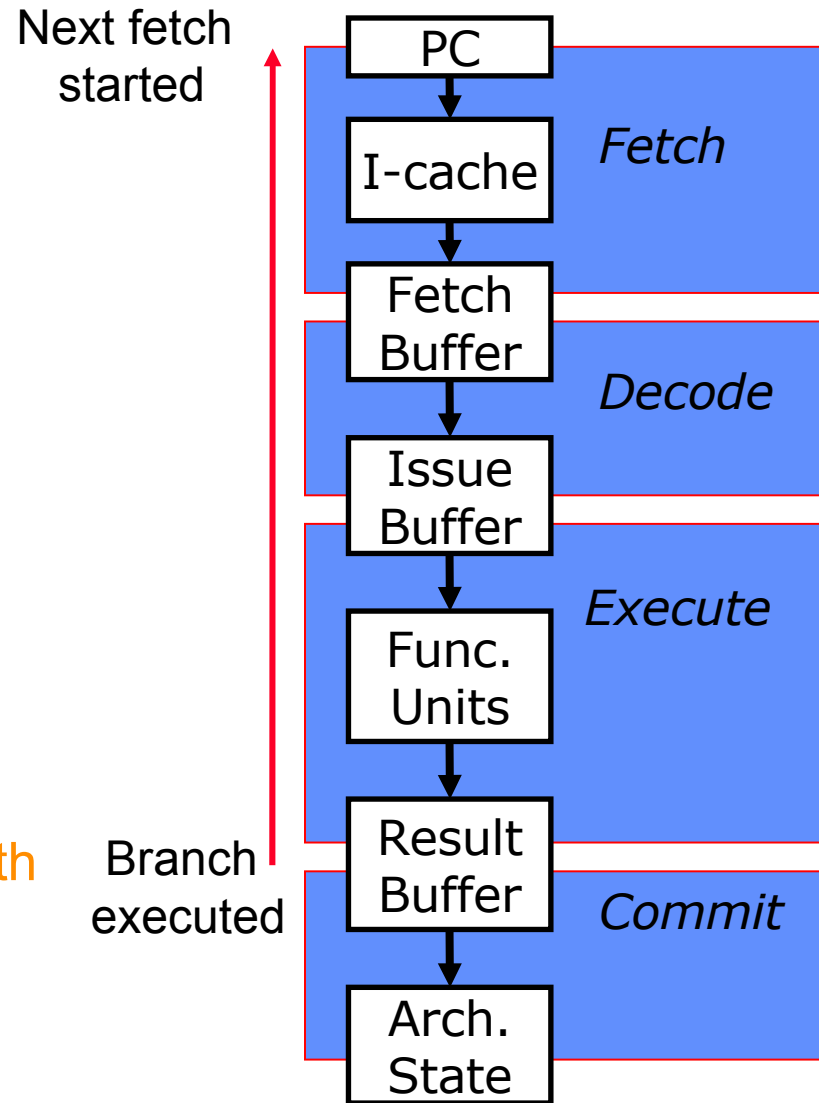


Μέθοδοι Πρόβλεψης Διακλαδώσεων (Branch Prediction Mechanisms)

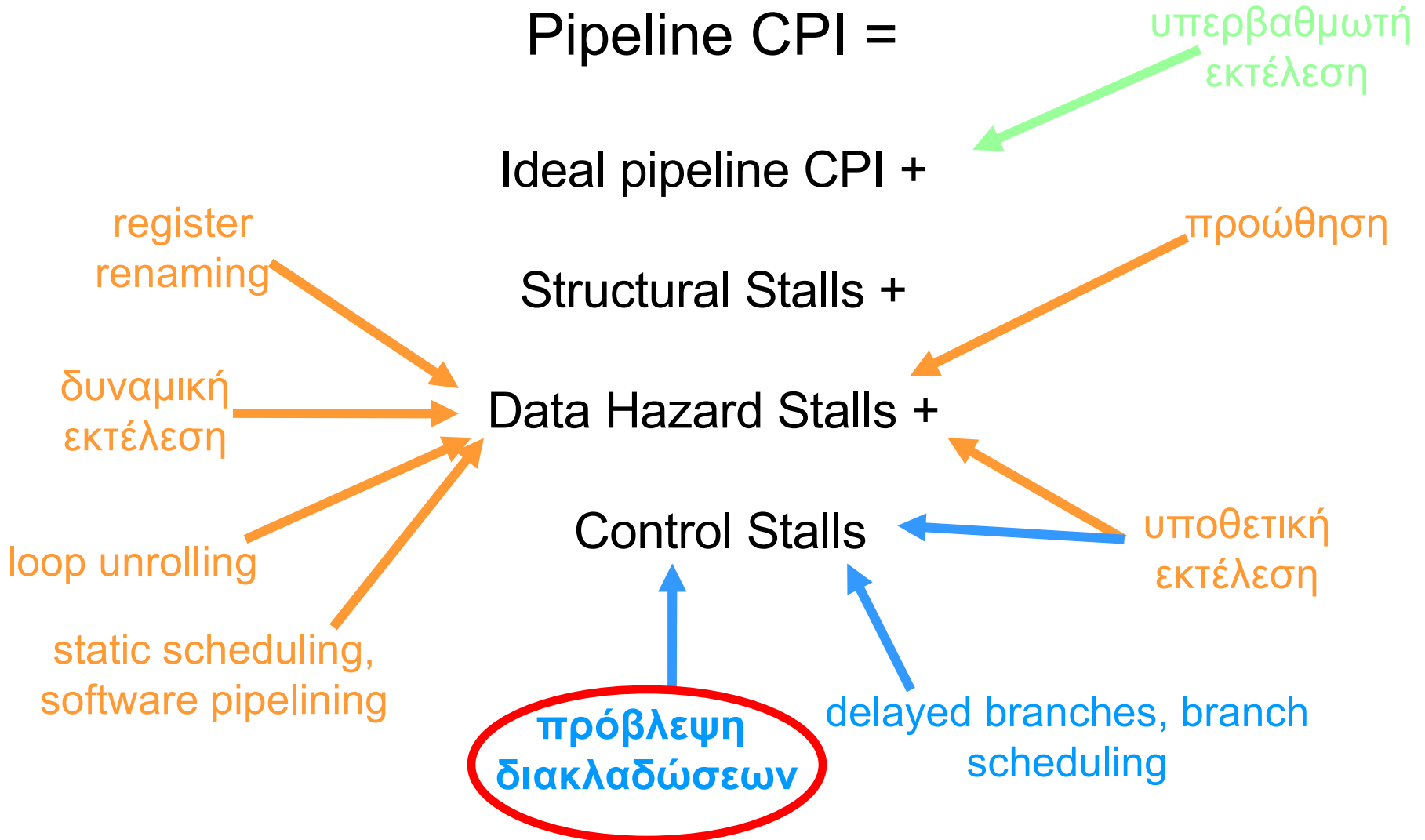
Εντολές Διακλάδωσης

- 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 αν 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)

