

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



## Συστήματα Παράλληλης Επεξεργασίας

9ο Εξάμηνο, 2024-2025

### Εργαστηριακή Αναφορά

των φοιτητών:

Λάζου Μαρία-Αργυρώ (el20129)

Σπηλιώτης Αθανάσιος (el20175)

Ομάδα: **parlab09**

# Conway's GameofLife

## Υλοποίηση

Για την παραλληλοποίηση του αλγορίθμου τροποποίησαμε τον κώδικα που δίνεται προσθέτοντας απλώς το #pragma directive στο κύριο loop για τα (i,j) του body:

Game\_Of\_Life.c

```
1  ****
2  ***** Conway's game of life ****
3  ****
4
5  Usage: ./exec ArraySize TimeSteps
6
7  Compile with -DOUTPUT to print output in output.gif
8  (You will need ImageMagick for that - Install with
9  sudo apt-get install imagemagick)
10 WARNING: Do not print output for large array sizes!
11 or multiple time steps!
12 ****
13
14
15 #include <stdio.h>
16 #include <stdlib.h>
17 #include <sys/time.h>
18
19 #define FINALIZE \
20 convert -delay 20 `ls -1 out*.pgm | sort -V` output.gif\n\
21 rm *pgm\n\
22 "
23
24 int ** allocate_array(int N);
25 void free_array(int ** array, int N);
26 void init_random(int ** array1, int ** array2, int N);
27 void print_to_pgm( int ** array, int N, int t );
28
29 int main (int argc, char * argv[]) {
30     int N;          //array dimensions
31     int T;          //time steps
32     int ** current, ** previous; //arrays - one for current timestep, one for previous timestep
33     int ** swap;    //array pointer
34     int t, i, j, nbrs; //helper variables
35
36     double time;    //variables for timing
37     struct timeval ts,tf;
38
39     /*Read input arguments*/
40     if ( argc != 3 ) {
41         fprintf(stderr, "Usage: ./exec ArraySize TimeSteps\n");
42         exit(-1);
43     }
44     else {
45         N = atoi(argv[1]);
46         T = atoi(argv[2]);
47     }
48
49     /*Allocate and initialize matrices*/
50     current = allocate_array(N);      //allocate array for current time step
51     previous = allocate_array(N);    //allocate array for previous time step
52
53     init_random(previous, current, N); //initialize previous array with pattern
54
55     #ifdef OUTPUT
56     print_to_pgm(previous, N, 0);
57     #endif
58
59     /*Game of Life*/
60
61     gettimeofday(&ts,NULL);
62     for ( t = 0 ; t < T ; t++ ) {
63         #pragma omp parallel for shared(current, previous) private (nbrs, i, j)
64         for ( i = 1 ; i < N-1 ; i++ ) {
```

```

65     for ( j = 1 ; j < N-1 ; j++ ) {
66         nbrs = previous[i+1][j+1] + previous[i+1][j] + previous[i+1][j-1] \
67             + previous[i][j-1] + previous[i][j+1] \
68             + previous[i-1][j-1] + previous[i-1][j] + previous[i-1][j+1];
69         if ( nbrs == 3 || ( previous[i][j]+nbrs ==3 ) )
70             current[i][j]=1;
71         else
72             current[i][j]=0;
73     }
74 }
75
76 #ifdef OUTPUT
77 print_to_pgm(current, N, t+1);
78#endif
79 //Swap current array with previous array
80 swap=current;
81 current=previous;
82 previous=swap;
83 }
84 gettimeofday(&tf,NULL);
85 time=(tf.tv_sec-ts.tv_sec)+(tf.tv_usec-ts.tv_usec)*0.000001;
86
87 free_array(current, N);
88 free_array(previous, N);
89 printf("GameOfLife: Size %d Steps %d Time %lf\n", N, T, time);
90 #ifdef OUTPUT
91 system(FINALIZE);
92#endif
93 }
94
95 int ** allocate_array(int N) {
96     int ** array;
97     int i,j;
98     array = malloc(N * sizeof(int*));
99     for ( i = 0; i < N ; i++ )
100         array[i] = malloc( N * sizeof(int));
101     for ( i = 0; i < N ; i++ )
102         for ( j = 0; j < N ; j++ )
103             array[i][j] = 0;
104     return array;
105 }
106
107 void free_array(int ** array, int N) {
108     int i;
109     for ( i = 0 ; i < N ; i++ )
110         free(array[i]);
111     free(array);
112 }
113
114 void init_random(int ** array1, int ** array2, int N) {
115     int i,pos,x,y;
116
117     for ( i = 0 ; i < (N * N)/10 ; i++ ) {
118         pos = rand() % ((N-2)*(N-2));
119         array1[pos%(N-2)+1][pos/(N-2)+1] = 1;
120         array2[pos%(N-2)+1][pos/(N-2)+1] = 1;
121
122     }
123 }
124
125 void print_to_pgm(int ** array, int N, int t) {
126     int i,j;
127     char * s = malloc(30*sizeof(char));
128     sprintf(s,"out%d.pgm",t);
129     FILE * f = fopen(s,"wb");
130     fprintf(f, "P5\n%d %d 1\n", N,N);
131     for ( i = 0; i < N ; i++ )
132         for ( j = 0; j < N ; j++ )
133             if ( array[i][j]==1 )
134                 fputc(1,f);
135             else
136                 fputc(0,f);
137     fclose(f);
138 }
```

```
139     free(s);  
140 }
```

Για την μεταγλώτιση και εκτέλεση στον scirouter χρησιμοποίησαμε το ακόλουθα scripts :

```
#!/bin/bash  
## Give the Job a descriptive name  
#PBS -N make_gameoflife  
## Output and error files  
#PBS -o make_gameoflife.out  
#PBS -e make_gameoflife.err  
## How many machines should we get?  
#PBS -l nodes=1:ppn=1  
## Start  
## Run make in the src folder (modify properly)  
module load openmpi/1.8.3  
cd /home/parallel/parlab09/a1  
make
```

```
#!/bin/bash  
## Give the Job a descriptive name  
#PBS -N run_gameoflife  
## Output and error files  
#PBS -o omp_gameoflife_all.out  
#PBS -e omp_gameoflife_all.err  
## Limit memory, runtime etc.  
#PBS -l walltime=01:00:00  
##Number of nodes aka threads  
#PBS -l nodes=1:ppn=8  
module load openmpi/1.8.3  
cd /home/parallel/parlab09/a1  
for threads in 1 2 4 6 8  
do  
export OMP_NUM_THREADS=$threads  
echo "Running with OMP_NUM_THREADS=$OMP_NUM_THREADS"  
.omp_gameoflife 64 1000  
.omp_gameoflife 1024 1000  
.omp_gameoflife 4096 1000  
echo "Finished run with OMP_NUM_THREADS=$OMP_NUM_THREADS"  
echo "-----"  
done
```

### Αποτελέσματα Μετρήσεων:

```
Running with OMP_NUM_THREADS=1  
GameOfLife: Size 64 Steps 1000 Time 0.023112  
GameOfLife: Size 1024 Steps 1000 Time 10.965944  
GameOfLife: Size 4096 Steps 1000 Time 175.900314  
Finished run with OMP_NUM_THREADS=1
```

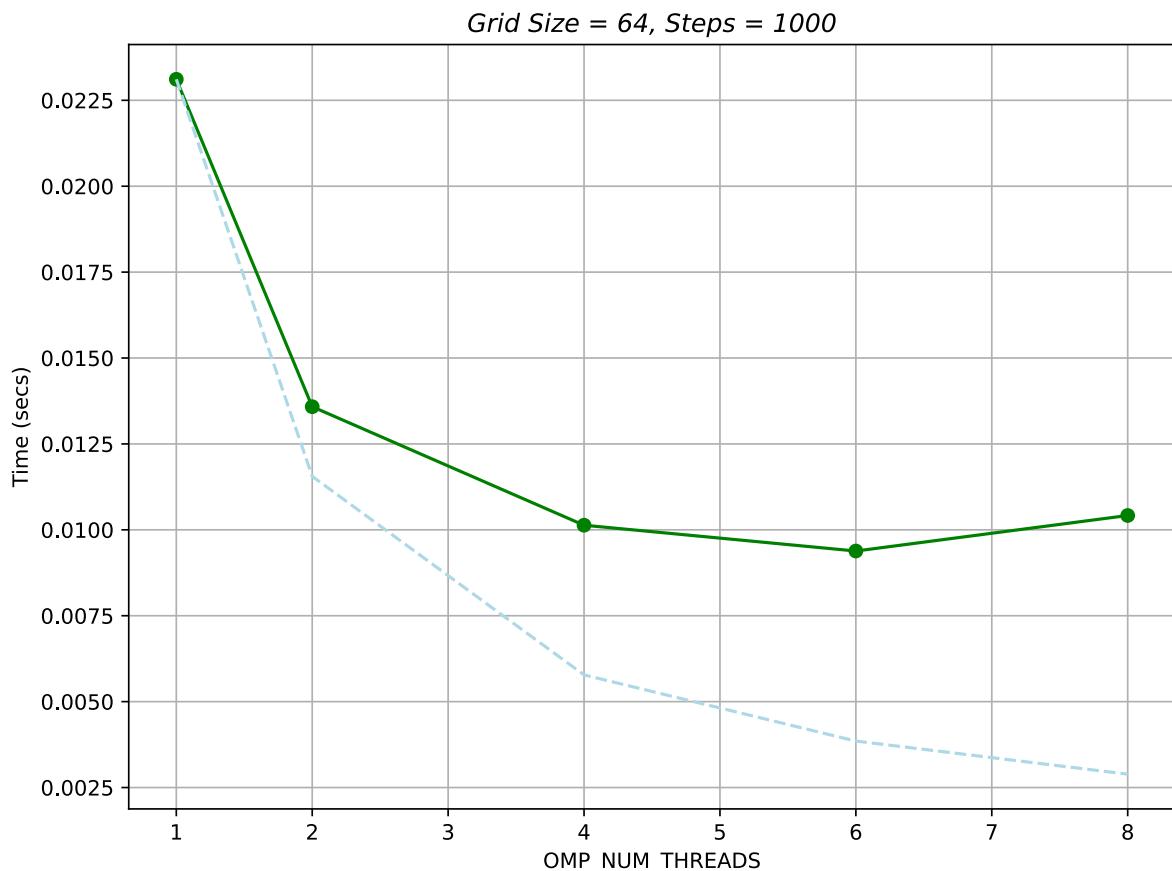
```
-----  
Running with OMP_NUM_THREADS=2  
GameOfLife: Size 64 Steps 1000 Time 0.013583  
GameOfLife: Size 1024 Steps 1000 Time 5.458949  
GameOfLife: Size 4096 Steps 1000 Time 88.263665  
Finished run with OMP_NUM_THREADS=2
```

```
-----  
Running with OMP_NUM_THREADS=4  
GameOfLife: Size 64 Steps 1000 Time 0.010134  
GameOfLife: Size 1024 Steps 1000 Time 2.723798  
GameOfLife: Size 4096 Steps 1000 Time 45.901567  
Finished run with OMP_NUM_THREADS=4  
-----
```

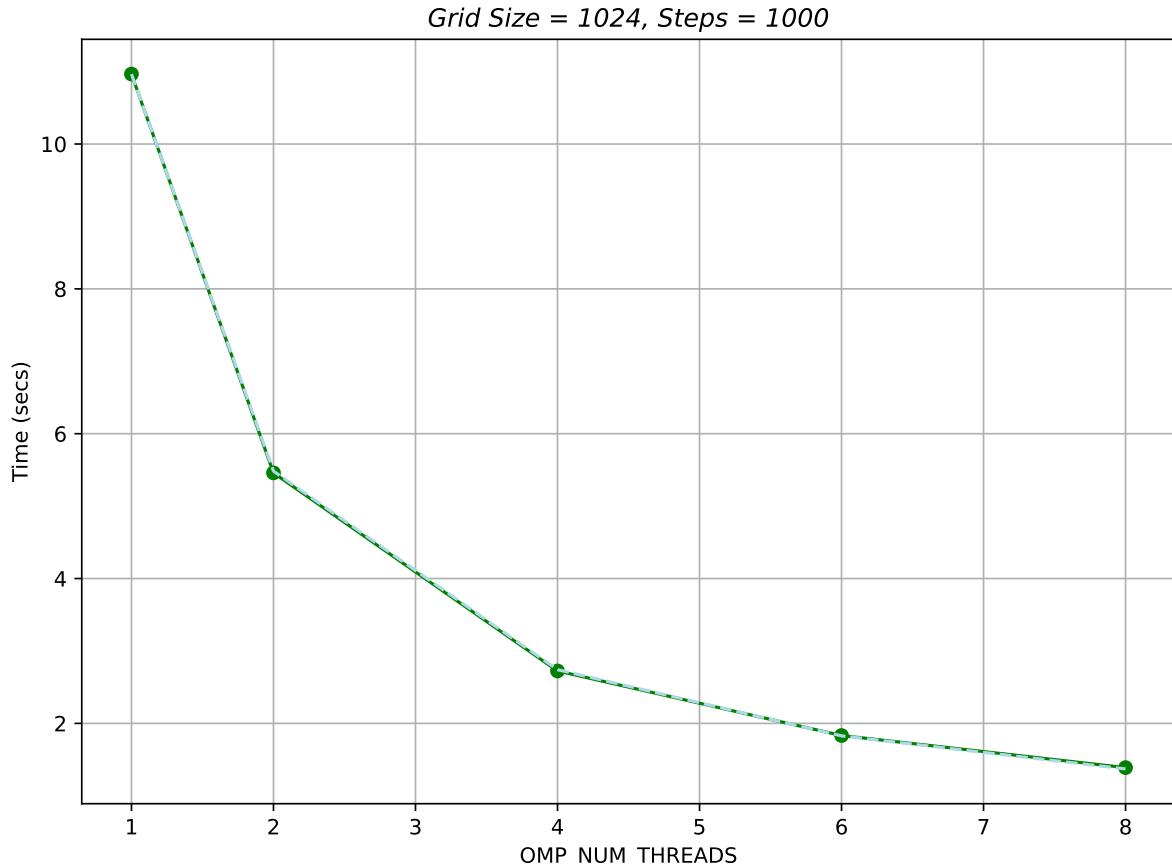
```
Running with OMP_NUM_THREADS=6  
GameOfLife: Size 64 Steps 1000 Time 0.009383  
GameOfLife: Size 1024 Steps 1000 Time 1.832227  
GameOfLife: Size 4096 Steps 1000 Time 43.661123  
Finished run with OMP_NUM_THREADS=6  
-----
```

```
Running with OMP_NUM_THREADS=8  
GameOfLife: Size 64 Steps 1000 Time 0.010417  
GameOfLife: Size 1024 Steps 1000 Time 1.389175  
GameOfLife: Size 4096 Steps 1000 Time 43.186379  
Finished run with OMP_NUM_THREADS=8  
-----
```

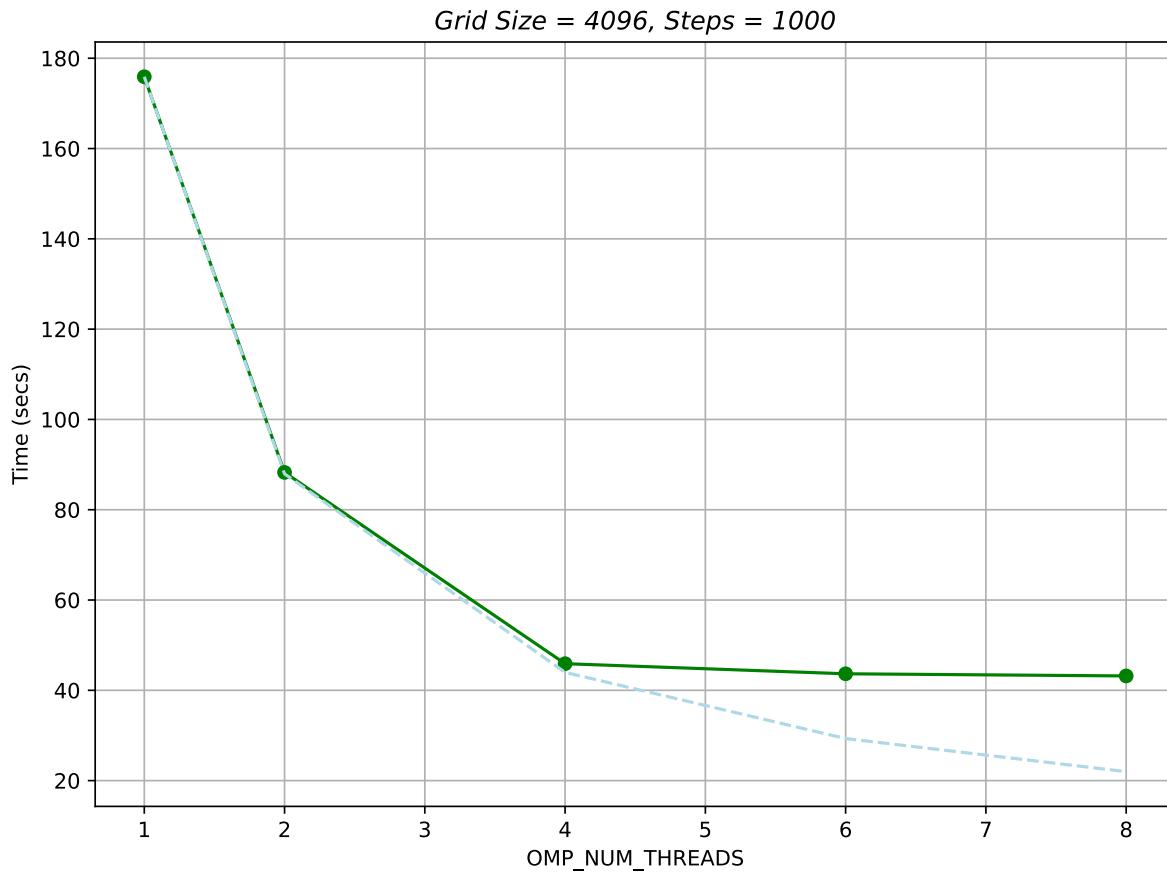
### Γραφική Απεικόνιση και Παρατηρήσεις



Παρατηρούμε ότι για μικρό μέγεθος grid (με συνολική απαίτηση μνήμης  $4*64*64\text{bytes} = 16\text{KB}$ ), δεν υπάρχει ομοιόμορφη κλιμάκωση της επίδοσης με αύξηση των νημάτων από 4 και πάνω. Bottleneck κόστους θα θεωρήσουμε την ανάγκη συγχρονισμού των threads και το overhead της δημιουργίας τους συγκρυτικά με τον φόρτο εργασίας που τους ανατίθεται (granularity).



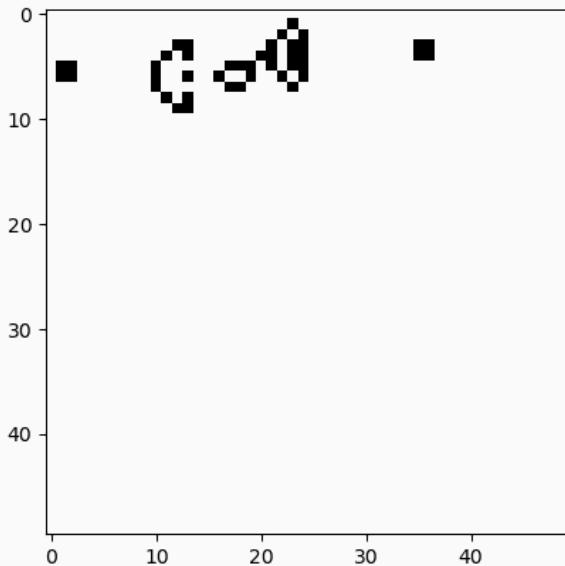
Για μέγεθος grid με συνολική απαίτηση μνήμης  $4*1024*1024 \text{ bytes} = 4\text{MB}$ , η επίδοση βελτίωνεται ομοιόμορφα και ανάλογα με το μέγεθος των νημάτων . Εικάζουμε, λοιπόν, πως η cache χωράει ολόκληρο το grid ώστε το κάθε νήμα δεν επιβαρύνει την μνήμη με loads των αντίστοιχων rows, ο φόρτος εργασίας είναι ισομοιρασμένος στους workers και το κόστος επικοινωνίας αμελητέο. Συνεπώς, προκύπτει perfect scaling.



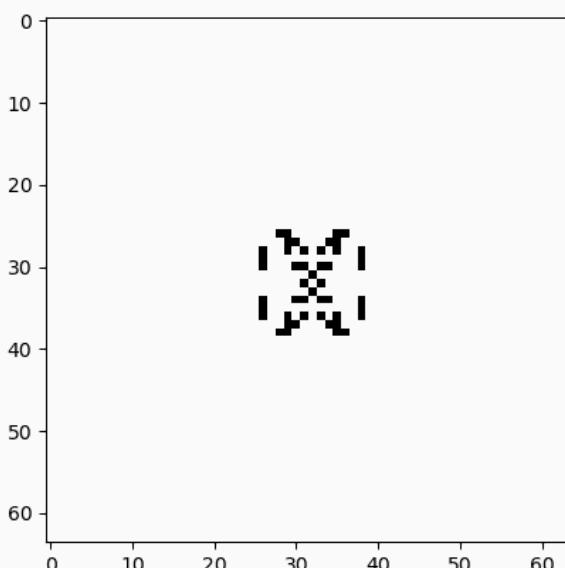
Για μεγάλο grid (με συνολική απαίτηση μνήμης  $4 * 4096 * 4096$  bytes = 64MB), η κλιμάκωση παύει να υφίσταται για περισσότερα από 4 νήματα. Bottleneck κόστους εδώ θεωρούμε το memory bandwidth. Επειδή ολόκληρο το grid δεν χωράει στην cache, δημιουργούνται misses όταν ξεχωριστά νήματα προσπαθούν να διαβάσουν ξεχωριστές γραμμές του previous. Σε κάθε memory request αδειάζουν χρήσιμα data για άλλα νήματα, φέρνοντας τις δικές τους γραμμές και στο μεταξύ οι υπολογισμοί stall-άρουν.

## Bonus

Δύο ενδιαφέρουσες ειδικές αρχικοποιήσεις του ταμπλό είναι το pulse και το gosper glider gun για τις οποίες η εξέλιξη των γενιών σε μορφή κινούμενης εικόνας φαίνεται με μορφή gif παρακάτω:



*glider\_gun animation*



*pulse animation*

## Πράρτημα

Για την εξαγωγή των γραφικών παραστάσεων χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας σε Python που ακολουθεί:

plots.py

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import re
4 import sys
5
6 outfile = "omp_gameoflife_all.out"
7
8 thread_pattern = r"Running with OMP_NUM_THREADS=(\d+)"
9 time_pattern = r"GameOfLife: Size (\d+) Steps 1000 Time ([\d.]+)"
10
11 with open (outfile, 'r') as fout:
12     data = fout.read()
13
14 thread_vals = re.findall(thread_pattern, data)
15 time_vals = re.findall(time_pattern, data)
16
17 #print(thread_vals, time_vals)
18
19 results_mapping = {}
20
21 for i in range(0, len(thread_vals)):
22     omp_num_thredas = int(thread_vals[i])
23
24     for j in range(0,3):
25         size = int(time_vals[i*3+j][0])
26         time = float(time_vals[i*3+j][1])
27         ## print(f"From {i,j} extracted size: {size} with time: {time}")
28
29         if size not in results_mapping :
30             results_mapping[size] = {}
31
32         results_mapping[size][omp_num_thredas] = time
33
34 for idx, (size, omp_times) in enumerate(results_mapping.items()):
35     print(f"Size: {size}, results: {omp_times}")
36
37     # Create a new figure for each graph
38     plt.figure(figsize=(8, 6))
39
40     # Plot the original times
41     plt.plot(omp_times.keys(), omp_times.values(), color='g', marker='o')
42
43     # Plot the inverse times
44     plt.plot(omp_times.keys(), [omp_times[1] / i for i in omp_times.keys()], color='lightblue',
45     linestyle='--')
46
47     # Add labels and title
48     plt.title(f"Grid Size = {size}, Steps = 1000", fontstyle='oblique', size=12)
49     plt.xlabel("OMP_NUM_THREADS")
50     plt.ylabel("Time (secs)")
51     plt.grid()
52
53     # Show the plot
54     plt.tight_layout()
55     plt.savefig(f"grid{size}.svg", format="svg")
```

# KMEANS

## 1) Shared Clusters

### Υλοποίηση

Για την παραλληλοποίηση της συγκεκριμένης έκδοσης χρησιμοπιήσαμε το parallel for directive του omp και για την αποφυγή race conditions τα omp atomic directives. Αυτά εμφανίζονται όταν περισσότερα από 1 νήματα προσπαθούν να ανανεώσουν τιμές στους shared πίνακες newClusters και newClusterSize σε indexes τα οποία δεν είναι μοναδικά για το καθένα καθώς και στην shared μεταβλητή delta. Για αυτήν προσφέρεται η χρήση reduction και εδώ μπορεί να αγνοηθεί εντελώς αφού η σύγκλιση του αλγορίθμου καθορίζεται από των πολύ μικρό αριθμό των επαναλήψεων(10). Ωστόσο, χρησιμοποιούμε atomic για ορθότητα της τιμής του και για παρατήρηση με βάση το μεγαλύτερο δυνατό overhead.

