



Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών  
Παράλληλα Υπολογιστικά Συστήματα  
Σεπτέμβριος 2019

## **Παραλληλοποίηση Αλγορίθμου Προσομοίωσης Μεταφοράς Θερμότητας**

**Γιώργος Κατσογιάννης-Μεϊμαράκης**  
sdi1400065@di.uoa.gr

**Γιάννης Χήρας**  
sdi1400225@di.uoa.gr



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Μεταγλώττιση &amp; Εκτέλεση</b>	<b>1</b>
2.1	Μεταγλώττιση . . . . .	1
2.2	Εκτέλεση . . . . .	1
<b>3</b>	<b>Εργαλεία Ανάπτυξης Project</b>	<b>1</b>
3.1	Version Control (Git/Github) . . . . .	1
<b>4</b>	<b>Οργάνωση Αρχείων &amp; Φακέλων</b>	<b>2</b>
4.1	Οργάνωση Αρχείων . . . . .	2
<b>5</b>	<b>Βελτιωμένο Πρόγραμμα MPI</b>	<b>2</b>
5.1	Γενικά . . . . .	2
5.2	Ανάλυση Βελτιώσεων . . . . .	2
5.2.1	Διαμοιρασμός σε 2 Διαστάσεις . . . . .	2
5.2.2	Άλλω Εξωτερικών Σημείων . . . . .	2
5.2.3	Workflow Επικοινωνιών - Υπολογισμός . . . . .	2
5.2.4	Πρώτα Receive - Μετά Send . . . . .	2
5.2.5	Datatypes Σειρών - Στηλών . . . . .	2
5.2.6	Υπολογισμός Γειτόνων . . . . .	2
5.2.7	Αποφυγή Ifs για Επικοινωνίες Γειτόνων . . . . .	2
5.2.8	Γείτονες σε ίδιο κόμβο . . . . .	2
5.2.9	Persisten Communication . . . . .	2
5.2.10	Δυναμικοί Πίνακες . . . . .	2
5.2.11	11 ??? . . . . .	3
5.2.12	Compile με -O3 . . . . .	3
5.3	Χρόνοι . . . . .	3
5.4	Speed-up . . . . .	5
5.5	Efficiency . . . . .	5
<b>6</b>	<b>Βελτιωμένο Πρόγραμμα MPI με Σύγκλιση</b>	<b>5</b>
6.1	Γενικά . . . . .	5
6.2	Ανάλυση Βελτιώσεων . . . . .	5
6.3	Χρόνοι . . . . .	5
6.4	Speed-up . . . . .	6
6.5	Efficiency . . . . .	6
<b>7</b>	<b>Βελτιωμένο Υβριδικό Πρόγραμμα MPI &amp; OpenMP με Σύγκλιση</b>	<b>7</b>
7.1	Γενικά . . . . .	7
7.2	Ανάλυση Βελτιώσεων . . . . .	8
7.3	Χρόνοι . . . . .	8
7.4	Speed-up . . . . .	8
7.5	Efficiency . . . . .	8

# 1 Εισαγωγή

HEAT2D is based on a simplified two-dimensional heat equation domain decomposition. The initial temperature is computed to be high in the middle of the domain and zero at the boundaries. The boundaries are held at zero throughout the simulation. During the time-stepping, an array containing two domains is used; these domains alternate between old data and new data. At each time step, worker processes must exchange border data with neighbors, because a grid point's current temperature depends upon its previous time step value plus the values of the neighboring grid points.

Για κάθε τετράγωνο του πλέγματος η τιμή της θερμοκρασίας στο επόμενο time-step υπολογίζεται από την εξής εξίσωση:

$$\begin{aligned} u'[x][y] = & u[x][y] \\ & + c_x * (u[x+1][y] + u[x-1][y] - 2 * u[x][y]) \\ & + c_y * (u[x][y+1] + u[x][y-1] - 2 * u[x][y]) \end{aligned}$$

Όπου  $c_x = c_y = 0.1$  σταθερές.

