איסוף אשפה (Garbage collection)

כותרת חילופית: ניהול זיכרון דינמי (Dynamic memory allocation)

ספר בתחום: Garbage Collection: Algorithms for automatic dynamic memory management, Richard Jones and Rafael Lins, Wiley, 1999.

```
void insert(int x){
   NODE * = malloc(sizeof(NODE));
   p → value = x ;
   p → next = s ;
   s = p ;
}
```

כמה זיכרון צורכת התוכנית הבאה ?

```
void main( ){
   for (i=0;  i < 5;  i++)
            insert(i);
   for (i=0;  i<1000;  i++)
            insert(i);
            delete(i-5);
}
```

```
void delete(int x){
   for (p = s; p → next → value ≠ x;  p = p → next);
   p → next = p → next → next ;
}
```

©Geiger & Itai, 2001

איסוף אשפה

הבעיה: איך לשחרר צמתים שהמתכנת לא שחרר באמצעות פקודת free.

חשיבות הבעיה

- בתוכניות גדולות עם הרבה מודולים והרבה אובייקטים (בניגוד לתוכניות שראינו בקורס) קשה למתכנתים לדעת מתי באמת משתחרר אובייקט.
- כאשר מיוצרת אשפה (Memory leak) קשה מאד לאתר את התקלה, כלומר ה- debugging קשה. לדוגמא בשפת C ניתן להחליף את malloc בפונקציה gcalloc ואת free בפונקציה gcfree אשר תומכות באיסוף אשפה אוטומטי ואז זליגת הזיכרון נפתרת.
- בשפת JAVA אין פקודת free. אחת הסיבות היא בטיחות.

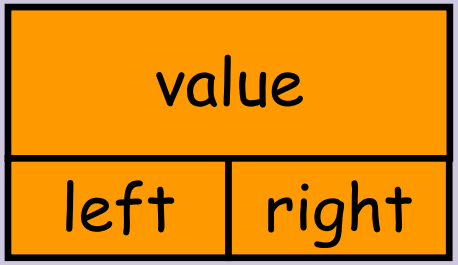
מודל לשימוש בזיכרון

הזיכרון מחולק פונקציונלית ל"מחסנית ריצה" ול"ערימת אובייקטים".
הערימה (Heap) משמשת לשמירת אובייקטים המיוצרים באופן דינמי
והמחסנית שומרת לכל תוכנית מסגרת (frame) אשר מכילה את משתני
התוכנית.

אל תבלבלו את השם Heap עם מבנה הנתונים בעל השם הזהה!!!

- ה-Heap מורכב ממערך mem[m] שבו מוקצים צמתים (אובייקטים)
מהצורה :

```
typedef struct node {
    DATA  value;
    node *left *right;
} NODE;
```

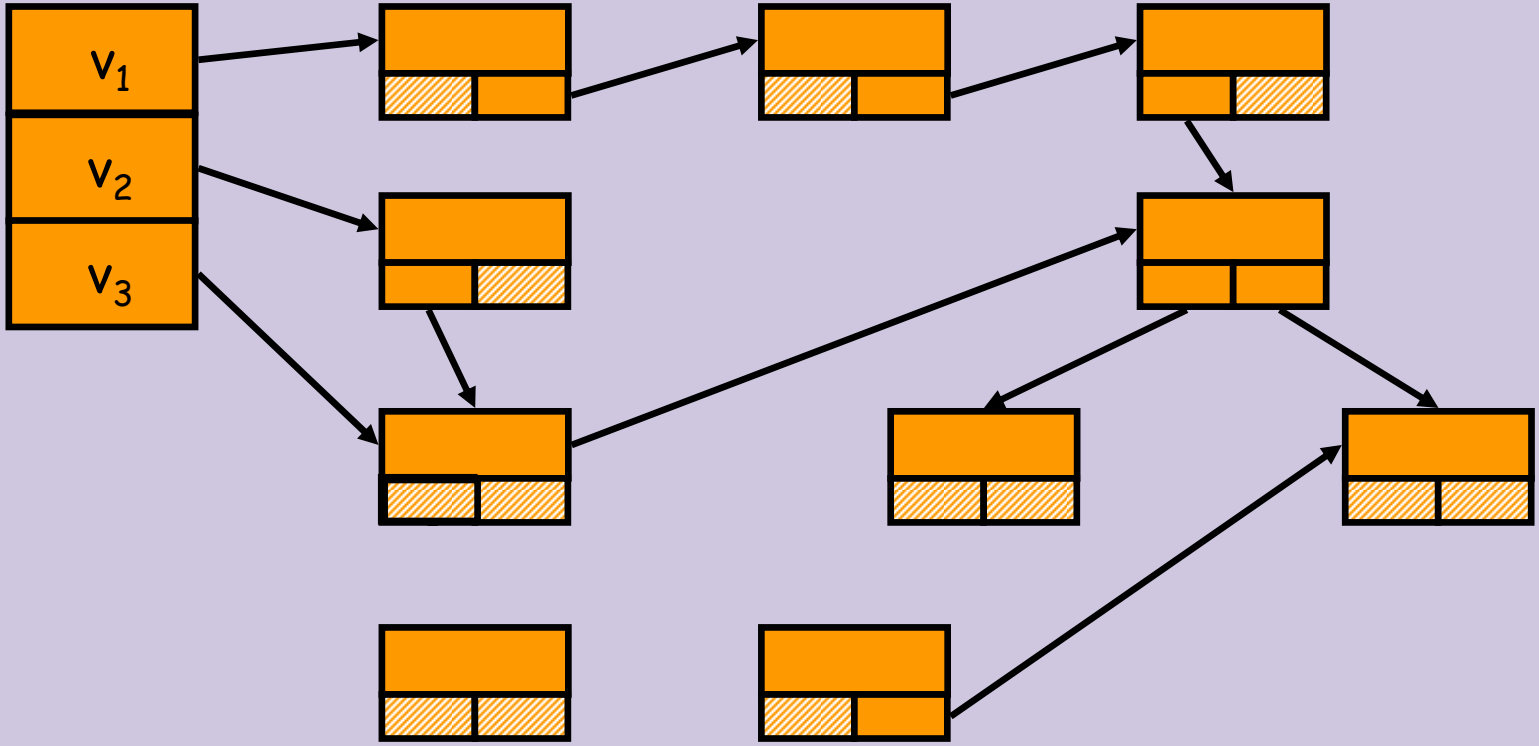


(צמתים מורכבים יותר ושוני גודל אפשריים, אך אנו נתרכז במודל פשוט).

- קיימת רשימה AVAIL של צמתים לא מנוצלים. כל פעם שעושים malloc
מקבלים צומת מרשימה זו וכשעושים free מחזירים צומת לרשימה AVAIL.

מודל לשימוש בזיכרון (המשך)

- ניתן לגשת לצמתים ב-Heap רק דרך "משתני התוכנית" $v_1,\ldots,v_n$ הנמצאים במחסנית הריצה.



<u>אשפה</u>: צמתים מנותקים, כאלה שאין אליהם מסלול מאף v_i.

כיצד נוצרת אשפה ?

נתאר שלושה פתרונות לבעיית האשפה: ספירה, סימון, ודחיסה.