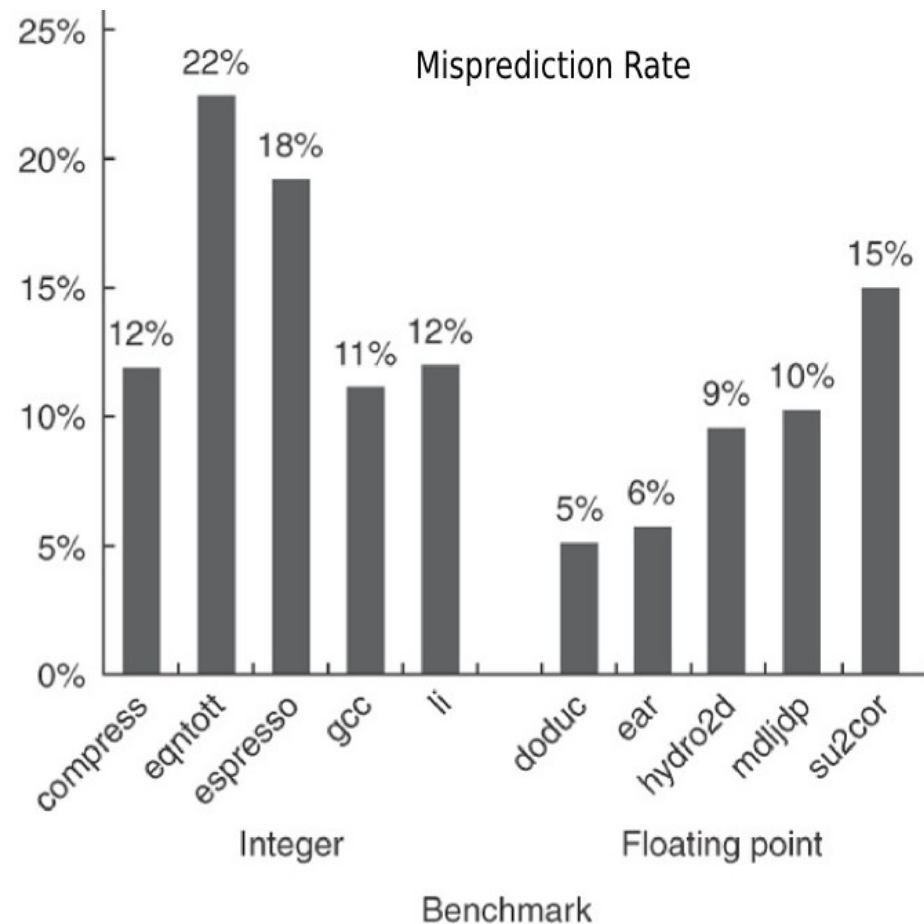
- BTFNT

- 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



Δυναμικές Τεχνικές Πρόβλεψης

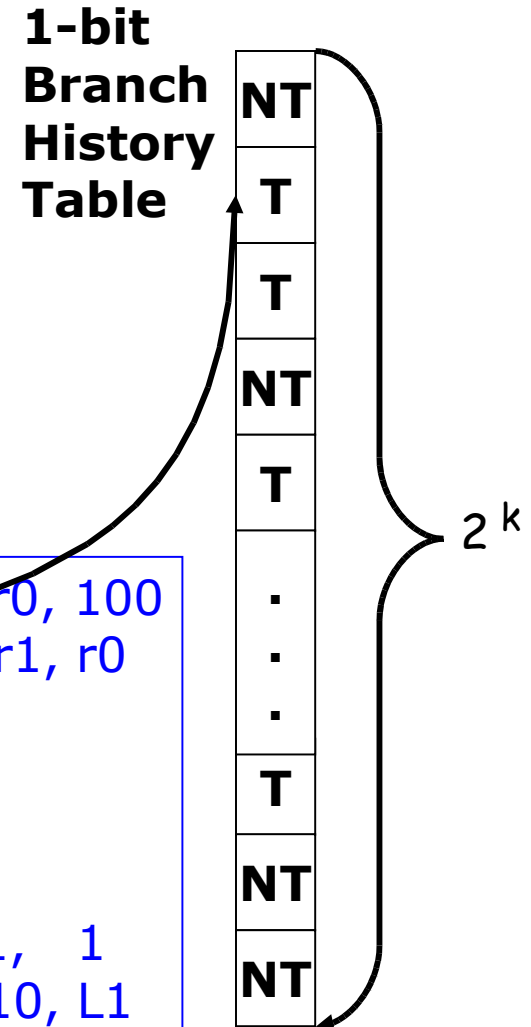
- 1-bit predictor

- 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



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



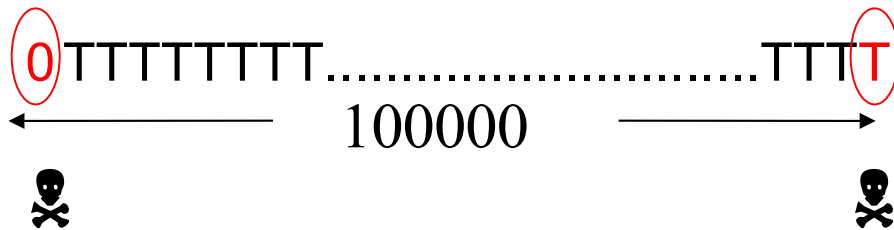
Απόφαση (108):

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):



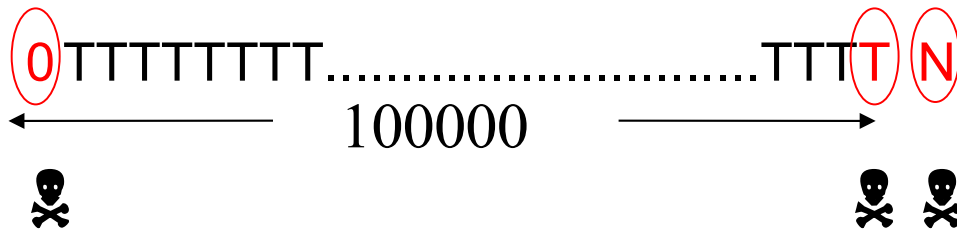
Απόφαση (108):