```
omp_naive_kmeans.c

1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3 #include "kmeans.h"
4 /*
5  * TODO: include openmp header file
6  */
7
8 // square of Euclid distance between two multi-dimensional points
9 inline static double euclid_dist_2(int      numdims, /* no. dimensions */
10                                double * coord1,   /* [numdims] */
11                                double * coord2)  /* [numdims] */
12 {
13     int i;
14     double ans = 0.0;
15
16     for(i=0; i<numdims; i++)
17         ans += (coord1[i]-coord2[i]) * (coord1[i]-coord2[i]);
18
19     return ans;
20 }
21
22 inline static int find_nearest_cluster(int      numClusters, /* no. clusters */
23                                       int      numCoords, /* no. coordinates */
24                                       double * object,    /* [numCoords] */
25                                       double * clusters) /* [numClusters][numCoords] */
26 {
27     int index, i;
28     double dist, min_dist;
29
30     // find the cluster id that has min distance to object
31     index = 0;
32     min_dist = euclid_dist_2(numCoords, object, clusters);
33
34     for(i=1; i<numClusters; i++) {
35         dist = euclid_dist_2(numCoords, object, &clusters[i*numCoords]);
36         // no need square root
37         if (dist < min_dist) { // find the min and its array index
38             min_dist = dist;
39             index   = i;
40         }
41     }
42     return index;
43 }
44
45 void kmeans(double * objects,           /* in: [numObjs][numCoords] */
46             int      numCoords,        /* no. coordinates */
47             int      numObjs,          /* no. objects */
48             int      numClusters,      /* no. clusters */
49             double   threshold,        /* minimum fraction of objects that change membership */
50             long    loop_threshold,    /* maximum number of iterations */
51             int     * membership,      /* out: [numObjs] */
```

```

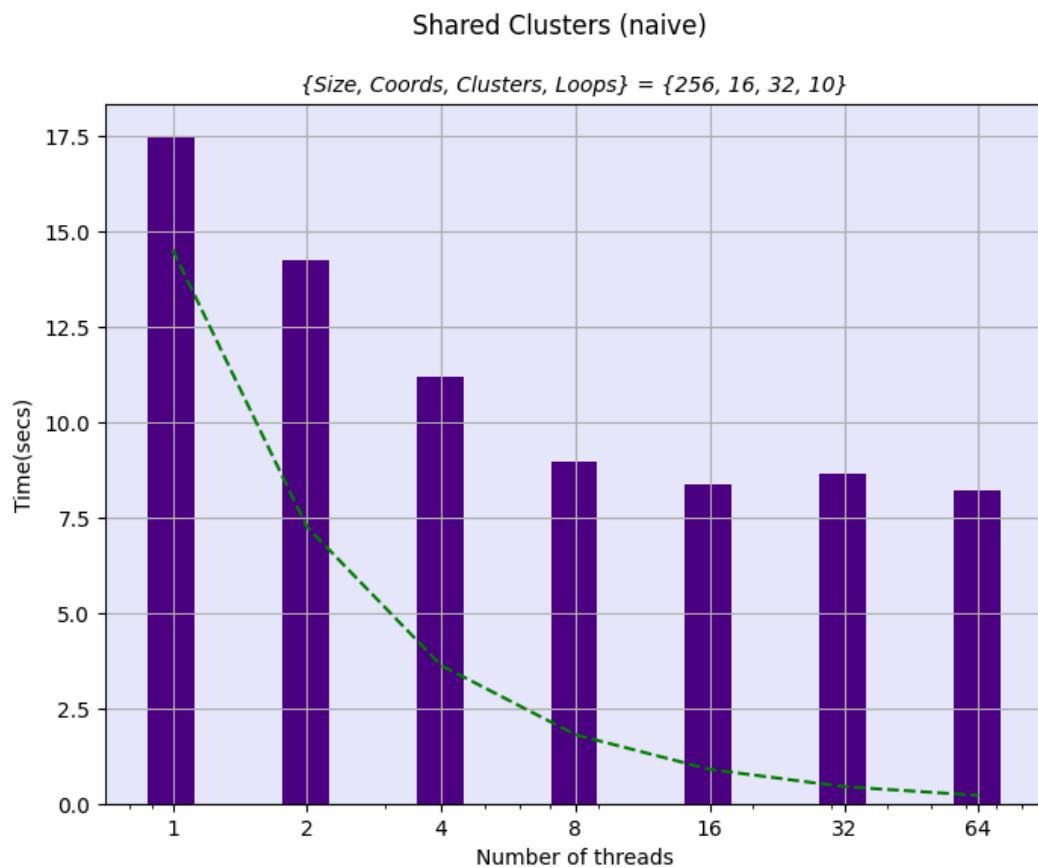
52     double * clusters)           /* out: [numClusters][numCoords] */
53 {
54     int i, j;
55     int index, loop=0;
56     double timing = 0;
57
58     double delta;             // fraction of objects whose clusters change in each loop
59     int * newClusterSize; // [numClusters]: no. objects assigned in each new cluster
60     double * newClusters; // [numClusters][numCoords]
61     int nthreads;          // no. threads
62
63     nthreads = omp_get_max_threads();
64     printf("OpenMP Kmeans - Naive\t(number of threads: %d)\n", nthreads);
65
66     // initialize membership
67     for (i=0; i<numObjs; i++)
68         membership[i] = -1;
69
70     // initialize newClusterSize and newClusters to all 0
71     newClusterSize = (typeof(newClusterSize)) calloc(numClusters, sizeof(*newClusterSize));
72     newClusters = (typeof(newClusters)) calloc(numClusters * numCoords, sizeof(*newClusters));
73
74     timing = wtime();
75
76     do {
77         // before each loop, set cluster data to 0
78         for (i=0; i<numClusters; i++) {
79             for (j=0; j<numCoords; j++)
80                 newClusters[i*numCoords + j] = 0.0;
81             newClusterSize[i] = 0;
82         }
83
84         delta = 0.0;
85
86         /*
87          * TODO: Detect parallelizable region and use appropriate OpenMP pragmas
88         */
89         #pragma omp parallel for private(i, j, index) shared(newClusters, newClusterSize,
90         membership) schedule(static)
91         for (i=0; i<numObjs; i++) {
92             // find the array index of nearest cluster center
93             index = find_nearest_cluster(numClusters, numCoords, &objects[i*numCoords], clusters);
94
95             // if membership changes, increase delta by 1
96             if (membership[i] != index)
97                 #pragma omp atomic
98                 delta += 1.0;
99
100            // assign the membership to object i
101            membership[i] = index;
102
103            // update new cluster centers : sum of objects located within
104            /*
105             * TODO: protect update on shared "newClusterSize" array
106             */
107            #pragma omp atomic
108            newClusterSize[index]++;
109            for (j=0; j<numCoords; j++)
110                /*
111                 * TODO: protect update on shared "newClusters" array
112                 */
113                #pragma omp atomic
114                newClusters[index*numCoords + j] += objects[i*numCoords + j];
115
116            // average the sum and replace old cluster centers with newClusters
117            // #pragma omp parallel for private(i,j)
118            for (i=0; i<numClusters; i++) {
119                if (newClusterSize[i] > 0) {
120                    for (j=0; j<numCoords; j++)
121                        clusters[i*numCoords + j] = newClusters[i*numCoords + j] / newClusterSize[i];
122                }
123            }
124        }
125

```

```

126     // Get fraction of objects whose membership changed during this loop. This is used as a
127     convergence criterion.
128     delta /= numObjs;
129
130     loop++;
131     printf("\r\tcompleted loop %d", loop);
132     fflush(stdout);
133 } while (delta > threshold && loop < loop_threshold);
134 timing = wtime() - timing;
135 printf("\n          nloops = %3d    (total = %7.4fs)  (per loop = %7.4fs)\n", loop, timing,
136 timing/loop);
137
138 free(newClusters);
139 free(newClusterSize);
140 }
```

Απεικονίζουμε παρακάτω τα αποτελέσματα των δοκιμών στον sandman για τις διάφορες τιμές της environmental variable OMP\_NUM\_THREADS:



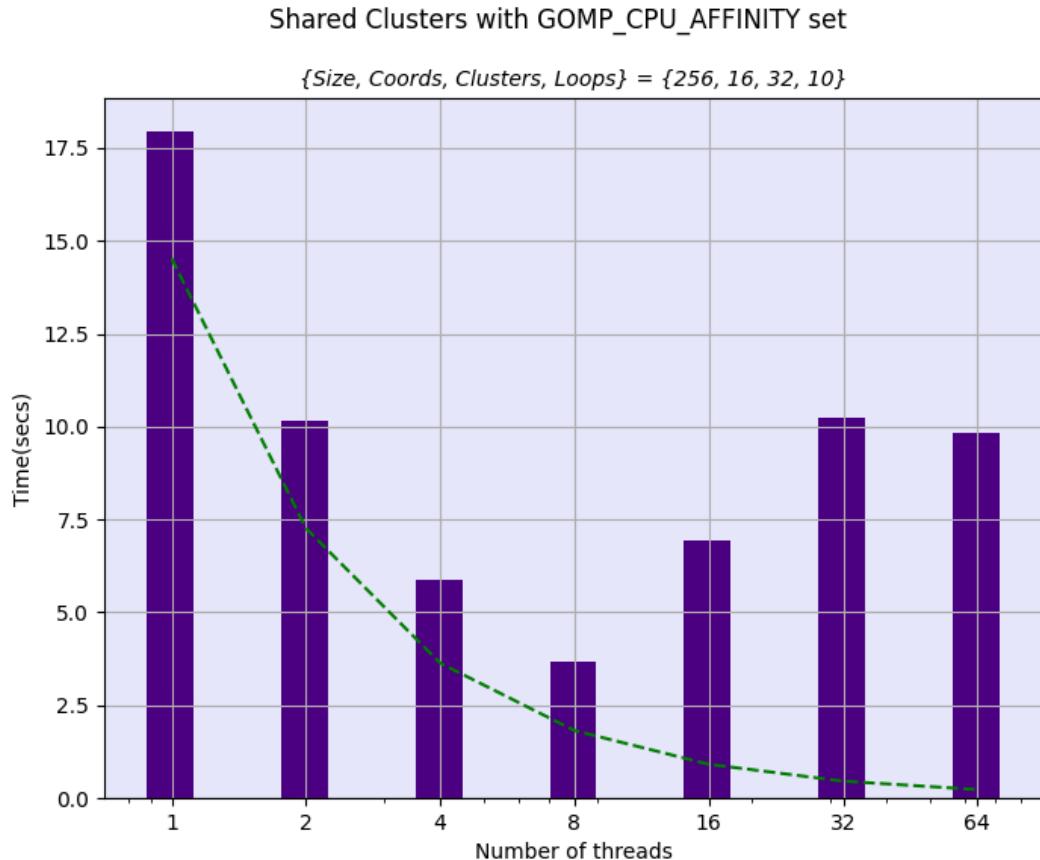
Παρατηρούμε πως ο αλγόριθμος δεν κλιμακώνει καθόλου καλά από 8 και πάνω νήματα εξαιτείας της σειριποίησης των εγγραφών ολοένα και περισσότερων νημάτων που επιβάλλει η omp atomic, και της αυξανόμενης συμφόρησης στο bus κατά την απόκτηση του lock.

## Εκμετάλλευση του GOMP\_CPU\_AFFINITY

Με την χρήση του environmental variable GOMP\_CPU\_AFFINITY και στατικό shceduling κάνουμε ριν νήματα σε πυρήνες(εφόσον δεν υπάρχει ανάγκη για περίπλοκη δυναμική δρομολόγηση). Έτσι, δεν σπαταλάται καθόλου χρόνος σε flash πυρήνων και αχρείαστη μεταφορά δεδομένων από πυρήνα σε άλλον.

Για την υλοποίηση τροποποίησαμε κατάλληλα το script υποβολής στον sandman και προσθέσαμε την παράμετρο **schedule (static)** στο parallel for.

### Αποτελέσματα



Παρατηρούμε σημαντική βελτίωση στην κλιμάκωση μέχρι 8 νήματα όμως μετά σταματάει να κλιμακώνει ο αλγόριθμος λόγω της δομής που έχει ο sandman. Για 16 νήματα και πάνω δεν μπορούμε να τα κάνουμε ριν στο ίδιο cluster οπότε δεν μοιράζονται τα νήματα την ίδια L3 cache και υπάρχει συνεχής μεταφορά δεδομένων των shared πινάκων και bus invalidations λόγω του cache coherence protocol. Ακόμη τα L3 misses κοστίζουν ξεχωριστά για κάθε cluster. Εάν αξιοποιήσουμε το hyperthreading και κάνουμε ριν τα threads 9-16 στους cores 32-40 που πέφτουν μέσα στο cluster 1 μπορούμε να μειώσουμε σημαντικά τον χρόνο για τα 16 νήματα. Από εκεί και πέρα η κλιμάκωση σταματάει. Παραθέτουμε το τελικό script υποβολής ακολούθως:

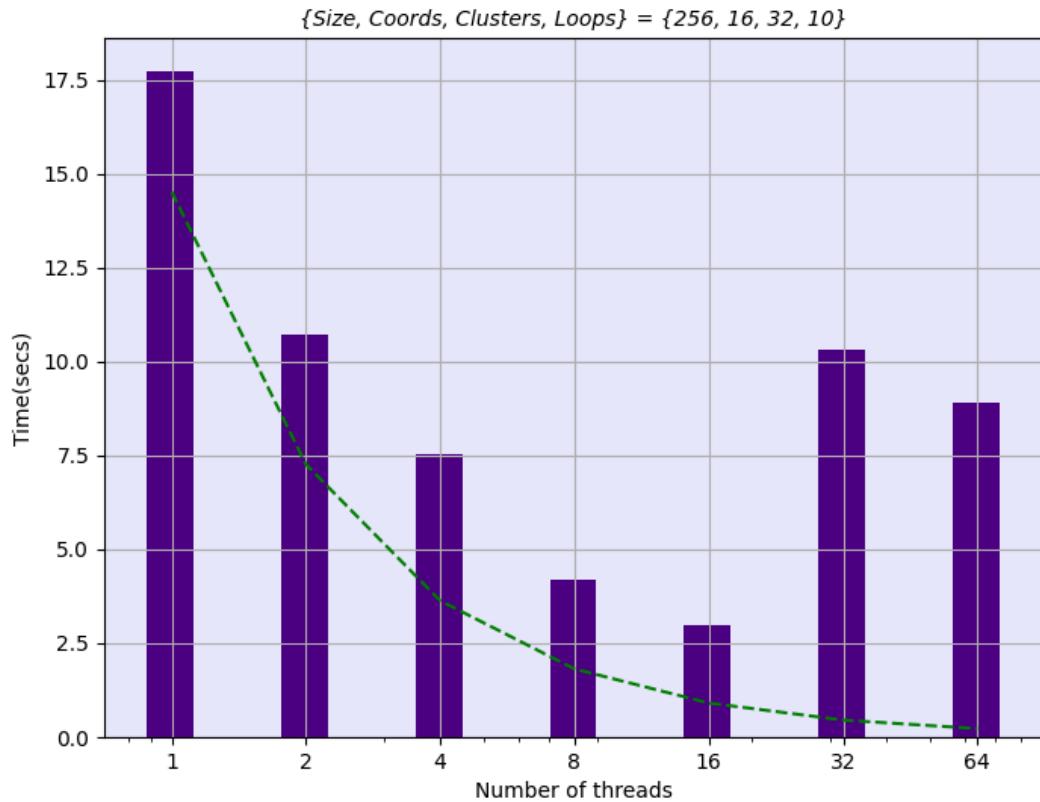
```

#!/bin/bash
## Give the Job a descriptive name
#PBS -N run_kmeans
## Output and error files
#PBS -o gomp_hyper_kmeans.out
#PBS -e gomp_hyper_kmeans.err
## How many machines should we get?
#PBS -l nodes=1:ppn=8
##How long should the job run for?
#PBS -l walltime=00:10:00
## Start
## Run make in the src folder (modify properly)
module load openmp
cd /home/parallel/parlab09/kmeans
Size=256
Coords=16
Clusters=32
Loops=10
for i in 1 2 4 8 16 32 64; do
    export OMP_NUM_THREADS=$i
    if [[ $i -eq 16 ]]; then
        export GOMP_CPU_AFFINITY=$(seq -s, 0 7),$(seq -s, 32 40)"
    else
        export GOMP_CPU_AFFINITY=$(seq -s, 0 $((i - 1)))"
    fi
done
./kmeans_omp_naive -s $Size -n $Coords -c $Clusters -l $Loops
done

```

## Αποτελέσματα

Shared Clusters with GOMP\_CPU\_AFFINITY[0-7][32-40]



## 2) Copied Clusters & Reduce

### Υλοποίηση

Μοιράζουμε σε κάθε νήμα ένα διαφορετικό τμήμα των πινάκων newClusters, newClusterSize οπότε τα δεδομένα γίνονται private, δεν υπάρχουν race conditions αλλά απαιτείται reduction (με πρόσθεση) στο τέλος για το τελικό αποτέλεσμα (η οποία πραγματοποιείται εδώ από 1 νήμα).

```
omp_reduction_kmeans.c

1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3 #include "kmeans.h"
4 /*
5  * TODO: include openmp header file
6  */
7
8 // square of Euclid distance between two multi-dimensional points
9 inline static double euclid_dist_2(int      numdims, /* no. dimensions */
10                                double * coord1,   /* [numdims] */
11                                double * coord2)  /* [numdims] */
12{
13     int i;
14     double ans = 0.0;
15
16     for(i=0; i<numdims; i++)
17         ans += (coord1[i]-coord2[i]) * (coord1[i]-coord2[i]);
18
19     return ans;
20 }
21
22 inline static int find_nearest_cluster(int      numClusters, /* no. clusters */
23                                       int      numCoords,    /* no. coordinates */
24                                       double * object,      /* [numCoords] */
25                                       double * clusters)   /* [numClusters][numCoords] */
26{
27     int index, i;
28     double dist, min_dist;
29
30     // find the cluster id that has min distance to object
31     index = 0;
32     min_dist = euclid_dist_2(numCoords, object, clusters);
33
34     for(i=1; i<numClusters; i++)
35         dist = euclid_dist_2(numCoords, object, &clusters[i*numCoords]);
36     // no need square root
37     if (dist < min_dist) { // find the min and its array index
38         min_dist = dist;
39         index = i;
40     }
41 }
42
43     return index;
44 }
45
46 void kmeans(double * objects,           /* in: [numObjs][numCoords] */
47             int      numCoords,        /* no. coordinates */
48             int      numObjs,          /* no. objects */
49             int      numClusters,       /* no. clusters */
50             double   threshold,        /* minimum fraction of objects that change membership */
51             long     loop_threshold,   /* maximum number of iterations */
52             int      * membership,     /* out: [numObjs] */
53             double   * clusters)       /* out: [numClusters][numCoords] */
54{
55     int i, j, k;
56     int index, loop=0;
57     double timing = 0;
58
59     double delta;           // fraction of objects whose clusters change in each loop
60     int * newClusterSize; // [numClusters]: no. objects assigned in each new cluster
61     double * newClusters; // [numClusters][numCoords]
62     int nthreads;           // no. threads
63
64     nthreads = omp_get_max_threads();
```

```

64  printf("OpenMP Kmeans - Reduction\t(number of threads: %d)\n", nthreads);
65
66 // initialize membership
67 for (i=0; i<numObjs; i++)
68     membership[i] = -1;
69
70 // initialize newClusterSize and newClusters to all 0
71 newClusterSize = (typeof(newClusterSize)) malloc(numClusters, sizeof(*newClusterSize));
72 newClusters = (typeof(newClusters)) malloc(numClusters * numCoords, sizeof(*newClusters));
73
74 // Each thread calculates new centers using a private space. After that, thread 0 does an
75 // array reduction on them.
76 int * local_newClusterSize[nthreads]; // [nthreads][numClusters]
77 double * local_newClusters[nthreads]; // [nthreads][numClusters][numCoords]
78
79 /*
80  * Hint for false-sharing
81  * This is noticed when numCoords is low (and neighboring local_newClusters exist close to
82  * each other).
83  * Allocate local cluster data with a "first-touch" policy.
84  */
85 // Initialize local (per-thread) arrays (and later collect result on global arrays)
86 for (k=0; k<nthreads; k++)
87 {
88     local_newClusterSize[k] = (typeof(*local_newClusterSize)) malloc(numClusters,
89     sizeof(**local_newClusterSize));
90     local_newClusters[k] = (typeof(*local_newClusters)) malloc(numClusters * numCoords,
91     sizeof(**local_newClusters));
92 }
93
94 timing = wtime();
95 do {
96     /* before each loop, set cluster data to 0
97     // #pragma omp parallel for private(i,j)
98     for (i=0; i<numClusters; i++) {
99         for (j=0; j<numCoords; j++)
100             newClusters[i*numCoords + j] = 0.0;
101         newClusterSize[i] = 0;
102     }
103
104     delta = 0.0;
105
106     /* TODO: Initiliaze local cluster data to zero (separate for each thread)
107     */
108
109     #pragma omp parallel for private(k, i, j) shared(local_newClusters, local_newClusterSize)
110     schedule(static)
111     for (k=0; k<nthreads; ++k){
112         for (i=0; i<numClusters; i++) {
113             for (j=0; j<numCoords; j++)
114                 local_newClusters[k][i*numCoords + j] = 0.0;
115             local_newClusterSize[k][i] = 0;
116         }
117     }
118
119     int thread_id;
120
121     #pragma omp parallel for private(i, j, thread_id, index) shared(local_newClusters,
122     local_newClusterSize) reduction(+:delta) schedule(static)
123     for (i=0; i<numObjs; i++)
124     {
125         thread_id = omp_get_thread_num();
126
127         // find the array index of nearest cluster center
128         index = find_nearest_cluster(numClusters, numCoords, &objects[i*numCoords], clusters);
129
130         // if membership changes, increase delta by 1
131         if (membership[i] != index)
132             delta += 1.0;
133
134         // assign the membership to object i
135         membership[i] = index;
136
137     }
138
139 }
```

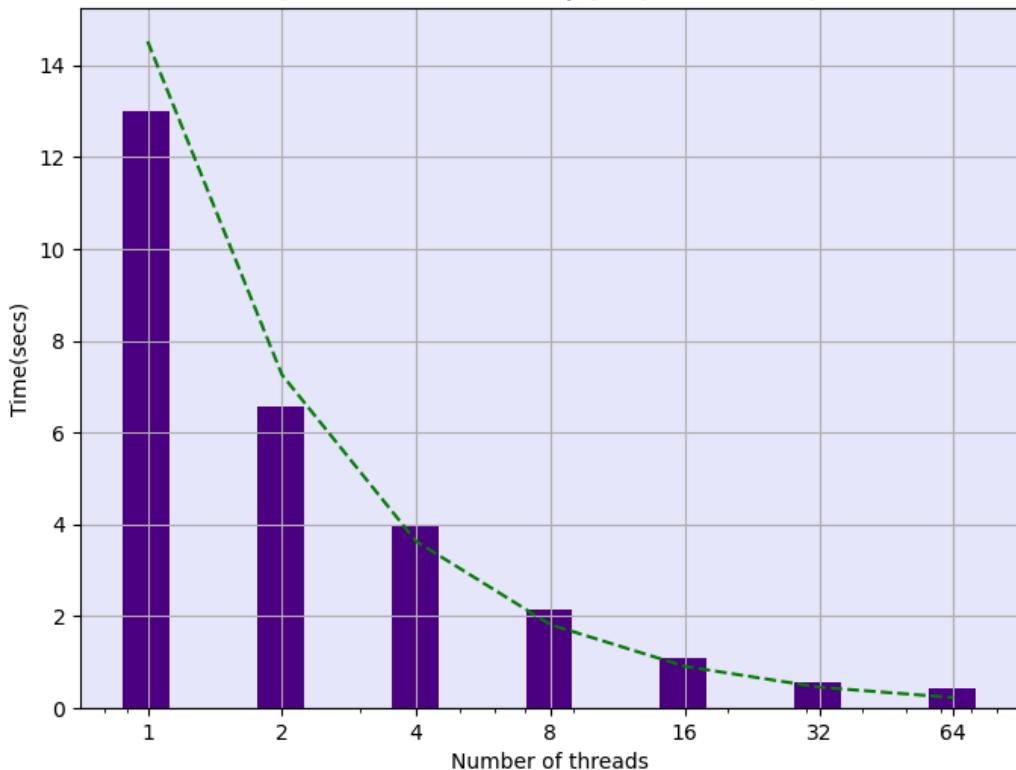
```

