

# Αλγόριθμοι και πολυπλοκότητα: 1η σειρά γραπτών ασκήσεων

Ονοματεπώνυμο: Τσαγκάρakis Στυλιανός ΑΜ: 03115180

## Άσκηση 1: Ασυμπτωτικός Συμβολισμός, Αναδρομικές Σχέσεις

(α)

Συνάρτηση	Τάξη Μεγέθους
$n^2$	$\Theta(n^2)$
$2^{(\log_2 n)^4}$	$n^4 = \Theta(n^4)$
$\frac{\log(n!)}{\log(n)^3}$	$\Theta(\frac{n}{\log^2 n})$ γιατί $\log(n!) = \Theta(n \log n)$
$n * 2^{2^{100}}$	$cn = \Theta(n)$
$\log\left(\frac{n}{\log n}\right)$	$\Theta(\log^2 n)$ γιατί $\left(\frac{n}{k}\right)^k < \log\binom{n}{k} < \frac{ne^k}{k}$
$\frac{\log^2 n}{\log \log n}$	$> \frac{\log^2 n}{\log n} = \Omega(\log n) \subset O(poly(\log n))$
$\log^4 n$	$= \Theta(poly(\log n)) = O(\sqrt{n})$ $\forall \varepsilon > 0 : \log^d n = O(n^\varepsilon)$ για $\varepsilon = \frac{1}{2}$
$(\sqrt{n})!$	?
$\binom{n}{6}$	$= \frac{n!}{6!(n-6)!} = \Theta(n^6)$
$\frac{n^3}{\log^8 n}$	$\leq \frac{n^3}{\sqrt{n}} = \Theta(n^{\frac{5}{2}})$ ισχύει για $\frac{n^3}{\log^{10} n}$
$(\log_2 n)^{\log_2 n}$	$= \Theta(n^{\log \log n})$
$\log\binom{2n}{n}$	$\leq \log\left(\frac{(2n)^{2n}}{n^n(2n-n)^{2n-n}}\right) = \log 2^{2n} = \Theta(n)$ επίσης: $\binom{n}{k} \leq \frac{n^n}{k^k(n-k)^{n-k}}$
$n \sum_{k=0}^n \binom{n}{k}$	$O(n2^n)$
$(\sqrt{n})^{\log_2 \log_2(n!)}$	$\Theta(n^{\log n})$
$\sum_{k=1}^n k 2^{-k}$	$\Theta(1)$ αφού αποδεικνύεται ότι $2^{-k} = 2 - \frac{n+2}{2^n}$
$\sum_{k=1}^n k 2^k$	$2(1 + (n-1)2^n) = O(n2^n)$ $\sum_{i=1}^n = \Theta(2^n)$

Τελικά έχουμε:

$$\sum_{k=1}^n k 2^{-k} \subseteq \log \binom{n}{\log n} \subseteq \frac{\log^2 n}{\log \log n} = \log^4 n \subseteq \frac{\log n!}{(\log n)^3} \subseteq$$

$$\log \binom{2n}{n} = n * 2^{2^{100}} = \Theta(n) \subseteq n^2 \subseteq \frac{n^3}{\log^8 n} \subseteq \binom{n}{6} \subseteq$$

$$(\log_2 n)^{\log_2 n} = \Theta \left( \frac{\log \log^d n}{n} \right) \subseteq 2^{\log_2 4} = \Theta(n^{\log^3 n}) \subseteq$$

$$\sum_{k=1}^n k 2^k = n \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} = \Theta(n * 2^n) \subseteq (\sqrt{n})^{\log_2 \log_2 (n!)}$$

(β)

