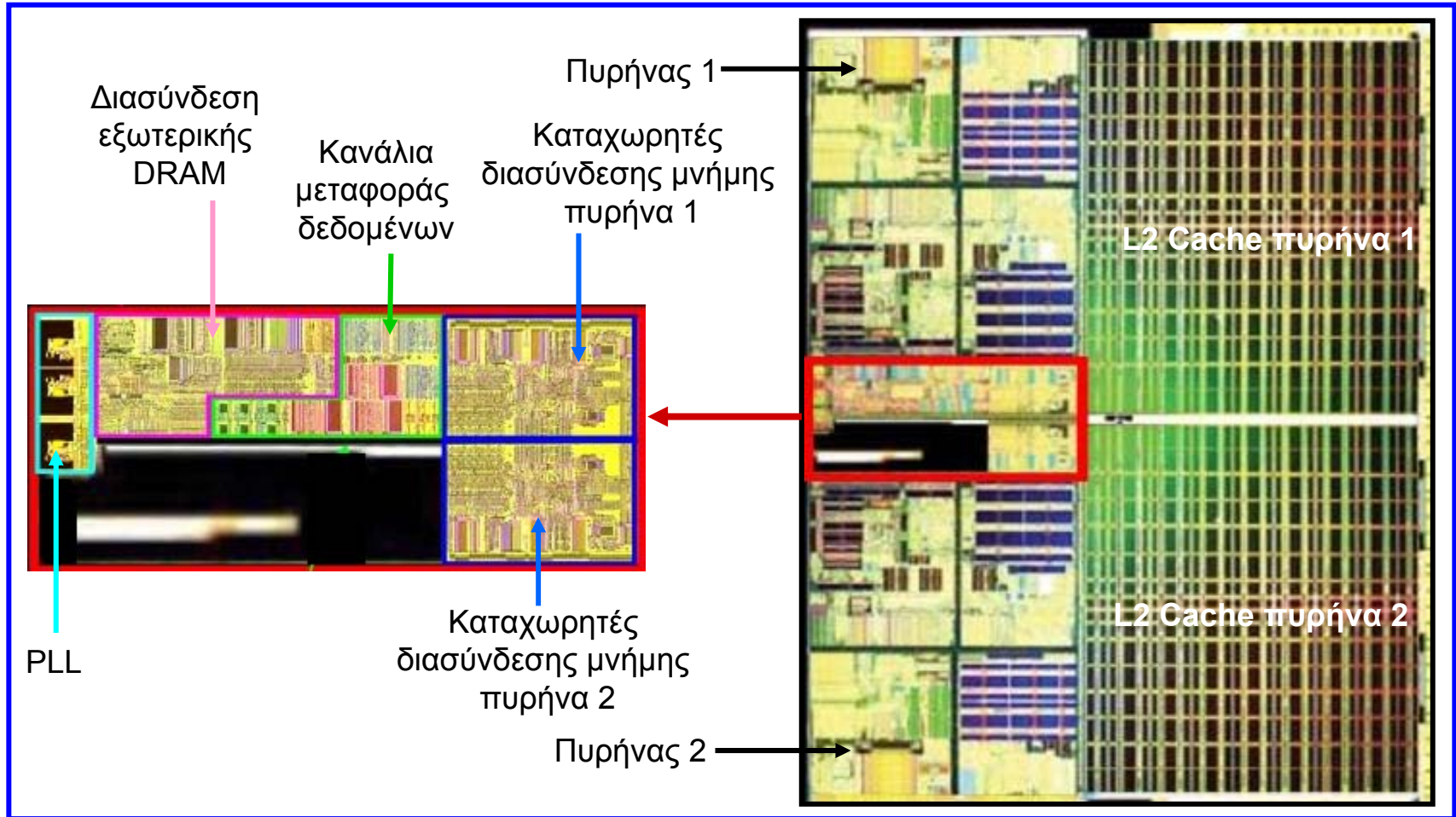


# Παράδειγμα 1ο: AMD Athlon 64



- Επεξεργαστής CISC 64-bit (τεχνολογία κατασκευής: 130 nm, επιφάνεια: 193 mm<sup>2</sup>, αριθμός τρανζίστορ: 106 εκατ.).
- Καταχωρητές: 16 64-bit και 16 128-bit.
- 64 KB κρυφή μνήμη (cache) δεδομένων και εντολών.
- 1 MB κρυφή μνήμη δευτέρου επιπέδου (L2 cache).
- Ενσωματωμένος ελεγκτή μνήμης.

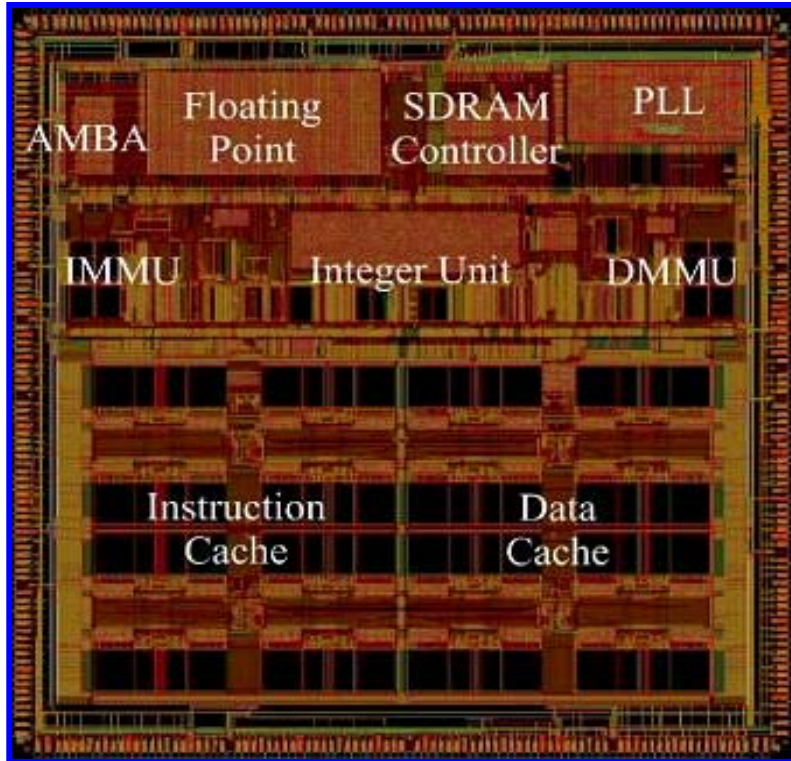
# Παράδειγμα 2ο: AMD Athlon 64 διπλού πυρήνα



- Επεξεργαστής διπλού πυρήνα (τεχνολογία κατασκευής: 90 nm, επιφάνεια: 199 mm<sup>2</sup>, αριθμός τρανζίστορ: 233 εκατ.).
- Χωριστές κρυφές μνήμες (cache) για κάθε πυρήνα, ειδικά κυκλώματα διασύνδεσης μνημών.



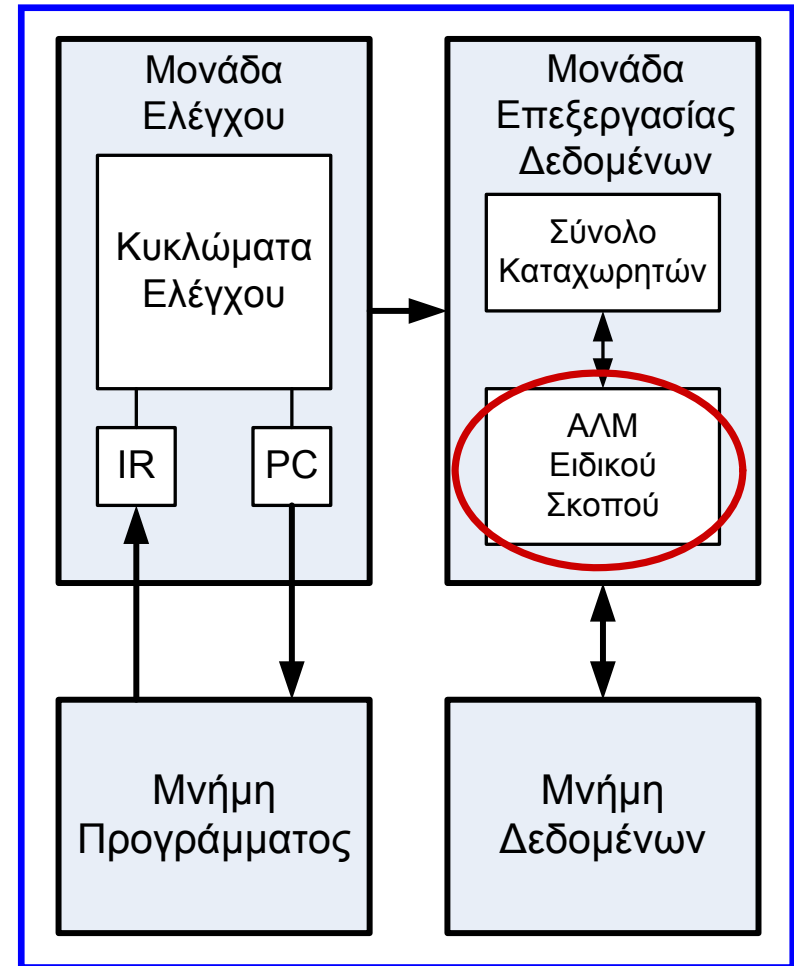
# Παράδειγμα 3ο: ARM 1020E



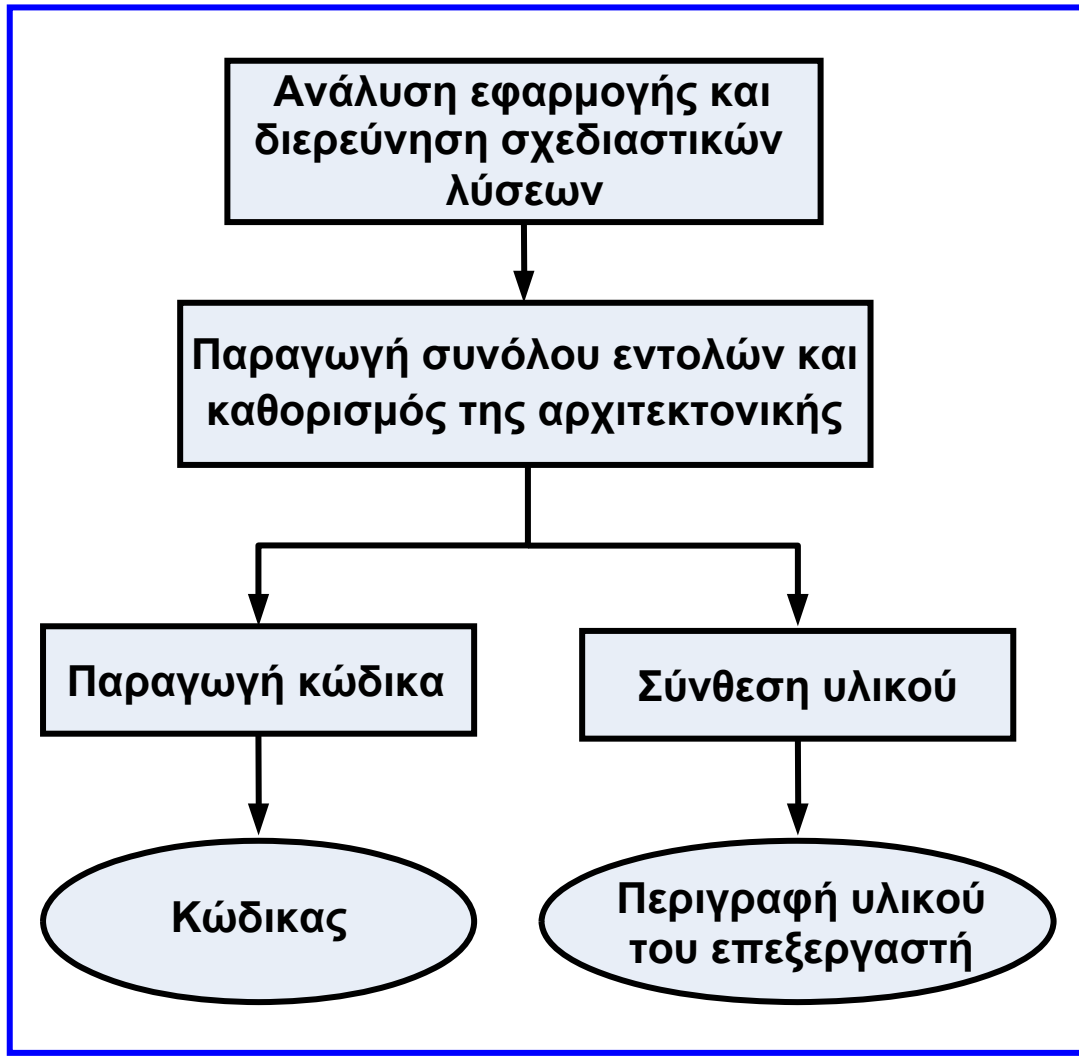
- Επεξεργαστής RISC 32-bit με αλυσίδα επεξεργασίας 6 βαθμίδων (τεχνολογία κατασκευής: 130 nm, επιφάνεια: 10.3 mm<sup>2</sup>).
- Δίαυλοι εντολών και δεδομένων 64-bit (εισαγωγή 2 εντολών ανά κύκλο ρολογιού).
- Εναλλακτικό σύνολο εντολών 16-bit για καλύτερη πυκνότητα κώδικα.
- Συνεπεξεργαστή για λειτουργίες κινητής υποδιαστολής.
- Ελεγκτή διασύνδεσης εξωτερικής μνήμης και μονάδες διαχείρισης μνήμης (MMU)
- 32 KB κρυφές μνήμες (cache) δεδομένων και εντολών.

# Επεξεργαστές ειδικού σκοπού (ASIP)

- Προγραμματιζόμενα στοιχεία για εκτέλεση συγκεκριμένης εφαρμογής ή οικογένειας εφαρμογών με κοινά χαρακτηριστικά.
- Περιλαμβάνει μνήμες προγράμματος και δεδομένων και βελτιστοποιημένη διάταξη επεξεργασίας δεδομένων με **λειτουργικές μονάδες ειδικού σκοπού**.
- Χρησιμοποιεί **εξειδικευμένο σύνολο εντολών**.
- Υψηλή απόδοση, μικρό μέγεθος, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, μικρή ευελιξία.
- DSP, προσδιοριζόμενοι (configurable), δικτυακοί (network) επεξεργαστές κλπ.

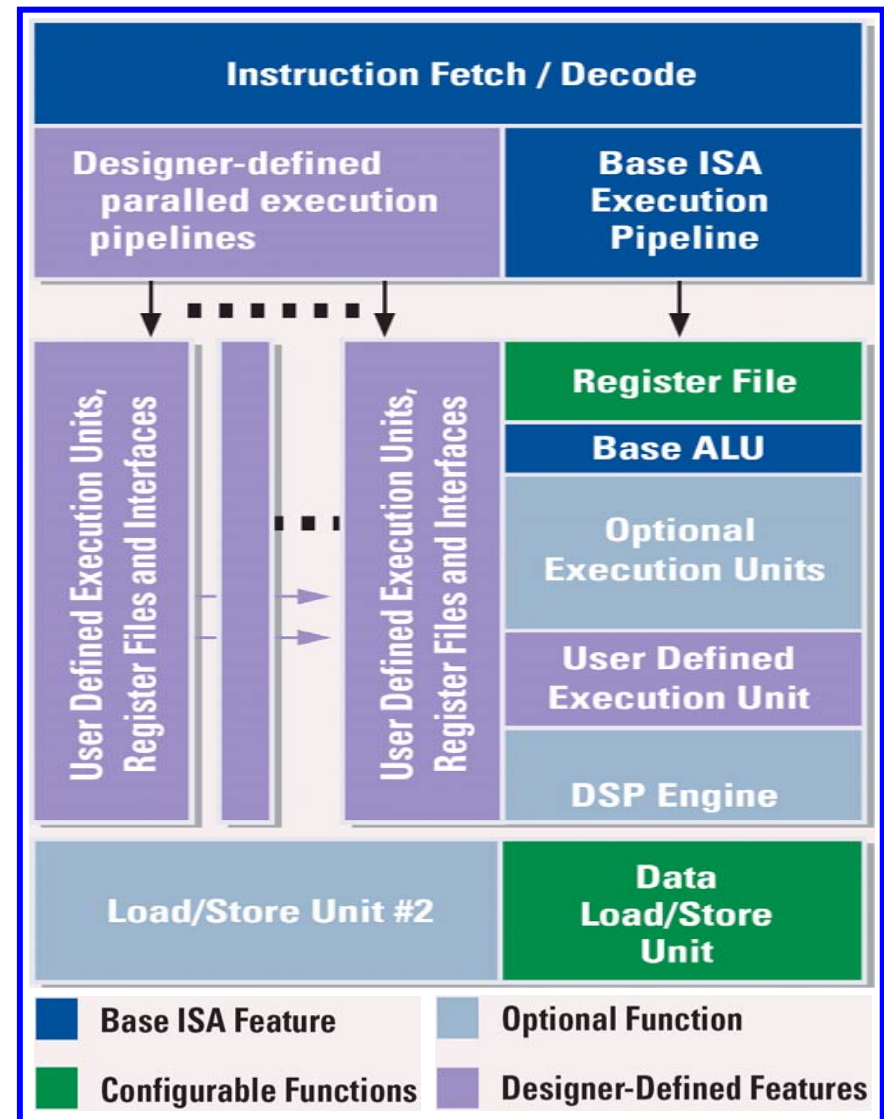


# Στάδια σχεδιασμού επεξεργαστών ειδικού σκοπού



# Παράδειγμα: Tensilica Xtensa LX2

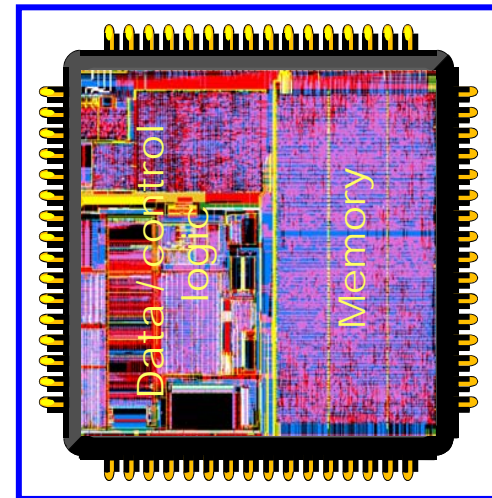
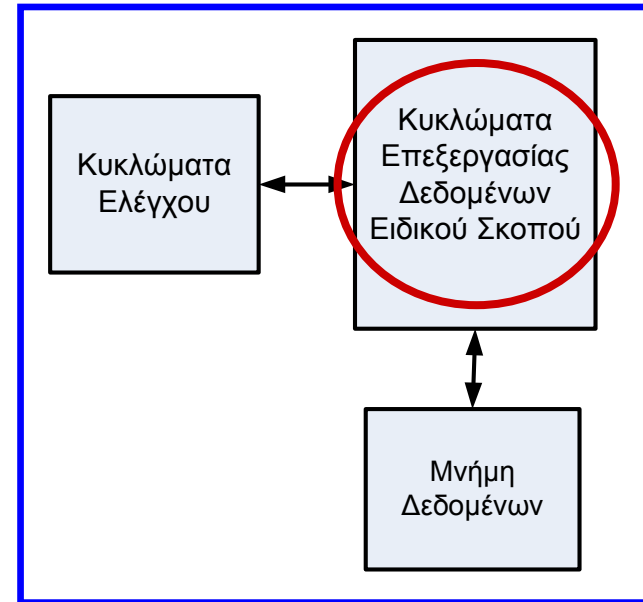
- Προσδιοριζόμενος, επεκτάσιμος και συνθέσιμος επεξεργαστής για γρήγορη υλοποίηση σύνθετων συστημάτων.
- Βασική αρχιτεκτονική: 32-bit ALM, 68 καταχωρητές, 80 εντολές, εναλλακτικό σύνολο εντολών 16 ή 24-bit.
- Δυνατότητα επιλογής και προσδιορισμού προκαθορισμένων λειτουργιών (προσδιορισιμότητα).
- Προκαθορισμένες λειτουργικές μονάδες προς επιλογή: πολλαπλασιαστής 32-bit, μονάδα MAC 16-bit, μονάδα DSP, μονάδα λειτουργιών κινητής υποδιαστολής.
- Εργαλείο ανάλυσης εφαρμογής, γλώσσα περιγραφής (Verilog-like) νέων λειτουργικών μονάδων και εργαλείο παραγωγής που τις προσαρτά στον επεξεργαστή (επεκτασιμότητα).
- Δυνατότητα επιλογής 5 ή 7 βαθμίδων αλυσίδας επεξεργασίας (προσθήκη 2 κύκλων για πρόσβαση σε αργές μνήμες).