131     // update new cluster centers : sum of all objects located within (average will be
132     // performed later)
133     /*
134      * TODO: Collect cluster data in local arrays (local to each thread)
135      * Replace global arrays with local per-thread
136      */
137
138     local_newClusterSize[thread_id][index]++;
139     for (j=0; j<numCoords; j++)
140         local_newClusters[thread_id][index*numCoords + j] += objects[i*numCoords + j];
141 }
142 /*
143  * TODO: Reduction of cluster data from local arrays to shared.
144  * This operation will be performed by one thread
145 */
146
147 for (i=0; i<numClusters; ++i){
148     for (k=0; k<nthreads; ++k){
149         newClusterSize[i] += local_newClusterSize[k][i];
150         for (j=0; j<numCoords; ++j)
151             newClusters[i*numCoords+j] += local_newClusters[k][i*numCoords+j];
152     }
153 }
154
155
156 // average the sum and replace old cluster centers with newClusters
157 // #pragma omp parallel for private(i,j)
158 for (i=0; i<numClusters; i++) {
159     if (newClusterSize[i] > 0) {
160         for (j=0; j<numCoords; j++) {
161             clusters[i*numCoords + j] = newClusters[i*numCoords + j] / newClusterSize[i];
162         }
163     }
164 }
165
166 // Get fraction of objects whose membership changed during this loop. This is used as a
167 // convergence criterion.
168 delta /= numObjs;
169
170 loop++;
171 printf("\r\ntcompleted loop %d", loop);
172 fflush(stdout);
173 } while (delta > threshold && loop < loop_threshold);
174 timing = wtime() - timing;
175 printf("\n          nloops = %3d    (total = %7.4fs)  (per loop = %7.4fs)\n", loop, timing,
176 timing/loop);
177
178 for (k=0; k<nthreads; k++)
179 {
180     free(local_newClusterSize[k]);
181     free(local_newClusters[k]);
182 }
183 free(newClusters);
184 free(newClusterSize);
185 }
```

## Αποτελέσματα

Copied Clusters & Reduction

$\{Size, Coords, Clusters, Loops\} = \{256, 16, 32, 10\}$

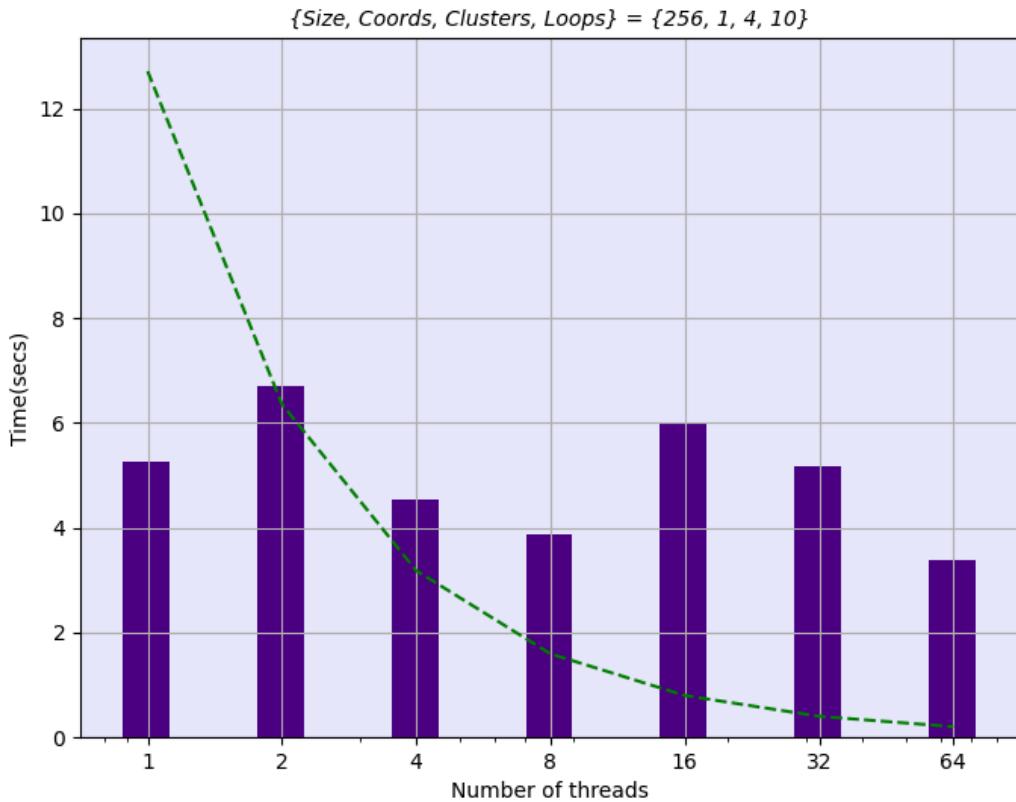


Παρατηρούμε τέλεια κλιμάκωση μέχρι και τα 32 νήματα και αρκετά καλή και στα 64 εφόσον δεν εισάγουμε overheads συγχρονισμού και η σειριακή ενοποίηση (reduction) δεν είναι computational intensive για να καθυστρεί τον αλγόριθμο.

## Δοκιμές με μικρότερο dataset

Τα αποτελέσματα δεν είναι ίδια για άλλα μεγέθη πινάκων. Συγκεκριμένα για το επόμενο configuration παρατηρούμε τα εξής:

## Copied Clusters & Reduction



Κυρίαρχο ρόλο για αυτήν την συμπεριφορά αποτελεί το φαινόμενο false sharing, που εμφανίζεται σε μικρά datasets (εδώ κάθε object έχει μόνο 1 συντεταγμένη!) όταν σε ένα cache line καταφέρνουν να χωρέσουν παραπάνω από 1 objects και σε κάθε εγγραφή γίνονται πάρα πολλά περιττά invalidations. Μια λύση είναι το padding όμως έχει memory overhead και δεν προτιμάται.

### First-touch Policy

Προς αποφυγή των παραπάνω εκμεταλλευόμαστε την πολιτική των linux κατά το mapping των virtual με physical addresses. Η δέσμευση φυσικής μνήμης πραγματοποιείται κατά την 1η εγγραφή του αντικειμένου (η calloc το εξασφαλίζει γράφοντας 0 ενώ η malloc όχι) οπότε εαν το κάθε νήμα γράψει ξεχωριστά στο κομμάτι του πίνακα που του αντιστοιχεί (ουσιαστικά παραλληλοποιώντας την αντιγραφή των shared πινάκων) θα απεικονιστεί στην μνήμη του αυτό και μόνο.

### Υλοποίηση

```
omp_reduction_kmeans.c

1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3 #include "kmeans.h"
4 /*
5  * TODO: include openmp header file
6  */
7
8 // square of Euclid distance between two multi-dimensional points
9 inline static double euclid_dist_2(int numdims, /* no. dimensions */
10                                 double * coord1, /* [numdims] */
11                                 double * coord2) /* [numdims] */
12 {
13     int i;
14     double ans = 0.0;
15 }
```

```

16     for(i=0; i<numdims; i++)
17         ans += (coord1[i]-coord2[i]) * (coord1[i]-coord2[i]);
18
19     return ans;
20 }
21
22 inline static int find_nearest_cluster(int      numClusters, /* no. clusters */
23                                         int      numCoords,   /* no. coordinates */
24                                         double * object,    /* [numCoords] */
25                                         double * clusters) /* [numClusters][numCoords] */
26 {
27     int index, i;
28     double dist, min_dist;
29
30     // find the cluster id that has min distance to object
31     index = 0;
32     min_dist = euclid_dist_2(numCoords, object, clusters);
33
34     for(i=1; i<numClusters; i++) {
35         dist = euclid_dist_2(numCoords, object, &clusters[i*numCoords]);
36         // no need square root
37         if (dist < min_dist) { // find the min and its array index
38             min_dist = dist;
39             index   = i;
40         }
41     }
42     return index;
43 }
44
45 void kmeans(double * objects,           /* in: [numObjs][numCoords] */
46             int      numCoords,        /* no. coordinates */
47             int      numObjs,          /* no. objects */
48             int      numClusters,       /* no. clusters */
49             double   threshold,        /* minimum fraction of objects that change membership */
50             long    loop_threshold,    /* maximum number of iterations */
51             int    * membership,       /* out: [numObjs] */
52             double  * clusters)        /* out: [numClusters][numCoords] */
53 {
54     int i, j, k;
55     int index, loop=0;
56     double timing = 0;
57
58     double delta;           // fraction of objects whose clusters change in each loop
59     int * newClusterSize; // [numClusters]: no. objects assigned in each new cluster
60     double * newClusters; // [numClusters][numCoords]
61     int nthreads;          // no. threads
62
63     nthreads = omp_get_max_threads();
64     printf("OpenMP Kmeans - Reduction\t(number of threads: %d)\n", nthreads);
65
66     // initialize membership
67     for (i=0; i<numObjs; i++)
68         membership[i] = -1;
69
70     // initialize newClusterSize and newClusters to all 0
71     newClusterSize = (typeof(newClusterSize)) calloc(numClusters, sizeof(*newClusterSize));
72     newClusters = (typeof(newClusters))  calloc(numClusters * numCoords, sizeof(*newClusters));
73
74     // Each thread calculates new centers using a private space. After that, thread 0 does an
75     // array reduction on them.
76     int * local_newClusterSize[nthreads]; // [nthreads][numClusters]
77     double * local_newClusters[nthreads]; // [nthreads][numClusters][numCoords]
78
79     /*
80      * Hint for false-sharing
81      * This is noticed when numCoords is low (and neighboring local_newClusters exist close to
82      * each other).
83      * Allocate local cluster data with a "first-touch" policy.
84      */
85
86     timing = wtime();
87     do {
88         // before each loop, set cluster data to 0
89         for (i=0; i<numClusters; i++) {
90             for (j=0; j<numCoords; j++)

```

```

89         newClusters[i*numCoords + j] = 0.0;
90         newClusterSize[i] = 0;
91     }
92
93     delta = 0.0;
94
95     /*
96      * TODO: Initiliaze local cluster data to zero (separate for each thread)
97      */
98
99     #pragma omp parallel for private(k,i,j) schedule(static)
100    for (k=0; k<nthreads; ++k){
101        local_newClusterSize[k] = (typeof(*local_newClusterSize)) calloc(numClusters,
102        sizeof(**local_newClusterSize));
103        local_newClusters[k] = (typeof(*local_newClusters)) calloc(numClusters * numCoords,
104        sizeof(**local_newClusters));
105
106        for (i=0; i<numClusters; i++) {
107            for (j=0; j<numCoords; j++)
108                local_newClusters[k][i*numCoords + j] = 0.0;
109                local_newClusterSize[k][i] = 0;
110        }
111    int thread_id;
112
113    #pragma omp parallel for private(i, j, thread_id, index) shared(local_newClusters,
114    local_newClusterSize) reduction(+:delta) schedule(static)
115    for (i=0; i<numObjs; i++)
116    {
117        thread_id = omp_get_thread_num();
118
119        // find the array index of nearest cluster center
120        index = find_nearest_cluster(numClusters, numCoords, &objects[i*numCoords], clusters);
121
122        // if membership changes, increase delta by 1
123        if (membership[i] != index)
124            delta += 1.0;
125
126        // assign the membership to object i
127        membership[i] = index;
128
129        // update new cluster centers : sum of all objects located within (average will be
130        // performed later)
131
132        local_newClusterSize[thread_id][index]++;
133        for (j=0; j<numCoords; j++)
134            local_newClusters[thread_id][index*numCoords + j] += objects[i*numCoords + j];
135    }
136
137    for (i=0; i<numClusters; ++i){
138        for (k=0; k<nthreads; ++k){
139            newClusterSize[i] += local_newClusterSize[k][i];
140            for (j=0; j<numCoords; ++j)
141                newClusters[i*numCoords+j] += local_newClusters[k][i*numCoords+j];
142        }
143
144        for (i=0; i<numClusters; i++) {
145            if (newClusterSize[i] > 0) {
146                for (j=0; j<numCoords; j++) {
147                    clusters[i*numCoords + j] = newClusters[i*numCoords + j] / newClusterSize[i];
148                }
149            }
150        }
151        delta /= numObjs;
152
153        loop++;
154        printf("\r\tcompleted loop %d", loop);
155        fflush(stdout);
156    } while (delta > threshold && loop < loop_threshold);
157    timing = wtime() - timing;

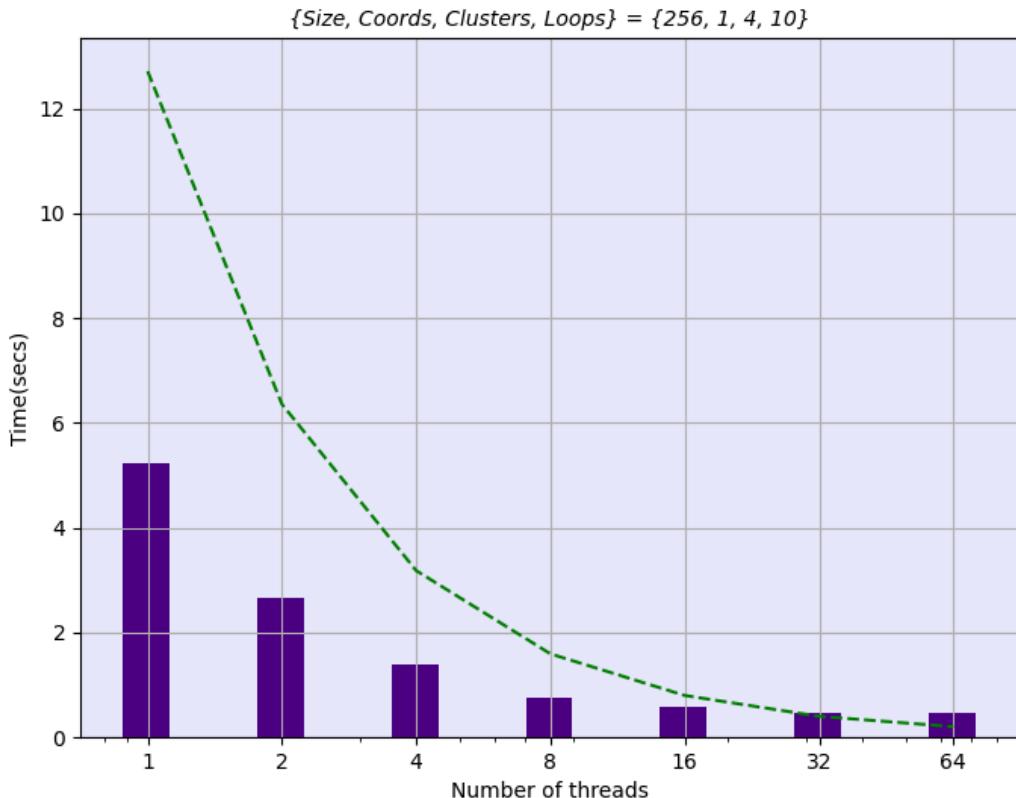
```

```

158     printf("\n          nloops = %3d    (total = %7.4fs)  (per loop = %7.4fs)\n", loop, timing,
159     timing/loop);
160
161     for (k=0; k<nthreads; k++)
162     {
163         free(local_newClusterSize[k]);
164         free(local_newClusters[k]);
165     }
166     free(newClusters);
167     free(newClusterSize);
168 }
```

## Αποτελέσματα

Copied Clusters & Reduction with First-Touch Policy



Υπάρχει σαφής βελτίωση και καλή κλιμάκωση μέχρι τα 32 νήματα ακόμα και σε σχέση με την ιδανική εκτέλεση του σειριακού αλγορίθμου. Ο καλύτερος χρόνος σε αυτό το ερώτημα είναι 0.4605s στα 32 νήματα!

## Numa-aware initialization

Με βάση όσα αναφέρθηκαν για το pinning σε cores και την πολιτική first-touch η αρχικοποίηση των shared πινάκων μπορεί να γίνει και αυτή ατομικά από κάθε νήμα σε ένα private τμήμα αυτού. Για την υλοποίηση προσθέτουμε το omp parallel for directive με στατική δρομολόγηση. Αυτή είναι απαραίτητη ώστε τα νήματα που θα βάλουν τους τυχαίους αριθμούς στα objects να είναι τα ίδια νήματα με αυτά που θα τα επεξεργαστούν στην main.c με σκοπό να είναι ήδη στις caches και να μην χρειάζεται να τα μεταφέρουν από την κύρια μνήμη ή από άλλα νήματα.

## Υλοποίηση

Τροποποιούμε το file\_io.c που δίνεται :

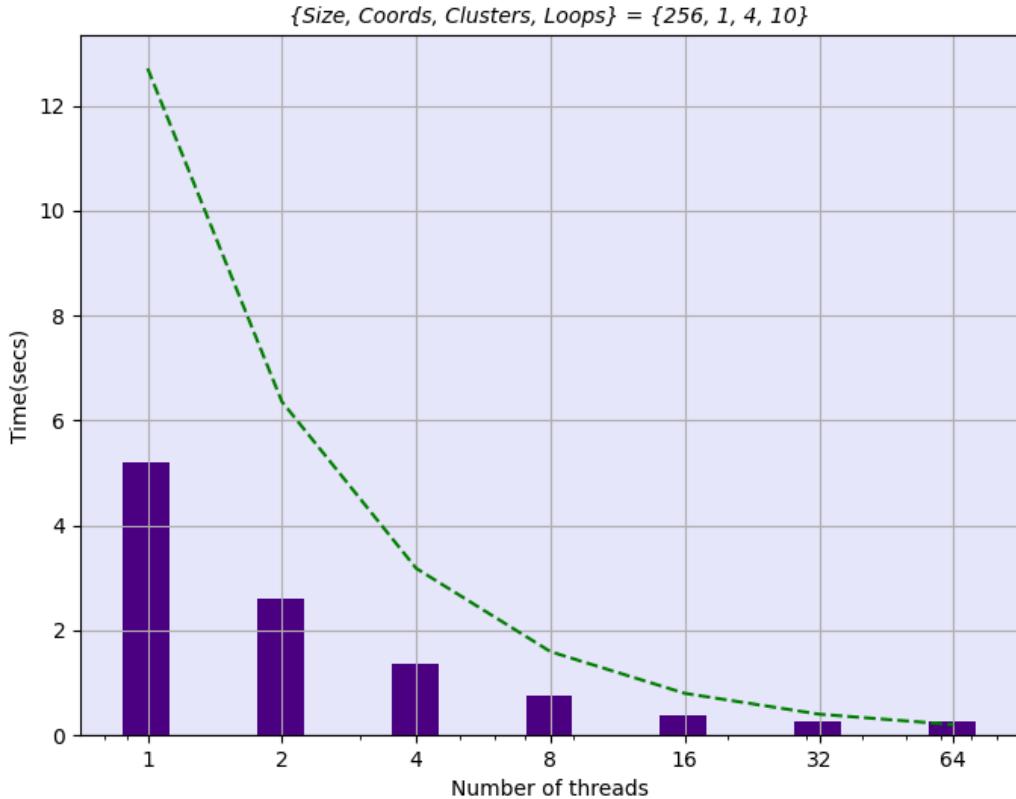
### file\_io.c

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3 #include <string.h>      /* strtok() */
4 #include <sys/types.h>    /* open() */
5 #include <sys/stat.h>
6 #include <fcntl.h>
7 #include <unistd.h>       /* read(), close() */
8 // TODO: remove comment from following line
9 #include <omp.h>
10
11 #include "kmeans.h"
12
13 double * dataset_generation(int numObjs, int numCoords)
14 {
15     double * objects = NULL;
16     long i, j;
17     // Random values that will be generated will be between 0 and 10.
18     double val_range = 10;
19
20     /* allocate space for objects[][] and read all objects */
21     objects = (typeof(objects)) malloc(numObjs * numCoords * sizeof(*objects));
22
23     /*
24      * Hint : Could dataset generation be performed in a more "NUMA-Aware" way?
25      *         Need to place data "close" to the threads that will perform operations on them.
26      *         reminder : First-touch data placement policy
27     */
28     int nthreads = omp_get_max_threads();
29     int chunk = numObjs / nthreads;
30     int thread_id, start_offs, end_offs;
31
32     #pragma omp parallel private(i, j, thread_id, start_offs, end_offs) shared(nthreads, chunk,
33     objects, numObjs, numCoords, val_range)
34     {
35         //set the binding to cores manually
36
37         thread_id = omp_get_thread_num();
38         start_offs = thread_id * chunk;
39         end_offs = (thread_id == nthreads-1) ? numObjs : start_offs + chunk;
40
41         for (i=start_offs; i<end_offs; i++)
42         {
43             unsigned int seed = i;
44             for (j=0; j <numCoords; j++)
45             {
46                 objects[i*numCoords + j] = (rand_r(&seed) / ((double) RAND_MAX)) * val_range;
47                 if (_debug && i == 0)
48                     printf("object[i=%ld][j=%ld]=%f\n", i, j, objects[i*numCoords + j]);
49             }
50         }
51     }
52     return objects;
53 }
```

)

## Αποτελέσματα

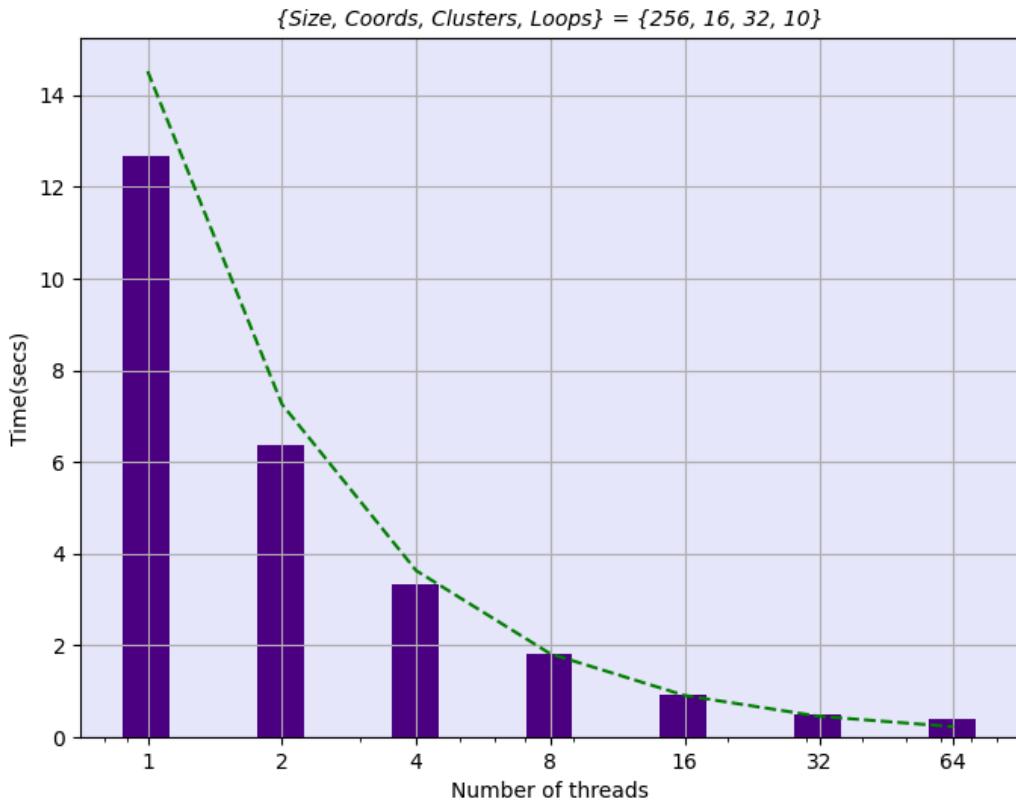
Copied Clusters & Reduction with First-Touch Policy & NUMA-aware initialization



Παρατηρούμε καλύτερη κλιμάκωση μέχρι τα 32 νήματα με χρόνο 0.2667s! Το κυρίαρχο bottleneck σε αυτήν την περίπτωση είναι το overhead της δημιουργίας των νημάτων.

Τέλος με όλες τις προηγούμενες αλλαγές δοκιμάζουμε ξανά το μεγάλο dataset που είχαμε στην αρχή:

### Copied Clusters & Reduction with First-Touch Policy & NUMA-aware initialization



Παρατηρούμε πως υπάρχει τέλεια κλιμάκωση του αλγορίθμου. Οπότε bottleneck θα μπορούσε να θεωρηθεί το computive intensity για κάθε object.

# FLOYD WARSHALL

## 1) Recursive

### Υλοποίηση

Δημιουργούμε ένα παράλληλο section κατά την πρώτη κλήση αφού έχουμε ενεργοποιήσει την επιλογή για nested tasks μέσω της `omp_set_nested(1)`. (**Μπορούμε να το θέσουμε και ως environmental variable (OMP\_NESTED=TRUE, OMP\_MAX\_ACTIVE\_LEVELS=64)**) Για την διατήρηση των εξαρτήσεων κατά τον υπολογισμό των blocks (A11) -> (A12 A21) -> A22 και αντιστρόφως τοποθετούμε κατάλληλα barriers έμμεσα με τα taskwait directives.

```
fw_sr.c

1  /*
2   * Recursive implementation of the Floyd-Warshall algorithm.
3   * command line arguments: N, B
4   * N = size of graph
5   * B = size of submatrix when recursion stops
6   * works only for N, B = 2^k
7   */
8
9  #include <stdio.h>
10 #include <stdlib.h>
11 #include <sys/time.h>
12 #include "util.h"
13 #include <omp.h>
14
15 inline int min(int a, int b);
16 void FW_SR (int **A, int arow, int acol,
17             int **B, int brow, int bcol,
18             int **C, int crow, int ccol,
19             int myN, int bsize);
20
21 int main(int argc, char **argv)
22 {
23     int **A;
24     int i,j;
25     struct timeval t1, t2;
26     double time;
27     int B=16;
28     int N=1024;
29
30     if (argc !=3){
31         fprintf(stdout, "Usage %s N B \n", argv[0]);
32         exit(0);
33     }
34
35     N=atoi(argv[1]);
36     B=atoi(argv[2]);
37
38     A = (int **) malloc(N*sizeof(int *));
39     for(i=0; i<N; i++) A[i] = (int *) malloc(N*sizeof(int));
40
41     graph_init_random(A,-1,N,128*N);
42     //enable nested task generation
43     omp_set_nested(1);
44     // default is equal to 1
45     omp_set_max_active_levels(64);
46
47     gettimeofday(&t1,0);
48
49     #pragma omp parallel
50     {
51         #pragma omp single
52         {
53             FW_SR(A,0,0, A,0,0,A,0,0,N,B);
54         }
55     }
56     gettimeofday(&t2,0);
```

```

57     time=(double)((t2.tv_sec-t1.tv_sec)*1000000+t2.tv_usec-t1.tv_usec)/1000000;
58     printf("FW_SR,%d,%d,.4f\n", N, B, time);
59
60     /*
61      for(i=0; i<N; i++)
62        for(j=0; j<N; j++) fprintf(stdout,"%d\n", A[i][j]);
63     */
64
65     return 0;
66 }
67
68
69 inline int min(int a, int b)
70 {
71     if(a<=b) return a;
72     else return b;
73 }
74
75 void FW_SR (int **A, int arow, int acol,
76             int **B, int brow, int bcol,
77             int **C, int crow, int ccol,
78             int myN, int bsize)
79 {
80     int k,i,j;
81
82     /*
83      * The base case (when recursion stops) is not allowed to be edited!
84      * What you can do is try different block sizes.
85     */
86
87     if(myN<=bsize)
88         for(k=0; k<myN; k++)
89             for(i=0; i<myN; i++)
90                 for(j=0; j<myN; j++)
91                     A[arow+i][acol+j]=min(A[arow+i][acol+j], B[brow+i][bcol+k]+C[crow+k][ccol+j]);
92     else {
93
94         FW_SR(A,arow, acol,B,brow, bcol,C,crow, ccol, myN/2, bsize); // A00
95         #pragma omp task
96         FW_SR(A,arow, acol+myN/2,B,brow, bcol,C,crow, ccol+myN/2, myN/2, bsize); //A01
97         #pragma omp task
98         FW_SR(A,arow+myN/2, acol,B,brow+myN/2, bcol,C,crow, ccol, myN/2, bsize); //A10
99         #pragma omp taskwait
100        FW_SR(A,arow+myN/2, acol+myN/2,B,brow+myN/2, bcol,C,crow, ccol+myN/2, myN/2, bsize); //
101        A11
102        FW_SR(A,arow+myN/2, acol+myN/2,B,brow+myN/2, bcol+myN/2,C,crow+myN/2, ccol+myN/2, myN/2,
103              bsize); //A11
104        #pragma omp task
105        FW_SR(A,arow+myN/2, acol,B,brow+myN/2, bcol+myN/2,C,crow+myN/2, ccol, myN/2, bsize); //A10
106        #pragma omp task
107        FW_SR(A,arow, acol+myN/2,B,brow, bcol+myN/2,C,crow+myN/2, ccol+myN/2, myN/2, bsize); //A01
108    }
109    // printf("Nested parallelism enabled: %d\n", omp_get_nested());
110 }

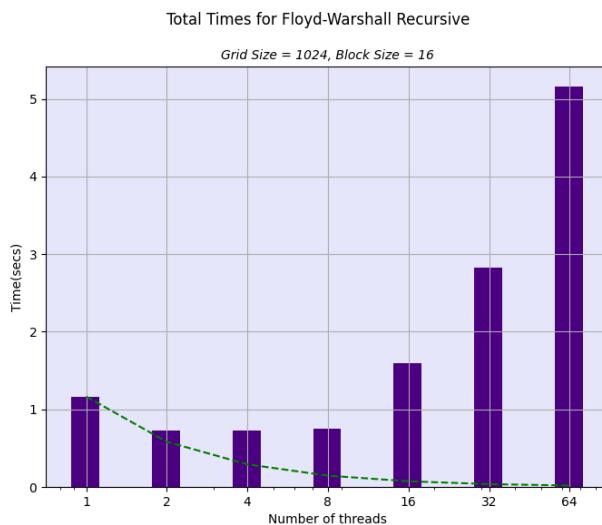
```