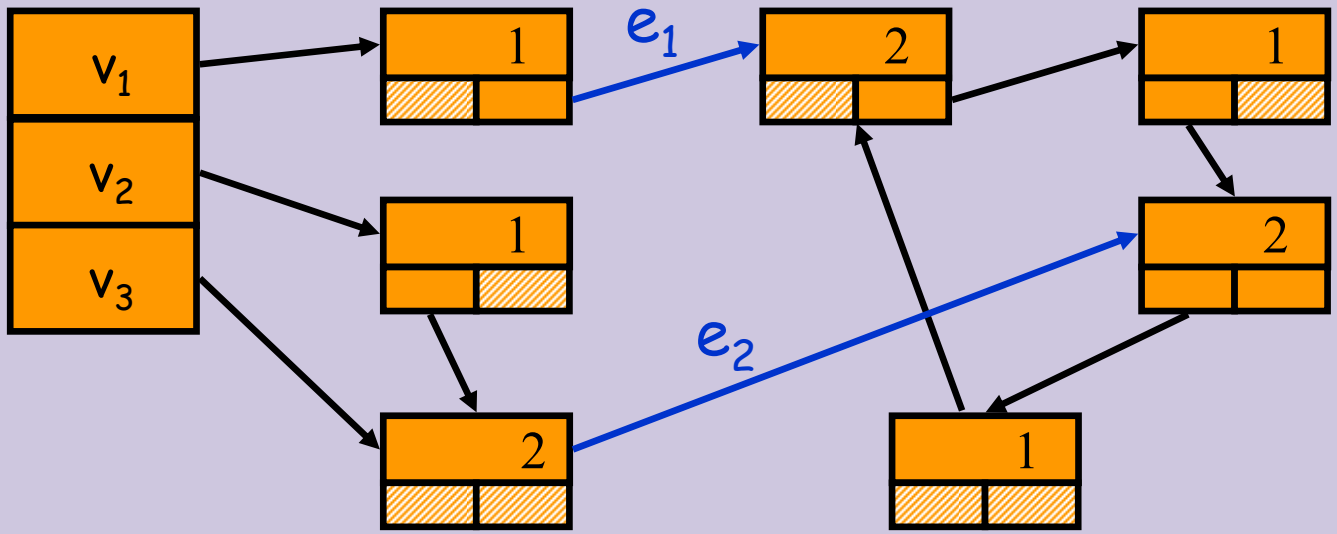
©cs,Technion

פתרון ע"י ספירה (reference counting)

הוסף לכל צומת V שדה count השומר את מספר המצביעים אליו.

עדכן את V.count בכל פעם שמשנים מצביע לצומת V.

כאשר עבור צומת V מתקבל V.count=0 הוסף את V לרשימת הצמתים הלא-מנוצלים AVAIL ועדכן את count לצמתים אליהם V מצביע.



<u>בעיה</u>: מעגלים תמיד מכילים צמתים עם count חיובי אפילו אם אין גישה למעגל כולו. למשל אם נבטל קשת e_1 וקשת e_2 נקבל מעגל ללא גישה אליו, כלומר אשפה.

©cs,Technion

פתרון ע"י סימון (tracing collector)

הרעיון: כאשר הרשימה AVAIL מתרוקנת, עוברים על הזיכרון כולו ומסמנים את כל הצמתים אליהם יש גישה ממשתני התוכנית. עוברים שנית על הזיכרון ומכניסים לרשימה AVAIL את כל הצמתים שלא סומנו. כדי לאפשר את סימון הצמתים יש להוסיף שדה בולאני label לכל צומת.

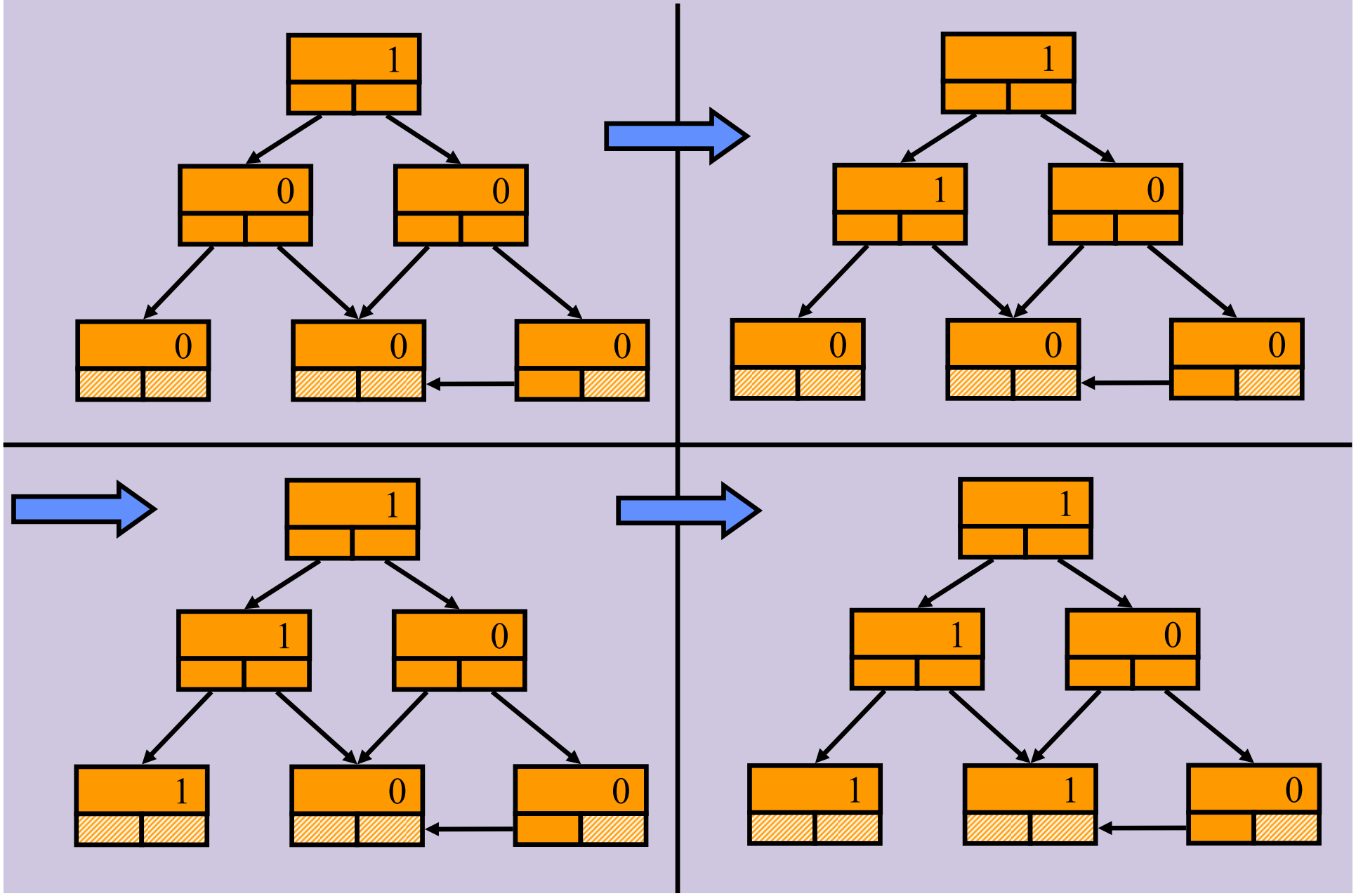
האלגוריתם

- עבור על כל צמתי הזיכרון וקבע label=0.
- סמן את הצמתים הקשורים ישירות למשתני התוכנית ע"י label = 1.
- אם סימנת צומת w שלא היה מסומן, המשך רקורסיבית עם הבן השמאלי והימני כדלקמן:

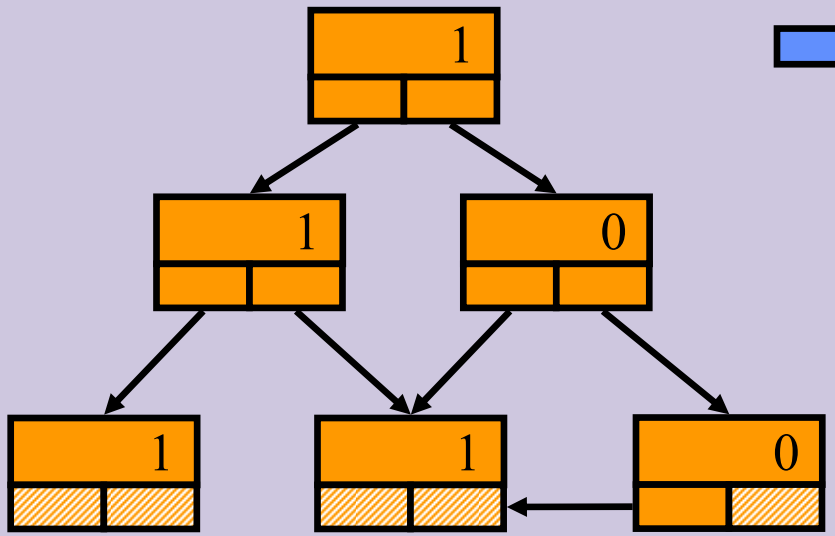
```
void mark(NODE *w){
  if(w!=NULL && w → label = = 0) {
    w → label = 1;
    mark(w → left);
    mark(w → right); }
}
```