## 2 Μεταγλώττιση & Εκτέλεση

### 2.1 Μεταγλώττιση

Τα προγράμματα μεταγλωττίζονται με τις παρακάτω εντολές και παράγουν ένα εκτελέσιμο το οποίο δίνεται προς εκτέλεση στην ουρά του συστήματος.

Για τη μεταγλώττιση προγραμμάτων που θα χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις, δίνουμε στον compiler το flag -O3 για τη βελτιστοποίηση του κώδικα σε χαμηλό επίπεδο.

- `mpi_heat2Dn.c`: Βελτιωμένος κώδικας MPI χωρίς σύγκλιση

```
mpicc -O3 mpi_heat2Dn.c -o mpi_heat2Dn.x
```

- `mpi_heat2Dn_conv.c`: Βελτιωμένος κώδικας MPI με σύγκλιση

```
mpicc -O3 mpi_heat2Dn_conv.c -o mpi_heat2Dn.x
```

- `mpi_heat2Dn_hybrid.c`: Βελτιωμένος υβριδικός κώδικας MPI + OpenMP με σύγκλιση

```
mpicc -O3 -fopenmp mpi_heat2Dn_hybrid.c -o mpi_heat2Dn.x
```

### 2.2 Εκτέλεση

Για την εκτέλεση του προγράμματος στο cluster του hellasgrid.gr χρησιμοποιούμε το script `pbs_script.sh`

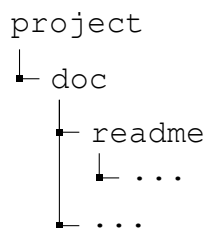
```
qsub pbs_script.sh
```

## 3 Εργαλεία Ανάπτυξης Project

### 3.1 Version Control (Git/Github)

Για την καλύτερη διαχείριση των εκδόσεων του κώδικα και των αλλαγών χρησιμοποιείται το πρόγραμμα `git` και η πλατφόρμα Github.

## 4 Οργάνωση Αρχείων & Φακέλων



Ο κώδικας οργανώνεται σε διαφορετικά αρχεία ανάλογα με το σκοπό και τη λειτουργικότητά του. Συγκεκριμένα στα εξής αρχεία:

### 4.1 Οργάνωση Αρχείων

## 5 Βελτιωμένο Πρόγραμμα MPI

### 5.1 Γενικά

### 5.2 Ανάλυση Βελτιώσεων

#### 5.2.1 Διαμοιρασμός σε 2 Διαστάσεις

Χήρας

#### 5.2.2 Άλλο Εξωτερικών Σημείων

Χήρας

#### 5.2.3 Workflow Επικοινωνιών - Υπολογισμός

Χήρας

#### 5.2.4 Πρώτα Receive - Μετά Send

Χήρας

#### 5.2.5 Datatypes Σειρών - Στηλών

Κάτσο

#### 5.2.6 Υπολογισμός Γειτόνων

Κάτσο

#### 5.2.7 Αποφυγή Ifs για Επικοινωνίες Γειτόνων

Κάτσο

#### 5.2.8 Γείτονες σε ίδιο κόμβο

Κάτσο

#### 5.2.9 Persisten Communication

Χήρας

#### 5.2.10 Δυναμικοί Πίνακες

Χήρας

## 5.2.11 11 ???

## 5.2.12 Compile με -O3

Χήρας Χρειάζεται να μπει εδώ; Το αναφέρω στη μετταγλώττιση

## 5.3 Χρόνοι

Στο παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μετρήσεις χρόνων που πήραμε τρέχοντας το πρόγραμμα mpi\_heat2Dn στο cluster του hellasgrid.

