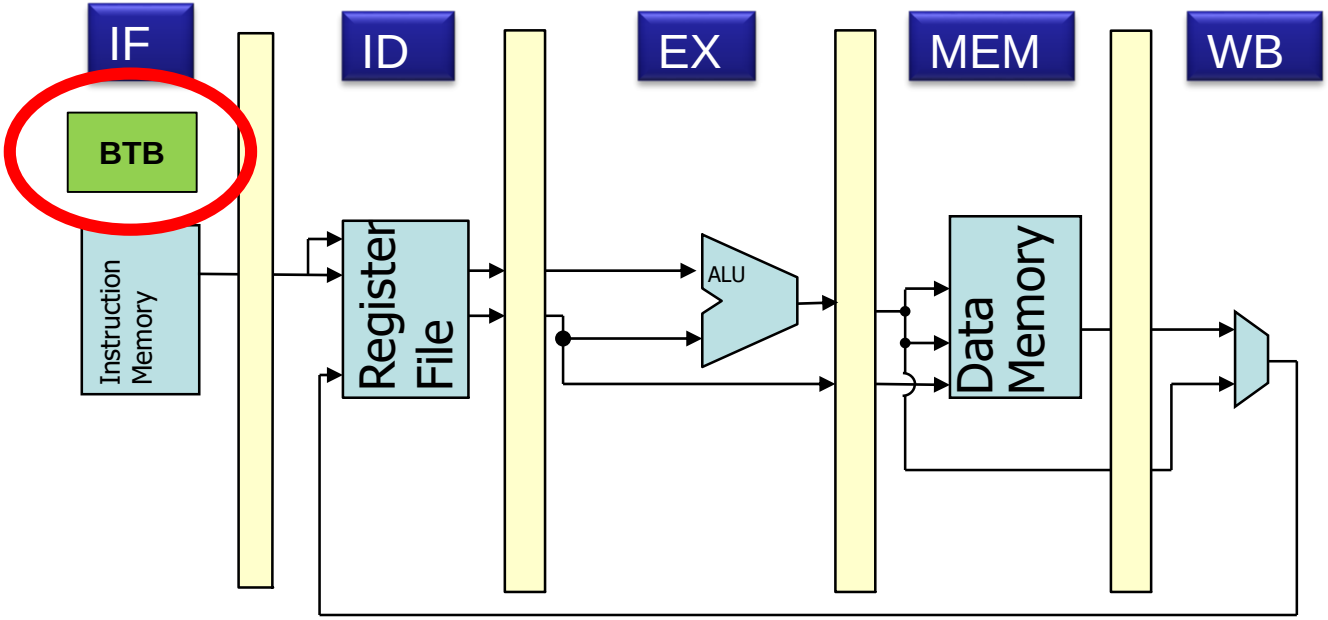
Branch Prediction

Oren Katzengold, Franck Sala, Elad Shtiegmann

חזאי קפיצות (תזכורת מתרגול 2)



- Branch instructions may jump
- Jump resolution known @ Execution phase
- Trivial optimization: Assume Not Taken
- If branch will jump → need to flush all pipe stages before Execution
- **Better solution: Use Branch Predictor (BTB) @ Fetch**

חיזוי באמצעות 1-ביט (תזכורת מתרגול 2)

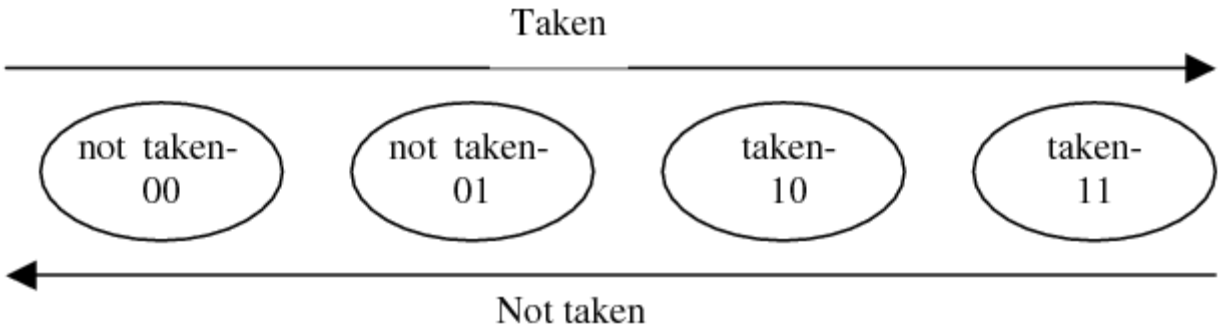
Pattern: 11110 11110 11110 11110 11110 1 …

1-bit Prediction: 1111 01111 01111 01111 01111 0 …

1-bit counter → Two mispredictions every iteration ☹☹

דוגמה (תזכורת מתרגול 2)

נתון מעבד בעל חמישה שלבי pipeline IF,ID,EX,MEM,WB עם מנגנון חיזוי (BTB) הפועל ע"פ האלגוריתם הבא:



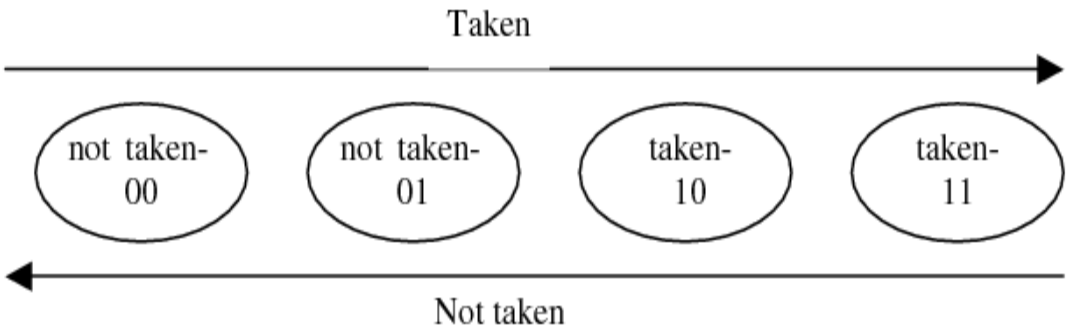
כאשר נרשמת פקודת branch ב-BTB בפעם הראשונה, מצב החיזוי שלו מאותחל ל-01.

1. מה יהיה החיזוי בכל פעם שפקודת ה BNEQ שבקטע הבא מבוצעת?
2. מהי כמות השגיאות בחיזוי?

```
        MOVI R1,2
loop1:  MOV R2,R1
loop2:  Dec R2
        BNEQ R2,R0,loop2
        INC R1
        BLT R1,4,loop1
```

דוגמה (תזכורת מתרגול 2)

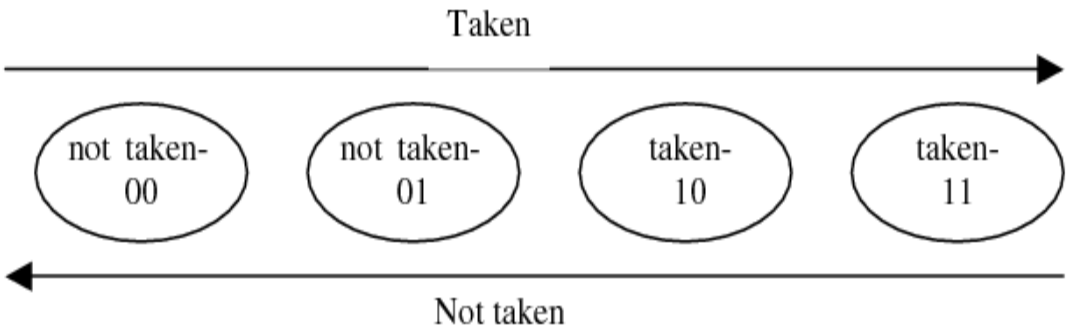
```
        MOVI R1,2
loop1:  MOV R2,R1
loop2:  Dec R2
        BNEQ R2,R0,loop2
        INC R1
        BLT R1,4,loop1
```



	מחזור	R1	R2	מצב נוכחי	חיזוי	בפועל	המצב הבא	שגיאה?

