

Π. ΚΡΗΤΗΣ  
HY-425

# ΗΥ 425 - Αρχιτεκτονική Υπολογιστών - Μ4-II

Χ. Σωτηρίου

9 Δεκεμβρίου 2001

---

Χ. Σωτηρίου

ΗΥ 425 - Αρχιτεκτονική Υπολογιστών - Μ4-II

9 Δεκεμβρίου 2001

## Επιρροή Βρόχων;

- τεχνικές δυναμικής δρομολόγησης εντολών: πίνακας, αλγόριθμος *Tomasko*.
- → μειώνουν την επιρροή των κινδύνων δεδομένων στην απόδοση.
- επιρροή βρόχων (*br X X s*) και αλλαγών ροής (*jumps*) ;
- καθώς αυξάνεται η χρήση *ILP*, αυξάνεται και η επιρροή βρόχων.
- μέχρι τώρα: στατικές τεχνικές → ο χειρισμός δεν εξαρτάται απο την δυναμική συμπεριφορά των βρόχων:
  - πρόγνωση-μή-ακολούθησης, πρόγνωση-ακολούθησης.
  - καθυστερημένος βρόχος, ακυρωτικός βρόχος.

## Δυναμική Πρόγνωση Βρόχων

- Χρήση υλικού για:
  - παρακολούθηση δυναμικής συμπεριφοράς βρόχων του προγράμματος.
  - δυναμική πρόγνωση του αποτελέσματος των βρόχων.
- η παρακολούθηση δυναμικής συμπεριφοράς γίνεται ενώ το πρόγραμμα εκτελείται στην αρχιτεκτονική!
- η απόδοση μιας αρχιτεκτονικής με Πρόγνωση Βρόχων εξαρτάται απο:
  - ακρίβεια της πρόγνωσης.
  - κόστος μιας λάθος πρόγνωσης.

## Πίνακας Ιστορικού Βρόχων - *Branch History Table*:

- πίνακας που αντιστοιχεί και προσβαίνεται από τα χαμηλά *bits* της διεύθυνσης του βρόχου.
- ο πίνακας περιέχει ένα *bit* που δείχνει άν ο βρόχος ακολουθήθηκε η όχι:

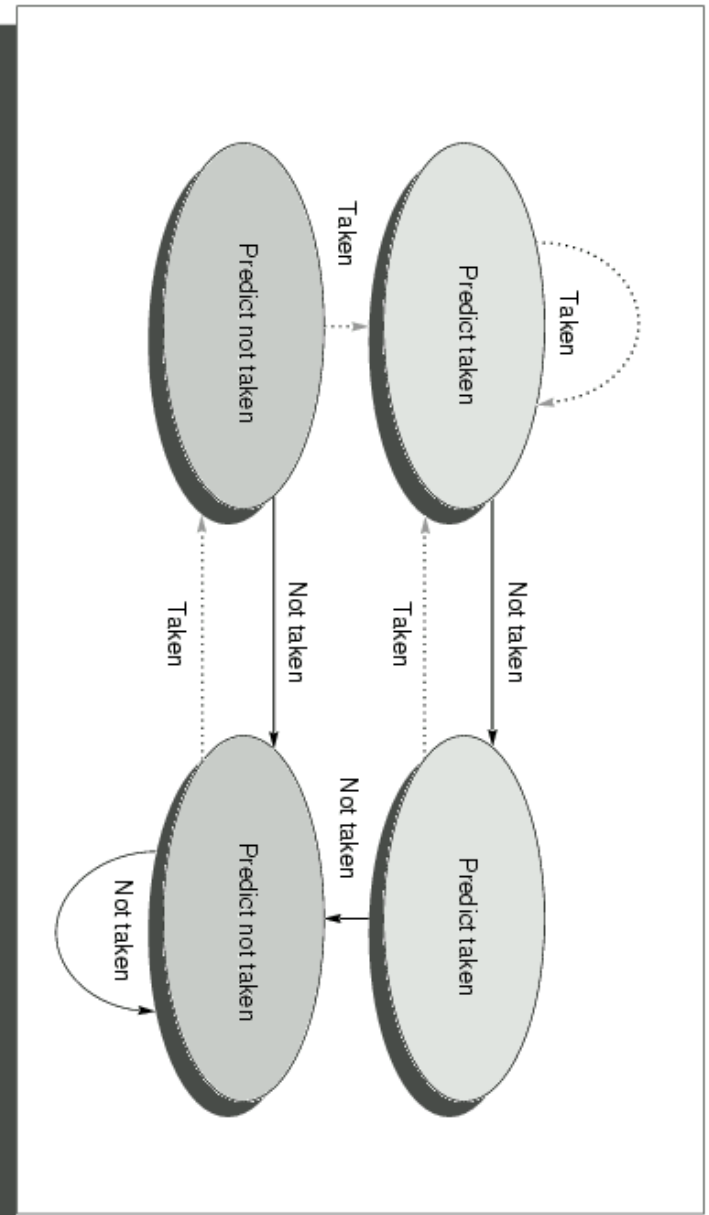
00000	✓
00100	✓
01000	
01100	
10000	✓
...	