Nodes	Tasks	$80 \times 64$	$160 \times 128$	$320 \times 256$	$640 \times 512$	$1280 \times 1024$	$2560 \times 2048$	$5120 \times 4096$
1	1	0.003476	0.013983	0.116129	0.464293	1.907506	7.492858	30.003448
1	4	0.001333	0.004159	0.014871	0.117549	0.472859	1.935913	7.563494
2	16	0.118759	0.153217	0.013015	0.012097	0.098547	0.053514	2.033478
8	64	0.281022	0.414862	0.061213	0.301717	0.326839	0.316296	0.527302
16	128	0.041406	0.131406	0.433416	0.321896	0.487963	0.296483	0.274705
20	160	0.071904	0.089528	0.596713	0.487695	0.521694	0.273331	0.205910

Table 1: Χρόνοι Εκτέλεσης mpi\_heat2Dn

Στη συνέχεια αναπαριστάμε γραφικά την αλλαγή του χρόνου εκτέλεσης για κάθε μέγεθος του προβλήματος καθώς αυξάνονται τα tasks που εργάζονται για να το λύσουν.

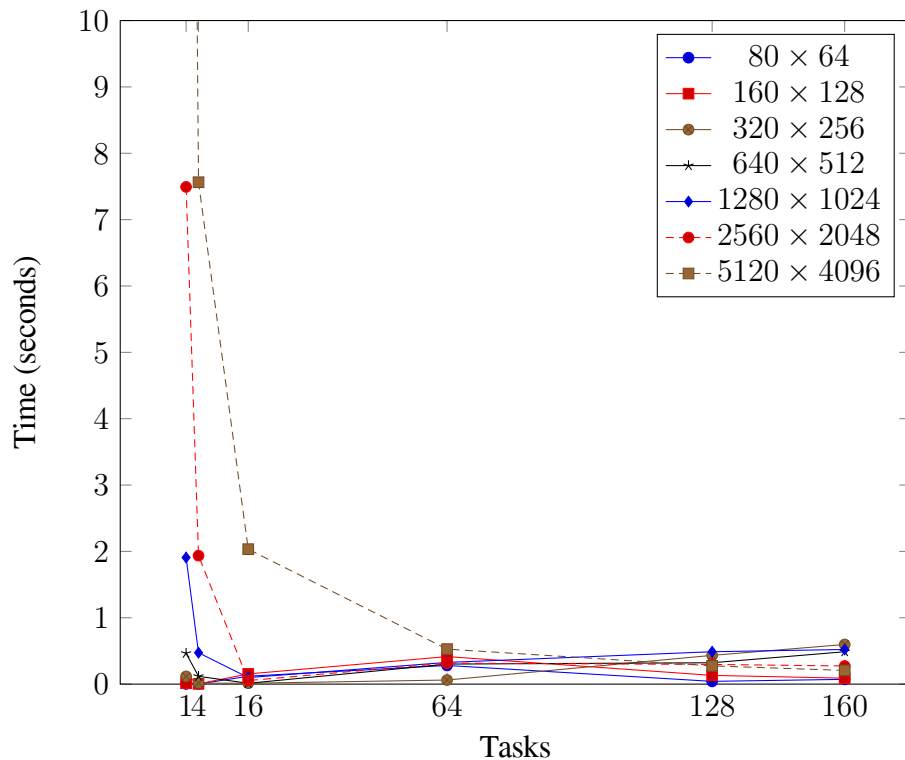


Figure 1: Χρόνοι Εκτέλεσης mpi\_heat2Dn προς πλήθος Tasks

Nodes	Tasks	$80 \times 64$	$160 \times 128$	$320 \times 256$	$640 \times 512$	$1280 \times 1024$	$2560 \times 2048$	$5120 \times 4096$
1	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	4	2.61	3.36	7.81	3.95	4.03	3.87	3.97
2	16	0.03	0.09	8.92	38.38	19.36	140.02	14.75
8	64	0.01	0.03	1.90	1.54	5.84	23.69	56.90
16	128	0.08	0.11	0.27	1.44	3.91	25.27	109.22
20	160	0.05	0.16	0.19	0.95	3.66	27.41	145.71