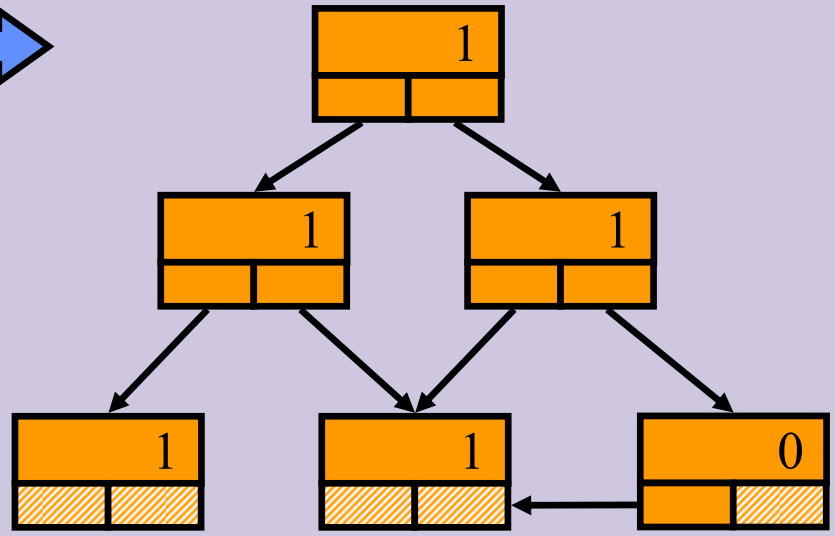
הערה: זהו אלגוריתם preorder עבור עצים. אבל הוא מסמן גרפים מכוונים כלשהם.

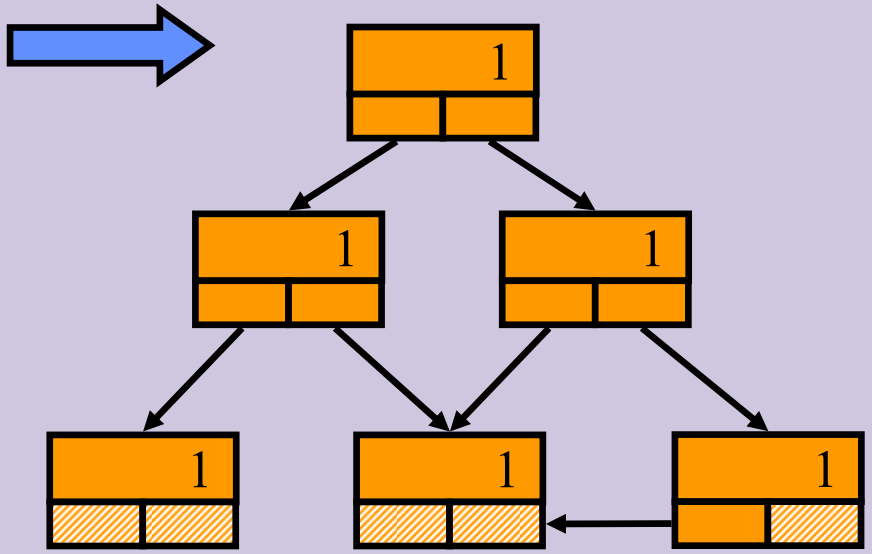
דוגמא על גרף כללי



דוגמא על גרף כללי







הערות:

- זהו אלגוריתם Depth First Search לסיור בגרפים מכוונים.
- גם סימון וגם ספירה ישימים כאשר לצמתי הזיכרון יותר משני בנים.

סימון ללא רקורסיה

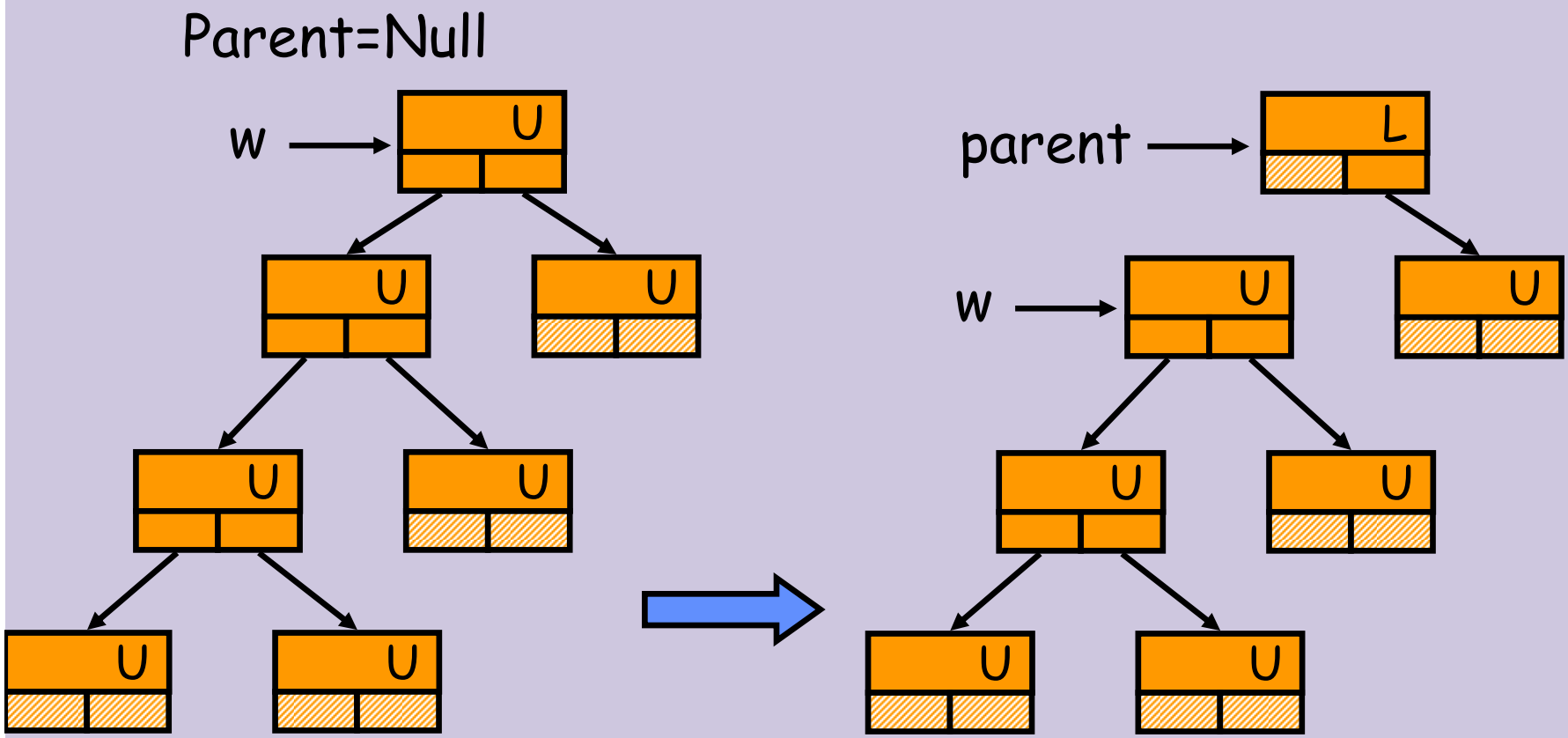
מהם דרישות הזיכרון של אלגוריתם הסימון?

האלגוריתם שהצגנו הוא חסר ערך, כי מפעילים אותו כאשר נגמר הזיכרון, אבל לשם מימושו צריך מחסנית. במקרה הגרוע, גודל המחסנית הוא כמספר הצמתים הקשורים, (מתי זה קורה?) ובמקרה הגרוע, כל הצמתים קשורים.

