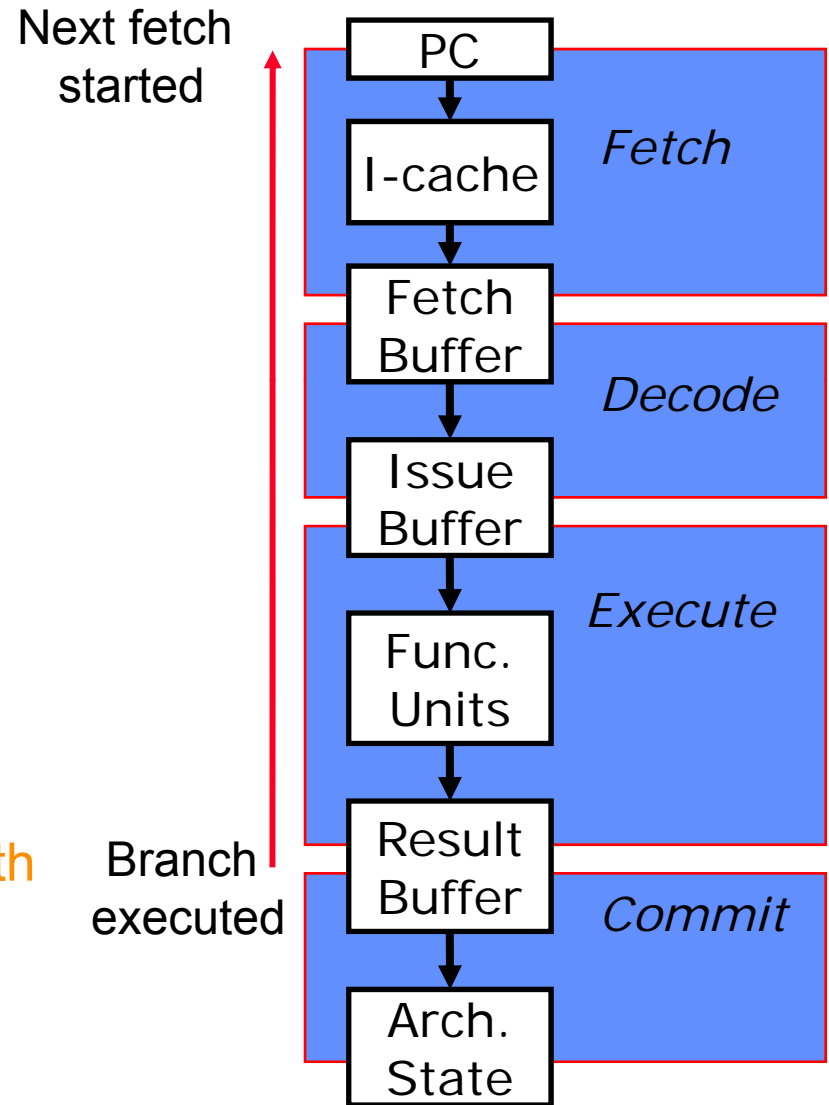


# Μέθοδοι Πρόβλεψης Διακλαδώσεων (Branch Prediction Mechanisms)

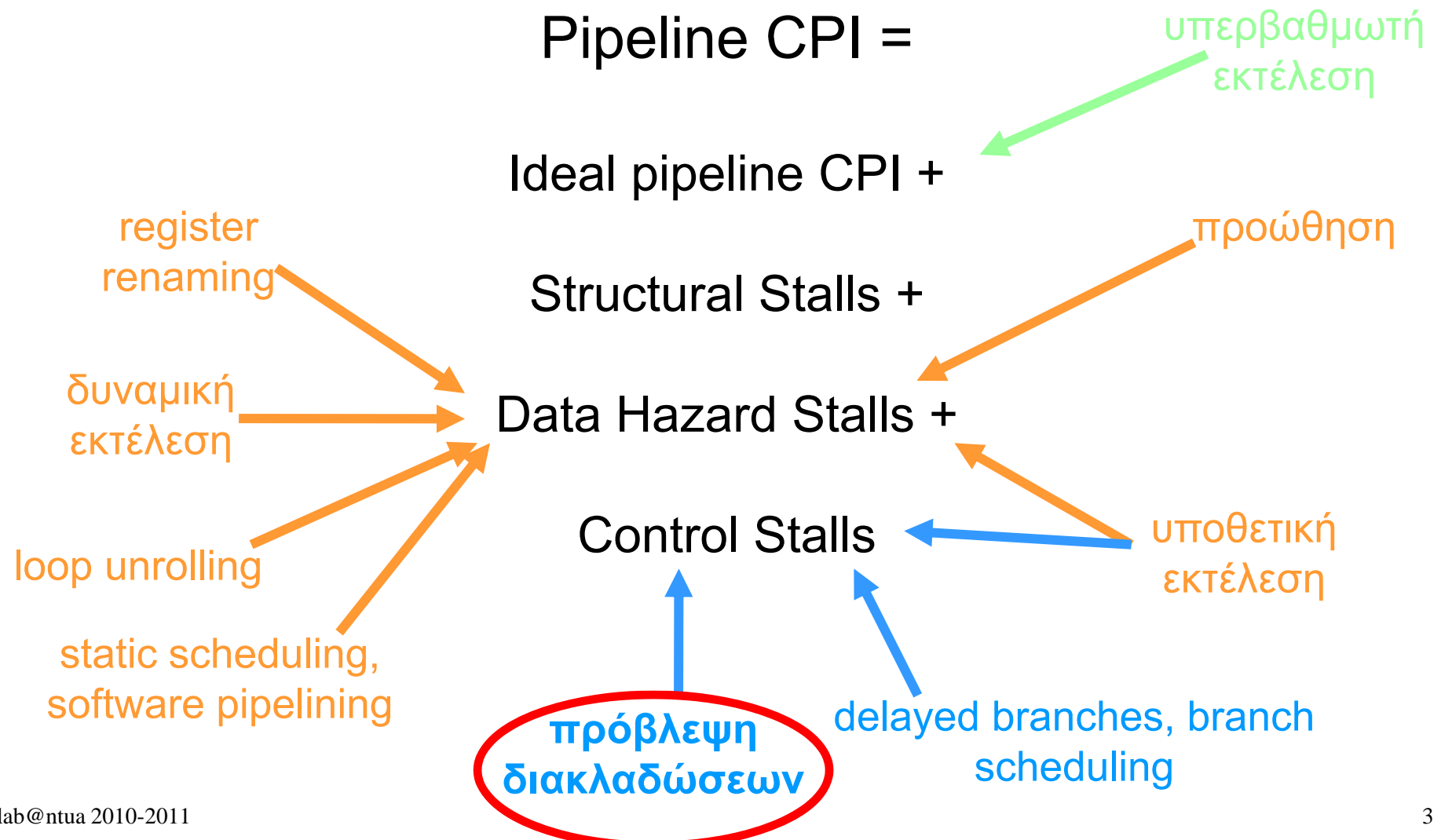
# Εντολές Διακλάδωσης

- Περίπου 20% των εντολών είναι εντολές διακλάδωσης
- Πολλά στάδια μεταξύ υπολογισμού του επόμενου PC και εκτέλεσης του branch (για σύγχρονους επεξεργαστές μπορεί και >10!)
- Εισαγωγή stalls και επομένως μείωση του ρυθμού ανάγνωσης και εκτέλεσης εντολών

#bubbles  $\sim$  pipeline depth  $\times$  loop length



# Τεχνικές βελτίωσης του CPI



# Τεχνικές Μείωσης Control Stalls

- Software
  - Μείωση των εντολών άλματος (loop unrolling)
  - Υπολογισμός της συνθήκης εκτέλεσης διακλάδωσης όσο πιο νωρίς
- Hardware
  - Αντικατάσταση των bubbles με χρήσιμη δουλειά
  - Παράλληλη εκτέλεση και των 2 ροών προγράμματος μέχρι να αποσαφηνιστεί ποιο κομμάτι της διακλάδωσης θα εκτελεστεί
  - Πρόβλεψη

# Εντολές Άλματος

- Χρειαζόμαστε 2 πληροφορίες
  - Αν θα εκτελεστεί το άλμα ή όχι (taken or not taken)
  - Αν εκτελεστεί ποιος είναι ο προορισμός (target PC)

Είδος Άλματος	Απόφαση	Προορισμός
Direct Jumps Function Calls	Always Taken	Υπολογίζεται εύκολα
Conditional Branches	???	Υπολογίζεται εύκολα
Indirect Jumps Function returns	Always Taken	Υπολογίζεται δύσκολα

# Πρόβλεψη Απόφασης

- Απαιτείται για εντολές διακλάδωσης υπό συνθήκη
  - Η πλειοψηφία των εντολών διακλάδωσης είναι υπό συνθήκη
- 2 είδη τεχνικών πρόβλεψης
  - Στατικές
  - Δυναμικές
- Απαιτείται *extra hardware*
  - Αποθήκευση χρήσιμων πληροφοριών για βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεων (branch history tables, branch target buffers, etc)
  - Μηχανισμός ανάνηψης σε περίπτωση λανθασμένης πρόβλεψης