# Κυκλώματα ειδικού σκοπού (ASIC)

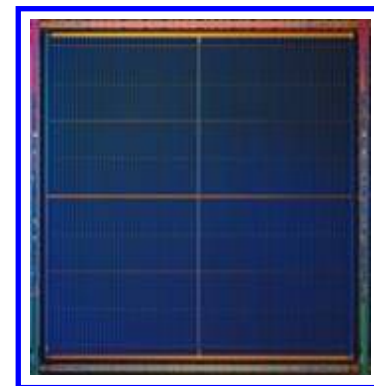
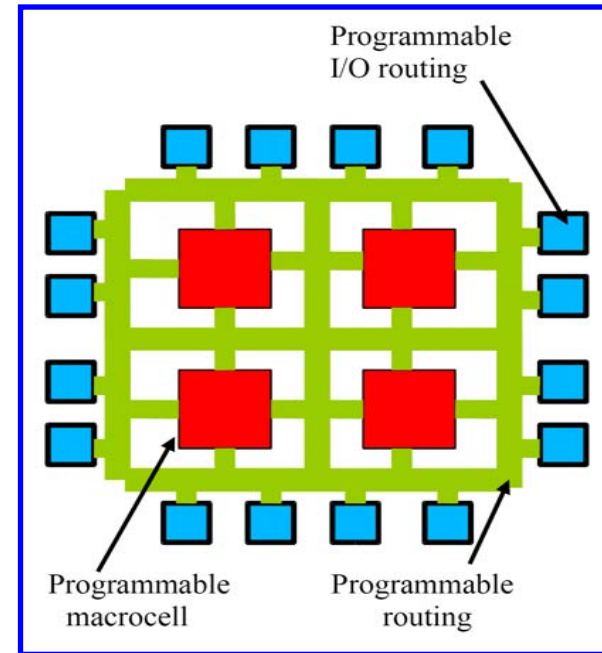
- Ψηφιακά κυκλώματα για την εκτέλεση ενός και μόνο αλγορίθμου (εφαρμογή ή μέρος εφαρμογής).
- Τα κυκλώματα αυτά (συνεπεξεργαστές ή επιταχυντές) είναι απαραίτητα στις περιπτώσεις όπου υπάρχει απόλυτος περιορισμός ταχύτητας ή κατανάλωσης ενέργειας.
- Περιλαμβάνουν μόνο τα κυκλώματα (επεξεργασίας δεδομένων και ελέγχου) που απαιτούνται για την εκτέλεση του αλγορίθμου για τον οποίο έχουν σχεδιαστεί (δεν απαιτείται μνήμη προγράμματος).
- Υψηλή απόδοση, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, μικρό μέγεθος, υψηλό κόστος (ιδιαίτερα για μικρή παραγωγή).



**ASIC**  
επεξεργασίας  
ήχου

# Προγραμματιζόμενα στοιχεία υλικού

- Προκατασκευασμένα ψηφιακά κυκλώματα που μπορούν να προγραμματιστούν από το σχεδιαστή/χρήστη.
- Διατάξεις πίνακα προγραμματιζόμενης λογικής που προγραμματίζονται από το χρήστη και όχι από τον κατασκευαστή.
- Παραδείγματα: PLD, FPGA.
- Αποτελούν εναλλακτική λύση των ASIC με μικρότερο κόστος ανάπτυξης και πιο γρήγορη διαθεσιμότητα.
- Οδηγούν σε υλοποιήσεις μεγαλύτερης επιφάνειας, χαμηλότερης απόδοσης και υψηλότερης κατανάλωσης ενέργειας.

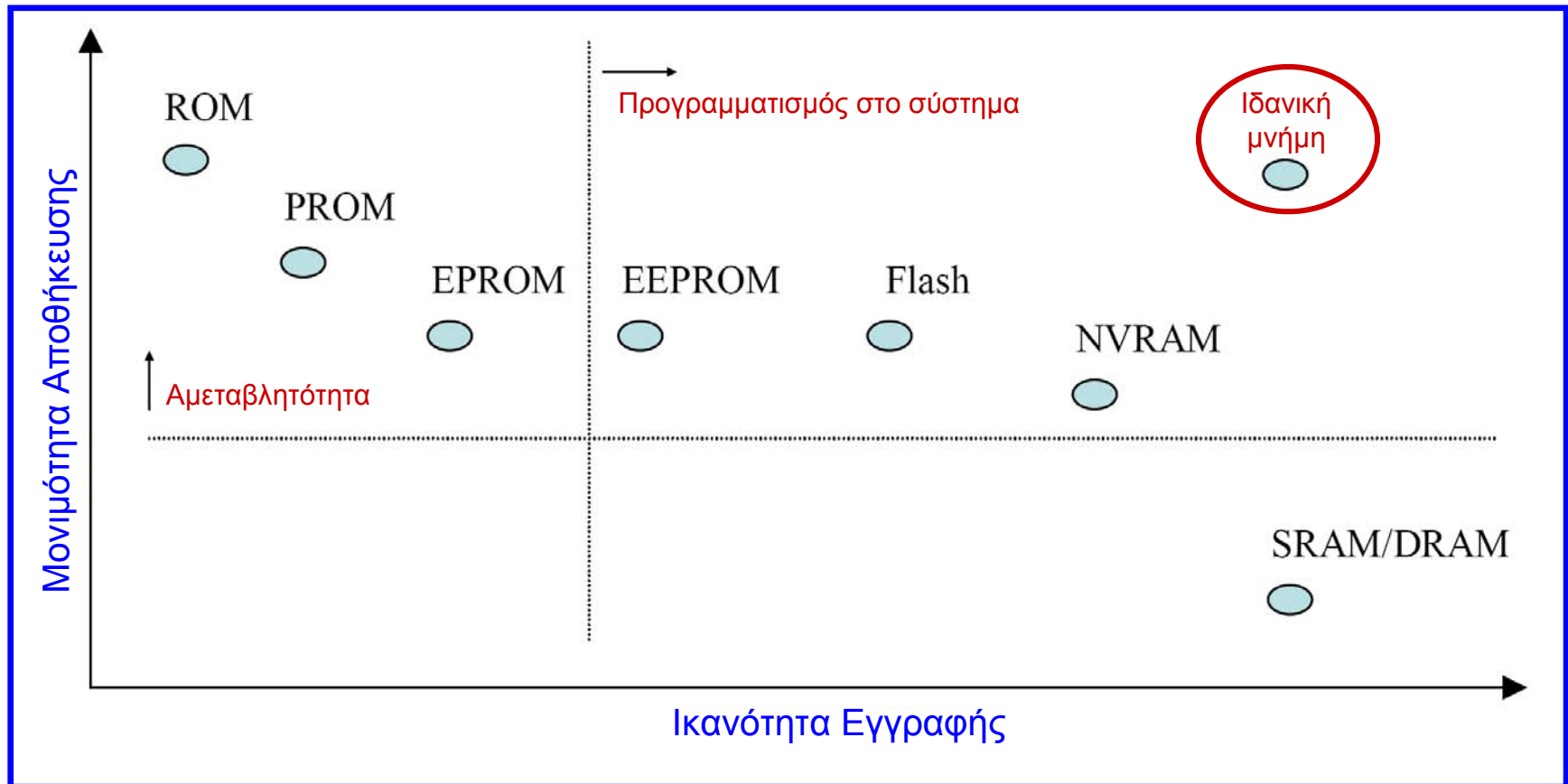


**Xilinx  
FPGA**

# Στοιχεία μνήμης στα ενσωματωμένα συστήματα

- Τα στοιχεία μνήμης χρησιμοποιούνται στα ενσωματωμένα συστήματα για να καλύψουν τις ανάγκες αποθήκευσης δεδομένων και παρέχουν δυνατότητες προσπέλασης σε αυτά (ανάγνωση και/ή εγγραφή).
- Βασικά χαρακτηριστικά στοιχείων μνήμης:
  - ✓ **Μονιμότητα αποθήκευσης:** ικανότητα του στοιχείου μνήμης να διατηρήσει τα αποθηκευμένα δεδομένα μετά την εγγραφή τους.
  - ✓ **Ικανότητα εγγραφής:** τρόπος και ταχύτητα εγγραφής σε ένα στοιχείο μνήμης.
- Τύποι στοιχείων μνήμης:
  - ✓ Τυχαίας προσπέλασης: SRAM, DRAM
  - ✓ Ανάγνωσης μόνο: ROM, PROM
  - ✓ Διαγραφόμενες-προγραμματιζόμενες: EPROM, EEPROM, Flash
  - ✓ Στοιχεία μνήμης που συνδυάζουν τις ιδιότητες SRAM και EEPROM: NVRAM

# Σύγκριση τύπων στοιχείων μνήμης



# Επικοινωνία στα ενσωματωμένα συστήματα

- Η επικοινωνία στα ενσωματωμένα συστήματα αφορά τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ των επεξεργαστών, των υποσυστημάτων ειδικού σκοπού των στοιχείων μνήμης και των περιφερειακών.
- Υλοποιείται συνήθως μέσω **διαύλων** (buses).
- Παράδειγμα: Η συνηθέστερη επικοινωνία είναι η ανάγνωση ή η εγγραφή δεδομένων που εκτελεί ένας επεξεργαστής σε μια μνήμη ή σε έναν καταχωρητή περιφερειακού.
- Διατάξεις επικοινωνίας:
  - ✓ **Σειριακή** επικοινωνία (USB, RS232 κλπ.): χρήση απλού καλωδίου, υψηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (throughput) για σχετικά μεγάλες αποστάσεις, χαμηλό κόστος.
  - ✓ **Παράλληλη** επικοινωνία (PCI, AMBA κλπ.): χρήση πολλαπλών καλωδίων, υψηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για μικρές αποστάσεις, υψηλό κόστος.
  - ✓ **Ασύρματη** επικοινωνία (Infrared, RF).
- Κάθε διάταξη ακολουθεί ένα **πρωτόκολλο επικοινωνίας** που καθορίζει τους κανόνες που διέπουν την μεταφορά δεδομένων.

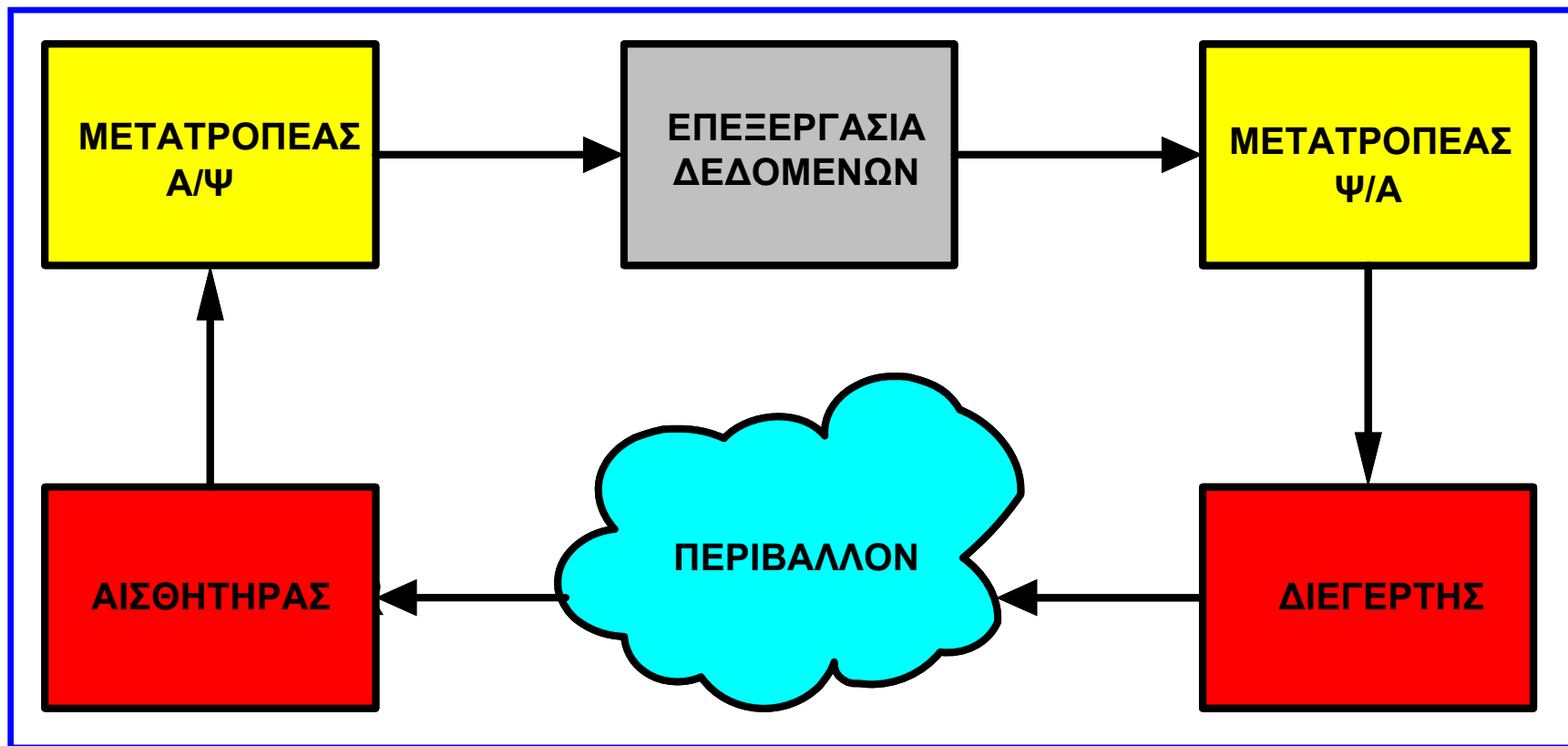
# Βασικά θέματα επικοινωνίας ενσωματωμένων συστημάτων

- Τα βασικά ζητήματα που αφορούν την επικοινωνία στα ενσωματωμένα συστήματα είναι:
  - ✓ Διαδικασία **διευθυνσιοδότησης** (addressing): αφορά το τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται ο χάρτης διευθύνσεων (address map) έτσι ώστε ο επεξεργαστής του συστήματος να επικοινωνεί με τη μνήμη και τα περιφερειακά.
  - ✓ Επικοινωνία οδηγούμενη από **σήματα διακοπής** (interrupt-driven): ο επεξεργαστής λαμβάνει σήματα διακοπής έτσι ώστε να δεχτεί προς επεξεργασία δεδομένα από τα περιφερειακά.
  - ✓ Απευθείας πρόσβαση στη μνήμη (**DMA**): αφορά τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ των περιφερειακών και της μνήμης χωρίς την παρέμβαση του επεξεργαστή.
  - ✓ **Διαιτησία** (arbitration): αφορά την αντιμετώπιση ταυτόχρονης ζήτησης για εξυπηρέτηση από τον επεξεργαστή περισσότερων του ενός περιφερειακών.