דוגמה (תזכורת מתרגול 2)

```
        MOVI R1,2
loop1:  MOV R2,R1
loop2:  Dec R2
        BNEQ R2,R0,loop2
        INC R1
        BLT R1,4,loop1
```



	מחזור	R1	R2	מצב נוכחי	חיזוי	בפועל	המצב הבא	שגיאה?
Loop1	1	2	2					
BNEQ	2	2	1	01	not taken	taken	10	+
BNEQ	3	2	0	10	taken	not taken	01	+
Loop1	4	3	3					
BNEQ	5	3	2	01	not taken	taken	10	+
BNEQ	6	3	1	10	taken	taken	11	
BNEQ	7	3	0	11	taken	not taken	10	+

חיזוי באמצעות 2-ביט (תזכורת מתרגול 2)

Pattern: 11110 11110 11110 11110 11110 1 …

2-bit Prediction: 1111 11111 11111 11111 11111 1 …

Counter: 2333 2 3333 2 3333 2 3333 2 3333 2 3

2-bit counter → one misprediction every iteration ☹

Performance example

- Assume 1 of 20 branches mispredicts (19 predictions are correct)
- Branch frequency 20% (1 of 5 instructions is branch)

→ 1 mispredict every 100 instructions

- Assume IPC without penalty = 2 (two instructions finish per cycle)
- Mispredict penalty: 10 Cycles

→ 1 mispredict every 50 cycles

→ **10 cycles penalty every 50 cycles**

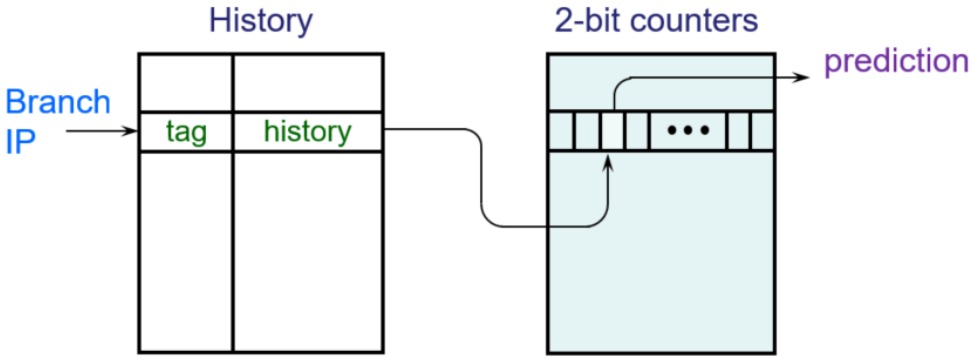
→ **20% performance loss!**

Better Idea: Use Branch History

Predict	History
T	1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0
T	1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0
T	1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0
NT	1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0
T	1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0
T	1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0
T	1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0
NT	1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0
T	1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0
…	

2-Level Branch Prediction

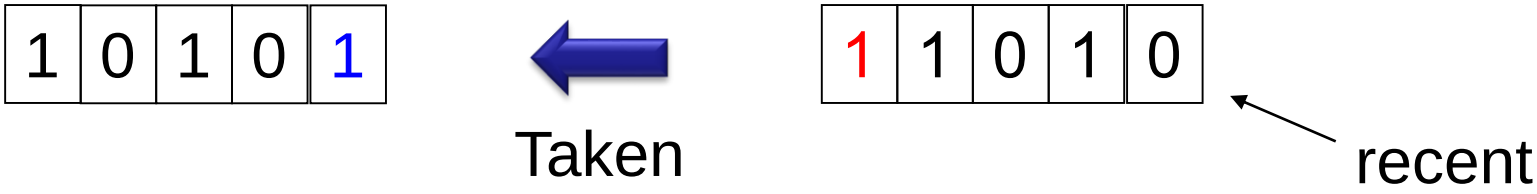
- בחזאי מסוג זה ישנם סט של היסטוריות (History) וסט של מכונות מצבים (State). כמו כן ישנו מיפוי בין שני הסטים.
- על כן נקרא 2-Level
- עבור כל הוראת branch, במקום להחזיק במכונת מצבים אחת, מחזיקים 2^n מכונות מצבים (אחת עבור כל ערך אפשרי של היסטוריה באורך n ביטים).
- בוחרים במכונת המצבים הרצויה ע"פ ההיסטוריה של n ההכרעות (taken/not-taken) האחרונות של אותה הוראת branch.



BHR: Branch History Register

- מחזיקים ב-**shift register** בן n ביטים אשר בכל רגע נתון מציין את ההיסטוריה של הבראנץ' (0 ל not taken ו-1 ל taken).

- למשל עבור חזאי-קפיצות עם BHR באורך 5 ביטים:



Example: 2-Level BTB Initialization

First level: shift register that keeps the history of the n last branches

1	1	1	0

ST	0
ST	1
WT	2
ST	3
WT	4
WT	5
	6
	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

We access the table based on current history state (0) and modify the history AFTER the outcome is known

Second level: prediction table that predicts for every history state if the direction should be taken or not taken

```
int x=0;
for (i=0; i<100; i++)
    for (j=0; j<4;j++)
        x += (j+i);
```

```
100        sub r10,r10,r10
104        movi r9, 100
108 L1:    movi r8,4
112 L2:    add  r10,r10,r9
116        add  r10,r10,r8
120        sub  r8,r8,1
124        if (r8 != r0) jump L2
128        sub (r9,r9,1)
132        If (r9 != r0) jump L1
```

Example continued

BHR	History
14	1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0
13	1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0
11	1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0
7	1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0
14	1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0

- If we look at the history that will be stored in the BHR, we can see that values 14 (“1110”), 13 (“1101”), and 11 (“1011”) indicate taken branch while state 7 (“0111”) indicates not-taken branch.
- When sequence of histories repeats itself, the system reaches <u>stability</u>.

Branch History Register (BHR)

- <u>Local BHR</u>

BHR לכל הוראת branch, ואז ה-BHR לוקאלי (עשוי לעלות על תבנית חוזרת של הוראת branch).

- <u>Global BHR</u>

History Register אחד גלובלי משותף לכל הוראות ה-Branch (עשוי להיות יעיל בתפיסת תלויות בין הוראות branch).

- לדוגמה בהינתן התכנית הבאה והיסטוריה גלובלית **111** תמיד נרצה לחזות Taken:

```
if(…)
    if(…)
        if(…)
            if(true) { … }
```

טבלת מכונות החיזוי

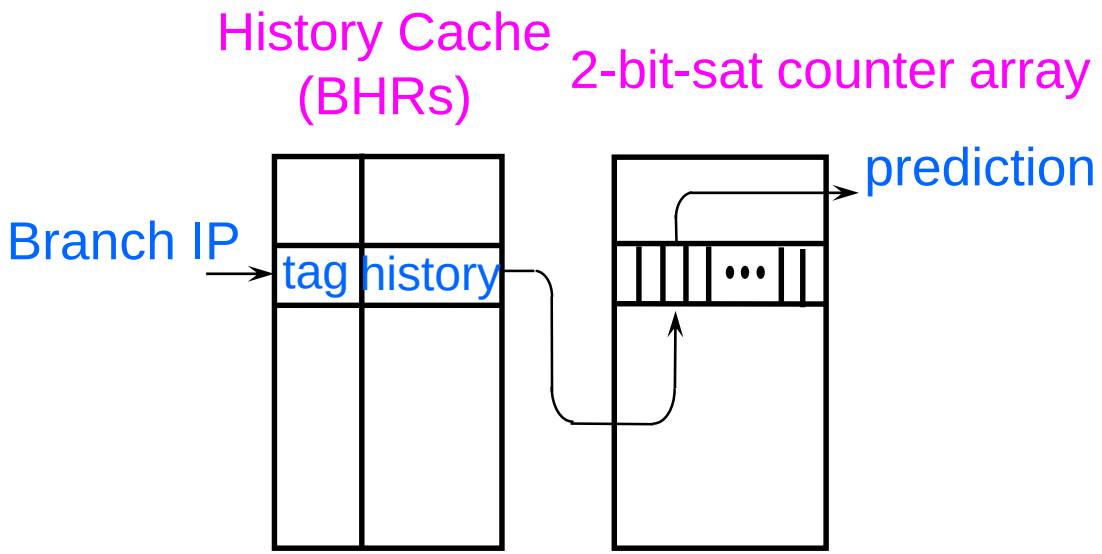
- <u>Global Table</u>

ניתן להחזיק טבלת מכונות מצבים גלובלית, בכך לחסוך במקום (ולאפשר אולי BHR-ים ארוכים יותר. שימו לב שהטבלה גדלה אקספוננציאלית).