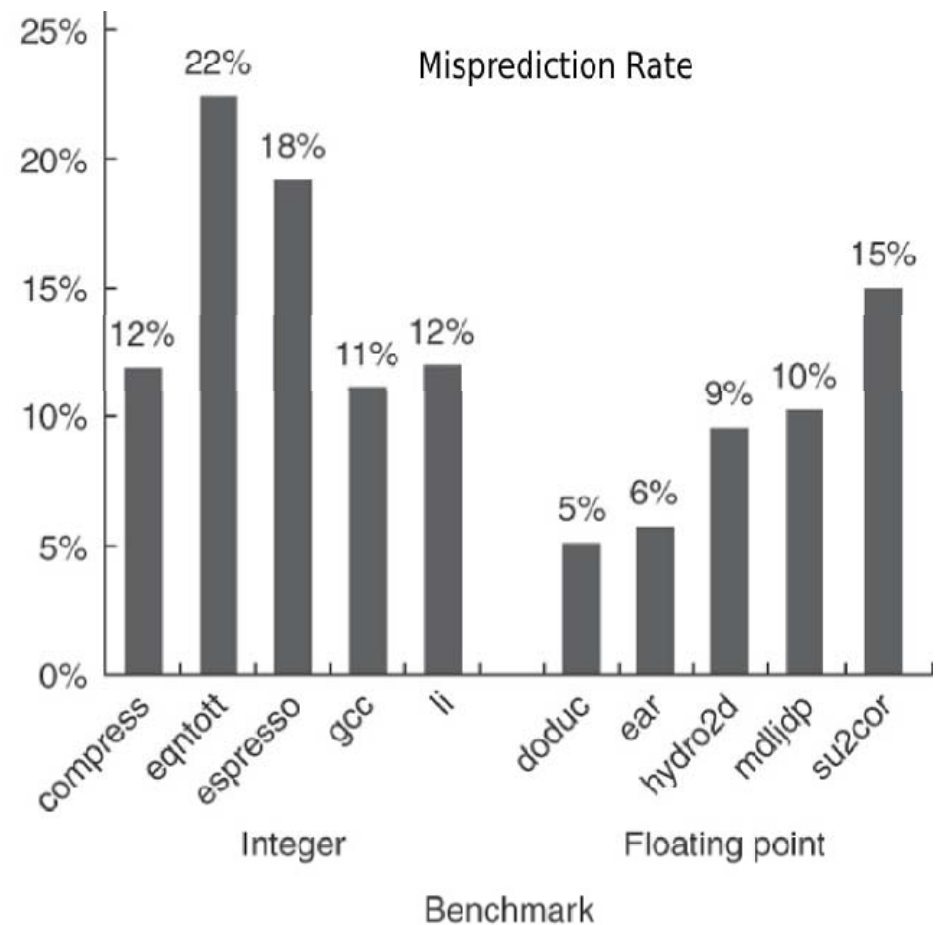
# Στατικές Τεχνικές Πρόβλεψης

- **Branch not taken (NT)**
  - Εύκολη υλοποίηση
  - Σε ένα loop **σωστή** πρόβλεψη μόνο στην τελευταία εκτέλεση
  - Misprediction rate ~60%-70%
- **Branch taken (T)**
  - Πιο πολύπλοκο hardware
  - Σε ένα loop **λάθος** πρόβλεψη μόνο στην τελευταία εκτέλεση
  - Average misprediction rate 34% (SPEC benchmarks)
- **BTFNT**
  - Άλματα προς τα πίσω (αρνητικό offset ως προς το PC) προβλέπεται ότι θα εκτελεστούν (Backwards taken)
  - Άλματα προς τα εμπρός (θετικό offset ως προς το PC) προβλέπεται ότι δε θα εκτελεστούν (Forwards not taken)
  - π.χ. χρησιμοποιείται στον Intel Pentium 4 σε περίπτωση που αποτύχει ο μηχανισμός δυναμικής πρόβλεψης

# Στατικές Τεχνικές Πρόβλεψης

- Profiling

- Εκτέλεση προγράμματος και καταγραφή στατιστικών
- Ο compiler τα χρησιμοποιεί για να βοηθήσει το hardware να κάνει σωστή πρόβλεψη (π.χ. αν μια εντολή διακλάδωσης εκτελείται πάνω από τις μισές φορές κατά τη διάρκεια του profiling τότε η πρόβλεψη είναι T)
- Εύκολη υλοποίηση
- Τα δεδομένα του profiling και της κανονικής εκτέλεσης μπορεί να είναι πολύ διαφορετικά. Επομένως λάθος προβλέψεις



© 2007 Elsevier, Inc. All rights reserved.



# Δυναμικές Τεχνικές Πρόβλεψης

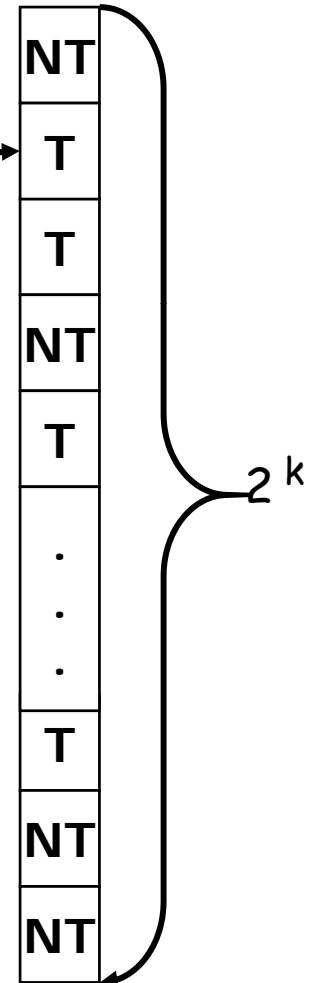
- 1-bit predictor

- Η πρόβλεψη βασίζεται στο τι έγινε την προηγούμενη φορά που εκτελέστηκε αυτή η εντολή διακλάδωσης
- Χρήση πίνακα για την αποθήκευση της απόφασης
- Προσπέλαση του πίνακα χρησιμοποιώντας  $k$  bits του PC
  - » Aliasing

0x40010100	addi r10, r0, 100
0x40010104	addi r1, r1, r0
0x40010108	L1:
...	...
...	...
0x40010A04	addi r1, r1, 1
0x40010A08	bne r1, r10, L1
...	...

$k$  bits

1-bit  
Branch  
History  
Table



# Παράδειγμα 1-bit predictor

```
0x108: for(i=0; i < 100000; i++) {  
    .....  
0x144:     if( ( i % 100) == 0 )  
           callA( );  
0x150:     if( (i & 1) == 1)  
           callB( );  
}
```

**Πρόβλεψη (108):**

0



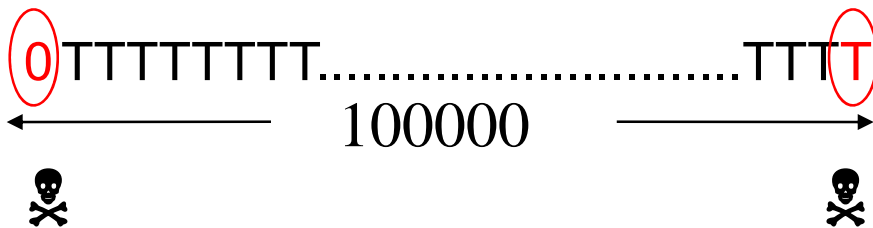
**Απόφαση (108):**

T

# Παράδειγμα 1-bit predictor

```
0x108: for(i=0; i < 100000; i++) {  
    .....  
0x144:     if( ( i % 100) == 0 )  
           callA( );  
0x150:     if( (i & 1) == 1)  
           callB( );  
}
```

Πρόβλεψη (108):



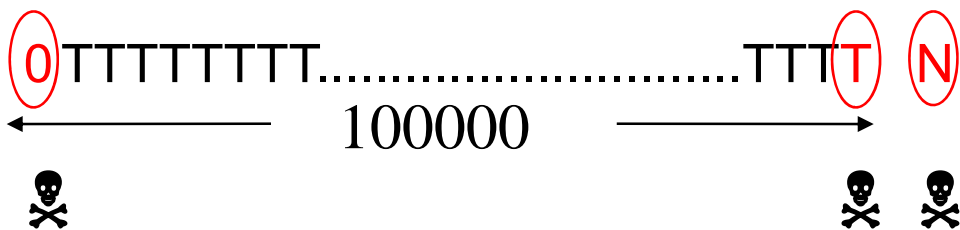
Απόφαση (108):



# Παράδειγμα 1-bit predictor

```
0x108: for(i=0; i < 100000; i++) {  
    .....  
0x144:   if( ( i % 100) == 0 )  
         callA( );  
0x150:   if( (i & 1) == 1)  
         callB( );  
}
```

Πρόβλεψη (108):



Απόφαση (108):



# Παράδειγμα 1-bit predictor

```
0x108: for(i=0; i < 100000; i++) {
```

.....

```
0x144:   if( ( i % 100) == 0 )
          callA( );
```

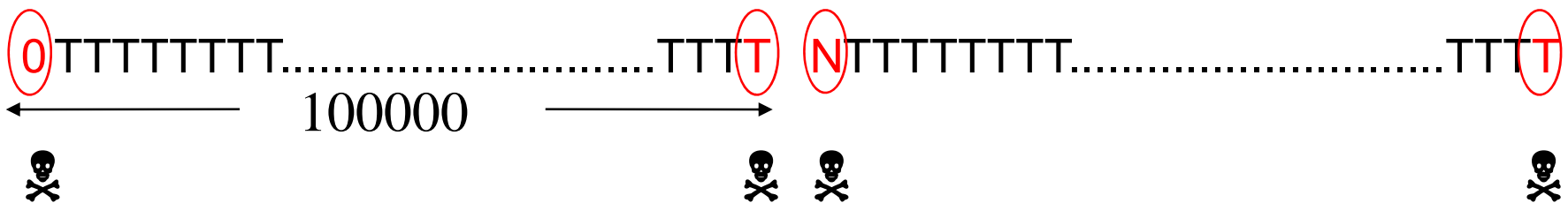
```
0x150:   if( (i & 1) == 1)
          callB( );
```

```
}
```