## Πίνακας Ιστορικού Βρόχων

- Μειονέκτημα: δεν είναι σίγουρη η πρόγνωση!
- η ροή εντολών αλλάζει στην κατεύθυνση της πρόγνωσης.
- άν η πρόγνωση είναι τελικά λάθος η τιμή του πίνακα αντιστρέφεται.
- η μέθοδος λέγεται και πρόγνωση ενός *bit*.
- Μειονέκτημα: δυο λάθος προγνώσεις για βρόχους που σχεδόν πάντα ακολουθούνται η όχι, π.χ. 9/10 ακολουύθηση → 80% ακρίβεια.

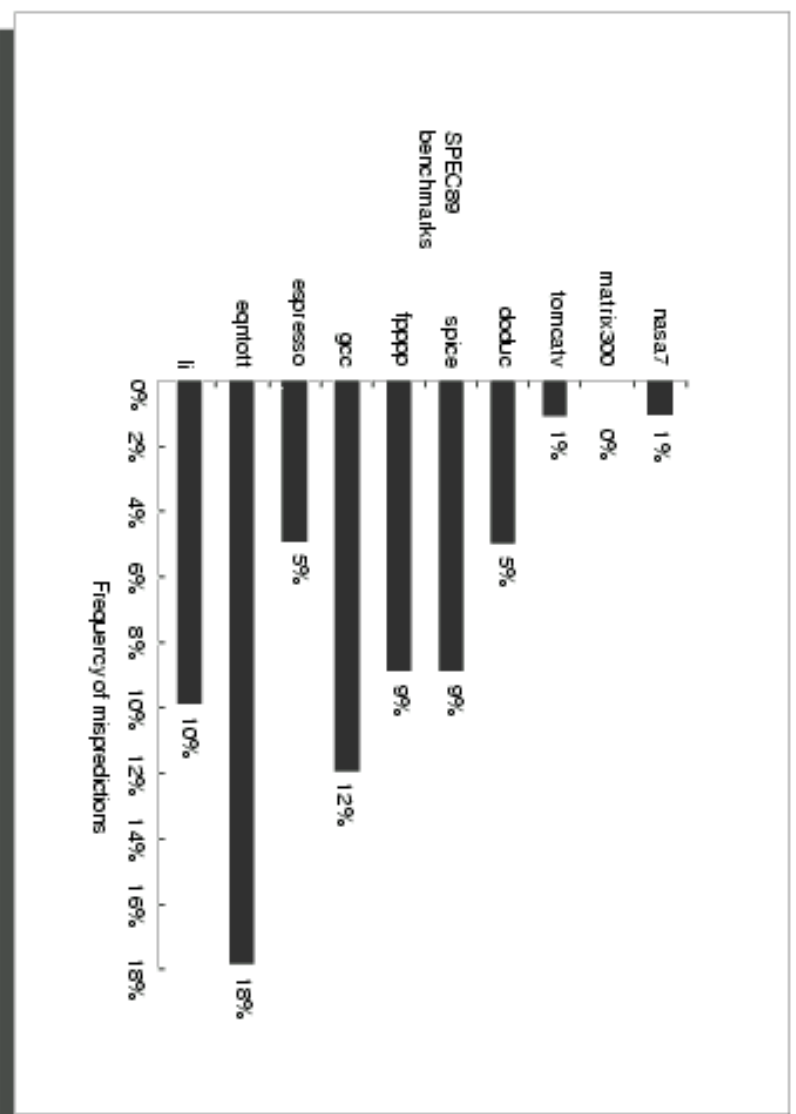
## Πρόγνωση 2-bit

ο πρόγνωση πρέπει να κάνει λάθος 2 φορές για να αλλάξει:



## Πρόγνωση $n$ -bit

- η πρόγνωση  $2$ -bit είναι μια απεικόνιση μιας γενικής μεθόδου.
- χρήση  $n$ -bit κορεσμένου μετρητή για κάθε στοιχείο του πίνακα ιστορικού βρόχου.
- μετρητής  $n$ -bit: τιμές μεταξύ  $0$  και  $2^n - 1$ .
- ο μετρητής αυξάνεται όταν ακολουθείται ένας βρόχος, μειώνεται όταν δέν ακολουθείται.
- Όταν: μετρητής  $\geq \frac{\text{μέγιστη τιμή}}{2}$  (δηλαδή  $2^{n-1}$ ), τότε ο βρόχος προγνωσείται ότι θα ακολουθηθεί.