1.  $T(n) = 2T(\frac{n}{3}) + n \log n$   $a = 2, b = 3$   $2f(\frac{n}{3}) < f(n) \Rightarrow 2\frac{n}{3} \log \frac{n}{3} < n \log n$   $f(n) = n \log n = \Theta(n \log n)$   
Περίπτωση 3:  $\Theta(n \log n)$
2.  $T(n) = 3T(\frac{n}{3}) + n \log n$  Με βάση το δέντρο αναδρομής βγαίνει το εξής:  $T(n) = 3T(\frac{n}{3}) + n \log n$   
 $T(\frac{n}{3}) = 3T(\frac{n}{9}) + \frac{n}{3} \log \frac{n}{3} \dots T(\frac{n}{3^k}) = T(1) = \frac{n}{3^k} \log \frac{n}{3^k}$  όπου  $k = \log_3 n$  άρα  $T(n) = \sum_{i=0}^k n \log \frac{n}{3^k}$   
άρα  $T(n) = n \log_3 n (\log n - \log_3 n)$  και  $\log_3 n = \frac{\log n}{\log 3}$  οπότε τελικά:  $T(n) = \Theta(n \log^2 n)$
3.  $T(n) = 4T(\frac{n}{3}) + n \log n$   $a = 4, b = 3$  Περίπτωση 1  $f(n) = n \log n \Rightarrow n^{\log_3 4} \Rightarrow T(n) = \Theta(n^{\log_3 4})$
4.  $T(n) = T(\frac{n}{2}) + T(\frac{n}{3}) + n$  Επειδή  $\frac{n}{2} + \frac{n}{3} < n$  υποθέτουμε ότι  $T(n) = \Theta(n)$  και αποδεικνύω με δέντρο. (όμοια με 2)
5.  $T(n) = T(\frac{n}{2}) + T(\frac{n}{3}) + T(\frac{n}{6}) + n$  Είναι  $\frac{n}{2} + \frac{n}{3} + \frac{n}{6} = n$  Υποπτεύομαι ότι  $T(n) = \Theta(n \log n)$  και αποδεικνύεται πάλι με δέντρο αναδρομής. Ύψος:  $\Theta(\log n)$  Κορυφών:  $\Theta(n) \frac{\text{Χρῶνος}}{\text{Επίπεδο}} = \Theta(n)$  από το 1.
6.  $T(n) = T(n^{\frac{5}{6}}) + \Theta(\log n)$  Θέτω  $m = \log_6 n$  Άρα  $T(m) = T(\frac{5m}{6}) + \Theta(m)$  Από Μ.Τ.  
 $a = 1, b = \frac{6}{5} \Rightarrow T(m) = \Theta(m)$
7.  $T(n) = T(\frac{n}{4}) + n^{\frac{1}{2}}$  Από Μ.Τ.  $\log_b a = \log_4 1 = 0, d = \frac{1}{2} \Rightarrow T(n) = \Theta(n^d) = \Theta(\sqrt{n})$

## Άσκηση 2: Ταξινόμηση

(α)

1. Βρίσκουμε το μέσο του μη ταξινομημένου πίνακα. Το κάνουμε χρησιμοποιώντας τον παρακάτω αλγόριθμο της Quick Select (όπου  $k = \frac{n}{2}$  στην περίπτωσή μας):

```
quickselect_modified(arrayA, left, right, k)
    if right - left + 1 > n/k
        start = 0
        end = SZ-1
        pivot = random element of arrayA
        for each element i in arrayA
            if i <= pivot
                arrayB[start] = i //B is an array of size "SZ"
                start = start + 1
            else
                arrayB[end] = i
                end = end - 1
        //it will finally be start=end;
        arrayB[end] = pivot
```

```

    if (end <= 1)
        quickselect_modified(arrayB, end+1, right, k)
    else if (end >= right-1)
        quickselect_modified(arrayB, left, end-1, k)
    else
        quickselect_modified(arrayB, end+1, right, k)
        quickselect_modified(arrayB, left, end-1, k)

return