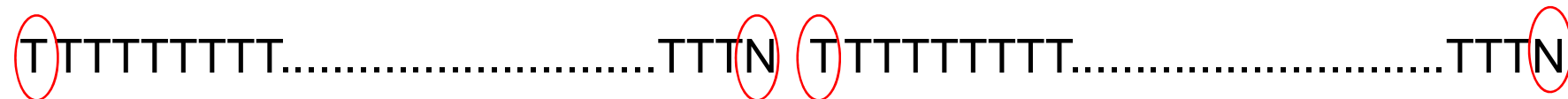
Misprediction = 2/100000

Prediction Rate = 99.998%

Πρόβλεψη (108):



Απόφαση (108):



# Παράδειγμα 1-bit predictor

0x108: for(i=0; i < 100000; i++) {

.....  
0x144: if( ( i % 100) == 0 )  
          callA( );

0x150: if( (i & 1) == 1)  
          callB( );

}



DIV	R2, #100
MFHI	R1
BNEZ	R1, 0x150
JMP	FUNA

Πρόβλεψη (144):

0



Απόφαση (144):

N

# Παράδειγμα 1-bit predictor

0x108: for(i=0; i < 100000; i++) {

.....  
0x144: if( ( i % 100) == 0 )  
          callA( );

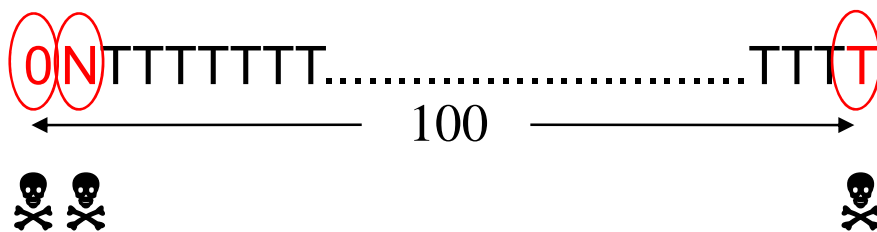
0x150: if( (i & 1) == 1)  
          callB( );

}



DIV	R2, #100
MFHI	R1
BNEZ	R1, 0x150
JMP	FUNA

Πρόβλεψη (144):



Απόφαση (144):



# Παράδειγμα 1-bit predictor

0x108: for(i=0; i < 100000; i++) {

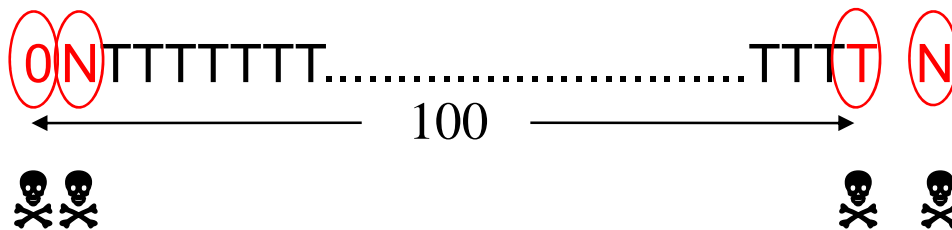
.....  
0x144: if( ( i % 100) == 0 )  
          callA( );

0x150: if( (i & 1) == 1)  
          callB( );

}

DIV    R2,#100  
MFHI   R1  
BNEZ   R1,0x150  
JMP    FUNA

Πρόβλεψη (144):



Απόφαση (144):





# Παράδειγμα 1-bit predictor

```
0x108: for(i=0; i < 100000; i++) {
```

.....

```
0x144:   if( ( i % 100) == 0 )
          callA( );
```

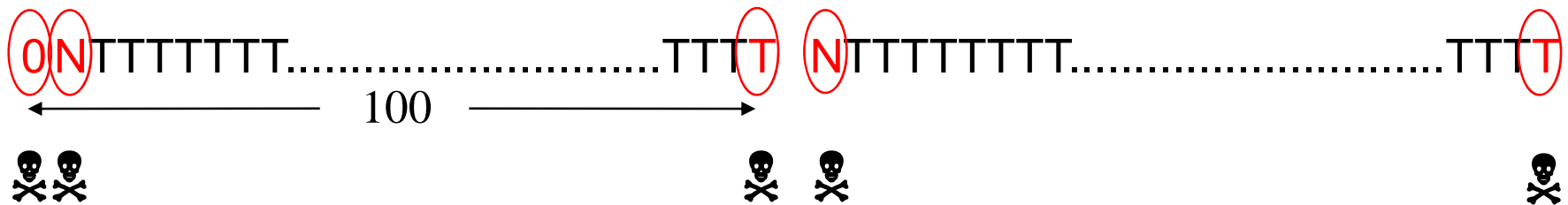
```
0x150:   if( (i & 1) == 1)
          callB( );
```

```
}
```

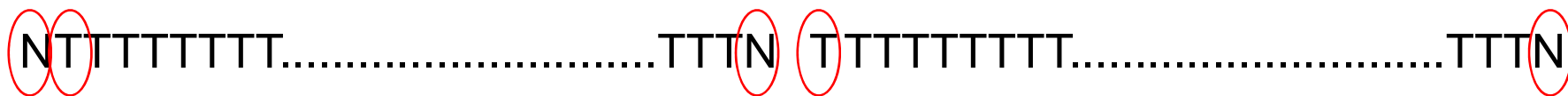
Misprediction = 2/100

Prediction Rate = 98%

Πρόβλεψη (144):



Απόφαση (144):



# Παράδειγμα 1-bit predictor

0x108: for(i=0; i < 100000; i++) {

.....

0x144: if( ( i % 100) == 0 )

callA( );

0x150: if( (i & 1) == 1)

callB( );

}



```
AND    R1,R2,#1
SUB    R1,#1
BNEZ   R1,ENDLOOP
JMP    FUNB
```

Πρόβλεψη (150):

0



Απόφαση (150):

T

# Παράδειγμα 1-bit predictor

0x108: for(i=0; i < 100000; i++) {

.....

0x144: if( ( i % 100) == 0 )

callA( );

0x150: if( (i & 1) == 1)

callB( );

}



AND	R1,R2,#1
SUB	R1,#1
BNEZ	R1,ENDLOOP
JMP	FUNB

Πρόβλεψη (150):

0 T



Απόφαση (150):

T N

# Παράδειγμα 1-bit predictor

0x108: for(i=0; i < 100000; i++) {

.....

0x144: if( ( i % 100) == 0 )

callA( );

0x150: if( (i & 1) == 1)

callB( );

}



```
AND    R1,R2,#1
SUB    R1,#1
BNEZ   R1,ENDLOOP
JMP    FUNB
```

Πρόβλεψη (150):

0 T N



Απόφαση (150):

T N T

# Παράδειγμα 1-bit predictor

```
0x108: for(i=0; i < 100000; i++) {
```

```
.....
```

```
0x144:   if( ( i % 100) == 0 )  
          callA( );
```

```
0x150:   if( (i & 1) == 1)  
          callB( );
```

```
}
```

Misprediction = 1/1

Prediction Rate = 0%

Πρόβλεψη (150):