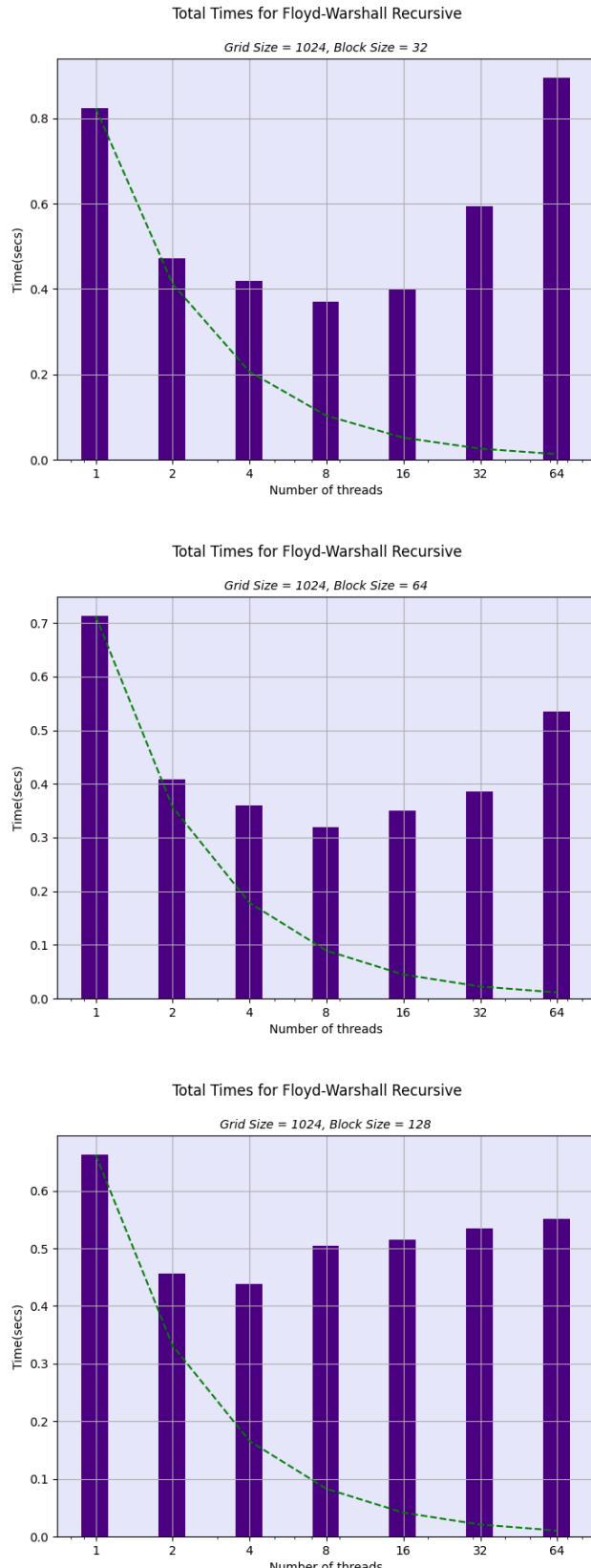
Πειραματιστήκαμε σχετικά με την βέλτιστη τιμή του BSIZE τρέχοντας τις προσομοιώσεις που ακολουθούν. Διαισθητικά η optimal τιμή οφείλει να εκμεταλλεύεται πλήρως το cache size και δεδομένου ότι έχουμε τετράγωνο grid για 1 recursive call που δημιουργεί 4 sub-blocks μεγέθους  $B$  θα είναι  $B_{opt} = \text{sqrt}(\text{cache size})$ . Για τα πειράματα χρησιμοποιήσαμε το ακόλουθο script:

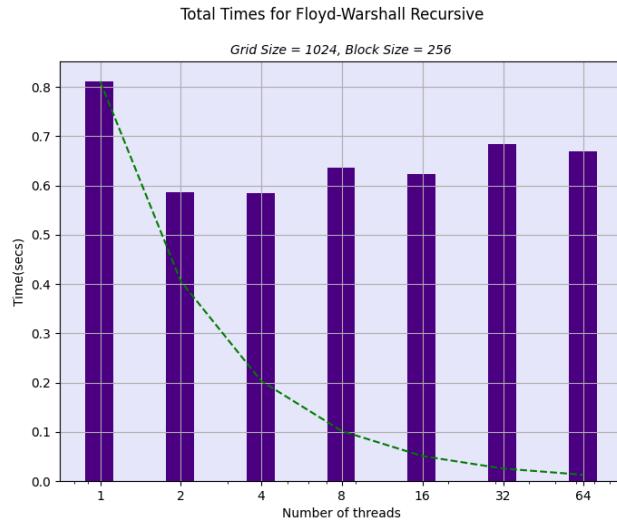
```
#!/bin/bash
## Give the Job a descriptive name #PBS -N run_fw
## Output and error files #PBS -o run_fw_recursive.out #PBS -e run_fw_recursive.err
## How many machines should we get? #PBS -l nodes=1:ppn=8
## How long should the job run for? #PBS -l walltime=00:10:00
## Start
## Run make in the src folder (modify properly)
module load openmp/1.8.3
cd /home/parallel/parlab09/a2/Fw
./fw $SIZE
export OMP_NESTED=TRUE
export OMP_MAX_ACTIVE_LEVELS=64
for SIZE in 1024 2048 4096; do
    for BSIZE in 16 32 64 128 256; do
        echo -e "\nBSIZE=${BSIZE}\n"
        for n in 1 2 4 8 16 32 64; do
            export OMP_NUM_THREADS=${n}
            echo -e "\nNumber of threads: ${n}"
            ./fw_sr $SIZE $BSIZE
        done
    done
done
```

## Αποτελέσματα

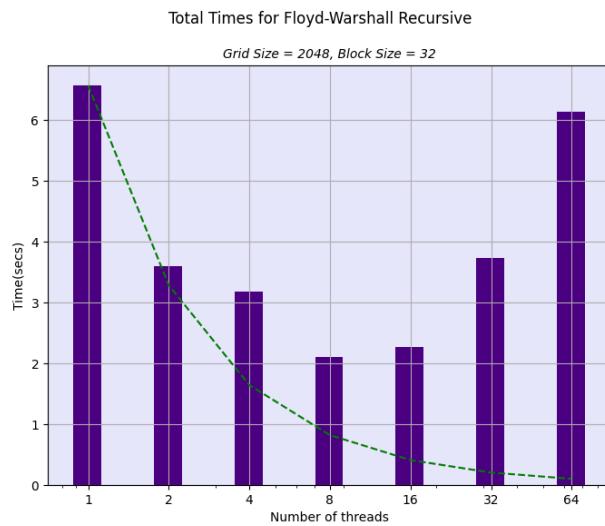
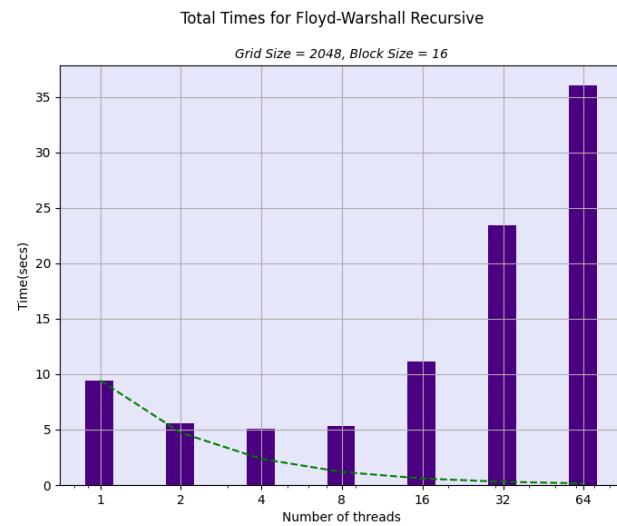
$$\{N = 1024\}$$





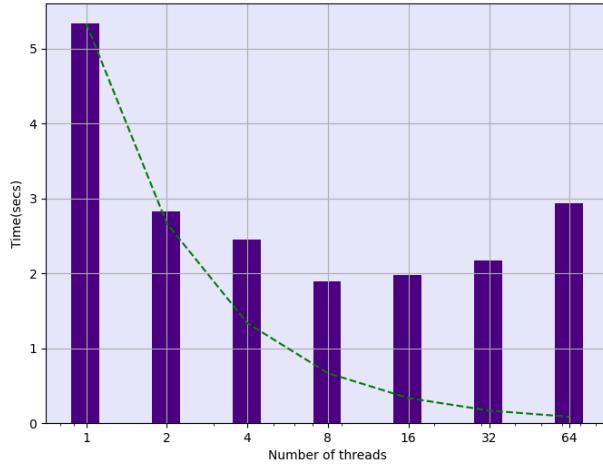


**{N = 2048}**



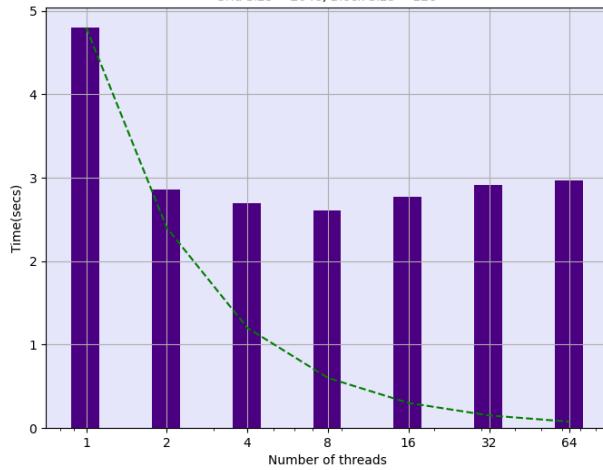
Total Times for Floyd-Warshall Recursive

Grid Size = 2048, Block Size = 64



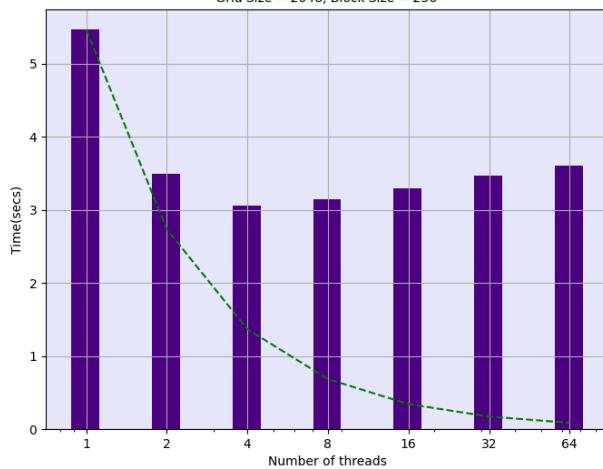
Total Times for Floyd-Warshall Recursive

Grid Size = 2048, Block Size = 128

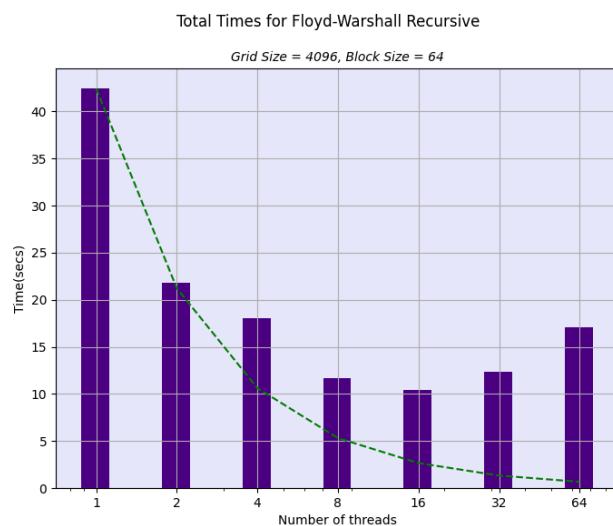
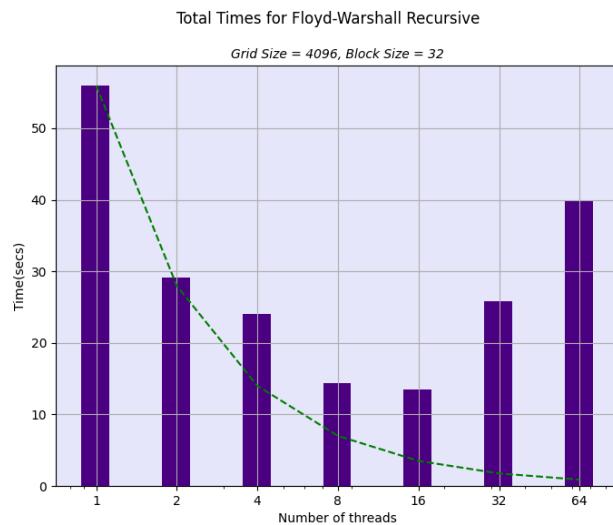
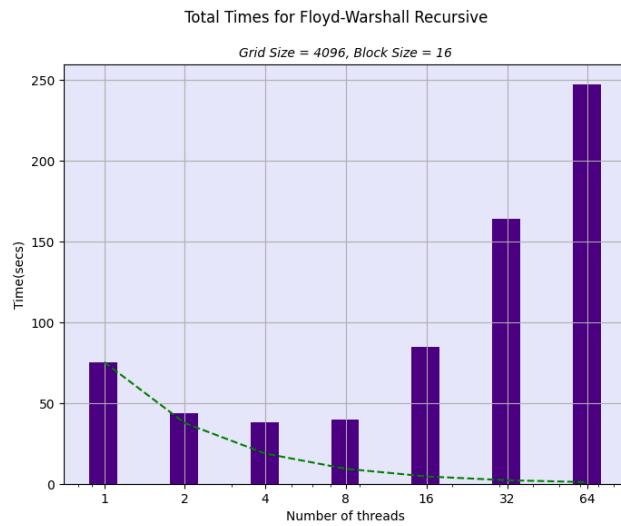


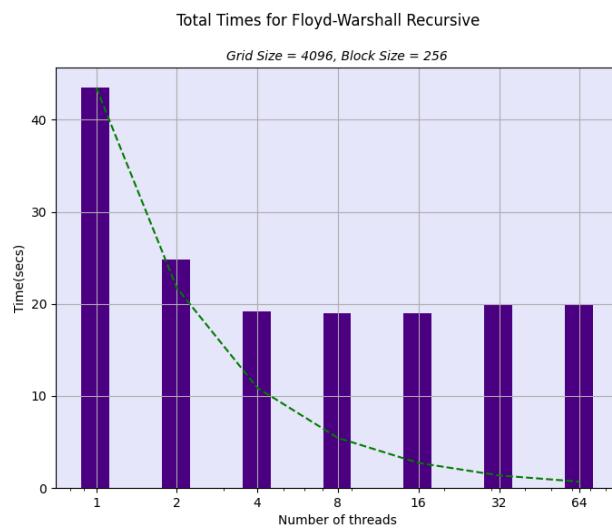
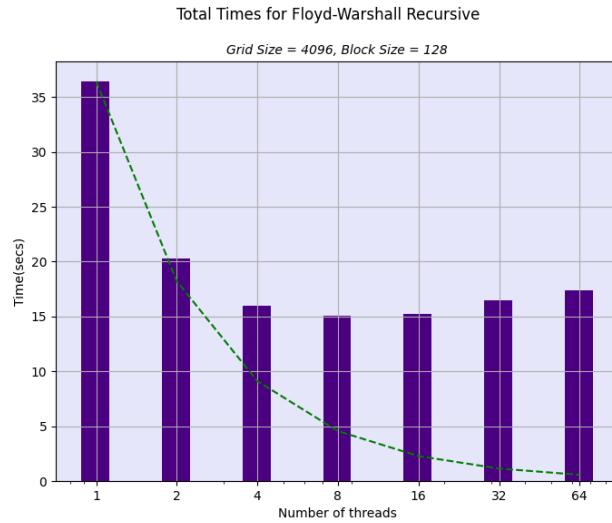
Total Times for Floyd-Warshall Recursive

Grid Size = 2048, Block Size = 256



$$\{ N = 4096 \}$$





Καταλήξαμε πως η ιδανική τιμή είναι  $B=64$  και ο καλύτερος χρόνος που πετύχαμε χρησιμοποιώντας αυτήν για 4096 μέγεθος πίνακα ήταν 10.4486 με 16 threads. Από το σημείο αυτό και έπειτα ο αλγόριθμος δεν κλιμακώνει και φανερώνει την αδυναμία του χάρη στην αναδρομή.

## 2) TILED

### Υλοποίηση

Φτιάχνουμε 1 παράλληλο section με κατάλληλα barriers ώστε να υπολογίζεται πρώτα (single) το κοστό στοιχείο στην διαγώνιο, έπειτα όσα βρίσκονται κατά μήκος του “σταυρού” που σχηματίζεται εκατέρωθεν αυτού, και τέλος τα blocks στοιχείων που απομένουν. Καθένα από τα στάδια 2 και 3 έχει 4 for loops που μπορούν να παραλληλοποιηθούν με parallel for και επειδή είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους με παράμετρο nowait. Το collapse(2) πραγματοποιεί flattening για καλύτερη λειτουργία του parallel for για nested loops. Με χρήση μόνο των παραπάνω επιτυγχάνουμε χρόνο εκτέλεσης 2.2 secs.

Για περαιτέρω βελτίωση επιχειρήσαμε να χρησιμοποιήσουμε SIMD εντολές αρχικά μέσω του OpenMP με το αντίστοιχο directive και στην συνέχεια γράφοντας χειροκίνητα τις intrinsics εντολές για AVX μοντέλο που υποστηρίζει 4-size vector operations καθώς διαπιστώσαμε ότι vector operations μεγαλύτερου μεγέθους (π.χ με 8 στοιχεία AVX2) δεν υποστηρίζεται στο εν λόγω μηχάνημα και λαμβάνουμε σφάλμα Illegal hardware instruction. Στην πρώτη εκδοχή λάβαμε συνολικό χρόνο εκτέλεσης 1.7secs.

Η χρήση των intrinsics απευθείας μας δίνει την δυνατότητα να εκμεταλλευτούμε πλήρως και την αρχιτεκτονική της κρυφής μνήμης μέσω loop unrolling. Συγκεκριμένα, αναγνωρίσαμε ότι το size του cacheline είναι 64bytes, συνεπώς χωράνε 16 integers, ή 4 vectors 4άδων σε όρους AVX. Άρα επιτυγχάνουμε μέγιστο locality exploitation κάνοντας unroll με παράγοντα 4 και αυξάνοντας το j κατά 16 σε κάθε iteration. Ακόμη, παρατηρούμε ότι τα στοιχεία A[i][k] είναι ανεξάρτητα του j και η φόρτωση αυτών των vectors μπορεί να γίνει στο εξωτερικό loop. Ο καλύτερος χρόνος εκτέλεσης που επιτύχαμε με αυτήν την εκδοχή είναι **1.39 secs!**

```
fw_smd.c

1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3 #include <sys/time.h>
4 #include <immintrin.h> // For SSE2 intrinsics
5 #include <omp.h>
6
7 inline void FW(int **A, int K, int I, int J, int B);
8
9 int main(int argc, char **argv)
10 {
11     int **A;
12     int i, j, k;
13     struct timeval t1, t2;
14     double time;
15     int B = 64;
16     int N = 1024;
17
18     if (argc != 3) {
19         fprintf(stdout, "Usage %s N B\n", argv[0]);
20         exit(0);
21     }
22
23     N = atoi(argv[1]);
24     B = atoi(argv[2]);
25
26     // Allocate memory for A with 32-byte alignment
27     posix_memalign((void**)&A, 32, N * sizeof(int*));
28     for (i = 0; i < N; ++i) {
29         posix_memalign((void**)&A[i], 32, N * sizeof(int));
30     }
31
32     // Initialize the graph with random values
33     graph_init_random(A, -1, N, 128 * N);
34
35     // Start timer
36     gettimeofday(&t1, 0);
37 }
```

```

38 // Main loop of the Floyd-Warshall algorithm with tiling
39 for (k = 0; k < N; k += B) {
40     #pragma omp parallel
41     {
42         #pragma omp single
43         {
44             FW(A, k, k, k, B);
45         }
46         #pragma omp for nowait
47         for (i = 0; i < k; i += B)
48             FW(A, k, i, k, B);
49
50         #pragma omp for nowait
51         for (i = k + B; i < N; i += B)
52             FW(A, k, i, k, B);
53
54         #pragma omp for nowait
55         for (j = 0; j < k; j += B)
56             FW(A, k, k, j, B);
57
58         #pragma omp for nowait
59         for (j = k + B; j < N; j += B)
60             FW(A, k, k, j, B);
61
62         #pragma omp barrier
63
64         #pragma omp for collapse(2) nowait
65         for (i = 0; i < k; i += B)
66             for (j = 0; j < k; j += B)
67                 FW(A, k, i, j, B);
68
69         #pragma omp for collapse(2) nowait
70         for (i = 0; i < k; i += B)
71             for (j = k + B; j < N; j += B)
72                 FW(A, k, i, j, B);
73
74         #pragma omp for collapse(2) nowait
75         for (i = k + B; i < N; i += B)
76             for (j = 0; j < k; j += B)
77                 FW(A, k, i, j, B);
78
79         #pragma omp for collapse(2) nowait
80         for (i = k + B; i < N; i += B)
81             for (j = k + B; j < N; j += B)
82                 FW(A, k, i, j, B);
83
84         #pragma omp barrier
85     }
86 }
87
88 // Stop timer and calculate execution time
89 gettimeofday(&t2, 0);
90 time = (double)((t2.tv_sec - t1.tv_sec) * 1000000 + t2.tv_usec - t1.tv_usec) / 1000000;
91 fprintf(stdout, "FW_TILED,%d,%d,%f\n", N, B, time);
92
93 // Free the memory
94 for (i = 0; i < N; i++) {
95     _mm_free(A[i]); // Free each row
96 }
97 _mm_free(A); // Free the pointer array
98
99 return 0;
100}
101
102 inline void FW(int **A, int K, int I, int J, int B)
103 {
104     int i, j, k;
105
106     // Iterate over a block of tiles (3D loop over the block)
107     for (k = K; k < K + B; k++) {
108         for (i = I; i < I + B; i++) {
109             // _mm_prefetch((const char*)&A[i][j], _MM_HINT_T0);
110             // _mm_prefetch((const char*)&A[k][j], _MM_HINT_T0);
111             // _mm_prefetch((const char*)&A[i][j + 16], _MM_HINT_T0);
112             // _mm_prefetch((const char*)&A[k][j + 16], _MM_HINT_T0);

```

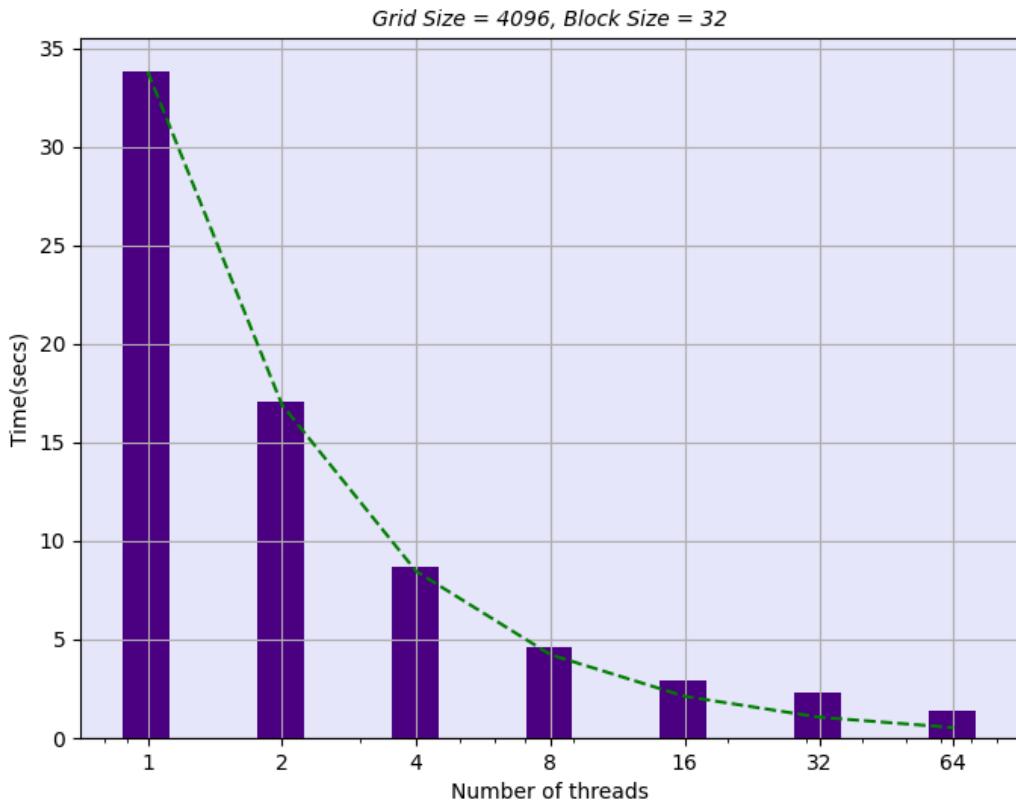
```

114     __m128i A_i_k = _mm_load_si128((__m128i*)&A[i][k]);
115
116     for (j = J; j < J + B; j+=16){
117
118         __m128i A_i_j = _mm_load_si128((__m128i*)&A[i][j]);
119         __m128i A_k_j = _mm_load_si128((__m128i*)&A[k][j]);
120
121         __m128i A_plus = _mm_add_epi32(A_i_k, A_k_j);
122         __m128i result = _mm_min_epi32(A_i_j, A_plus);
123
124         _mm_store_si128((__m128i*)&A[i][j], result);
125
126         // next chunk
127         A_i_j = _mm_load_si128((__m128i*)&A[i][j+4]);
128         A_k_j = _mm_load_si128((__m128i*)&A[k][j+4]);
129
130         A_plus = _mm_add_epi32(A_i_k, A_k_j);
131         result = _mm_min_epi32(A_i_j, A_plus);
132
133         _mm_store_si128((__m128i*)&A[i][j+4], result);
134
135         //next chunk
136         A_i_j = _mm_load_si128((__m128i*)&A[i][j+8]);
137         A_k_j = _mm_load_si128((__m128i*)&A[k][j+8]);
138
139         A_plus = _mm_add_epi32(A_i_k, A_k_j);
140         result = _mm_min_epi32(A_i_j, A_plus);
141
142         _mm_store_si128((__m128i*)&A[i][j+8], result);
143
144         //next chunk
145         A_i_j = _mm_load_si128((__m128i*)&A[i][j+12]);
146         A_k_j = _mm_load_si128((__m128i*)&A[k][j+12]);
147
148         A_plus = _mm_add_epi32(A_i_k, A_k_j);
149         result = _mm_min_epi32(A_i_j, A_plus);
150
151         _mm_store_si128((__m128i*)&A[i][j+12], result);
152
153         // if(j == J)
154         //     _mm_prefetch((const char*)&A[i+1][k], _MM_HINT_T0);
155     }
156 }
157 }
158 // if (k + 1 < K + B) {
159 //     _mm_prefetch((const char*)&A[i][k + 1], _MM_HINT_T0);
160 // }
161 }
162 }