- <u>Local (Per Branch) Table</u>

ניתן להחזיק טבלת מכונות מצבים נפרדת (לוקאלית) לכל הוראת branch.

טבלה ו-BHR לוקליים



- נניח טבלת היסטוריות בת 1024 כניסות עם היסטוריות באורך 4 ביט, Fully Associative
- נניח שכתובת היא בת 32 ביט וכל ההוראות הן aligned לכפולה של ארבעה בתים (כך שניתן להשמיט את שתי הסיביות ה-lsb מה-tag בטבלה)
- **מהו גודל חזאי הקפיצות?**

Predictor size = #entries * (tag_size + history_size + $2*2^{history\_size}$)

#entries = 1024

tag_size (branch IP w/o 2 lsb bits) = 32 – 2 = 30 bit

history_size = 4 bit

→ **Predictor size = 1024 * ($30+4+2*2^4$) = 66 KB**

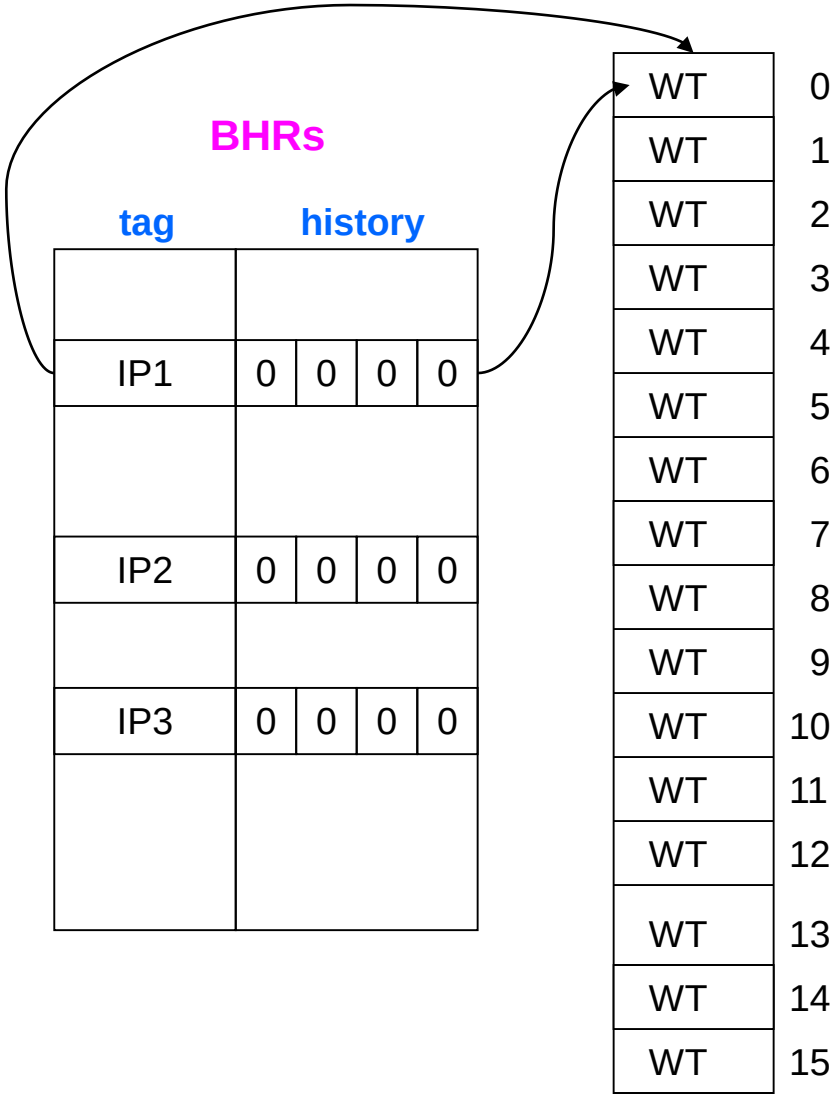
דוגמת קטע קוד

```
for (i=100; i>0; i--)
    for (j=2; j<5; j++)
        if (i%j == 0) …
```

תרגום:

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
L2:   Mod    r3, r1, r2
      Bne    r3, r0, IF
                 . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

Not Taken



r1	**100**
r2	**2**
r3	**0**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
L2:   Mod    r3, r1, r2
      Bne    r3, r0, IF
                   . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

IP1

IP2

IP3

טעות בחיזוי (ולא הייתה קפיצה)

BHRs

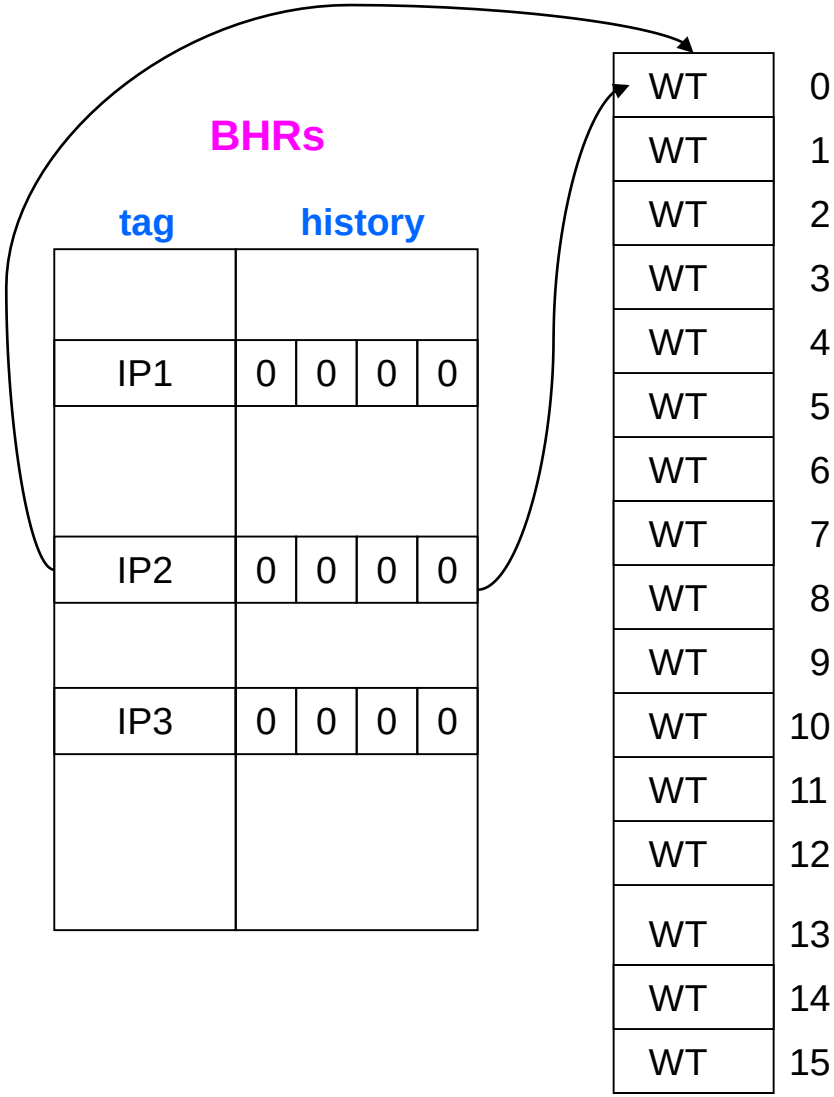
tag	history			
IP1	0	0	0	0
IP2	0	0	0	0
IP3	0	0	0	0