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();

}



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):

ON TTTTTTTT.....TTTT

← 100 →



Απόφαση (144):

NTTTTTTTT.....TTTN

Παράδειγμα 1-bit predictor

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

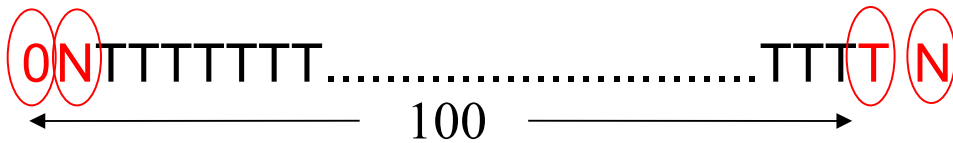
.....
0x144: if((i % 100) == 0)
 callA();



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( );
```

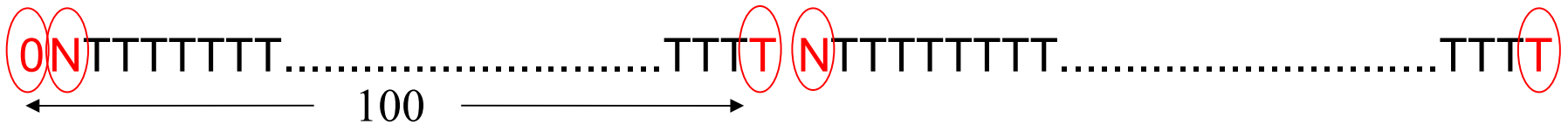
```
0x150:   if( (i & 1) == 1)
          callB( );
```

```
}
```

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)

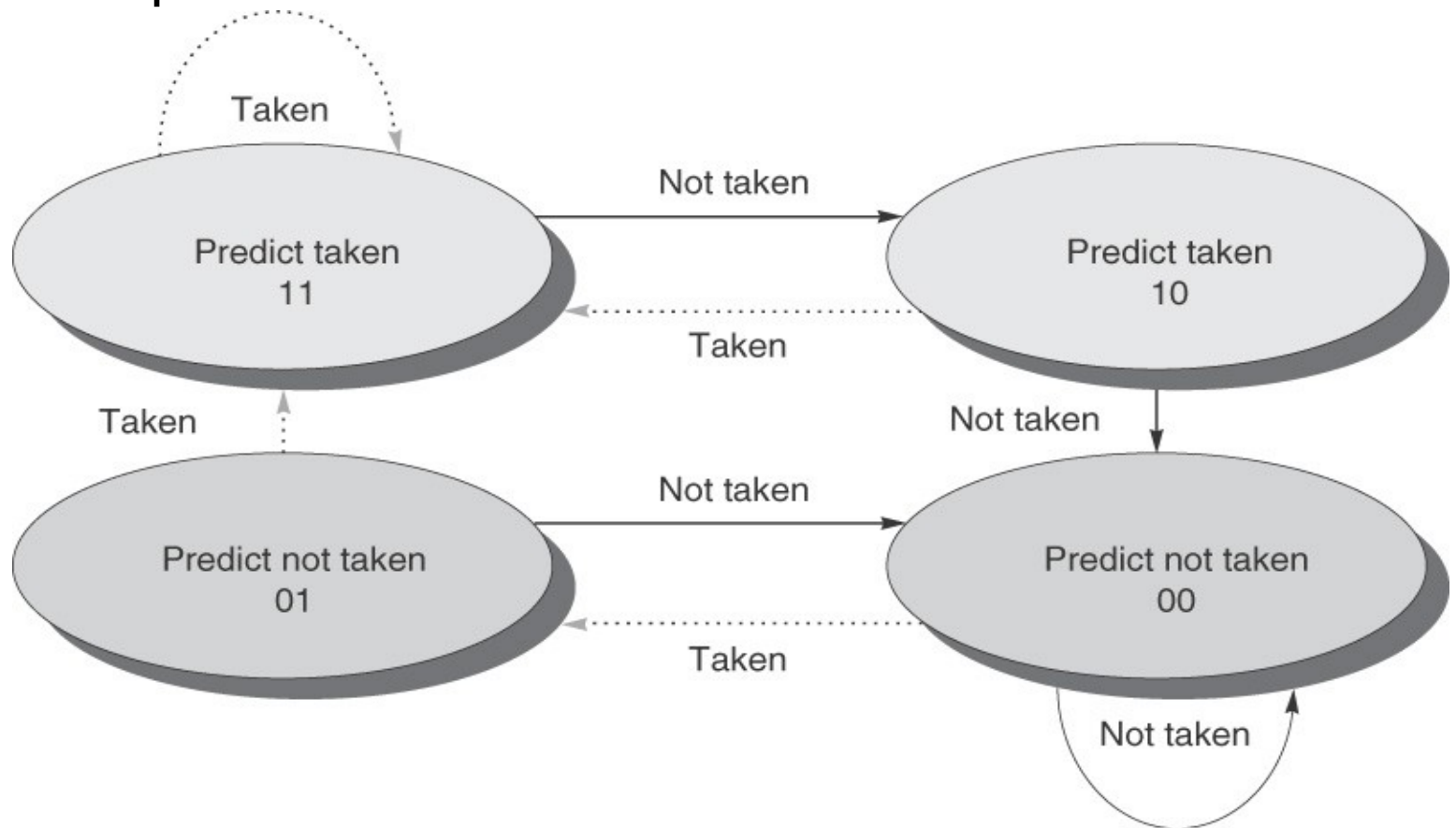


Απόφαση (150):

(T) (N) (T)

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)
```

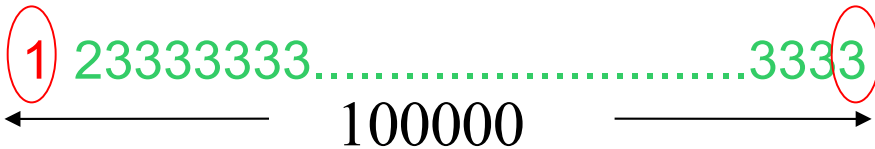
```
         callB( );
```

```
}
```

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)
```

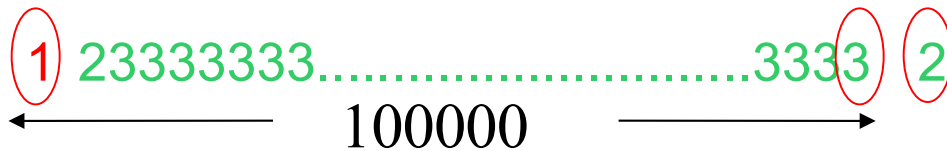
```
        callB( );
```