```

## Αποτελέσματα

Total Times for Floyd-Warshall Tiled



Παραθέτουμε αναλυτικά και τους βέλτιστους χρόνους:

Number of threads: 1

FW\_TILED,4096,32,33.8411

Number of threads: 2

FW\_TILED,4096,32,17.0405

Number of threads: 4

FW\_TILED,4096,32,8.7231

Number of threads: 8

FW\_TILED,4096,32,4.5795

Number of threads: 16

FW\_TILED,4096,32,2.9022

Number of threads: 32

FW\_TILED,4096,32,2.3016

Number of threads: 64

FW\_TILED,4096,32,1.3925

## Παράρτημα

Για την δημιουργία των γραφικών παραστάσεων χρημιοποιηθηκαν οι εξής κώδικες σε Python :

results.py

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 #import pandas
4 import re
5
6 regex_total = r"\(total\s*=\s*([\d.]+)\s\)"
7 regex_loop = r"\(per\s+loop\s*=\s*([\d.]+)\s\)"
8
9 total_times = []
10 loop_times = []
11
12 with open("results.txt", 'r') as file:
13     for line in file:
14         match_total = re.search(regex_total, line)
15         match_loop = re.search(regex_loop, line)
16         if (match_total is not None and match_loop is not None):
17             total_times.append(float(match_total.group(1)))
18             loop_times.append(float(match_loop.group(1)))
19
20
21 seq_totals = total_times[0:2]
22 seq_loop = loop_times[0:2]
23
24 total_times = total_times[2::]
25 loop_times = loop_times[2::]
26
27 print("Sequential Times: ", seq_totals, seq_loop)
28 print("Total Times:", total_times)
29 print("Loop Times:", loop_times)
30
31 threads = [1,2,4,8,16,32,64]
32 nthreads = len(threads)
33 titles = ["Shared Clusters (naive)",
34           "Shared Clusters with GOMP_CPU_AFFINITY set",
35           "Copied Clusters & Reduction",
36           "Copied Clusters & Reduction",
37           "Copied Clusters & Reduction with First-Touch Policy",
38           "Copied Clusters & Reduction with First-Touch Policy & NUMA-aware initialization",
39           "Copied Clusters & Reduction with First-Touch Policy & NUMA-aware initialization",
40           "Shared Clusters with GOMP_CPU_AFFINITY[0-7][32-40]"]
41
42 subtitles = [{"Size, Coords, Clusters, Loops} = {256, 16, 32, 10}",
43               "{Size, Coords, Clusters, Loops} = {256, 1, 4, 10}",
44               "{Size, Coords, Clusters, Loops} = {256, 16, 32, 10}"]
45
46 for i in range(0,8):
47     x_axis = threads
48     y_axis = total_times[i*nthreads:i*nthreads+nthreads]
49     if (i==3 or i==4 or i==5) : seq_time = seq_totals[1]
50     else: seq_time = seq_totals[0]
51     print(f"Times for version{i}: ", y_axis)
52     plt.figure(figsize=(8,6))
53     plt.gca().set_facecolor("#e6e6fa")
54     plt.xscale('log')
55     widths = 0.6*np.diff(threads, prepend=threads[0] / 2) * 0.8
56     plt.bar(x_axis, y_axis, width=widths, color="#4b0082", align="center")
57     plt.xticks(x_axis, [str(t) for t in threads])
58     plt.plot(x_axis, [seq_time/t for t in threads], color ='g', linestyle='--')
59     plt.suptitle(titles[i], size = 12)
60     plt.title(subtitles[int(i/3)], fontstyle = 'oblique', size = 10)
61     plt.xlabel("Number of threads")
62     plt.ylabel("Time(secs)")
63     plt.grid('y')
64     plt.savefig(f"fig{i}.png")
65     plt.clf()
```

### plots.py

```
1 # import seaborn as sns
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 #import pandas
5
6
7 total_times = []
8 loop_times = []
9
10 with open("sandman.out", 'r') as file:
11     for line in file:
12         if (line.startswith("omp_num_threads")):
13             t = float(line.split(',')[-1])
14             if (t is not None):
15                 total_times.append(t)
16
17
18 print("Total Times:", total_times)
19 print("Loop Times:", loop_times)
20
21 threads = [1,2,4,8,16,32,64]
22 GridSize = [1024, 2048, 4096]
23 BSizes = [256, 128, 64, 32, 16]
24 nthreads = len(threads)
25
26 for grid in range (0,len(GridSize)):
27     for bsize in range(0,len(BSizes)):
28         start_idx = grid*(nthreads*len(BSizes)) + nthreads*bsize
29         end_idx = start_idx + nthreads
30         x_axis = threads
31         y_axis = total_times[start_idx:end_idx]
32         print(f"Times for S={GridSize[grid]}, BS={BSizes[bsize]}: ", y_axis)
33         plt.figure(figsize=(8,6))
34         plt.gca().set_facecolor("#e6e6fa")
35         plt.xscale('log')
36         widths = 0.6*np.diff(threads, prepend=threads[0] / 2) * 0.8
37         plt.bar(x_axis, y_axis, width=widths, color="#4b0082", align="center")
38         plt.xticks(x_axis, [str(t) for t in threads])
39         plt.plot(x_axis, [y_axis[0]/t for t in threads], color ='g', linestyle='--')
40         plt.suptitle("Total Times for Floyd-Warshall Recursive", size = 12)
41         plt.title(f"Grid Size = {GridSize[grid]}, Block Size = {BSizes[bsize]}", fontstyle =
42 'oblique', size = 10)
43         plt.xlabel("Number of threads")
44         plt.ylabel("Time(secs)")
45         plt.grid('y')
46         plt.savefig(f"fig{GridSize[grid]}_{BSizes[bsize]}.png")
47         plt.clf()
```

## Αμοιβαίος Αποκλεισμός-Κλειδώματα

Στο συγκεκριμένο ερώτημα καλούμαστε να αξιολογήσουμε τους διαφορετικούς τρόπους υλοποίησης κλειδωμάτων για αμοιβαίο αποκλεισμό.

Μας δίνονται έτοιμες όλες οι υλοποίησεις των κλειδωμάτων. Για την εκτέλεση του συγκεκριμένου data set (Size = 32, Coords = 16, Clusters = 32, Loops = 10) στον scirouter χρησιμοποιήσαμε το ακόλουθο script :

```
#!/bin/bash
## Give the Job a descriptive name
#PBS -N run_kmeans
## Output and error files
#PBS -o run_kmeans.out
#PBS -e run_kmeans.err
## How many machines should we get?
#PBS -l nodes=1:ppn=8
##How long should the job run for?
#PBS -l walltime=00:10:00
## Start
## Run make in the src folder (modify properly)
module load openmp
cd /home/parallel/parlab09/a2_new/a2/kmeans
export SIZE=32
export COORDS=16
export CLUSTERS=32
export LOOPS=10
for n in 1 2 4 8 16 32 64; do
    export OMP_NUM_THREADS=$n
    echo "Setting OMP_NUM_THREADS=$n" >&2
    export GOMP_CPU_AFFINITY="0-$((($n - 1)))"
    echo "Running ./kmeans_omp_array_lock" >&2
    ./kmeans_omp_array_lock -s $SIZE -n $COORDS -c $CLUSTERS -l $LOOPS
    echo "Running ./kmeans_omp_clh_lock" >&2
    ./kmeans_omp_clh_lock -s $SIZE -n $COORDS -c $CLUSTERS -l $LOOPS
    echo "Running ./kmeans_omp_critical" >&2
    ./kmeans_omp_critical -s $SIZE -n $COORDS -c $CLUSTERS -l $LOOPS
    echo "Running ./kmeans_omp_naive" >&2
    ./kmeans_omp_naive -s $SIZE -n $COORDS -c $CLUSTERS -l $LOOPS
    echo "Running ./kmeans_omp_nosync_lock" >&2
    ./kmeans_omp_nosync_lock -s $SIZE -n $COORDS -c $CLUSTERS -l $LOOPS
    echo "Running ./kmeans_omp_pthread_mutex_lock" >&2
    ./kmeans_omp_pthread_mutex_lock -s $SIZE -n $COORDS -c $CLUSTERS -l $LOOPS
    echo "Running ./kmeans_omp_pthread_spin_lock" >&2
    ./kmeans_omp_pthread_spin_lock -s $SIZE -n $COORDS -c $CLUSTERS -l $LOOPS
    echo "Running ./kmeans_omp_tas_lock" >&2
    ./kmeans_omp_tas_lock -s $SIZE -n $COORDS -c $CLUSTERS -l $LOOPS
    echo "Running ./kmeans_omp_ttas_lock" >&2
    ./kmeans_omp_ttas_lock -s $SIZE -n $COORDS -c $CLUSTERS -l $LOOPS
done
```

### Τεχνικές συγχρονισμού

#### 1) pthread\_mutex\_lock

Σε αυτήν την τεχνική χρησιμοποιείται ένα κλείδωμα αμοιβαίου αποκλεισμού και μεσολαβεί το λειτουργικό σύστημα σε περίπτωση αποτυχίας (context switch). Έτσι, επιτρέπει σε άλλες διεργασίες να τρέχουν μέχρι να ξυπνήσει από κάποιο κατάλληλο signal. Τότε, επιχειρεί εκ νέου να μπει στο κρίσιμο τμήμα.

#### 2) pthread\_spin\_lock

Σε αυτήν την τεχνική, χρησιμοποιείται και πάλι ένα κλείδωμα όμως το κάθε νήμα εκτελεί busy waiting loop για την απόκτηση του. Έτσι, δεν επιτρέπει σε άλλο νήμα να τρέξει στην θέση του (εκτός

φυσικά εαν περάσει χρόνος ίσος με το runtime quantum και το αποσύρει ο scheduler) σπαταλώντας ωφέλιμο CPU time. Αυτό το μοντέλο προσφέρεται για operations που μπλοκάρουν μόνο για λίγους κύκλους, δηλαδή ο χρόνος αναμονής είναι μικρότερος του context switching overhead.

### 3) tas\_lock

Αυτή η τεχνική βασίζεται στην υποστήριξη από το υλικό και χρησιμοποιεί την ατομική εντολή test\_and\_set που προσφέρει το ISA. Θέτει **ταυτόχρονα** το κλείδωμα (μεταβλητή state) σε 1 και επιστρέφει την προηγούμενη τιμή της (μεταβλητή test). Αν η προηγούμενη τιμή είναι 0 τότε το νήμα δέσμευσε επιτυχώς το κλείδωμα. Κάθε νήμα που προσπαθεί να μπει στο κρίσιμο εκτελεί ένα dummy while loop με την tas. Σε κάθε iteration γράφει στην θέση μνήμης της state, που είναι **μοιραζόμενη**, και στέλνει cache line invalidation στα υπόλοιπα με βάση το πρωτόκολλο MESI για συνάφεια κρυφών μνημών. Συνεπώς, δημιουργείται υπερβολικά μεγάλη και περιττή συμφόρηση στο δίαυλο.

### 4) ttas\_lock

Μοιάζει με την tas, οστόσω το νήμα δεν γράφει απευθείας την state αλλά επιχειρεί πρώτα να την διαβάσει (test). Εαν η τιμή της δεν είναι 0, παραμένει μέσα στο busy wit loop και μόλις διαβάσει τιμή 0, προσπαθεί να γράψει σε αυτήν (test\_and\_set). Τα διαδοχικά reads δεν κοστίζουν σε bandwidth αφού δεν στέλνουν κάποια ενημέρωση μέσω bus. Ο αριθμός των writes μειώνεται σημαντικά όρα και τα συνολικά invalidations. Περεταίρω βελτίωση γίνεται με εκθετική οπισθοχώρηση (κατά το read και έτσι μειώνονται dummy CPU cycles και αποφεύγονται περισσότερα αποτυχημένα writes) αλλά δεν το εξετάζουμε σε αυτήν την άσκηση.

### 5) array\_lock

Σε αυτήν την τεχνική κάθε νήμα έχει μια δική του μεταβλητή slot, ένα global πίνακα flag και που είναι τώρα το τέλος της ουράς. Κάθε φορά που προσπαθεί ένα νήμα να πάρει το κλείδωμα, παίρνει το τέλος της ουράς και κάνει ατομική αύξηση κατά 1, θέτει αυτό ως δικό του slot και περιμένει πότε θα γίνει true. Κάθε φορά που ένα νήμα αποδεσμεύει το κλείδωμα, ξαναθέτει το slot του ως false και κάνει το επόμενο true ώστε να πάρει το κλείδωμα αυτός που έχει το επόμενο slot. Αυτή η τεχνική έχει λιγότερη συμφόρηση στο δίαυλο γιατί κάθε νήμα κάνει πάντα 3 αλλαγές για να δεσμεύσει και να αποδεσμεύσει. Επίσης είναι δίκαιη, δηλαδή τα νήματα εκτελούν το κρίσιμο τμήμα με την ίδια σειρά που προσπάθησαν να το δεσμεύσουν. Ωστόσω, ένα νήμα πρέπει να περιμένει στην χειρότερη περίπτωση μια πλήρη περιστροφή του δακτυλίου ώστε να μπει στο κρίσιμο τμήμα ακόμη και αν είναι το μοναδικό που το επιδιώκει.

### 6) clh\_lock

Σε αυτήν την τεχνική κάθε νήμα έχει ένα κόμβο με ένα κλείδωμα. Κάθε φορά που προσπαθεί να δεσμεύσει το κλείδωμα βάζει το δικό του κλείδωμα να είναι 1, αλλάζει ατομικά τον δείκτη στο κόμβο που αναπαριστά το τέλος της ουράς στον εαυτό του και μετά περιμένει πότε το κλείδωμα του προηγούμενου θα γίνει 0. Αντίστοιχα όταν αποδεσμεύει το κλείδωμα απλά θέτει το δικό του κλείδωμα σε 0. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι πως είναι πολύ κλιμακώσιμη για αρκετά threads καθώς υπάρχει μόνο 1 κοινή μεταβλητή για τα threads και όχι ολόκληρος πίνακας.

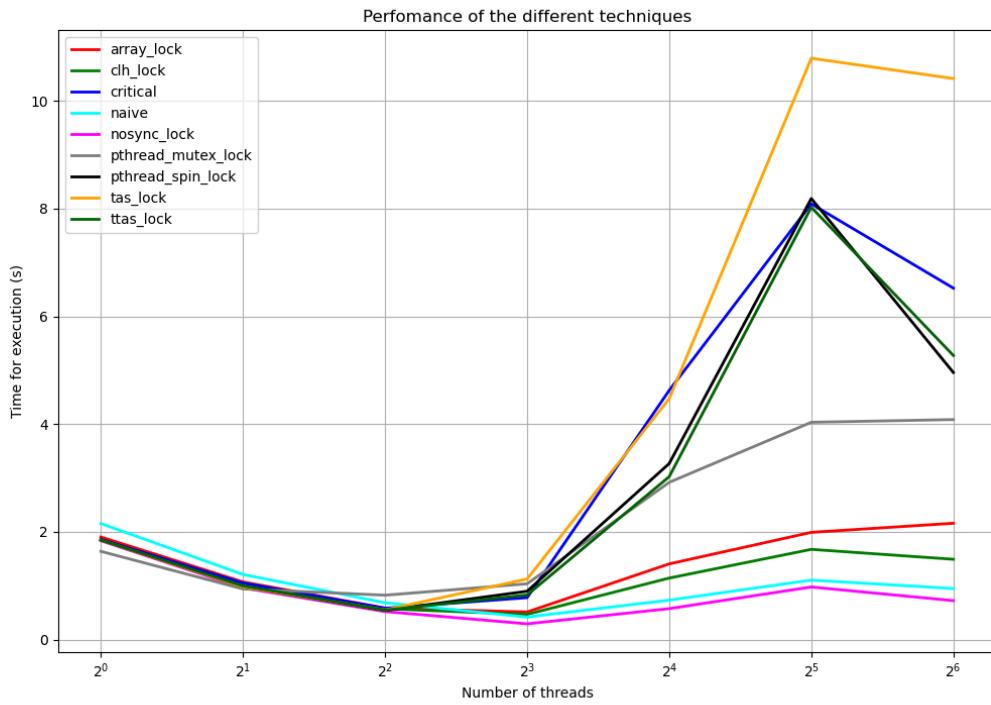
### 7) pragma omp critical

Θα αξιολογήσουμε και την επίδοση της βιβλιοθήκης του OpenMP για το κρίσιμο τμήμα.

### 8) pragma omp atomic

Θα αξιολογήσουμε επίσης και την επίδοση μέχρι μόνο 2 ατομικών εντολών και όχι κρίσιμου τμήματος, καθώς μπορεί να μην αλλάζουν τις ίδιες μεταβλητές 2 νήματα.

## Αποτελέσματα

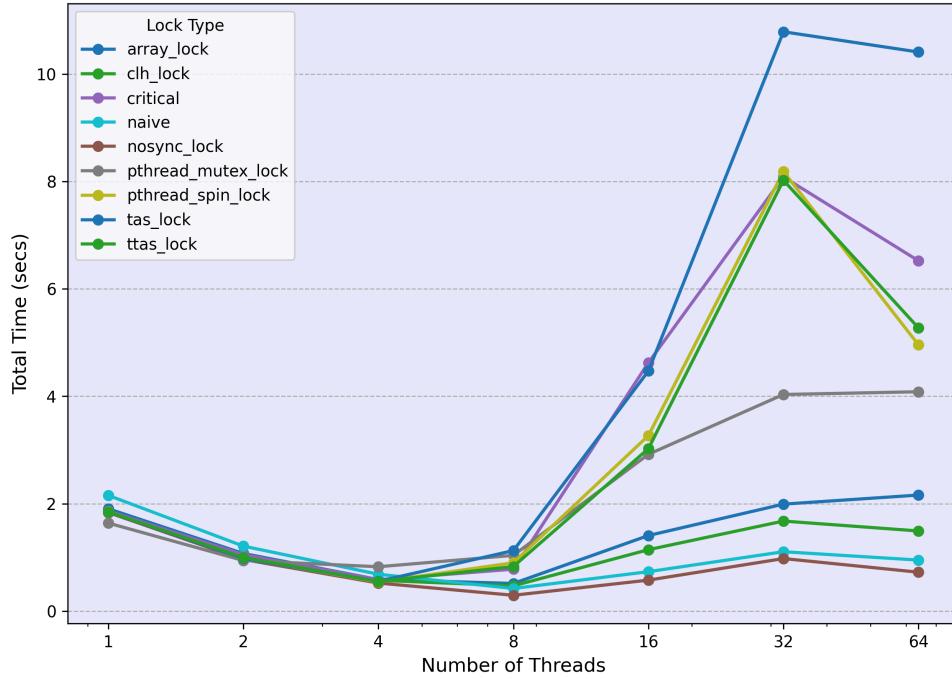


Παρατηρούμε πως :

- 1) Την χειρότερη επίδοση την έχει η τεχνική tas καθώς δημιουργεί την περισσότερη συμφόρηση στο δίσυντο όπως εξηγήθηκε.
- 2) Η χρήση του omp critical έχει πολύ μεγάλο κόστος υλοποίησης και είναι η δεύτερη χειρότερη.
- 3) Οι τεχνικές ttas και pthread\_spin\_lock έχουν παρόμοια απόδοση. Η ttas τα πηγαίνει αρκετά καλύτερα από την tas για πολλά νήματα.
- 4) Η καλύτερη έτοιμη υλοποίηση από βιβλιοθήκη είναι η pthread\_mutex\_lock όπως αναμένεται.
- 5) Οι τεχνικές array\_lock, clh\_lock κλιμακώνουν πολύ καλά για πολλά νήματα καθώς κάθε νήμα που θέλει να μπει στο κρίσιμο τμήμα εκτελεί πάντα συγκεκριμένο αριθμό αναθέσεων σε κοινές μεταβλητές. Η clh τα πάει καλύτερα καθώς έχει μόνο ένα κοινό δείκτη και όχι ολόκληρο πίνακα.
- 6) Η χρήση του omp atomic βλέπουμε πως βελτιστοποιεί πάρα πολύ τον συγχρονισμό που χρειάζεται και τα πηγαίνει σχεδόν το ίδιο καλά με το κάτω όριο που είναι η εκτέλεση χωρίς συγχρονισμό.
- 7) Οι 3 καλύτερες τεχνικές για αυτήν την άσκηση(array, clh, omp atomic) κλιμακώνουν πολύ καλά για 1 cluster πυρήνων του sandman, δηλαδή 8 νήματα. Αν χρησιμοποιούσαμε hyperthreading για τα 16 νήματα, δηλαδή βάζαμε τα 8 τελευταία νήματα εκτός των 64 λογικών, θα δούμε κλιμάκωση και για 16 νήματα όπως φαίνεται παρακάτω :

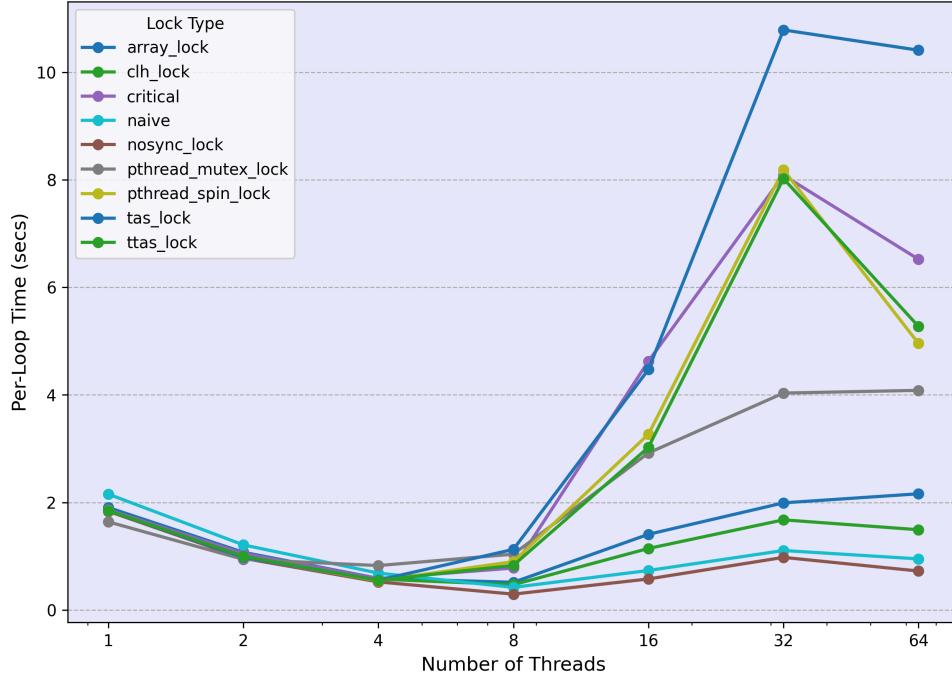
*Locking Mechanism vs Time*

Configuration = {32, 16, 32, 10}



*Locking Mechanism vs Time*

Configuration = {32, 16, 32, 10}



# Ταυτόχρονες Δομές δεδομένων

Σε αυτό το ερώτημα εξετάζουμε πως κλιμακώνουν διάφορες ταυτόχρονες υλοποιήσεις για μια απλά συνδεδεμένη λίστα.

Οι ταυτόχρονες υλοποιήσεις που θα εξετάσουμε είναι οι εξής :

## 1) Coarse-grain locking

Σε αυτήν την υλοποίηση υπάρχει ένα γενικό κλείδωμα για όλη την δομή. Για κάθε προσθήκη ή αφαίρεση στοιχείου στη λίστα, το νήμα προσπαθεί να δεσμεύσει το κλείδωμα και να κάνει την κατάλληλη αλλαγή. Είναι πολύ απλό στην υλοποίηση όμως δεν θα κλιμακώσει καθόλου καθώς όλοι περιμένουν το ίδιο κλείδωμα και δεν εκμεταλλευόμαστε καθόλου παραλληλία σε ανεξάρτητα τμήματα της λίστας.

## 2) Fine-grain locking

Σε αυτήν την υλοποίηση υπάρχει ένα κλείδωμα για κάθε στοιχείο της λίστας. Ο τρόπος διάσχισης είναι hand-over-hand locking δηλαδή ένα νήμα προσπαθεί να δεσμεύσει τον επόμενο, όταν τα καταφέρει, αφήνει τον προηγούμενο. Αυτό είναι αναγκαστικό προς αποφυγή deadlock, εφόσον για ένα operation απαιτούνται κλειδώματα σε 2 στοιχεία (pred, curr) και θα δημιουργούνταν πρόβλημα αν 2 νήματα επιχειρούσαν να αλλάξουν 2 γειτονικά nodes και προσπαθούσαν να πάρουν τα κλειδώματα με αντίθετη σειρά. Μπορεί να δουλέψει καλύτερα από την coarse grain σε συγκεκριμένες περιπτώσεις αλλά το σημαντικότερο πρόβλημα είναι πως αν ένα νήμα θέλει να αλλάξει κάτι που βρίσκεται νωρίς στη λίστα, μπλοκάρει όλα τα άλλα νήματα που θέλουν να ψάξουν ή αλλάξουν κάτι που είναι πιο μετά στη λίστα.

## 3) Optimistic synchronization

Σε αυτήν την υλοποίηση ένα νήμα για κάθε αλλαγή, βρίσκει τον προηγούμενο και τον επόμενο προς αλλαγή, προσπαθεί να τους δεσμεύσει, ελέγχει αν η δομή είναι ακόμη συνεπής (δηλαδή είναι προσβάσιμοι και διαδοχικοί) και κάνει την αλλαγή. Η contains στη συγκεκριμένη υλοποίηση χρησιμοποιεί επίσης κλειδώματα αν και δεν χρειάζεται. Το κύριο πρόβλημα αυτής της υλοποίησης είναι πως η validate διατρέχει όλη την λίστα για να επιβεβαιώσει την συνέπεια και αυτό είναι πάρα πολύ χρονοβόρο.

## 4) Lazy synchronization

Σε αυτήν την υλοποίηση προσθέτουμε στη δομή μια boolean μεταβλητή που δείχνει αν ο κόμβος βρίσκεται στη λίστα ή έχει διαγραφεί. Η contains διατρέχει τη λίστα χωρίς να κλειδώνει και ελέγχει αυτήν την boolean μεταβλητή οπότε είναι wait-free. Η validate δεν διατρέχει την λίστα αλλά κάνει τοπικούς ελέγχους στον προηγούμενο και επόμενο κόμβο, δηλαδή ελέγχει αν ανήκουν στη δομή και οι 2 με την επιπλέον μεταβλητή και ο next του προηγούμενο είναι ο τωρινός. Η add/remove κάνουν πρώτα λογική και μετά φυσική αλλαγή των κόμβων.

## 5) Non-blocking

Σε αυτήν την υλοποίηση προσπαθούμε να αφαιρόμε τελείως την ανάγκη για κλειδώματα και να χρησιμοποιήσουμε τις ατομικές εντολές που μας δίνει το instruction set του εκάστοτε επεξεργαστή. Η κεντρική ιδέα είναι να χειριστούμε την boolean μεταβλητή marked και το πεδίο next σαν μία μεταβλητή. Κάνει ατομικό σύνθετο έλεγχο και αλλαγή με 1 εντολή compare and set. Έτσι η διαγραφή κάνει με 1 εντολή validate και λογική διαγραφή και 1 μόνο προσπάθεια φυσικής διαγραφής. Η find/contains είναι αυτή που εξετάζει αν υπάρχει στοιχείο που έχει διαγραφεί λογικά και όχι φυσικά και το αναλαμβάνει εκείνη. Η προσθήκη αναγκαστικά ξαναπροσπαθεί μέχρι να τα καταφέρει για να είναι συνεπής η δομή.

Μας δίνονται έτοιμες όλες οι παραπάνω ταυτόχρονες υλοποιήσεις. Για την ζητούμενη εκτέλεση, το σειριακό πρόγραμμα εκτελέστηκε μόνο με 1 thread αλλιώς θα υπάρχει πρόβλημα, για 128 νήματα χρησιμοποιήθηκε oversubscription. Δηλαδή η μεταβλητή MT\_CONF τέθηκε σε 0,1,...63,0,1,...63 ώστε να δημιουργηθούν και να πινάρουν 128 νήματα σε συγκεκριμένους πυρήνες. Επειδή οι λογικοί πυρήνες του sandman είναι 64, το scheduling των νημάτων πλέον το αναλαμβάνει το λειτουργικό και το software και όχι το ίδιο το υλικό όπως όταν χρησιμοποιούμε hyperthreading.

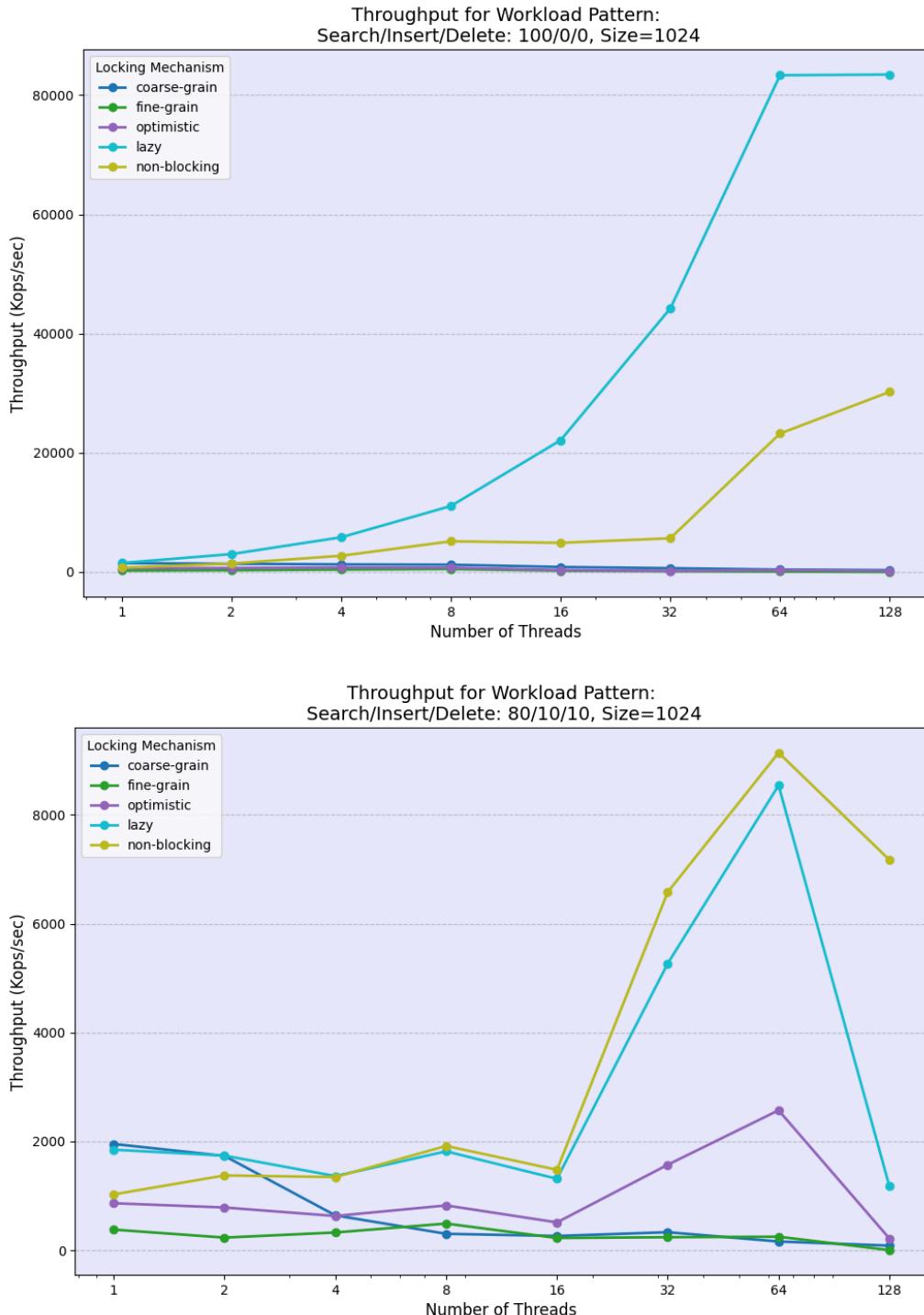
```