Ο Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν

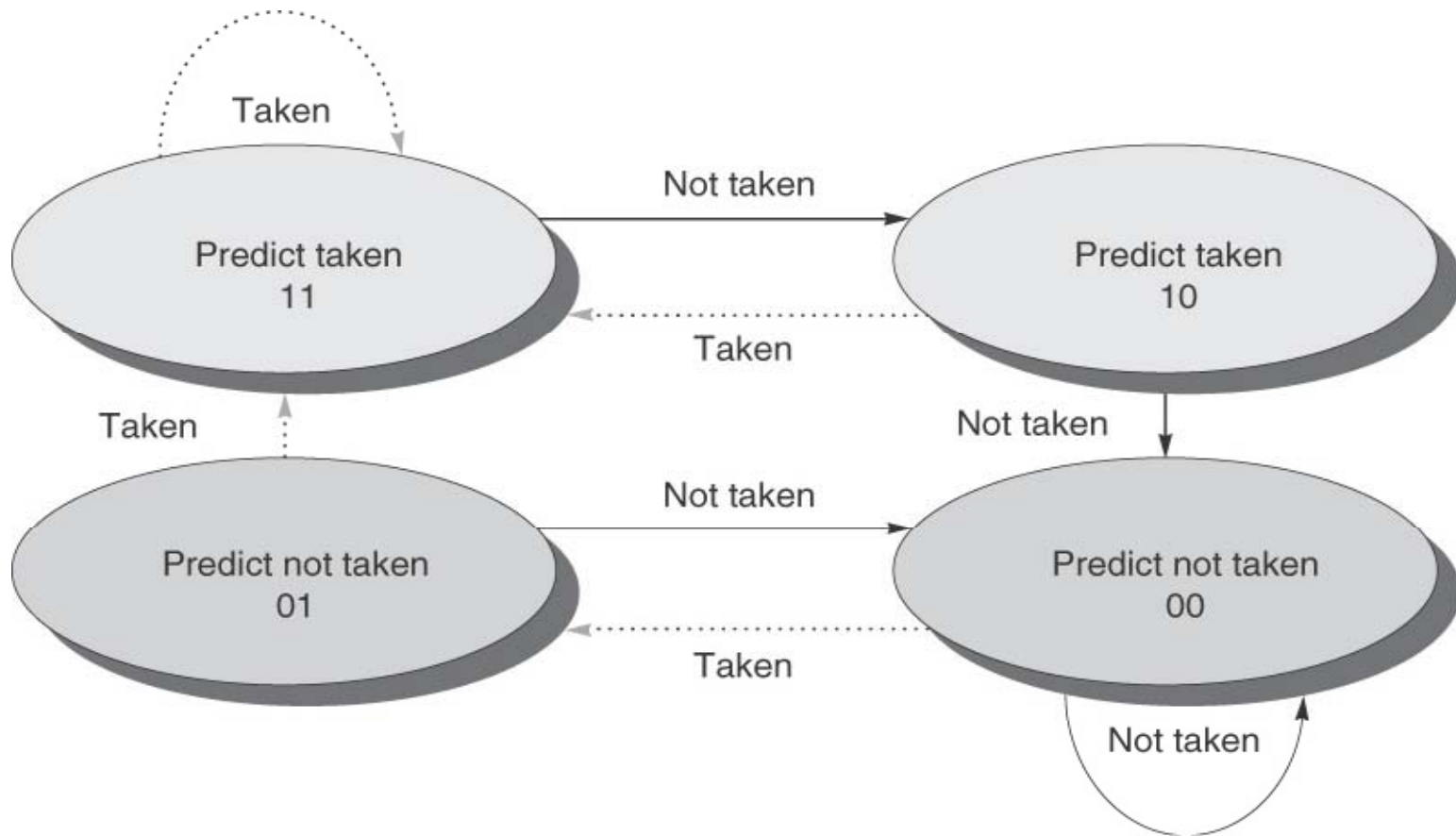


Απόφαση (150):

Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ Ν Τ

# Δυναμικές Τεχνικές Πρόβλεψης

- 2-bit predictor



# Παράδειγμα 2-bit predictor

```
0x108: for(i=0; i < 100000; i++) {
```

```
.....
```

```
0x144:   if( ( i % 100) == 0 )
```

```
         callA( );
```

```
0x150:   if( (i & 1) == 1)
```

```
         callB( );
```

```
}
```

0,1 :Predict Not Taken

2,3 :Predict Taken

Πρόβλεψη (108):

1



Απόφαση (108):

T

# Παράδειγμα 2-bit predictor

0x108: for(i=0; i < 100000; i++) {

.....

0x144: if( ( i % 100) == 0 )

callA( );

0x150: if( (i & 1) == 1)

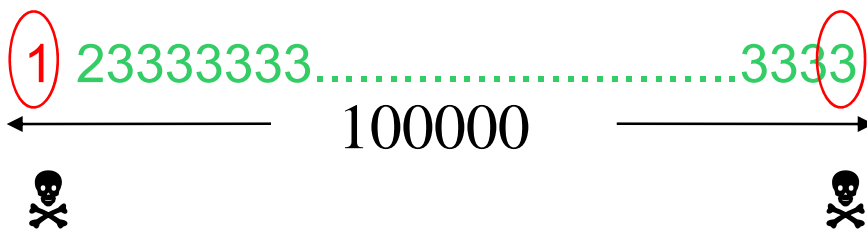
callB( );

}

0,1 : Predict Not Taken

2,3 : Predict Taken

Πρόβλεψη (108):



Απόφαση (108):





# Παράδειγμα 2-bit predictor

0x108: for(i=0; i < 100000; i++) {

.....

0x144: if( ( i % 100) == 0 )

callA( );

0x150: if( (i & 1) == 1)

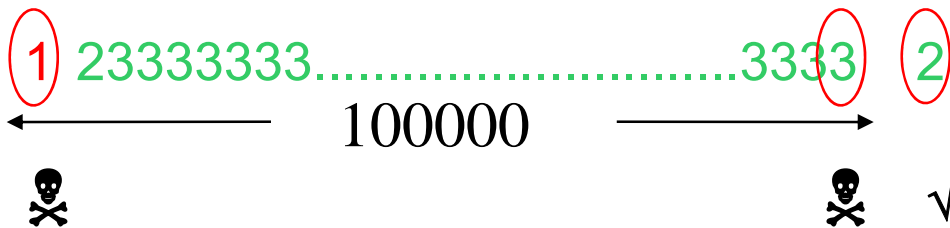
callB( );

}

0,1 : Predict Not Taken

2,3 : Predict Taken

Πρόβλεψη (108):



Απόφαση (108):



# Παράδειγμα 2-bit predictor

```
0x108: for(i=0; i < 100000; i++) {  
    .....  
0x144:  if( ( i % 100) == 0 )  
        callA( );  
0x150:  if( (i & 1) == 1)  
        callB( );  
}
```

Misprediction  $\approx$  1 per N branches

0x108 Prediction Rate = 99.999%

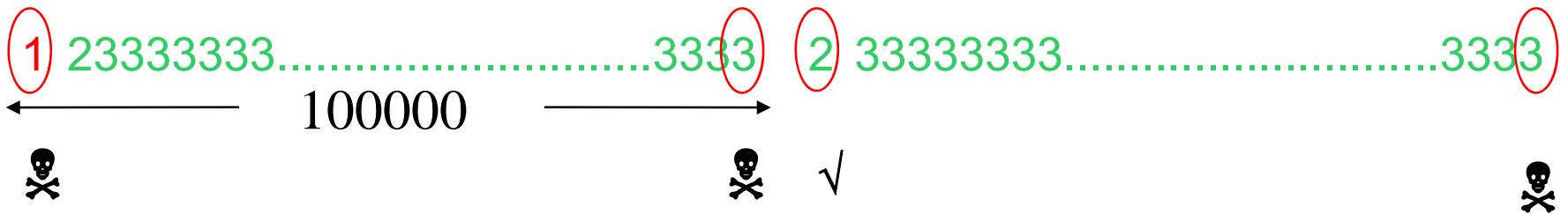
0x144 Prediction Rate = 99%

0x150 Prediction Rate = 50%

0,1 : Predict Not Taken

2,3 : Predict Taken

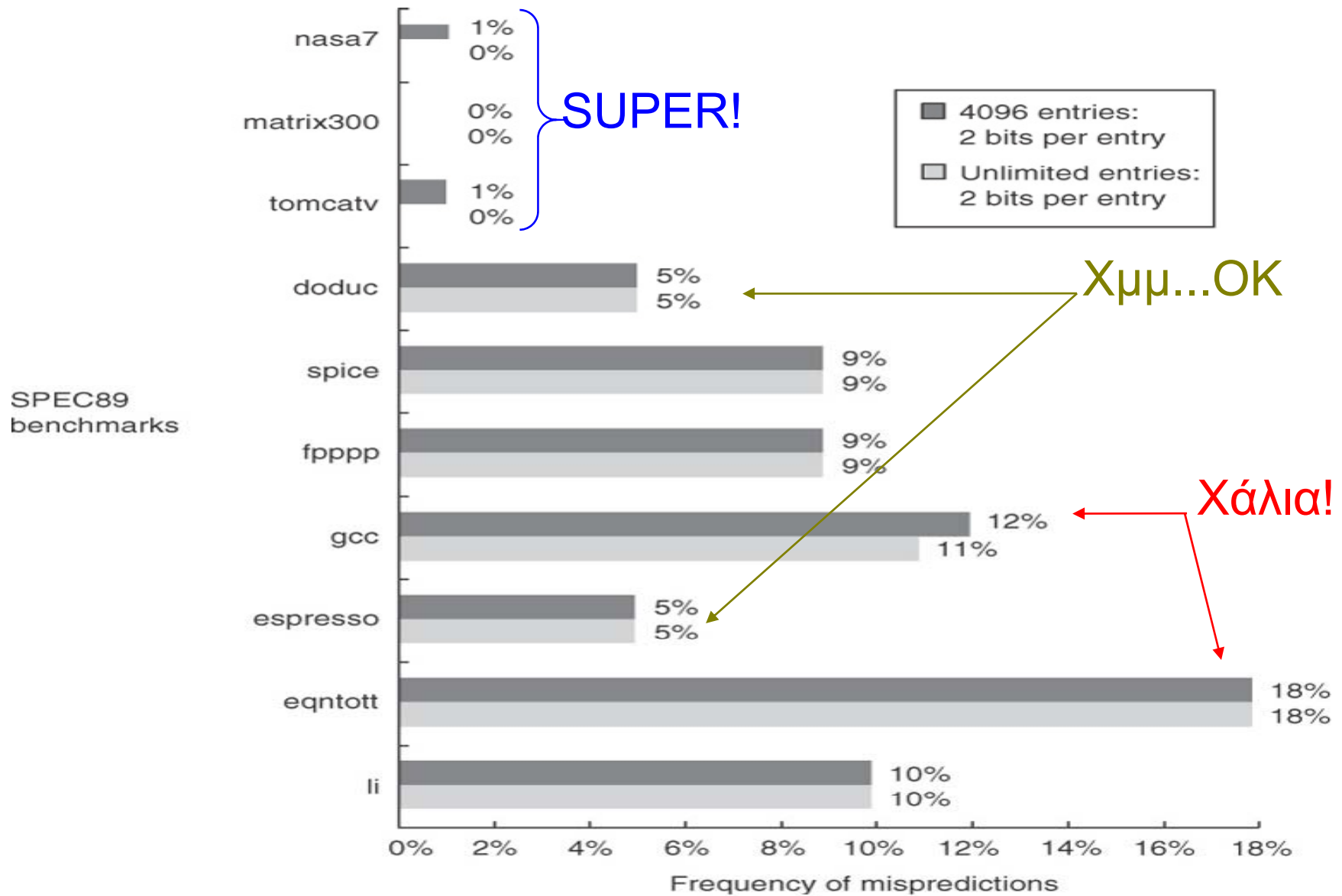
Πρόβλεψη (108):



