UNIVERZITET U BEOGRADU - ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

MULTIPROCESORKI SISTEMI (13S114MUPS, 13E114MUPS)


# DOMAĆI ZADATAK – OPENMP

Izveštaj o urađenom domaćem zadatku

Predmetni saradnici:

prof. dr Marko Mišić

Student:

Vuk Lužanin 29/2022

Beograd, april 2025.

# SADRŽAJ

# 1. NAPOMENA

Navedeni rezultati izvršavanja se odnose na pokretanje na MacBook Pro M1.

# 2. PROBLEM 1 - PROSTI BROJEVI

U okviru ovog poglavlja je dat kratak izveštaj u vezi rešenja zadatog problema prime.

## 2.1. Tekst problema

Paralelizovati program koji vrši određivanje ukupnog broja prostih brojeva u zadatom opsegu. Program se nalazi u datoteci **`prime.c`** u arhivi koja je priložena uz ovaj dokument. Prilikom paralelizacije nije dozvoljeno koristiti direktive za podelu posla (*worksharing* direktive), već je iteracije petlje koja se paralelizuje potrebno raspodeliti ručno. Obratiti pažnju na ispravno deklarisanje svih promenljivih prilikom paralelizacije. Program testirati sa parametrima koji su dati u datoteci **`run`**. [1, N]

## 2.2. Delovi koje treba paralelizovati

### *2.2.1. Diskusija*

Mogućnost paralelizacije izvršenja uočena je u funkciji **`prime_number()`**, koja pomoću naivnog algoritma računa broj prostih brojeva u opsegu od 2 do $n$, gde je $n$ argument funkcije. Funkcija se sastoji od 2 ugnježdene petlje - spoljna prolazi kroz opseg brojeva, a unutrašnja proverava da li je trenutni broj spoljne petlje prost, i ako jeste, uvećava brojač prostih brojeva za 1.

### *2.2.2. Način paralelizacije*

Treba uočiti da se za svaku iteraciju spoljne petlje dužina iteracije unutrašnje poveća za jedan, odnosno za još jedan broj više čiji ostatak treba da se pojavi. Ovo čini trougaonu petlju, i zahteva cikličnu dekompoziciju problema između niti da bi se balansiralo opterećenje između njih.

Paralelizovana je spoljna petlja, tako što svaka nit počinje od broja pomerenog za svoj identifikator i iteracija se povećava za ukupan broj niti. Time je obezbeđena ciklična dekompozicija.

Za sam brojač prostih brojeva **`total`** korišćena je sabirajuća redukcija.

Iako bi se sam program značajno ubrzao ukoliko bi se umesto ovakvog naivnog algoritma koristio algoritam gde se prosti brojevi traže do korena zadate granice, umesto do cele granice, razlika između izvršavanja takve sekvencijalne implementacije sa jednom i više niti ne bi bila mnogo različita, odnosno ne bi se postiglo veće ubrzanje paralelne u odnosu na sekvencijalnu implementaciju. Štaviše, efekti paralelizacije bi postali značajno manji na zadatim parametrima, pošto

bi se i program na jednoj niti izvršavao dosta brže. Zbog ovoga, ovakva izmena sekvencijalnog algoritma nije urađena.

## 2.3. Rezultati

U okviru ove sekcije su izloženi rezultati paralelizacije ovog problema.

### *2.3.1. Logovi izvršavanja*

Ovde su dati logovi izvršavanja za definisane test primere i različit broj niti. Radi dobijanja tačnih rezultata, u funkciji **`test`** promenjen je način računanja vremena sa CPU vremena na wall vreme, koristeći OpenMP rutinu **`omp_get_wtime()`**.

```
TEST: func=0, lo=1, hi=131072, factor=2, num_threads=1
         1          0        0.000026
         2          1        0.000000
         4          2        0.000001
         8          4        0.000000
        16          6        0.000001
        32         11        0.000000
        64         18        0.000001
       128         31        0.000002
       256         54        0.000005
       512         97        0.000019
      1024        172        0.000063
      2048        309        0.000220
      4096        564        0.000862
      8192       1028        0.002866
     16384       1900        0.010483
     32768       3512        0.038575
     65536       6542        0.168822
    131072      12251        0.654493
```

**Izvršavanje za argumente 1 131072 2 i jednu nit**

```
TEST: func=0, lo=1, hi=131072, factor=2, num_threads=2
          1          0        0.000029
          2          1        0.000006
          4          2        0.000010
          8          4        0.000008
         16          6        0.000017
         32         11        0.000008
         64         18        0.000009
        128         31        0.000012
        256         54        0.000013
        512         97        0.000027
       1024        172        0.000075
       2048        309        0.000226
       4096        564        0.000783
       8192       1028        0.002962
      16384       1900        0.010527
      32768       3512        0.038307
      65536       6542        0.167586
     131072      12251        0.653688
```

**Izvršavanje za argumente 1 131072 2 i dve niti**

```
TEST: func=0, lo=1, hi=131072, factor=2, num_threads=4
          1          0        0.000058
          2          1        0.000017
          4          2        0.000016
          8          4        0.000014
         16          6        0.000015
         32         11        0.000013
         64         18        0.000017
        128         31        0.000013
        256         54        0.000013
        512         97        0.000019
       1024        172        0.000048
       2048        309        0.000128
       4096        564        0.000436
       8192       1028        0.001465
      16384       1900        0.005485
      32768       3512        0.019466
```

```
        65536      6542        0.085877
       131072     12251        0.338080
```

**Izvršavanje za argumente 1 131072 2 i četiri niti**

```
TEST: func=0, lo=1, hi=131072, factor=2, num_threads=8
            1         0        0.000157
            2         1        0.000078
            4         2        0.000060
            8         4        0.000110
           16         6        0.000062
           32        11        0.000041
           64        18        0.000065
          128        31        0.000043
          256        54        0.000033
          512        97        0.000062
         1024       172        0.000065
         2048       309        0.000145
         4096       564        0.000319
         8192      1028        0.000854
        16384      1900        0.002868
        32768      3512        0.010233
        65536      6542        0.044305
       131072     12251        0.176343
```

**Izvršavanje za argumente 1 131072 2 i osam nit**

```
TEST: func=0, lo=1, hi=131072, factor=2, num_threads=16
            1         0        0.000203
            2         1        0.000088
            4         2        0.000101
            8         4        0.000068
           16         6        0.000079
           32        11        0.000119
           64        18        0.000112
          128        31        0.000098
          256        54        0.000185
          512        97        0.000110
         1024       172        0.000135
         2048       309        0.000127
         4096       564        0.000260
```

```
    8192      1028        0.000812
   16384      1900        0.001552
   32768      3512        0.005713
   65536      6542        0.022959
  131072     12251        0.088691
```

**Izvršavanje za argumente 1 131072 2 i šestnaest niti**

```
TEST: func=0, lo=5, hi=500000, factor=10, num_threads=1
       5         3        0.000006
      50        15        0.000001
     500        95        0.000018
    5000       669        0.001120
   50000      5133        0.096989
  500000     41538        8.625681
```

**Izvršavanje za argumente 5 500000 10 i jednu nit**

```
TEST: func=0, lo=5, hi=500000, factor=10, num_threads=2
       5         3        0.000033
      50        15        0.000008
     500        95        0.000029
    5000       669        0.001140
   50000      5133        0.097226
  500000     41538        8.843688
```

**Izvršavanje za argumente 5 500000 10 i dve niti**

```
TEST: func=0, lo=5, hi=500000, factor=10, num_threads=4
       5         3        0.000046
      50        15        0.000016
     500        95        0.000032
    5000       669        0.000609
   50000      5133        0.050411
  500000     41538        4.442671
```

**Izvršavanje za argumente 5 500000 10 i četiri niti**

```
TEST: func=0, lo=5, hi=500000, factor=10, num_threads=8
       5         3        0.000156
      50        15        0.000089
```

```
          500         95         0.000082
         5000        669         0.000415
        50000       5133         0.025732
       500000      41538         2.278442
```

**Izvršavanje za argumente 5 500000 10 i osam nit**

```
TEST: func=0, lo=5, hi=500000, factor=10, num_threads=16
            5          3         0.000271
           50         15         0.000121
          500         95         0.000161
         5000        669         0.000369
        50000       5133         0.013743
       500000      41538         1.151832
```

**Izvršavanje za argumente 5 500000 10 i šestnaest niti**

```
TEST: func=0, lo=1, hi=65536, factor=4, num_threads=1
            1          0         0.000005
            4          2         0.000001
           16          6         0.000000
           64         18         0.000001
          256         54         0.000006
         1024        172         0.000062
         4096        564         0.000777
        16384       1900         0.010573
        65536       6542         0.167660
```

**Izvršavanje za argumente 1 65536 4 i jednu nit**

```
TEST: func=0, lo=1, hi=65536, factor=4, num_threads=2
            1          0         0.000038
            4          2         0.000007
           16          6         0.000009
           64         18         0.000009
          256         54         0.000014
         1024        172         0.000069
         4096        564         0.000785
        16384       1900         0.010553
        65536       6542         0.167709
```