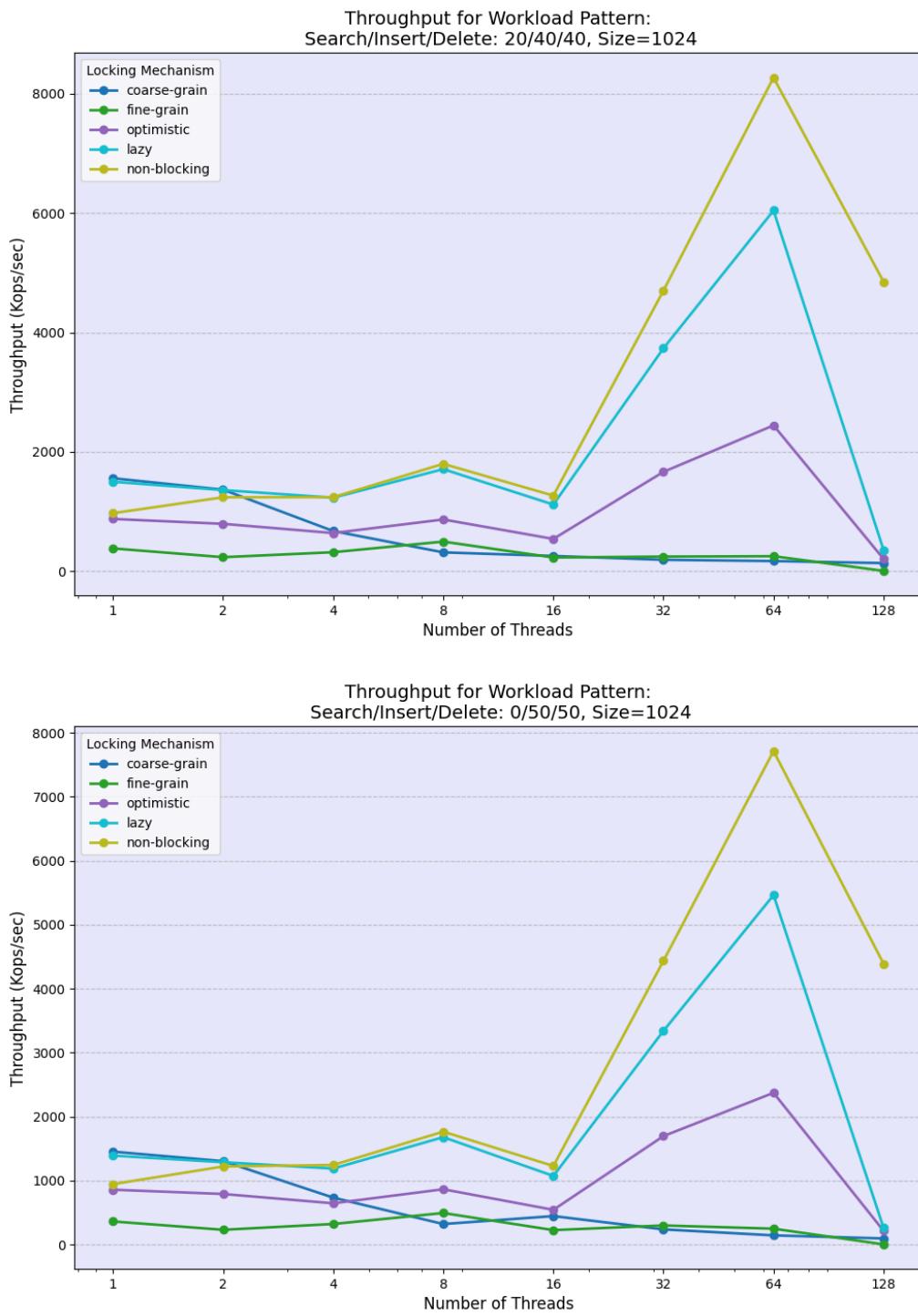
#!/bin/bash
## Give the Job a descriptive name
#PBS -N run_conc_ll
## Output and error files
#PBS -o run_conc_ll.out
#PBS -e run_conc_ll.err
## How many machines should we get?
#PBS -l nodes=1:ppn=8
##How long should the job run for?
#PBS -l walltime=01:00:00
## Start
## Run make in the src folder (modify properly)
module load openmp
cd /home/parallel/parlab09/a2_new/a2/conc_ll
choices=(
    "100 0 0"
    "80 10 10"
    "20 40 40"
    "0 50 50"
)
for lsize in 1024 8192; do
    export LSIZE=$lsize
    echo "LSIZE=$LSIZE"
    for choice in "${choices[@]}"; do
        read -r CONTAINS_PCT ADD_PCT REMOVE_PCT <<< "$choice"
        export MT_CONF="0"
        echo "serial"
        ./x.serial $LSIZE $CONTAINS_PCT $ADD_PCT $REMOVE_PCT
        for n in 1 2 4 8 16 32 64 128; do
            if [ "$n" -eq 128 ]; then
                # Special case for n=128 for over subscription
                export MT_CONF="$((seq -s, 0 63),$(seq -s, 0 63))"
            else
                # Default case for n=1, 2, 4, ..., 64
                export MT_CONF=$((seq -s, 0 $((n-1))) )
            fi
            echo "coarse-grain"
            ./x.cgl $LSIZE $CONTAINS_PCT $ADD_PCT $REMOVE_PCT
            echo "fine-grain"
            ./x.fgl $LSIZE $CONTAINS_PCT $ADD_PCT $REMOVE_PCT
            echo "optimistic"
            ./x.opt $LSIZE $CONTAINS_PCT $ADD_PCT $REMOVE_PCT
            echo "lazy"
            ./x.lazy $LSIZE $CONTAINS_PCT $ADD_PCT $REMOVE_PCT
            echo "non-blocking"
            ./x.nb $LSIZE $CONTAINS_PCT $ADD_PCT $REMOVE_PCT
        done
    done
done