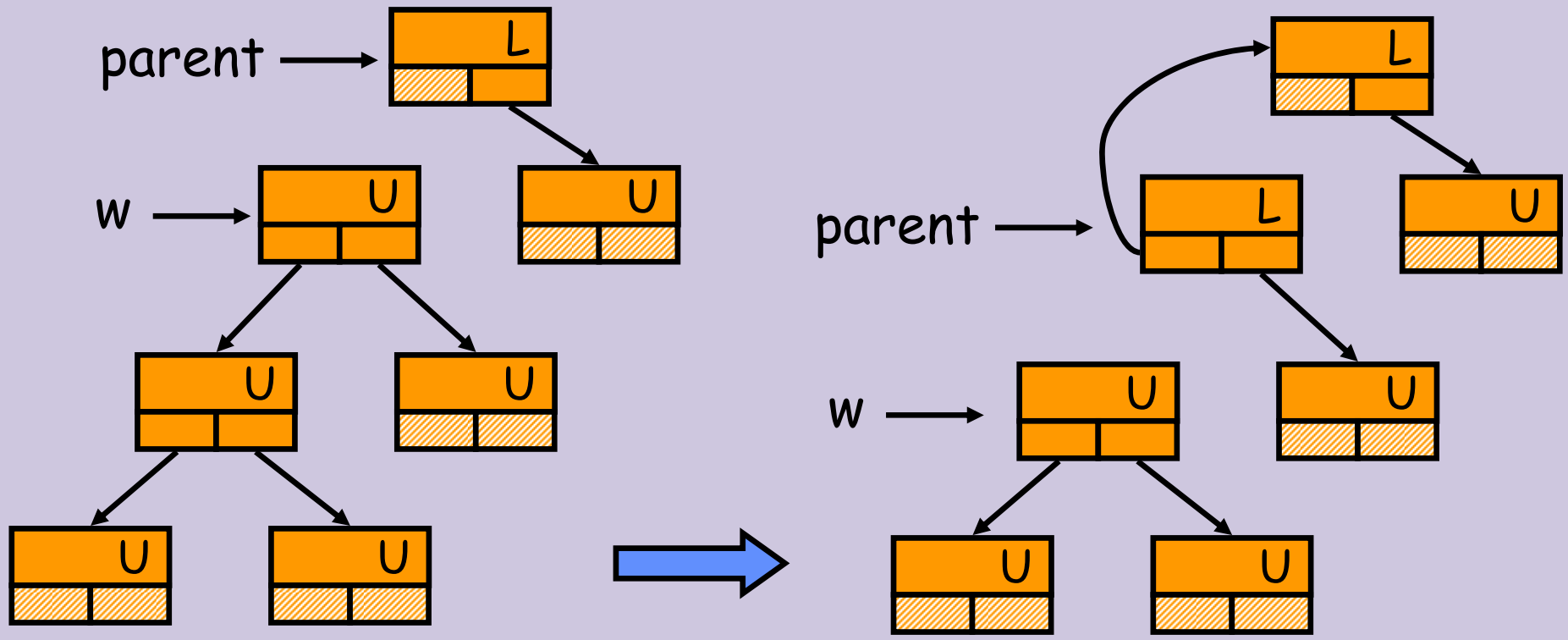
פיתרון: סימון ללא רקורסיה

הרעיון: כאשר נבקר בצומת, נשמור את המכוון להורה שלו בשדה left או right כך שנוכל לחזור להורה בסוף הביקור. לתווית של כל צומת יהיו שלושה ערכים: {u,r,l} שיאפשרו לדעת איזה מכוון מצביע להורה. נשתמש במשתנים הבאים: root עבור שורש העץ ו-w עבור הצומת הנוכחי (מאותחל ל-root). השיטה נקראת הפוך מצביעים (Pointer Reversal): פרק 4.3 בספר (Garbage Collection, Jones & Lins, 96).