Ακρίβεια 2-bit Πρόγνωσης (*SPEC* 98)



## Δυναμική Πρόγνωση Βρόχων

- η πρόγνωση *2-bit* χρησιμοποιεί μόνο την πιο επίκαιρη συμπεριφορά ενός βρόχου.
- η ακρίβεια της πρόγνωσης μπορεί να βελτιωθεί αν αναλυθεί και η συμπεριφορά άλλων σχετικών βρόχων.

Παράδειγμα - Κώδικας από *SPEC 92*:

```
if (aa == 2)
aa = 0;
if (bb == 2)
bb = 0;
if (aa != bb) {
...
}
```

## Δυναμική Πρόγνωση Βρόχων

Μεταγλώττιση σε *assembly DLX*:

```
SUBUI R3, R1, #2      ; R1 -> aa
BNEZ R3, L1           ; *B1* (aa != 2)
ADD R1, R0, R0        ; aa = 0
L1: SUBUI R3, R2, #2   ; R2 -> bb
    BNEZ R3, L2       ; *B2* (bb != 2)
    ADD R2, R0, R0    ; bb = 0
L2: SUBU R3, R1, R2    ; R3 -> aa - bb
    BEQZ R3, L3       ; *B3* (aa == bb)
```

- Βασική παρατήρηση: αν δεν ακολουθηθούν και οι δυο βρόχοι *B1*, *B2*, τότε θα ακολουθηθεί ο *B3* - οι βρόχοι *B1*, *B2* και *B3* συσχετίζονται.

## Συσχετική Πρόγνωση - *Correlated Prediction*

Συσχετική Πρόγνωση ή πρόγνωση 2 επιπέδων:

- πρόγνωση που χρησιμοποιεί το αποτέλεσμα άλλων βρόχων για την πρόγνωση του αποτελέσματος του τρέχοντος βρόχου.

- παράδειγμα:

```
if (d == 0)
  d = 1;
if (d == 1)
{
  . . .
```

## Συσχετική Πρόγνωση

Μεταγλώττιση σε *assembly DLX*:

```

BNEZ R1, L1      ; *B1* (d != 0)
ADDI R1, R0, #1  ; d == 0 => d = 1
L1: SUBUI R3, R1, #1
    BNEZ R3, L2   ; *B2* (d != 1)
    ...
L2:

```

Ανάλυση εκτέλεσης του παραπάνω κώδικα:

τιμή $d$	$d == 0$ ;	$B1$	$d$ πριν $B2$	$B2$	$d == 1$ ;	$B2$
0	Ναί	Δεν Ακ.	1	Ναί	Δεν Ακ.	
1	Όχι	Ακ.	1	Ναί	Δεν Ακ.	
2	Όχι	Ακ.	2	Όχι	Ακ.	

## Συσχετική Πρόγνωση

- Συμτέρασμα: αν δεν ακολουθείται ο  $B1$ , τότε δεν ακολουθείται ούτε ο  $B2$ .
- Η εκτέλεση αυτού του προγράμματος με απλή πρόγνωση 1-bit και αρχική πρόγνωση μη ακολουθήσεως έχει ακρίβεια μηδέν για το  $d$  εναλλάσσεται μεταξύ 2 και 0!

$\delta =$	Πρ. $B1$	Απ. $B1$	Νέα Πρ. $B1$	Πρ. $B2$	Απ. $B2$	Νέα Πρ. $B2$
2	$\Delta A$	A	A	$\Delta A$	A	A
0	A	$\Delta A$	$\Delta A$	A	$\Delta A$	$\Delta A$
2	$\Delta A$	A	A	$\Delta A$	A	A
0	A	$\Delta A$	$\Delta A$	A	$\Delta A$	$\Delta A$

## Συσχετική Πρόγνωση

- η Συσχετική Πρόγνωση, ή πρόγνωση 2 επιπέδων, χρησιμοποιεί 2 ξεχωριστά *bits* πρόγνωσης:
  - μια πρόγνωση στην περίπτωση που ο τελευταίος βρόχος δεν ακολουθήθηκε.
  - και μια στην περίπτωση που ο τελευταίος βρόχος ακολουθήθηκε.