**Izvršavanje za argumente 1 65536 4 i dve niti**

```
TEST: func=0, lo=1, hi=65536, factor=4, num_threads=4
         1          0        0.000045
         4          2        0.000016
        16          6        0.000045
        64         18        0.000024
       256         54        0.000030
      1024        172        0.000067
      4096        564        0.000447
     16384       1900        0.005453
     65536       6542        0.086229
```

**Izvršavanje za argumente 1 65536 4 i četiri niti**

```
TEST: func=0, lo=1, hi=65536, factor=4, num_threads=8
         1          0        0.000152
         4          2        0.000059
        16          6        0.000041
        64         18        0.000041
       256         54        0.000035
      1024        172        0.000124
      4096        564        0.000242
     16384       1900        0.002779
     65536       6542        0.044002
```

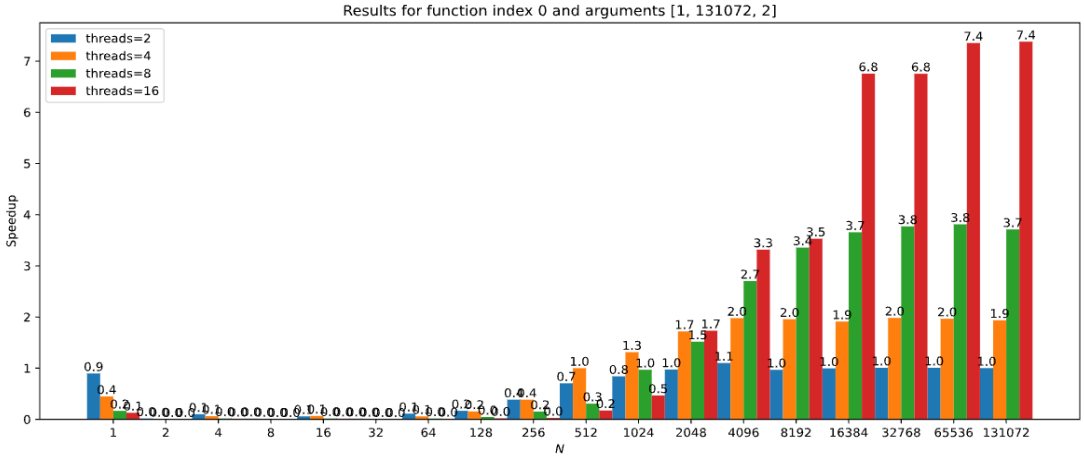
**Izvršavanje za argumente 1 65536 4 i osam nit**

```
TEST: func=0, lo=1, hi=65536, factor=4, num_threads=16
         1          0        0.000239
         4          2        0.000114
        16          6        0.000094
        64         18        0.000092
       256         54        0.000139
      1024        172        0.000113
      4096        564        0.000230
     16384       1900        0.001510
     65536       6542        0.025112
```

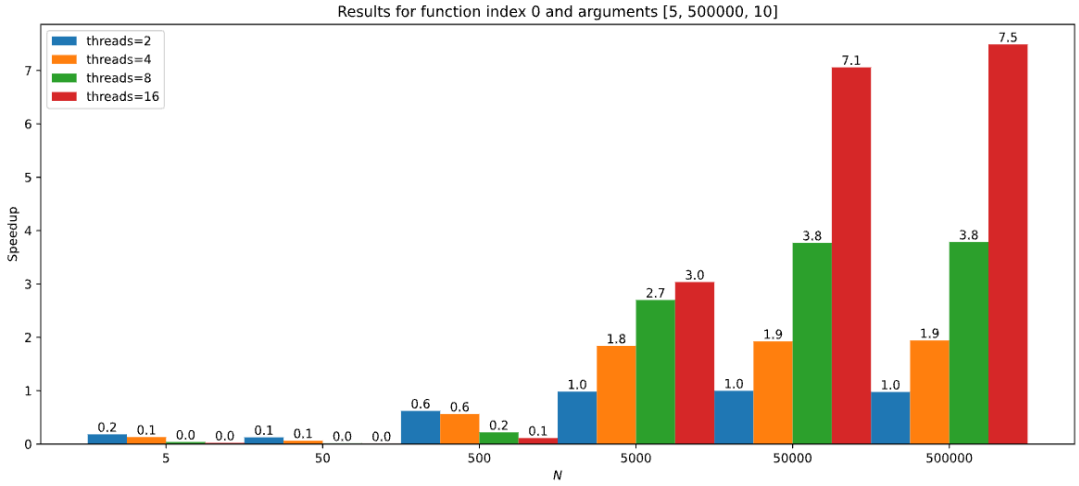
**Izvršavanje za argumente 1 65536 4 i šestnaest niti**

### *2.3.2. Grafici ubrzanja*

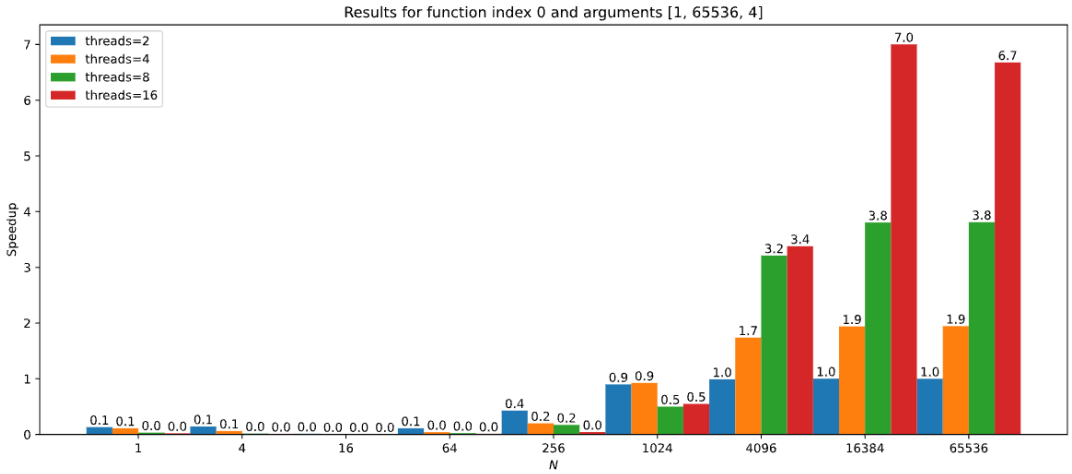
U okviru ove sekcije su dati grafici ubrzanja u odnosu na sekvencijalnu implementaciju.




**Grafik zavisnosti ubrzanja programa od granice do koje se traže prosti brojevi, podeljenu po nitima, za argumente 1, 131072, 2.**




**Grafik zavisnosti ubrzanja programa od granice do koje se traže prosti brojevi, podeljenu po nitima, za argumente 5, 5000000, 10.**




**Grafik zavisnosti ubrzanja programa od granice do koje se traže prosti brojevi, podeljenu po nitima, za argumente 1, 65536, 4.**

### *2.3.3. Diskusija dobijenih rezultata*

Paralelizacija je vidno uspešna za veće N. Dalja ubrzanja dostižna su pomenutim optimizacijama samog algoritma otkrivanja da li je broj prost, ali bi ubrzanje dobijeno paralelizacijom u odnosu na sekvencijalno izvršavanje bilo manje izraženo.

# 3. PROBLEM 2 - PROSTI BROJEVI

U okviru ovog poglavlja je dat kratak izveštaj u vezi rešenja zadatog problema 2.

## 3.1. Tekst problema

Prethodni program paralelizovati korišćenjem direktiva za podelu posla (*worksharing* direktive). Program testirati sa parametrima koji su dati u datoteci **`run`**. [1, N]

## 3.2. Delovi koje treba paralelizovati

### *3.2.1. Diskusija*

Diskusija je ista kao i za prethodni problem.

### *3.2.2. Način paralelizacije*

Program je paralelizovan jednom **`for`** *worksharing* direktivom, sa *static* raspoređivanjem i *chunksize*-om 1. Odluka da se koristi *static* raspoređivanje dolazi od toga da je razlika u dužini iteracija ravnomerna, pa je takav način raspoređivanja idealan i ne donosi sa sobom znatne režijske troškove. Parametar *chunksize* je vrednosti 1 da bi se dobila ciklična dekompozicija problema, kao što je i predloženo u prethodnom problemu. Veća vrednost parametra *chunksize* bi mogla da dovede do neravnomerne raspodele posla, i generalno nije poboljšala performanse – empirijski je primećeno.

Kao i prethodnom problemu, koristi se redukcija sabiranjem za brojač **`total`**.

## 3.3. Rezultati

U okviru ove sekcije su izloženi rezultati paralelizacije ovog problema.