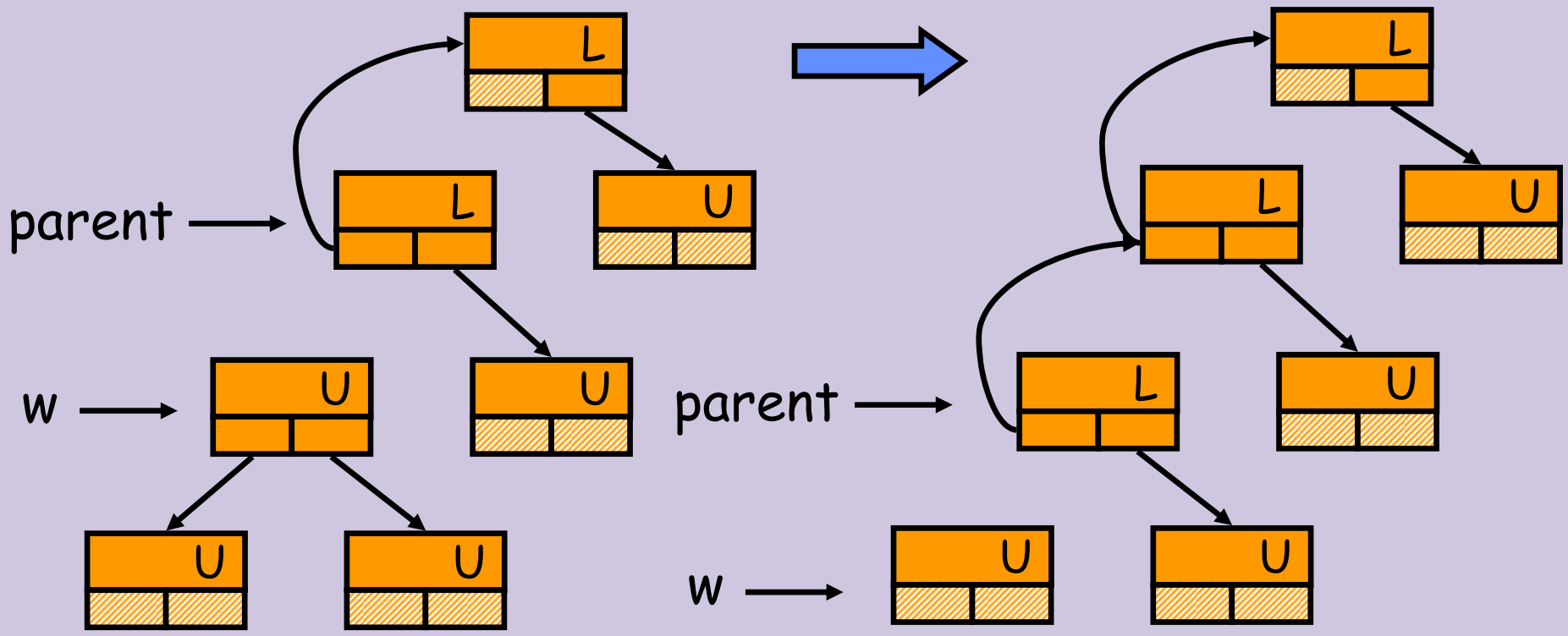
סימון ללא רקורסיה



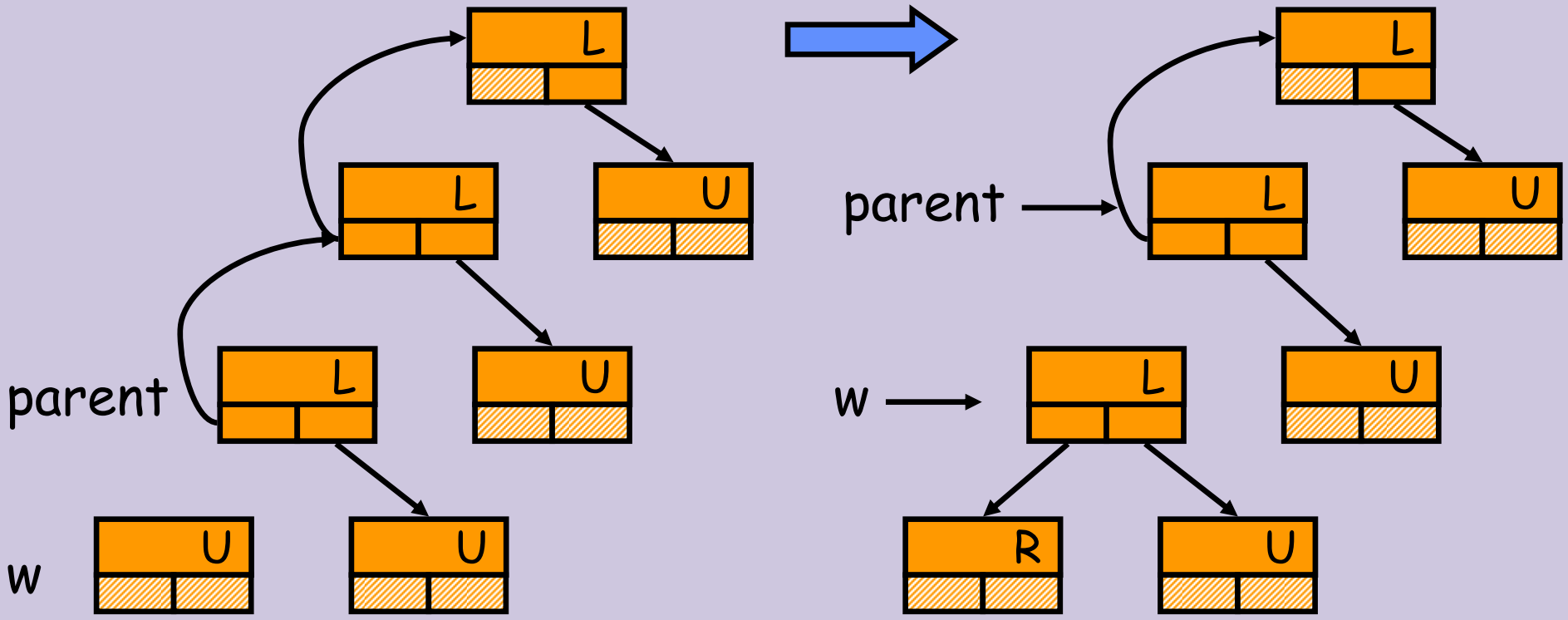
סימון ללא רקורסיה (המשך)



סימון ללא רקורסיה (המשך)

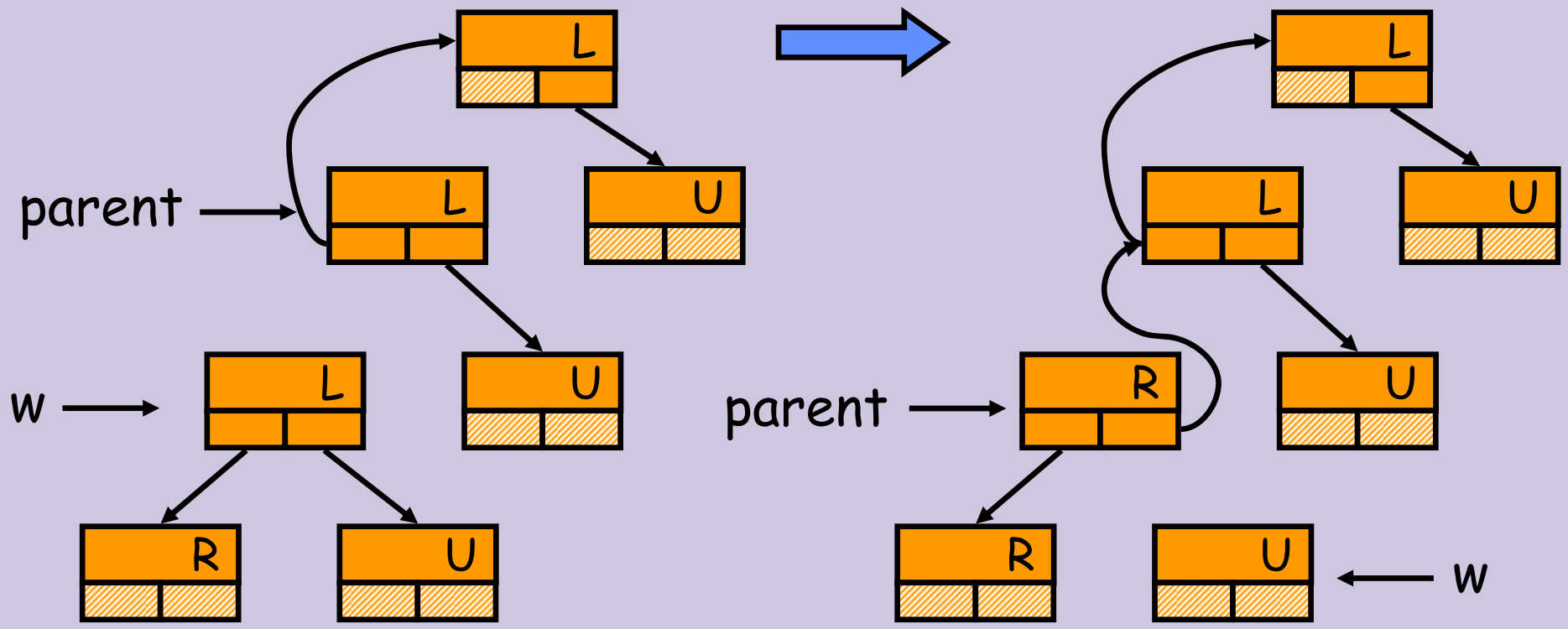


סימון ללא רקורסיה (המשך)

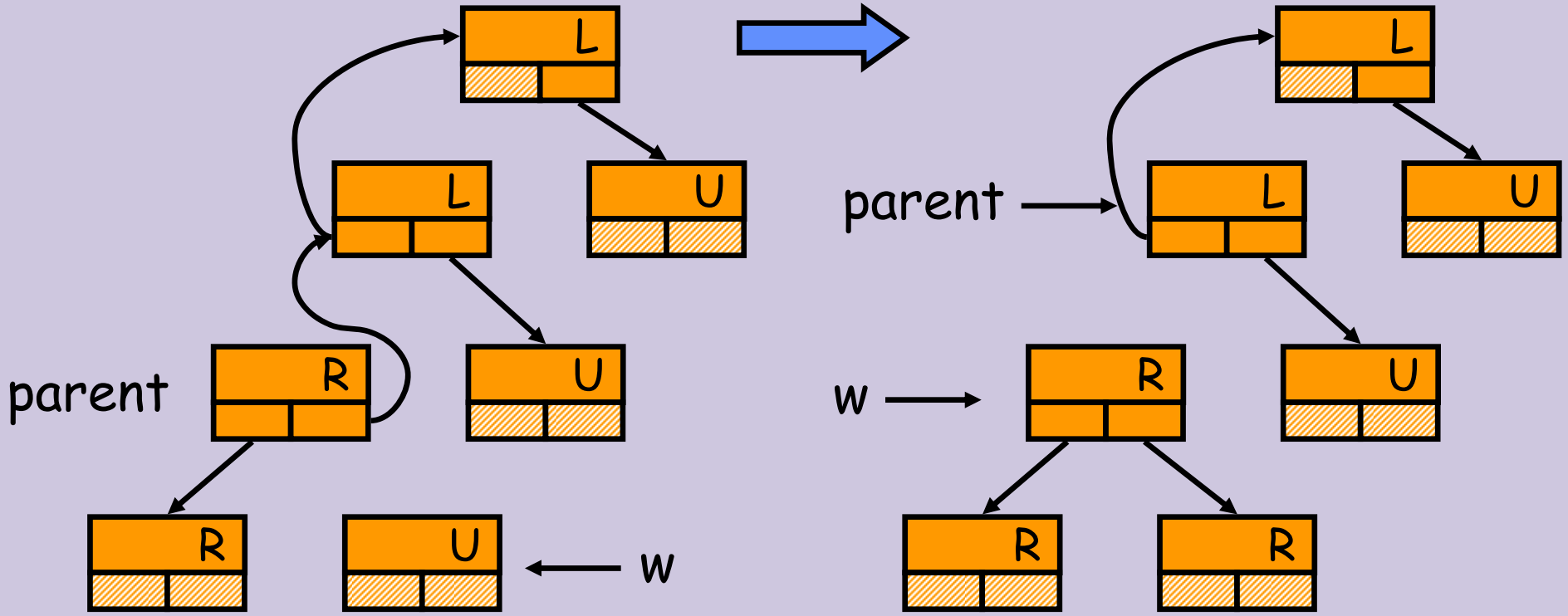


©cs,Technion

סימון ללא רקורסיה (המשך)



