Παράλληλα και Διανεμημένα Συστήματα Εργασία 3 .
CUDA Ising Model

Μιχάλης Καρατζάς AEM:9137 email:mikalaki@ece.auth.gr

Ομάδα στο elearning: Ομάδα Μ

Github link για το project :https://github.com/mikalaki/Ising_model_CUDA

1. **Σύντομη Περιγραφή των υλοποιήσεων.**
   - **V0-Sequential**: Η Ακολουθιακή υλοποίηση του προγράμματος στην C, υλοποιεί την εξέλιξη του Ising model , με τις τροποποιήσεις που αναφέρθηκαν και με το template της συνάρτησης ising() που μας δόθηκε στον online tester. Συγκεκριμένα , η συνάρτηση ising(), καλεί την nextStateCalculation() ,τόσες φορές όσες και τα βήματα στα οποία θέλουμε να εξελίξουμε το ising μοντέλο. Αυτή η συνάρτηση , για κάθε ένα σημείο του πλέγματος(μέσω for επαναλήψεων) καλεί την getTheSpin(),η οποία δίνει την ροπή (spin) του σημείου στην αμέσως επόμενη κατάσταση του φερομαγνητικού υλικού ,με βάση την κατάσταση των γειτόνων του, στο δεδομένο πλέγμα και το εκχωρεί στον δεύτερο πίνακα G (secondG). Αφού ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, η συνάρτηση ising() κάνει την αλλαγή των *pointer* όπως μας ζητήθηκε,μέσω της pointer_swap() ενώ σε περίπτωση περιττού αριθμού σημείων , γίνεται αντιγραφή (memcpy()) των σημείων του δευτέρου πίνακα G στον πρώτο πίνακα, ώστε ο πρώτος(δοθέν) πίνακας να είναι ενημερωμένος με τα τελευταία σημεία της εξέλιξης του μοντέλου. Για τις οριακές συνθήκες του πλέγματος , λόγο περιοδικών ιδιοτήτων, χρησιμοποιείται αριθμητική με *modulus*. (προστίθεται +n , πριν υπολογιστεί το *modulo* ,καθώς το *modulo* στην C ταυτίζεται με το υπόλοιπο της διαίρεσης και δίνει και αρνητικές τιμές).
   - **V1**: Στην πρώτη υλοποίηση με CUDA, μας ζητήθηκε ένα *thread* να βρίσκει την ροπή (spin) ενός σημείου(1 *thread* για 1 σημείο). Έτσι τροποποιήθηκε ο σειριακός κώδικας ,ώστε να γίνουν οι απαραίτητες δεσμεύσεις και "αντιγραφές- μεταφορές " στην μνήμη της GPU,ώστε να μπορεί να υλοποιηθεί το πρόγραμμα μας αξιοποιώντας την κάρτα γραφικών .Επίσης η μέθοδος nextStateCalculation() , καλείται σαν *kernel* με ένα *grid* από *threads*, συνολικών διαστάσεων ί(gridDim.x*blockDim*x>=n κ gridDim.y*blockDim*y>=n) όπου n μια πλευρά του δοθέν πλέγματος. Η συνάρτηση αυτή ,αφού ελέγξει ώστε να μην "εκτελούν "την getTheSpin() *threads* που "περισσεύουν ",καλεί την __device__ getTheSpin() , ώστε κάθε *thread* να υπολογίσει την ροπή του σημείου που του αντιστοιχεί. Ενώ πλέον η pointer_swap() μέσα στην ising(), αλλάζει τους *pointers* για τους αντίστοιχους πίνακες της κάρτας γραφικών (*device*).* *
   - **V2**: Σε αυτή την υλοποίηση,σε σχέση με την παραπάνω , ο κώδικας του *kernel* nextStateClaculation(),τροποποιείται έτσι ώστε ένα *thread* να υπολογίζει το *spin* για ένα σύνολο από σημεία , το οποίο εξαρτάται τις παραμέτρους του *grid* .Τα σημεία αυτά απέχουν κατά τον X και τον Y άξονα απόσταση ίση με strideX και strideY, αντίστοιχα , η οποία υπολογίζεται στην παραπάνω μέθοδο και εξαρτάται από τις παραμέτρους του grid . Οι διαστάσεις του *grid* και των *block* του , επιλέγονται από τα *#define* που υπάρχουν στο πάνω μέρος του κώδικα . Ενώ οι τιμές που έχουν επιλεχθεί δίνουν βέλτιστη απόδοση.
   - **V3**: Η συγκεκριμένη υλοποίηση βασίζεται στην V2 (οπότε στην δομή της ισχύει ότι και για την παραπάνω) ωστόσο έχει τροποποιηθεί , έτσι ώστε τα *thread* ενός *block* , για τον υπολογισμό του spin του σημείου που υπολογίζουν , να μην χρειάζεται να διαβάζουν πληροφορία από τον πίνακα G από την *ολική μνήμη(global memory)* της κάρτας γραφικών, αλλά από ένα τμήμα του G (μόνο το απαραίτητο σύνολο σημείων), που έχει μεταφερθεί στην *shared memory* του μπλοκ από τα ίδια τα *thread* του *block στην αρχή του kernel nextStateClaculation(),* με στόχο την επίτευξη γρηγορότερης επίδοσης. Επίσης για *blockDim.x>5* και *blockDim.y>5*, μεταφέρεται και ο πίνακας των βαρών (weights),δίνοντας μια επιπλέον πολύ μικρή βελτίωση στον χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος (σχεδόν αμελητέα) .

   Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τον κώδικα και κάθε υλοποίηση υπάρχουν στα σχόλια του κώδικα.

2. **Μετρήσεις, γραφήματα, σχόλια χρόνων εκτέλεσης και συμπεράσματα.**

   I. Το σύστημα στο οποίο πραγματοποιήθηκαν υλοποίηση και μετρήσεις:

Η υλοποίηση και οι μετρήσεις έγιναν σε ένα laptop με επεξεργαστή i5-2410M και 4 GB *RAM* , το οποίο έχει κάρτα γραφικών NVIDIA gt 540m με μνήμη 2GB. Η κάρτα έχει Compute Capability (CC) 2.1 ,με αποτέλεσμα να μην είναι εγκατεστημένη στο σύστημα η τελευταία έκδοση CUDA (10.2) , άλλα η CUDA 8 και λόγω CC του υλικού ,δεν ήταν εφικτό να χρησιμοποιηθεί Unified Memory (π.χ. cudaMallocManaged()).Η κάρτα διαθέτει 2 Multiprocessors(MPs) με 48 cuda threads ο καθένας. Σε κάθε MP μπορούν να "τρέχουν" έως 1536 thread. Περισσότερες πληροφορίες για την κάρτα γραφικών του συστήματος βρίσκονται εδώ.

II. A) Επιλογή των διαστάσεων των *block* του V1(μετρήσεις V1 για διαφορά *block size*)

Οι μετρήσεις για την επιλογή του μεγέθους του *block* στην V1 έγιναν για n=1000 και k=20 μέσω του *profiler* της Nvidia για CUDA (nvprof) και μετρήθηκε ο χρόνος εκτέλεσης του kernel (nextStateCalculation()). Παρακάτω οι μετρήσεις :

Block Size	V1 kernel – Time	Calls	(avg	min	max) --
1X1	21.8176s	20	(1.09088s	1.09082s	1.09099s)
2x2	5.73757s	20	(286.88ms	286.73ms	287.38ms)
4x4	1.62129s	20	(81.065ms	80.999ms	81.237ms)
8x8	558.15ms	20	(27.908ms	27.865ms	27.956ms)
12x12	472.54ms	20	(23.627ms	23.578ms	23.669ms)
16x16	469.43ms	20	(23.471ms	23.396ms	23.538ms)
20x20	544.69ms	20	(27.234ms	27.187ms	27.289ms)
24x24	618.80ms	20	(30.940ms	30.872ms	31.002ms)
28x28	721.74ms	20	(36.087ms	36.064ms	36.121ms)
32x32	740.46ms	20	(37.023ms	36.994ms	37.042ms)

Από τις μετρήσεις αυτές βλέπουμε ότι στο V1 έχουμε βέλτιστη επίδοση για block με διαστάσεις 16x16 , επομένως θα θέσουμε αυτές τις διαστάσεις για τις μετρήσεις τις ενότητας III (ενδέχεται για πρόβλημα με διαφορετικό n , καθώς οι διαστάσεις του *grid* εξαρτώνται από το n , να μην είναι βέλτιστο αυτό το *configuration*) .

Πίνακας 1:Χρόνοι εκτέλεσης υλοποίησης V1,μεταβαλλόμενου block size ,n=1000,k=20).

B) Επιλογή των διαστάσεων του *Grid* και των *block* για τα V2,V3.