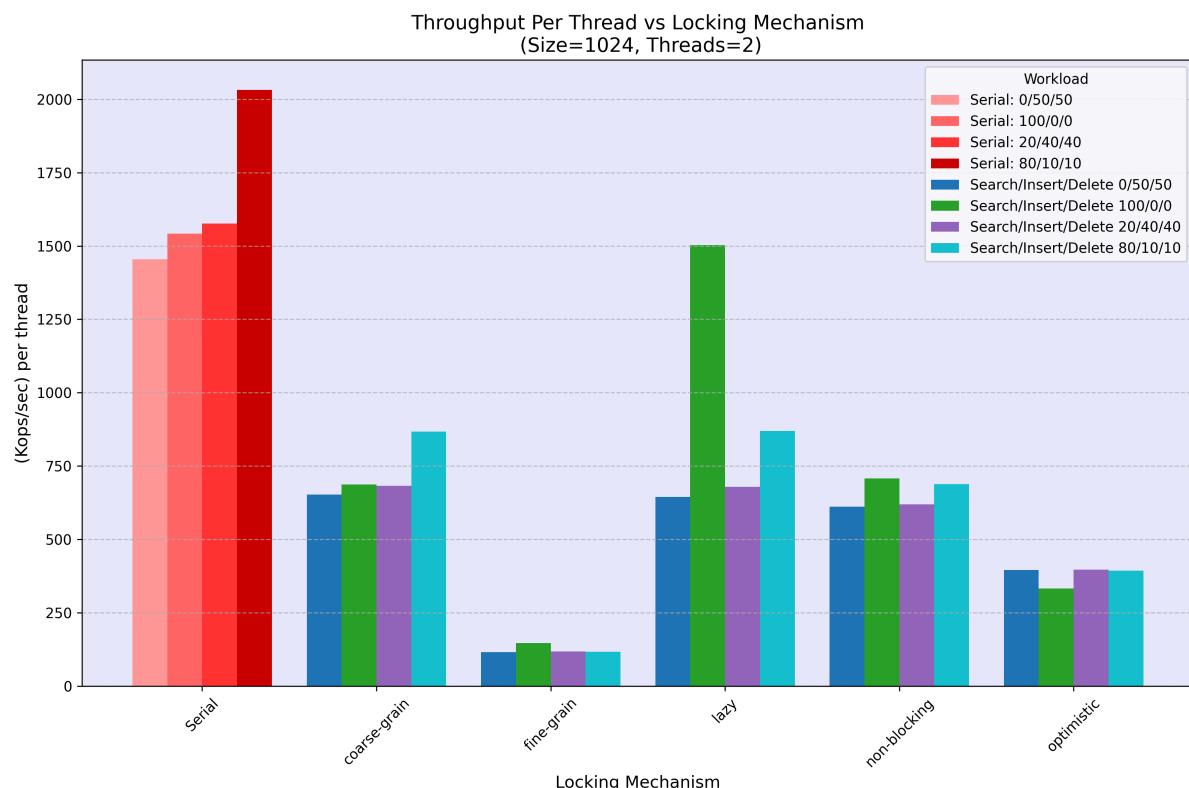
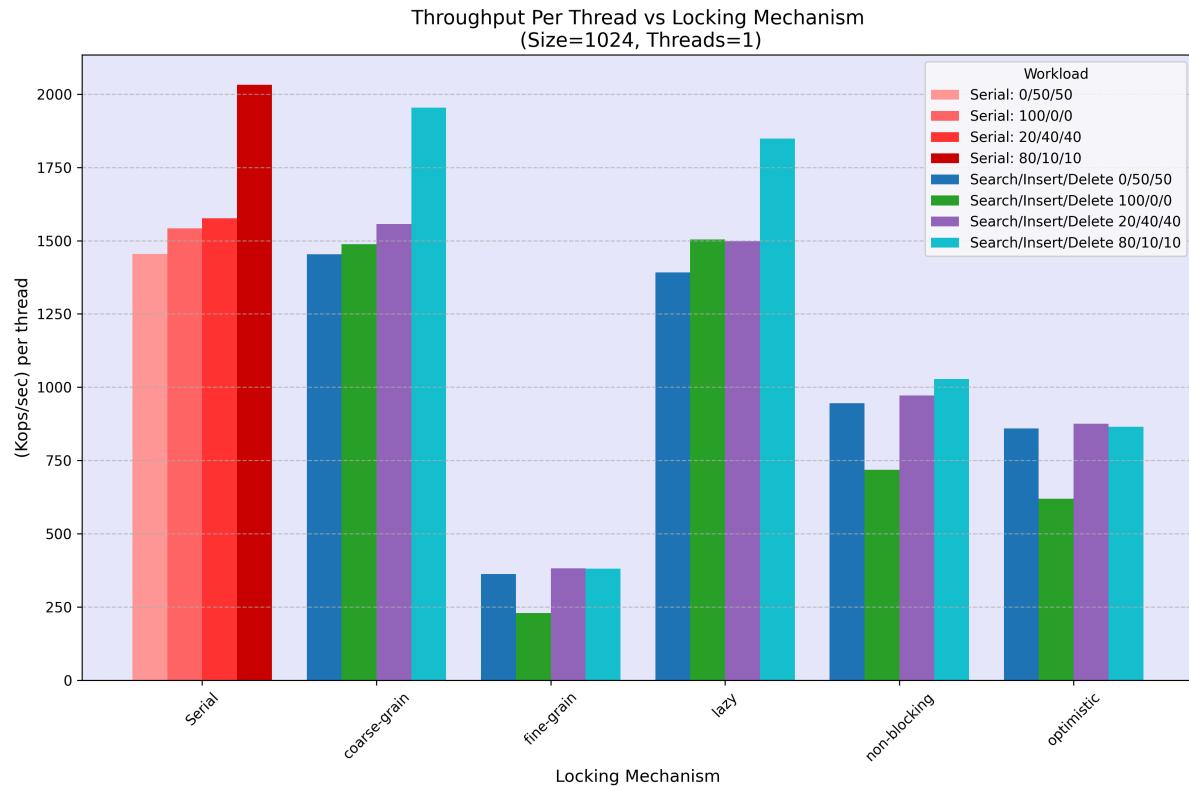
```

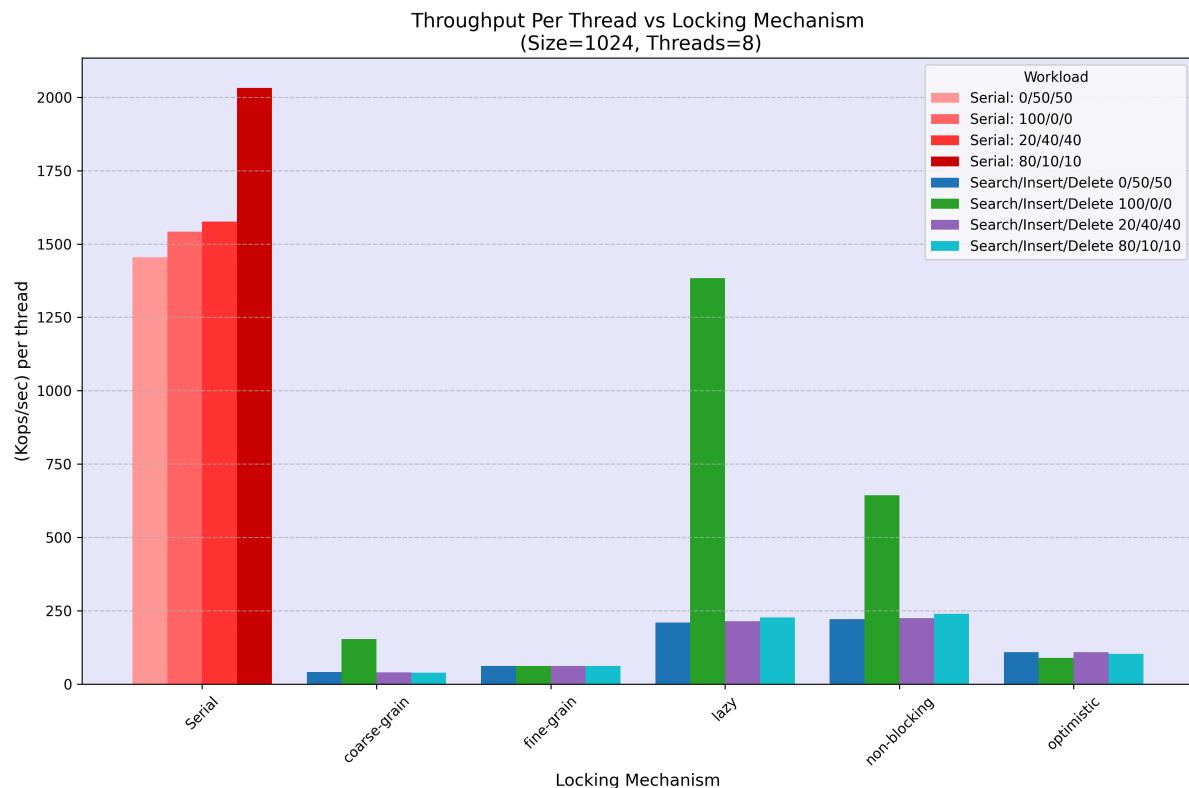
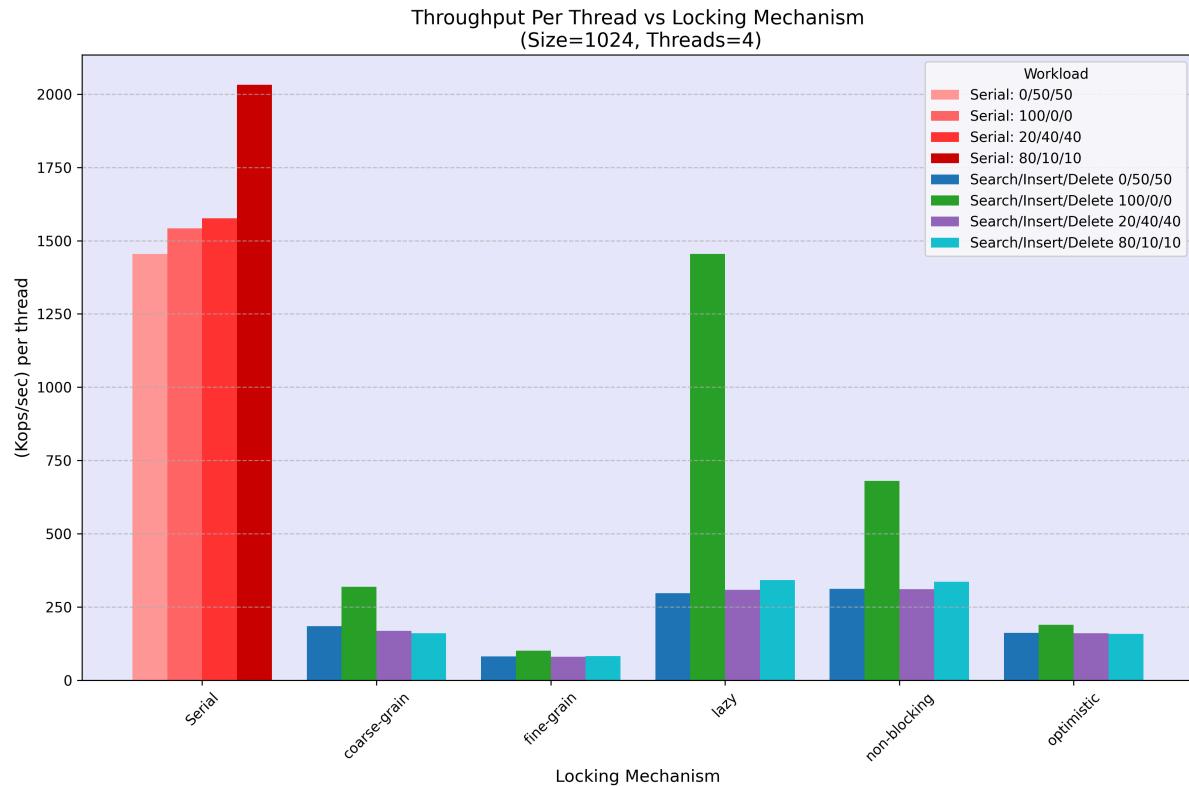
## Αποτελέσματα

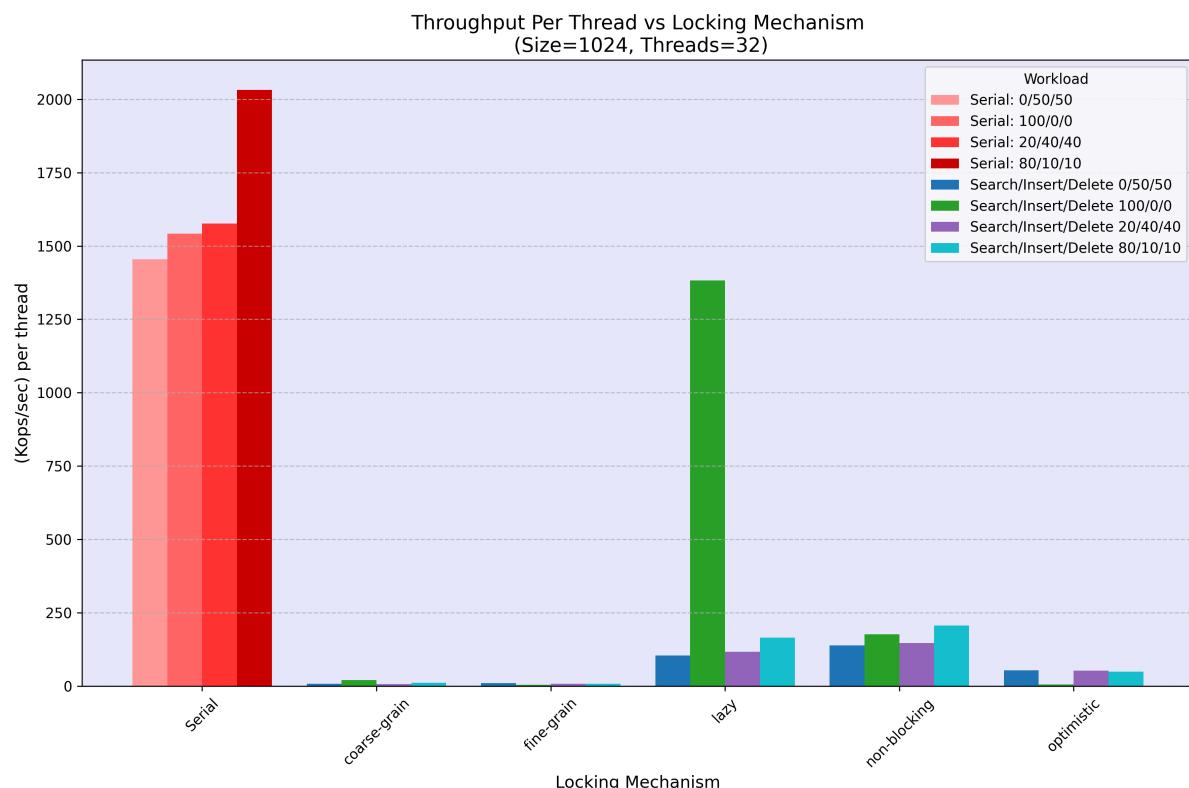
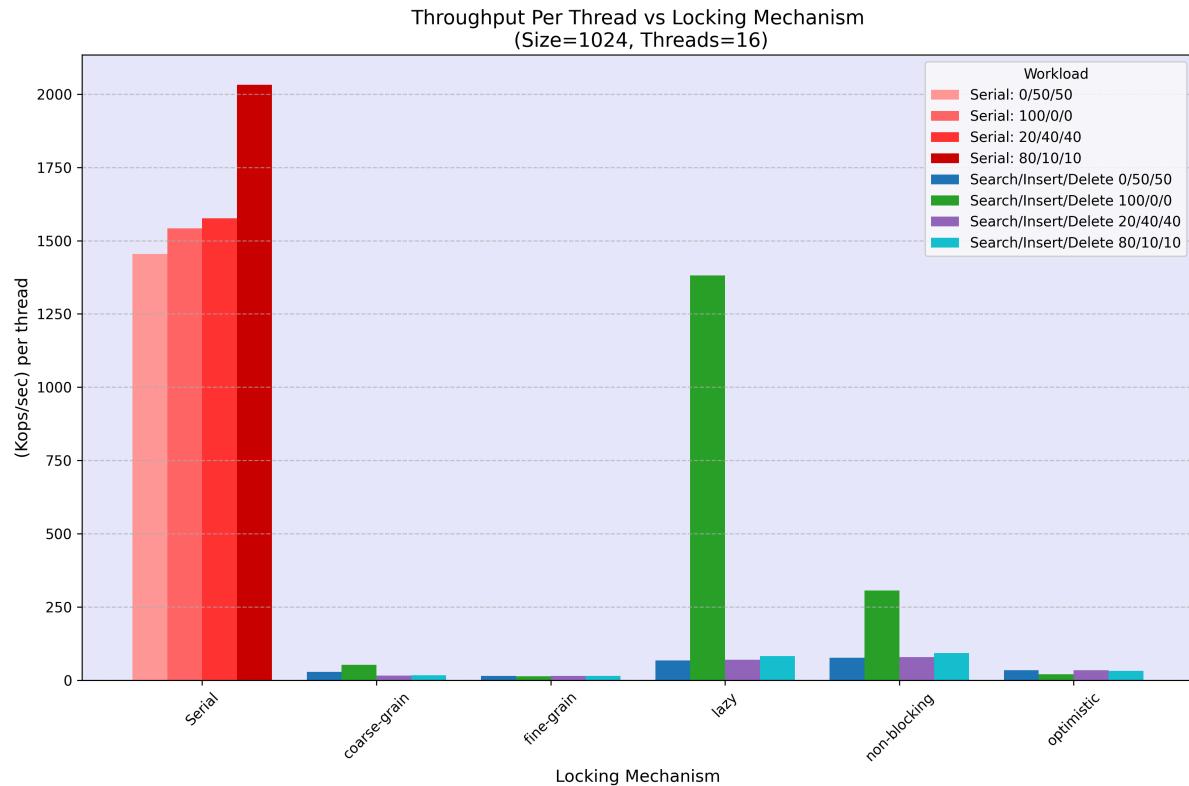
Παρουσιάζονται τα Kops/sec με την μορφή line plots ανά κάθε διαφορετικό workload configuration καθώς και το κανονικοποιημένο Kops/sec ανά νήμα με την μορφή barplots για κάθε εκτέλεση με n threads.

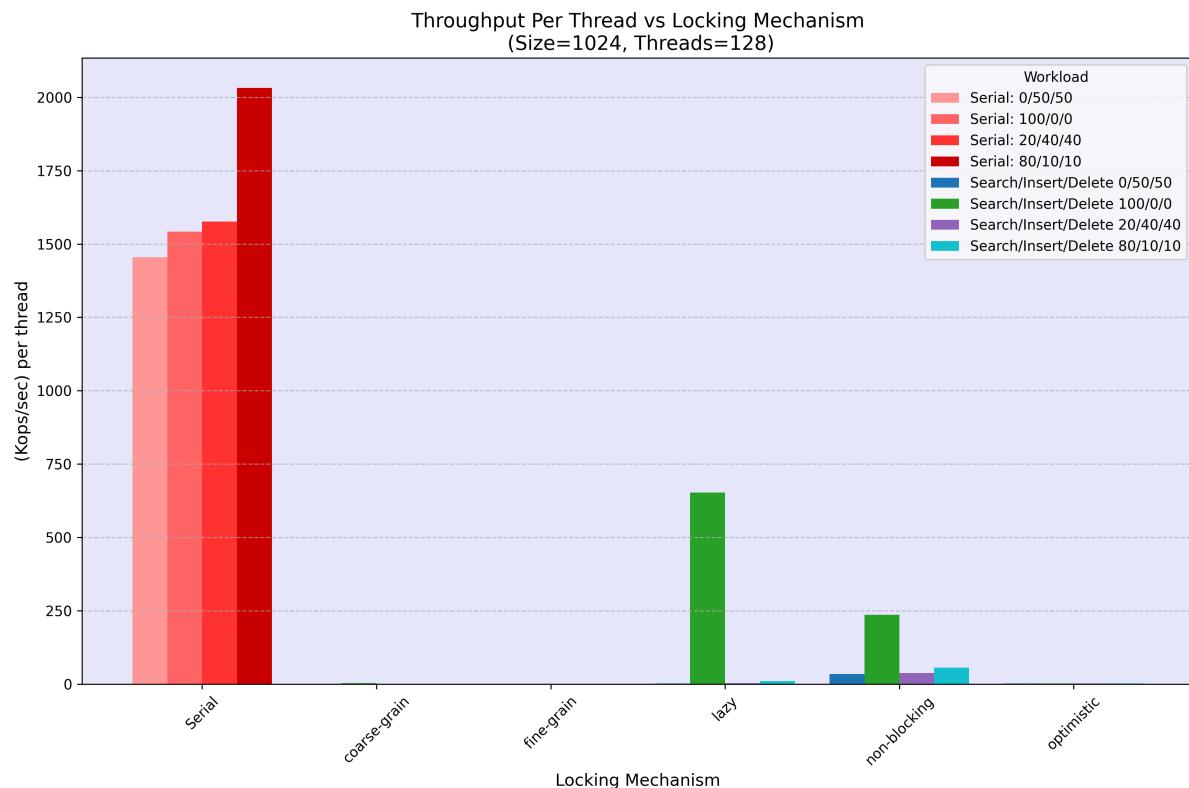
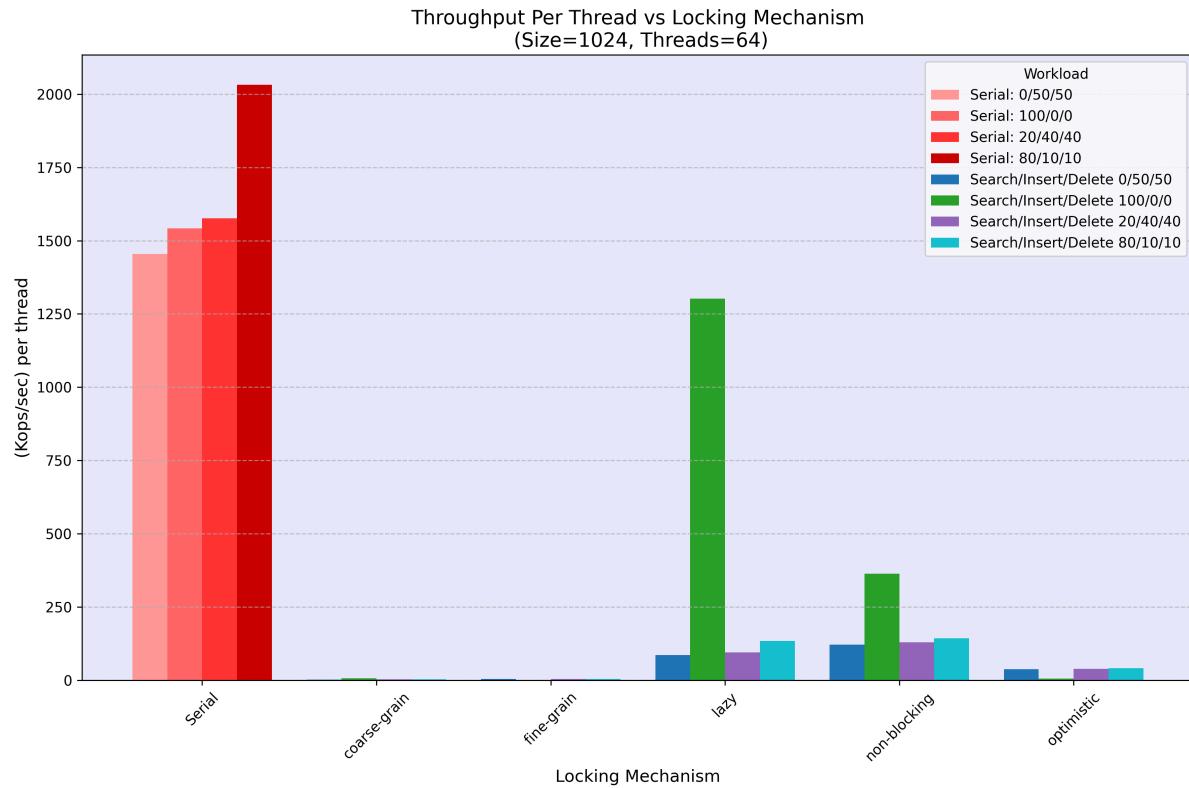






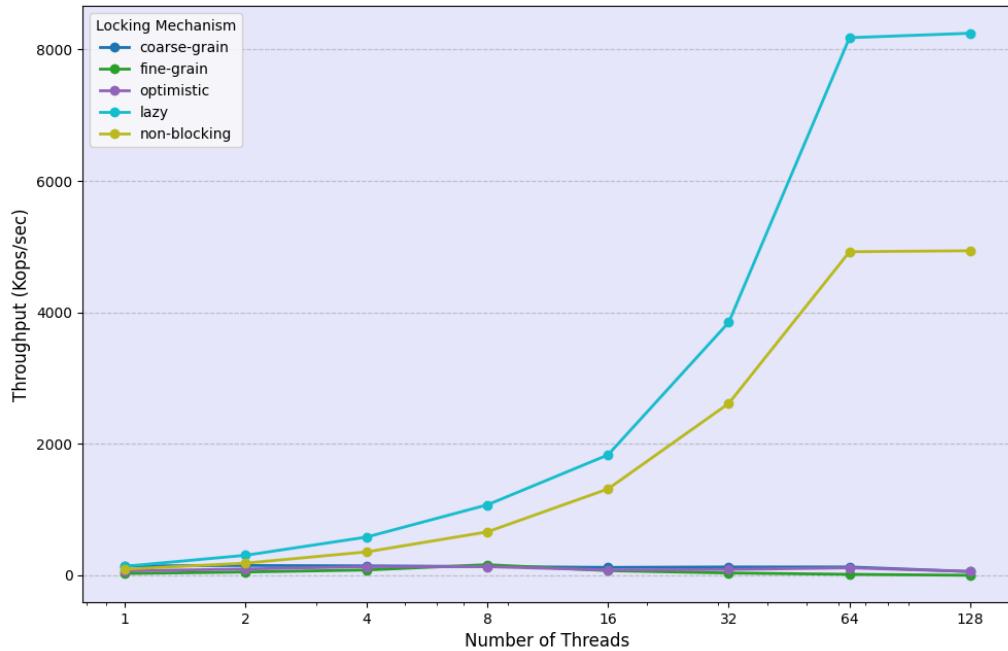




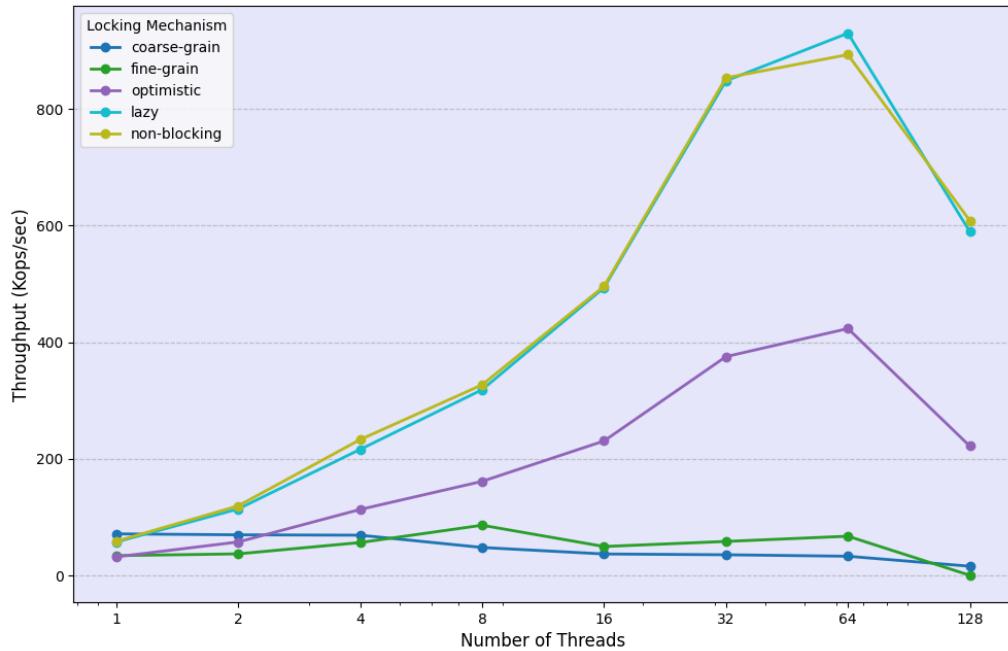


## Τια μήκος λίστας 8192

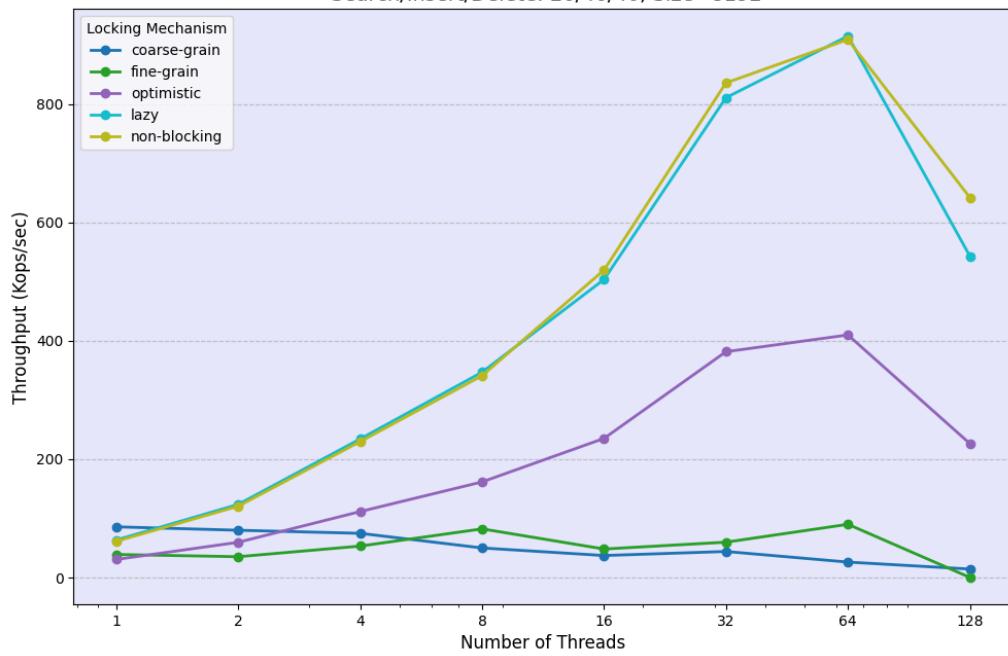
Throughput for Workload Pattern:  
Search/Insert/Delete: 100/0/0, Size=8192



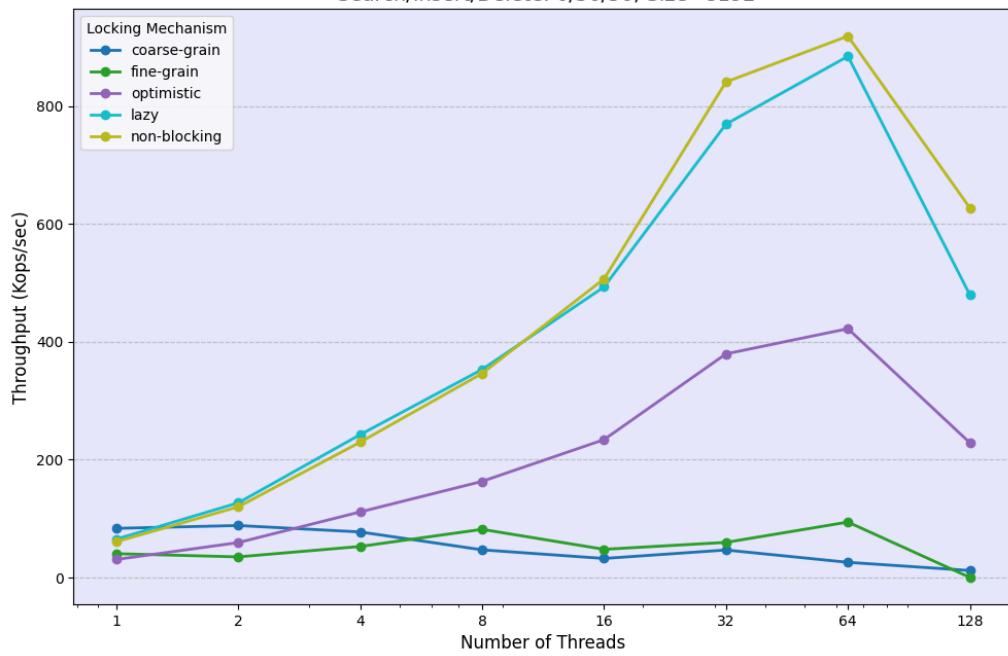
Throughput for Workload Pattern:  
Search/Insert/Delete: 80/10/10, Size=8192



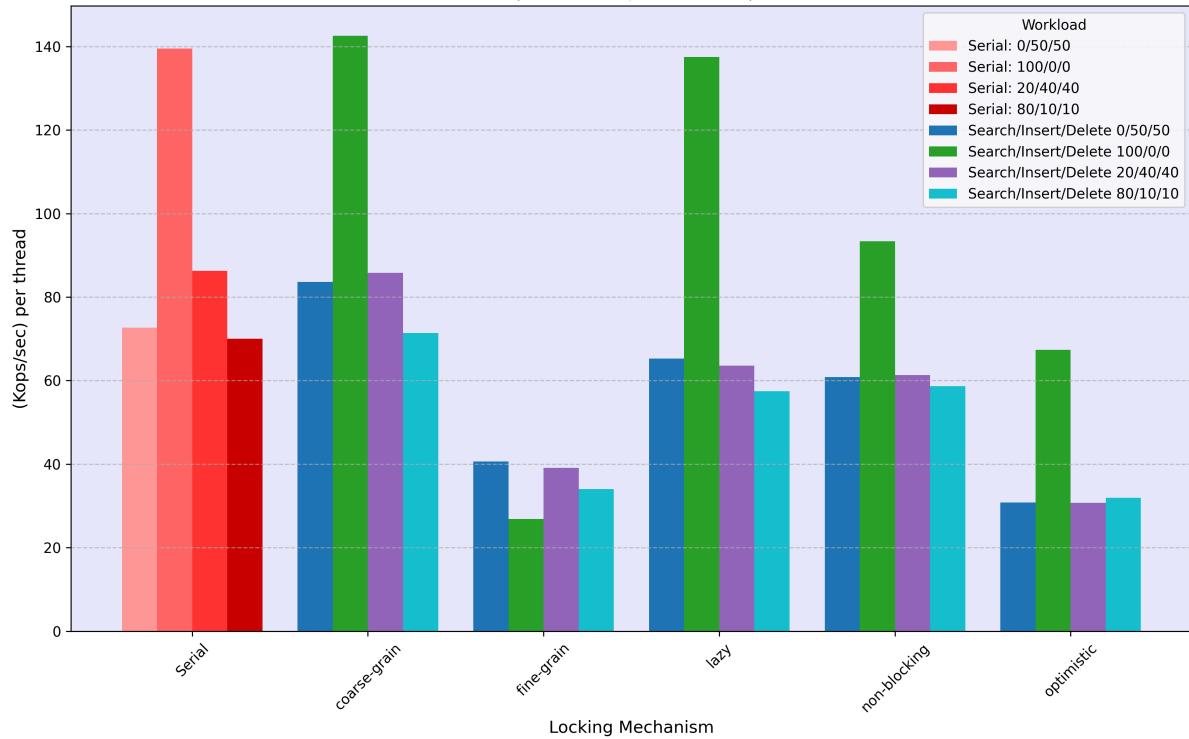
Throughput for Workload Pattern:  
Search/Insert/Delete: 20/40/40, Size=8192



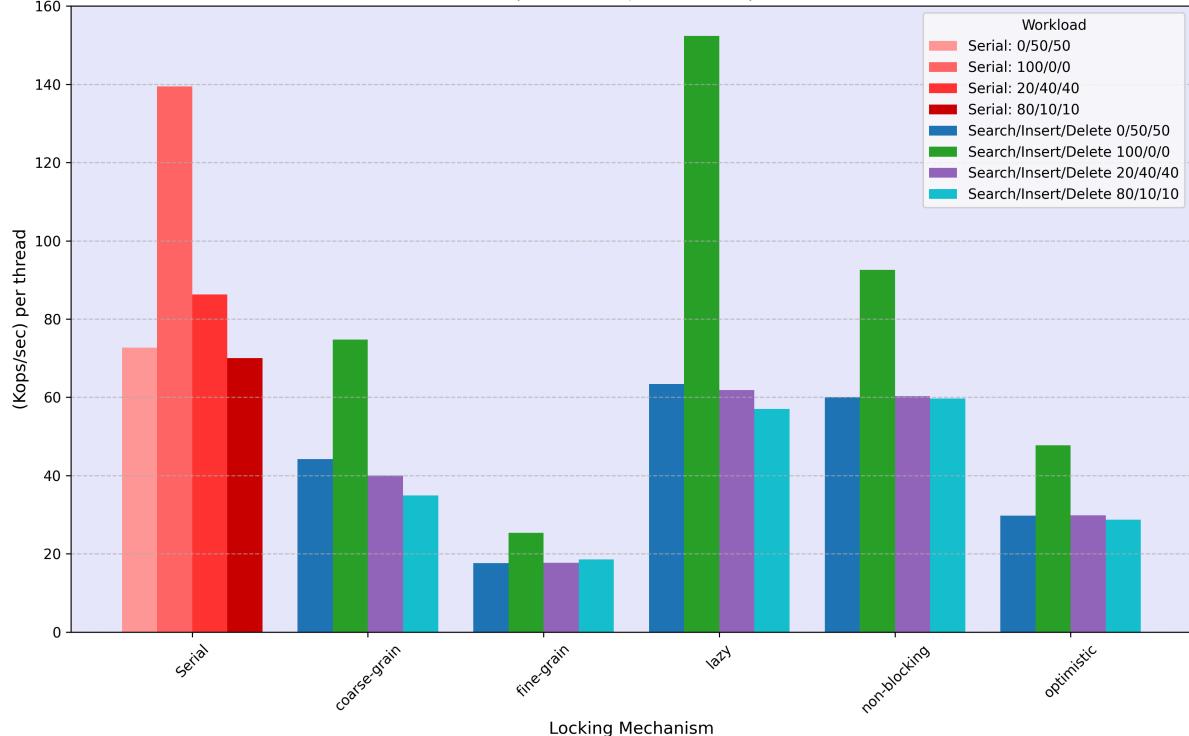
Throughput for Workload Pattern:  
Search/Insert/Delete: 0/50/50, Size=8192

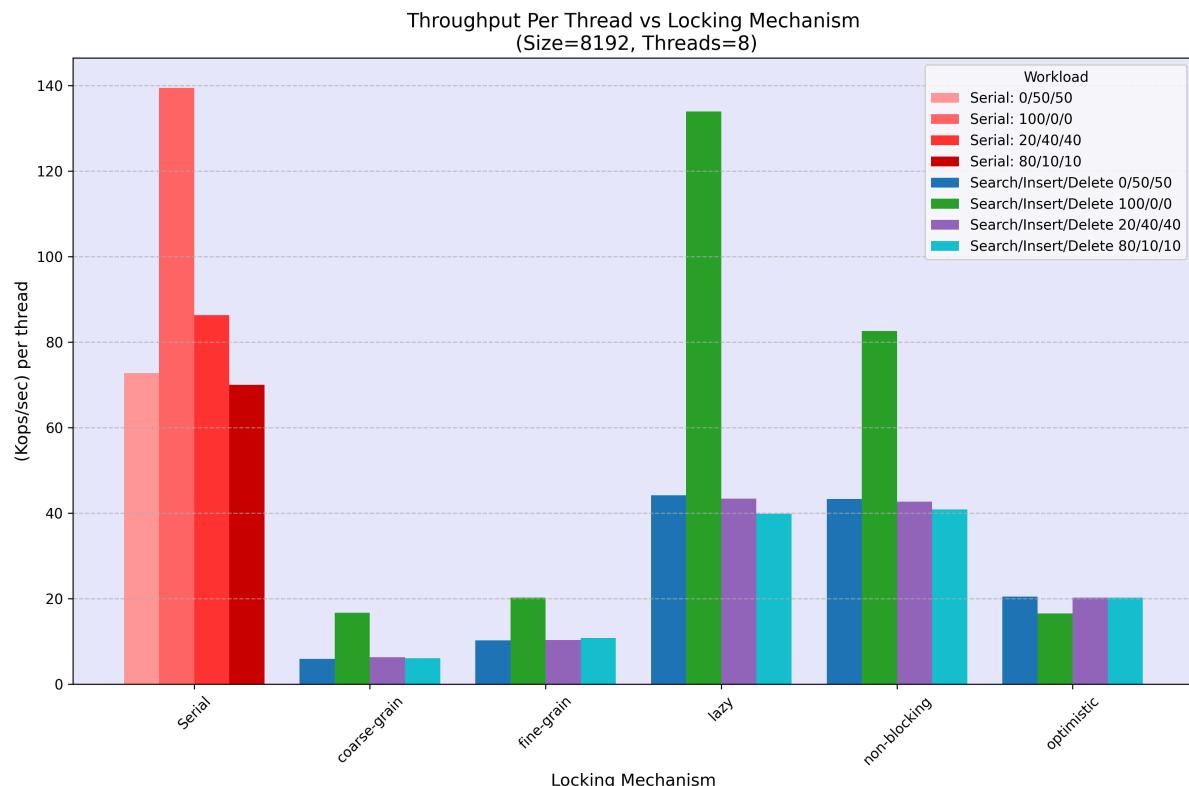
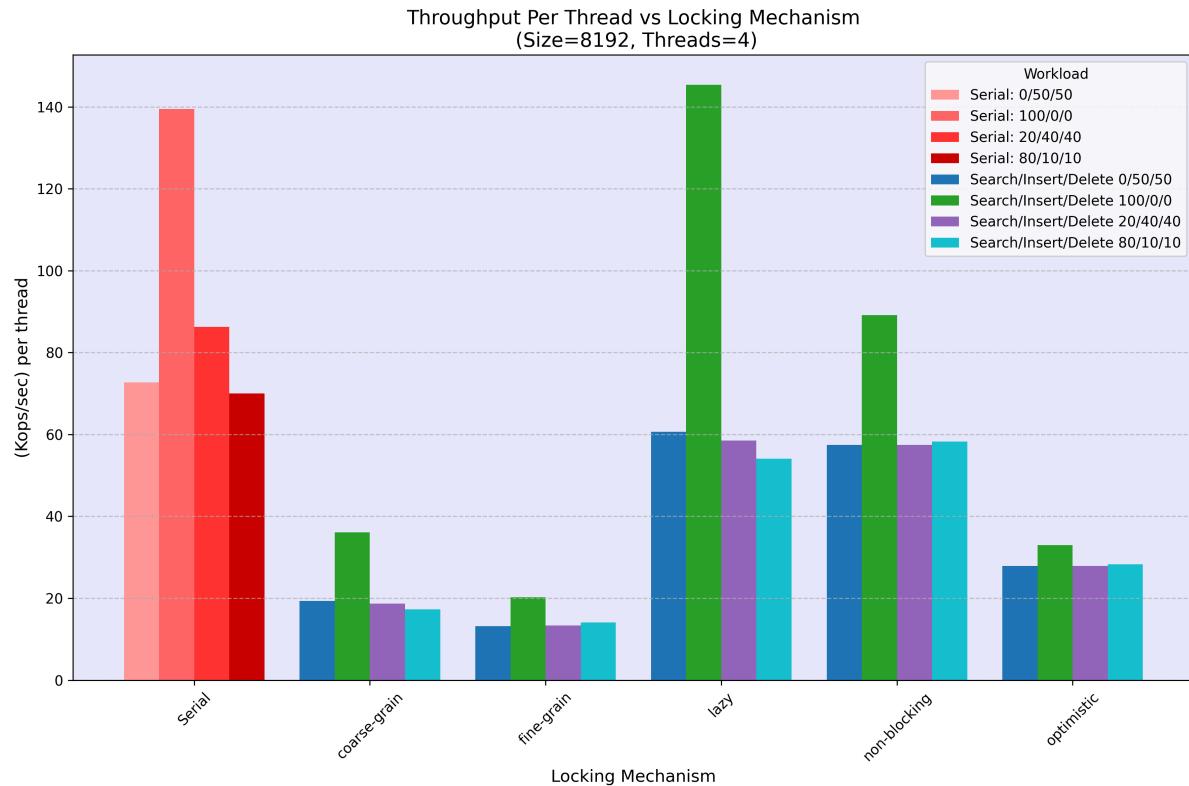


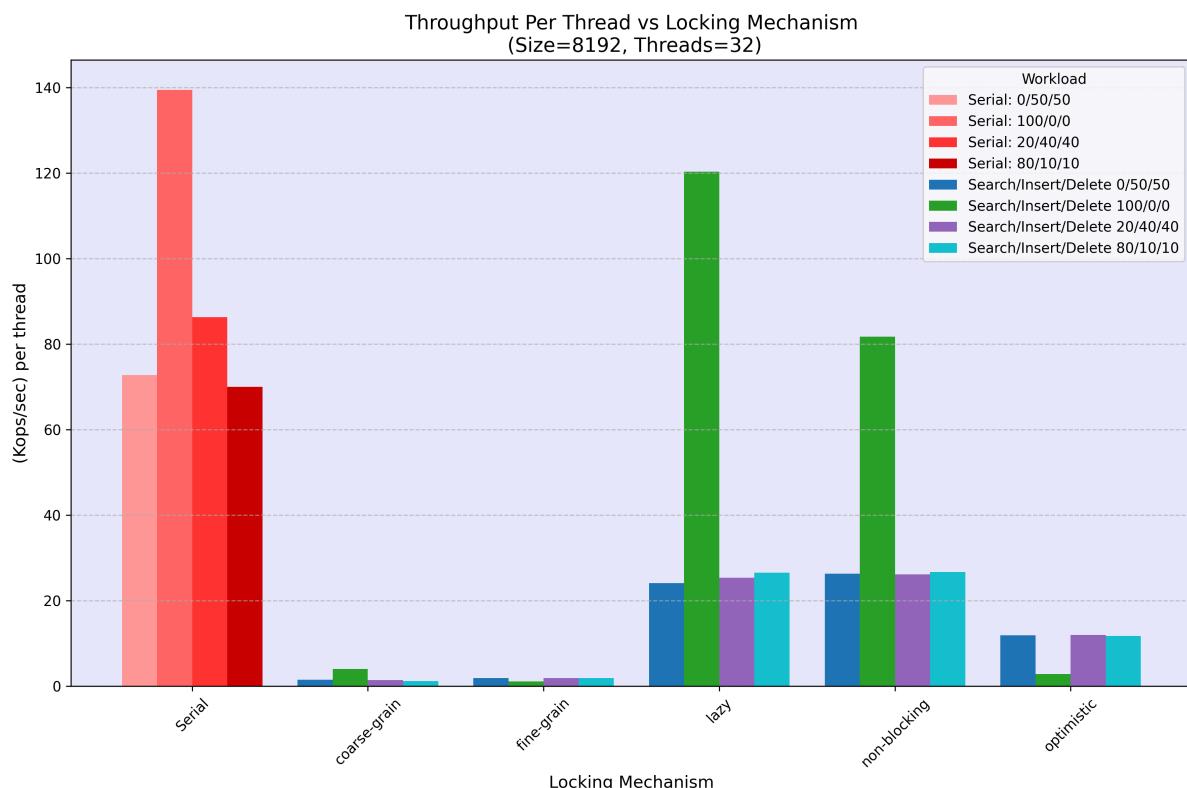
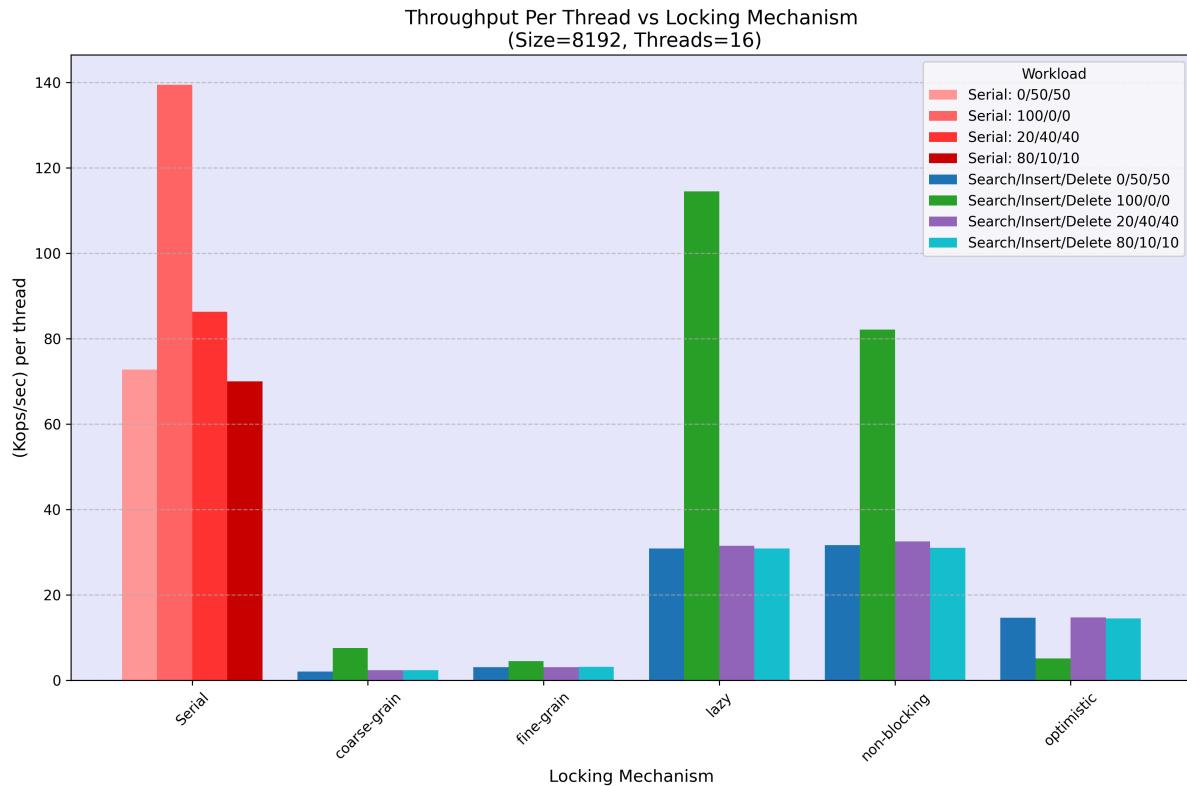
Throughput Per Thread vs Locking Mechanism  
(Size=8192, Threads=1)

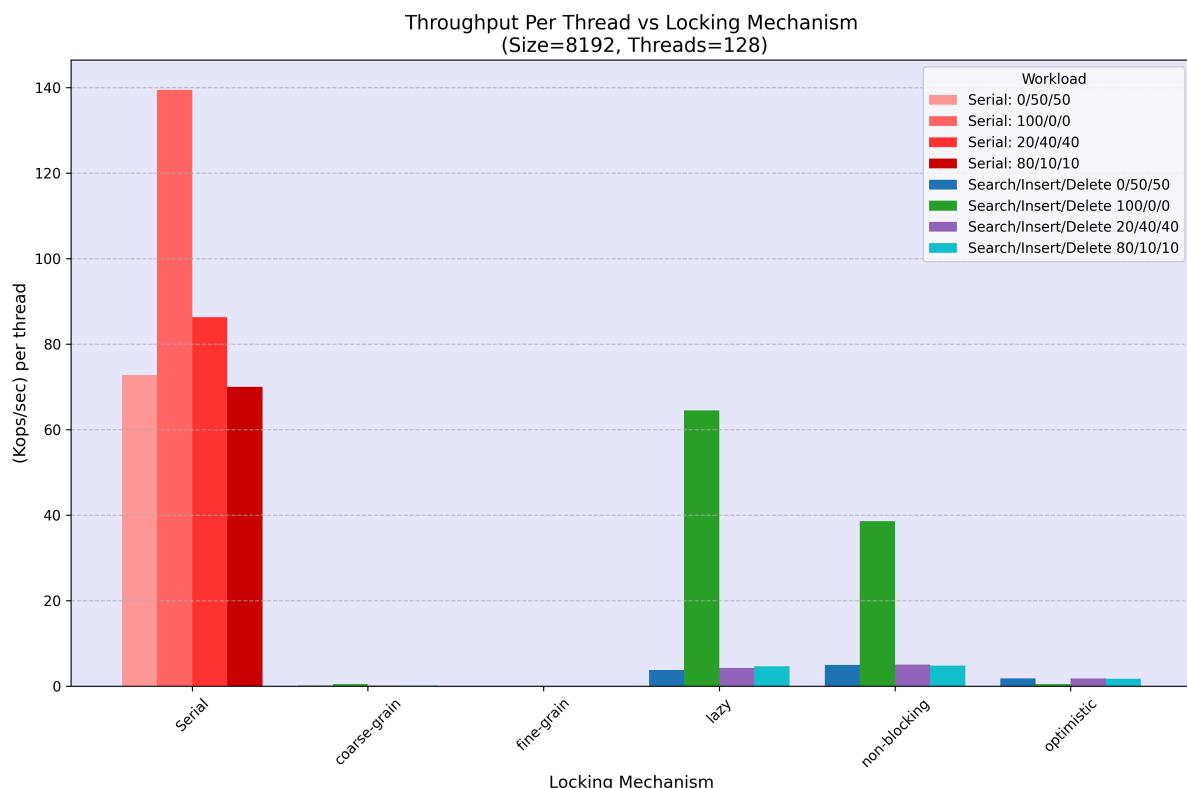
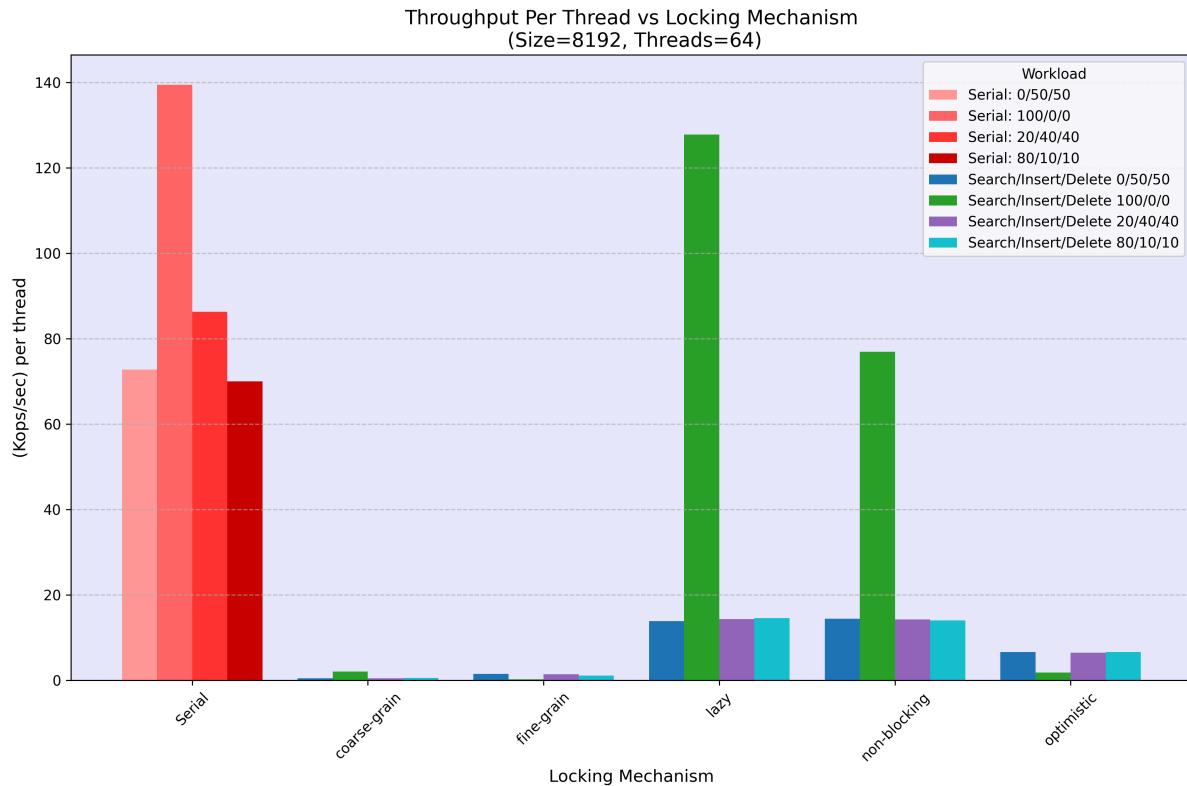


Throughput Per Thread vs Locking Mechanism  
(Size=8192, Threads=2)









## **Συμπεράσματα**

Παρατηρούμε πως :

- 1) Στην περίπτωση που έχουμε μόνο contains την χειρότερη επίδοση την έχει η fine grain που έχει τεράστιο overhead καθώς έχει κλείδωμα για κάθε κόμβο, ενώ η coarse grain που έχει ένα global κλείδωμα τα πάει καλύτερα.
- 2) Στην ίδια περίπτωση για το μεγάλο μέγεθος λίστας οι coarse grain, fine grain, optimistic έχουν φυσιολογικές επιδόσεις μέχρι 8 νήματα, με το που χρησιμοποιήσουμε παραπάνω από 1 cluster με μη κοινή L3 cache τα πάνε χάλια. Αυτό συμβαίνει διότι διασχίζουν την λίστα πολλές φορές για κάθε αλλαγή και αυτό σε συνδυασμό με το πρωτόκολλο συνάφεια κρυφής μνήμης προκαλεί τεράστιες καθυστερήσεις.
- 3) Η non blocking έχει πιο κακή επίδοση στη μικρή λίστα ενώ στη μεγάλη είναι το ίδιο καλή με την lazy. Αυτό είναι λογικό καθώς η φυσική διαγραφή δεν γίνεται πάντα.
- 4) Η lazy synchronization έχει τις καλύτερες επιδόσεις σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις και φτάνει πολύ κοντά στο ιδανικό όταν έχουμε μόνο contains. Αυτό συμβαίνει διότι διατρέχει μόνο 1 φορά τη λίστα για κάθε πράξη και δεν δεσμεύει περιττά κλειδώματα.
- 5) Δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα υπόλοιπα workloads καθώς η contain είναι πιο wait-free μέθοδος και άμα κάνουν όλοι το ίδιο δεν περιμένουν τόσο.
- 6) Σε όλες τις περιπτώσεις το oversubscription είναι κακή ιδέα καθώς η επίδοση ή μένει ίδια(όταν έχουμε μόνο contains) ή πέφτει αισθητά από τα 64 νήματα. Βλέπουμε πως όταν εμπλακεί το λειτουργικό για το scheduling η επίδοση πέφτει πολύ.

## Παράρτημα

Για την δημιουργία των γραφικών παραστάσεων χρημιοποίηθηκαν οι εξής κώδικες σε Python :

### scraping\_kmeans.py