סימון ללא רקורסיה (המשך)

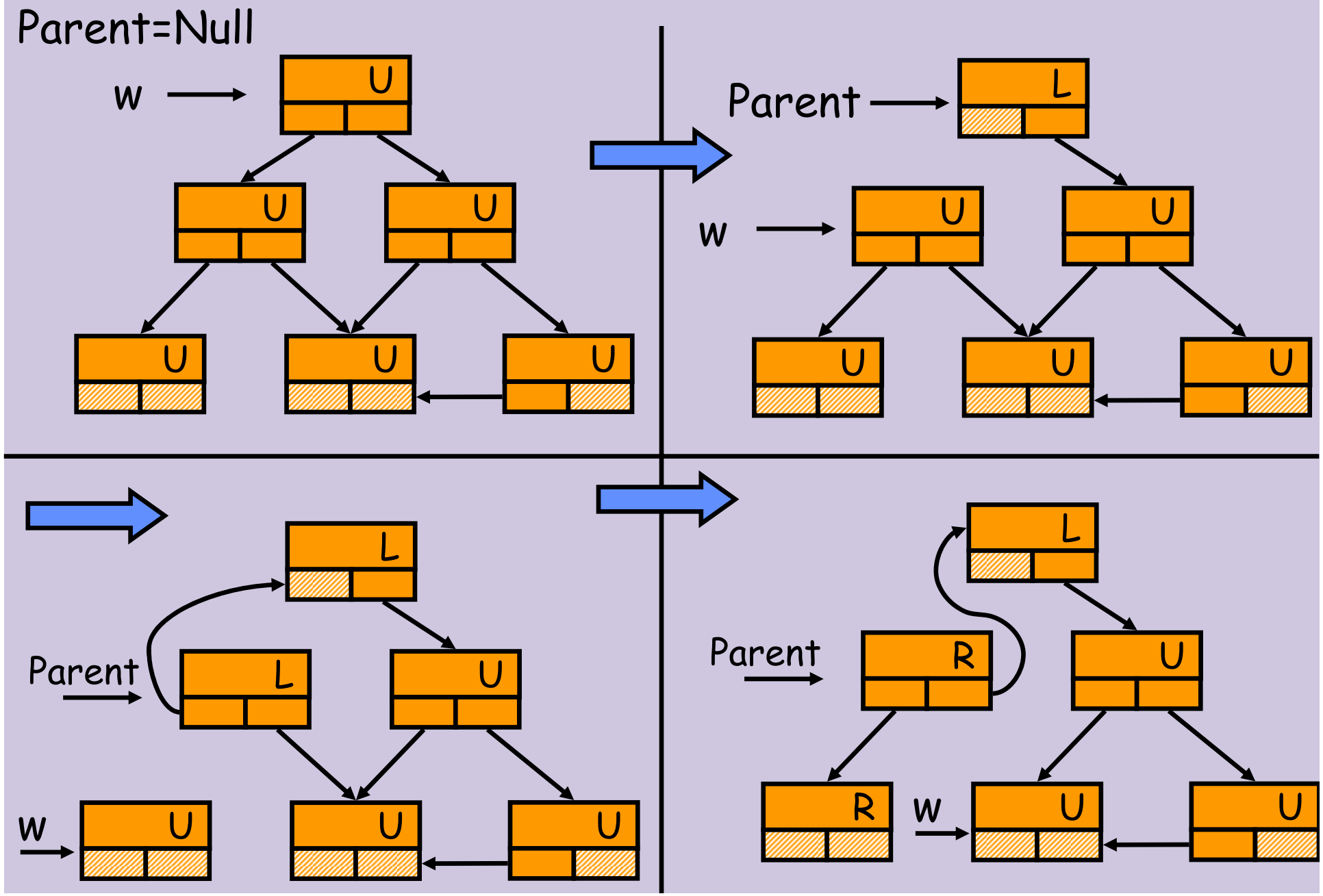


בסוף ריצת הפרוצדורה כל התוויות מסומנות R.

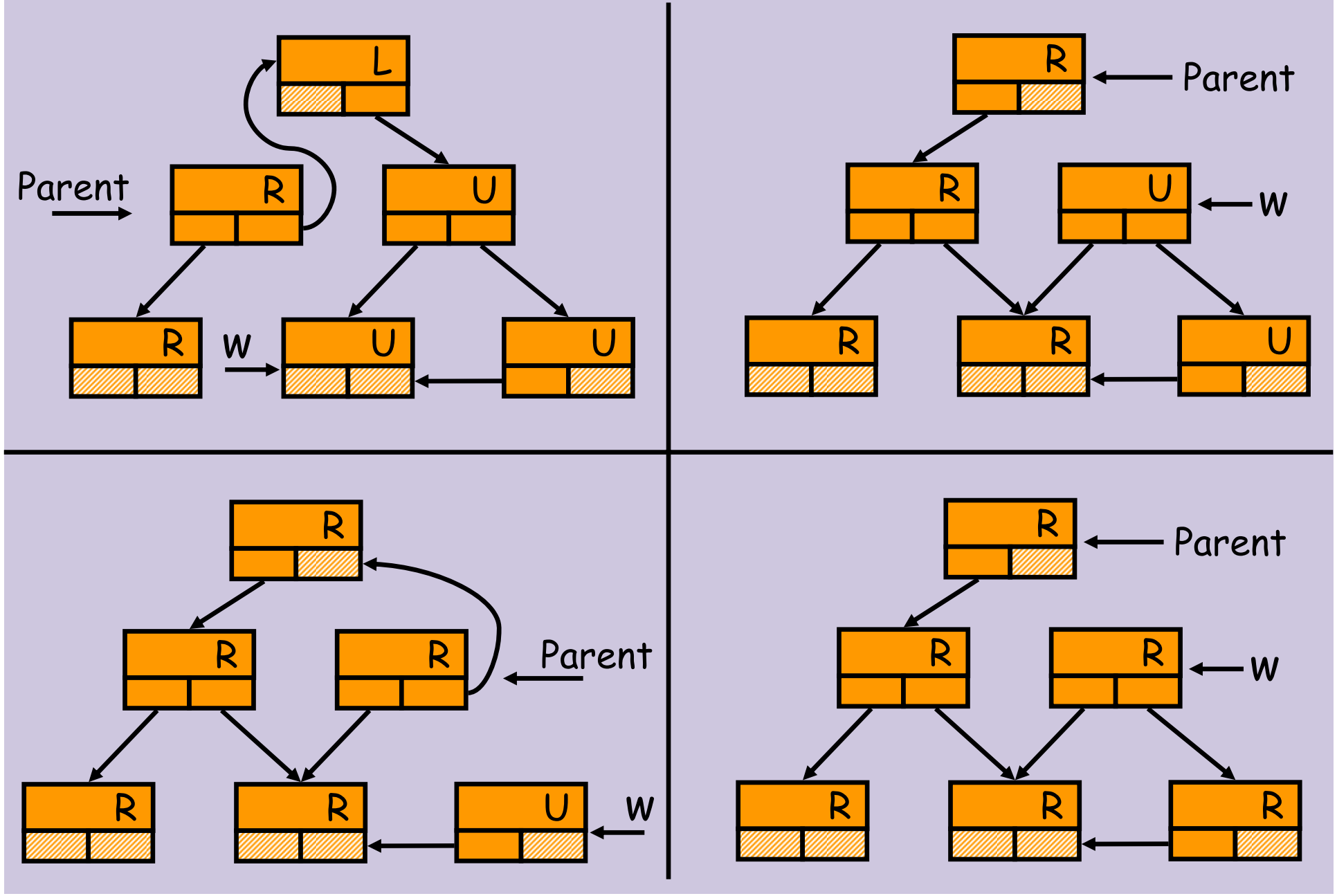
שלד התוכנית

```
Void mark (NODE root) {
  NODE *w = root ;
  NODE *parent = NULL;
  NODE *temp
While(w != NULL){
        if ((w → label ==  U) && (w → left != NULL) && (w → left → label = = U)){
        GO-LEFT :  w → label = L;
        temp = w → left;            /*  הורדת מצביעים שמאלה תוך שימוש בתא עזר  */
        w → left = parent;
        w = temp;
        }
        else if (w → label = = L) && (w → right != NULL) && (w → right → label = = U)){
        GO-RIGHT :  w → label = R;
        המשך באופן דומה...
        else {                      /* ביקרנו כבר את הילדים של w*/
        GO-UP :
        המשך באופן דומה...
}
```

האלגוריתם עובד גם על גרף כללי



האלגוריתם על גרף כללי (המשך)



התכנית הראשית

```
Garbage_collect( ){
   for(v in memory)
         v.label = U;
   for(program variable x)
         mark(x);
   for(v in memory){
         if(v.label == U)
               add v to AVAIL;
   }
}
```

©cs,Technion

הערות

רצוי למנוע מצב שמדי פעם נעשית פעולה ארוכה של איסוף אשפה מזיכרון שבו נערמה אשפה רבה.