```
}
```

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%

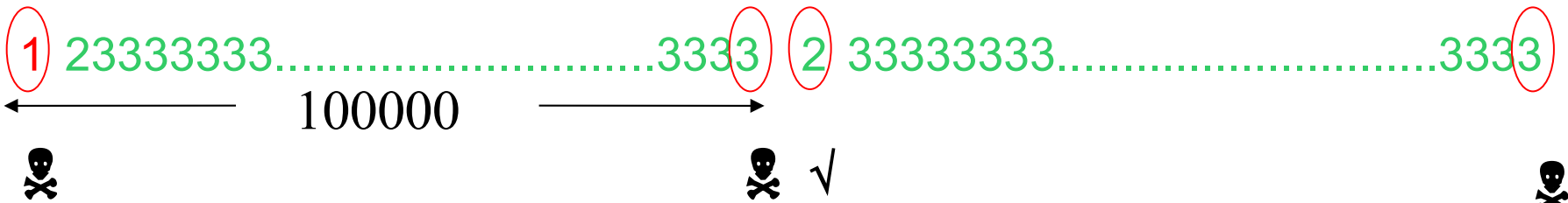
0x144 Prediction Rate = 99%

0x150 Prediction Rate = 50%

0,1 : Predict Not Taken

2,3 : Predict Taken

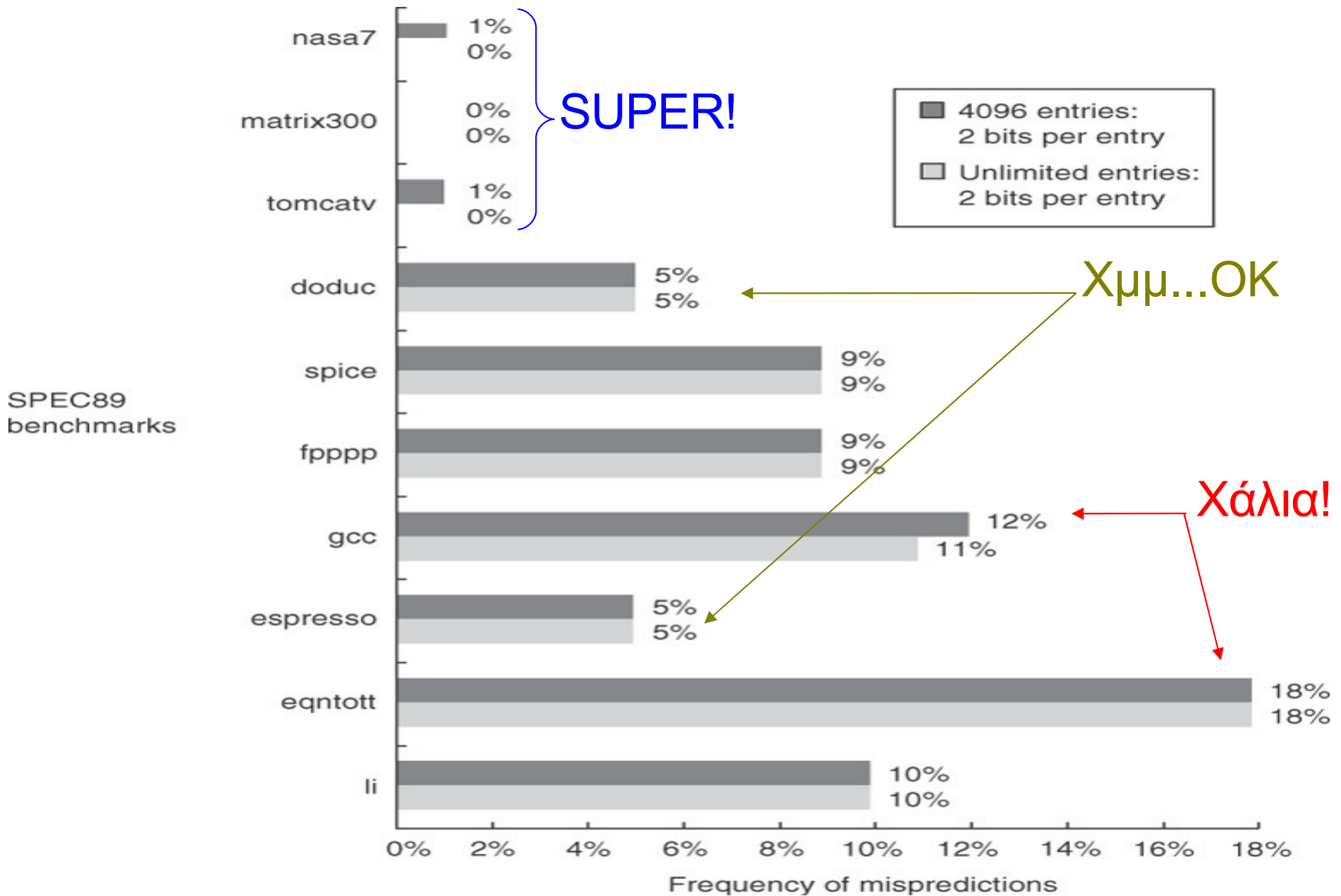
Πρόβλεψη (108):



Απόφαση (108):



Ακρίβεια Πρόβλεψης για 2-bits predictor



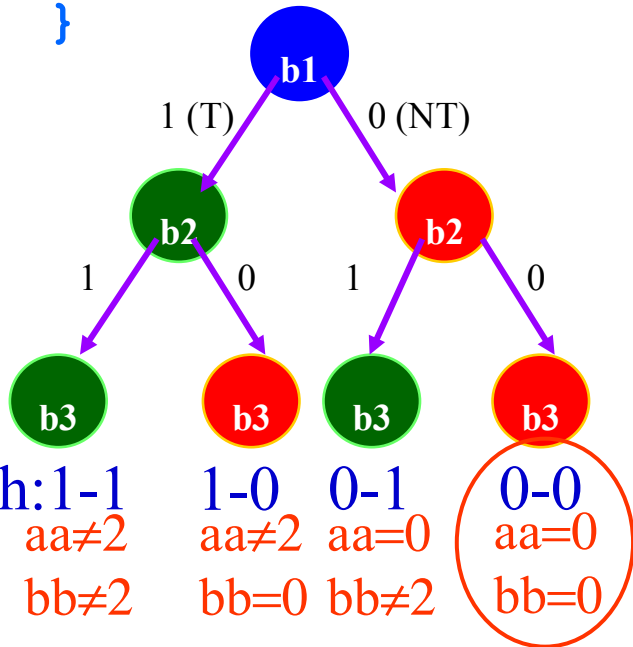
Δυναμικές Τεχνικές Πρόβλεψης

- **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)
```



