

Sortare

SD 2019/2020

Sortare bazată pe comparații

- sortare prin interschimbare

- sortare prin inserție

- sortare prin selecție

- sortare prin interclasare (*merge sort*)

- sortare rapidă (*quick sort*)

Sortare prin numărare

Sortare prin distribuire

Problema sortării

► Forma 1:

- Intrare: $n, (v_0, \dots, v_{n-1})$
- Ieșire: (w_0, \dots, w_{n-1}) astfel încât (w_0, \dots, w_{n-1}) este o permutare a (v_0, \dots, v_{n-1}) și $w_0 \leq \dots \leq w_{n-1}$

► Forma 2:

- Intrare: $n, (R_0, \dots, R_{n-1})$ cu cheile k_0, \dots, k_{n-1}
- Ieșire: (R'_0, \dots, R'_{n-1}) astfel încât (R'_0, \dots, R'_{n-1}) este o permutare a (R_0, \dots, R_{n-1}) și $R'_0 \cdot k_0 \leq \dots \leq R'_{n-1} \cdot k_{n-1}$

► Structura de date

Tabloul $a[0..n-1]$

$$a[0] = v_0, \dots, a[n-1] = v_{n-1}$$

Sortare bazată pe comparații

sortare prin interschimbare

sortare prin inserție

sortare prin selecție

sortare prin interclasare (*merge sort*)

sortare rapidă (*quick sort*)

Sortare prin numărare

Sortare prin distribuire

Sortare prin interschimbare (*bubble-sort*)

- ▶ Principiul de bază:
 - ▶ (i, j) cu $i < j$ este o inversiune dacă $a[i] > a[j]$
 - ▶ Cât timp există o inversiune $(i, i + 1)$ interschimbă $a[i]$ cu $a[i + 1]$

- ▶ Algorithm:

```
Procedure bubbleSort( $a, n$ )  
begin  
     $ultim \leftarrow n - 1$   
    while ( $ultim > 0$ ) do  
         $n1 \leftarrow ultim - 1$ ;  $ultim \leftarrow 0$   
        for  $i \leftarrow 0$  to  $n1$  do  
            if ( $a[i] > a[i + 1]$ ) then  
                swap( $a[i], a[i + 1]$ )  
                 $ultim \leftarrow i$   
end
```

Sortare prin interschimbare - exemplu

| | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| | 3 2 1 4 7 ($n1 = 2$) |
| 3 7 2 1 4 ($n1 = 3$) | 2 3 1 4 7 |
| 3 7 2 1 4 | 2 3 1 4 7 |
| 3 2 7 1 4 | 2 1 3 4 7 |
| 3 2 7 1 4 | 2 1 3 4 7 |
| 3 2 1 7 4 | 2 1 3 4 7 |
| 3 2 1 7 4 | |
| 3 2 1 4 7 | 2 1 3 4 7 ($n1 = 0$) |
| 3 2 1 4 7 | 1 2 3 4 7 |
| | 1 2 3 4 7 |

Sortare prin interschimbare

► Analiza

- Cazul cel mai nefavorabil

$$a[0] > a[1] > \dots > a[n-1]$$

Timp căutare: $O(n-1 + n-2 + \dots + 1) = O(n^2)$

$$T_{bubbleSort}(n) = O(n^2)$$

- Cazul cel mai favorabil: $O(n)$

Sortare bazată pe comparații

sortare prin interschimbare

sortare prin inserție

sortare prin selecție

sortare prin interclasare (*merge sort*)

sortare rapidă (*quick sort*)

Sortare prin numărare

Sortare prin distribuire

Sortare prin inserție directă

- ▶ Principiul de bază:
presupunem $a[0..i-1]$ sortat
inserează $a[i]$ astfel încât $a[0..i]$ devine sortat
- ▶ Algoritm (căutarea poziției lui $a[i]$ secvențial):