### *3.3.1. Logovi izvršavanja*

Ovde su dati logovi izvršavanja za definisane test primere i različit broj niti. Radi dobijanja tačnih rezultata, u funkciji **`test`** promenjen je način računanja vremena sa CPU vremena na wall vreme, koristeći OpenMP rutinu **`omp_get_wtime()`**.

```
TEST: func=1, lo=1, hi=131072, factor=2, num_threads=1
         1         0        0.000008
         2         1        0.000001
         4         2        0.000000
         8         4        0.000001
```

```
          16          6        0.000000
          32         11        0.000001
          64         18        0.000001
         128         31        0.000002
         256         54        0.000005
         512         97        0.000015
        1024        172        0.000053
        2048        309        0.000187
        4096        564        0.000693
        8192       1028        0.002552
       16384       1900        0.009225
       32768       3512        0.033851
       65536       6542        0.126282
      131072      12251        0.473765
```

**Izvršavanje za argumente 1 131072 2 i jednu nit**

```
TEST: func=1, lo=1, hi=131072, factor=2, num_threads=2
          1          0        0.000092
          2          1        0.000112
          4          2        0.000040
          8          4        0.000015
         16          6        0.000029
         32         11        0.000010
         64         18        0.000011
        128         31        0.000024
        256         54        0.000030
        512         97        0.000036
       1024        172        0.000104
       2048        309        0.000209
       4096        564        0.000708
       8192       1028        0.002520
      16384       1900        0.009180
      32768       3512        0.033909
      65536       6542        0.126419
     131072      12251        0.474634
```

**Izvršavanje za argumente 1 131072 2 i dve niti**

```
TEST: func=1, lo=1, hi=131072, factor=2, num_threads=4
```

```
         1          0        0.000081
         2          1        0.000035
         4          2        0.000040
         8          4        0.000040
        16          6        0.000025
        32         11        0.000033
        64         18        0.000029
       128         31        0.000023
       256         54        0.000027
       512         97        0.000040
      1024        172        0.000073
      2048        309        0.000137
      4096        564        0.000378
      8192       1028        0.001352
     16384       1900        0.004768
     32768       3512        0.017573
     65536       6542        0.065280
    131072      12251        0.246356
```

**Izvršavanje za argumente 1 131072 2 i četiri niti**

```
TEST: func=1, lo=1, hi=131072, factor=2, num_threads=8
         1          0        0.000221
         2          1        0.000117
         4          2        0.000098
         8          4        0.000074
        16          6        0.000119
        32         11        0.000071
        64         18        0.000115
       128         31        0.000051
       256         54        0.000097
       512         97        0.000110
      1024        172        0.000089
      2048        309        0.000188
      4096        564        0.000269
      8192       1028        0.000758
     16384       1900        0.002613
     32768       3512        0.009215
     65536       6542        0.033452
```

```
131072     12251        0.127555
```

**Izvršavanje za argumente 1 131072 2 i osam nit**

```
TEST: func=1, lo=1, hi=131072, factor=2, num_threads=16
         1          0        0.000309
         2          1        0.000161
         4          2        0.000150
         8          4        0.000150
        16          6        0.000146
        32         11        0.000224
        64         18        0.000166
       128         31        0.000155
       256         54        0.000203
       512         97        0.000233
      1024        172        0.000190
      2048        309        0.000293
      4096        564        0.000394
      8192       1028        0.000567
     16384       1900        0.001492
     32768       3512        0.008870
     65536       6542        0.017366
    131072      12251        0.064492
```

**Izvršavanje za argumente 1 131072 2 i šestnaest niti**

```
TEST: func=1, lo=5, hi=500000, factor=10, num_threads=1
         5          3        0.000006
        50         15        0.000001
       500         95        0.000016
      5000        669        0.000991
     50000       5133        0.076023
    500000      41538        6.242606
```

**Izvršavanje za argumente 5 500000 10 i jednu nit**

```
TEST: func=1, lo=5, hi=500000, factor=10, num_threads=2
         5          3        0.000118
        50         15        0.000017
       500         95        0.000032
      5000        669        0.001062
     50000       5133        0.076004
```

```
    500000     41538        6.167683
```

**Izvršavanje za argumente 5 500000 10 i dve niti**

```
TEST: func=1, lo=5, hi=500000, factor=10, num_threads=4
         5         3        0.000065
        50        15        0.000026
       500        95        0.000045
      5000       669        0.000548
     50000      5133        0.039014
    500000     41538        3.179488
```

**Izvršavanje za argumente 5 500000 10 i četiri niti**

```
TEST: func=1, lo=5, hi=500000, factor=10, num_threads=8
         5         3        0.000172
        50        15        0.000061
       500        95        0.000091
      5000       669        0.000360
     50000      5133        0.020069
    500000     41538        1.639120
```

**Izvršavanje za argumente 5 500000 10 i osam nit**

```
TEST: func=1, lo=5, hi=500000, factor=10, num_threads=16
         5         3        0.000418
        50        15        0.000245
       500        95        0.000177
      5000       669        0.000338
     50000      5133        0.012121
    500000     41538        0.827429
```

**Izvršavanje za argumente 5 500000 10 i šestnaest niti**

```
TEST: func=1, lo=1, hi=65536, factor=4, num_threads=1
         1         0        0.000005
         4         2        0.000000
        16         6        0.000000
        64        18        0.000001
       256        54        0.000004
      1024       172        0.000053
```

```
        4096       564        0.000691
       16384      1900        0.009283
       65536      6542        0.126418
```

**Izvršavanje za argumente 1 65536 4 i jednu nit**

```
TEST: func=1, lo=1, hi=65536, factor=4, num_threads=2
           1         0        0.000043
           4         2        0.000016
          16         6        0.000016
          64        18        0.000014
         256        54        0.000018
        1024       172        0.000067
        4096       564        0.000699
       16384      1900        0.009331
       65536      6542        0.126510
```

**Izvršavanje za argumente 1 65536 4 i dve niti**

```
TEST: func=1, lo=1, hi=65536, factor=4, num_threads=4
           1         0        0.000064
           4         2        0.000040
          16         6        0.000027
          64        18        0.000030
         256        54        0.000031
        1024       172        0.000074
        4096       564        0.000400
       16384      1900        0.004847
       65536      6542        0.065178
```

**Izvršavanje za argumente 1 65536 4 i četiri niti**

```
TEST: func=1, lo=1, hi=65536, factor=4, num_threads=8
           1         0        0.000214
           4         2        0.000079
          16         6        0.000039
          64        18        0.000083
         256        54        0.000054
        1024       172        0.000143
        4096       564        0.000276
       16384      1900        0.002504
       65536      6542        0.033660
```

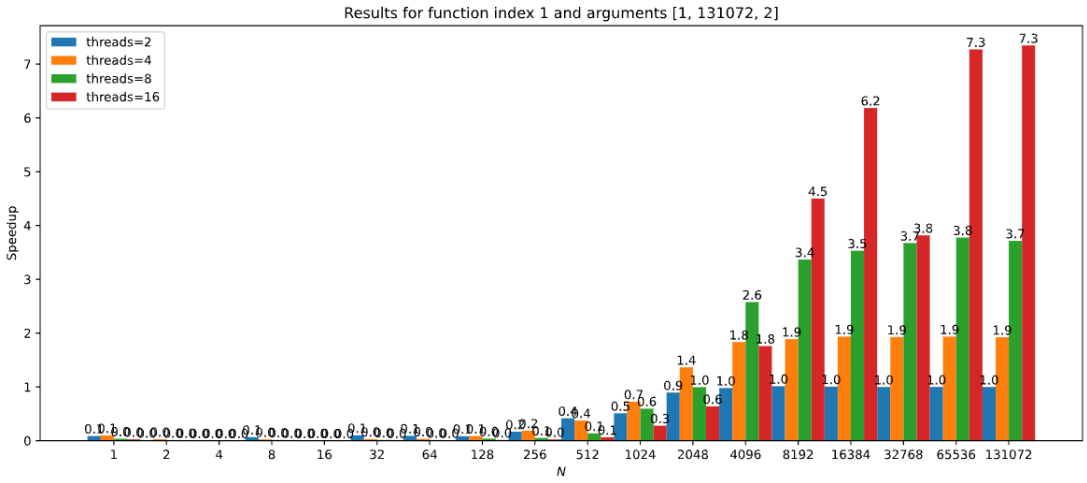
**Izvršavanje za argumente 1 65536 4 i osam nit**

```
TEST: func=1, lo=1, hi=65536, factor=4, num_threads=16
         1          0        0.000281
         4          2        0.000118
        16          6        0.000157
        64         18        0.000130
       256         54        0.000128
      1024        172        0.000149
      4096        564        0.000262
     16384       1900        0.001721
     65536       6542        0.017738
```

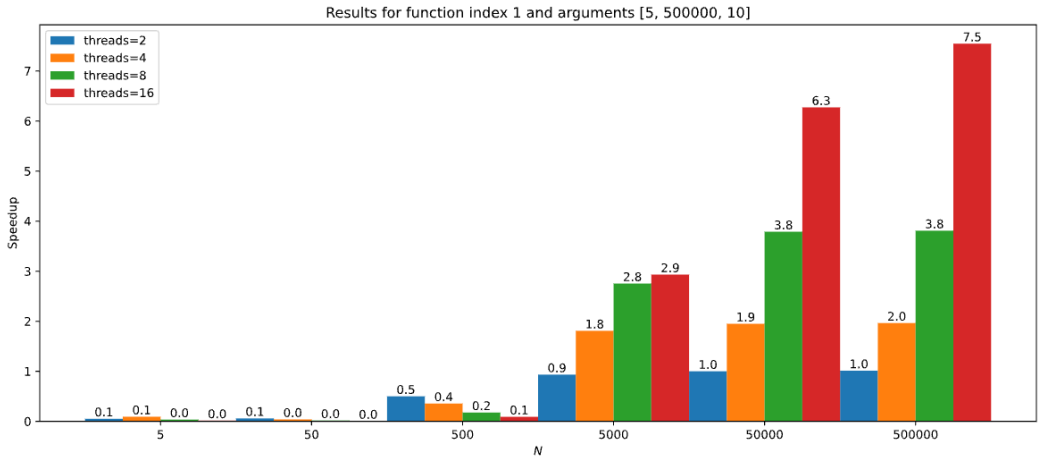
**Izvršavanje za argumente 1 65536 4 i šestnaest niti**