# Περιφερειακά & ελεγκτές στα ενσωματωμένα συστήματα

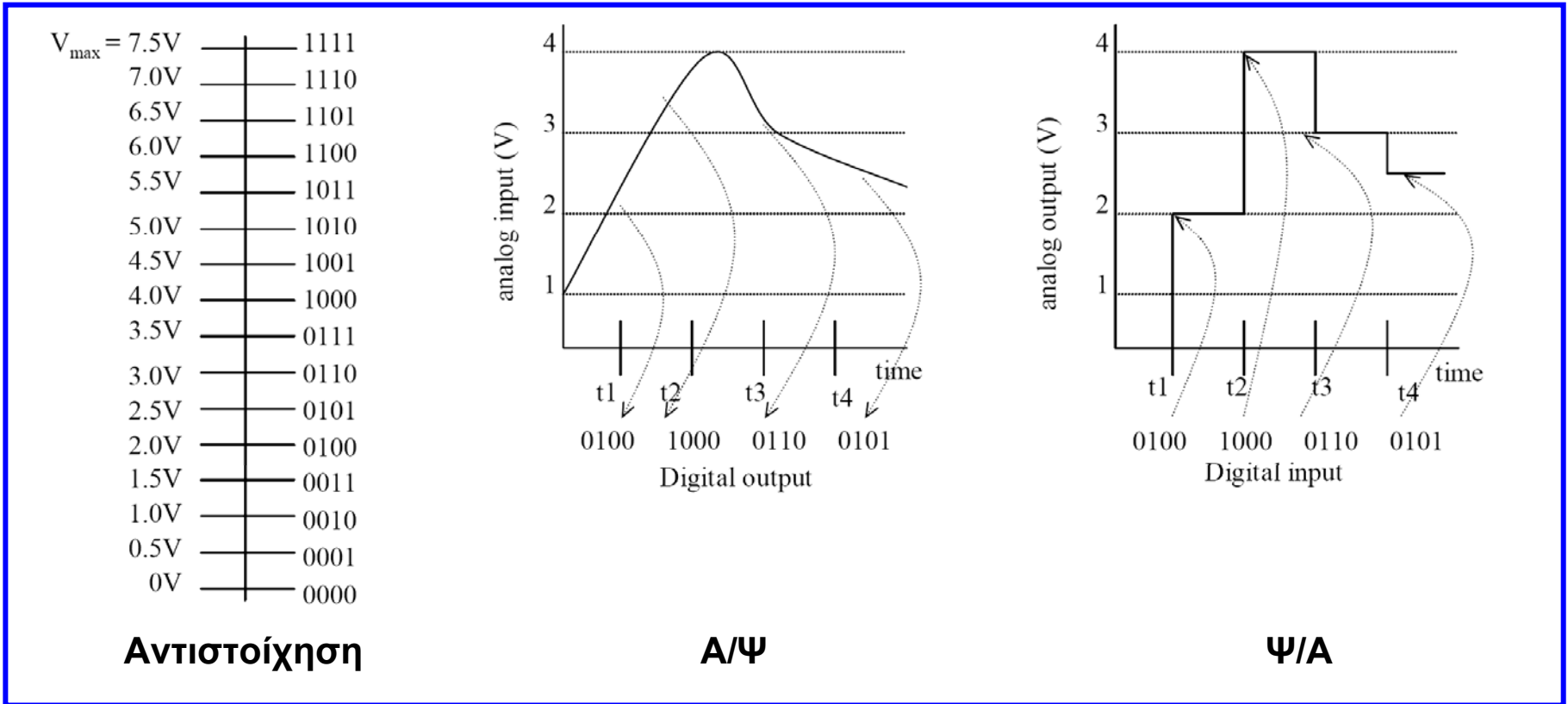
- Τα περιφερειακά και οι ελεγκτές εκτελούν ειδικές λειτουργίες που απαιτούνται στα ενσωματωμένα συστήματα κυρίως για τη διασύνδεσή τους με εξωτερικές συσκευές.
- Είναι ειδικά κυκλώματα που σχεδιάζονται για την εκτέλεση κάποιας ειδικής λειτουργίας του συστήματος ή κυκλώματα που έχουν σχεδιαστεί από τρίτους για την εκτέλεση μιας κοινής λειτουργίας που απαιτείται όμως από το σύστημα.
- Παραδείγματα:
  - ✓ Κυκλώματα χρονισμού και απαριθμητές (timers, counters).
  - ✓ UART (universal asynchronous receiver transmitter): λαμβάνει παράλληλα δεδομένα τα οποία μεταδίδει σειριακά και αντιστρόφως.
  - ✓ Διασύνδεση LCD: εξασφαλίζει την επικοινωνία του συστήματος με οθόνη υγρών κρυστάλλων.
  - ✓ Ελεγκτής εξωτερικής μνήμης, ελεγκτής PCI, διασύνδεση USB, διασύνδεση Ethernet, διασυνδέσεις με δίκτυα διαφόρων τύπων.

# Μετατροπείς στα ενσωματωμένα συστήματα (1)





# Μετατροπείς στα ενσωματωμένα συστήματα (2)



Βασικά θέματα:

- **Δειγματοληψία** (sampling): πόσο συχνά μετατρέπεται το σήμα.
- **Κβαντισμός** (quantization): πόσα ψηφία (bits) χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση του σήματος.

# Αναλογικά στοιχεία στα ενσωματωμένα συστήματα

- **Αισθητήρες:**

- ✓ Λαμβάνουν φυσικές διεγέρσεις (θερμότητα, φως, ήχος, πίεση, μαγνητισμός, μηχανική κίνηση).

- ✓ Παράγουν ανάλογο ηλεκτρικό ρεύμα.

- **Διεγέρτες:**

- ✓ Μετατρέπουν τις «ηλεκτρικές» εντολές που λαμβάνουν σε φυσικές διεγέρσεις (θερμότητα, φως, ήχος, πίεση, μαγνητισμός, μηχανική κίνηση).



Μικρόφωνο



Μεγάφωνο



Δίοδος και  
τρανζίστορ  
laser



Κεραία



Κινητήρας DC



Επιταχυνσιό-  
μετρο

# Αισθητήρες και διεγέρτες στα ενσωματωμένα συστήματα

- **Αισθητήρες** μπορούν να σχεδιαστούν σχεδόν για κάθε φυσική διέγερση. Αρχικά λαμβάνουν τη φυσική διέγερση και στη συνέχεια την επεξεργάζονται.
- Πολλά φυσικά φαινόμενα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αισθητήρων: νόμος επαγωγής, φωτοηλεκτρικό φαινόμενο κλπ.
- Παραδείγματα: αισθητήρες ελέγχου θερμότητας περιβάλλοντος, διάφοροι αισθητήρες οχημάτων (βροχής, προσέγγισης γειτονικού οχήματος κλπ.), αισθητήρες πίεσης (οθόνες αφής), αισθητήρες ήχου, κίνησης, θερμότητας σώματος (ανίχνευση ιού SARS) κλπ.
- Οι **διεγέρτες** παράγουν φυσικές διεγέρσεις για χρήση σε διάφορα περιβάλλοντα: διεγέρτες ελέγχου μηχανών για βιομηχανικές εφαρμογές, οπτικοί διεγέρτες (IR), θερμικοί διεγέρτες, στοιχεία MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) κλπ.
- Η τεχνολογία **MEMS** αφορά την ολοκλήρωση μηχανολογικών και ηλεκτρονικών στοιχείων σε κοινό υπόστρωμα πυριτίου και εφαρμόζεται σήμερα στη βιοτεχνολογία (ανίχνευση DNA), στις τηλεπικοινωνίες (RF-MEMS), και στα επιταχυνσιόμετρα (αερόσακοι αυτοκινήτων).

# Εφαρμογές ενσωματωμένων συστημάτων

- **Ηλεκτρονικά αυτοκινήτων** (έλεγχος αερόσακων, πληροφορίες κονσόλας, ABS, έλεγχος κατανάλωσης κλπ.).
- **Ηλεκτρονικά αεροσκαφών** (αυτόματη πλοήγηση, έλεγχος πτήσης, έλεγχος ποιότητας αέρα, έλεγχος πίεσης κλπ.).
- **Τηλεπικοινωνιακά συστήματα** (κινητά τηλέφωνα, κάρτες δικτύου, σταθμοί βάσης κινητής τηλεφωνίας ή ασύρματης επικοινωνίας κλπ.).
- **Ιατρικά συστήματα** (διαγνωστικά συστήματα και συστήματα παρακολούθησης, συστήματα ακτινοβολίας).
- **Αμυντικά συστήματα** (ραντάρ και ασφαλή τηλεπικοινωνιακά συστήματα, συστήματα πλοήγησης GPS κλπ.).
- **Καταναλωτικά συστήματα πολυμέσων** (ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, παιχνιδομηχανές κλπ.).
- **Συστήματα ελέγχου βιομηχανικών διεργασιών.**
- **Ρομποτική** (ηλεκτρομηχανικά συστήματα).



# Εφαρμογές στην καθημερινή ζωή...

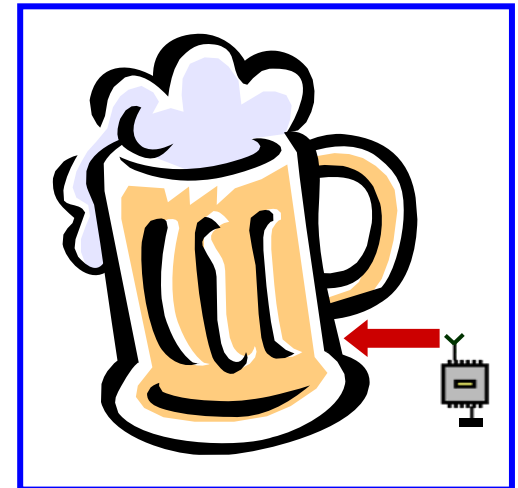
- **Κινητό τηλέφωνο:**

- ✓ Πολυεπεξεργαστικό σύστημα (8 επεξεργαστές των 32 bit για την εξυπηρέτηση της διασύνδεσης του χρήστη, επεξεργαστής DSP, επεξεργαστής 32 bit για εξυπηρέτηση των διασυνδέσεων IR και Bluetooth).
- ✓ Μνήμη 8-100 MB, κυκλώματα ειδικού σκοπού, ενσωματωμένη φωτογραφική μηχανή, μεγάφωνο, μικρόφωνο κλπ.



- **Έξυπνο ποτήρι μπύρας:**

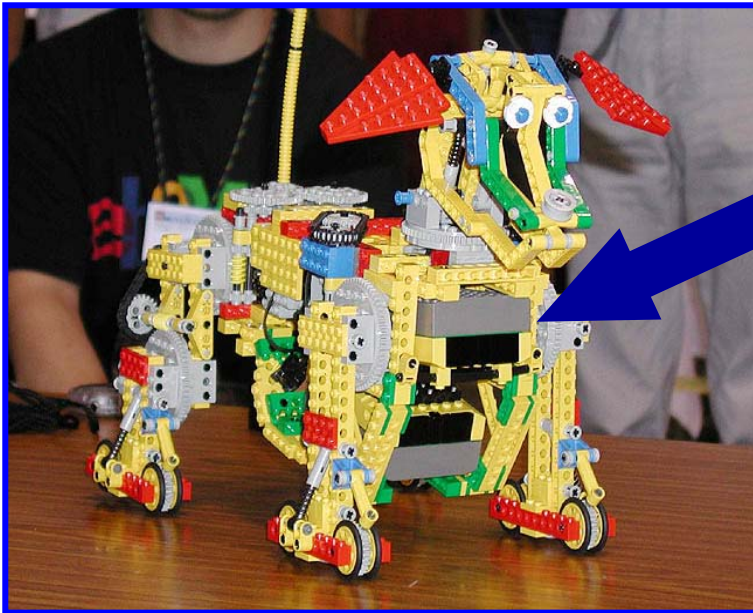
- ✓ Συνδυάζει έναν αισθητήρα ανίχνευσης στάθμης υγρού με έναν απλό επεξεργαστή 8-bit και ένα σύστημα RF με εσωτερική κεραία και ελέγχει τη στάθμη της μπύρας ειδοποιώντας ασύρματα το σερβιτόρο όταν η μπύρα τείνει να τελειώσει.
- ✓ Ενσωματώνει αρκετές τεχνολογίες όπως: ραδιομετάδοση, αισθητήρες, παρακολούθηση μέσω υπολογιστή κλπ.



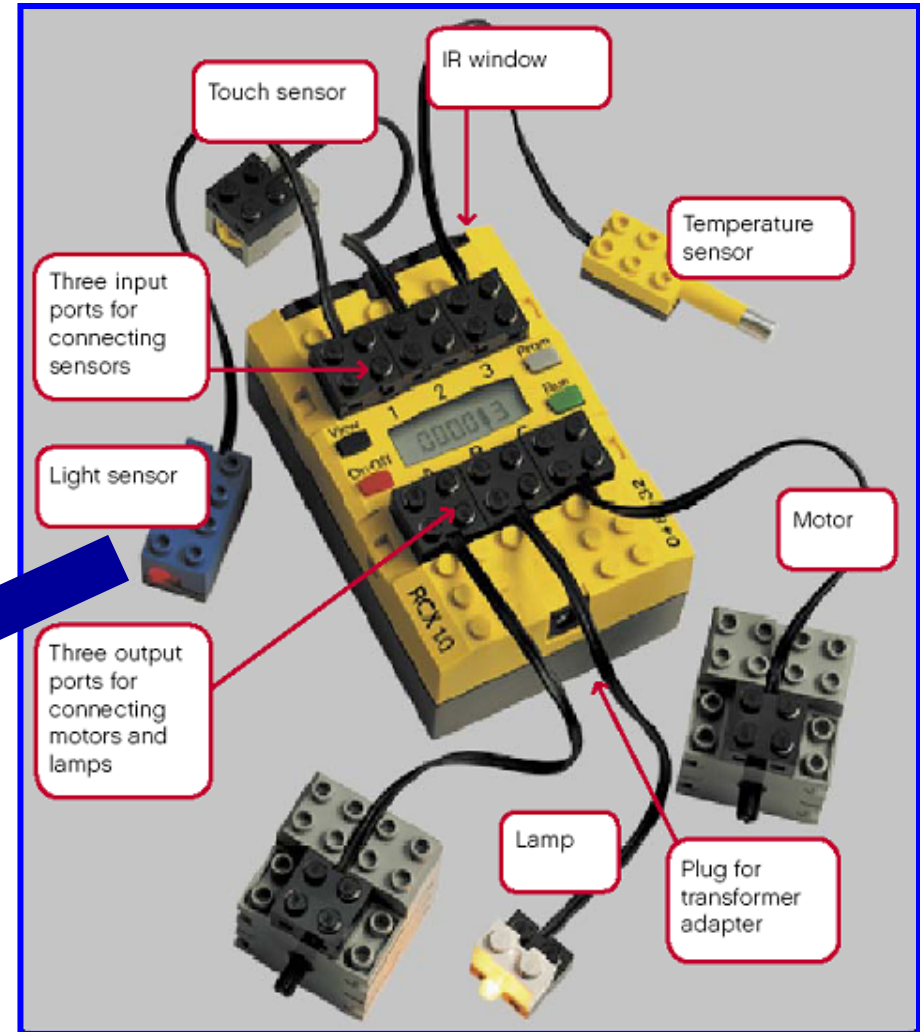


# Εφαρμογές για παιδιά...

- **Lego mindstorms robotics kit:** βασίζεται σε επεξεργαστή 8 bit με μνήμη 64 KB.
- Περιλαμβάνει ηλεκτρονικά κυκλώματα για τη διασύνδεση του επεξεργαστή με αισθητήρες και κινητήρες.
- Ο καλύτερος τρόπος να αρχίσει κανείς....

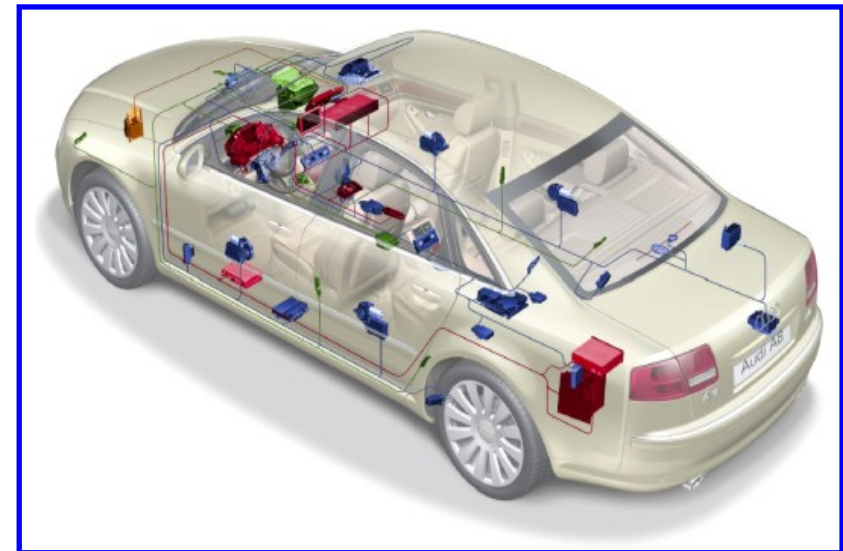
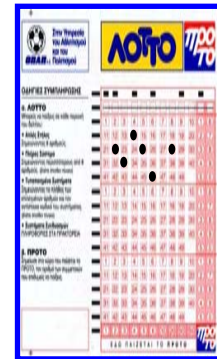


## Μονάδα ελέγχου



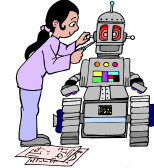
# Εφαρμογές για τυχερούς...

- 53 επεξεργαστές των 8 bit, 11 των 32 bit και 7 των 16 bit (**71 επεξεργαστές!**).
- Πολλαπλά δίκτυα.
- Διάσπαρτοι αισθητήρες και διεγέρτες σε όλο το όχημα.
- Λειτουργικό σύστημα: Windows CE.
- Διαχείριση λειτουργίας μηχανής: έλεγχος κατανάλωσης, ανάφλεξης, εκπομπών κλπ.
- Ενημέρωση οδηγού: Συλλογή, επεξεργασία και επίδειξη διάφορων δεδομένων.
- Ασφάλεια και ευστάθεια: αερόσακοι, ABS, ESP (electronic stability control), αποδοτικό και αυτόματο κιβώτιο ταχυτήτων κλπ.
- Διασκέδαση και άνεση: ηχοσύστημα, κλιματισμός, τηλεόραση, GPS κλπ.



# Περιορισμοί στις εφαρμογές ενσωματωμένων συστημάτων

- Απαίτηση για συνεχή αλληλεπίδραση με το περιβάλλον τους (reactivity requirement).



- Χρονικοί περιορισμοί.



- Περιορισμοί κατανάλωσης ενέργειας.



- Περιορισμοί μεγέθους και βάρους.



- Περιορισμοί κόστους.



- Περιορισμοί ασφάλειας (safety, security).