Procedure *insertSort*(a, n)

begin

for $i \leftarrow 1$ **to** $n - 1$ **do**

$j \leftarrow i - 1$ // $a[0..i-1]$ sortat

$temp \leftarrow a[i]$ // caut locul lui $temp$

while $((j \geq 0) \text{ and } (a[j] > temp))$ **do**

$a[j + 1] \leftarrow a[j]$

$j \leftarrow j - 1$

if $(a[j + 1] \neq temp)$ **then**

$a[j + 1] \leftarrow temp$

end

Sortare prin inserție directă

▶ Exemplu

3 7 2 1

3 7 2 1

2 3 7 1

1 2 3 7

▶ Analiza

- ▶ căutarea poziției i în $a[0..j-1]$ necesită $O(j-1)$ pași
- ▶ cazul cel mai nefavorabil $a[0] > a[1] > \dots > a[n-1]$

Timp căutare: $O(1 + 2 + \dots + n - 1) = O(n^2)$

$$T_{\text{insertSort}}(n) = O(n^2)$$

- ▶ Cazul cel mai favorabil: $O(n)$

Sortare bazată pe comparații

sortare prin interschimbare

sortare prin inserție

sortare prin selecție

sortare prin interclasare (*merge sort*)

sortare rapidă (*quick sort*)

Sortare prin numărare

Sortare prin distribuire

Sortare prin selecție

- ▶ Se aplică următoarea schemă:
 - ▶ pasul curent: selectează un element și-l duce pe poziția sa finală din tabloul sortat;
 - ▶ repetă pasul curent până când toate elementele ajung pe locurile finale.
- ▶ După modul de selectare a unui element:
 - ▶ Selecție naivă: alegerea elementelor în ordinea în care se află inițial (de la $n - 1$ la 0 sau de la 0 la $n - 1$)
 - ▶ Selecție sistematică: utilizare max-heap

Sortare prin selecție naivă

- ▶ În ordinea $n - 1, n - 2, \dots, 1, 0$, adică:
 $(\forall i) 0 \leq i < n \implies a[i] = \max\{a[0], \dots, a[i]\}$

Procedure *naivSort*(a, n)

begin

for $i \leftarrow n - 1$ **downto** 1 **do**

$imax \leftarrow i$

for $j \leftarrow i - 1$ **downto** 0 **do**

if ($a[j] > a[imax]$) **then**

$imax \leftarrow j$

if ($i \neq imax$) **then**

 swap($a[i], a[imax]$)

end

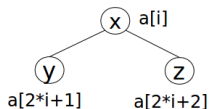
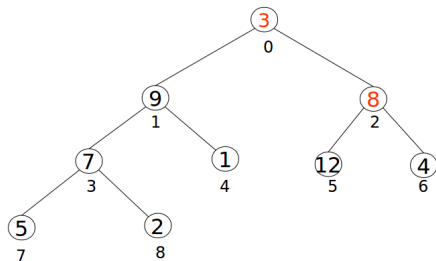
- ▶ Complexitatea timp în toate cazurile este $O(n^2)$

Heap sort (sortare prin selecție sistematică)

Etapa I

- ▶ organizează tabloul ca un max-heap: $(\forall k) 1 \leq k \leq n - 1 \implies a[k] \leq a[(k - 1)/2]$;
- ▶ inițial tabloul satisface proprietatea max-heap începând cu poziția $n/2$;
- ▶ introduce în max-heap elementele de pe pozițiile $n/2 - 1, n/2 - 2, \dots, 1, 0$.