ΟΙ διαστάσεις για το *Grid* και τα block επιλέχθηκαν έπειτα από μετρήσεις του χρόνου που απαιτεί το *kernel*(nextStateCalculation()) να εκτελεστεί στις υλοποιήσεις V2 και V3 , για ένα σύνολο διαστάσεων των *block* και του *grid*. Οι μετρήσεις έγιναν για n=1000 και k=20 μέσω του *profiler* της Nvidia για CUDA (nvprof) . Παρακάτω οι μετρήσεις:

Grid Size	Block Size	V2 kernel – Time	Calls	(avg	min	max) --	V3 kernel- Time	Calls	(avg	min	max) --
4x4	2x2	5.26403s	20	(263.20ms	262.87ms	263.59ms)	2.63122s	20	(131.56ms	130.78ms	132.47ms)
4x4	4x4	1.54508s	20	(77.254ms	75.560ms	78.823ms)	709.48ms	20	(35.474ms	35.407ms	35.688ms)
4x4	8x8	480.02ms	20	(24.001ms	23.761ms	24.353ms)	252.44ms	20	(12.622ms	12.586ms	12.658ms)
4x4	12x12	439.43ms	20	(21.971ms	21.944ms	22.016ms)	226.08ms	20	(11.304ms	11.268ms	11.341ms)
4x4	16x16	369.01ms	20	(18.451ms	18.400ms	18.500ms)	198.69ms	20	(9.9343ms	9.9202ms	9.9518ms)
4x4	20x20	369.52ms	20	(18.476ms	18.454ms	18.502ms)	202.81ms	20	(10.140ms	10.126ms	10.154ms)
4x4	24x24	347.42ms	20	(17.371ms	17.320ms	17.389ms)	196.05ms	20	(9.8024ms	9.7665ms	9.8429ms)
4x4	28x28	378.79ms	20	(18.939ms	18.916ms	18.959ms)	228.46ms	20	(11.423ms	11.406ms	11.439ms)
4x4	32x32	352.28ms	20	(17.614ms	17.594ms	17.625ms)	209.67ms	20	(10.484ms	10.453ms	10.532ms)
1x1	24x24	684.44ms	20	(34.222ms	34.183ms	34.259ms)	397.88ms	20	(19.894ms	19.808ms	19.968ms)
2x2	24x24	362.27ms	20	(18.114ms	18.089ms	18.128ms)	217.87ms	20	(10.894ms	10.866ms	10.909ms)
4x4	24x24	347.42ms	20	(17.371ms	17.320ms	17.389ms)	196.05ms	20	(9.8024ms	9.7665ms	9.8429ms)
6x6	24x24	353.75ms	20	(17.687ms	17.672ms	17.698ms)	196.78ms	20	(9.8392ms	9.7757ms	9.8609ms)
8x8	24x24	356.72ms	20	(17.836ms	17.824ms	17.845ms)	217.32ms	20	(10.866ms	10.853ms	10.878ms)
12x12	24x24	361.29ms	20	(18.065ms	18.044ms	18.084ms)	212.12ms	20	(10.606ms	10.583ms	10.635ms)
16x16	24x24	364.44ms	20	(18.222ms	18.198ms	18.235ms)	198.66ms	20	(9.9331ms	9.8995ms	9.9456ms)
20x20	24x24	370.92ms	20	(18.546ms	18.530ms	18.557ms)	222.81ms	20	(11.140ms	11.114ms	11.151ms)

πίνακας 2:Χρόνοι εκτέλεσης υλοποιήσεων V2,V3 ,μεταβαλλόμενων block size και grid size (n=1000 , k =20).

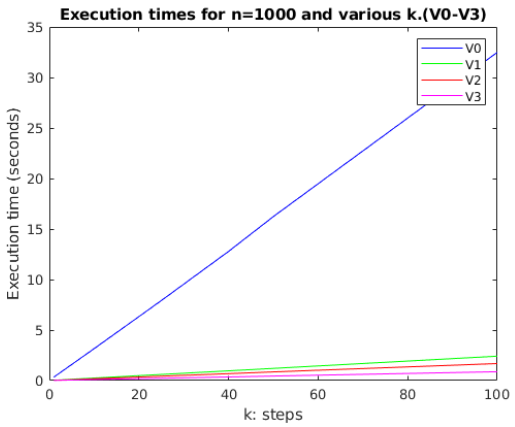
Από τις παραπάνω μετρήσεις εύκολα μπορούμε να καταλάβουμε ότι έχουμε βέλτιστη απόδοση για *block size* 24x24 και *grid size* 4x4. Επίσης βλέπουμε ότι οι διαστάσεις του *block* παίζουν σημαντικότερο ρόλο από αυτές του *grid*. Το παραπάνω *Configuration* χρησιμοποιείται παρακάτω .