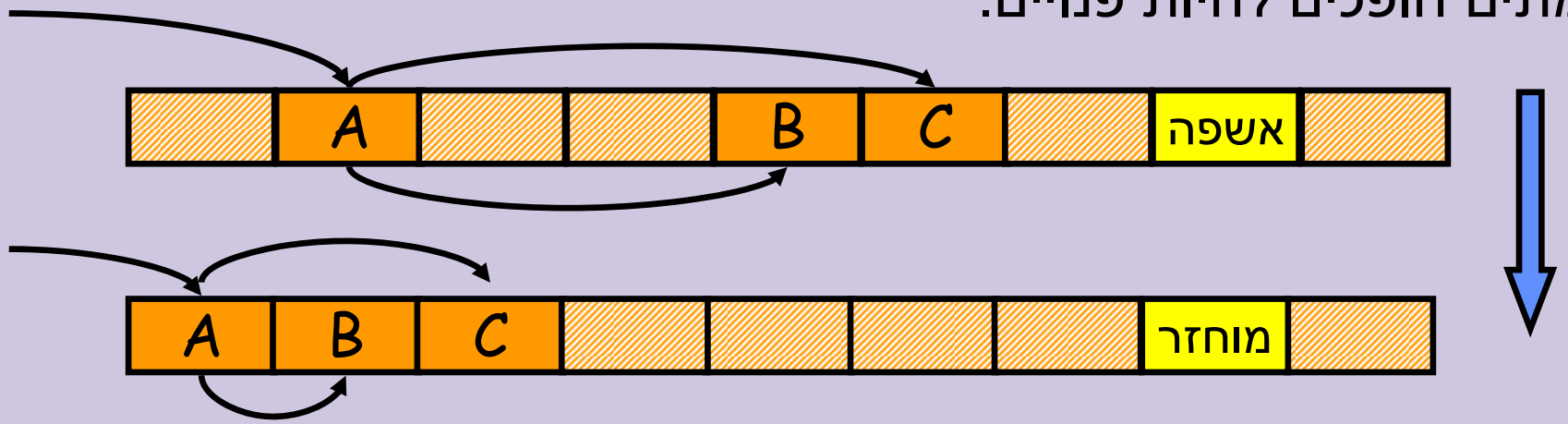
פיתרון

- שילוב בן ספירה וסימון. ספירה משחררת צמתים בזמן שהם מתגלים. בד"כ אין מעגלים רבים וספירה מונעת הצטברות אשפה. ניתן להגביל את גודל השדה count לשלושה-ארבע ביטים מפני שרק לעיתים רחוקות מספר המצביעים על צומת גדולה מ-10. מצב נדיר זה מטופל ע"י הסימון.
- איסוף אשפה גם כאשר רשימת AVAIL אינה ריקה (on the fly), במקביל לפעולות הרגילות של התכנית.

©cs,Technion

דחיסה (Compaction)

מטרה: ריכוז כל הצמתים הקשורים בתחילת הזיכרון – כל שאר הצמתים הופכים להיות פנויים.



נדרשת זהירות בעדכון המצביעים: העתקה של צמתים למקומם החדש אינה מספיקה. להלן פתרון ראשוני לבעיה:

לכל צומת נוסיף שדה new-addr שישמש אותנו בזמן איסוף האשפה.

- נבצע סימון.
- נחשב לכל צומת את הכתובת החדשה, ונשים אותה בשדה new-addr.
- נעבור על הצמתים הקשורים ונעדכן מצביעים.
- נעתיק את הצמתים.

פרוט התוכנית

1. סימון:

```
For (i = 0; i < n; i++)
   mark(v_i) ;
```

2. חישוב כתובת חדשה:

```
p=0;
  for (j=0; j < m; j++){
     if(mem[j].label != U)
        mem[j].new_addr = p++;
}
```

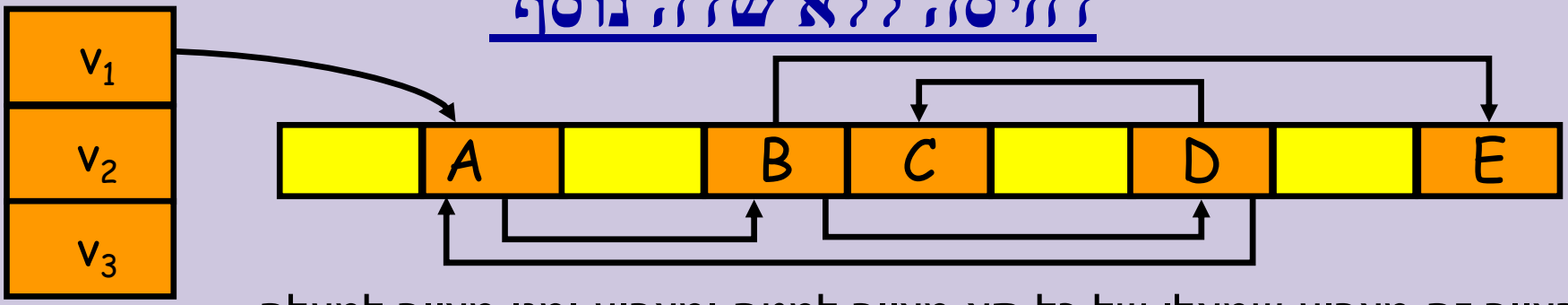
3. עדכון מצביעים:

```
for (j=0; j < m; j++){
  if(mem[j].label != U){
    if (mem[j].left != NULL){
        mem[j].left = mem[j].left → new_addr;
    if (mem[j].right != NULL){
        mem[j].right=mem[j].right → new_addr;
  }
}
```

4. העתקה:

```
  for (j=0; j < m; j++){
     if(mem[j].label != U){
        mem[mem[j].new_addr] = mem[j];
}  /*  mem[j].new_addr < j   :שימו לב שמתקיים */
```

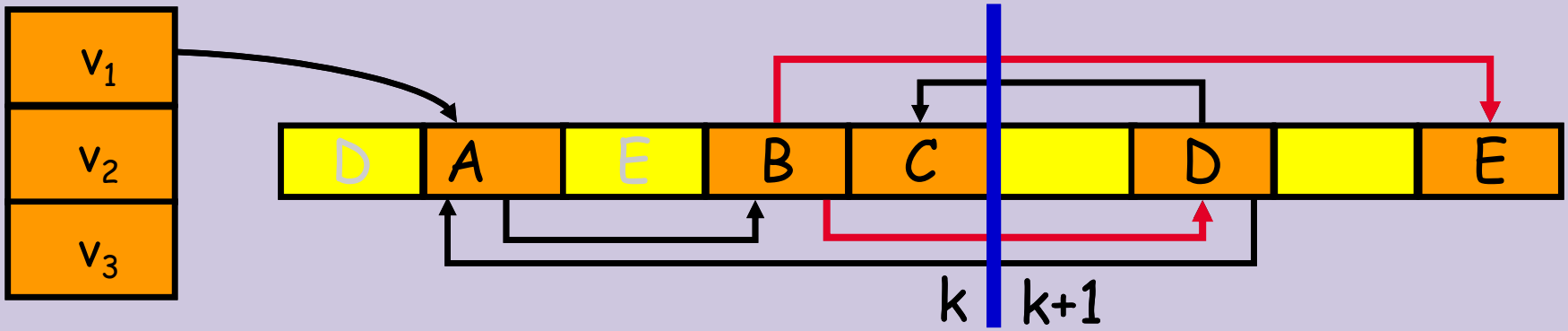
דחיסה ללא שדה נוסף



בציור זה מצביע שמאלי של כל תא מצויר למטה ומצביע ימני מצויר למעלה.