### *3.3.2. Grafici ubrzanja*

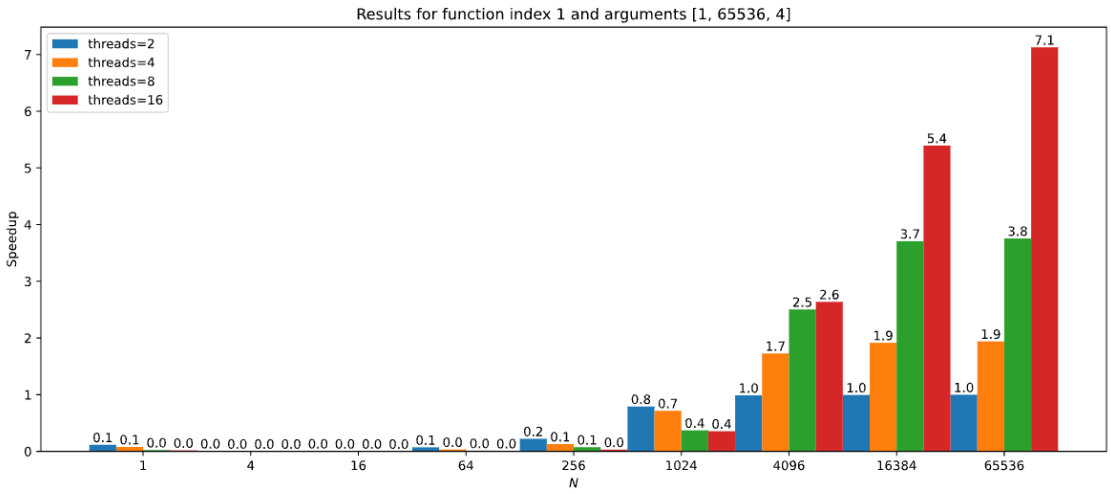
U okviru ove sekcije su dati grafici ubrzanja u odnosu na sekvencijalnu implementaciju.




**Grafik zavisnosti ubrzanja programa od granice do koje se traže prosti brojevi, podeljenu po nitima, za argumente 1, 131072, 2.**




**Grafik zavisnosti ubrzanja programa od granice do koje se traže prosti brojevi, podeljenu po nitima, za argumente 5, 5000000, 10.**




**Grafik zavisnosti ubrzanja programa od granice do koje se traže prosti brojevi, podeljenu po nitima, za argumente 1, 65536, 4.**

### *3.3.3. Diskusija dobijenih rezultata*

Paralelizacija je vidno uspešna za veće N. Rezultati su slični kao iz prethodnog problema. Dalja ubrzanja dostižna su pomenutim optimizacijama samog algoritma otkrivanja da li je broj prost, ali bi ubrzanje dobijeno paralelizacijom u odnosu na sekvencijalno izvršavanje bilo manje izraženo.

# 4. PROBLEM 3 - POASONOVA JEDNAČINA

U okviru ovog poglavlja je dat kratak izveštaj u vezi rešenja zadatog problema 3.

## 4.1. Tekst problema

Paralelizovati program koji vrši izračunavanje 3D Poasonove jednačine korišćenjem Feynman-Kac algoritma. Algoritam stohastički računa rešenje parcijalne diferencijalne jednačine krenuvši N puta iz različitih tačaka domena. Tačke se kreću po nasumičnim putanjama i prilikom izlaska iz granica domena kretanje se zaustavlja računajući dužinu puta do izlaska. Proces se ponavlja za svih N tačaka i konačno aproksimira rešenje jednačine. Program se nalazi u datoteci **`feyman.c`** u arhivi koja je priložena uz ovaj dokument. Program testirati sa parametrima koji su dati u datoteci **`run`**. [1, N]

## 4.2. Delovi koje treba paralelizovati

### *4.2.1. Diskusija*

Mogućnost paralelizacije izvršenja uočena je u funkciji **`feynman()`**, koja implementira sam *Feynman-Kac* algoritam. Specifičnost ovog algoritma je nasumično generisanje putanja tačaka, za šta se koristi generator pseudoslučajnih brojeva po uniformnoj raspodeli u funkciji **`r8_uniform_01()`**. Postoji *seed* za generisanje ovih pseudo-nasumičnih brojeva, ali on ne pravi problem za paralelizaciju, jer svaka nit može da ima svoj sopstveni *seed* i brojevi koji se generišu će nastaviti da budu uniformni. Ukoliko je ovaj *seed* deljen, zaključili smo da se ne garantuje uniformnost raspodele.

### *4.2.2. Način paralelizacije*

Paralelizacija je izvršena jednom **`for`** *worksharing* direktivom sa **`collapse(3)`** opcijom nad tri prve petlje. Ovom prilikom je računanje brojeva **`x`** i **`y`** premešteno unutar iste petlje kao računanje broja **`z`**, zbog zahteva ove direktive, ne izazivajući naročito usporenje u izvršavanju.

Kako različite niti počinju sa istim *seed*-om, zaključeno je da će generisati iste brojeve po uniformnoj raspodeli. Kada je pokušano da se svakoj niti dodeli različit *seed*, uvećavanjem podrazumevanog *seed*-a za identifikator trenutne niti, dobijeno je da je *root-mean-square error* malo bliži onom od sekvencijalnog algoritma, pa je tako i ostavljeno.

Sinhronizacija između niti postignuta je sabirajućom redukcijom po promenljivama **`err`** i **`n_inside`**.

## 4.3. Rezultati

U okviru ove sekcije su izloženi rezultati paralelizacije ovog problema.

### *4.3.1. Logovi izvršavanja*

Ovde su dati logovi izvršavanja za definisane test primere i različit broj niti. Merenje vremena je rađeno korišćenjem *wall clock time*, koristeći OpenMP rutinu **`omp_get_wtime()`**.

```
TEST: func=0, N=1000, num_threads=1
1000    0.021717    4.131337
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 1000 i jednu nit**

```
TEST: func=0, N=1000, num_threads=2
1000    0.021614    2.082415
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 1000 i dve niti**

```
TEST: func=0, N=1000, num_threads=4
1000    0.021846    1.817548
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 1000 i četiri niti**

```
TEST: func=0, N=1000, num_threads=8
1000    0.021634    1.022370
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 1000 i osam niti**

```
TEST: func=0, N=1000, num_threads=16
1000    0.022469    0.604707
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 1000 i šestnaest niti**

```
TEST: func=0, N=5000, num_threads=1
5000    0.021273    20.522961
```

```
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 5000 i jednu nit**

```
TEST: func=0, N=5000, num_threads=2
5000    0.021125    10.457520
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 5000 i dve niti**

```
TEST: func=0, N=5000, num_threads=4
5000    0.021317    8.584322
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 5000 i četiri niti**

```
TEST: func=0, N=5000, num_threads=8
5000    0.020931    4.957851
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 5000 i osam niti**

```
TEST: func=0, N=5000, num_threads=16
5000    0.020941    3.212632
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 5000 i šestnaest niti**

```
TEST: func=0, N=10000, num_threads=1
10000    0.021100    40.813259
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 10000 i jednu nit**

```
TEST: func=0, N=10000, num_threads=2
10000    0.020984    20.798146
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 10000 i dve niti**

```
TEST: func=0, N=10000, num_threads=4
10000    0.021043    17.112431
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 10000 i četiri niti**

```
TEST: func=0, N=10000, num_threads=8
10000    0.021000    9.861268
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 10000 i osam niti**

```
TEST: func=0, N=10000, num_threads=16
10000    0.020995    5.661726
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 10000 i šestnaest niti**

```
TEST: func=0, N=20000, num_threads=1
20000    0.021027    81.066985
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 20000 i jednu nit**

```
TEST: func=0, N=20000, num_threads=2
20000    0.020978    41.448141
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 20000 i dve niti**

```
TEST: func=0, N=20000, num_threads=4
20000    0.021046    34.250091
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 20000 i četiri niti**

```
TEST: func=0, N=20000, num_threads=8
20000    0.020947    19.690891
TEST END
```