Απόφαση (108):



# Ακρίβεια Πρόβλεψης για 2-bits predictor



# Δυναμικές Τεχνικές Πρόβλεψης

- **Χρονική Συσχέτιση (Temporal Correlation)**
  - Όλες οι προηγούμενες τεχνικές προβλέπουν το αποτέλεσμα μιας εντολής διακλάδωσης με βάση τις αποφάσεις που πάρθηκαν σε προηγούμενες εκτελέσεις
- **Τοπική Συσχέτιση (Spatial Correlation)**
  - Πρόβλεψη μιας εντολής διακλάδωσης με βάση τη συμπεριφορά άλλων εντολών διακλάδωσης που προηγούνται στη ροή του προγράμματος

# Παράδειγμα

```

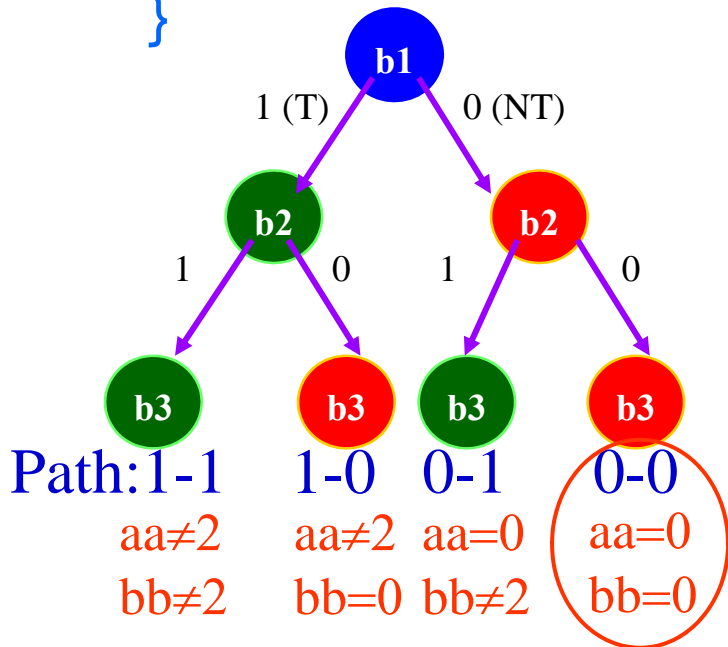
if (aa==2)
  aa = 0;
if (bb == 2)
  bb = 0;
if (aa != bb) {
  .....
}

```

```

DADDIU R3,R1,#-2
BNEZ   R3,L1      ;branch b1 (aa!=2)
DADD   R1,R0,R0  ;aa=0
L1:DADDIU R3,R2,#-2
BNEZ   R3,L2      ;branch b2 (bb!=2)
DADD   R2,R0,R0  ;bb=0
L2:DSUBU R3,R1,R2 ;R3=aa-bb
BEQZ   R3,L3      ;branch b3 (aa==bb)

```



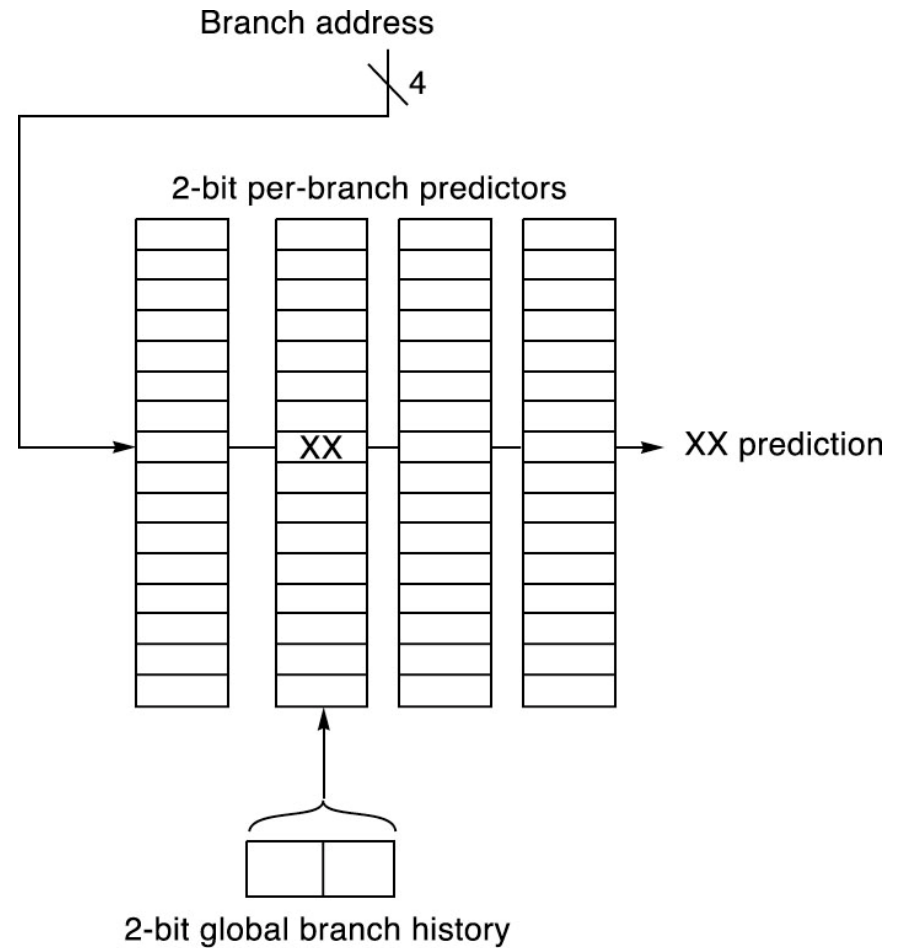
**Αν b1 και b2 NT (Not Taken) τότε b3 T (Taken) !**

# Correlating/Two-level Predictors

- Γενική περίπτωση : (m,n) predictor
  - m τελευταίες εντολές διακλάδωσης
  - επιλογή ενός από  $2^m$  predictors
  - Κάθε predictor είναι n-bits
- Ο 2-bit predictor είναι ένας (0,2) predictor αφού δεν χρησιμοποιεί την ιστορία των άλλων εντολών διακλάδωσης
- Απλή υλοποίηση
  - Branch History Register (BHR) : m-bit shift register για να καταγράφει τη συμπεριφορά των τελευταίων m εντολών διακλάδωσης
  - Pattern History Table (PHT) : Ο πίνακας που αποθηκεύονται οι predictors