Table 2: Speed-up για το mpi\_heat2Dn

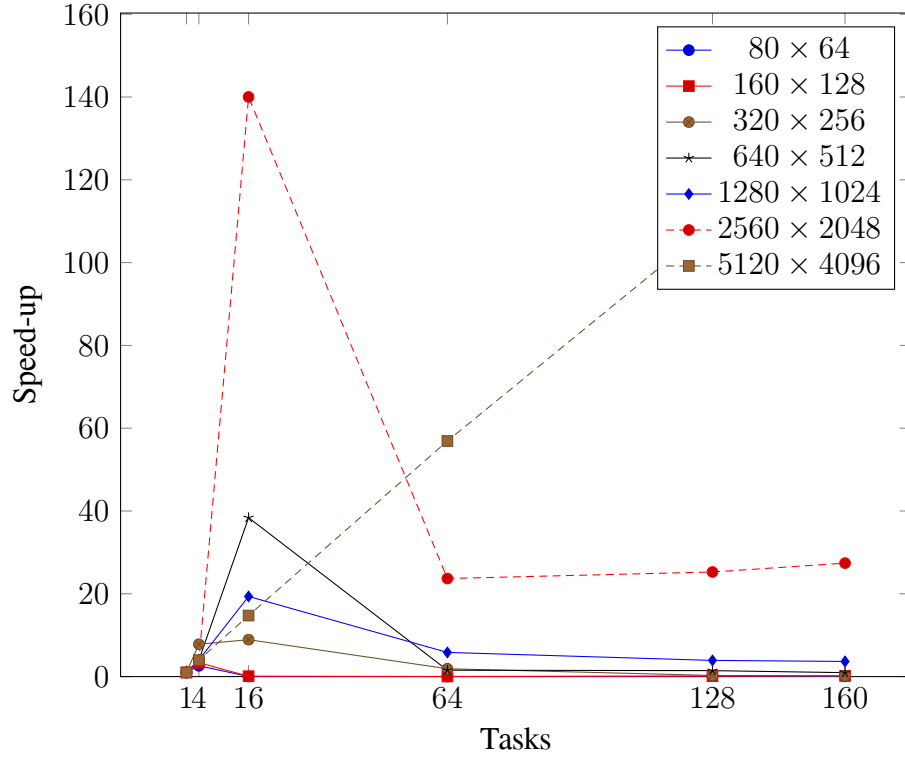


Figure 2: Speed-up του mpi\_heat2Dn προς πλήθος Tasks

Nodes	Tasks	$80 \times 64$	$160 \times 128$	$320 \times 256$	$640 \times 512$	$1280 \times 1024$	$2560 \times 2048$	$5120 \times 4096$
1	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	4	2.61	3.36	7.81	3.95	4.03	3.87	3.97
2	16	0.01	0.05	4.46	19.19	9.68	70.01	7.38
8	64	0.00	0.00	0.24	0.19	0.73	2.96	7.11
16	128	0.01	0.01	0.02	0.09	0.24	1.58	6.83
20	160	0.00	0.01	0.01	0.05	0.18	1.37	7.29