- Περιορισμοί αξιοπιστίας.



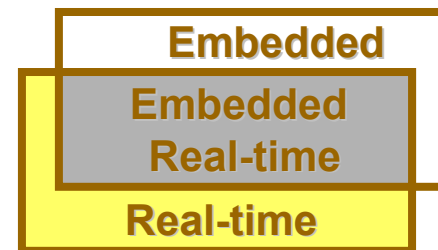
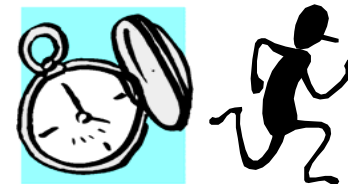
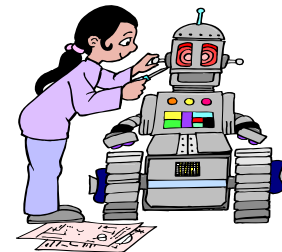
- Περιορισμοί που αφορούν το χρόνο διάθεσης στην αγορά (time-to-market).





# Αλληλεπίδραση με το περιβάλλον και χρονικοί περιορισμοί

- Τα ενσωματωμένα συστήματα βρίσκονται σε συνεχή **αλληλεπίδραση με το περιβάλλον** τους μέσω αισθητήρων και διεγερτών και θα πρέπει να λειτουργούν σε ρυθμό που στην ουσία καθορίζεται από αυτό.
- **Χρονικοί περιορισμοί:**
  - ✓ Τα περισσότερα ενσωματωμένα συστήματα λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο που σημαίνει ότι εάν τα δεδομένα δεν έχουν παραχθεί σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (deadline), δηλ. εάν το σύστημα δεν αποκριθεί σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που συνήθως καθορίζεται από το περιβάλλον του, τότε οδηγούμαστε σε εσφαλμένη λειτουργία.
  - ✓ Οι χρονικοί περιορισμοί διακρίνονται σε αυστηρούς και χαλαρούς (hard, soft deadlines).
  - ✓ Τα περισσότερα ενσωματωμένα συστήματα λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο και τα περισσότερα συστήματα πραγματικού χρόνου είναι ενσωματωμένα.
  - ✓ Τα ενσωματωμένα συστήματα πραγματικού χρόνου είναι συνήθως σύγχρονα συστήματα.



# Περιορισμοί ενέργειας, μεγέθους και βάρους

- Περιορισμοί κατανάλωσης ενέργειας:

- ✓ Συστήματα με υψηλή κατανάλωση ενέργειας απαιτούν συστήματα τροφοδοσίας και ψύξης με μεγάλο κόστος.
- ✓ Συστήματα με υψηλή κατανάλωση ενέργειας οδηγούν σε μικρότερο χρόνο ζωής της μπαταρίας που τα τροφοδοτεί (πολύ κρίσιμο ζήτημα σε κινητές, φορητές συσκευές).



- Περιορισμοί μεγέθους και βάρους:

- ✓ Σημαντικοί περιορισμοί για κινητές, φορητές συσκευές (π.χ. PDA, κινητά τηλέφωνα, φωτογραφικές μηχανές).
- ✓ Πολύ κρίσιμοι σε ειδικές ιατρικές εφαρμογές (π.χ. κάψουλες με ενσωματωμένη κάμερα και σύστημα συλλογής δεδομένων).



11 x 26 mm

# Περιορισμοί κόστους

- Τα ενσωματωμένα συστήματα απευθύνονται συνήθως σε ανταγωνιστικές αγορές μεγάλου εύρους, οπότε θα πρέπει το κόστος τους να είναι μικρό ώστε να μπορούν να προσφερθούν σε χαμηλή τιμή (π.χ. κινητά τηλέφωνα).
- Το κύριο κόστος αφορά το **σχεδιασμό** και την **κατασκευή** των συστημάτων.
- Βασικοί **παράγοντες κόστους**: χρόνος και ανθρώπινη προσπάθεια για το σχεδιασμό, είδος και ποσότητα των στοιχείων του συστήματος (επεξεργαστές, μνήμες, I/O), τεχνολογία (board, system-on-chip), χρόνος ελέγχου λειτουργίας, κατανάλωση ενέργειας.
- Το **μη επαναλαμβανόμενο κόστος ανάπτυξης** (non-recurring engineering – NRE) περιλαμβάνει το κόστος σχεδιασμού και το κόστος ανάπτυξης πρωτοτύπων και γίνεται συνεχώς υψηλότερο λόγω της πολυπλοκότητας των σημερινών συστημάτων. Γι' αυτό:
  - ✓ Είναι συχνά ασύμφορη η ανάπτυξη συστημάτων σε μικρές ποσότητες.
  - ✓ Αναπτύσσονται πλατφόρμες υλοποίησης (implementation platforms) ώστε να χρησιμοποιηθούν για παρόμοια προϊόντα.



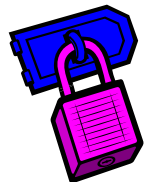
# Περιορισμοί αξιοπιστίας και ασφάλειας

- **Περιορισμοί αξιοπιστίας:**

- ✓ Αξιοπιστία είναι η πιθανότητα ενός ενσωματωμένου συστήματος να λειτουργεί σωστά, δεδομένου ότι λειτουργούσε σωστά κατά την έναρξη λειτουργίας του.
- ✓ Ακόμη και τα άριστα σχεδιασμένα συστήματα μπορεί να παρουσιάσουν εσφαλμένη λειτουργία εάν οι λειτουργικές προδιαγραφές (υποθέσεις) του είναι εσφαλμένες. Οπότε, θα πρέπει ο σχεδιαστής να είναι πολύ προσεκτικός κατά τον καθορισμό αυτών για συγκεκριμένη εφαρμογή σε δεδομένο περιβάλλον λειτουργίας.



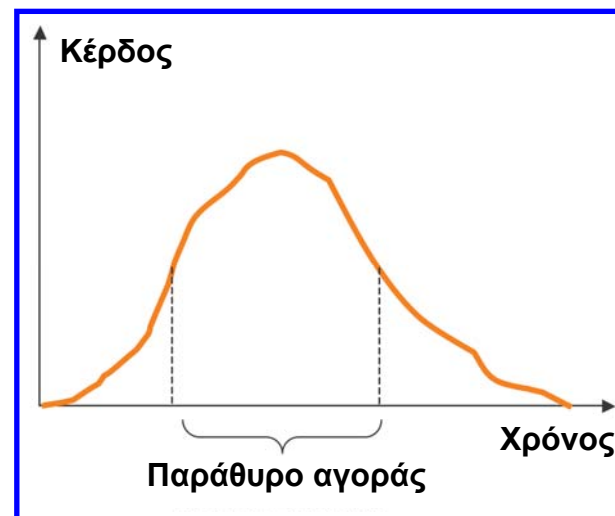
- Η **ασφάλεια** στα ενσωματωμένα συστήματα αφορά την **προστασία** των σχετιζομένων με το σύστημα σε εφαρμογές κρίσιμες για την ανθρώπινη ζωή (ηλεκτρονικά αυτοκινήτων, πυρηνικές εγκαταστάσεις, ιατρικές εφαρμογές, αμυντικά συστήματα κλπ.), καθώς και ζητήματα **εμπιστευτικότητας** και **αυθεντικότητας** που πρέπει να υποστηρίζονται σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές.



- Για να εξασφαλιστούν οι παραπάνω περιορισμοί θα πρέπει κατά το σχεδιασμό να γίνεται διεξοδική επαλήθευση των σχετικών ιδιοτήτων των συστημάτων, η οποία όπως και τα υπόλοιπα στάδια του σχεδιασμού να βασίζεται σε **αποδοτικά αυτοματοποιημένα εργαλεία**.

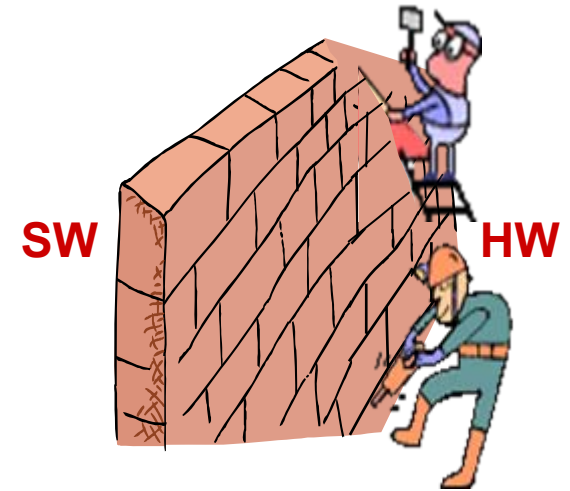
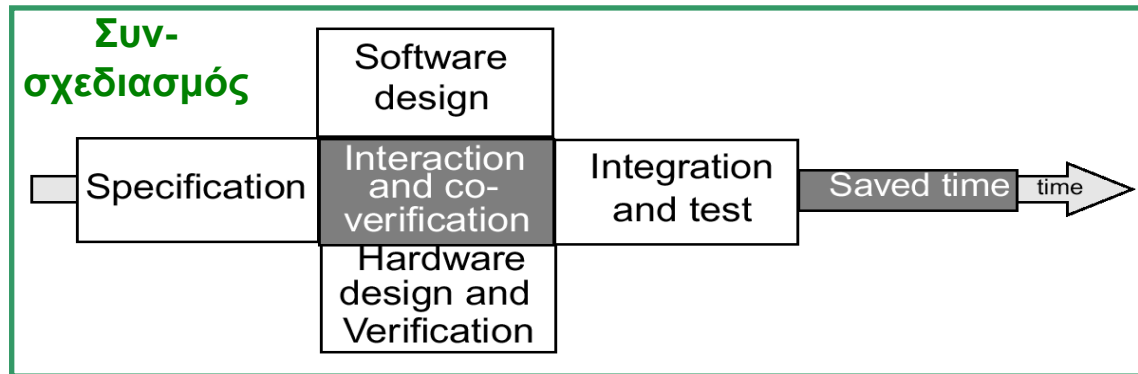
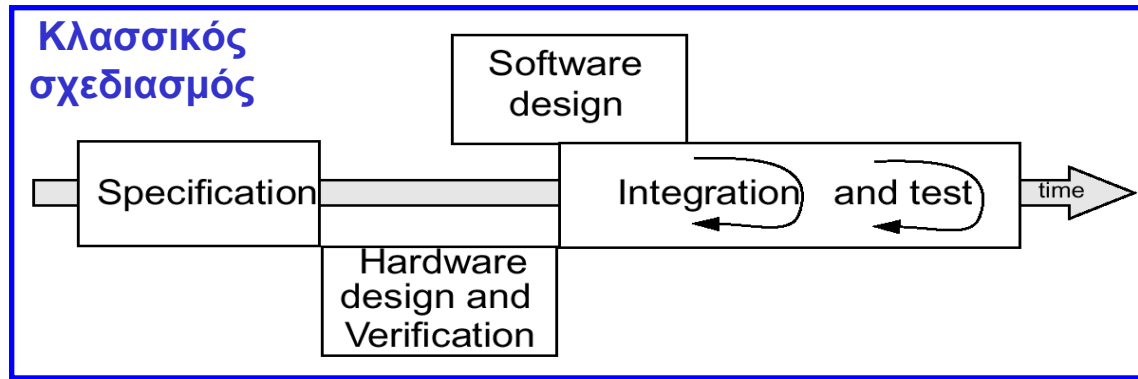
# Χρόνος διάθεσης του συστήματος στην αγορά

- Σε ανταγωνιστικές αγορές είναι πολύ κρίσιμο να είναι διαθέσιμο το προϊόν (ενσωματωμένο σύστημα) με την έναρξη του «**παράθυρου αγοράς**». Ακόμη και μια μικρή καθυστέρηση μπορεί να έχει καταστροφικές οικονομικές συνέπειες, έστω κι αν η ποιότητα του προϊόντος είναι άριστη.
- Ο **χρόνος ανάπτυξης** του συστήματος θα πρέπει να μειωθεί και μερικοί τρόποι για να επιτευχθεί αυτό είναι:
  - ✓ Αποδοτικές **μεθοδολογίες** σχεδιασμού.
  - ✓ Αποδοτικά **εργαλεία** σχεδιασμού.
  - ✓ **Επιαναχρησιμοποίηση (reuse) υποσυστημάτων** που έχουν προηγουμένως σχεδιαστεί και έχει επαληθευθεί η λειτουργία τους.
  - ✓ Χρησιμοποίηση διαθέσιμων **πλατφόρμων πρωτοτυποποίησης**.
  - ✓ **Κατανόηση** από την ομάδα σχεδιασμού ζητημάτων που σχετίζονται με **υλικό** και **λογισμικό**.



# Τι είναι ο συν-σχεδιασμός υλικού-λογισμικού;

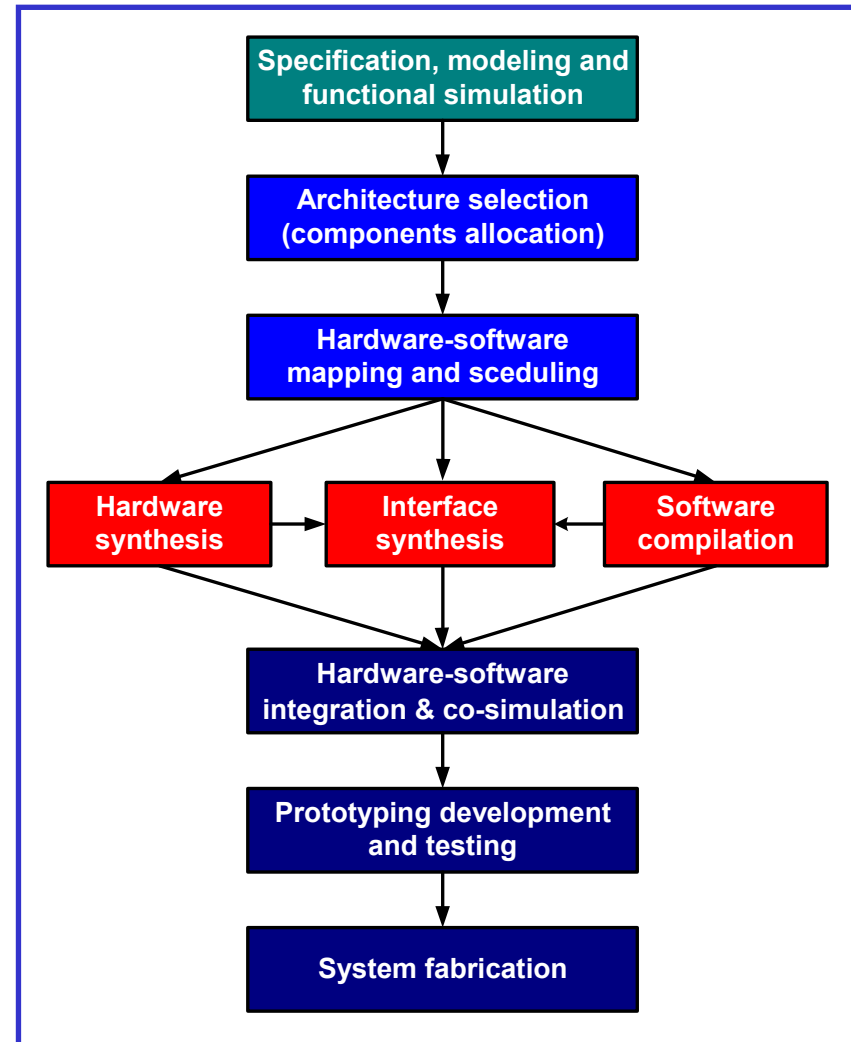
Συν-σχεδιασμός είναι ο **ταυτόχρονος σχεδιασμός** των μερών λογισμικού και υλικού ενός ψηφιακού συστήματος.



Ο τοίχος μεταξύ του υλικού και του λογισμικού πρέπει να γκρεμιστεί !

# Διάγραμμα ροής συν-σχεδιασμού υλικού-λογισμικού

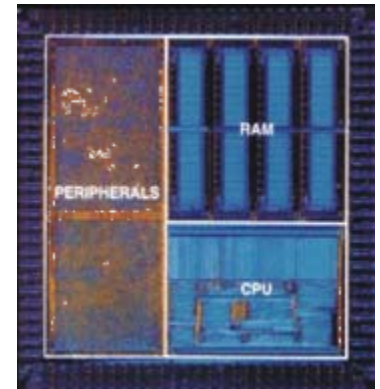
- Καθορισμός προδιαγραφών και μοντελοποίηση.
- Σύνθεση σε επίπεδο συστήματος (high-level co-synthesis):
  - ✓ Επιλογή αρχιτεκτονικής.
  - ✓ Διάθεση των κατάλληλων στοιχείων (επεξεργαστές, ειδικά κυκλώματα, στοιχεία μνημών και επικοινωνίας).
  - ✓ Ανάθεση λειτουργιών σε υλικό και λογισμικό.
  - ✓ Χρονοδρομολόγηση λειτουργιών.
- Σύνθεση (low-level co-synthesis):
  - ✓ Σύνθεση υλικού.
  - ✓ Μεταγλώττιση λογισμικού και παραγωγή κώδικα.
  - ✓ Σύνθεση διασυνδέσεων.
- Ενοποίηση, προσομοίωση, πρωτοτυποποίηση, κατασκευή.
- Όλα τα στάδια υποστηρίζονται από εργαλεία CAD.





# Δυσκολίες στο συν-σχεδιασμό υλικού-λογισμικού

- Οι δυσκολίες στο σχεδιασμό ενσωματωμένων συστημάτων οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν **υψηλή πολυπλοκότητα**, είναι **εξειδικευμένα** για συγκεκριμένη εφαρμογή και πρέπει να είναι **αποδοτικά** όσον αφορά:
  - ✓ το **χρόνο εκτέλεσης** της εφαρμογής
  - ✓ την **κατανάλωση ενέργειας**
  - ✓ το **μέγεθος του κώδικα** (μειωμένες απαιτήσεις μνήμης)
  - ✓ το **κόστος** (ελαχιστοποίηση των στοιχείων υλικού)
  - ✓ το **χρόνο ανάπτυξης** (γρήγορη διάθεση στην αγορά)
  - ✓ το **μέγεθος** και το **βάρος** τους.
- Βασικές ενέργειες για να επιτευχθούν τα παραπάνω είναι:
  - ✓ η διερεύνηση πολλών **εναλλακτικών λύσεων σχεδιασμού**
  - ✓ η επίτευξη βέλτιστης **εξισορρόπησης** στη χρήση ειδικών στοιχείων **υλικού** και του κατάλληλου **λογισμικού**, ώστε να προκύπτει βέλτιστη υλοποίηση κρίσιμων λειτουργιών, αλλά και να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ευελιξία.
  - ✓ η υλοποίηση του τελικού συστήματος σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (**system-on-chip**).