WNT	0
WT	1
WT	2
WT	3
WT	4
WT	5
WT	6
WT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

r1	**100**
r2	**2**
r3	**0**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
L2:   Mod    r3, r1, r2
      Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

Taken



r1	**100**
r2	**3**
r3	**0**

```
     Addi   r5, r0,  5
     Addi   r1,r0,100
L1:  Addi   r2, r0,  2
L2:  Mod    r3, r1, r2
     Bne    r3, r0, IF
                 . . .
IF:  Addi   r2, r2,  1
     Bne    r2, r5, L2
     Subi   r1, r1,  1
     Bne    r1, r0, L1
```

חיזוי נכון והייתה קפיצה

BHRs

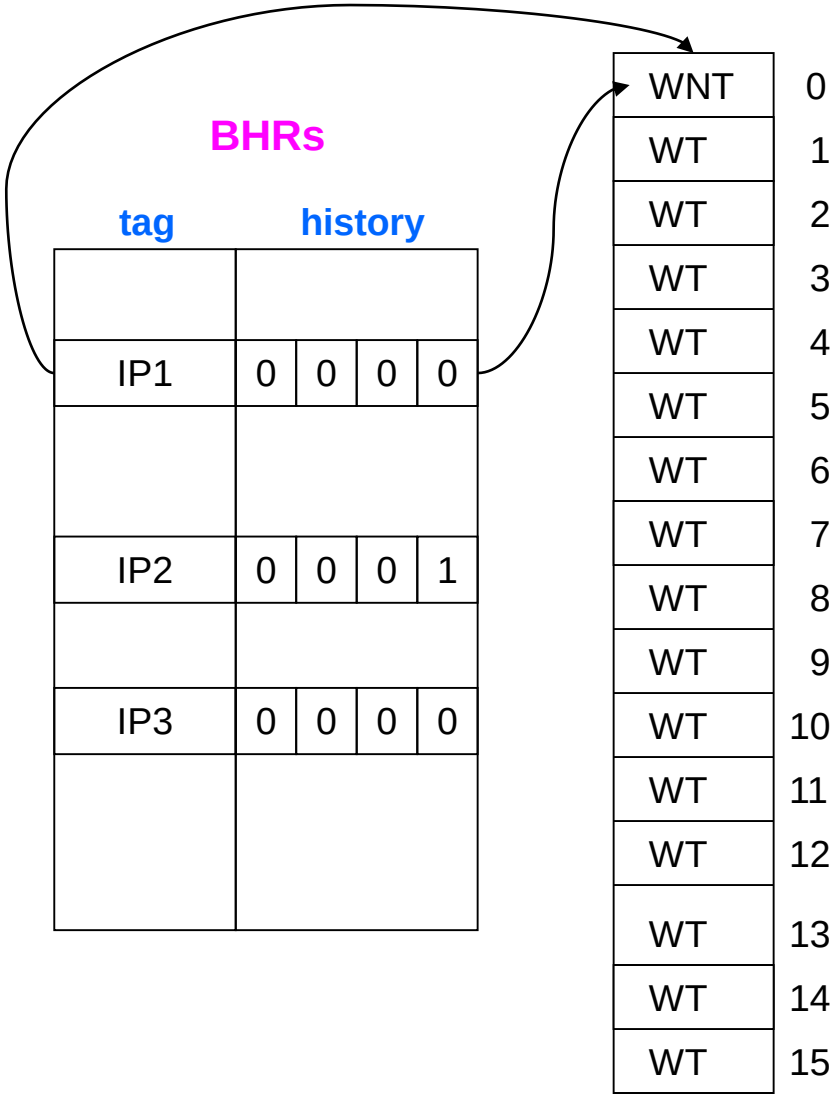
tag	history			
IP1	0	0	0	0
IP2	0	0	0	1
IP3	0	0	0	0

ST	0
WT	1
WT	2
WT	3
WT	4
WT	5
WT	6
WT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

r1	**100**
r2	**3**
r3	**0**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
L2:   Mod    r3, r1, r2
      Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

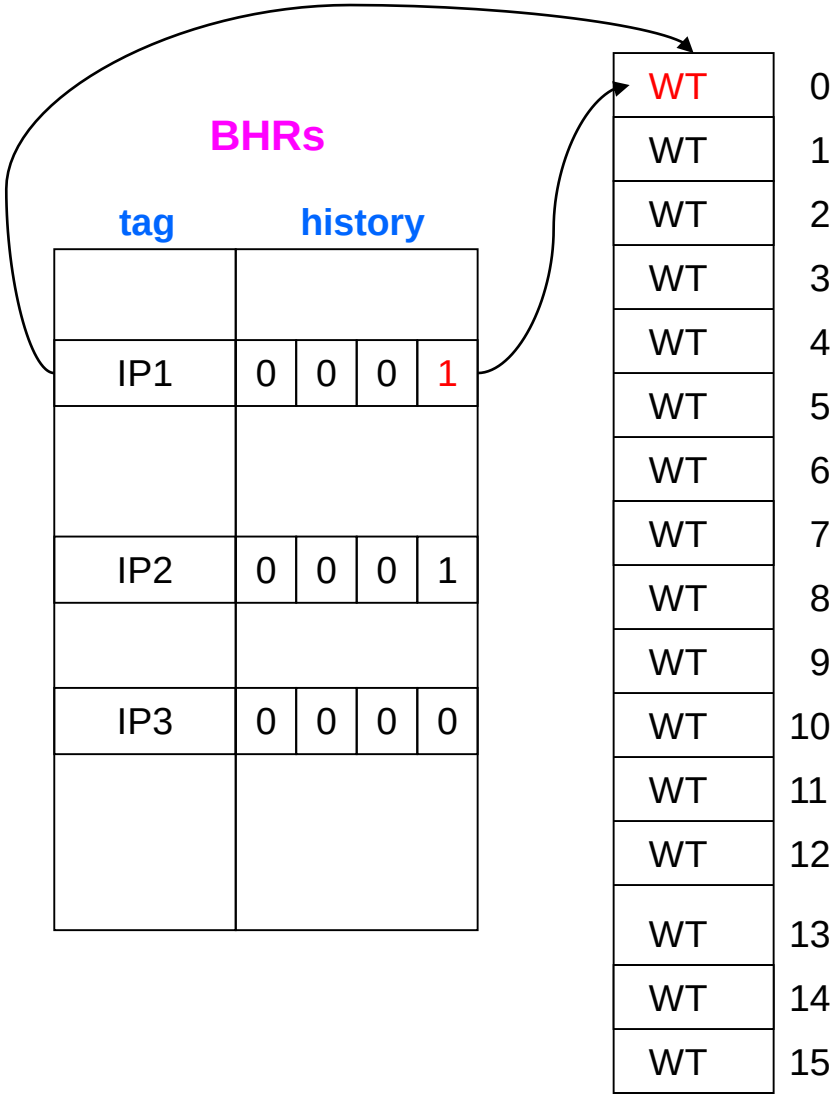
Taken



r1	**100**
r2	**3**
r3	**1**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
L2:   Mod    r3, r1, r2
      Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

טעות בחיזוי והייתה קפיצה



r1	**100**
r2	**3**
r3	**1**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
L2:   Mod    r3, r1, r2
      Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