```

Η παραπάνω αναδρομική συνάρτηση θα εκτελέσει τις εντολές του for loop για  $n$  φορές την πρώτη φορά,  $\frac{n}{2}$  την δεύτερη φορά κ.ο.κ. Συνολικά θα τρέξει  $\log k$  φορές από  $n$  στοιχεία κάθε φορά. Άρα πολυπλοκότητα  $O(n \log k)$ . Με οπτικοποίηση του αλγόριθμου θα έχουμε ένα δέντρο ύψους  $\log k$  και  $n$  στοιχείων σε κάθε επίπεδο. Ο αλγόριθμος είναι βέλτιστος γιατί πρέπει να κατασκευάζονται κάθε φορά  $\frac{n!}{\left(\left(\frac{n}{k}\right)!\right)^k}$  φύλλα και ύψους  $\log$  φύλλων. Άρα ο χρόνος εκτέλεσης:

$$\geq \log \frac{n!}{\left(\left(\frac{n}{k}\right)!\right)^k} = \log n! - k \log \left(\left(\frac{n}{k}\right)!\right) \Rightarrow (Stirling) = \Theta(n \log k)$$

2. Γενικά η Quicksort θέλει  $O(n \log n)$  στην μέση περίπτωση. Άρα ταξινομώ τους  $k$  υποπίνακες με κόστος  $O\left(\frac{n}{k} * \log\left(\frac{n}{k}\right) * k\right)$  δηλαδή  $O\left(n * \log\left(\frac{n}{k}\right)\right)$ . Κάθε συγκριτικός αλγόριθμος ταξινόμησης πρέπει να έχει  $\Omega\left(n * \log\left(\frac{n}{k}\right)\right)$ , γιατί αλλιώς θα κατασκευάζαμε πλήρη συγκριτικό αλγόριθμο ταξινόμησης  $O(n \log n) = \Theta(n \log k) + O\left(n \log\left(\frac{n}{k}\right)\right)$ .

(β)

- Έστω ότι έχουμε ένα υποπίνακα  $A'$  του  $A$  ο οποίος περιέχει  $M$  διαφορετικά στοιχεία του  $A$  σε αύξουσα σειρά.
- Διασχίζουμε τον  $A$  και για κάθε στοιχείο που συναντάμε κάνουμε δυαδική αναζήτηση στον  $A'$  για να βρούμε με ποιο στοιχείο του  $A'$  είναι ίσο.
- Αυξάνουμε ένα Counter σε εκείνο το σημείο και βάση αυτού μπορούμε να παράξουμε μια ταξινόμηση για τον  $A$ .
- Πολυπλοκότητα:  $O(n \log M)$

Πρέπει να υπολογίσουμε τον  $A'$ . Θα χρησιμοποιήσουμε μια παραλλαγή της Mergesort.

- Χωρίζουμε τον  $A$  στην μέση και παίρνουμε τους πίνακες  $A'_1$  και  $A'_2$ .
- Αναδρομικά υπολογίζουμε τους  $A'_1$  και  $A'_2$ , καθένας τους περιέχει το πολύ  $M$  στοιχεία.
- Συγχωνεύουμε τους  $A'_1$  και  $A'_2$  με την διαφορά ότι αν συναντήσουμε 2 ίσα στοιχεία πετάμε ο ένα.
- Ο πίνακας που προκύπτει είναι ο  $A'$ .
- Πολυπλοκότητα:

$$T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + \Theta(M) \Rightarrow T(n) = O(M \log n)$$

Συνολική Πολυπλοκότητα:  $O(n \log M + M \log n)$

Συγκεκριμένα εδώ αφού έχουμε  $M = O(\log^d n)$ :

$$O(n \log \log^d n) = O(d * n \log \log n) = O(n \log \log n)$$

Ουσιαστικά θέλουμε να υπολογίσουμε το πλήθος των διαφορετικών ταξινομημένων ακολουθιών μήκους  $n$  με στοιχεία που παίρνουν τιμές στο  $\{1, \dots, M\}$ , όπου  $M = \max(A)$ .

Έστω  $A_k$  το πλήθος των στοιχείων με τιμή  $k$ .