Οι συνδυασμοί και ερμηνεία των *2-bit* συσχετικής πρόγνωσης:

Τιμές	Πρ. Αν ο Τελευταίος Βρόχος ΔΑ	Πρ. ο Αν Τελευταίος Βρόχος Α
ΔΑ/ΔΑ	ΔΑ	ΔΑ
ΔΑ/Α	ΔΑ	Α
Α/ΔΑ	Α	ΔΑ
Α/Α	Α	Α

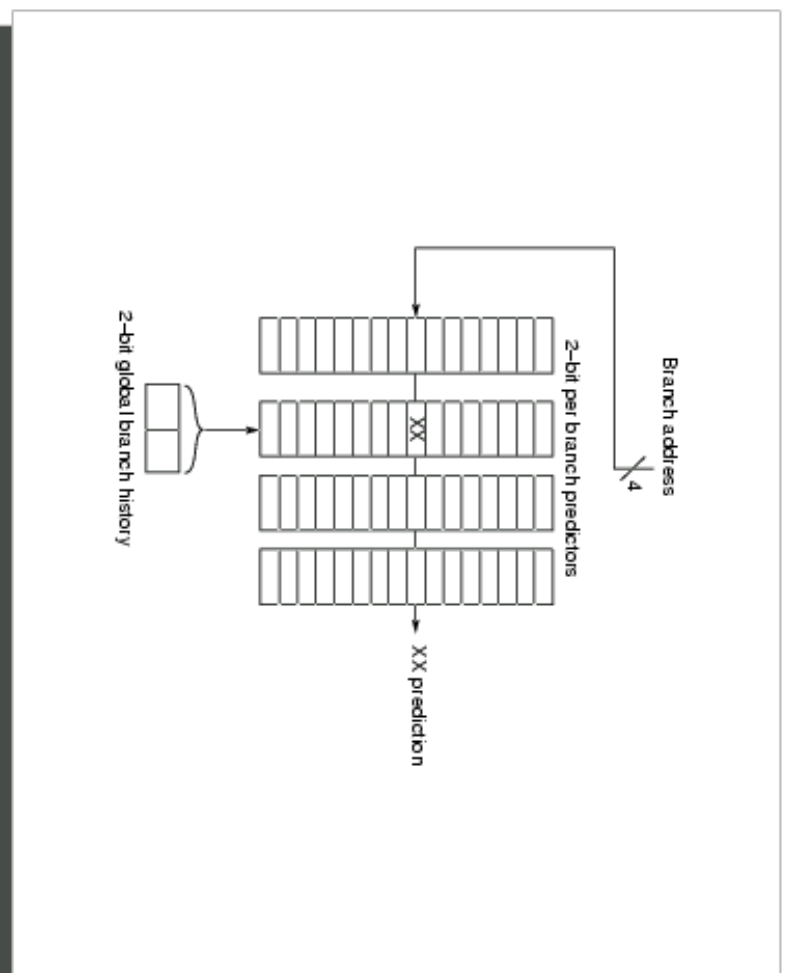
## Συσχετική Πρόγνωση

Εκτέλεση του παραδείγματος με συσχετική πρόγνωση:

$\delta =$	Πρ. $B1$	Απ. $B1$	Νέα Πρ. $B1$	Πρ. $B2$	Απ. $B2$	Νέα Πρ. $B2$
2	$[\Delta A]/\Delta A$	A	A/ $\Delta A$	$\Delta A/[\Delta A]$	A	$\Delta A/A$
0	A/ $[\Delta A]$	$\Delta A$	A/ $\Delta A$	$[\Delta A]/A$	$\Delta A$	$\Delta A/A$
2	$[A]/\Delta A$	A	A/ $\Delta A$	$\Delta A/[A]$	A	$\Delta A/A$
0	A/ $[\Delta A]$	$\Delta A$	A/ $\Delta A$	$[\Delta A]/A$	A	$\Delta A/\Delta A$