Taken

BHRs

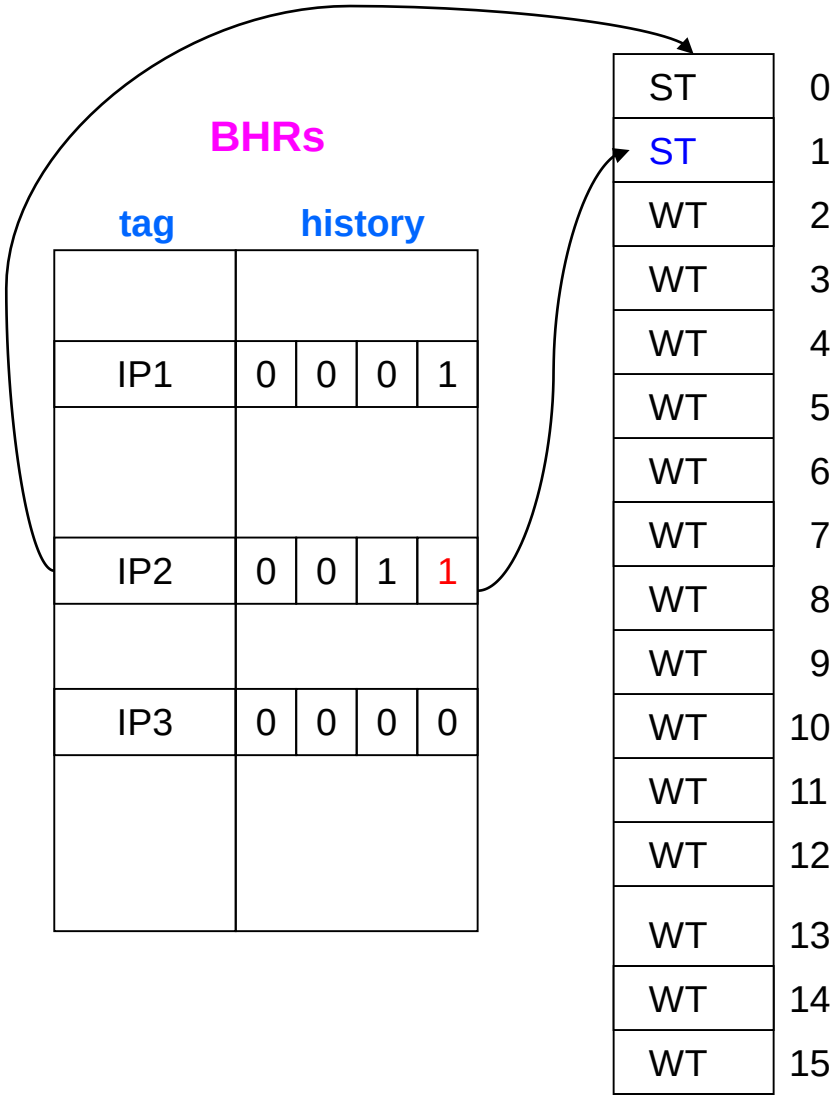
tag	history			
IP1	0	0	0	1
IP2	0	0	0	1
IP3	0	0	0	0

ST	0
WT	1
WT	2
WT	3
WT	4
WT	5
WT	6
WT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

r1	**100**
r2	**4**
r3	**1**

```
     Addi   r5, r0,  5
     Addi   r1,r0,100
L1:  Addi   r2, r0,  2
L2:  Mod    r3, r1, r2
     Bne    r3, r0, IF
                 . . .
IF:  Addi   r2, r2,  1
     Bne    r2, r5, L2
     Subi   r1, r1,  1
     Bne    r1, r0, L1
```

חיזוי נכון והייתה קפיצה



r1	**100**
r2	**4**
r3	**1**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
L2:   Mod    r3, r1, r2
      Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

Not Taken

BHRs

tag	history			
IP1	0	0	0	1
IP2	0	0	1	1
IP3	0	0	0	0

WT	0
WT	1
WT	2
WT	3
WT	4
WT	5
WT	6
WT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

r1	**100**
r2	**4**
r3	**0**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
L2:   Mod    r3, r1, r2
      Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

טעות בחיזוי ולא הייתה קפיצה

BHRs

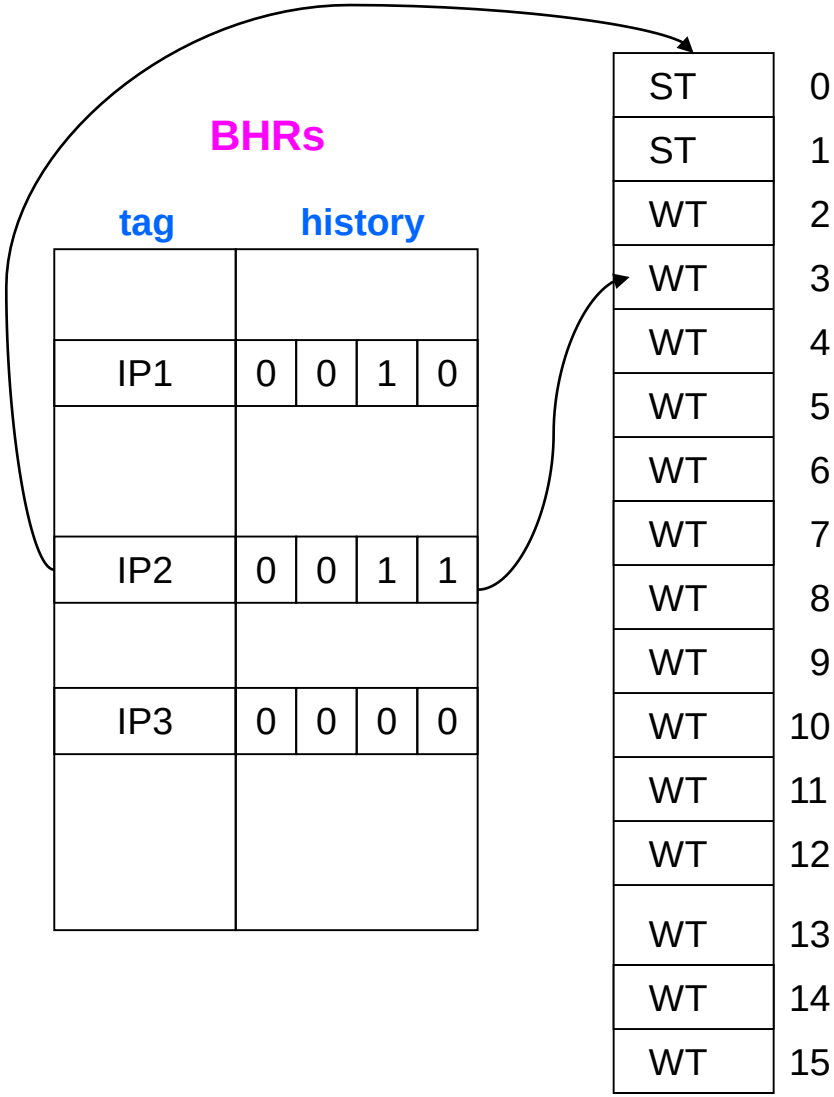
tag	history			
IP1	0	0	1	0
IP2	0	0	1	1
IP3	0	0	0	0

WT	0
WNT	1
WT	2
WT	3
WT	4
WT	5
WT	6
WT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

r1	**100**
r2	**4**
r3	**0**

```
     Addi   r5, r0,  5
     Addi   r1,r0,100
L1:  Addi   r2, r0,  2
L2:  Mod    r3, r1, r2
     Bne    r3, r0, IF
                . . .
IF:  Addi   r2, r2,  1
     Bne    r2, r5, L2
     Subi   r1, r1,  1
     Bne    r1, r0, L1
```

Not Taken



r1	**100**
r2	**5**
r3	**0**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
L2:   Mod    r3, r1, r2
      Bne    r3, r0, IF
                   . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