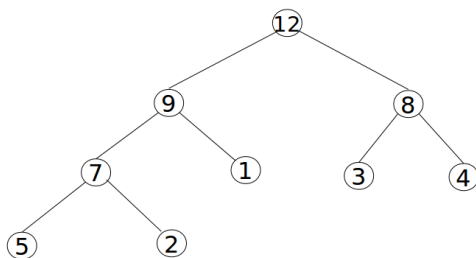
| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|----|---|---|---|
| 3 | 9 | 8 | 7 | 1 | 12 | 4 | 5 | 2 |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |



Heap sort (sortare prin selecție sistematică)

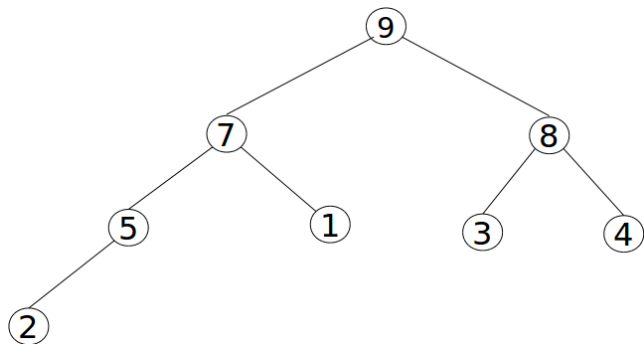
Etapa II

- ▶ selectează elementul maxim și-l duce la locul lui prin interschimbare cu ultimul;
- ▶ micșorează n cu 1 și apoi reface max-heapul;
- ▶ repetă pașii de mai sus până când toate elementele ajung pe locul lor.



Heap sort (sortare prin selecție sistematică)

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 9 | 7 | 8 | 5 | 1 | 3 | 4 | 2 | 12 |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |



Operația de introducere în heap

```
Procedure insereazaAlTlea(a, n, t)  
begin  
     $j \leftarrow t$   
    heap  $\leftarrow$  false  
    while ( $(2 * j + 1 < n)$  and not heap) do  
         $k \leftarrow 2 * j + 1$   
        if ( $(k < n - 1)$  and ( $a[k] < a[k + 1]$ )) then  
             $k \leftarrow k + 1$   
        if ( $a[j] < a[k]$ ) then  
            swap( $a[j]$ ,  $a[k]$ )  
             $j \leftarrow k$   
        else  
            heap  $\leftarrow$  true  
end
```

Heap sort (sortare prin selecție sistematică)

```
Procedure heapSort(a, n)  
begin  
    // construiește maxheap-ul  
    for  $t \leftarrow (n - 1)/2$  downto 0 do  
        insereazaAlTlea(a, n, t)  
    // elimina  
     $r \leftarrow n - 1$   
    while ( $r > 0$ ) do  
        swap(a[0], a[r])  
        insereazaAlTlea(a, r, 0)  
         $r \leftarrow r - 1$   
end
```

Heap sort - Exemplu

| | | | | | |
|-----------|-----------|----------|-----------|----------|--------------|
| 10 | 17 | 5 | 23 | 7 | (n = 5) |
| 10 | 17 | <u>5</u> | <u>23</u> | <u>7</u> | |
| 10 | <u>23</u> | <u>5</u> | <u>17</u> | <u>7</u> | |
| 23 | 10 | 5 | 17 | 7 | |
| <u>23</u> | <u>17</u> | <u>5</u> | <u>10</u> | <u>7</u> | (max-heap n) |

Heap sort - Exemplu

| | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| <u>23</u> | <u>17</u> | <u>5</u> | <u>10</u> | <u>7</u> | (max-heap n) |
| <u>7</u> | <u>17</u> | <u>5</u> | <u>10</u> | 23 | |
| <u>17</u> | <u>10</u> | <u>5</u> | <u>7</u> | 23 | (max-heap n-1) |
| <u>7</u> | <u>10</u> | <u>5</u> | 17 | 23 | |
| <u>10</u> | <u>7</u> | <u>5</u> | 17 | 23 | (max-heap n-2) |
| <u>5</u> | <u>7</u> | <u>10</u> | 17 | 23 | |
| <u>7</u> | <u>5</u> | <u>10</u> | 17 | 23 | (max-heap n-3) |
| <u>5</u> | <u>7</u> | 10 | 17 | 23 | |
| <u>5</u> | 7 | 10 | 17 | 23 | (max-heap n-4) |
| 5 | 7 | 10 | 17 | 23 | |