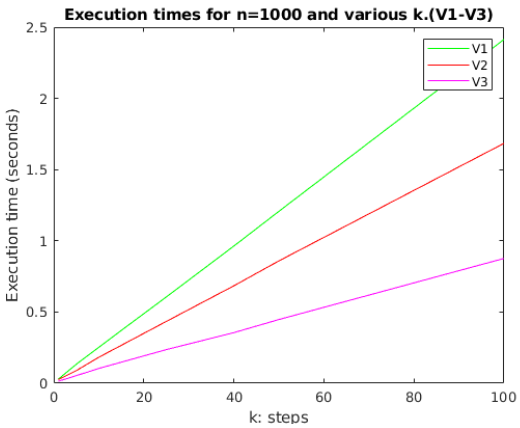
--> Λόγω τετράγωνης συμμετρίας του προβλήματος επιλέξαμε τετράγωνου σχήματος *block* και *grid*.

III. Μετρήσεις χρόνου εκτέλεσης κάθε υλοποίησης για διάφορα n και k.

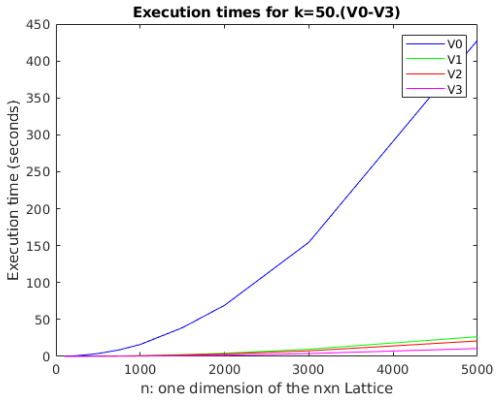
Στις μετρήσεις παρακάτω , υπολογίζεται ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος (συνάρτηση ising()) και όχι μόνο , ο χρόνος της συνάρτησης (*kernel*) nextStateCalculation() ,καθώς μας αφορά η λύση του συνολικού προβλήματος.

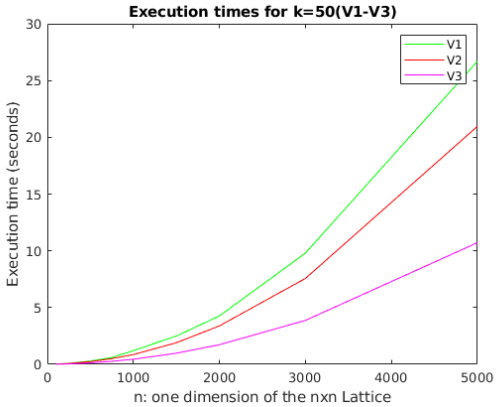
A) Γραφήματα για σταθερό n και μεταβαλλόμενο k.

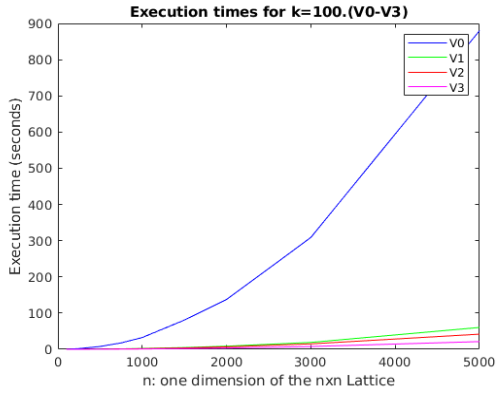


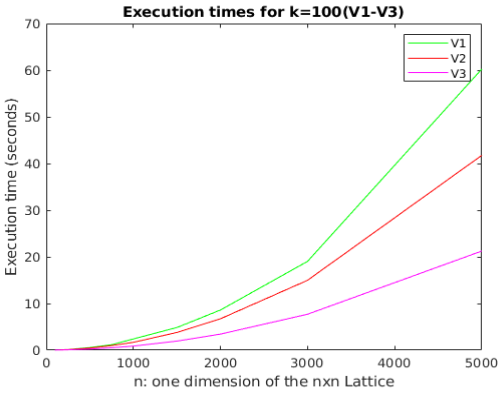


B) Γραφήματα για σταθερό k , μεταβαλλόμενο n.