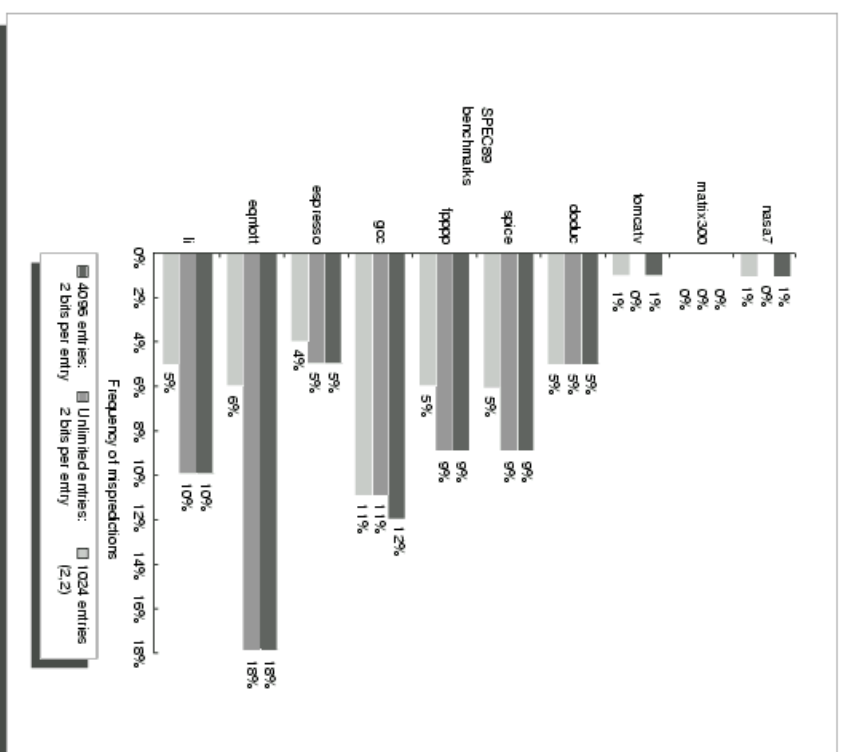
- αυτός ο τύπος συσχέτισης ονομάζεται (1, 1).
- γενικά: ( $m, n$ ) συσχετική πρόγνωση,  $m$  προηγούμενοι βρόχοι με  $2^m$  τιμές αντι-στοιχούν σε  $n$ -bit μετρητές για κάθε βρόχο.

## Συσχετική Πρόγνωση - Συσχέτιση (2, 2)





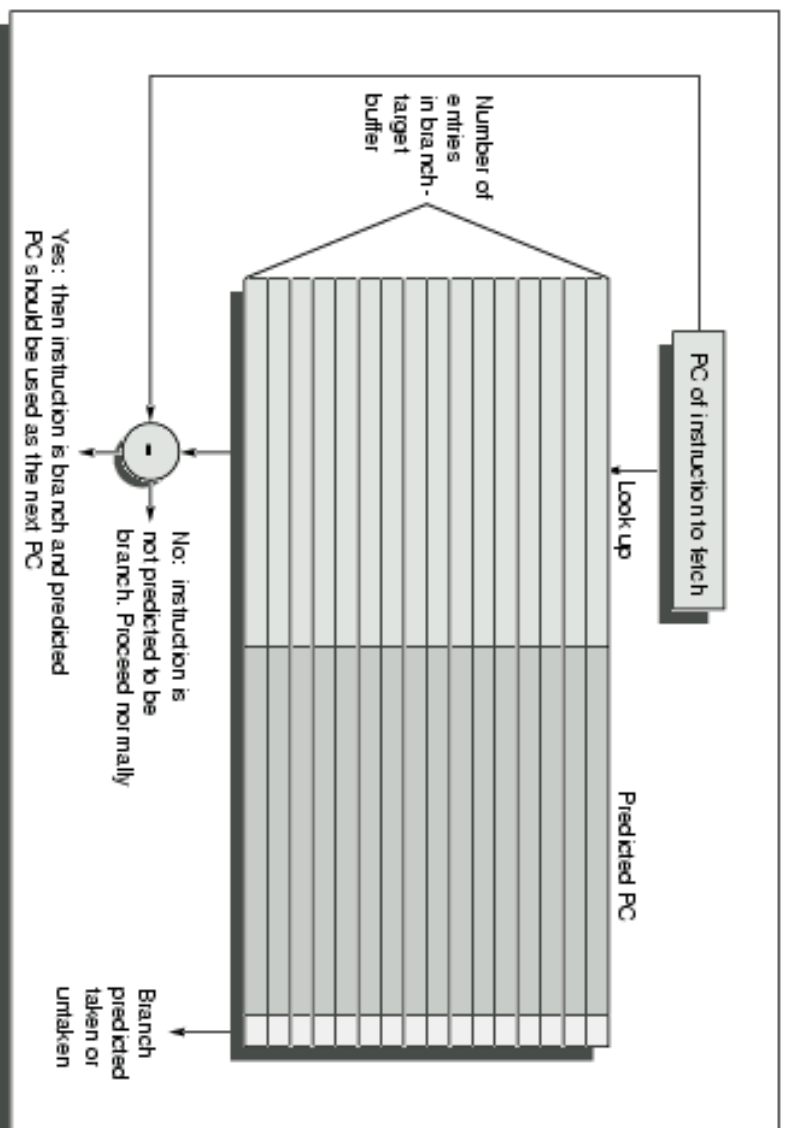
## Σύγκριση Πρόγνωσης 4K, 2-bit, απ. 2-bit και 1K (2, 2)