Heap sort - complexitate

- ▶ formarea heap-ului (pp. $n = 2^k - 1$)
$$\sum_{i=0}^{k-1} 2(k-i-1)2^i = 2^{k+1} - 2(k+1)$$
- ▶ eliminarea din heap si refacerea heap-ului
$$\sum_{i=0}^{k-1} 2i2^i = (k-2)2^{k+1} + 4$$
- ▶ complexitate algoritm de sortare
$$T_{heapSort}(n) = 2n \log n - 2n = O(n \log n)$$

Sortare bazată pe comparații

sortare prin interschimbare

sortare prin inserție

sortare prin selecție

sortare prin interclasare (*merge sort*)

sortare rapidă (*quick sort*)

Sortare prin numărare

Sortare prin distribuire

Paradigma *divide-et-impera*

- ▶ $P(n)$: problemă de dimensiune n
- ▶ baza:
 - ▶ dacă $n \leq n_0$ atunci rezolvă P prin metode elementare
- ▶ *divide-et-impera*:
 - ▶ **divide** P în a probleme $P_1(n_1), \dots, P_a(n_a)$ cu $n_i \leq n/b, b > 1$
 - ▶ **rezolvă** $P_1(n_1), \dots, P_a(n_a)$ în aceeași manieră și obține soluțiile S_1, \dots, S_a
 - ▶ **asamblează** S_1, \dots, S_a pentru a obține soluția S a problemei P

Paradigma *divide-et-impera*: algoritm

```
Procedure DivideEtImpera( $P, n, S$ )  
begin  
  if ( $n \leq n_0$ ) then  
    determină  $S$  prin metode elementare  
  else  
    Împarte  $P$  în  $P_1, \dots, P_a$   
    DivideEtImpera( $P_1, n_1, S_1$ )  
    ...  
    DivideEtImpera( $P_a, n_a, S_a$ )  
    Asambleaza( $S_1, \dots, S_a, S$ )  
end
```


Sortare prin interclasare (*Merge sort*)

- ▶ generalizare: $a[p..q]$
- ▶ baza: $p \geq q$
- ▶ *divide-et-impera*
 - ▶ divide: $m = \lfloor (p + q)/2 \rfloor$
 - ▶ subprobleme: $a[p..m]$, $a[m + 1..q]$
 - ▶ asamblare: interclasează subsecvențele sortate $a[p..m]$ și $a[m + 1..q]$
 - ▶ inițial memorează rezultatul interclasării în *temp*
 - ▶ copie din $temp[0..q - p + 1]$ în $a[p..q]$
- ▶ complexitate:
 - ▶ timp: $T(n) = O(n \log n)$
 - ▶ spațiu suplimentar: $O(n)$

Interclasarea a două secvențe sortate

- ▶ problema:

- ▶ date $a[0] \leq a[1] \leq \dots \leq a[m-1]$, $b[0] \leq b[1] \leq \dots \leq b[n-1]$, să se construiască $c[0] \leq c[1] \leq \dots \leq c[m+n-1]$ a.î.
 $(\forall k)((\exists i)c[k] = a[i]) \vee (\exists j)c[k] = b[j])$ iar pentru $k \neq p$, $c[k]$ și $c[p]$ provin din elemente diferite

- ▶ soluția

- ▶ inițial: $i \leftarrow 0$, $j \leftarrow 0$, $k \leftarrow 0$
- ▶ pasul curent:
 - ▶ dacă $a[i] \leq b[j]$ atunci $c[k] \leftarrow a[i]$, $i \leftarrow i + 1$
 - ▶ dacă $a[i] > b[j]$ atunci $c[k] \leftarrow b[j]$, $j \leftarrow j + 1$
 - ▶ $k \leftarrow k + 1$
- ▶ condiția de terminare: $i > m - 1$ sau $j > n - 1$
- ▶ dacă e cazul, copie în c elementele din tabloul neterminat