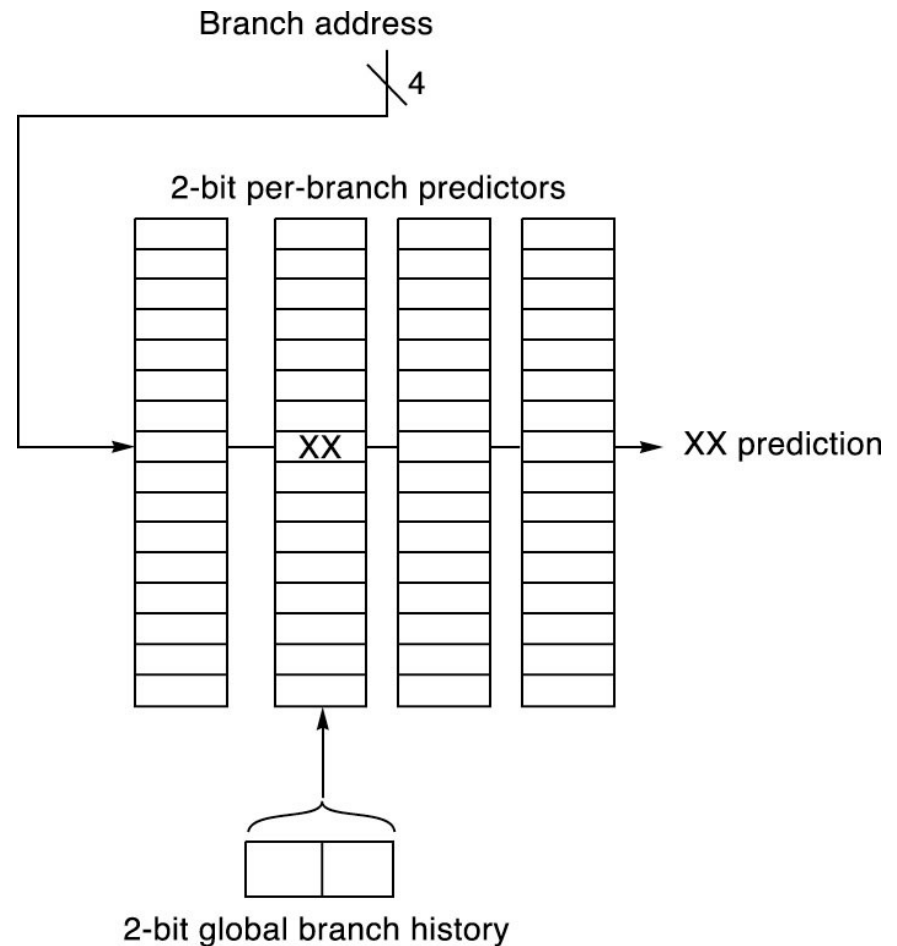
Αν b1 και b2 NT (Not Taken) τότε b3 T (Taken) !