Table 3: Efficiency για το mpi\_heat2Dn

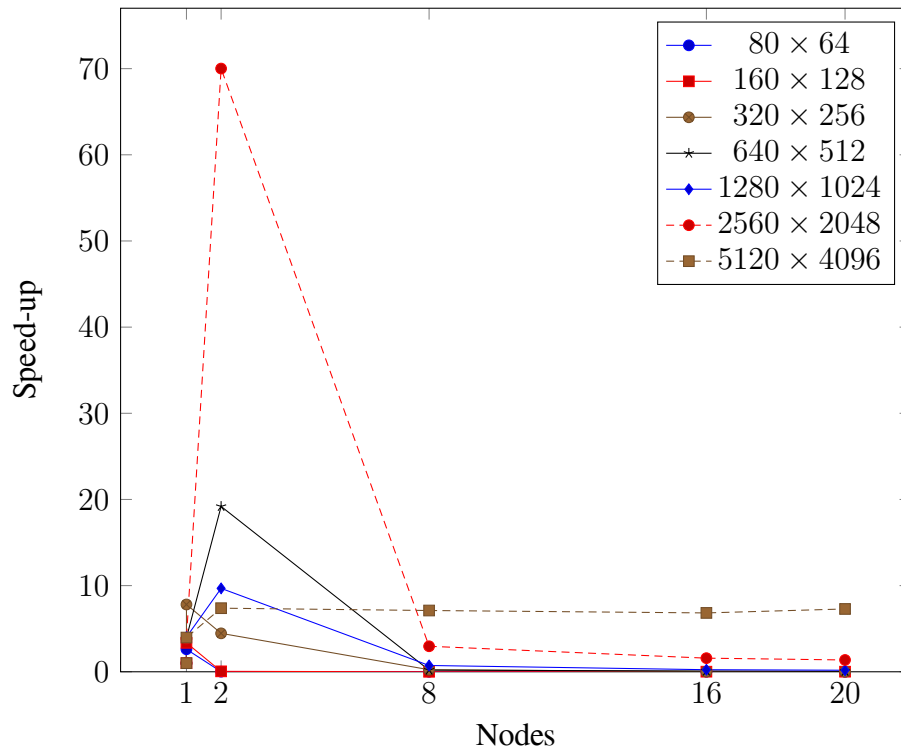


Figure 3: Efficiency του mpi\_heat2Dn προς πλήθος Nodes

## 5.4 Speed-up

## 5.5 Efficiency

# 6 Βελτιωμένο Πρόγραμμα MPI με Σύγκλιση

## 6.1 Γενικά

Κάτσο

## 6.2 Ανάλυση Βελτιώσεων

Κάτσο

## 6.3 Χρόνοι

Nodes	Tasks	80 × 64	160 × 128	320 × 256	640 × 512	1280 × 1024	2560 × 2048	5120 × 4096
1	1	0.003599	0.014306	0.116803	1.912541	3.587840	14.385803	30.130099
1	4	0.001452	0.004271	0.015229	0.468824	0.469402	1.943977	7.594688
2	16	0.012620	0.802080	0.105832	1.995662	2.004883	2.232759	0.023318
8	64	0.704997	0.398689	0.191372	0.203051	0.533432	0.564690	0.045449
16	128	0.567120	0.533837	0.325748	0.316250	0.384510	0.475910	0.071355
20	160	0.400491	0.356482	0.354197	0.342627	0.318850	0.214963	0.105473