Αρκεί να υπολογίσουμε με πόσους τρόπους μπορούμε να αναθέσουμε τιμές από το 0 στο  $n$ , στους αριθμούς  $A_1, A_2, \dots, A_M$  έτσι ώστε  $A_1 + A_2 + \dots + A_M = n$ .

Το παραπάνω μπορεί να γίνει με  $\binom{n+M-1}{n}$  τρόπους.

Άρα κάθε συγκριτικός αλγόριθμος χρειάζεται τουλάχιστον  $\Omega(\log \binom{n+M-1}{n}) = \Omega(n \log M)$ .

Στην περίπτωση μας  $M = \log^d n$  συνεπώς δεν έχουμε  $n$  διαφορετικά στοιχεία. Άρα δεν ισχύει το κάτω φράγμα του  $\Omega(n \log k)$ .

Παρακάτω είναι ο ψευδοκώδικας για την άσκηση:

```
merge_modified(arrayA, l, r)
    //arrayCounter is of size M
    //where M is the max element of arrayA
    initialize arrayCounter to 0
    copy arrayA to arrayAcopy

    mergeSort(arrayA, l, r)
    //now arrayA is A' and arrayAcopy is A

    for each element i of arrayA
        //find the position of each element of arrayA
        //in the Acount and increase counter by one
        index = binarySearch(arrayAcopy, l, r, i)
        arrayCounter[index] = arrayCounter[index] + 1

    //Create A sorted
    for each element i of arrayA
        for each element j of arrayCounter
            j = i

mergeSort(arrayA, l, r)
    if (l < r)
        m = (r-l)/2
        //Sort first and second halves
        mergeSort(A, l, m)
        mergeSort(A, m+1, r)
        merge_without_equals(A, l, m, r)

merge_without_equals(arrayA, l, m, r)
    arrayL = left half of arrayA
    arrayR = right half of arrayA

    while left in arrayL && right in arrayR
        if left < right
            add in arrayA the element left
            left = next element of arrayL
        else if left > right
```

```

        add in arrayA the element right
        right = next element of arrayR
    else //left == right
        if last element of arrayA == left || arrayA.empty()
            add left to arrayA
        left = next element of arrayL
        right = next element of arrayR

    for each remaining element i in arrayL
        add i to arrayA
    for each remaining element i in arrayR
        add i to arrayA

```

### Άσκηση 3: Διάστημα ελάχιστου μήκους που καλύπτει όλους τους Πίνακες

(α)

```

min_diff_2(arrayA1, n1, arrayA2, n2)
    //n1 is the size of arrayA1
    //n2 is the size of arrayA2
    while i<n1 AND j<n2
        min = abs(A1[i]-A2[j]) //|A1 - A2|
        if A1[i] <= A2[j]
            i = i + 1
        else
            j = j + 1
        if i>n1 OR j>n2
            exit

```

Η παραπάνω συνάρτηση θα περάσει μια φορά τον κάθε πίνακα οπότε είμαστε στα πλαίσια της γραμμικής πολυπλοκότητας  $\Rightarrow O(n)$ .

Είμαστε σίγουροι ότι τα ζευγάρια που "χάνουμε" έχουν μεγαλύτερη διαφορά από αυτά που υπολογίζουμε αφού κάθε φορά προχωράμε το μικρότερο.

**Απόδειξη:**

Έστω  $x_k \leq y_z$  και  $min$  η έως τώρα ελάχιστη διαφορά.

Έχουμε:  $\forall(i, k) : i \leq k \rightarrow x_i \leq x_k$  και  $\forall(z, j) : z \leq j \rightarrow y_z \leq y_j$  άρα  $|x_i - y_j| \geq |x_k - y_z| \geq min$

(β)

```

min_diff_n(m arrays)
    while each element i_m in arraym
        min = min from i_m elements
        max = max from i_m elements
        diff = max - min
        if i1 <= i2 && i1 <= i3
            i1 = next element of array1
        else if i2 <= i1 && i2 <= i3
            i2 = next element of array2
        else if i3 <= i1 && i3 <= i2
            i3 = next element of array3
        else if ...
            ...