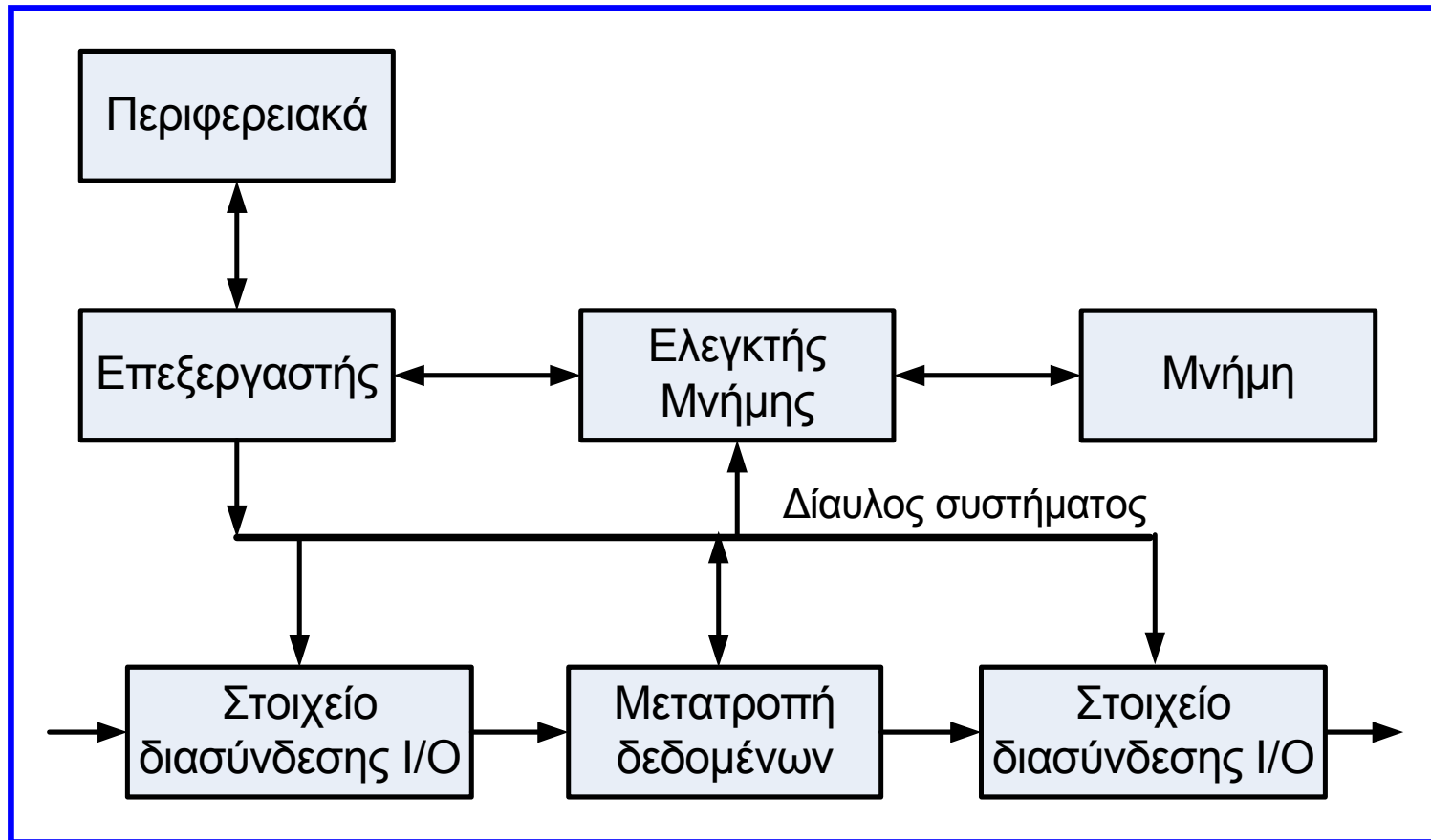


# Τι είναι «σύστημα σε ολοκληρωμένο κύκλωμα»;

---

- Σύστημα σε ολοκληρωμένο κύκλωμα (**system-on-chip**) είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα που υλοποιεί τις περισσότερες ή όλες τις λειτουργίες ενός πλήρους ηλεκτρονικού συστήματος το οποίο εξειδικεύεται σε μια συγκεκριμένη ενσωματωμένη εφαρμογή.
- Είναι ένα **ετερογενές σύστημα** δηλ. μπορεί να περιλαμβάνει μέρη υλικού και λογισμικού, ψηφιακά, αναλογικά και άλλων τύπων στοιχεία τα οποία στο σύνολό τους υλοποιούν λειτουργίες ελέγχου και επεξεργασίας δεδομένων.
- Εκτός από έναν ή περισσότερους επεξεργαστές μπορεί να περιλαμβάνει: στοιχεία μνήμης, κυκλώματα ειδικού σκοπού, περιφερειακά, μετατροπείς Α/Ψ και Ψ/Α κλπ.

# Τυπικό «σύστημα σε ολοκληρωμένο κύκλωμα» (SoC)



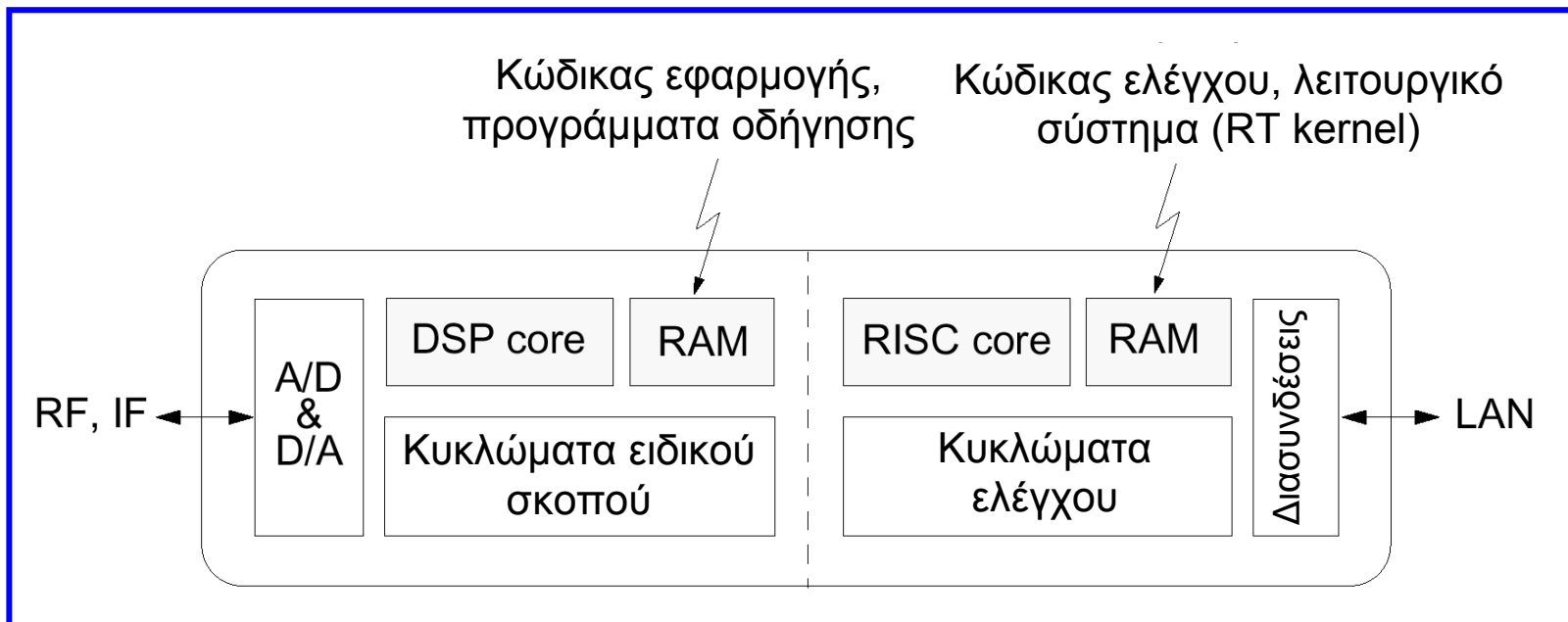
# Συστατικά ενός SoC

---

- Πυρήνες επεξεργαστών (processor cores):
  - ✓ Η **πολυπλοκότητα** αλγορίθμων και πρωτοκόλλων αυξάνεται συνεχώς, καθιστώντας την **υλοποίησή τους σε υλικό αρκετά δύσκολη**.
  - ✓ Οι σύγχρονοι **επεξεργαστές είναι γρήγοροι** σαν αποτέλεσμα του αποδοτικού σχεδιασμού τους.
  - ✓ Η βελτίωση (upgrade) των υλοποιήσεων σε λογισμικό είναι σχετικά εύκολη (**ευελιξία**).
- Τα **στοιχεία υλικού ειδικού σκοπού** παραμένουν πολύ χρήσιμα:
  - ✓ **Υψηλές επιδόσεις** για χρονικά κρίσιμες διεργασίες.
  - ✓ **Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας**.

# Τυπικό παράδειγμα SoC

Παράδειγμα: Δομή «συστήματος σε ολοκληρωμένο κύκλωμα» για την υλοποίηση μιας τυπικής **εφαρμογής ασύρματης επικοινωνίας**.



# Γιατί χρειαζόμαστε τα SoC;



- Η ολοκλήρωση ενός συστήματος σε ολοκληρωμένο σύστημα είναι πλέον **τεχνολογικά εφικτή**, αφού τα σημερινά ολοκληρωμένα κυκλώματα περιλαμβάνουν ακόμη και 100 εκατ. τρανζίστορ (ακόμη και ο νόμος του Moores που αναφέρει διπλασιασμό του αριθμού των τρανζίστορ σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα κάθε 18 μήνες, τείνει να καταρριφθεί).
- **Υψηλότερες επιδόσεις**: γρηγορότερη μεταφορά δεδομένων σε σχέση με εκείνη που προσφέρουν οι συνδέσεις των κλασικών καρτών.
- **Χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας**: τα συστήματα διακριτών στοιχείων απαιτούν πρόσθετα προγράμματα οδήγησης και διασυνδέσεις.
- **Μικρότερο μέγεθος**: τα διακριτά στοιχεία των κλασικών καρτών μπορούν πλέον να ολοκληρωθούν σε ένα και μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα.
- **Χαμηλότερο κόστος** και αυξημένη **αξιοπιστία** και **ασφάλεια σχεδιασμού**.

# Προβλήματα στο σχεδιασμό των SoC

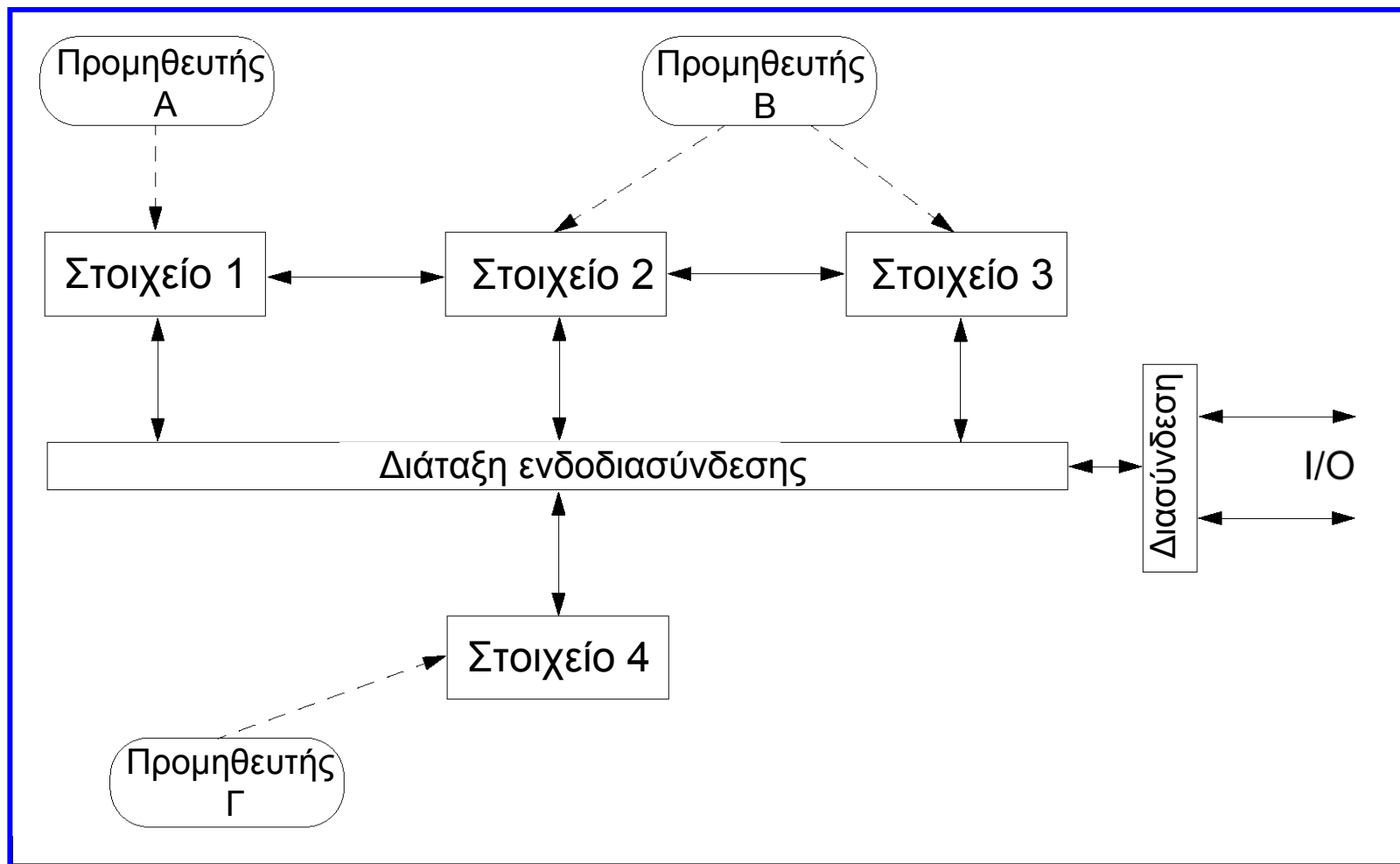
---

- Αυξημένη πολυπλοκότητα κυρίως λόγω της **ετερογένειας** (συνυπάρχουν αναλογικά και ψηφιακά στοιχεία, επεξεργαστές και στοιχεία ειδικού σκοπού, διαφορετικοί τύποι μνημών κλπ.) και λόγω της **ανάγκης ολοκλήρωσης** πολλαπλών στοιχείων.
- Η αυξημένη πολυπλοκότητα δημιουργεί προβλήματα στη **φάση σχεδιασμού** (αφού απαιτείται εμπειρία σε διαφορετικά αντικείμενα σχεδιασμού και η ολοκλήρωση είναι αρκετά απαιτητική διαδικασία), αλλά και στον τομέα της **τεχνολογίας κατασκευής** (αφού θα πρέπει να ενσωματωθούν διαφορετικές διεργασίες σε μία και μόνο ψηφίδα).
- Οι παραδοσιακές **μεθοδολογίες σχεδιασμού δεν επαρκούν**.
- Έχουν αυξηθεί οι απαιτήσεις **επαλήθευσης**.
- Δημιουργείται ανταγωνισμός μεταξύ της παραγωγικότητας σχεδιασμού και της πίεσης για άμεση πρόσβαση του συστήματος στην αγορά (**design productivity vs. time-to-market pressure**).
- **Λύσεις:** χρήση **αποδοτικών μεθοδολογιών και εργαλείων σχεδιασμού** που είναι εξειδικευμένες για SoC και κυρίως η **επαναχρησιμοποίηση στοιχείων** (υποσυστημάτων υλικού ή λογισμικού) που έχουν προηγουμένως σχεδιαστεί και έχει επαληθευθεί η λειτουργία τους (**intellectual Property -IP- blocks reuse**).