Table 4: Χρόνοι Εκτέλεσης mpi\_heat2Dn\_conv



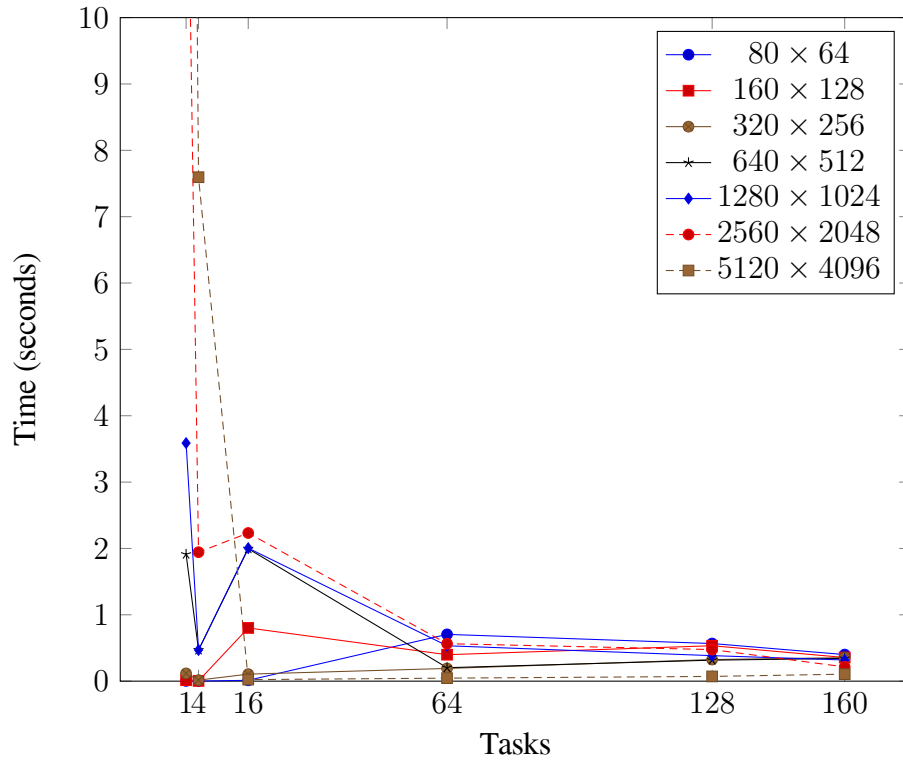


Figure 4: Χρόνοι Εκτέλεσης mpi\_heat2Dn\_conv προς πλήθος Tasks

## 6.4 Speed-up

Nodes	Tasks	$80 \times 64$	$160 \times 128$	$320 \times 256$	$640 \times 512$	$1280 \times 1024$	$2560 \times 2048$	$5120 \times 4096$
1	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	4	2.48	3.35	7.67	4.08	7.64	7.40	3.97
2	16	0.29	0.02	1.10	0.96	1.79	6.44	1292.14
8	64	0.01	0.04	0.61	9.42	6.73	25.48	662.94
16	128	0.01	0.03	0.36	6.05	9.33	30.23	422.26
20	160	0.01	0.04	0.33	5.58	11.25	66.92	285.67

Table 5: Speed-up για το mpi\_heat2Dn\_conv

## 6.5 Efficiency

Nodes	Tasks	$80 \times 64$	$160 \times 128$	$320 \times 256$	$640 \times 512$	$1280 \times 1024$	$2560 \times 2048$	$5120 \times 4096$
1	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	4	2.48	3.35	7.67	4.08	7.64	7.40	3.97
2	16	0.14	0.01	0.55	0.48	0.89	3.22	646.07
8	64	0.00	0.00	0.08	1.18	0.84	3.18	82.87
16	128	0.00	0.00	0.02	0.38	0.58	1.89	26.39
20	160	0.00	0.00	0.02	0.28	0.56	3.35	14.28