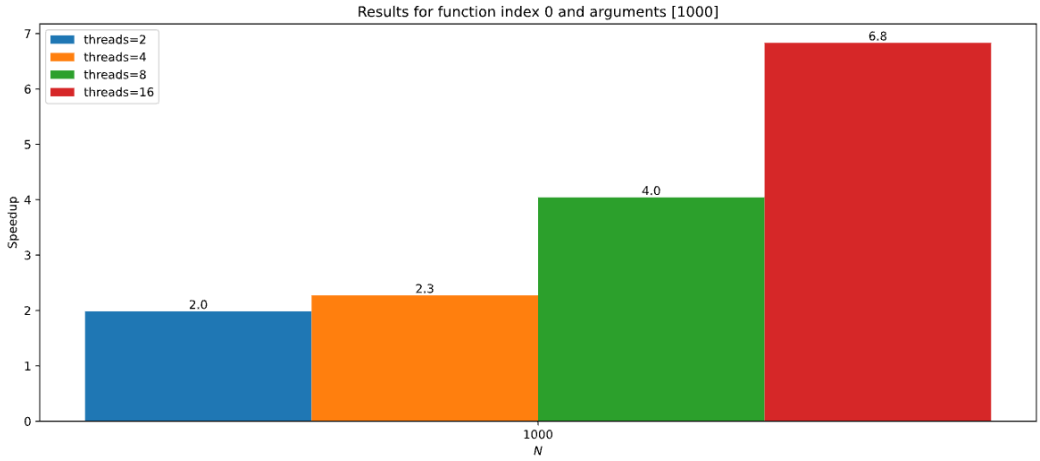
**Izvršavanje za argumente 20000 i osam niti**

```
TEST: func=0, N=20000, num_threads=16
20000    0.020964    11.411134
TEST END
```

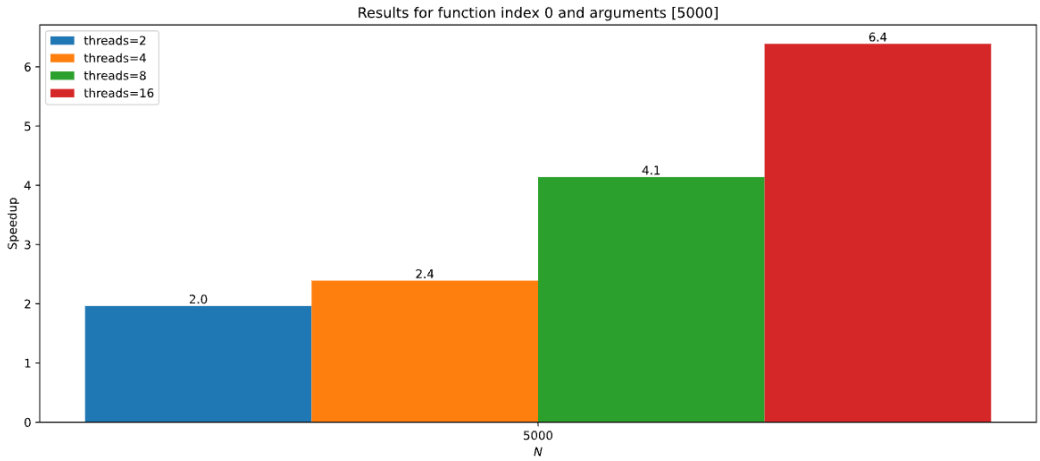
**Izvršavanje za argumente 20000 i šestnaest niti**

### *4.3.2. Grafici ubrzanja*

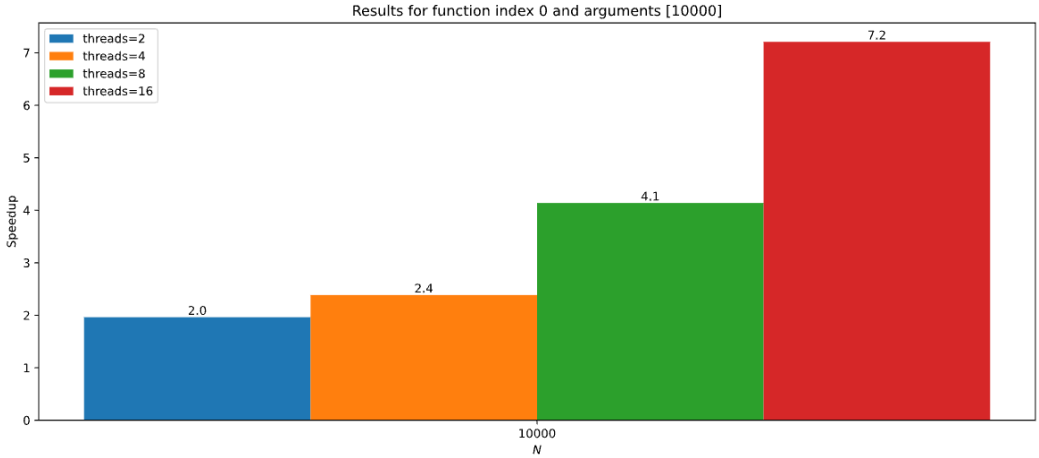
U okviru ove sekcije su dati grafici ubrzanja u odnosu na sekvencijalnu implementaciju.



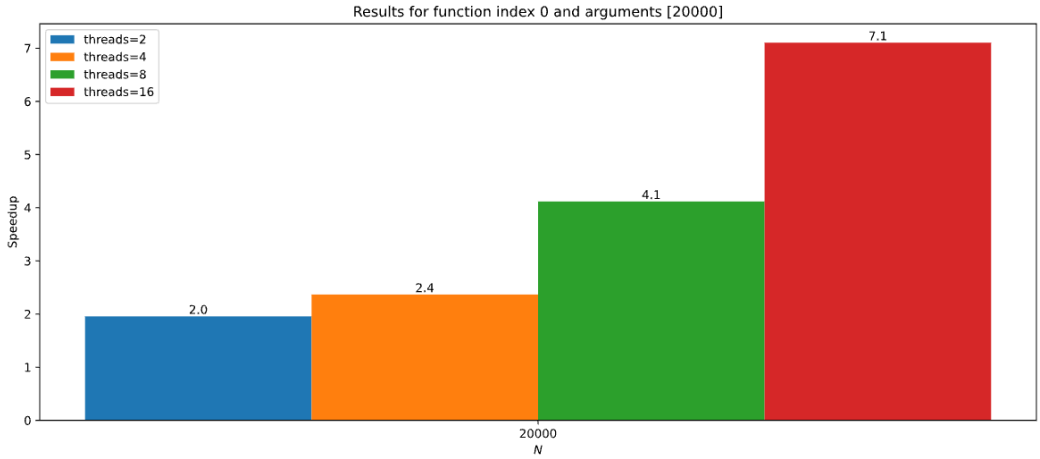

**Grafik ubrzanja za različit broj niti, sa argumentom 1000.**




**Grafik ubrzanja za različit broj niti, sa argumentom 5000.**




**Grafik ubrzanja za različit broj niti, sa argumentom 10000.**




**Grafik ubrzanja za različit broj niti, sa argumentom 20000.**

### *4.3.3. Diskusija dobijenih rezultata*

Paralelizacija je uspešno izvršena i svi rezultati su bili u dozvoljenom opsegu odstupanja ±**ACCURACY**. (kao što je navedeno u tekstu zadatka) Za veći broj niti dobija se vidljivo veće ubrzanje, što može da ukazuje na to da se problem može dalje skalirati.

# 5. PROBLEM 4 - POASONOVA JEDNAČINA

U okviru ovog poglavlja je dat kratak izveštaj u vezi rešenja zadatog problema 4.

## 5.1. Tekst problema

Rešiti prethodni problem korišćenjem koncepta poslova (*tasks*). Obratiti pažnju na eventualnu potrebu za sinhronizacijom i granularnost poslova. Program testirati sa parametrima koji su dati u datoteci **`run`**. [1, N]

## 5.2. Delovi koje treba paralelizovati

### *5.2.1. Diskusija*

Diskusija je slična kao i za prethodni problem. Ipak, korišćenje poslova nam daje mogućnost da paralelizujemo sadržaj skroz unutrašnje **`for`** petlje, koji u sebi sadrži još jednu **`while`** petlju sa promenljivim brojem iteracija. Ovo ukazuje na to da poslovi mogu značajno pomoći u raspodeli posla ukoliko bi se paralelizovali na tom nivou. Paralelizacija na nivou pojedinačnih iteracija **`while`** petlje nije smislena, jer iteracije zavise jedna od druge.

Ipak, ovaj način paralelizacije donosi dodatne probleme sa sobom. Promenljiva **`wt`**, koja služi za izračunavanje sabirka sa ukupnom greškom, se sada računa unutar jednog posla, i računanje pomenutog sabirka bi moralo da se vrši nakon završetka poslova koje menjaju tu promenljivu. Prva ideja koja bi mogla da radi jeste **`taskwait`** direktiva nakon pomenute **`for`** petlje, ali to može da donese značajno usporenje.

### *5.2.2. Način paralelizacije*

Način na koji odabrano rešavanje ovog problema jeste mala preformulacija algoritma. Pošto je primećeno da su dimenzije tri spoljašnje petlje jako male (17, 12 i 7 iteracija respektivno), promenljiva koja čuva izračunate **`w_exact`** i **`wt`** vrednosti u zavisnosti od iteracije petlje ne bi zauzela značajnu količinu memorije. Zbog ovoga, unutar samog posla se na **`wt`** promenljivu dodaje izračunata vrednost (zaštićena **`atomic`** direktivom) a nakon cele te procedure se vrši sabiranje izračunatih vrednosti kako bi se dobila krajnja greška. Na ovaj način više nije potrebna sinhronizacija po **`err`** niti **`n_inside`**, jer im pristupa samo jedna nit.