Sortare bazată pe comparații

sortare prin interschimbare

sortare prin inserție

sortare prin selecție

sortare prin interclasare (*merge sort*)

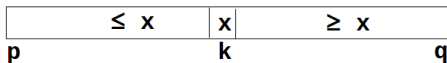
sortare rapidă (*quick sort*)

Sortare prin numărare

Sortare prin distribuire

Sortare rapidă (*Quick sort*)

- ▶ generalizare: $a[p..q]$
- ▶ baza: $p \geq q$
- ▶ *divide-et-impera*
 - ▶ divide: determină k între p și q prin interschimbări a.î. după determinarea lui k avem:
 - ▶ $p \leq i \leq k \implies a[i] \leq a[k]$
 - ▶ $k < j \leq q \implies a[k] \leq a[j]$



- ▶ subprobleme: $a[p..k-1]$, $a[k+1..q]$
- ▶ asamblare: nu există

Quick sort: partiționare

- ▶ inițial:
 - ▶ $x \leftarrow a[p]$ (se poate alege x arbitrar din $a[p..q]$)
 - ▶ $i \leftarrow p + 1; j \leftarrow q$
- ▶ pasul curent:
 - ▶ dacă $a[i] \leq x$ atunci $i \leftarrow i + 1$
 - ▶ dacă $a[j] \geq x$ atunci $j \leftarrow j - 1$
 - ▶ dacă $a[i] > x > a[j]$ și $i < j$ atunci
 $\text{swap}(a[i], a[j])$
 $i \leftarrow i + 1$
 $j \leftarrow j - 1$
- ▶ terminare:
 - ▶ condiția $i > j$
 - ▶ operații
 $k \leftarrow i - 1$
 $\text{swap}(a[p], a[k])$