Table 6: Efficiency για το mpi\_heat2Dn\_conv

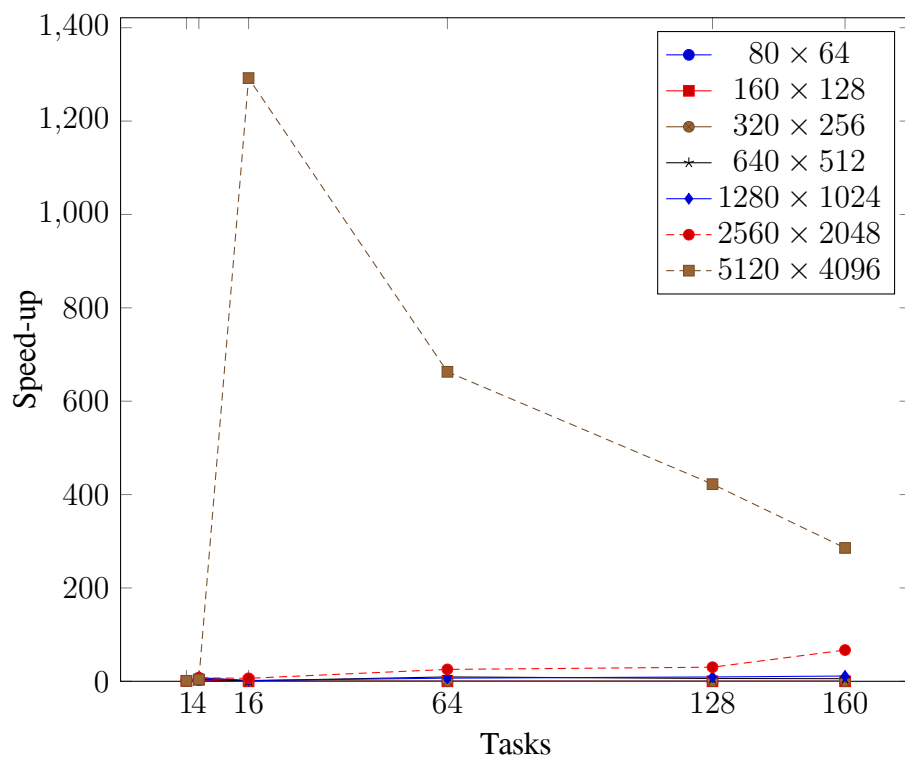


Figure 5: Speed-up του mpi\_heat2Dn\_convn προς πλήθος Tasks

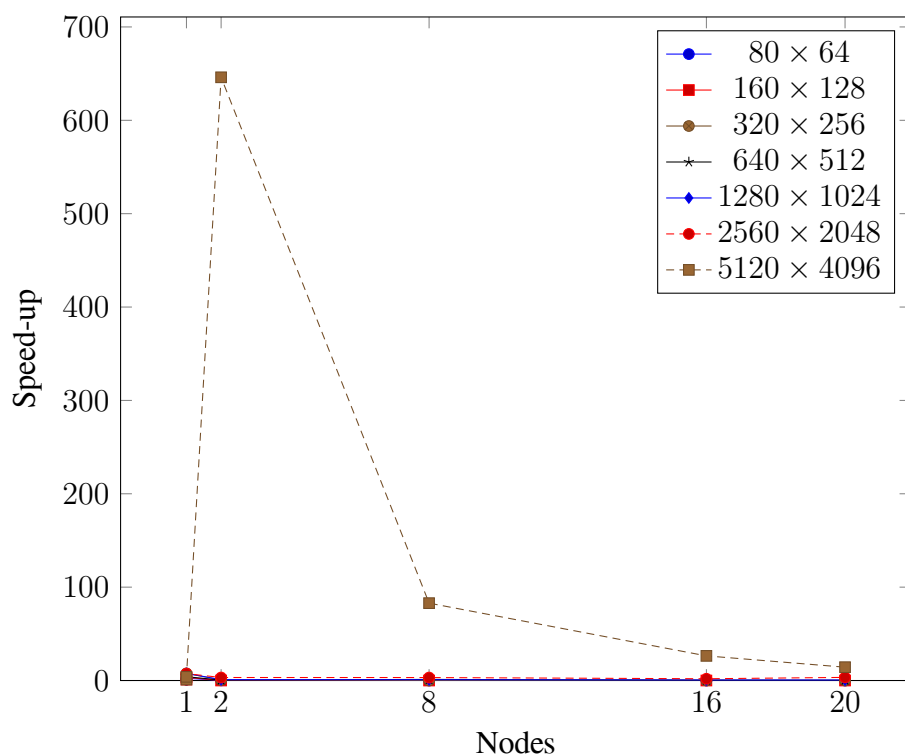


Figure 6: Efficiency του mpi\_heat2Dn\_convn προς πλήθος Nodes

## 7 Βελτιωμένο Υβριδικό Πρόγραμμα MPI & OpenMP με Σύγκλιση

### 7.1 Γενικά

Κάτσο

## 7.2 Ανάλυση Βελτιώσεων

Κάτσο

## 7.3 Χρόνοι

Nodes	PPN	Threads	$80 \times 64$	$160 \times 128$	$320 \times 256$	$640 \times 512$	$1280 \times 1024$	$2560 \times 2048$	$5120 \times 4096$
1	1	4	0.017807	0.076955	0.849709	6.237978	18.845583	94.873767	419.162658
1	2	2	0.010130	0.054823	0.302259	4.974396	5.028509	76.641657	346.727030
1	2	4	0.010141	0.042359	0.573377	5.160128	13.141330	77.193930	346.580322
2	2	8	0.041168	0.046581	0.307811	4.093556	1.288874	4.958769	343.488488
2	4	4	0.048170	0.054576	0.117058	0.605236	1.287806	4.941937	37.707930
2	8	2	0.050319	0.113991	0.077582	0.397800	2.373664	9.473987	19.348335
2	8	4	0.045401	0.053395	0.090122	0.350299	13.168804	75.159566	19.255832
8	32	2	0.0451497	1.458103	1.566198	2.001983	2.741039	3.373491	4.997810
8	32	4	0.0571659	1.054486	1.977853	2.744596	5.358996	9.114651	13.694557
8	16	4	6.149755	0.994236	2.094377	3.649588	5.001397	7.811678	9.335702
8	8	8	0.084391	0.197436	0.374159	0.569843	0.742369	1.422739	4.036750
16	64	2	2.547896	2.784369	2.974612	2.897413	3.014716	3.364197	3.941678
16	64	4	1.557396	2.317885	2.569332	3.468102	3.671539	5.039125	8.997672
16	32	4	0.686951	1.247556	2.648337	5.276559	4.168227	5.066149	7.330571
16	16	8	0.0579463	1.722579	2.165993	3.943687	4.379551	4.089271	9.325899