C) <u>Πίνακες μετρήσεων:</u>

n	k	V3	V2	V1	V0
100	100	0.031023	0.038176	0.035095	0.3153
100	50	0.012834	0.018831	0.026908	0.158297
100	40	0.010082	0.020191	0.016612	0.134378
100	25	0.005894	0.010373	0.007724	0.082458
100	10	0.002771	0.003669	0.003126	0.040409
100	5	0.001775	0.002184	0.001642	0.020819

n	k	V3	V2	V1	V0
500	100	0.246216	0.458328	0.569058	7.815543
500	50	0.127999	0.23591	0.289977	3.916218
500	40	0.105586	0.188875	0.242501	3.136734
500	25	0.064416	0.123426	0.154311	1.958934
500	10	0.037021	0.060731	0.07243	0.786562
500	5	0.0141	0.026088	0.036686	0.396289
500	1	0.003784	0.005932	0.007258	0.081865

n	k	V3	V2	V1	V0
1000	100	0.876282	1.684512	2.414034	32.487474
1000	50	0.447298	0.858948	1.206911	16.227674
1000	40	0.355322	0.684114	0.963061	12.782729
1000	25	0.236068	0.434011	0.606377	7.92002
1000	10	0.103837	0.182318	0.252335	3.161162
1000	5	0.053232	0.08851	0.13281	1.594185
1000	1	0.013779	0.02577	0.028346	0.343522

n	k	V3	V2	V1	V0
5000	100	21.246232	41.759988	60.247466	879.95927
5000	50	10.715139	20.964793	26.69991	428.1436
5000	40	8.556874	16.809952	21.06138	343.80212
5000	25	5.4019	10.488461	13.115355	211.55215
5000	10	2.195362	4.268791	5.349556	88.452974
5000	5	1.136068	2.162336	2.692025	44.467088
5000	1	0.282833	0.487849	0.598376	9.064908

D) <u>Παρατηρήσεις-Σχόλια-Συμπεράσματα:</u>

- Αρχικά βλέπουμε ότι για σταθερό αριθμό σημείων n μεταβαλλόμενου k , το πρόβλημα είναι πρακτικα γραμμικό.Καθώς αυξάνονται τα βήματα για την εξέλιξη του μοντέλου ,σχεδόν στον ίδιο βαθμό αυξάνεται και ο χρόνος εκτέλεσης, το οποίο είναι και αναμενόμενο. Αντίθετα για σταθερό k , αυξανόμενου n, η αύξηση του χρόνου εκτέλεσης τείνει σε εκθετική, με την V3 , να παίρνει ομαλότερη κλίση από τις άλλες 3 υλοποιήσεις καθώς αυξάνει το n.
- Για κάθε συνδυασμό n και k, και οι 3 υλοποιήσεις(V1-V3) της CUDA είναι πολύ γρηγορότερες από αυτές της ακολουθιακής(V0) υλοποίησης, με την V1 να είναι έως και 14 περίπου φορές(π.χ. n=5000, k=100) γρηγορότερη της V0. Η V2 είναι έως και πάνω από 21 φορές γρηγορότερη από την V0, ενώ τέλος η V3 φτάνει να είναι έως και πάνω από 41 φορές γρηγορότερη της V0 (π.χ. για n=5000 , k=100 η V3 είναι πάνω από 41 φορές γρηγορότερη !).
- Αναφορικά με την απόδοση των υλοποιήσεων σε CUDA , αν και για μικρό αριθμό σημείων(n=100) η V2 , μοιάζει να μην είναι ξεκαθαρα γρηγορότερη της V1, για όλες τις άλλες μετρήσεις η V2 υπερτερεί της V1 ξεκάθαρα και η V3 της V2. Στην V2 έχουμε επιτάχυνση έως και 30% σε σχέση με τον χρόνο εκτέλεσης της V1(n=10000,k=100) ,ενώ στην V3 συναντάμε επιτάχυνση έως και περίπου 50% για μερικές υλοποιήσεις σε σχέση με την V2(π.χ. n=5000, k=100).
- Η σαφής υπεροχή της V2 , έναντι της V1, οφείλεται στο γεγονός ότι "οργανώνει" πολύ ορθότερα τα *threads* στους πυρήνες της gpu . Αντίθετα η V3 , υπερέχει της V2 , καθώς ενώ "οργανώνει" με ίδιο τρόπο τα threads , τα block της για τους υπολογισμούς λαμβάνουν δεδομένα από την πολύ γρηγορότερη μνήμη (*shared memory*) των *blocks* και όχι από την *global memory*.
- Επίσης είναι ξεκάθαρο τόσο από τα γραφήματα όσο και από τους πίνακες, ότι όσο αυξάνει το φορτίο (δηλαδή αυξάνουν τα n και k), τόσο πιο έντονες είναι οι διαφορές στον χρόνο εκτέλεσης μεταξύ των υλοποιήσεων και τόσο μεγαλύτερο το "όφελος" που αποκομίζουμε από τις γρηγορότερες υλοποιήσεις.

(Περισσότερα γραφήματα ,πίνακες και csv καθώς και το σκριπτάκι του matlab για τα γραφήματα, στο repo, στον φάκελο data)