הרעיון: נניח שישנם k צמתים נגישים. בדוגמא k=5.

כל הצמתים בכתובות 1...k יושארו במקומם. כל צמתים הקשורים הנמצאים במקומות k+1...m יועתקו למרווחים שנמצאים ב-k הכתובות הראשונות.

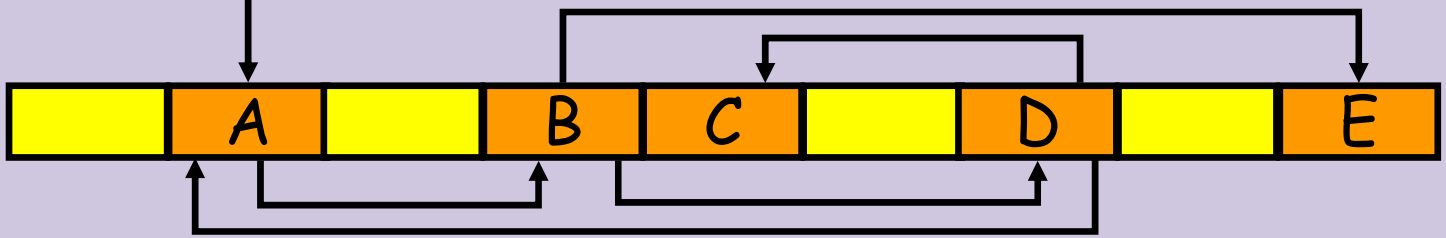


בזמן העתקת צומת V לכתובתו החדשה, נשמור במקומו הישן (נאמר בשדה left) מצביע לכתובת החדשה. מצביע זה ישמש לעדכון המכוונים המצביעים אל V. בדוגמא נעדכן את שני המצביעים של צומת B לכתובות החדשות של D ושל E.

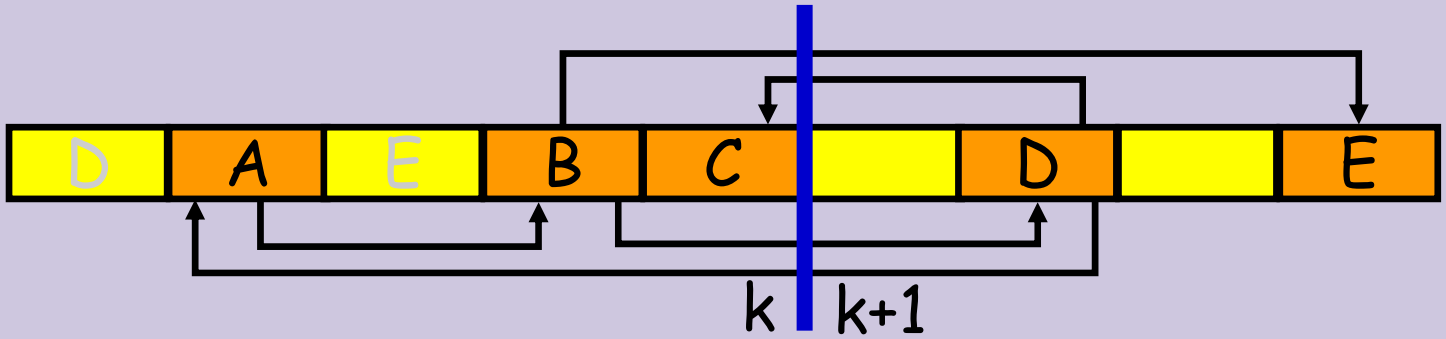
©cs,Technion

האלגוריתם לדחיסה

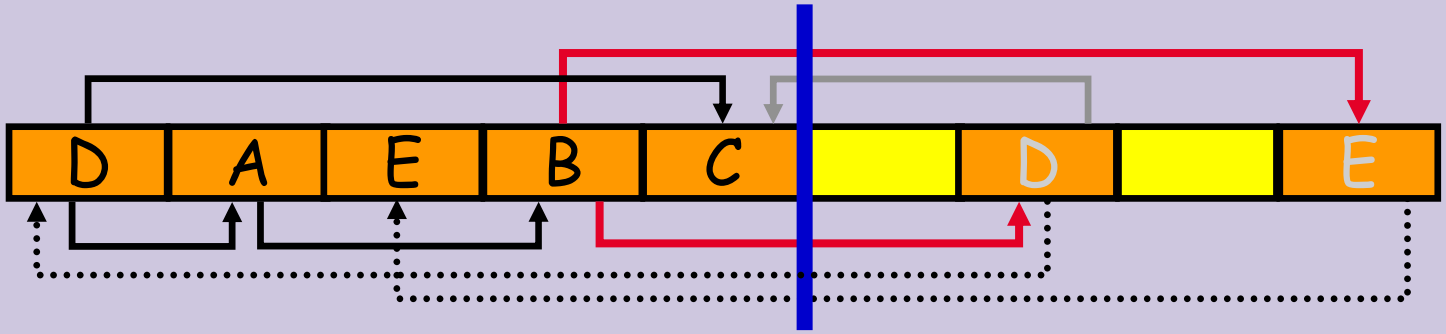
סימון וספירה:



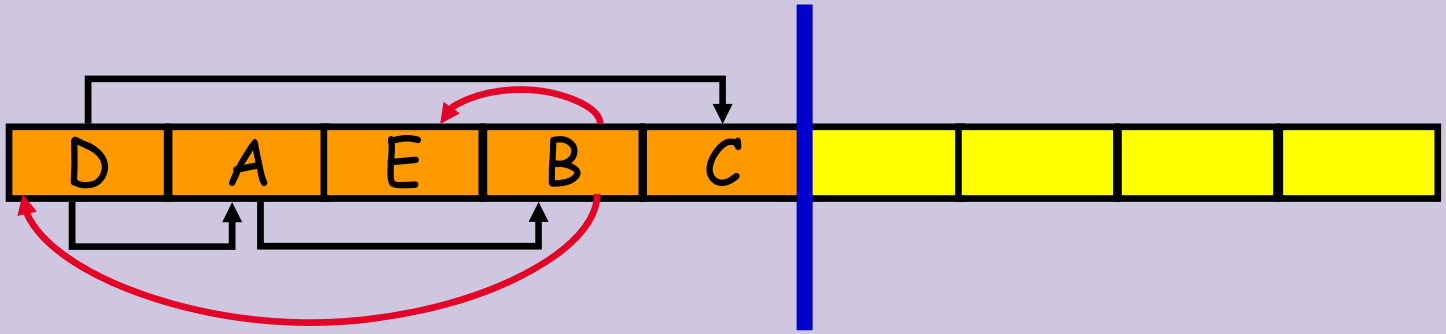
חישוב כתובות:



העתקת צמתים:



עדכון מצביעים:



הערות לסיכום

- בשיטת הספירה משתמשים לדוגמא במערכות ה- unix: awk, perl וכן במערכות חומרה קטנות כמו בקרים בהם פעולת reset מנקה אשפה.
- בשפת MODULA 2+ משתמשים בשיטת ספירה עם backup בעזרת שיטת הסימון.
- בספר Garbage Collection: Algorithms for automatic dynamic memory management, Richard Jones and Rafael Lins, Wiley, 1999.

יש פרקים על איסוף אשפה בשפת C++ ובשפות רבות נוספות.

- כל האלגוריתמים בהם דנו ניתנים להרחבה לזיכרון המכיל אובייקטים מסוגים וגדלים שונים.

Garbage Collection