טעות בחיזוי ולא הייתה קפיצה

BHRs

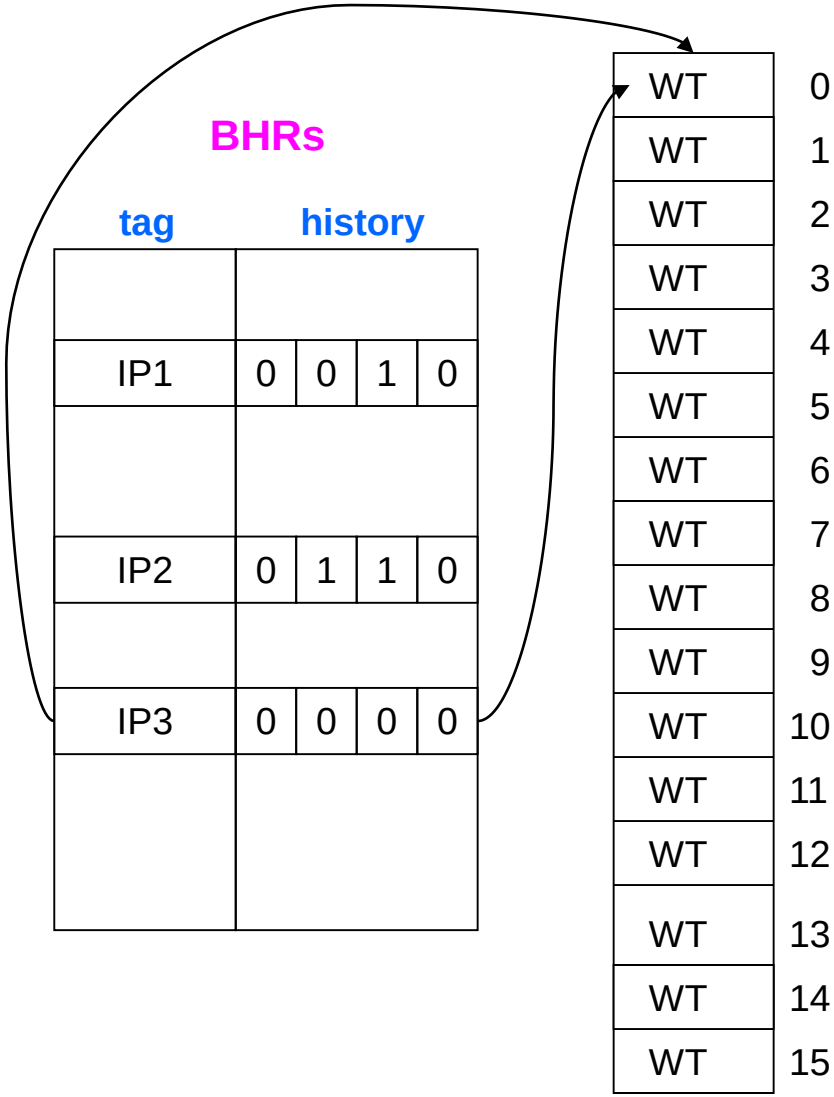
tag	history			
IP1	0	0	1	0
IP2	0	1	1	0
IP3	0	0	0	0

ST	0
ST	1
WT	2
WNT	3
WT	4
WT	5
WT	6
WT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

r1	**100**
r2	**5**
r3	**0**

```
     Addi   r5, r0,  5
     Addi   r1,r0,100
L1:  Addi   r2, r0,  2
L2:  Mod    r3, r1, r2
     Bne    r3, r0, IF
                . . .
IF:  Addi   r2, r2,  1
     Bne    r2, r5, L2
     Subi   r1, r1,  1
     Bne    r1, r0, L1
```

Taken



r1	**99**
r2	**5**
r3	**0**

```
     Addi   r5, r0,  5
     Addi   r1,r0,100
L1:  Addi   r2, r0,  2
L2:  Mod    r3, r1, r2
     Bne    r3, r0, IF
                 . . .
IF:  Addi   r2, r2,  1
     Bne    r2, r5, L2
     Subi   r1, r1,  1
     Bne    r1, r0, L1
```

חיזוי נכון והייתה קפיצה

BHRs

tag	history			
IP1	0	0	1	0
IP2	0	1	1	0
IP3	0	0	0	1

ST	0
WT	1
WT	2
WT	3
WT	4
WT	5
WT	6
WT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

r1	**99**
r2	**5**
r3	**0**

```
     Addi   r5, r0,  5
     Addi   r1,r0,100
L1:  Addi   r2, r0,  2
L2:  Mod    r3, r1, r2
     Bne    r3, r0, IF
                . . .
IF:  Addi   r2, r2,  1
     Bne    r2, r5, L2
     Subi   r1, r1,  1
     Bne    r1, r0, L1
```

טבלה ו-BHR **גלובליים**

- כעת אנו משתמשים ב- BHR יחיד, וכן בטבלה בודדת (בניגוד לדוגמה הקודמת בה לכל IP היה BHR וטבלת מצבים משלו).
- עדיין זוכרים ב-BHR היסטוריה של 4 קפיצות (כלומר גודלו 4 ביטים).

מהו גודל החזאי?

Predictor size = history_size + 2*2 $^{\text{history\_size}}$

history_size = 4

→ Predictor size = $4+2*2^4$ = 36 bits

vs. 66KB needed for local history/state arrays!

(Save 1023 entries of tag, each pointing to 2^4=16 2-bit state machines).

Not Taken

Global table

WT	0
WT	1
WT	2
WT	3
WT	4
WT	5
WT	6
WT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

Global BHR

0	0	0	0

r1	**100**
r2	**2**
r3	**0**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
      Mod    r3, r1, r2
L2:   Bne    r3, r0, IF
                      . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

IP1

IP2

IP3

טעות בחיזוי ולא הייתה קפיצה

Global table

WNT	0
WT	1
WT	2
WT	3
WT	4
WT	5
WT	6
WT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

Global BHR

0	0	0	0

r1	**100**
r2	**2**
r3	**0**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
      Mod    r3, r1, r2
L2:   Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

Taken

Global table

WNT	0
WT	1
WT	2
WT	3
WT	4
WT	5
WT	6
WT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

Global BHR

0	0	0	0

r1	**100**
r2	**3**
r3	**0**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
      Mod    r3, r1, r2
L2:   Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

טעות בחיזוי והייתה קפיצה

Global table

WT	0
WT	1
WT	2
WT	3
WT	4
WT	5
WT	6
WT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

Global BHR

0	0	0	1

r1	**100**
r2	**3**
r3	**0**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
      Mod    r3, r1, r2
L2:   Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

Taken

Global table

WT	0
WT	1
WT	2
WT	3
WT	4
WT	5
WT	6
WT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

Global BHR

0	0	0	1

r1	**100**
r2	**3**
r3	**1**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
      Mod    r3, r1, r2
L2:   Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

חיזוי נכון והייתה קפיצה

Global table

WT	0
ST	1
WT	2
WT	3
WT	4
WT	5
WT	6
WT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

Global BHR

0	0	1	1

r1	**100**
r2	**3**
r3	**1**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
      Mod    r3, r1, r2
L2:   Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

Taken

Global table

WT	0
ST	1
WT	2
WT	3
WT	4
WT	5
WT	6
WT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

Global BHR

0	0	1	1

r1	**100**
r2	**4**
r3	**1**

```
     Addi   r5, r0,  5
     Addi   r1,r0,100
L1:  Addi   r2, r0,  2
     Mod    r3, r1, r2
L2:  Bne    r3, r0, IF
                 . . .
IF:  Addi   r2, r2,  1
     Bne    r2, r5, L2
     Subi   r1, r1,  1
     Bne    r1, r0, L1
```

חיזוי נכון והייתה קפיצה

Global table

WT	0
ST	1
WT	2
ST	3
WT	4
WT	5
WT	6
WT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

Global BHR

0	1	1	1

r1	**100**
r2	**4**
r3	**1**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
      Mod    r3, r1, r2
L2:   Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

Not Taken

Global BHR

0	1	1	1

Global table

WT	0
ST	1
WT	2
ST	3
WT	4
WT	5
WT	6
WT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

r1	**100**
r2	**4**
r3	**0**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
      Mod    r3, r1, r2
L2:   Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

טעות בחיזוי ולא הייתה קפיצה

Global BHR

1	1	1	0

Global table

WT	0
ST	1
WT	2
ST	3
WT	4
WT	5
WT	6
WNT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

r1	**100**
r2	**4**
r3	**0**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
      Mod    r3, r1, r2
L2:   Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

Not Taken

Global BHR

1	1	1	0

Global table

WT	0
ST	1
WT	2
ST	3
WT	4
WT	5
WT	6
WNT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WT	14
WT	15

r1	**100**
r2	**5**
r3	**0**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
      Mod    r3, r1, r2
L2:   Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