## 5.3. Rezultati

U okviru ove sekcije su izloženi rezultati paralelizacije ovog problema.

### *5.3.1. Logovi izvršavanja*

Ovde su dati logovi izvršavanja za definisane test primere i različit broj niti. Merenje vremena je rađeno korišćenjem *wall clock time*, koristeći OpenMP rutinu **`omp_get_wtime()`**.

```
TEST: func=1, N=1000, num_threads=1
1000    0.021712    4.024811
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 1000 i jednu nit**

```
TEST: func=1, N=1000, num_threads=2
1000    0.021669    2.086967
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 1000 i dve niti**

```
TEST: func=1, N=1000, num_threads=4
1000    0.021484    1.087751
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 1000 i četiri niti**

```
TEST: func=1, N=1000, num_threads=8
1000    0.022419    0.668714
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 1000 i osam niti**

```
TEST: func=1, N=1000, num_threads=16
1000    0.022461    0.737575
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 1000 i šestnaest niti**

```
TEST: func=1, N=5000, num_threads=1
5000    0.021272    20.489973
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 5000 i jednu nit**

```
TEST: func=1, N=5000, num_threads=2
5000    0.021018    10.478945
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 5000 i dve niti**

```
TEST: func=1, N=5000, num_threads=4
5000    0.021126    5.449140
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 5000 i četiri niti**

```
TEST: func=1, N=5000, num_threads=8
5000    0.021035    3.304991
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 5000 i osam niti**

```
TEST: func=1, N=5000, num_threads=16
5000    0.021179    3.570575
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 5000 i šestnaest niti**

```
TEST: func=1, N=10000, num_threads=1
10000    0.021099    40.358381
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 10000 i jednu nit**

```
TEST: func=1, N=10000, num_threads=2
10000    0.020766    20.964848
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 10000 i dve niti**

```
TEST: func=1, N=10000, num_threads=4
10000    0.021035    11.065931
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 10000 i četiri niti**

```
TEST: func=1, N=10000, num_threads=8
10000    0.020970    6.904453
TEST END
```

```
```

**Izvršavanje za argumente 10000 i osam niti**

```
TEST: func=1, N=10000, num_threads=16
10000    0.020933    6.965258
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 10000 i šestnaest niti**

```
TEST: func=1, N=20000, num_threads=1
20000    0.021027    80.615823
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 20000 i jednu nit**

```
TEST: func=1, N=20000, num_threads=2
20000    0.020982    41.855304
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 20000 i dve niti**

```
TEST: func=1, N=20000, num_threads=4
20000    0.020967    21.833881
TEST END
```

**Izvršavanje za argumente 20000 i četiri niti**

```
TEST: func=1, N=20000, num_threads=8
20000    0.020940    13.855232
TEST END
```

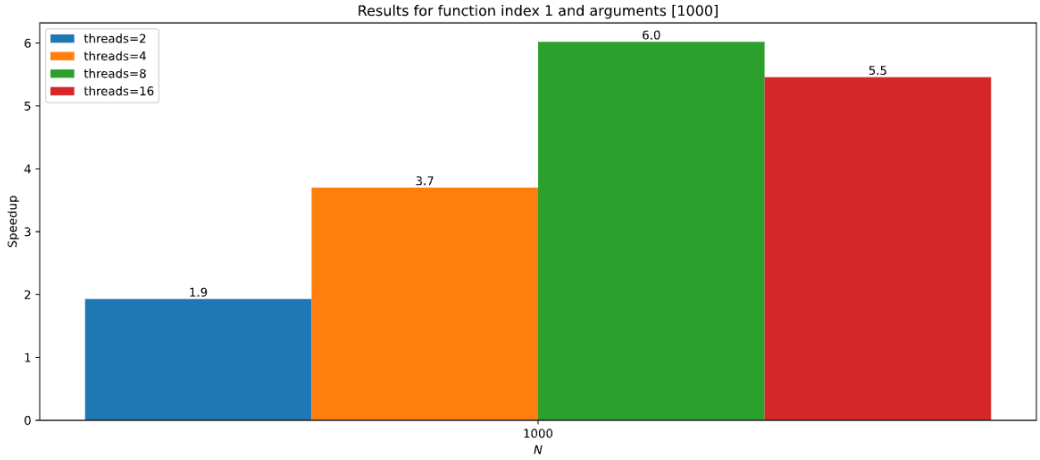
**Izvršavanje za argumente 20000 i osam niti**

```
TEST: func=1, N=20000, num_threads=16
20000    0.020928    14.158208
TEST END
```

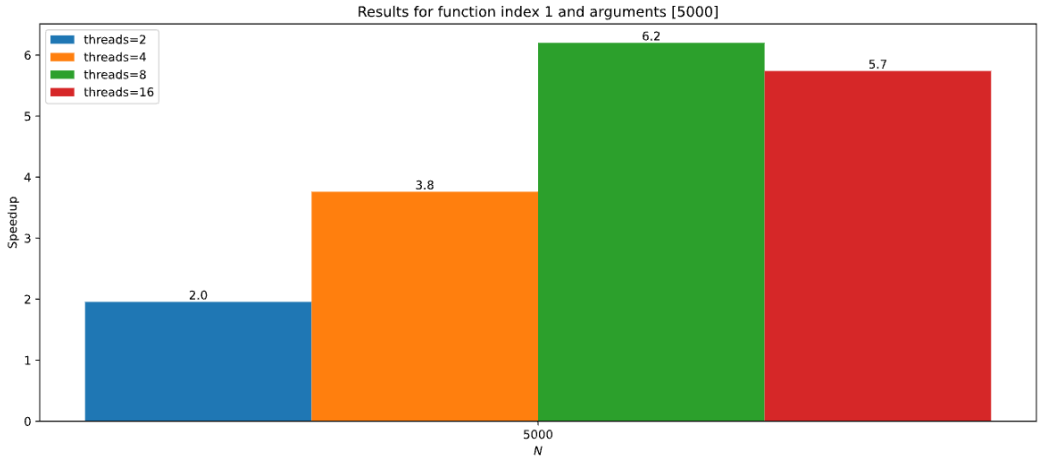
**Izvršavanje za argumente 20000 i šestnaest niti**

### *5.3.2. Grafici ubrzanja*

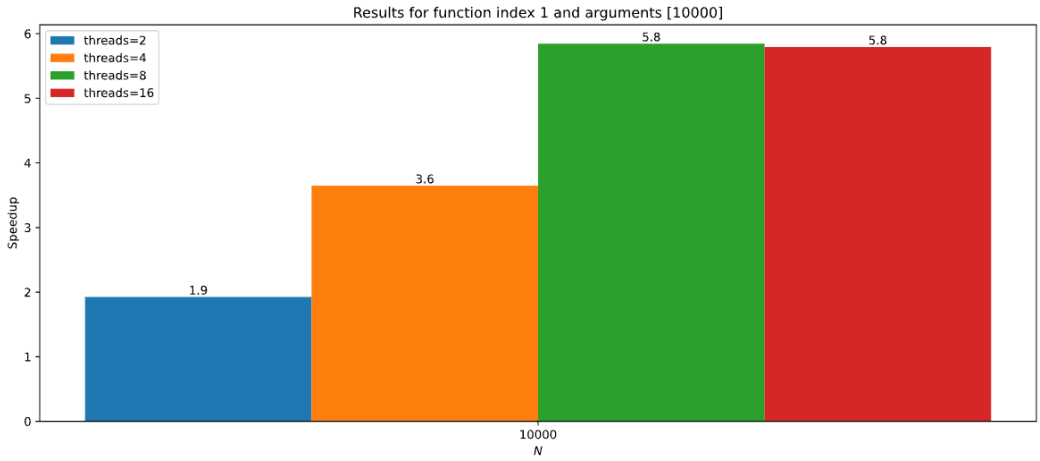
U okviru ove sekcije su dati grafici ubrzanja u odnosu na sekvencijalnu implementaciju.