Quick sort: partiționare - exemplu

Procedure *partitioneaza*(a, p, q, k)
begin

$x \leftarrow a[p]$

$i \leftarrow p + 1$

$j \leftarrow q$

while ($i \leq j$) **do**

if ($a[i] \leq x$) **then**

$i \leftarrow i + 1$

if ($a[j] \geq x$) **then**

$j \leftarrow j - 1$

if ($i < j$) **and** ($a[i] > x$) **and** ($x > a[j]$)
 then

$\text{swap}(a[i], a[j])$

$i \leftarrow i + 1$

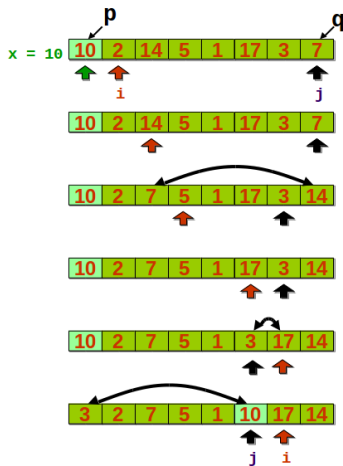
$j \leftarrow j - 1$

$k \leftarrow i - 1$

$a[p] \leftarrow a[k]$

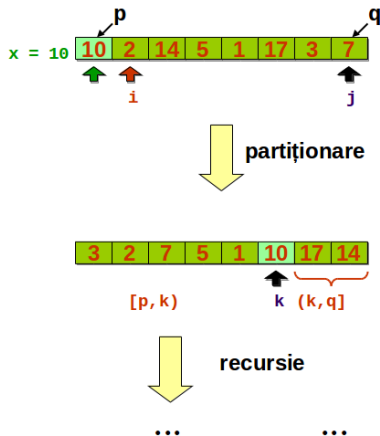
$a[k] \leftarrow x$

end

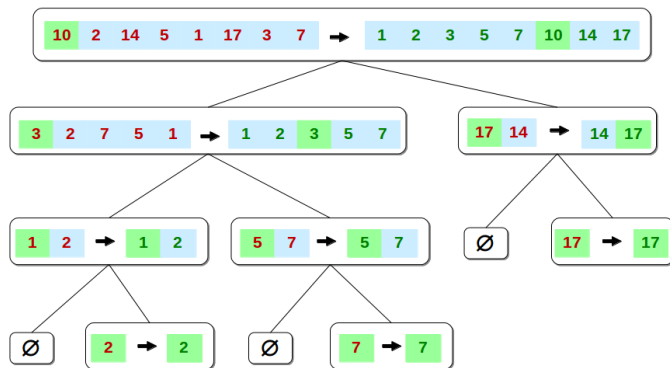


Quick sort: recursie - exemplu

```
Procedure quickSort( $a, p, q$ )  
begin  
    while ( $p < q$ ) do  
        partioneaza( $a, p, q, k$ )  
        quickSort( $a, p, k - 1$ )  
        quickSort( $a, k + 1, q$ )  
    end  
end
```

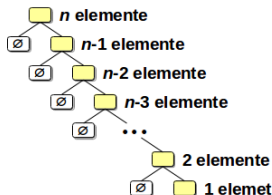


Quick sort: arbore de recursie



Quick sort - complexitate

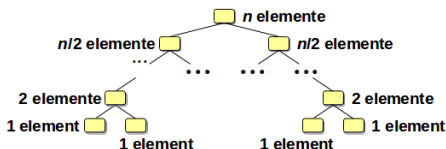
- ▶ Alegerea pivotului influențează eficiența algoritmului
- ▶ Cazul cel mai nefavorabil: pivotul este cea mai mică (cea mai mare) valoare. Timp proporțional cu $n + n - 1 + \dots + 1$.
- ▶ $T_{quickSort}(n) = O(n^2)$



- ▶ Arborele de recursie:

Quick sort - complexitate

- ▶ Un pivot “bun” împarte tabloul în două subtablouri de dimensiuni comparabile
- ▶ Înălțimea arborelui de recursie este $O(\log n)$
- ▶ Complexitatea medie este $O(n \log n)$



Sortare bazată pe comparații

- sortare prin interschimbare

- sortare prin inserție

- sortare prin selecție

- sortare prin interclasare (*merge sort*)

- sortare rapidă (*quick sort*)

Sortare prin numărare

Sortare prin distribuire

Sortare prin numărare

- ▶ Ipoteză: $a[i] \in \{1, 2, \dots, k\}$
- ▶ Se determină poziția fiecărui element în tabloul sortat numărând câte elemente sunt mai mici decât acesta

```
1 Procedure countingSort( $a, b, n, k$ )  
2 begin  
3   for  $i \leftarrow 1$  to  $k$  do  
4      $c[i] \leftarrow 0$   
5   for  $j \leftarrow 0$  to  $n - 1$  do  
6      $c[a[j]] \leftarrow c[a[j]] + 1$   
7   for  $i \leftarrow 2$  to  $k$  do  
8      $c[i] \leftarrow c[i] + c[i - 1]$   
9   for  $j \leftarrow n - 1$  downto  $0$  do  
10     $b[c[a[j]] - 1] \leftarrow a[j]$   
11     $c[a[j]] \leftarrow c[a[j]] - 1$   
12 end
```

Complexitate: $O(k + n)$

Sortare prin numărare – exemplu ($k = 6$)

[illegible]

| | | |
|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 0 1 2 3 4 5 6 7 | 0 1 2 3 4 5 6 7 | 0 1 2 3 4 5 6 7 |
| b 4 | b 1 4 | b 1 4 4 |
| 1 2 3 4 5 6 | 1 2 3 4 5 6 | 1 2 3 4 5 6 |
| c 2 2 4 6 7 8 | c 1 2 4 6 7 8 | c 1 2 4 5 7 8 |
| <i>liniile 9-11, j = 7</i> | <i>liniile 9-11, j = 6</i> | <i>liniile 9-11, j = 5</i> |

| | | | | | | | | |
|------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| <i>tabloul sortat:</i> | b | 1 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 |