טעות בחיזוי ולא הייתה קפיצה

Global BHR

1	1	0	0

Global table

WT	0
ST	1
WT	2
ST	3
WT	4
WT	5
WT	6
WNT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WNT	14
WT	15

r1	**100**
r2	**5**
r3	**0**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
      Mod    r3, r1, r2
L2:   Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
      Bne    r1, r0, L1
```

Taken

Global BHR

1	1	0	0

Global table

WT	0
ST	1
WT	2
ST	3
WT	4
WT	5
WT	6
WNT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
WT	12
WT	13
WNT	14
WT	15

r1	**99**
r2	**5**
r3	**0**

```
     Addi   r5, r0,  5
     Addi   r1,r0,100
L1:  Addi   r2, r0,  2
     Mod    r3, r1, r2
L2:  Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:  Addi   r2, r2,  1
     Bne    r2, r5, L2
     Subi   r1, r1,  1
     Bne    r1, r0, L1
```

חיזוי נכון והייתה קפיצה

Global BHR

1	0	0	1

Global table

WT	0
ST	1
WT	2
ST	3
WT	4
WT	5
WT	6
WNT	7
WT	8
WT	9
WT	10
WT	11
ST	12
WT	13
WNT	14
WT	15

r1	**99**
r2	**5**
r3	**0**

```
      Addi   r5, r0,  5
      Addi   r1,r0,100
L1:   Addi   r2, r0,  2
      Mod    r3, r1, r2
L2:   Bne    r3, r0, IF
                  . . .
IF:   Addi   r2, r2,  1
      Bne    r2, r5, L2
      Subi   r1, r1,  1
→     Bne    r1, r0, L1
```

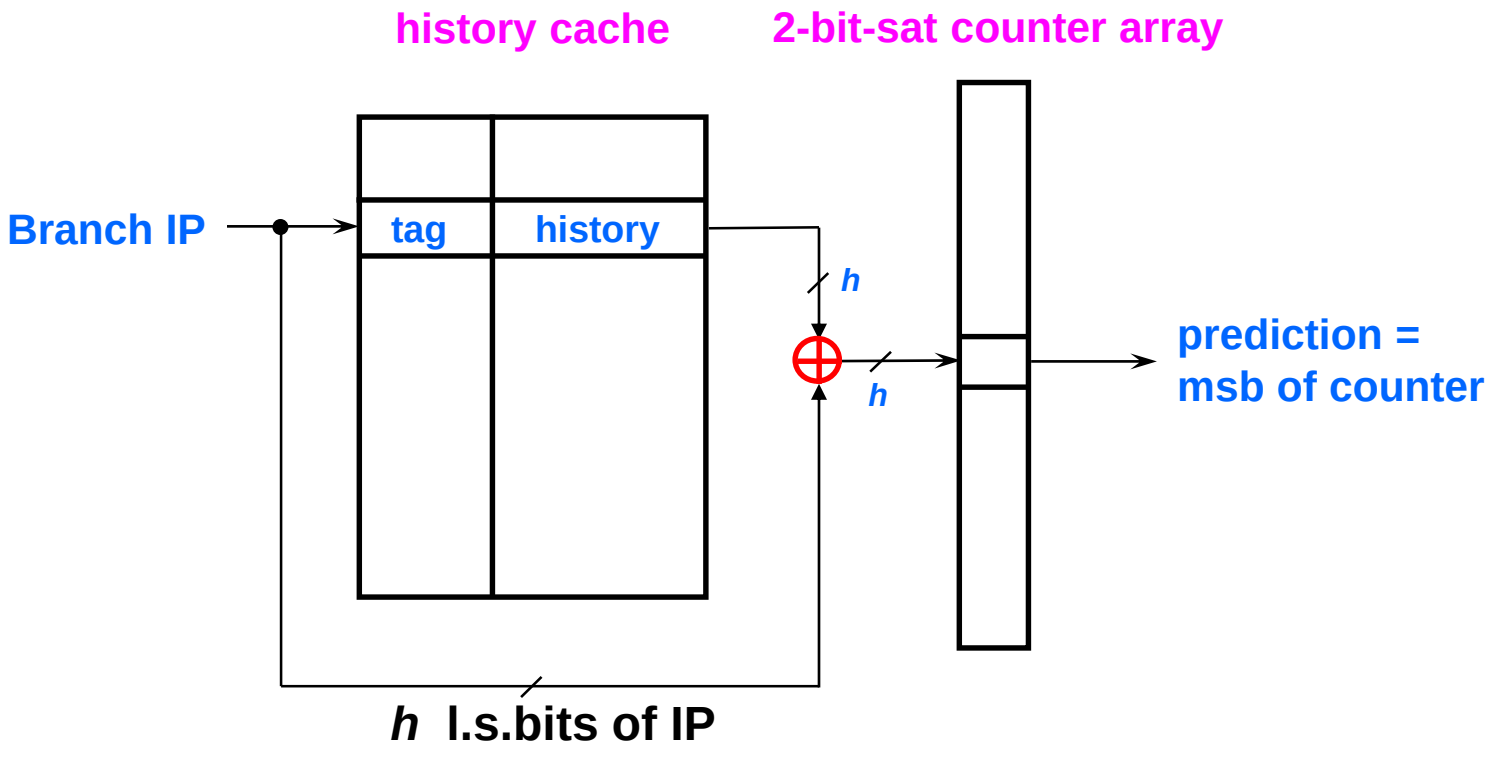
טבלת חיזוי גלובלית

- החיסרון של טבלה גלובלית של מכונות מצבים הינו בעיית ההתנגשויות בין הוראות branch שונות
  - הוראות branch שונות שבמקרה בעלות אותה היסטורייה (לוקלית) ברגע מסוים, משנות את ערכי החיזוי של אותן מכונות מצבים:
  - Branch 1: (IP = …0101) History = 1101 → Taken
  - Branch 2: (IP = …1010) History = 1101 → Not Taken
- דרך אפשרית למניעת התנגשויות היא ליצור ערבול כלשהו בטבלה ע"י בחירת מכונת המצבים המתאימה לא רק ע"פ ה-BHR אלא ע"פ תוצאת ה-XOR של ה-BHR עם ה-branch IP
  - Branch 1: IP ⊕ History = 0101 ⊕ 1101 = 1000 → Taken
  - Branch 2: IP ⊕ History = 1010 ⊕ 1101 = 0111 → Not Taken
- חזאי שעושה זאת נקרא:
  - L-Share (Local BHR)
  - G-Share (Global BHR)
  - הבהרה: L-Share/G-Share מתייחס לטבלת מכונות גלובלית בלבד!

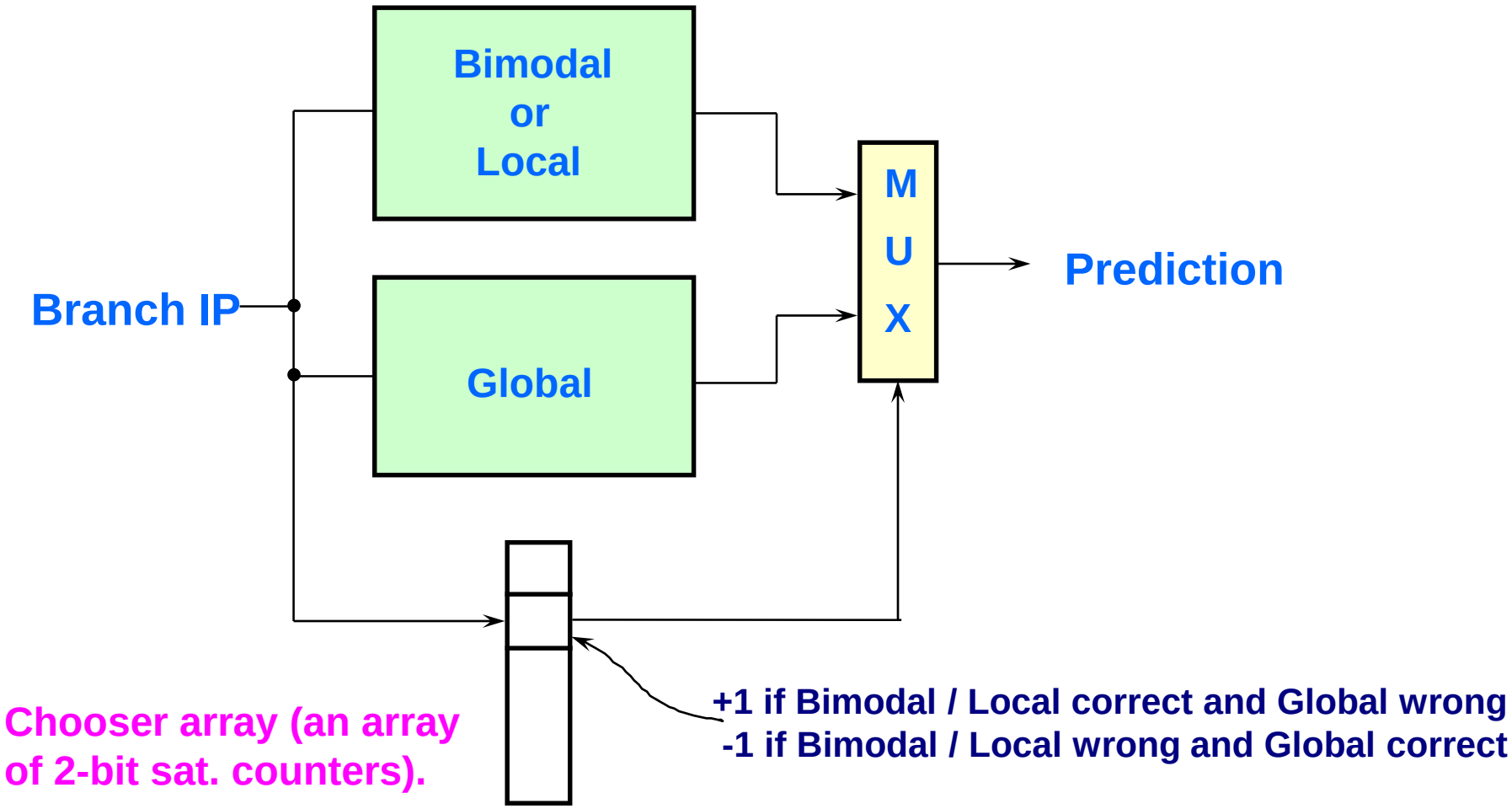
local Predictor: LShare

Lshare **XORs the local history information with the branch IP**

This XOR is a significant improvement for BTB performance



Chooser



- The chooser may also be indexed by the GHR

דוגמא:

```
for (i=100; i>0; i--)        ← 0
    for (j=2; j<6; j++)      ← 1
        switch (i%j) {
        case 0: … break;     ← 2
        case 1: … break;     ← 3
        case 2: … break;     ← 4
        case 3: … break;     ← 5
        case 4: … break;     ← 6
        }
```

התנהגות ה branch-ים השונים בתכנית

- TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTN **- 0**
- TTTN **- 1**
- TTTTNTTTTNTTNTNTTTTNNNTTTTTTNTNTTNTTNTTNTTTTNNNTTTTTNTTTTNTNNTNTTTTTNNTTTTTTNTNNTNTTNTTTTTTTNNNTTTTNNTTTTNTTNTNTTTTTNNTNTTTTNTNTTNTTNTTTTTTNNNNTTTTTNTTTTNTTNTNNTTTTNNTTTTTTNTNTTNTNNTTTTTTTNNNTTTTTNTTNTNTTNTNTTTTTNNTTTTTNNTNTTNTTNTTTTTTTNNNNTTTTNTTTTNTTNTNTTTTNNNTTTTTTNTNTTNTTNTTNTTTTNNNTTTTTNTTTTNTNNTNTTTTTNNTTTTTTNTNNTNTTNTTTTTTTNNNTTTTNNTTTTNTTNTNTTTTTNNTNTTTTNTNTTNTTNTTTTTTNNNNTTTTTNTTTTNTTNTNN **- 2**
- NNNNTTTTNTTTTNTTNTNTTTTNNNTTTTTTNTNTTNTTNTTNTTTTNNNTTTTTNTTTTNTNNTNTTTTTNNTTTTTTNTNNTNTTNTTTTTTTNNNTTTTNNTTTTNTTNTNTTTTTNNTNTTTTNTNTTNTTNTTTTTTNNNNTTTTTNTTTTNTTNTNNTTTTNNTTTTTTNTNTTNTNNTTTTTTTNNNTTTTTNTTNTNTTNTNTTTTTNNTTTTTNNTNTTNTTNTTTTTTTNNNNTTTTNTTTTNTTNTNTTTTNNNTTTTTTNTNTTNTTNTTNTTTTNNNTTTTTNTTTTNTNNTNTTTTTNNTTTTTTNTNNTNTTNTTTTTTTNNNTTTTNNTTTTNTTNTNTTTTTNNTNTTTTNTNTTNTTNTTTTTTNNNNTTTTTNTTTTNTT **- 3**
- TTTTTNNNTTTTTTTTTNTTTTNTTTTNTNTTTTTTTTNTTNTTTTTNTTTTTNNTTTTTTTTTTNTNTTNTTTTTTNTTTTTTTTNNTNTTTTTTTTTTTNNTTTTNTTTTTNTTTTNTTTTTTNTNTTTTTTNTTNTTTTTTTTTNTNNTTTTTTTTTTNTTTTNNTTTTTNTTTTTTTTNTTNTNTTTTTTTTTNNTTTTTTTTNTNTTTTNTTTTTTNTTTTTNTTNTTNTTTTTTTTTTTNNNTTTTTTTTTNTTTTNTTTTNTNTTTTTTTTNTTNTTTTTNTTTTTNNTTTTTTTTTTNTNTTNTTTTTTNTTTTTTTTNNTNTTTTTTTTTTTNNTTTTNTTTTTNTTTTNTTTTTTNTNTTTTTTNTTNTTTTTTTTTNTNNTTTTTTTTT **- 4**
- TTTTTTTTTTNNTTTTTTTTTTTTTTNTTTTNTTTTTTTTTTNTTTTTTTTNTTTTTTNTTTTTTTTTTTTNTTNTTTTTTTTTTTTTTTNNTTTTTTTTTTTTTTNTTTTNTTTTTTTTTTNTTTTTTTTNTTTTTTNTTTTTTTTTTTTNTTNTTTTTTTTTTTTTTTNNTTTTTTTTTTTTTTNTTTTNTTTTTTTTTTNTTTTTTTTNTTTTTTNTTTTTTTTTTTTNTTNTTTTTTTTTTTTTTTNNTTTTTTTTTTTTTTNTTTTNTTTTTTTTTTNTTTTTTTTNTTTTTTNTTTTTTTTTTTTNTTNTTTTTTTTTTTTTTTNNTTTTTTTTTTTTTTNTTTTNTTTTTTTTTTNTTTTTTTTNTTTTTTNTTTTTTTTTTTTNTTNTTTTT **- 5**
- TTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTTTTTTTTTTTTTTTTTNTTTT **- 6**

שיעורי חיזוי נכון (היסטוריה של 5 הוראות)

2 bit counter:
0 : 0.98
1 : 0.7475
2 : 0.605
3 : 0.61
4 : 0.7675
5 : 0.8725
6 : 0.9475
avg: 0.7672

local history & tables:
0 : 0.99
1 : 0.995
2 : 0.6025
3 : 0.605
4 : 0.76
5 : 0.885
6 : 0.95
avg:

global history & table:
0 : 0.99
1 : 0.655
2 : 0.565
3 : 0.77
4 : 0.7675
5 : 0.88
6 : 0.965
avg:

local history
global table:
0 : 0.98
1 : 0.98
2 : 0.6275
3 : 0.64
4 : 0.785
5 : 0.865
6 : 0.9275
avg:

global history
local tables:
0 : 0.99
1 : 0.7975
2 : 0.5725
3 : 0.74
4 : 0.7975
5 : 0.9475
6 : 0.9975
avg:

instructions	1,000,000
pipe length	5
penalty	3
branch probability	5

	all wrong	bimodal	local	global hist	perfect
hit rate	0	0.7672	0.8072	0.816	1
cycles	16,000,005	4,492,005	3,892,005	3,760,005	1,000,005
speed up		356.2%	115.4%	103.5%	376.0%