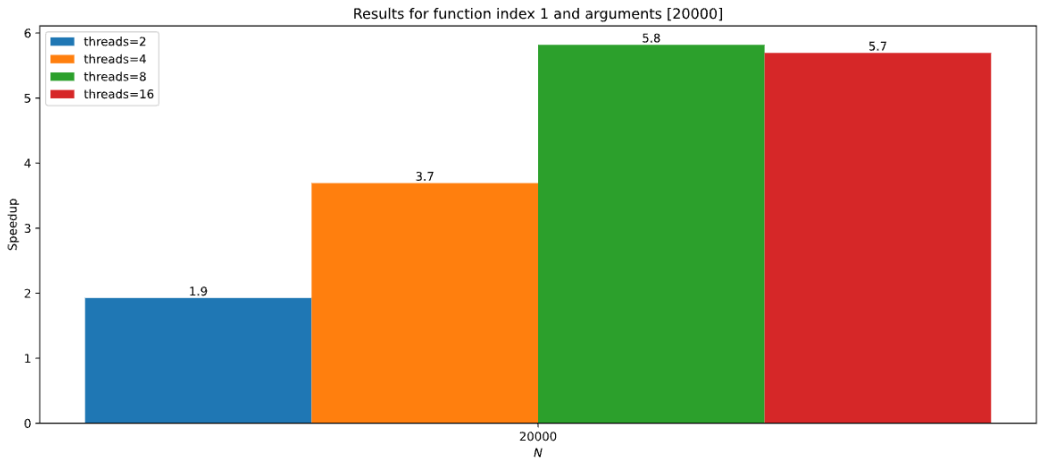

**Grafik ubrzanja za različit broj niti, sa argumentom 1000.**




**Grafik ubrzanja za različit broj niti, sa argumentom 5000.**




**Grafik ubrzanja za različit broj niti, sa argumentom 10000.**




**Grafik ubrzanja za različit broj niti, sa argumentom 20000.**

### *5.3.3. Diskusija dobijenih rezultata*

Grafici ubrzanja ovom metodom na nekim delovima pokazuju veće ubrzanje nego u prethodnom zadatku. Ovu paralelizaciju smatramo uspešnom, a tražena tačnost je takođe u traženom opsegu.

# 6. PROBLEM 5 - MOLEKULARNA DINAMIKA

U okviru ovog poglavlja je dat kratak izveštaj u vezi rešenja zadatog problema 5.

## 6.1. Tekst problema

Paralelizovati jednostavan program koji se bavi molekularnom dinamikom. Kod predstavlja simulaciju molekularne dinamike argonovog atoma u ograničenom prozoru (prostoru) sa periodičnim graničnim uslovima. Atomi se inicijalno nalaze raspoređeni u pravilnu mrežu, a zatim se tokom simulacije dešavaju interakcije između njih. U svakom koraku simulacije u glavnoj petlji se dešava sledeće:

- Čestice (atomi) se pomeraju zavisno od njihovih brzina i brzine se parcijalno ažuriraju u pozivu funkcije **`domove`**.
- Sile koje se primenjuju na nove pozicije čestica se izračunavaju; takođe, akumuliraju se prosečna kinetička energija (*virial*) i potencijalna energija u pozivu funkcije **`forces`**.
- Sile se skaliraju, završava ažuriranje brzine i izračunavanje kinetičke energije u pozivu funkcije **`mkekin`**.
- Prosečna brzina čestice se računa i skaliraju temperature u pozivu funkcije **`velavg`**.
- Pune potencijalne i prosečne kinetičke energije (virial) se računaju i ispisuju u funkciji prnout.

Program se nalazi u datoteci direktorijumu **`MolDyn`** u arhivi koja je priložena uz ovaj dokument. Program se sastoji od više datoteka, od kojih su od interesa datoteke **`main.c`** i **`forces.c`**, jer se u njima provodi najviše vremena. Analizirati dati kod i obratiti pažnju na redukcione promenljive unutar datoteke **`forces.c`**. Ukoliko je potrebno međusobno isključenje prilikom paralelizacije programa, koristiti kritične sekcije ili atomske operacije. [1, N]

## 6.2. Delovi koje treba paralelizovati

### *6.2.1. Diskusija*

Razmatrana je paralelizacija funkcije **`forces()`**, koja računaju promene kinetičke i potencijalne energije u molekulima. Funkcija se sastoji od dve ugnježdene for petlje, koje izvršavaju floating-point operacije i rezultate (promene sila) upisuju u niz. Kao bočni efekat, računaju ukupnu kinetičku i potencijalnu energiju u globalnim promenljivama **`vir`** i **`epot`**, respektivno.

### *6.2.2. Način paralelizacije*

Paralelizacija je izvršena **`for`** direktivom sa **`collapse(2)`** opcijom. Slično kao u trećem zadatku, neka izračunavanja su morala da budu pomerena u unutrašnju petlju, ali se ne očekuje da je to izazvalo veće usporenje.

Sinhronizacija je vršena nad nizom **`f`** tako što je svaka izmena tog niza obuhvaćena pod **`atomic`** direktivom. Takođe je probana sinhronizacija sa jednom **`critical`** direktivom umesto više **`atomic`** direktiva, ali je zaključeno da **`atomic`** direktiva ovde daje bolje performanse. Bolja sinhronizacija je potencijalno mogla biti postignuta sinhronizacijom nad svakim članom niza, umesto nizom u celosti, korišćenjem mehanizma brava. – **moguće unapređenje**.

Vršena je sabirajuća redukcija nad pomenutim promenljivama **`vir`** i **`epot`**.

## 6.3. Rezultati

U okviru ove sekcije su izloženi rezultati paralelizacije ovog problema.

### *6.3.1. Logovi izvršavanja*

Ovde su dati logovi izvršavanja za definisane test primere i različit broj niti. Merenje vremena je rađeno korišćenjem *wall clock time*, koristeći OpenMP rutinu **`omp_get_wtime()`**. Delovi gde je rađen ispis na standardni izlaz nisu računati u ukupno vreme izvršavanja.

```
      TEST: num_threads=1
            1  14551.3619 -93836.0953 -79284.7335     0.7186    -6.1148     0.1953
46.3
            2  14340.7480 -93654.4811 -79313.7331     0.7082    -6.0186     0.1939
45.6
            3  13968.2189 -93306.7546 -79338.5357     0.6898    -5.8516     0.1914
44.4
            4  13404.4586 -92759.7121 -79355.2536     0.6620    -5.6090     0.1876
42.6
            5  12619.1758 -91985.3542 -79366.1784     0.6232    -5.2880     0.1821
39.7
            6  11599.4183 -90970.4371 -79371.0188     0.5729    -4.8918     0.1748
35.8
            7  10379.3400 -89747.3564 -79368.0164     0.5126    -4.4367     0.1655
30.7
            8   9066.7213 -88424.5967 -79357.8754     0.4478    -3.9592     0.1546
24.7
            9   7831.4466 -87177.8677 -79346.4211     0.3868    -3.5119     0.1434
18.7
```

```
          10   14619.4170 -86181.5919 -71562.1749     0.7220    -2.8265     0.1336
14.1
          11   13529.0454 -85087.0949 -71558.0496     0.6682    -2.4076     0.1875
42.0
          12   12687.0299 -84243.7642 -71556.7343     0.6266    -2.0726     0.1812
38.5
          13   12082.9134 -83640.4681 -71557.5547     0.5967    -1.8201     0.1766
36.2
          14   11674.2473 -83233.7353 -71559.4879     0.5765    -1.6380     0.1734
34.7
          15   11405.1707 -82966.3254 -71561.1547     0.5633    -1.5094     0.1714
33.6
          16   11223.2084 -82785.5933 -71562.3850     0.5543    -1.4177     0.1701
33.0
          17   11089.5877 -82652.2025 -71562.6148     0.5477    -1.3495     0.1693
32.9
          18   10982.3523 -82544.7149 -71562.3626     0.5424    -1.2965     0.1687
32.5
          19   10893.9581 -82455.5630 -71561.6050     0.5380    -1.2544     0.1682
32.2
          20   10825.0423 -82385.8646 -71560.8222     0.5346    -1.2219     0.1679
32.2
      20     5.714868
```

**Izvršavanje za jednu nit**

```
      TEST: num_threads=2
           1   14551.3619 -93836.0953 -79284.7335     0.7186    -6.1148     0.1953
46.3
           2   14340.7480 -93654.4811 -79313.7331     0.7082    -6.0186     0.1939
45.6
           3   13968.2189 -93306.7546 -79338.5357     0.6898    -5.8516     0.1914
44.4
           4   13404.4586 -92759.7121 -79355.2536     0.6620    -5.6090     0.1876
42.6
           5   12619.1758 -91985.3542 -79366.1784     0.6232    -5.2880     0.1821
39.7
           6   11599.4183 -90970.4371 -79371.0188     0.5729    -4.8918     0.1748
35.8
           7   10379.3400 -89747.3564 -79368.0164     0.5126    -4.4367     0.1655
30.7
           8    9066.7213 -88424.5967 -79357.8754     0.4478    -3.9592     0.1546
24.7
           9    7831.4466 -87177.8677 -79346.4211     0.3868    -3.5119     0.1434
18.7
          10   14619.4170 -86181.5919 -71562.1749     0.7220    -2.8265     0.1336
14.1
```

```
          11  13529.0454 -85087.0949 -71558.0496    0.6682   -2.4076    0.1875
42.0
          12  12687.0299 -84243.7642 -71556.7343    0.6266   -2.0726    0.1812
38.5
          13  12082.9134 -83640.4681 -71557.5547    0.5967   -1.8201    0.1766
36.2
          14  11674.2473 -83233.7353 -71559.4879    0.5765   -1.6380    0.1734
34.7
          15  11405.1707 -82966.3254 -71561.1547    0.5633   -1.5094    0.1714
33.6
          16  11223.2084 -82785.5933 -71562.3850    0.5543   -1.4177    0.1701
33.0
          17  11089.5877 -82652.2025 -71562.6148    0.5477   -1.3495    0.1693
32.9
          18  10982.3523 -82544.7149 -71562.3626    0.5424   -1.2965    0.1687
32.5
          19  10893.9581 -82455.5630 -71561.6050    0.5380   -1.2544    0.1682
32.2
          20  10825.0423 -82385.8646 -71560.8222    0.5346   -1.2219    0.1679
32.2
     20    2.990249
```