```
1 import os
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 #replace with the actual path
5 folder_path = "../"
6 file_name = "run_kmeans_hyper.err"
7
8 total_path = os.path.join(folder_path, file_name)
9
10 with open(total_path, "r") as file:
11     data = file.read()
12
13 omp_num_threads = 1
14 current_running = 'array_lock'
15 #we need just one the two, but may we need both
16 results_dict= {}
17 results_array = []
18 for line in data.splitlines():
19     words = line.split()
20     if len(words) == 0:
21         continue
22     #set the nthreads, set what is running or the exec time
23     if words[0] == 'Setting':
24         omp_num_threads = int(words[1].split('=')[-1])
25     if words[0] == 'Running':
26         temp = words[1].split('_')[2:]
27         current_running = '_'.join(temp)
28     if words[0] == 'nloops':
29         temp_res = float(words[5][0:-2])
30         if current_running not in results_dict:
31             results_dict[current_running] = {}
32             results_array[current_running] = []
33         results_dict[current_running][omp_num_threads] = temp_res
34         results_array[current_running].append(temp_res)
35
36
37 nthreads = [1, 2, 4, 8, 16, 32, 64]
38 colours = ['red', 'green', 'blue', 'cyan', 'magenta', 'gray', 'black', 'orange', 'darkGreen']
39
40 plt.figure(figsize=(12, 8))
41 counter = 0
42 for technique in results_array.keys():
43     plt.plot(nthreads, results_array[technique], linewidth=2, color=colours[counter],
44     label=technique)
45     counter += 1
46 plt.xlabel('Number of threads')
47 plt.xscale('log', base=2)
48 plt.ylabel('Time for execution (s)')
49 plt.title("Performace of the different techniques")
50 plt.grid(True)
51 plt.legend(loc='best')
52 plt.savefig("kmeans_results_hyper.png")
53 plt.close()
```

### conc\_plt.py

```
1 import re
2 from collections import defaultdict
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import numpy as np
5
6 outfile1 = "./conc_ll_1024.out"
7 outfile2 = "./conc_ll_8196.out"
8 size1 = 1024
```

```

9  size2 = 8192
10
11 throughputs = defaultdict(dict)
12
13 outfile=outfile2
14 size=size2
15
16 mech_regex = r"^(serial|coarse-grain|fine-grain|optimistic|lazy|non-blocking)$"
17 threads_regex = r"Nthreads:\s+(\d+)"
18 workload_regex = r"Workload:\s+(\d+/\d+/\d+)"
19 throughput_regex = r"Throughput\((Kops/sec)\):\s+([\d.]+)"
20
21 locking_mech = None
22 workload = None
23
24 with open(outfile, 'r') as f:
25     lines = f.readlines()
26     for line in lines:
27         mech_match = re.match(mech_regex, line)
28         if mech_match:
29             locking_mech = mech_match.group(1)
30
31         workload_match = re.search(workload_regex, line)
32         if workload_match:
33             workload = workload_match.group(1)
34
35         threads_match = re.search(threads_regex, line)
36         throughput_match = re.search(throughput_regex, line)
37         if threads_match and throughput_match:
38             threads = int(threads_match.group(1))
39             throughput = float(throughput_match.group(1))
40
41             if locking_mech and workload:
42                 throughputs[(locking_mech, workload)][threads] = throughput
43
44 for key, value in throughputs.items():
45     mech, workload = key
46     print(f"Mechanism: {mech}, Workload: {workload}")
47     for threads, throughput in sorted(value.items()):
48         print(f" Threads: {threads}, Throughput: {throughput}")
49
50
51 mechanisms = sorted(set(pair[0] for pair in throughputs.keys()))
52 workloads = sorted(set(pair[1] for pair in throughputs.keys()))
53 threads = [1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128]
54
55 #Line Plot settings
56 color_palette = ["#1f77b4", "#2ca02c", "#9467bd", "#17becf", "#bcbd22", "#8c564b"]
57
58 for workload in workloads:
59     plt.figure(figsize=(10, 7))
60
61     for idx, mech in enumerate(mechanisms):
62         throughput_values = [throughputs.get((mech, workload), {}).get(n, 0) for n in threads]
63         plt.plot(
64             threads, throughput_values,
65             marker="o", # Add markers for clarity
66             color=color_palette[idx % len(color_palette)], # Cycle colors
67             label=mech
68         )
69
70     plt.gca().set_facecolor("#e6e6fa")
71     plt.xscale("log") # Log scale for thread counts
72     plt.xticks(threads, [str(t) for t in threads])
73     plt.xlabel("Number of Threads", fontsize=12)
74     plt.ylabel("Throughput (Kops/sec)", fontsize=12)
75     plt.title(f"Throughput vs Threads for Workload Pattern:\n Search/Insert/Delete: {workload}, Size={size}", fontsize=14)
76     plt.grid(which="major", axis="y", linestyle="--", alpha=0.7)
77     plt.legend(title="Locking Mechanism", fontsize=10)
78
79     plt.tight_layout()
80     plt.savefig(f"line_plt{workload.replace('/', '_')}{size}.png", dpi=300)
81
82

```

```

83 # Bar Plot settings
84 bar_width = 0.2
85 x_indices = np.arange(len(mechanisms))
86
87 serial = [mech for mech in mechanisms if mech == "serial"]
88 non_serial_mechanisms = [mech for mech in mechanisms if mech != "serial"]
89
90
91 color_palette = ["#1f77b4", "#2ca02c", "#9467bd", "#17becf"] # Blue, Green, Purple, Cyan
92 serial_palette = ["#ff9999", "#ff6666", "#ff3333", "#cc0000"] # Shades of red for serial
93
94 for n in threads:
95     plt.figure(figsize=(12, 8))
96
97     # Plot serial bars first
98     if serial:
99         for idx, workload in enumerate(workloads):
100             serial_throughput = throughputs.get((serial[0], workload), {}).get(1, 0) # Serial
101             only at n=1
102             plt.bar(
103                 x_indices[0] + idx * bar_width,
104                 serial_throughput,
105                 width=bar_width,
106                 color=serial_palette[idx % len(serial_palette)],
107                 label=f"Serial: {workload}"
108             )
109
110     throughput_data = {
111         mech: [throughputs.get((mech, workload), {}).get(n, 0) for workload in workloads]
112         for mech in non_serial_mechanisms
113     }
114
115     for idx, workload in enumerate(workloads):
116         workload_throughput = [throughput_data[mech][idx] for mech in non_serial_mechanisms]
117         workload_norm = np.divide(workload_throughput, n)
118         plt.bar(
119             x_indices[1:] + idx * bar_width, # Offset bars for non-serial mechanisms
120             workload_norm,
121             width=bar_width,
122             color=color_palette[idx % len(color_palette)],
123             label=f"Search/Insert/Delete {workload}"
124         )
125
126     # Formatting the plot
127     plt.gca().set_facecolor("#e6e6fa")
128     plt.xticks(
129         x_indices + bar_width * (len(workloads) - 1) / 2,
130         ["Serial"] + non_serial_mechanisms, # Add "Serial" as the first x-axis label
131         rotation=45
132     )
133     plt.xlabel("Locking Mechanism", fontsize=12)
134     plt.ylabel("(Kops/sec) per thread", fontsize=12)
135     plt.title(f"Throughput Per Thread vs Locking Mechanism\n (Size={size}, Threads={n})",
136               fontsize=14)
137     plt.legend(title="Workload", fontsize=10)
138     plt.grid(axis="y", linestyle="--", alpha=0.7)
139
140     # Save the figure
141     plt.tight_layout()
142     plt.savefig(f"conc_{size}_{n}.png", dpi=300)

```