Table 7: Χρόνοι Εκτέλεσης mpi\_heat2Dn\_hybrid

## 7.4 Speed-up

Nodes	PPN	Threads	$80 \times 64$	$160 \times 128$	$320 \times 256$	$640 \times 512$	$1280 \times 1024$	$2560 \times 2048$	$5120 \times 4096$
1	1	4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	2	2	1.76	1.40	2.81	1.25	3.75	1.24	1.21
1	2	4	1.76	1.82	1.48	1.21	1.43	1.23	1.21
2	2	8	0.43	1.65	2.76	1.52	14.62	19.13	1.22
2	4	4	0.37	1.41	7.26	10.31	14.63	19.20	11.12
2	8	2	0.35	0.68	10.95	15.68	7.94	10.01	21.66
2	8	4	0.39	1.44	9.43	17.81	1.43	1.26	21.77
8	32	2	0.39	0.05	0.54	3.12	6.88	28.12	83.87
8	32	4	0.31	0.07	0.43	2.27	3.52	10.41	30.61
8	16	4	0.00	0.08	0.41	1.71	3.77	12.15	44.90
8	8	8	0.21	0.39	2.27	10.95	25.39	66.68	103.84
16	64	2	0.01	0.03	0.29	2.15	6.25	28.20	106.34
16	64	4	0.01	0.03	0.33	1.80	5.13	18.83	46.59
16	32	4	0.03	0.06	0.32	1.18	4.52	18.73	57.18
16	16	8	0.31	0.04	0.39	1.58	4.30	23.20	44.95

Table 8: Speed-up για το mpi\_heat2Dn\_hybrid

## 7.5 Efficiency

<b>Nodes</b>	<b>PPN</b>	<b>Threads</b>	$80 \times 64$	$160 \times 128$	$320 \times 256$	$640 \times 512$	$1280 \times 1024$	$2560 \times 2048$	$5120 \times 4096$
1	1	4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	2	2	1.76	1.40	2.81	1.25	3.75	1.24	1.21
1	2	4	1.76	1.82	1.48	1.21	1.43	1.23	1.21
2	2	8	0.22	0.83	1.38	0.76	7.31	9.57	0.61
2	4	4	0.18	0.71	3.63	5.15	7.32	9.60	5.56
2	8	2	0.18	0.34	5.48	7.84	3.97	5.01	10.83
2	8	4	0.20	0.72	4.71	8.90	0.72	0.63	10.88
8	32	2	0.05	0.01	0.07	0.39	0.86	3.52	10.48
8	32	4	0.04	0.01	0.05	0.28	0.44	1.30	3.83
8	16	4	0.00	0.01	0.05	0.21	0.47	1.52	5.61
8	8	8	0.03	0.05	0.28	1.37	3.17	8.34	12.98
16	64	2	0.00	0.00	0.02	0.13	0.39	1.76	6.65
16	64	4	0.00	0.00	0.02	0.11	0.32	1.18	2.91
16	32	4	0.00	0.00	0.02	0.07	0.28	1.17	3.57
16	16	8	0.02	0.00	0.02	0.10	0.27	1.45	2.81

Table 9: Efficiency για το mpi\_heat2Dn\_hybrid