Sortare bazată pe comparații

- sortare prin interschimbare
- sortare prin inserție
- sortare prin selecție
- sortare prin interclasare (*merge sort*)
- sortare rapidă (*quick sort*)

Sortare prin numărare

Sortare prin distribuire

Sortare prin distribuire

- ▶ Ipoteză: Elementele $a[i]$ sunt distribuite uniform peste intervalul $[0, 1)$
- ▶ Principiu:
 - ▶ se divide intervalul $[0, 1)$ în n subintervale de mărimi egale, numerotate de la 0 la $n - 1$;
 - ▶ se distribuie elementele $a[i]$ în intervalul corespunzător: $\lfloor n \cdot a[i] \rfloor$;
 - ▶ se sortează fiecare pachet folosind o altă metodă;
 - ▶ se combină cele n pachete într-o listă sortată.

Sortare prin distribuire

- ▶ Algorithm:

Procedure *bucketSort*(a, n)

begin

for $i \leftarrow 0$ **to** $n - 1$ **do**

 insereaza($B[\lfloor n \cdot a[i] \rfloor], a[i]$)

for $i \leftarrow 0$ **to** $n - 1$ **do**

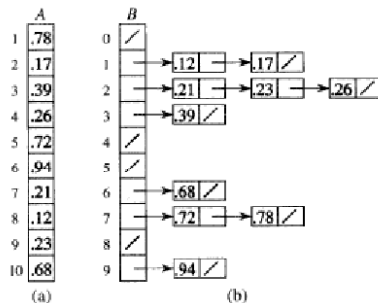
 sortează lista $B[i]$

 concatenează în ordine listele $B[0], B[1], \dots, B[n - 1]$

end

Complexitatea medie: $O(n)$

Sortare prin distribuire – exemplu



(Cormen T.H. et al., Introducere în algoritmi)

Sortare - complexitate

| Algoritm | Caz | | |
|--------------|------------|------------|-------------|
| | favorabil | mediu | nefavorabil |
| bubbleSort | n | n^2 | n^2 |
| insertSort | n | n^2 | n^2 |
| naivSort | n^2 | n^2 | n^2 |
| heapSort | $n \log n$ | $n \log n$ | $n \log n$ |
| mergeSort | $n \log n$ | $n \log n$ | $n \log n$ |
| quickSort | $n \log n$ | $n \log n$ | n^2 |
| countingSort | — | $n + k$ | $n + k$ |
| bucketSort | — | n | — |

Când utilizăm un anumit algoritm de sortare?

- ▶ O metodă de sortare este *stabilă* dacă păstrează ordinea relativă a elementelor cu chei identice
- ▶ Recomandări
 - ▶ *Quick sort*: când nu e nevoie de o metodă stabilă și performanța medie e mai importantă decât cea în cazul cel mai nefavorabil; $O(n \log n)$ complexitatea timp medie, $O(\log n)$ spațiu suplimentar
 - ▶ *Merge sort*: când este necesară o metodă stabilă; complexitate timp $O(n \log n)$; dezavantaje: $O(n)$ spațiu suplimentar, constanta mai mare decât cea a QuickSort
 - ▶ *Heap sort*: când nu e nevoie de o metodă stabilă și ne interesează mai mult performanța în cazul cel mai nefavorabil decât în cazul mediu; timp $O(n \log n)$, spațiu $O(1)$
 - ▶ *Insert sort*: când n e mic

Când utilizăm un anumit algoritm de sortare?

- ▶ In anumite condiții, este posibilă o sortare în $O(n)$
- ▶ *Counting sort*: valori dintr-un interval
- ▶ *Bucket sort*: valorile sunt distribuite aproximativ uniform

<https://github.com/StamateValentin/SortingAlgorithms>