# Global-History Two-Level Predictor

- (2,2) predictor
- 64 entries
- 4 low order bits PC
- 2 bits **global history**



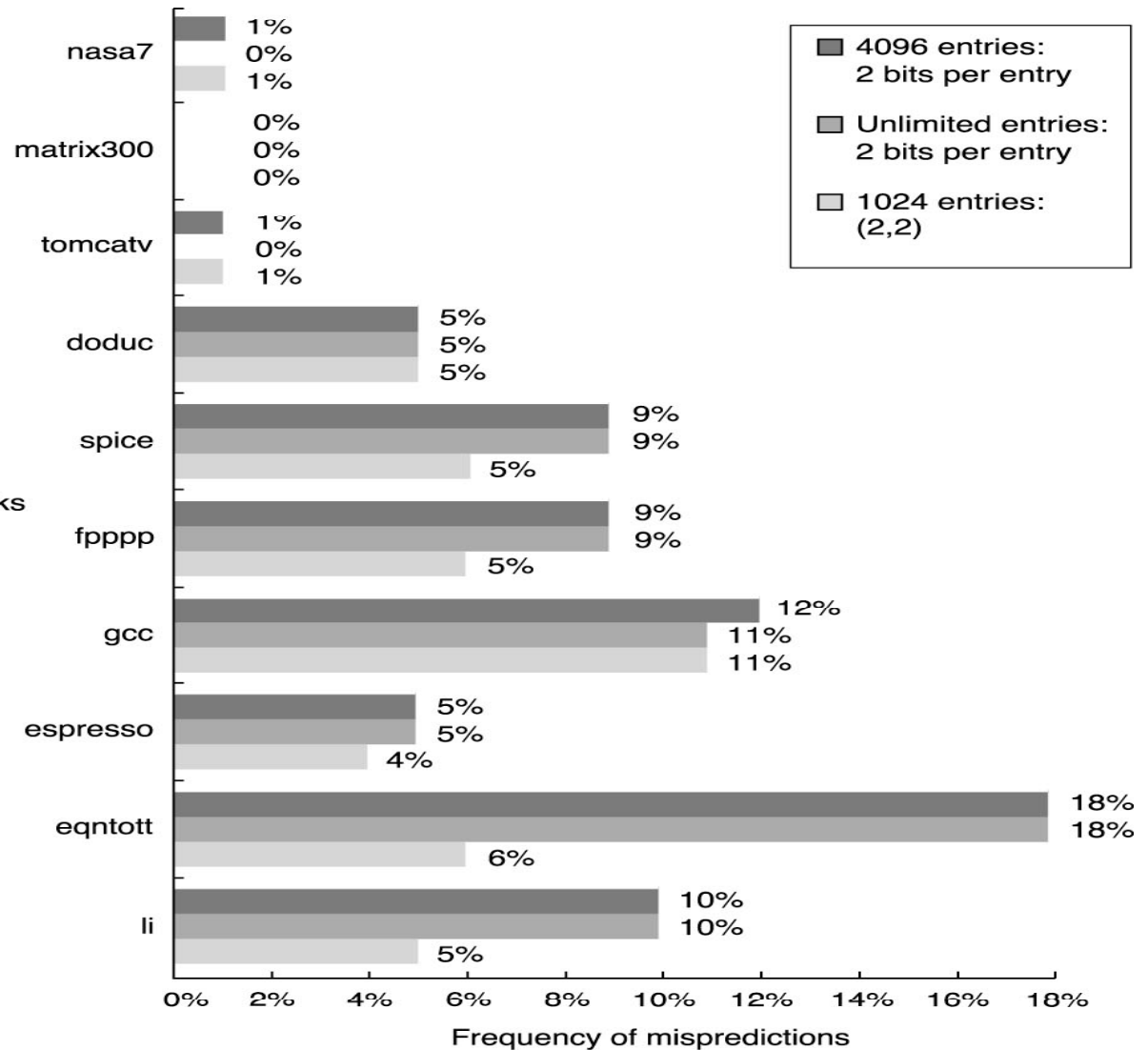
# Σύγκριση

- (0,2) predictor με 4096 εγγραφές (8K bits)

vs

- (2,2) predictor με 1024 εγγραφές (8K bits)

SPEC89 benchmarks





# Local-History Two-Level Predictor

- Αντί για τις  $m$  τελευταίες εντολές διακλάδωσης, παρακολουθούμε τις  $m$  τελευταίες εκτελέσεις της συγκεκριμένης εντολής
- Ο BHR αντικαθίσταται από τον BHT (Branch History Table)
  - 1 BHR ανά εντολή διακλάδωσης
- Ο global-history predictor αποτελεί ουσιαστικά υποπερίπτωση, όπου ο BHT έχει μόνο μια εγγραφή

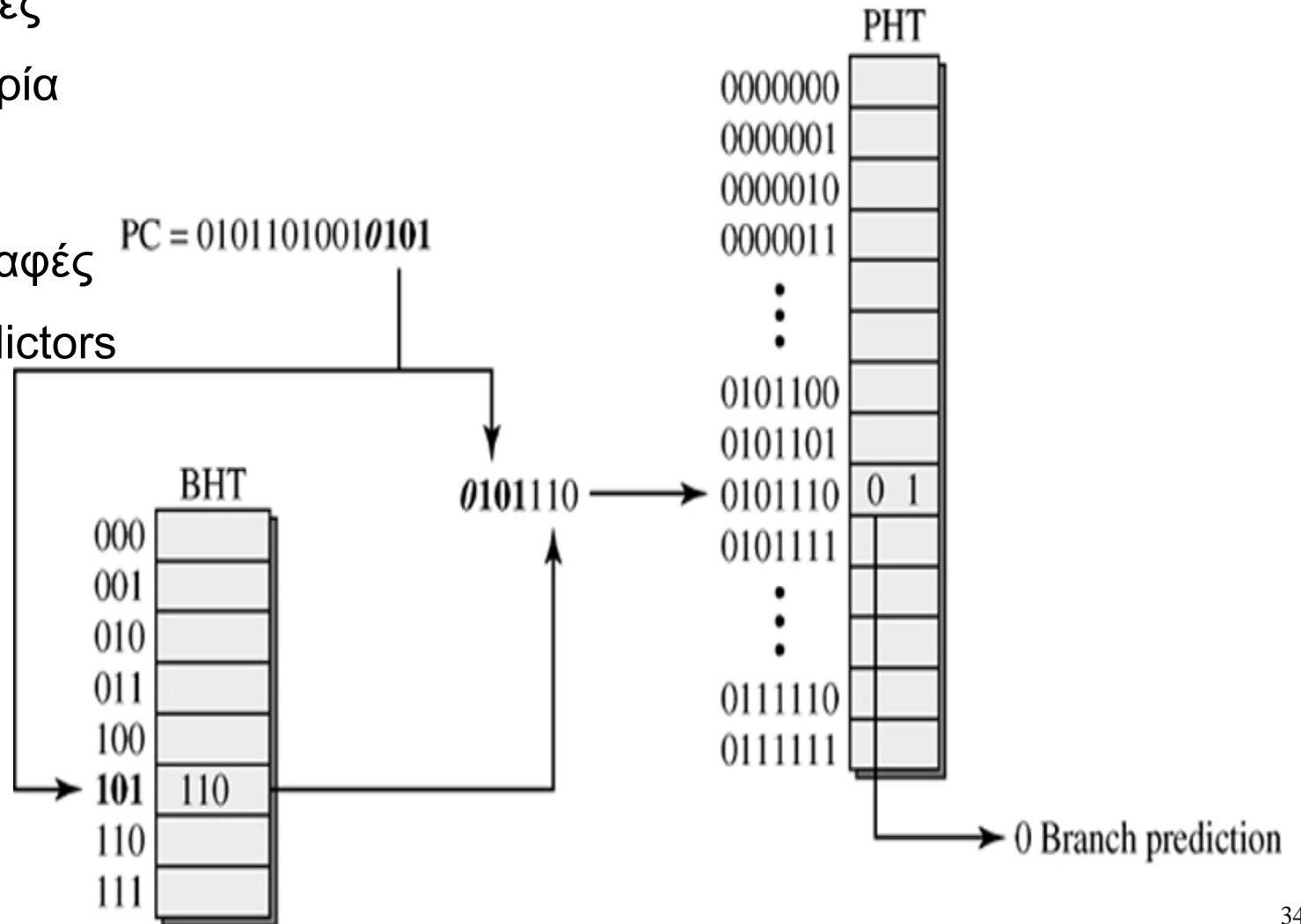
# Local-History Two-Level Predictor

- BHT

- 8 εγγραφές
- 3-bit ιστορία

- PHT

- 128 εγγραφές
- 2-bit predictors



# Tournament Predictors

- Δεν υπάρχει τέλειος predictor
  - Διαφορετικές εντολές άλματος παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά
- **ΙΔΕΑ** : Να κατασκευάσουμε ένα predictor που θα μαντεύει ποιος predictor μπορεί να μαντέψει ακριβέστερα το αποτέλεσμα ενός άλματος!

# Tournament Hybrid Predictor

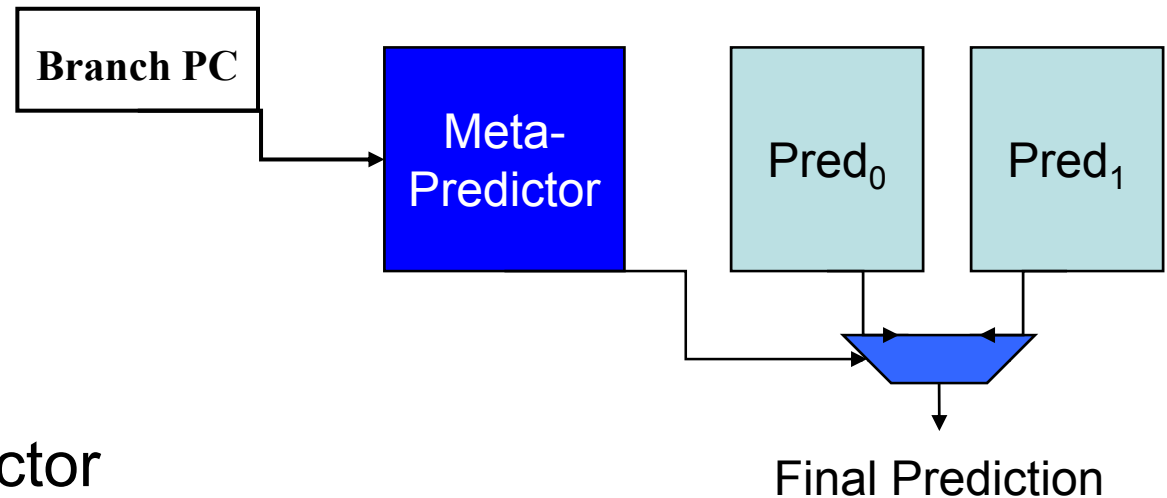
- meta-predictor

- 2-bit μετρητές
- 0,1 χρησιμοποιείται ο  $P_0$
- 2,3 χρησιμοποιείται ο  $P_1$

- Η τιμή του meta-predictor ενημερώνεται μόνο όταν οι δυο predictors κάνουν διαφορετική πρόβλεψη