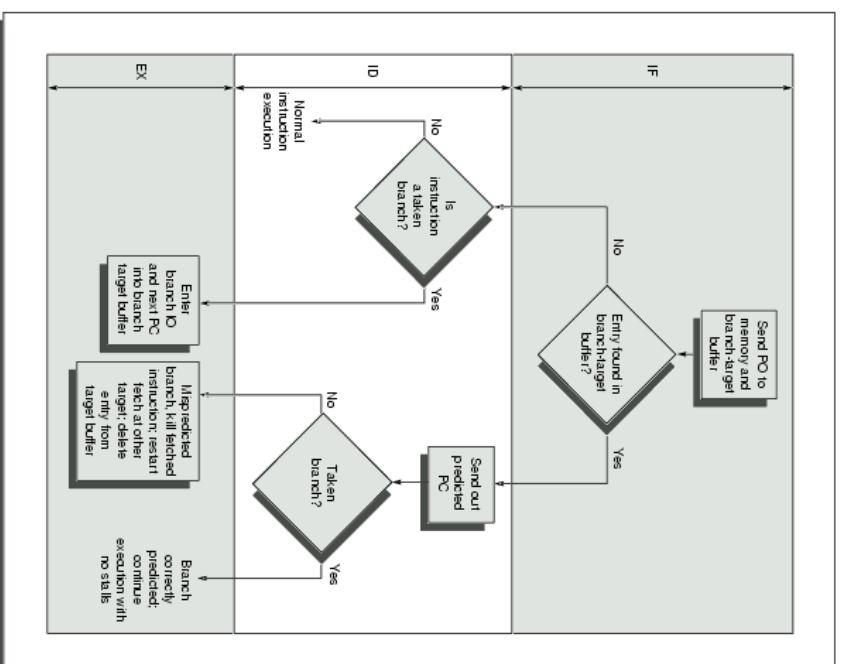
## Πίνακας Κατεύθυνσης Βρόχων - *Branch Target Buffer*:

- Βασικό πρόβλημα είναι και ο υπολογισμός της διεύθυνσης που ακολουθεί ο βρόχος.
- π.χ. στον *DLX* η διεύθυνση δεν είναι γνωστή πριν το τέλος του *ID*.
- ο Πίνακας Κατεύθυνσης Βρόχων μας επιτρέπει να προγνώσουμε και την διεύθυνση του βρόχου (αν είναι στον πίνακα).
- ο Πίνακας Κατεύθυνσης Βρόχων διαβάζεται στο στάδιο *IF* χρησιμοποιώντας την διεύθυνση της παρούσας εντολής (*PC*), πιθανά εντολή βρόχου.
- Αν η διεύθυνση είναι στον πίνακα, τότε προγνώσαμε την διεύθυνση του βρόχου ένα κύκλο νωρίτερα από πριν.

## Πίνακας Κατεύθυνσης Βρόχων



## Πίννακας Κατεύθυνσης Βρόχων - Στάδια



## Πίνακας Κατεύθυνσης Βρόχων

- ο Πίνακας Κατεύθυνσης Βρόχων μπορεί να συνδιαστεί και με Πίνακα Ιστορικού, π.χ. *PowerPC 620*.
- Κόστος για Πίνακα Κατεύθυνσης Βρόχων:

Εντολή στον Πίνακα	Πρόγνωση	Αποτέλεσμα	Κόστος Κύκλων
Ναί	Ακ.	Ακ.	0
Ναί	Ακ.	Δέν Ακ.	2
Όχι		Ακ.	2
Όχι		Δέν Ακ.	0