# Σχεδιασμός SoC με επαναχρησιμοποίηση στοιχείων (1)

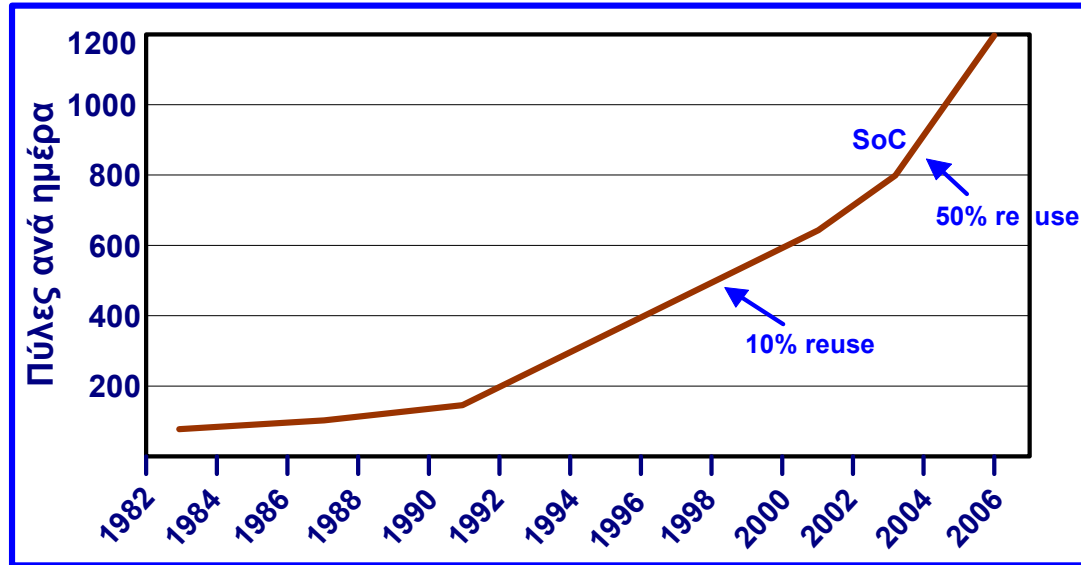
- Σχεδιασμός βασισμένος σε στοιχεία IP είναι στην ουσία η δημιουργία ενός συστήματος μέσω της επαναχρησιμοποίησης ήδη υπαρχόντων στοιχείων.
- Τα στοιχεία IP ενδέχεται να είναι:
  - ✓ Μικροεπεξεργαστές (ARM, MIPS, PowerPC κλπ.)
  - ✓ Στοιχεία διασύνδεσης (USB, PCI, UART κλπ.)
  - ✓ Κωδικοποιητές και αποκωδικοποιητές (JPEG, MPEG, Viterbi κλπ.)
  - ✓ Μνήμες (SRAM, Flash κλπ.)
  - ✓ Μικροελεγκτές (HC11)
  - ✓ Επεξεργαστές DSP (TI, Oak κλπ.)
  - ✓ Στοιχεία μετασχηματισμού δεδομένων (FFT, IFFT κλπ.)
  - ✓ Στοιχεία δικτύωσης (Ethernet, ATM κλπ.)
  - ✓ Στοιχεία κρυπτογραφίας δεδομένων (DES, AES κλπ.).
- Η αυξημένη ανάγκη για νέα SoC ωθεί σήμερα εταιρίες σχεδιασμού στην ανάπτυξη στοιχείων IP υψηλής ποιότητας με αποτέλεσμα τη γέννηση μια «**νέας βιομηχανίας**».

# Σχεδιασμός SoC με επαναχρησιμοποίηση στοιχείων (2)





# Παραγωγικότητα και κόστος σχεδιασμού SoC



## Κόστος ανάπτυξης SoC με 50 εκατ. τρανζίστορ

Πύλες	12.5 εκατ.
Παραγωγικότητα (πύλες / ημέρα)	1200
Σύνολο ανθρωπομηνών	~ 520
Κόστος ανθρωπομήνα	~ 8.5 Κ€
Συνολικό κόστος ανθρώπινου δυναμικού	~ 4.5 Μ€
Πρόσθετο κόστος NRE (προετοιμασία κατασκευής, εργαλεία CAD)	~ 4 Μ€
Συνολικό κόστος	~ 8.5 Μ€

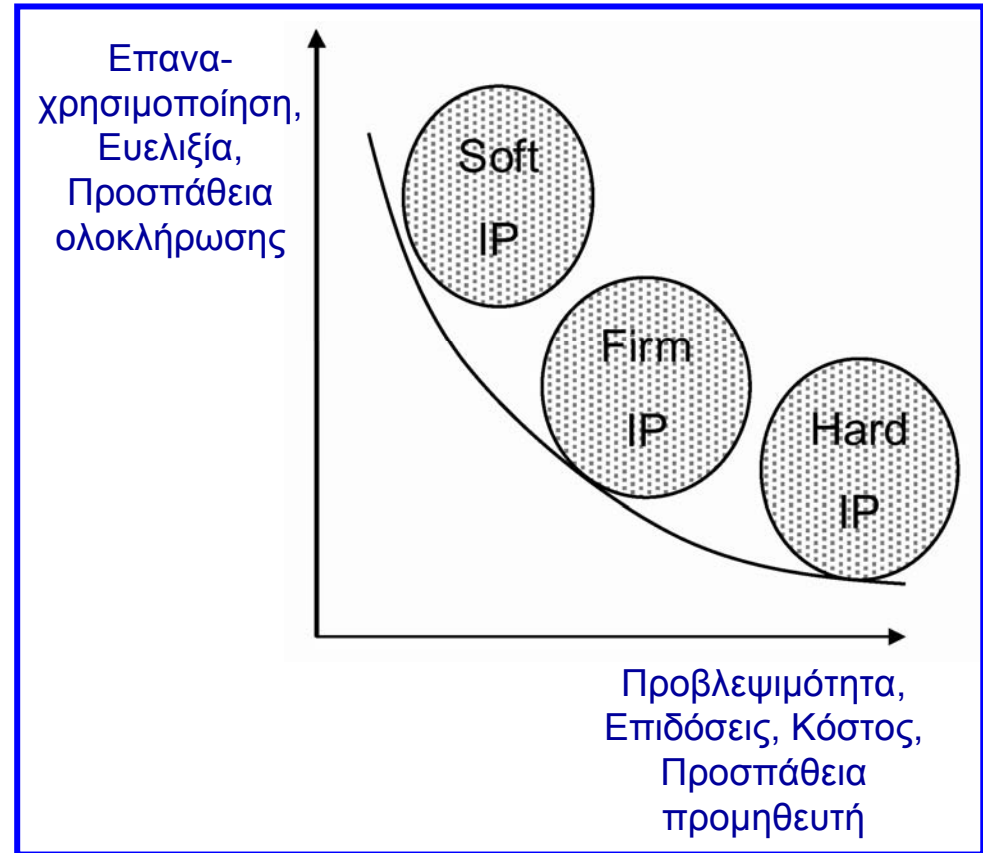
# Βασικά θέματα στο σχεδιασμό στοιχείων IP

---

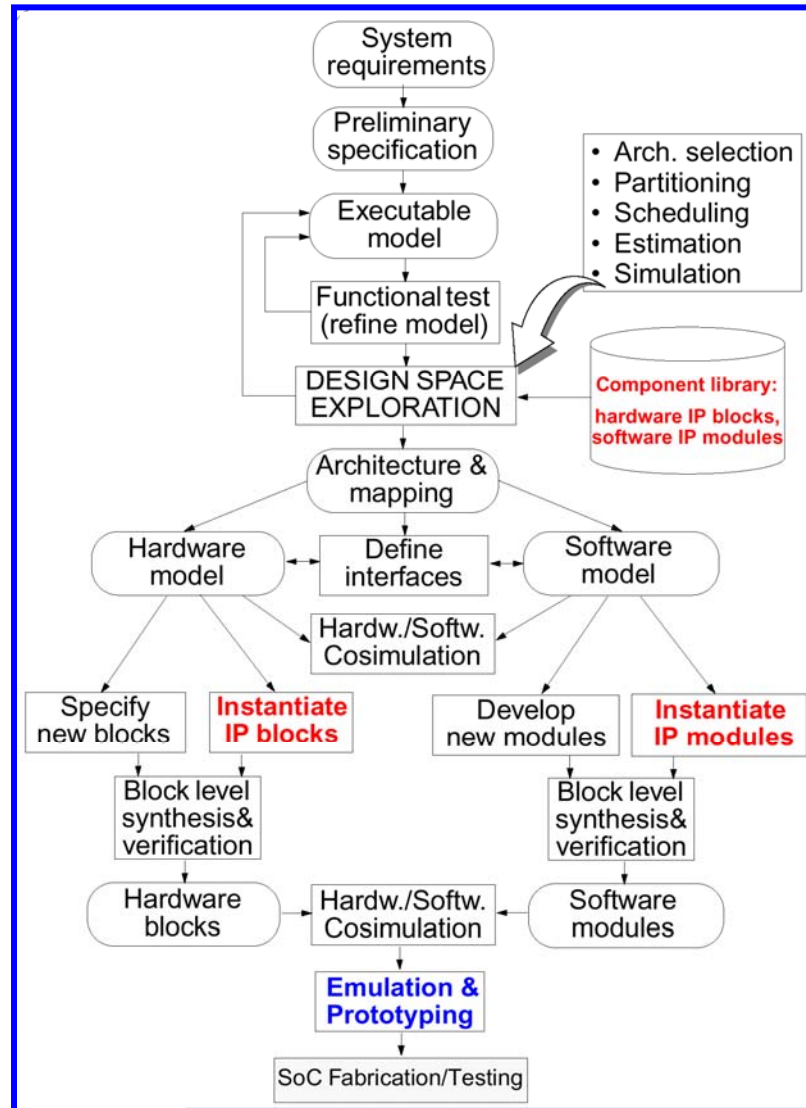
- Απαιτούμενες προδιαγραφές στοιχείων IP: λειτουργία-ες που εκτελούνται, χρονισμοί, διασυνδέσεις, επίδοση που επιτυγχάνεται, κατανάλωση ενέργειας κλπ.
- Ο πλήρης σχεδιασμός ενός στοιχείου IP περιλαμβάνει:
  - ✓ Καθορισμό προδιαγραφών, προσομοίωση, εκτίμηση βασικών παραμέτρων και διερεύνηση εναλλακτικών σχεδιαστικών επιλογών.
  - ✓ Ολοκλήρωση (καθορισμός διασυνδέσεων και υλοποίηση).
  - ✓ Επαλήθευση και δοκιμές για επαρκές σύνολο συνθηκών λειτουργίας και εισόδων.

# Κατηγορίες στοιχείων IP

- **HARD**: Πλήρως σχεδιασμένα στοιχεία, χωροθετημένα και διασυνδεδεμένα. Προσφέρεται τελικό φυσικό σχέδιο με καθορισμένα χρονικά χαρακτηριστικά, εξασφαλίζοντας γρήγορη ολοκλήρωση με χαμηλή όμως ευελιξία.
- **FIRM**: Προσφέρεται κώδικας (netlist) σε επίπεδο πύλης για συγκεκριμένη τεχνολογία και παρέχεται ευελιξία όσον αφορά τη χωροθέτηση και τη διασύνδεση των υποσυστημάτων, αλλά με χαμηλότερη προβλεψιμότητα των χαρακτηριστικών του στοιχείου.
- **SOFT**: Προσφέρεται κώδικας σε γλώσσα περιγραφής υλικού επιπέδου καταχωρητή (RTL) ή συμπεριφοράς. Απαιτείται περισσότερη προσπάθεια για ολοκλήρωση και επαλήθευση, αλλά παρέχεται μεγαλύτερη ευελιξία.



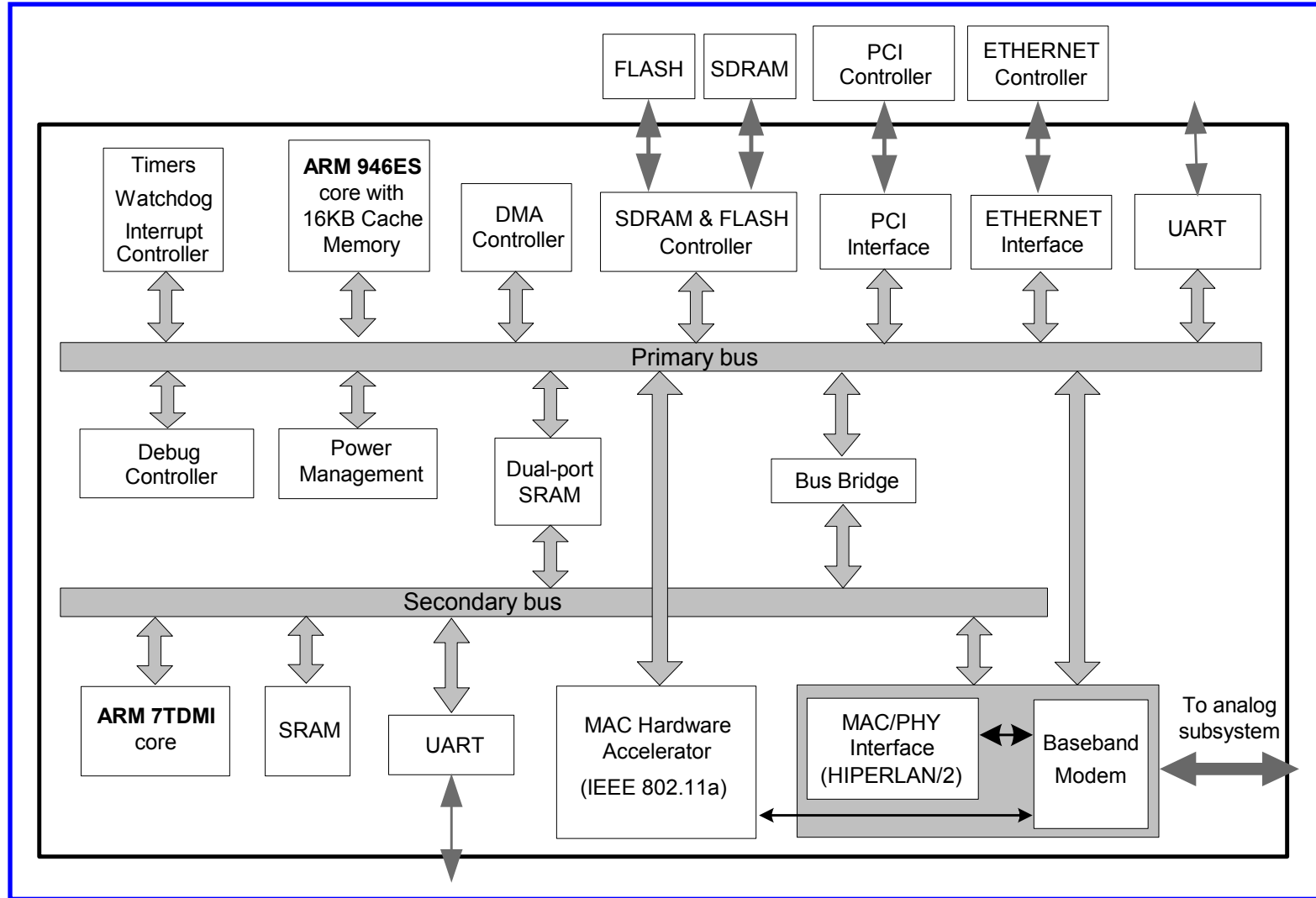
# Διάγραμμα ροής σχεδιασμού SoC



# Παράδειγμα: SoC για ασύρματα τοπικά δίκτυα (1)

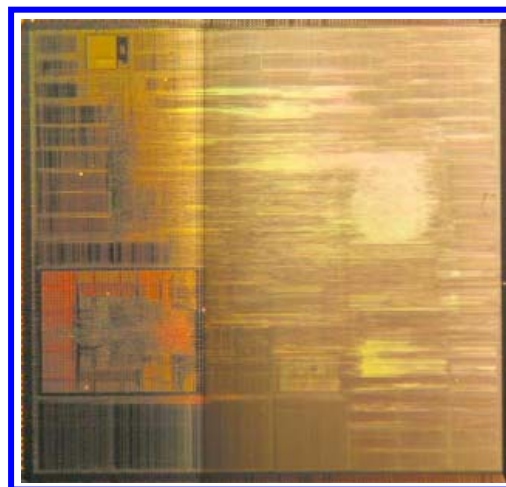
- Ευέλικτη αρχιτεκτονική για την υλοποίηση του ψηφιακού μέρους του φυσικού επιπέδου δύο προτύπων ασύρματων τοπικών δικτύων που λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων 5 GHz (HIPERLAN/2, IEEE 802.11a).
- Το ολοκληρωμένο κύκλωμα υλοποιεί επίσης τις λειτουργίες των επιπέδων CL και DLC του HIPERLAN/2 και το επίπεδο lower-MAC του IEEE 802.11a.
- Περιλαμβάνει δύο ενσωματωμένους επεξεργαστές:
  - ✓ ARM946E-S για την υλοποίηση των ανωτέρων επιπέδων του προτύπου HIPERLAN/2.
  - ✓ ARM7TDMI για την υλοποίηση του επιπέδου lower-MAC του προτύπου HIPERLAN/2 και τον έλεγχο του διαμορφωτή/ αποδιαμορφωτή (φυσικό επίπεδο) του συστήματος.
- Επίσης, κύκλωμα ειδικού σκοπού (MAC hardware accelerator) που υλοποιεί το επίπεδο lower-MAC του IEEE 802.11a, καθώς και διάφορα περιφερειακά όπως: ελεγκτή δοκιμής και αποσφαλμάτωσης, ελεγκτή κατανάλωσης ενέργειας, διασυνδέσεις Ethernet και PCI, στοιχεία μνημών, ελεγκτή εξωτερικών μνημών, ελεγκτή DMA, στοιχεία UART.