- $Pred_0$ ,  $Pred_1$

- Συνδυασμοί των προηγούμενων συστημάτων

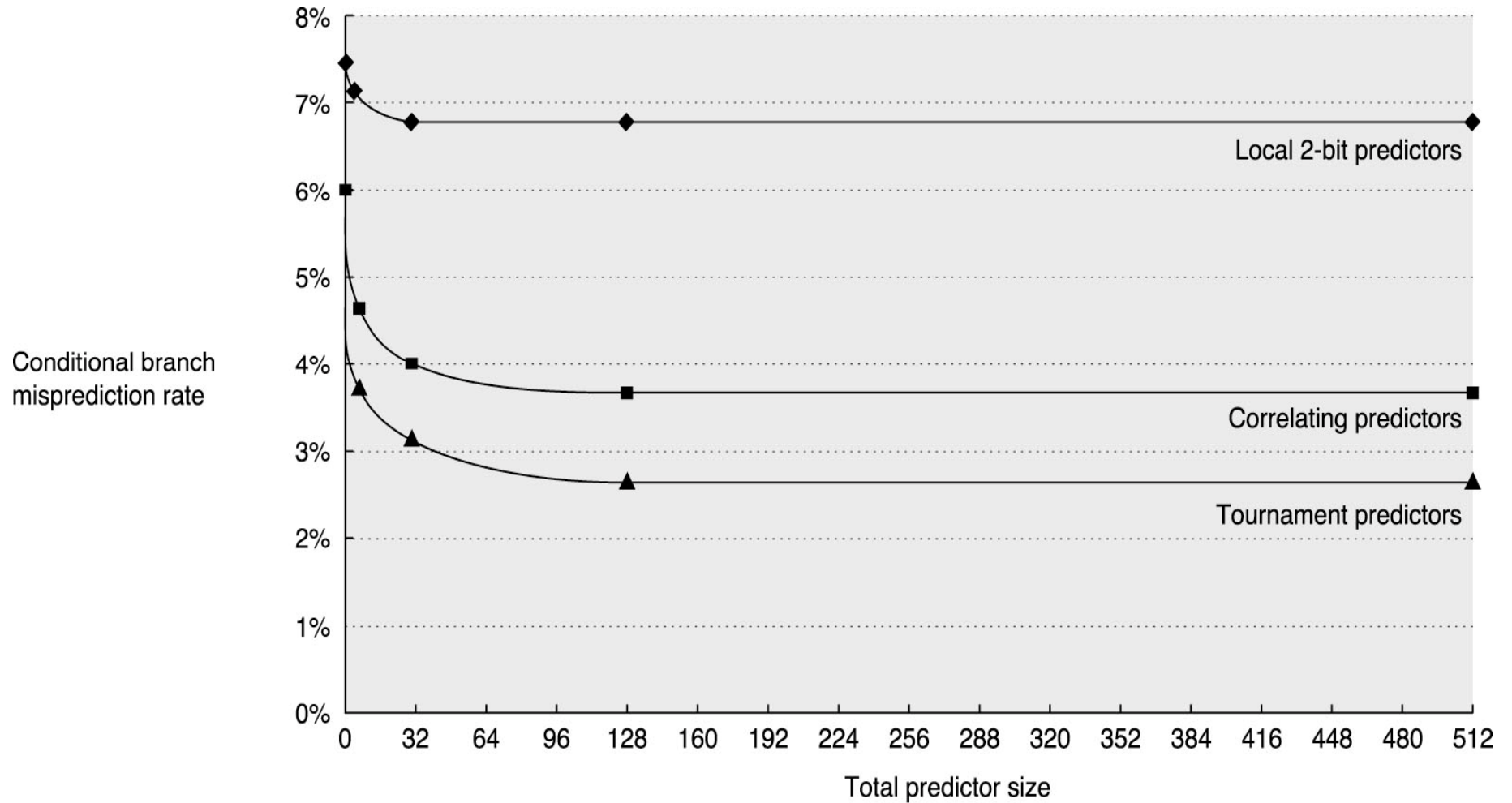


$Pred_0$	$Pred_1$	Meta Update
Λάθος	Λάθος	---
Λάθος	Σωστή	+1
Σωστή	Λάθος	-1
Σωστή	Σωστή	---

## Παράδειγμα: Alpha 21264

- Meta-predictor
  - 4K εγγραφές
  - κάθε εγγραφή είναι ένας 2-bit predictor
  - προσπέλαση με βάση το PC της εντολής διακλάδωσης
- $\text{Pred}_0$  : Local-history two-level predictor
  - BHT: 1K 10-bit εγγραφές
  - PHT: 1K 3-bit predictors
- $\text{Pred}_1$  : Global-history two-level predictor
  - PHT: 4K 2-bit predictors
- Σύνολο : 29K bits
- SPECfp95 : misprediction = 1 / 1000 instructions
- SPECint95: misprediction = 11.5/1000 instructions

# Σύγκριση Δυναμικών Τεχνικών Πρόβλεψης



© 2003 Elsevier Science (USA). All rights reserved.

## Πρόβλεψη Προορισμού

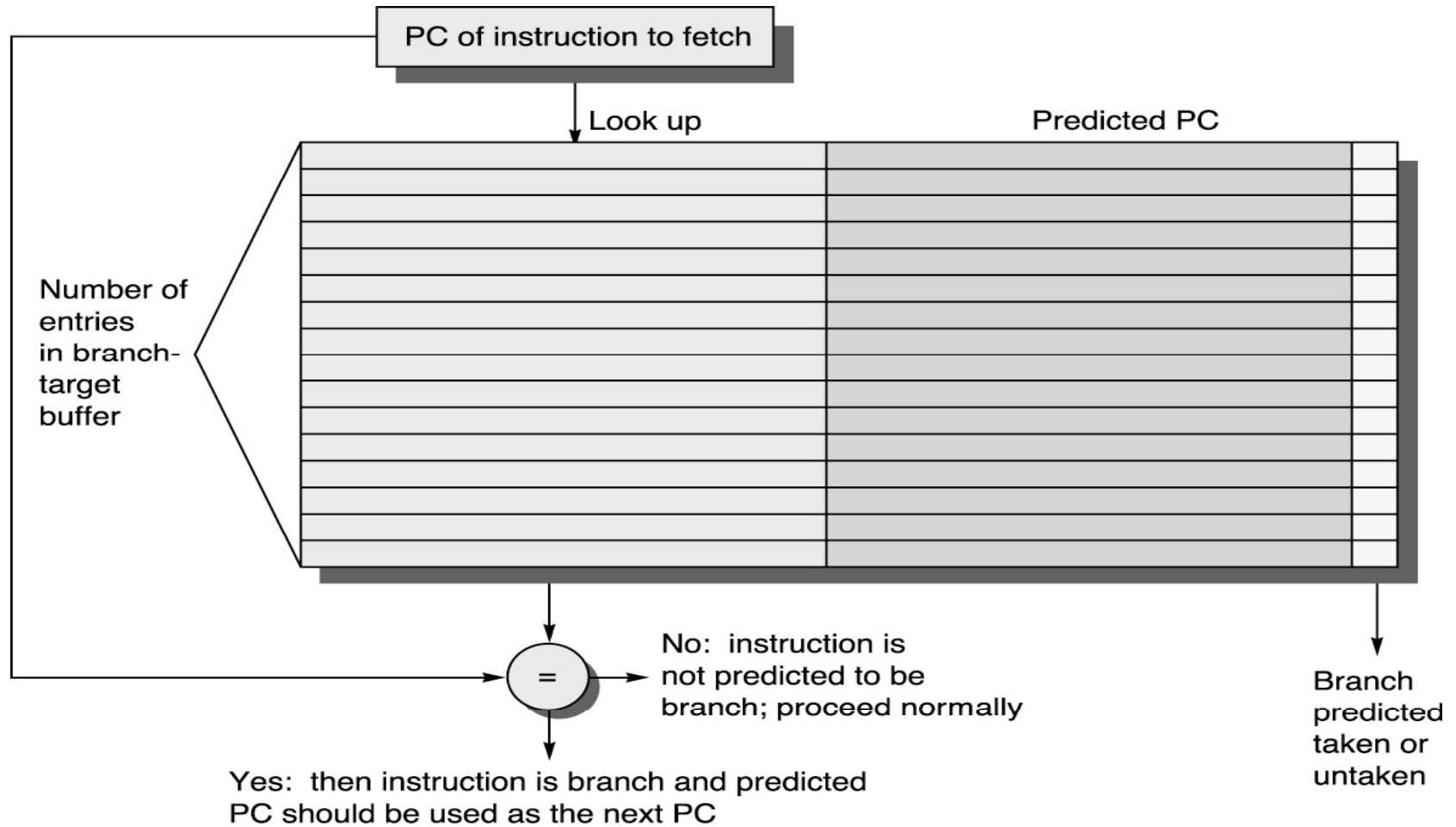
- Όλα τα προηγούμενα συστήματα προβλέπουν μόνο το ποιο μονοπάτι μιας εντολής διακλάδωσης θα ακολουθηθεί
- Χρειάζεται όμως και ο προορισμός-στόχος (target)
  - Not taken: Προορισμός =  $PC + \text{instruct\_word\_size}$
  - Taken : Προορισμός = ???
    - » Άμεσος :  $PC + \text{offset}$
    - » Έμμεσος :  $\text{register\_value} + \text{offset}$  (π.χ. Object-oriented programs, subroutines returns, dynamically linked libraries)
- Για να διατηρήσουμε υψηλό throughput πρέπει στο τέλος κάθε κύκλου να γνωρίζουμε το επόμενο PC
- Για κάποια άλματα με έμμεσο προορισμό, γίνεται γνωστός μετά το EX
- Ακόμα και για τα υπόλοιπα πρέπει να περιμένουμε μέχρι το τέλος του ID