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**



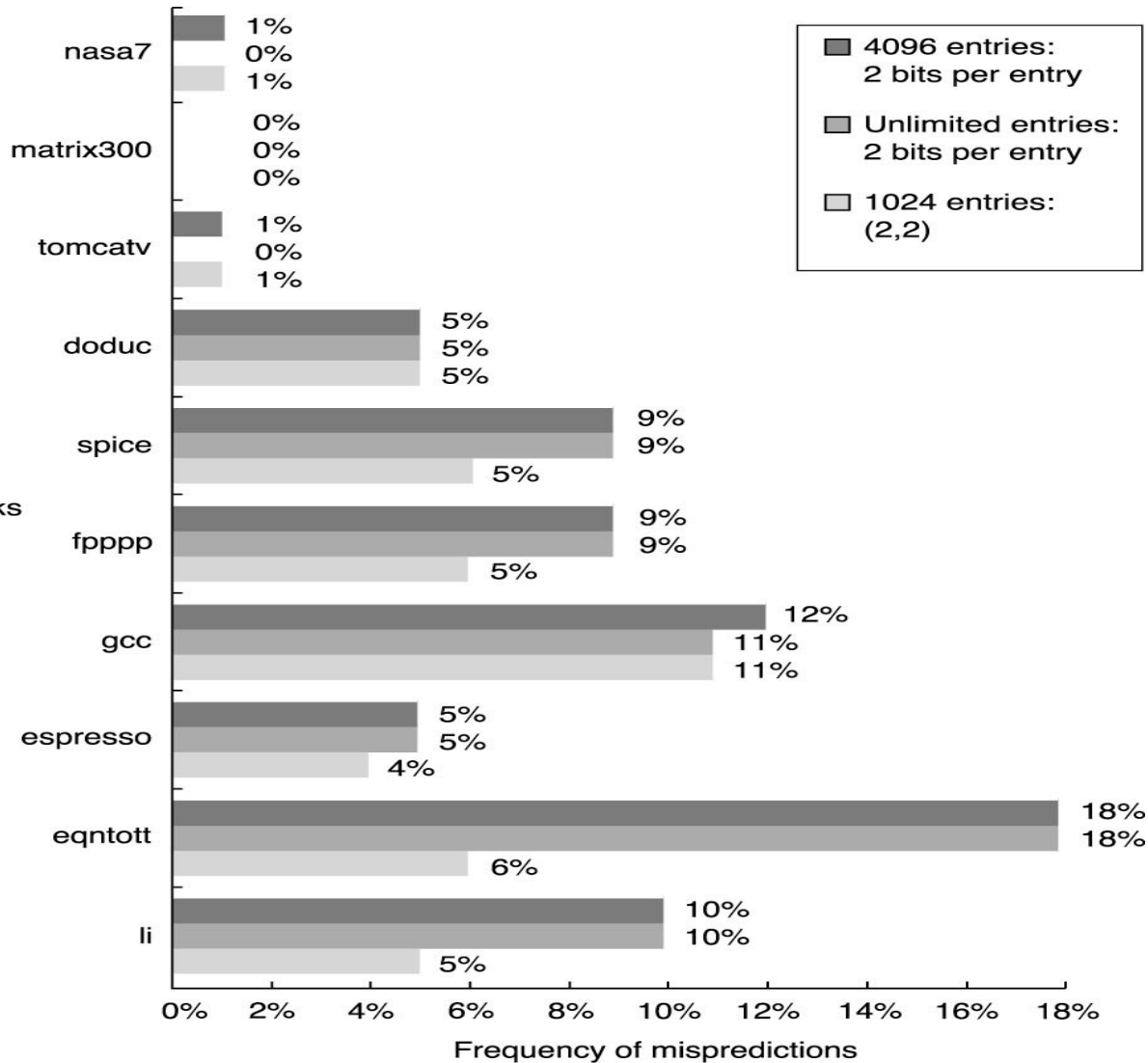
Σύγκριση

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

vs

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

SPEC89 benchmarks

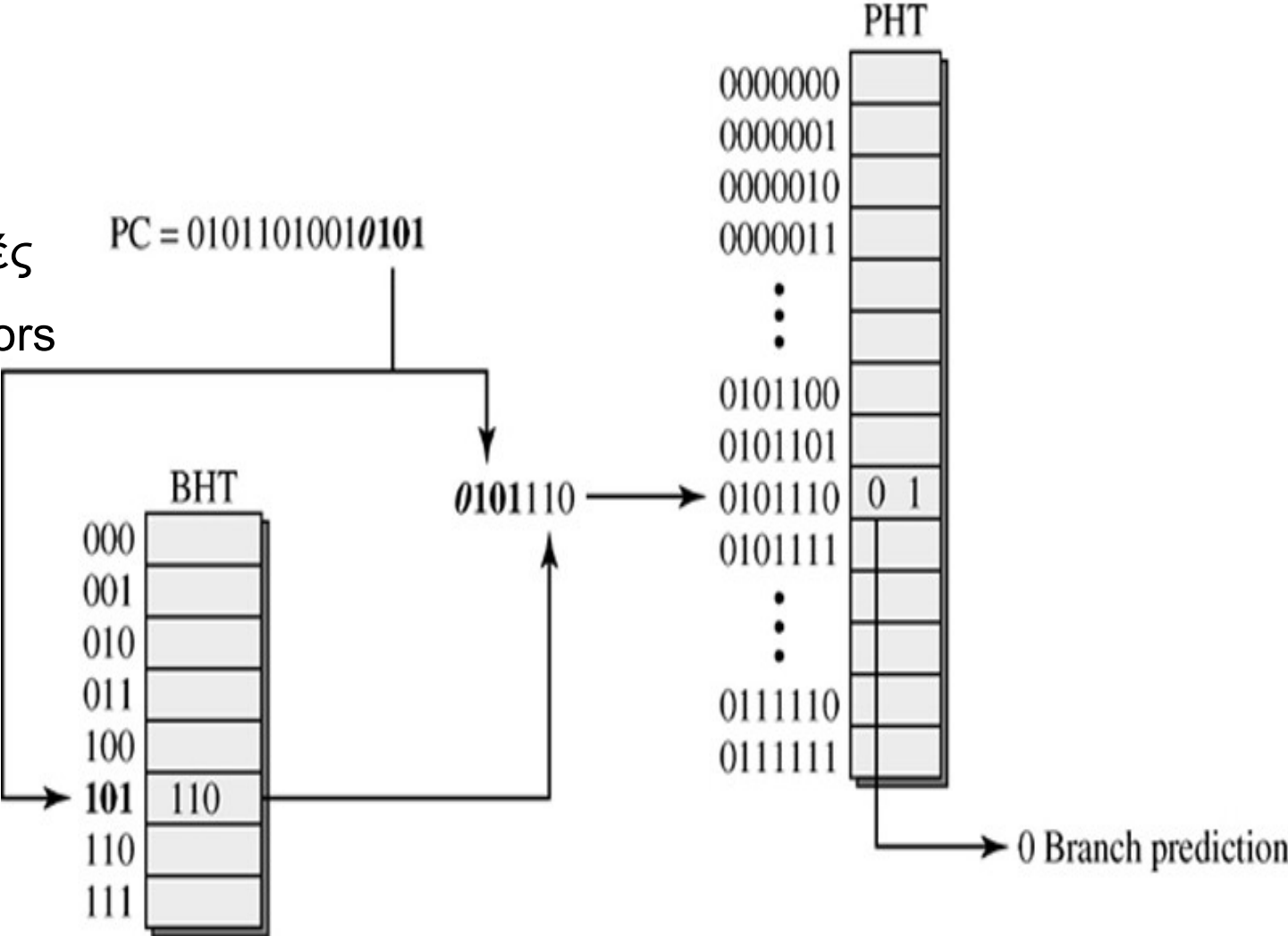


Local-History Two-Level Predictor

- 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

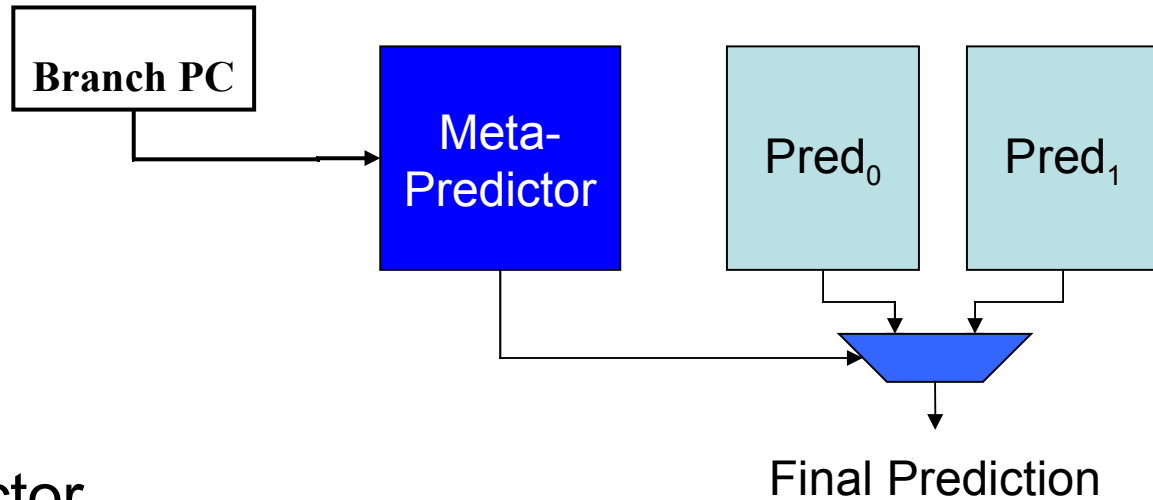
- meta-predictor

- 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