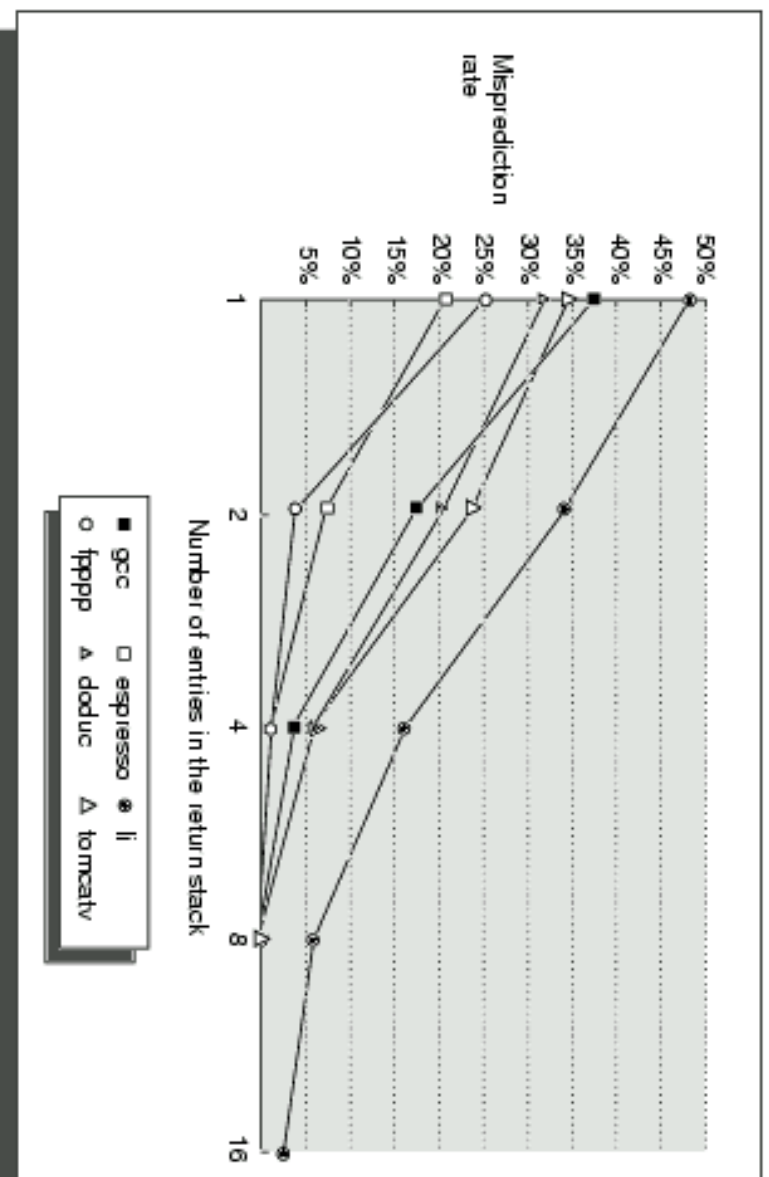
## Περεταίρω Βελτιώσεις

- αποθήκευση μιας ή πολλαπλών εντολών απο τον στόχο του βρόχου στον Πίνακα Κατεύθυνσης Βρόχων αντί για, ή μαζί με την κατεύθυνση.
- Βασικό πλεονεκτήμα:
  - επιτρέπει την βελτίωση που λέγεται ‘δίπλωμα βρόχου’.
  - 0 κύκλοι καθυστέρησης για μη-προποθετικούς βρόχους.
  - 0 κύκλοι καθυστέρησης κατα περίπτωση για προποθετικούς βρόχους.

## Περεταίρω Βελτιώσεις

- υψηλή συχνότητα έμμεσων βρόχων και ειδικά των επιστροφών απο υπορουτίνες (85% ε.β.) απαιτεί την βελτίωση τους.
- Πίνακα Κατεύθυνσης Βρόχων δεν είναι καλή λύση.
- οι υπορουτίνες καλούνται απο διάφορες διευθύνσεις.
- Μέθοδος: Σωρός Διευθύνσεων Επιστροφών.
  - σε κάθε κλήση η διεύθυνση επιστροφής μπαίνει στον σωρό.
  - σε κάθε επιστροφή αφαιρείται η διεύθυνση στην κορυφή.

## Σωρός Διευθύνσεων Επιστροφών





## Αρχιτεκτονικές Πολλαπλής Έκδοσης

- μέχρι τώρα:
  - τεχνικές για μείωση εξαρτήσεων δεδομένων (εκτέλεση εκτός σειράς, Πίνακας,  *Tomasulo*).
  - τεχνικές για μείωση εξαρτήσεων ελέγχου (δυναμική πρόγνωση βρόχων).
- στόχος: προσέγγιση του *CPI* στο ιδανικό 1.
- μπορούμε να βελτιώσουμε την αποδόση παραπάνω; (*CPI* < 1;)
- *CPI* < 1  $\Rightarrow$  έκδοση πάνω απο μίας εντολής ανα κύκλο.