# Παράδειγμα: SoC για ασύρματα τοπικά δίκτυα (2)



# Παράδειγμα: SoC για ασύρματα τοπικά δίκτυα (2)

Process technology	0.18 $\mu\text{m}$ CMOS
Supply voltage	1.8 V (core), 3.3 V (I/O pads)
Operating frequency	80 MHz (some modem's blocks in 40 MHz)
Average power consumption	554 mW
Equivalent gates count	4,400,000
Transistors count	> 17,500,000
Pins count	456 (about 130 are for testing/debugging purposes)
Packaging	BGA 35mm x 35mm
Chip area	9.408mm x 9.408mm $\approx$ 88.5 sq. mm
Core area	8.576 mm x 8.576 mm $\approx$ 73.5 sq. mm
Area occupied by logic	43 sq. mm
Area occupied by memories	30.5 sq. mm
Total length of interconnections	47 m (six metal layers)



Σχεδιασμός	
Κατασκευή	



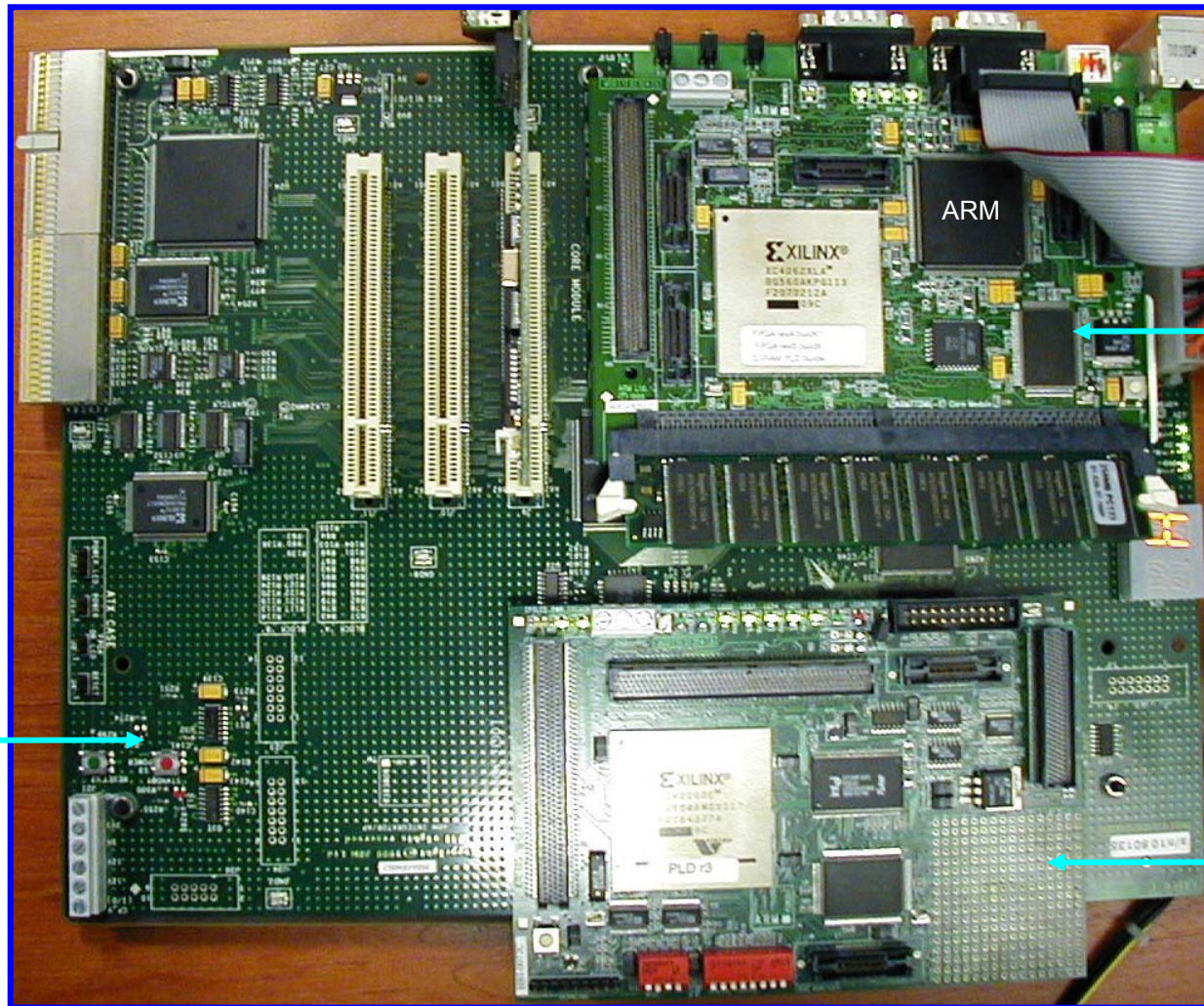


# Πλατφόρμες πρωτοτυποποίησης

---

- Χρησιμοποιούνται μετά την προσομοίωση (ή ως εναλλακτική λύση της προσομοίωσης), ώστε να αναπτυχθεί το πρωτότυπο του συστήματος που πρόκειται να υλοποιηθεί σε ολοκληρωμένο κύκλωμα σε κάρτα ή σύστημα καρτών που βασίζονται σε στοιχεία FPGA.
- Παρέχουν αξιόπιστη αναπαράσταση του συστήματος αφού οδηγούν σε πραγματικές υλοποιήσεις σε αντίθεση με τη διαδικασία της προσομοίωσης.
- Παρέχουν μεγαλύτερη ταχύτητα αφού μπορούν να αναπαράγουν τυχόν προβλήματα λειτουργίας σε μερικά δευτερόλεπτα εκτέλεσης, ενώ στα περιβάλλοντα προσομοίωσης υπάρχουν συνήθως μεγάλες καθυστερήσεις.
- Ωστόσο, δεν αποτελούν ακριβή αντίγραφα του τελικού SoC και δεν μπορούν να εκτελέσουν την εφαρμογή στην ίδια συχνότητα με το τελικό SoC.
- Η ανάπτυξη του συστήματος είναι σχετικά σύντομη (συνήθως μερικές ημέρες).
- Παρέχουν υποστήριξη αποσφαλμάτωσης (debugging).
- Ωστόσο, δυσκολίες συναντώνται κατά το διαχωρισμό της εφαρμογής στα στοιχεία της πλατφόρμας καθώς και κατά τη δρομολόγηση του σήματος ρολογιού, το χειρισμό των διαύλων επικοινωνίας και των στοιχείων μνήμης (memory mapping).
- Για μεγάλα συστήματα μπορεί να είναι δαπανηρές και είναι πιθανό να οδηγήσουν σε προβλήματα διαχείρισης ανθρώπινου δυναμικού (η ανάπτυξη μιας ομάδας μπορεί να καθυστερήσει στην περίπτωση που η πλατφόρμα χρησιμοποιείται από άλλη ομάδα).

# Παράδειγμα: Πλατφόρμα ARM Integrator



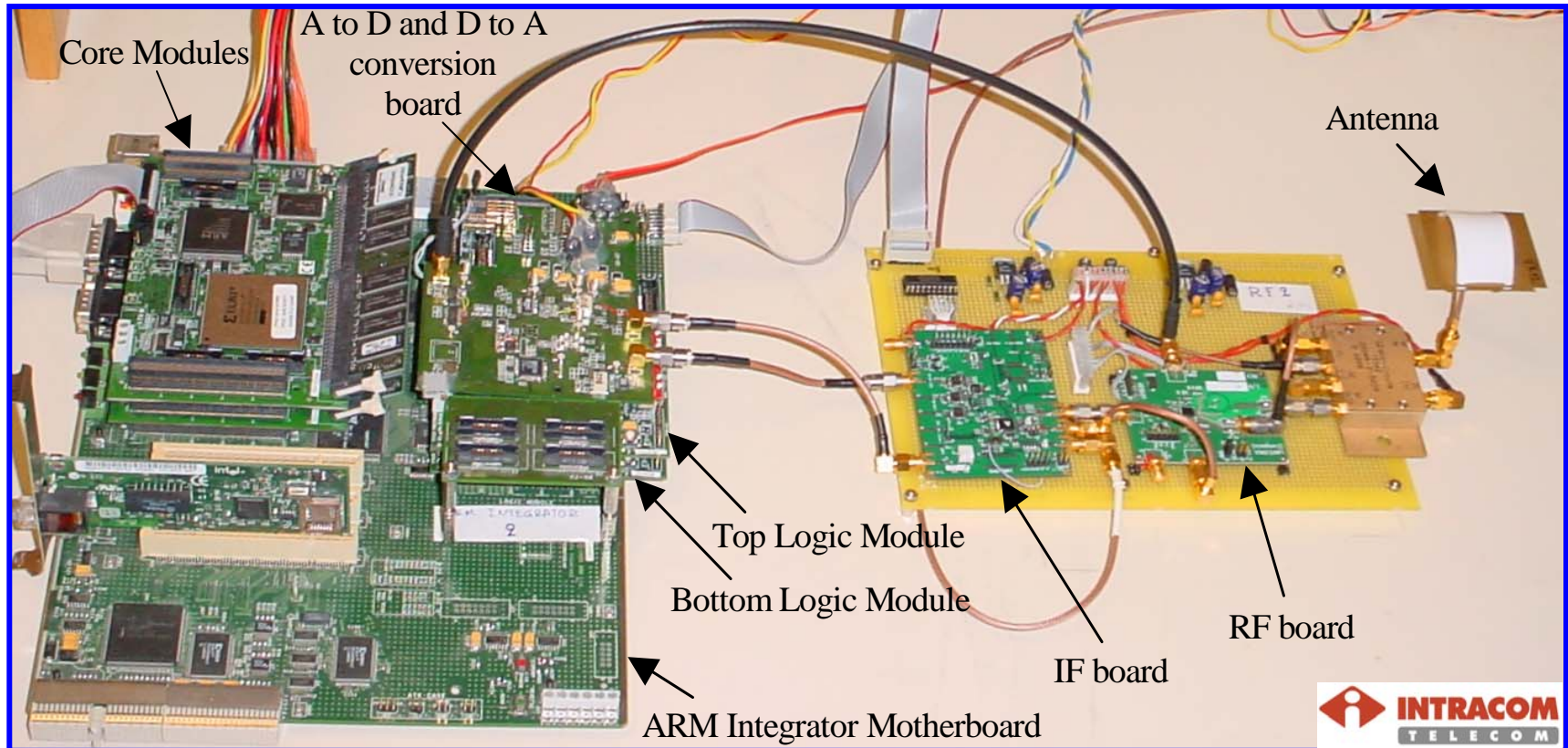
Κάρτα  
επεξεργαστικού  
πυρήνα  
(core module)

Κάρτα  
ανάπτυξης  
λογικής  
(logic module)

Κάρτα  
συστήματος  
(system board)



# Πρωτοτυποποίηση SoC για ασύρματα τοπικά δίκτυα

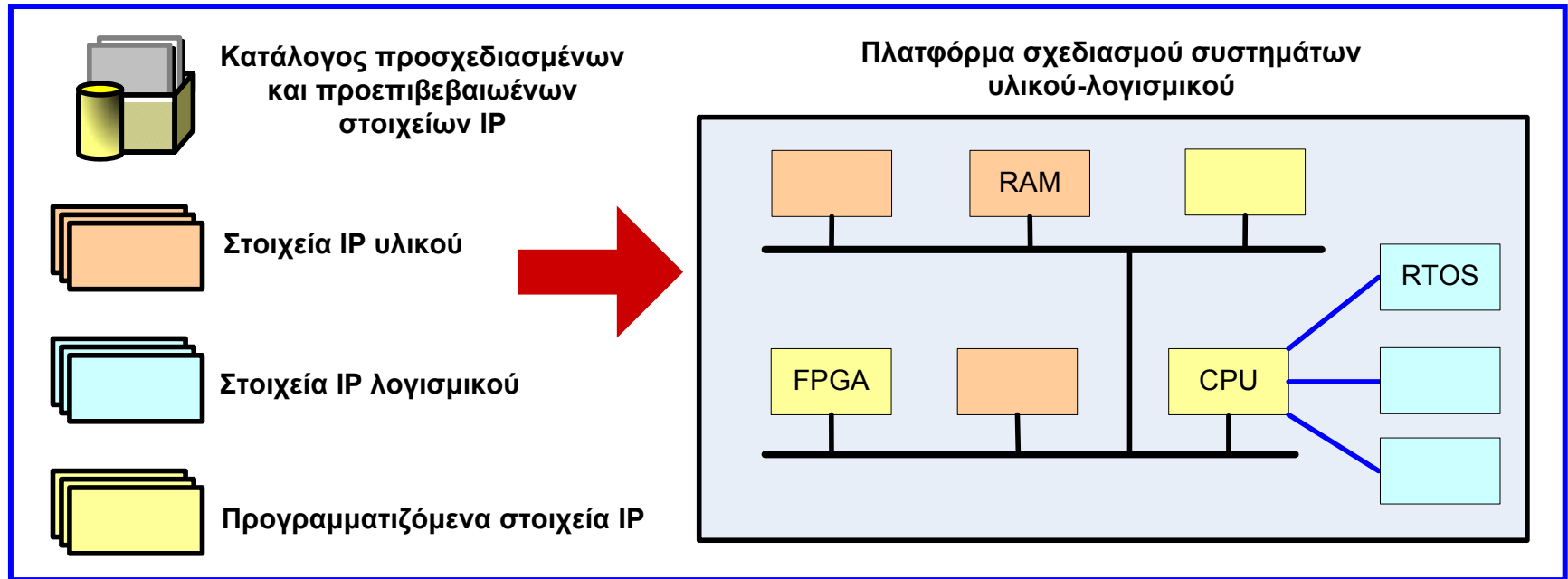


- Χρησιμοποιήθηκαν **δύο κάρτες πυρήνα** (ARM7TDMI core modules) για την υλοποίηση την υλοποίηση των ανωτέρων επιπέδων του προτύπου (το πρώτο) και για την υλοποίηση του επιπέδου lower MAC και τον έλεγχο του διαμορφωτή-αποδιαμορφωτή (το δεύτερο).
- Επίσης, **δύο κάρτες ανάπτυξης λογικής** (XILINX Virtex E 2000 logic modules) για την υλοποίηση του διαμορφωτή-αποδιαμορφωτή. Η μέση εκμετάλλευση (utilization) των FPGA ήταν 87%.

# Ολοκληρωμένα κυκλώματα με ενσωματωμένα επαναπροσδιοριζόμενα στοιχεία

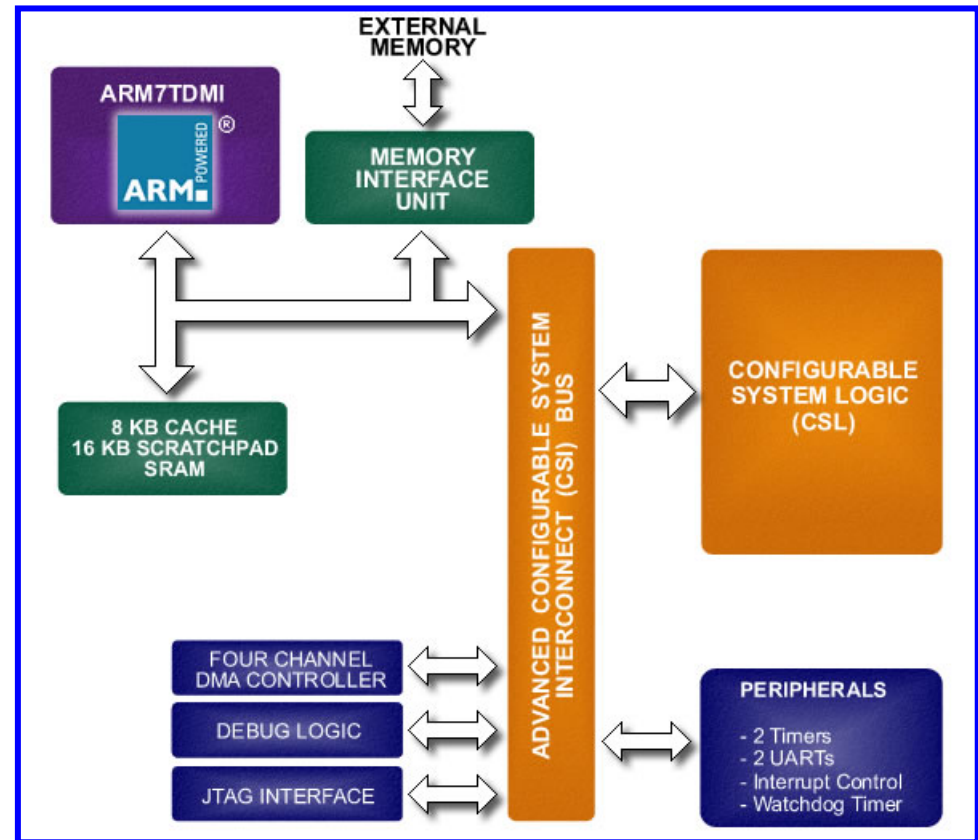
- Τα SoC ειδικού σκοπού προϋποθέτουν υψηλό κόστος και στην ουσία ενδείκνυνται όταν πρόκειται να κατασκευαστεί μεγάλος αριθμός από αυτά.
- Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα με ενσωματωμένα επαναπροσδιοριζόμενα στοιχεία (που συναντώνται και ως πλατφόρμες σχεδιασμού συστημάτων υλικού-λογισμικού) προϋποθέτουν μικρότερο κόστος και παρέχουν στους σχεδιαστές μια εναλλακτική λύση σε σχέση με τα SoC ειδικού σκοπού και τα συστήματα κλασικών επεξεργαστών με εξωτερικά περιφερειακά στοιχεία.
- Οι πλατφόρμες αυτές βασίζονται σε μια σταθερή αρχιτεκτονική SoC που απευθύνεται συνήθως σε μια κατηγορία εφαρμογών και συνδυάζει επεξεργαστές και διατάξεις επαναπροσδιοριζόμενης λογικής.
- Μπορούν να εξατομικευτούν σχετικά γρήγορα και εύκολα.
- Η χρήση τους αυξάνει την παραγωγικότητα και τις πιθανότητες επιτυχούς σχεδιασμού και μειώνει το χρόνο σχεδιασμού.
- Συστήματα που υλοποιούν παρόμοιες εφαρμογές μπορούν εύκολα να αναπτυχθούν μέσω τροποποιήσεων στο λογισμικό αλλά και στο υλικό.

# Βασική ιδέα πλατφόρμων σχεδιασμού συστημάτων υλικού-λογισμικού



# Παραδείγματα πλατφόρμων σχεδιασμού συστημάτων υλικού-λογισμικού (1)

- **A7S** της Triscend: 32-bit επαναπροσδιορίζόμενο SoC.
- Ενσωματωμένο πυρήνα ARM7TDMI των 32-bit.
- Διάταξη επαναπροσδιορίζομενης λογικής (Configurable System Logic - CSL).
- Υποσύστημα μνημών.
- Εσωτερικό δίαυλο υψηλών επιδόσεων.
- Διάφορα περιφερειακά στοιχεία.
- Παρόμοια είναι και η πλατφόρμα **Excalibur** της Altera που συνδυάζει έναν πυρήνα ARM9 και ένα στοιχείο PLD.