**Izvršavanje za dve niti**

```
     TEST: num_threads=4
           1  14551.3619 -93836.0953 -79284.7335    0.7186   -6.1148    0.1953
46.3
           2  14340.7480 -93654.4811 -79313.7331    0.7082   -6.0186    0.1939
45.6
           3  13968.2189 -93306.7546 -79338.5357    0.6898   -5.8516    0.1914
44.4
           4  13404.4586 -92759.7121 -79355.2536    0.6620   -5.6090    0.1876
42.6
           5  12619.1758 -91985.3542 -79366.1784    0.6232   -5.2880    0.1821
39.7
           6  11599.4183 -90970.4371 -79371.0188    0.5729   -4.8918    0.1748
35.8
           7  10379.3400 -89747.3564 -79368.0164    0.5126   -4.4367    0.1655
30.7
           8   9066.7213 -88424.5967 -79357.8754    0.4478   -3.9592    0.1546
24.7
           9   7831.4466 -87177.8677 -79346.4211    0.3868   -3.5119    0.1434
18.7
          10  14619.4170 -86181.5919 -71562.1749    0.7220   -2.8265    0.1336
14.1
          11  13529.0454 -85087.0949 -71558.0496    0.6682   -2.4076    0.1875
42.0
```

```
           12  12687.0299 -84243.7642 -71556.7343     0.6266    -2.0726     0.1812
38.5
           13  12082.9134 -83640.4681 -71557.5547     0.5967    -1.8201     0.1766
36.2
           14  11674.2473 -83233.7353 -71559.4879     0.5765    -1.6380     0.1734
34.7
           15  11405.1707 -82966.3254 -71561.1547     0.5633    -1.5094     0.1714
33.6
           16  11223.2084 -82785.5933 -71562.3850     0.5543    -1.4177     0.1701
33.0
           17  11089.5877 -82652.2025 -71562.6148     0.5477    -1.3495     0.1693
32.9
           18  10982.3523 -82544.7149 -71562.3626     0.5424    -1.2965     0.1687
32.5
           19  10893.9581 -82455.5630 -71561.6050     0.5380    -1.2544     0.1682
32.2
           20  10825.0423 -82385.8646 -71560.8222     0.5346    -1.2219     0.1679
32.2
      20    1.550238
```

**Izvršavanje za četiri niti**

```
      TEST: num_threads=8
            1  14551.3619 -93836.0953 -79284.7335     0.7186    -6.1148     0.1953
46.3
            2  14340.7480 -93654.4811 -79313.7331     0.7082    -6.0186     0.1939
45.6
            3  13968.2189 -93306.7546 -79338.5357     0.6898    -5.8516     0.1914
44.4
            4  13404.4586 -92759.7121 -79355.2536     0.6620    -5.6090     0.1876
42.6
            5  12619.1758 -91985.3542 -79366.1784     0.6232    -5.2880     0.1821
39.7
            6  11599.4183 -90970.4371 -79371.0188     0.5729    -4.8918     0.1748
35.8
            7  10379.3400 -89747.3564 -79368.0164     0.5126    -4.4367     0.1655
30.7
            8   9066.7213 -88424.5967 -79357.8754     0.4478    -3.9592     0.1546
24.7
            9   7831.4466 -87177.8677 -79346.4211     0.3868    -3.5119     0.1434
18.7
           10  14619.4170 -86181.5919 -71562.1749     0.7220    -2.8265     0.1336
14.1
           11  13529.0454 -85087.0949 -71558.0496     0.6682    -2.4076     0.1875
42.0
           12  12687.0299 -84243.7642 -71556.7343     0.6266    -2.0726     0.1812
38.5
```

```
           13   12082.9134 -83640.4681 -71557.5547     0.5967    -1.8201     0.1766
36.2
           14   11674.2473 -83233.7353 -71559.4879     0.5765    -1.6380     0.1734
34.7
           15   11405.1707 -82966.3254 -71561.1547     0.5633    -1.5094     0.1714
33.6
           16   11223.2084 -82785.5933 -71562.3850     0.5543    -1.4177     0.1701
33.0
           17   11089.5877 -82652.2025 -71562.6148     0.5477    -1.3495     0.1693
32.9
           18   10982.3523 -82544.7149 -71562.3626     0.5424    -1.2965     0.1687
32.5
           19   10893.9581 -82455.5630 -71561.6050     0.5380    -1.2544     0.1682
32.2
           20   10825.0423 -82385.8646 -71560.8222     0.5346    -1.2219     0.1679
32.2
      20    0.844637
```

**Izvršavanje za osam niti**

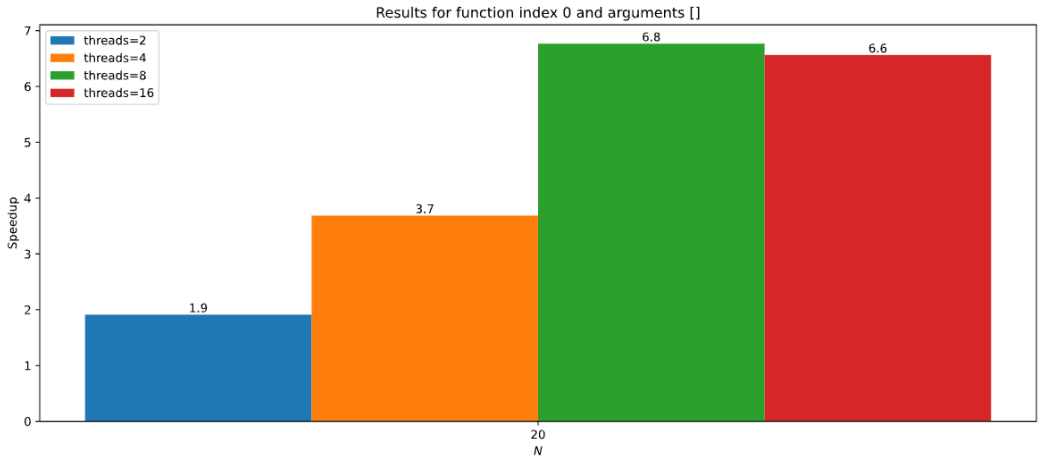
```
      TEST: num_threads=16
            1   14551.3619 -93836.0953 -79284.7335     0.7186    -6.1148     0.1953
46.3
            2   14340.7480 -93654.4811 -79313.7331     0.7082    -6.0186     0.1939
45.6
            3   13968.2189 -93306.7546 -79338.5357     0.6898    -5.8516     0.1914
44.4
            4   13404.4586 -92759.7121 -79355.2536     0.6620    -5.6090     0.1876
42.6
            5   12619.1758 -91985.3542 -79366.1784     0.6232    -5.2880     0.1821
39.7
            6   11599.4183 -90970.4371 -79371.0188     0.5729    -4.8918     0.1748
35.8
            7   10379.3400 -89747.3564 -79368.0164     0.5126    -4.4367     0.1655
30.7
            8    9066.7213 -88424.5967 -79357.8754     0.4478    -3.9592     0.1546
24.7
            9    7831.4466 -87177.8677 -79346.4211     0.3868    -3.5119     0.1434
18.7
           10   14619.4170 -86181.5919 -71562.1749     0.7220    -2.8265     0.1336
14.1
           11   13529.0454 -85087.0949 -71558.0496     0.6682    -2.4076     0.1875
42.0
           12   12687.0299 -84243.7642 -71556.7343     0.6266    -2.0726     0.1812
38.5
           13   12082.9134 -83640.4681 -71557.5547     0.5967    -1.8201     0.1766
36.2
```

```
          14   11674.2473 -83233.7353 -71559.4879     0.5765    -1.6380     0.1734
34.7
          15   11405.1707 -82966.3254 -71561.1547     0.5633    -1.5094     0.1714
33.6
          16   11223.2084 -82785.5933 -71562.3850     0.5543    -1.4177     0.1701
33.0
          17   11089.5877 -82652.2025 -71562.6148     0.5477    -1.3495     0.1693
32.9
          18   10982.3523 -82544.7149 -71562.3626     0.5424    -1.2965     0.1687
32.5
          19   10893.9581 -82455.5630 -71561.6050     0.5380    -1.2544     0.1682
32.2
          20   10825.0423 -82385.8646 -71560.8222     0.5346    -1.2219     0.1679
32.2
      20     0.870708
```

**Izvršavanje za šestnaest niti**

### *6.3.2. Grafici ubrzanja*

U okviru ove sekcije su dati grafici ubrzanja u odnosu na sekvencijalnu implementaciju.




**Grafik ubrzanja za različit broj niti.**

### *6.3.3. Diskusija dobijenih rezultata*

Paralelizacija je vidljivo uspešna, sa identičnim rezultatima kao sekvencijalno rešenje.