## Αρχιτεκτονικές Πολλαπλής Έκδοσης

- Αρχιτεκτονικές Πολλαπλής Έκδοσης:
  - επιτρέπουν σε πολλαπλές εντολές να εκδοθούν σε 1 κύκλο.
  - Δύο Είδη:
    - \* Υπερκλίμακας - *Superscalar*.
    - \* Πολύ -Μακράς -Αέξης -Εντολής - *Very Long Instruction Word* (*VLIW*).

## Αρχιτεκτονικές Υπερχλιμάκωσης - *Superscalar*

- μεταβλητός αριθμός εντολών εκδίδεται ανα κύκλο (π.χ. 1→8).
- στατική δρομολόγηση απο τον *compiler* και δυναμική δρομολόγηση απο το υλικό (π.χ. Πίννακας,  *Tomasulo*).
- εντολές πρέπει να είναι ανεξάρτητες και να πληρούν περιορισμούς (δομικοί κίνδυνοι).

## Αρχιτεκτονικές *VLIW*

- σταθερός αριθμός εντολών εκδίδεται ανα κύκλο με την μορφή μιας μακράς εντολής/πακέτου εντολών.
- μόνο στατική δρομολόγηση στο τον *compiler*.
- παράδειγμα *VLIW* εντολής:

Πρόσβαση Μνήμης 1	Πρόσβαση Μνήμης 2	Λειτουργία Ρητών 1	Λειτουργία Ρητών 2	Λειτουργία Ακεραίων/Βρόχος
----------------------	----------------------	-----------------------	-----------------------	-------------------------------

## *Superscalar DLX*

- απλή *superscalar* αρχιτεκτονική του *DLX*:
  - 2 εντολές εκδίδονται ανα κύκλο.
  - πρώτη: μνήμης, βρόχος η ακέραιας αριθμητικής.
  - δεύτερη: λειτουργία ρητών.
  - πολύ πιο απλή απο γενική αρχιτεκτονική 2-ής εκδόσης.
  - παρόμοια με τον *HP7100*.

*Superscalar DLX*

Τύπος	1	2	3	4	5	6	7	8
Ακεραίου	<i>IF</i>	<i>ID</i>	<i>EX</i>	<i>MEM</i>	<i>WB</i>			
Ρητού	<i>IF</i>	<i>ID</i>	<i>EX</i>	<i>MEM</i>	<i>WB</i>			
Ακεραίου		<i>IF</i>	<i>ID</i>	<i>EX</i>	<i>MEM</i>	<i>WB</i>		
Ρητού		<i>IF</i>	<i>ID</i>	<i>EX</i>	<i>MEM</i>	<i>WB</i>		
Ακεραίου			<i>IF</i>	<i>ID</i>	<i>EX</i>	<i>MEM</i>	<i>WB</i>	
Ρητού			<i>IF</i>	<i>ID</i>	<i>EX</i>	<i>MEM</i>	<i>WB</i>	
Ακεραίου				<i>IF</i>	<i>ID</i>	<i>EX</i>	<i>MEM</i>	<i>WB</i>
Ρητού				<i>IF</i>	<i>ID</i>	<i>EX</i>	<i>MEM</i>	<i>WB</i>

## *Superscalar DLX* - Κίνδυνοι

- μια και οι λειτουργίες ακεραίων και ρητών είναι ανεξάρτητες η ανάγκη για επιπλέον έλεγχο κινδύνων είναι μικρή.
- έλεγχος πολλαπλής έκδοσης γίνεται ελέγχοντας τους κωδικούς εντολών.
- Ειδική περίπτωση:
  - ακεραία εντολή: μνήμης με *FP* καταχωρητή.
  - αυξάνει την ανάγκη για θύρες στο A.K. *FP*.
  - *RAW* εξάρτηση αν η δεύτερη εξαρτάται από την πρώτη.

## *Superscalar DLX* - Κίνδυνοι

- 1η λύση: έκδοση εντολών μνήμης με *FP* καταχωρητή χωρίς δεύτερη εντολή.
- 2η λύση: αποφυγή έκδοσης εντολής *FP*.
- Άλλο Πρόβλημα:
  - στον απλό *DLX* οι εντολές *load* έχουν ένα κύκλο αναμονής.
  - έτσι, στην *superscalar* αρχιτεκτονική οι επόμενες 3 εντολές απο ένα *load* δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν το αποτελεσμα χωρίς αναμονή.