```

Ο παρακάτω αλγόριθμος έχει πολυπλοκότητα  $O(mN)$  όπου  $N = \sum_{k=1}^m n_k$ .

Αυτό γιατί περνάει όλα τα στοιχεία του κάθε πίνακα, άρα  $N$ , και κάθε φορά περνάει το στοιχείο από τον κάθε πίνακα που επιλέγουμε άρα  $m$ . Συνολικά  $O(mN)$ .

(γ)

Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε heap για να αποθηκεύουμε το επιλεγμένο στοιχείο του κάθε πίνακα σε κάθε επανάληψη.

Έτσι η εισαγωγή/αφαίρεση του στοιχείου θα παίρνει  $O(\log m)$ .

Αντίστοιχα η εύρεση του min.

Η εύρεση του max μπορεί να παίρνει μόνο  $O(1)$  καθώς θα συγκρίνουμε το στοιχείο που αλλάζουμε σε κάθε επανάληψη με το ήδη max. Στην πρώτη επανάληψη θα κάνουμε  $(m-1)$  συγκρίσεις αλλά πάλι θεωρείται  $O(1)$  συνολικά.

Δηλαδή βελτιώνουμε το  $O(mN)$  σε  $O(N \log m)$

## **Άσκηση 4η: Αναζήτηση**

(α)

Τις 1.000.000 φιάλες (διακριτές καταστάσεις) μπορούμε να τις κωδικοποιήσουμε με 20 bit ( $2^{20} > 1.000.000$  ενώ  $2^{19} \approx 500.000$ ). Έστω ότι κάθε bit ξεκινώντας από το LSB αναπαριστά έναν εθελοντή και όταν το bit αυτό γίνει 1 τότε πίνει ο αντίστοιχος εθελοντής.

Για παράδειγμα η 1<sup>η</sup> φιάλη είναι 0...01 και έχει 1 το 1<sup>ο</sup> bit. Αυτό σημαίνει ότι από την φιάλη θα πιεί μόνο ο 1<sup>ος</sup> εθελοντής.

Η 2<sup>η</sup> φιάλη είναι 0...010 και έχει 1 το 2<sup>ο</sup> bit. Αυτό σημαίνει ότι από την 2<sup>η</sup> φιάλη πίνει μόνο ο 2<sup>ος</sup> εθελοντής.

Στην 3<sup>η</sup> (0...011)θα πιεί ο 1<sup>ος</sup> και ο 2<sup>ος</sup>

Κ.Ο.Κ.

Έτσι θα μπορέσουμε να αντιληφθούμε με βάση συνδυασμών ποια φιάλη έχει το μαγικό φίλτρο.

(β)

```

find_best_split(arrayA, days)
    //lower search bound = max element -> O(n)
    //upper search bound = sum of all -> O(n)
    upper = 0 //sum
    lower = 0
    for each element i in arrayA
        upper = upper + i //calculate sum
        if i > lower
            lower = i

    temp[days] = 0 //array of 'days' positions initialized to 0
    while true
        test_number = (upper+lower)/2 //integer division
        if test_number = 0 //this means max - min < 1 then max is our answer
            return max //found result
        count = 0
        for each element i in arrayA
            if (temp[count] + i) < test_number
                temp[count] = temp[count] + i
            else
                count = count + 1
                if count > days
                    lower = test_number //lower upper bound
                    exit for loop
                else
                    temp[count] = temp[count] + i
        if count <= days
            upper = test_number
        continue //move to next test

```

Το άνω όριο αναζήτησης είναι το άθροισμα όλων των στοιχείων ενώ το κάτω όριο είναι το μεγαλύτερο στοιχείο. Με σταθερό  $k$  στο διάστημα [κάτω όριο, πάνω όριο] κάνουμε δυαδική αναζήτηση. Αν με το νούμερο που θα επιλέξουμε το ταξίδι είναι επιτυχές τότε διαιρούμε  $/2$  το αριστερό μισό ( $median \rightarrow upperbound$ ) αλλιώς το δεξί μισό ( $median \rightarrow lowerbound$ ).