## Branch-Target Buffer (BTB)

- Μια μικρή cache (direct-mapped / associative)
- Αποθηκεύει τον προορισμό (target) της εντολής άλματος
- Προσπέλαση κατά τη διάρκεια του IF, ώστε την ώρα που φέρνουμε μια εντολή ταυτόχρονα προβλέπουμε από που θα χρειαστεί να φέρουμε την επόμενη
- Περιέχει
  - **Instruction Address**
  - **Predicted PC**
- Αποθηκεύουμε μόνο άλματα που έχουν εκτελεστεί (taken branches και jumps)

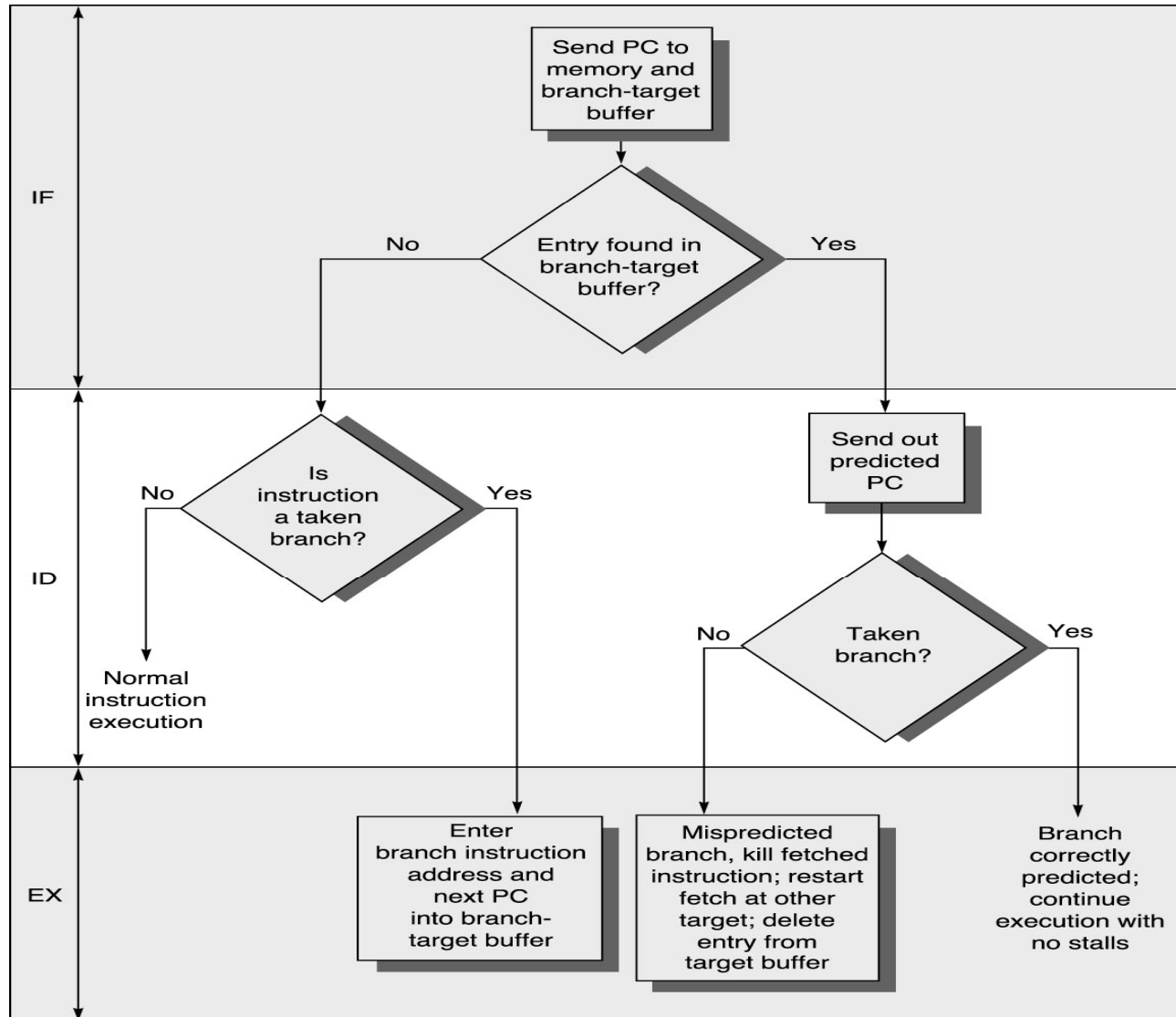


# Branch-Target Buffer



© 2003 Elsevier Science (USA). All rights reserved.

# Χρήση BTB



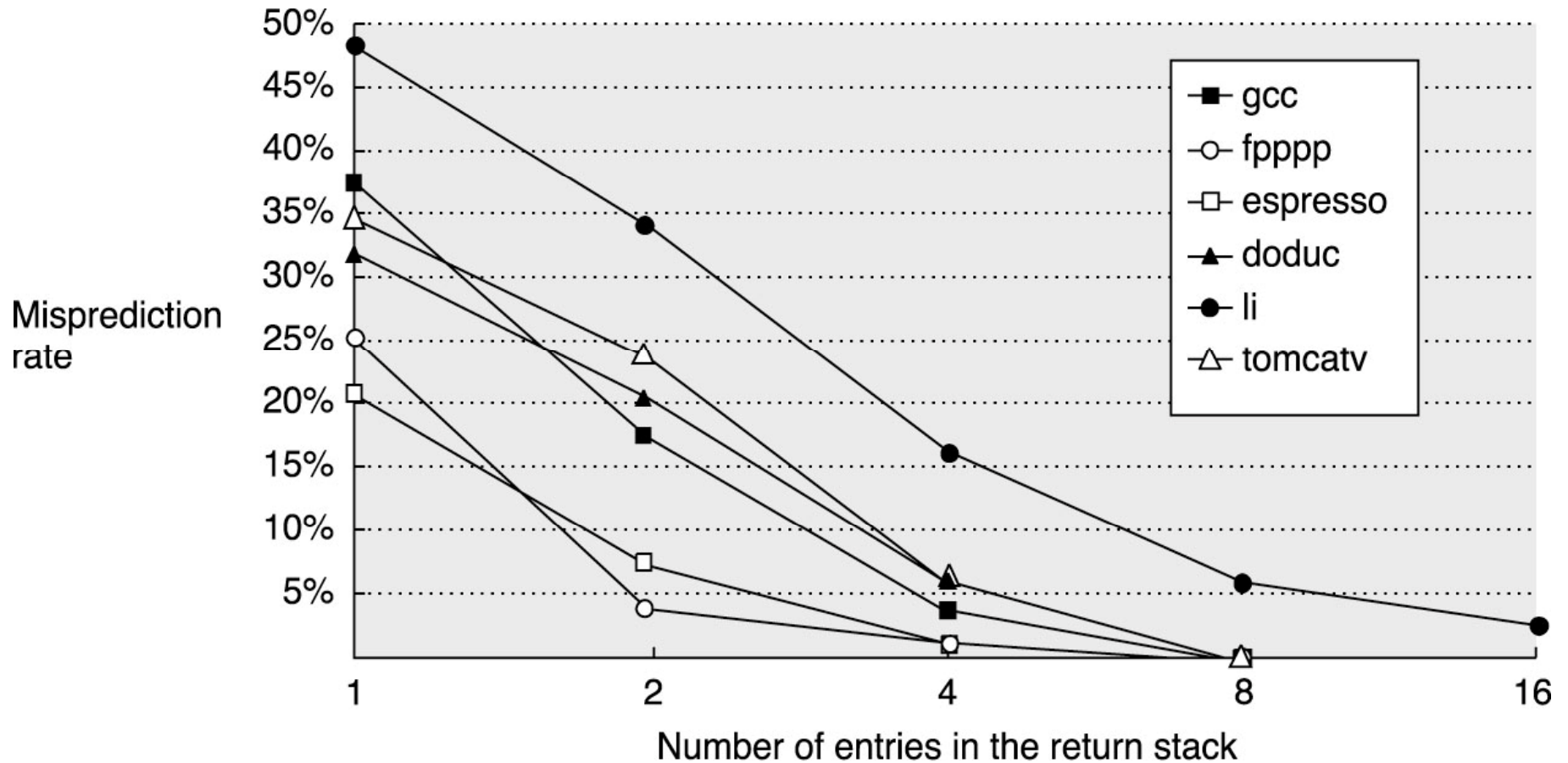
## Return Address Stack (RAS)

- SPEC89 : 85% των έμμεσων αλμάτων είναι function returns
- Προορισμός
  - Δύσκολος να υπολογιστεί. Γίνεται γνωστός μετά το EX.
  - Δύσκολα μπορεί να προβλεφθεί με τον BTB, μιας και ένα function μπορεί να κληθεί από πολλά διαφορετικά σημεία.

## Return Address Stack (RAS)

- Ο προορισμός ενός return είναι ΠΑΝΤΑ η επόμενη διεύθυνση της τελευταίας εντολής call
- Χρήση ενός stack (FILO)
  - Εκτέλεση call → push address into RAS
  - Εκτέλεση return → pop address into RAS

# Return Address Stack (RAS)



© 2003 Elsevier Science (USA). All rights reserved.