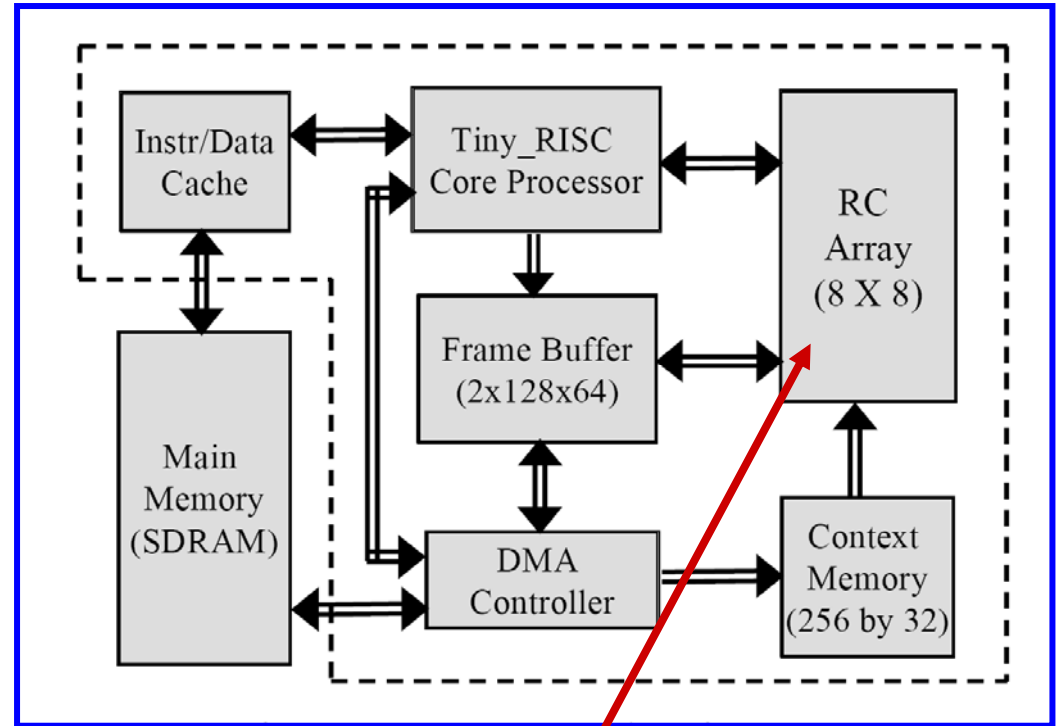


# Παραδείγματα πλατφόρμων σχεδιασμού

## συστημάτων υλικού-λογισμικού (2)

University of California at Irvine

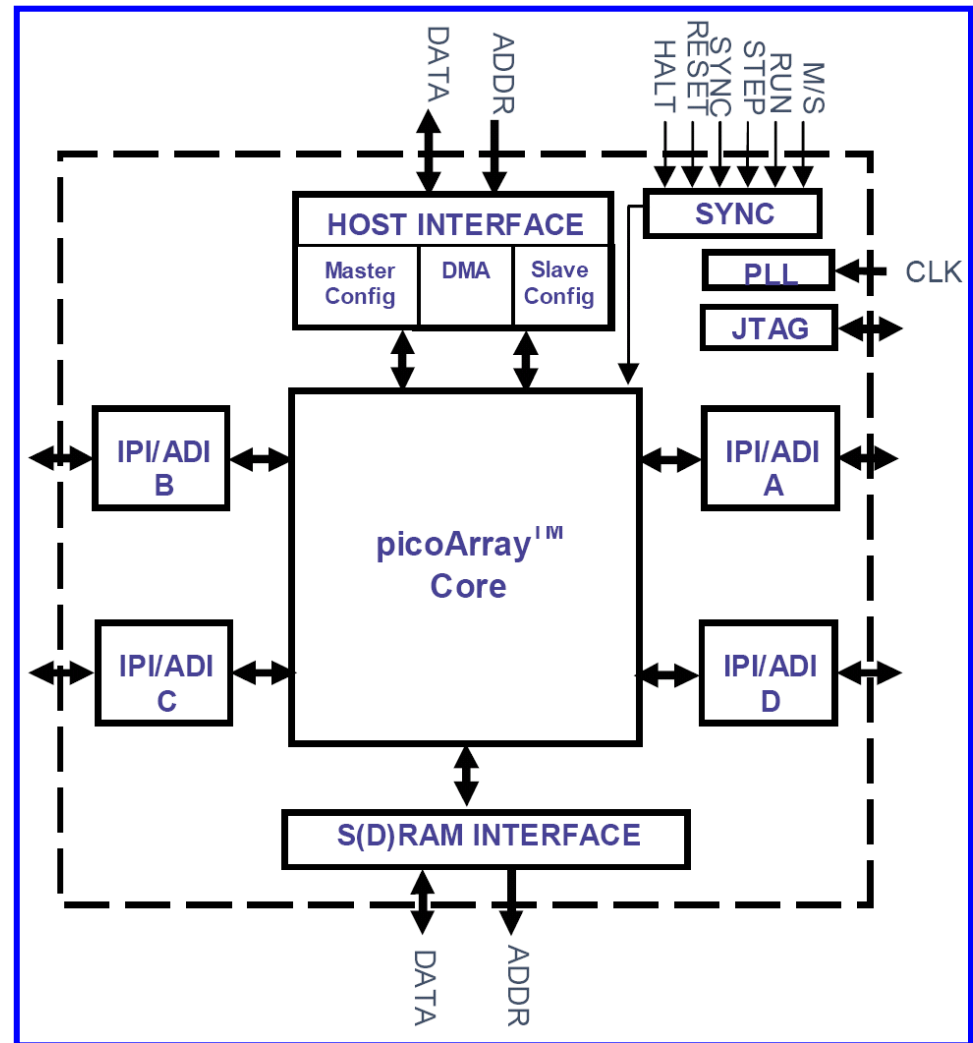
- Η πλατφόρμα **MorphoSys** περιλαμβάνει πυρήνα RISC Tiny (32-bit ALM και ενσωματωμένη κρυφή μνήμη).
- Επίσης, διάταξη πίνακα 8x8 επαναπροσδιοριζόμενων κελιών (Reconfigurable Cells - RC).
- Κάθε RC περιλαμβάνει ALM με πολλαπλασιαστή, μονάδα ολίσθησης, πολυπλέκτες εισόδου και 5 καταχωρητές των 16-bit.



Η διάταξη είναι διαθέσιμη και ως αυτόνομο στοιχείο IP (embedded reconfigurable core) και μπορεί να ενσωματωθεί σε οποιοδήποτε σύστημα ειδικού σκοπού.

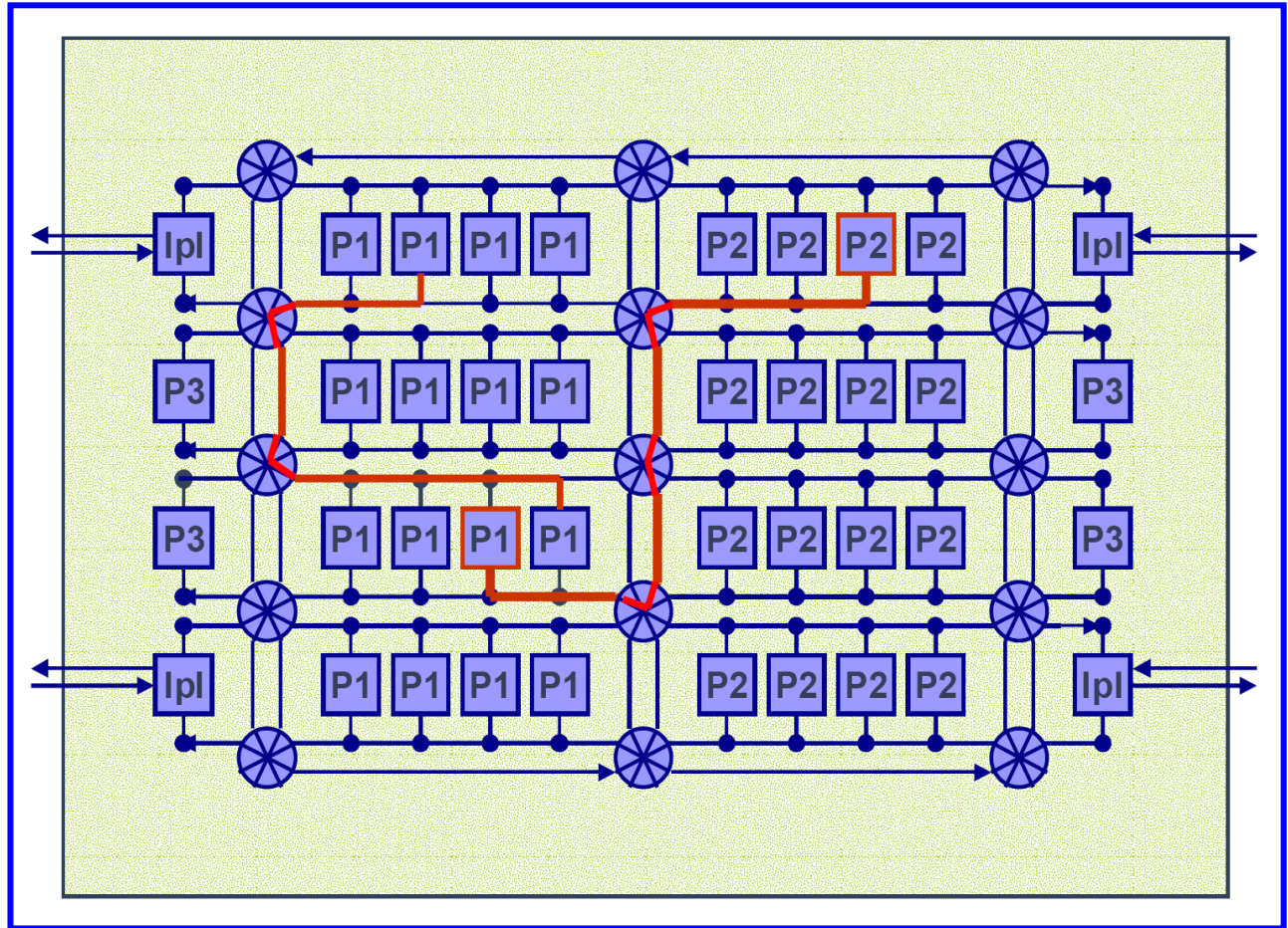
# Παραδείγματα πλατφόρμων σχεδιασμού συστημάτων υλικού-λογισμικού (3)

Η πλατφόρμα **picoChip** περιλαμβάνει επαναπροσδιοριζόμενη διάταξη επεξεργαστών (picoArray) και περιφερειακά (διασύνδεση εξωτερικού επεξεργαστή και εξωτερικής μνήμης, διασυνδέσεις με επιπλέον στοιχεία picoArray).



# Παραδείγματα πλατφόρμων σχεδιασμού συστημάτων υλικού-λογισμικού (4)

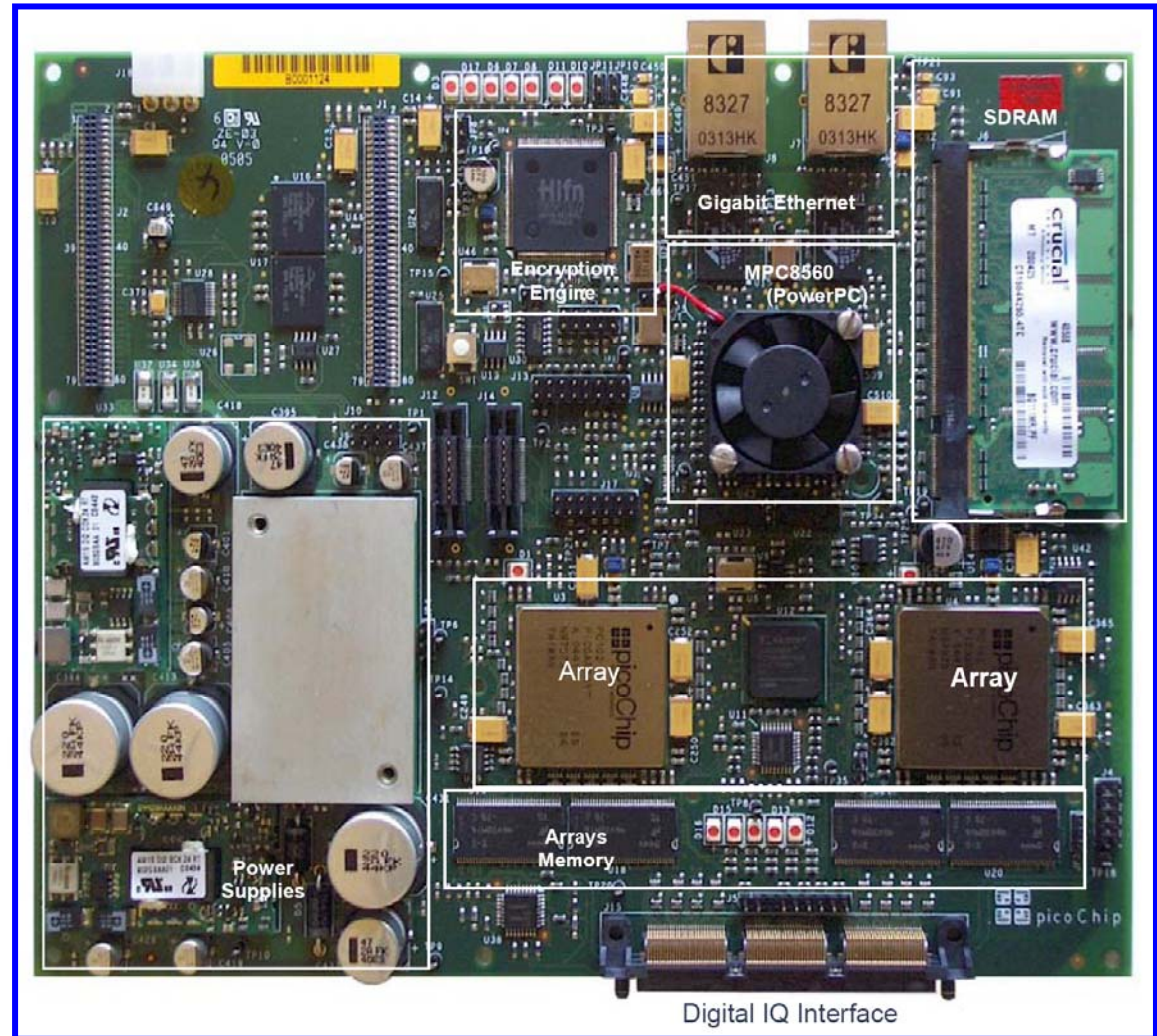
Η διάταξη picoArray περιλαμβάνει 322 στοιχεία: 308 επεξεργαστές (16-bit 3-way LIW) με τοπική μνήμη και 14 συνεπεξεργαστές, με προγραμματιζόμενα στοιχεία διασύνδεσης.





# Παραδείγματα πλατφόρμων σχεδιασμού συστημάτων υλικού-λογισμικού (5)

- Η ευελιξία της διάταξης picoArray επιτρέπει την υλοποίηση διαφόρων προτύπων επικοινωνίας (IEEE 802.11 - wireless LAN, IEEE802.16 - outdoor wireless).
- Το φυσικό επίπεδο υλοποιείται στις δύο διατάξεις picoArray, ενώ το επίπεδο MAC των προτύπων υλοποιείται σε εξωτερικό επεξεργαστή PowerPC.
- Επίσης, διατίθεται και ολοκληρωμένο κύκλωμα που υλοποιεί βασικά πρότυπα κρυπτογραφίας δεδομένων.



# Συμπεράσματα (1)

---

- Τα ενσωματωμένα συστήματα αναπτύσσονται για συγκεκριμένη εφαρμογή, περιλαμβάνουν τουλάχιστον ένα προγραμματιζόμενο στοιχείο, αλληλεπιδρούν διαρκώς με το περιβάλλον τους σε πραγματικό χρόνο και πρέπει να ικανοποιούν διάφορους περιορισμούς.
- Η φύση λοιπόν των συστημάτων αυτών φέρνει αντιμέτωπους τους μηχανικούς με νέα προβλήματα όταν καλούνται να προδιαγράψουν, προσομοιώσουν, σχεδιάσουν και βελτιστοποιήσουν τέτοια σύνθετα συστήματα.
- Οι υλοποιήσεις ενσωματωμένων συστημάτων αποτελούνται συνήθως από προγραμματιζόμενα στοιχεία γενικού ή ειδικού σκοπού, στοιχεία υλικού ειδικού σκοπού, καθώς και στοιχεία επικοινωνίας και μνήμης.
- Ο σχεδιασμός ενσωματωμένων συστημάτων κατευθύνεται από διάφορους περιορισμούς όπως: επιδόσεις, κατανάλωση ενέργειας, μέγεθος και βάρος, ασφάλεια, αξιοπιστία και χρόνος διάθεσης του συστήματος στην αγορά.
- Η βελτιστοποίηση των συστημάτων προϋποθέτει την ταυτόχρονη ικανοποίηση στόχων που σχετίζονται με τους περιορισμούς αυτούς (που σε πολλές περιπτώσεις είναι ανταγωνιστικοί μεταξύ τους).
- Συνεπώς, απαιτείται αρκετή προσπάθεια και εργαλεία αυτοματοποίησης σχεδιασμού ώστε να διαχειριστεί κανείς την πολυπλοκότητα των σημερινών ενσωματωμένων συστημάτων.

## Συμπεράσματα (2)

---

- Λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας, της αύξησης της πολυπλοκότητας των σημερινών εφαρμογών και της πίεσης για γρήγορη διάθεση των σχετικών προϊόντων, η ανάπτυξη των SoC είναι φυσικό επακόλουθο για την υλοποίηση ενσωματωμένων συστημάτων.
- Τα προγραμματιζόμενα στοιχεία σε ένα ενσωματωμένο σύστημα παρέχουν την απαιτούμενη ευελιξία, ενώ τα στοιχεία υλικού ειδικού σκοπού αποσκοπούν στην ικανοποιητική υλοποίηση χρονικά κρίσιμων διεργασιών και στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.
- Το βασικό πρόβλημα στο σχεδιασμό SoC είναι η παραγωγικότητα σχεδιασμού.
- Λύση αποτελεί η επαναχρησιμοποίηση στοιχείων IP και η χρήση αποδοτικών μεθοδολογιών και εργαλείων σχεδιασμού.
- Οι πλατφόρμες πρωτοτυποποίησης χρησιμοποιούνται μετά την προσομοίωση (ή ως εναλλακτική λύση της προσομοίωσης), ώστε να αναπτυχθεί το πρωτότυπο του συστήματος που πρόκειται να υλοποιηθεί σε ολοκληρωμένο κύκλωμα.
- Ως εναλλακτική λύση των στοιχείων FPGA και των SoC ειδικού σκοπού, οι μηχανικοί-σχεδιαστές σήμερα έχουν τη δυνατότητα χρησιμοποίησης ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με ενσωματωμένα επαναπροσδιοριζόμενα στοιχεία καθώς και ενσωματωμένων επαναπροσδιοριζόμενων στοιχείων.