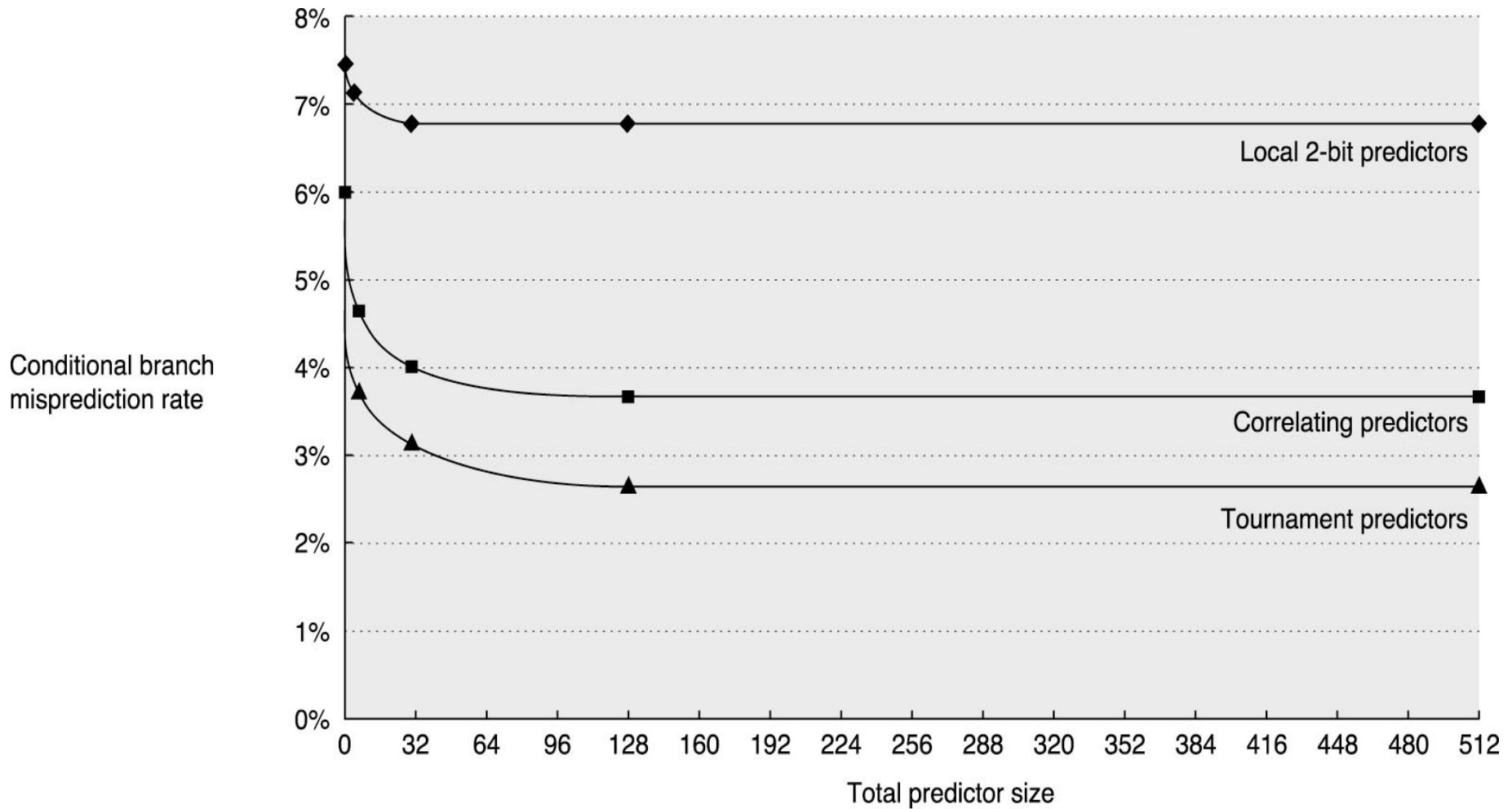


$Pred_0$	$Pred_1$	Meta Update
Λάθος	Λάθος	---
Λάθος	Σωστή	+1
Σωστή	Λάθος	-1
Σωστή	Σωστή	---

Παράδειγμα: Alpha 21264

- Meta-predictor
 - 4K εγγραφές
 - κάθε εγγραφή είναι ένας 2-bit predictor
 - προσπέλαση με βάση το PC της εντολής διακλάδωσης
- $Pred_0$: Local-history two-level predictor
 - BHT: 1K 10-bit εγγραφές
 - PHT: 1K 3-bit predictors
- $Pred_1$: 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