Πρακτικά ο αλγόριθμος είναι πολυπλοκότητας  $O(upperbound) = O(\sum_{i=1}^n k_n)$  αφού κάνουμε δυαδική αναζήτηση και μας επηρεάζει το άνω όριο. Οποιαδήποτε βελτιστοποίηση άνω και κάτω ορίου δεν προσφέρει σημαντική βελτίωση στον αλγόριθμο.

## Άσκηση 5: Επιλογή

(α)

Λύση:

- Ρωτάμε πλήθος στοιχείων μικρότερα από  $(\frac{M}{2}), F_S(\frac{M}{2})$ .
- Αν  $F_S(\frac{M}{2}) < k$  συνεχίζουμε αναδρομικά στο  $[\frac{M}{2}, M]$ .
- Αν  $F_S(\frac{M}{2}) > k$  συνεχίζουμε αναδρομικά στο  $[0, \frac{M}{2}]$ .
- Τελειώνουμε όταν βρούμε  $t$  τέτοιο ώστε  $F_S(t-1) < k$  και  $F_S(t) \geq k$ .
- Επιστρέφουμε το  $t$  σε χρόνο  $O(\log M)$ .

Παρακάτω και σε ψευδοκώδικα:

```

return_kth_element(arrayA, k)
    upper = M
    lower = 0
    while true
        mid = (upper + lower)/2
        temp = Fs(mid) //external function
        if temp < k
            lower = upper/2
        else if temp > k
            upper = upper/2
        else
            return mid

```

Ο αλγόριθμος πάντα θα επιστρέφει το  $k$ -οστό στοιχείο καθώς κάθε φορά στον έλεγχο ψάχνουμε έναν αριθμό  $t$  τέτοιο ώστε  $F_S(t) \geq k$  αλλά και  $F_S(t-1) < k$  δηλαδή υπάρχουν  $k$  στοιχεία μικρότερα ή ίσα από τον  $t$  συμπεριλαμβανομένου του εαυτού του. Άρα είναι το ζητούμενο νούμερο. Στην χειρότερη περίπτωση θα γίνει  $O(\log M)$  δηλαδή να χρειαστεί να ψάξουμε "όλο" τον πίνακα ή αλλιώς να μην πετυχαίνουμε το στοιχείο με κανένα κόψιμο παρά μόνο στο τελευταίο.

(β)

Λύση:

- Ταξινομούμε τον πίνακα A με την Quicksort.
- Αν δυο στοιχεία έχουν την ερωτούμενη διαφορά  $k$ 
  - Οι διαφορές με τα στοιχεία ανάμεσά τους "προσμετρώνται".
  - Οι διαφορές με τα στοιχεία πάνω από το μεγαλύτερο όχι καθώς είναι μεγαλύτερες.
- Χρησιμοποιούμε δύο δείκτες, τον μπροστά και τον πίσω, αρχικοποιημένους στο 0.
- Όσο η διαφορά στα στοιχεία των δυο δεικτών είναι μικρότερη από την ερωτούμενη
  - +1 τον μπροστά δείκτη
  - προσθέτουμε τις "καινούργιες" διαφορές ( $\neq$  διαφορά δεικτών)
- Όσο η διαφορά των δυο δεικτών είναι μεγαλύτερη
  - +1 τον πίσω δείκτη
  - τίποτα στις διαφορές
- Σταματάμε όταν η διαφορά στοιχείων είναι ίση με  $k$

---

**Συνολικός χρόνος:**

- Χρόνος ταξινόμησης (Quicksort)
- Γραμμικός για να περάσουμε μια φορά τον πίνακα

Δηλαδή:

$$T(n) = O(n * \log n) + O(n) \Rightarrow$$

$$T(n) = O(n * \log n)$$