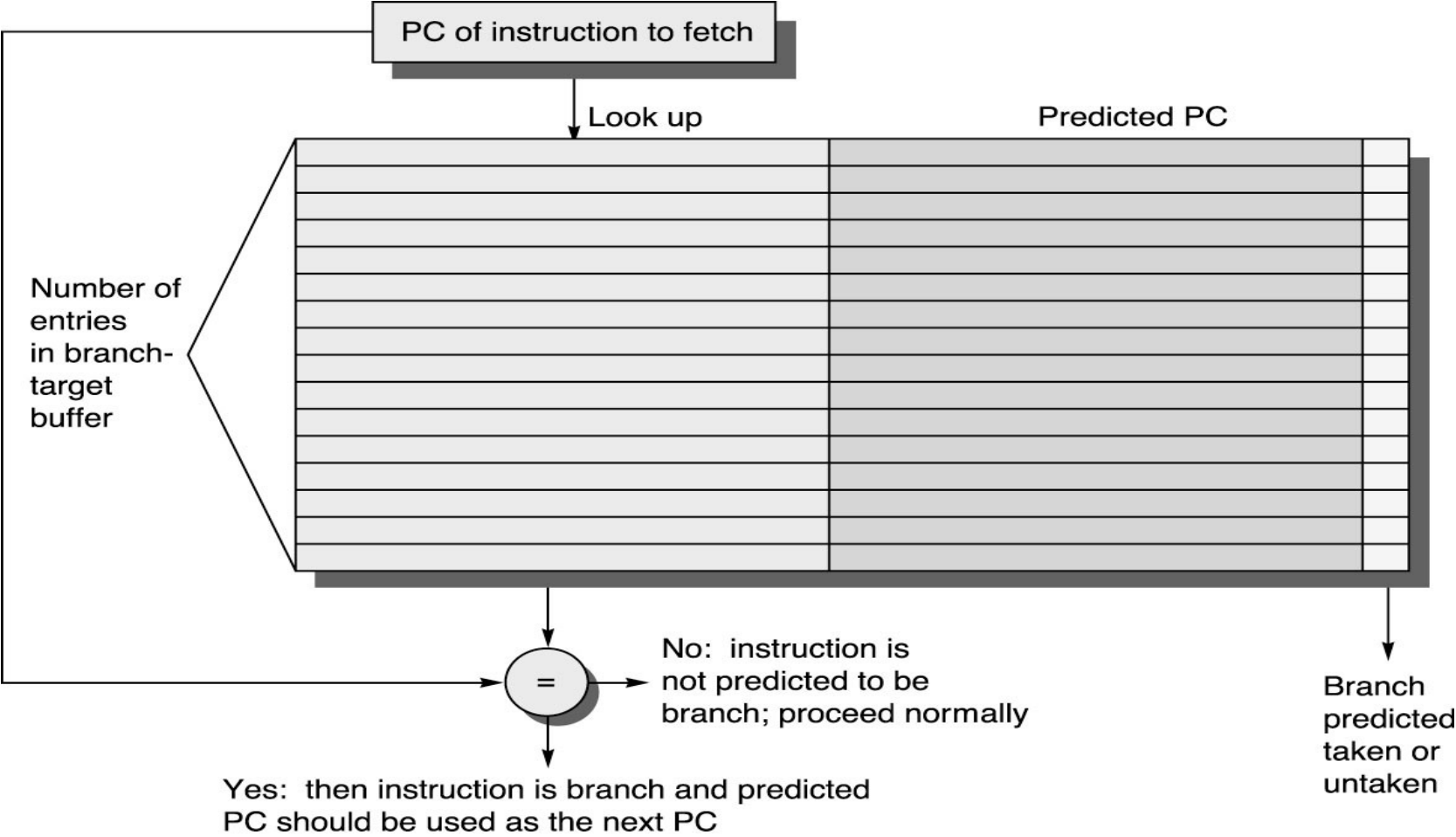
Πρόβλεψη Προορισμού

- 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

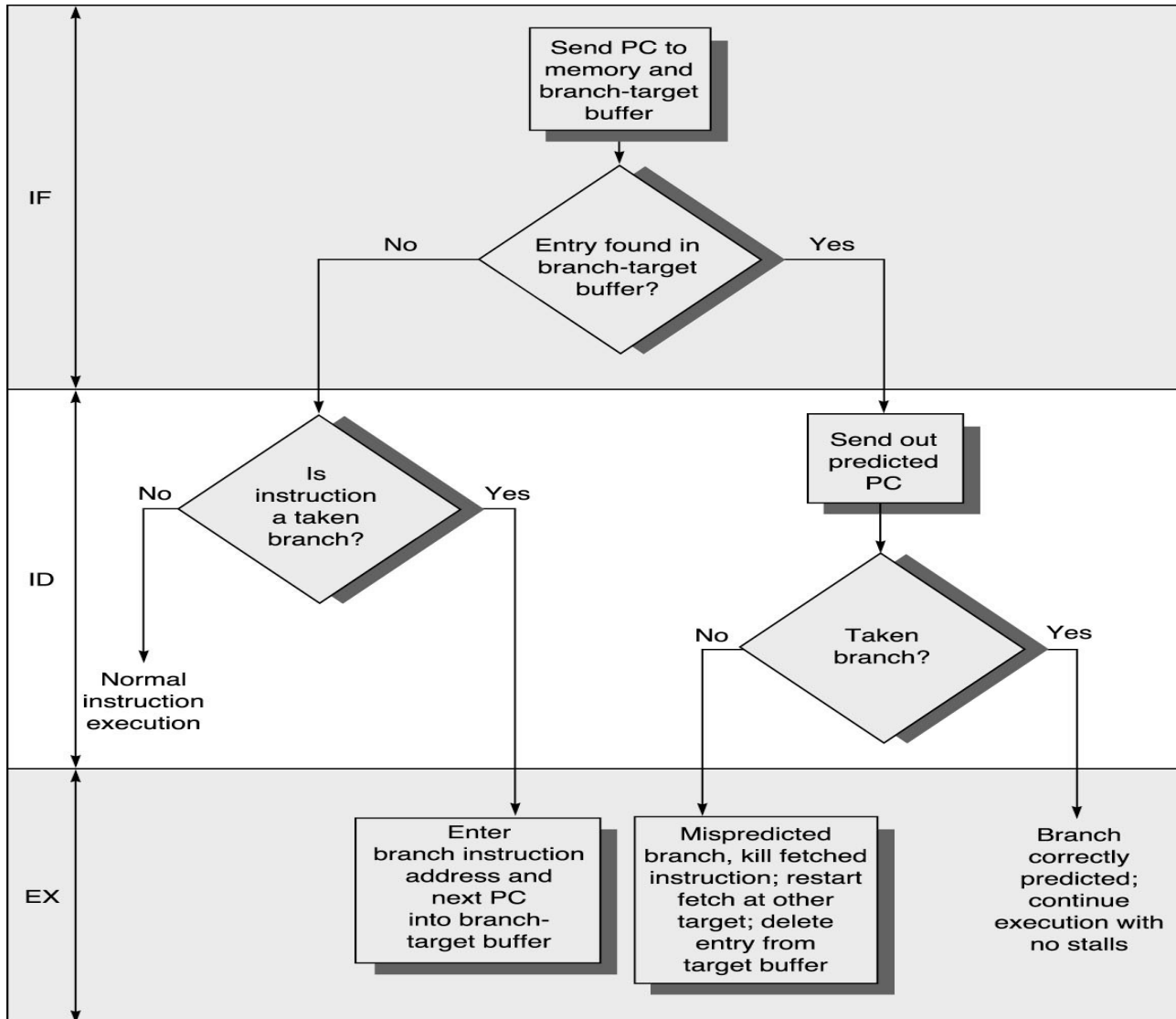
Branch-Target Buffer (BTB)

- 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



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)

