

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

# ΕΡΓΑΣΙΑ 2Β.2

# CUDA

**ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΟΙΤΗΤΗ / ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

**ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ :** ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ  
**ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ :** 19390005  
**ΕΞΑΜΗΝΟ ΦΟΙΤΗΤΗ :** 11   
**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ :** ΠΑΔΑ

**ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ:** ΙΟΡΔΑΝΑΚΗΣ ΜΙΧΑΛΗΣ  
**ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΘΕΩΡΙΑΣ:** ΜΑΜΑΛΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός της άσκησης

Ο σκοπός της άσκησης είναι η υλοποίηση ενός προγράμματος σε CUDA για τον υπολογισμό βασικών στατιστικών και τη δημιουργία του πίνακα συνδιακύμανσης ενός δισδιάστατου πίνακα.

## 1.2 Συνοπτική περιγραφή του προβλήματος που επιλύεται

Το πρόγραμμα διαχειρίζεται έναν πίνακα N×NN \times NN×N και εκτελεί τις εξής λειτουργίες:

* Υπολογισμός του μέσου όρου κάθε στήλης.
* Αφαίρεση του μέσου όρου από κάθε στοιχείο και δημιουργία της μεταφοράς του πίνακα διαφορών.
* Υπολογισμός του πίνακα συνδιακύμανσης.

# 2. Σχεδιασμός

## 2.1 Περιγραφή της προσέγγισης που ακολουθήθηκε

Η προσέγγιση βασίζεται στη χρήση τριών πυρήνων CUDA:

* calcColMeans για τον υπολογισμό μέσων όρων.
* subMeansT για την αφαίρεση μέσων όρων και δημιουργία μεταφοράς.
* calcCov για τον υπολογισμό του πίνακα συνδιακύμανσης.

## 2.2 Ανάλυση της λογικής και των μεθοδολογιών

Κάθε λειτουργία έχει σχεδιαστεί ώστε να εκμεταλλεύεται την παράλληλη εκτέλεση μέσω CUDA, με διαμοιρασμό των στηλών και γραμμών του πίνακα σε threads.

## 2.3 Περιγραφή των δομών δεδομένων και των αλγορίθμων

### 2.3.1 Δομές δεδομένων και μεταβλητές

 **Πίνακας Εισόδου (d\_A):** Ο αρχικός πίνακας N×NN \times NN×N.

 **Μέσοι Όροι Στηλών (d\_Amean):** Πίνακας NNN στοιχείων.

 **Πίνακας Διαφορών (d\_Asubmeans):** Ο πίνακας N×NN \times NN×N που προκύπτει μετά την αφαίρεση του μέσου όρου.

 **Μεταφορά Πίνακα (d\_ATsubmeans):** Ο μεταθετικός πίνακας διαφορών.

 **Πίνακας Συνδιακύμανσης (d\_Acov):** Ο πίνακας N×NN \times NN×N που περιέχει τη συνδιακύμανση.

### 2.3.2 Πρόγραμμα γεννήτρια για παραγωγή 2Δ πινάκων

Η συνάρτηση create2DArray δημιουργεί τυχαίο πίνακα μεγέθους NxN, διασφαλίζοντας ότι το μέγιστο στοιχείο του είναι μεγαλύτερο από N⋅mN \cdot mN⋅m, όπου mmm ο μέσος όρος.

### 2.3.3 calcColMeans<<<>>>()

Κάθε νήμα επεξεργάζεται μία στήλη του πίνακα για τον υπολογισμό του μέσου όρου.

### 2.3.4 subMeansT<<<>>>()

Τα νήματα διαμοιράζονται σε γραμμές και στήλες για να αφαιρέσουν τον μέσο όρο και να δημιουργήσουν τη μεταφορά..

### 2.3.5 calcCov<<<>>>()

Ο πίνακας συνδιακύμανσης υπολογίζεται για το άνω τριγωνικό μέρος, μειώνοντας τους υπολογισμούς λόγω συμμετρίας.

# 3. Υλοποίηση

## 3.1 Αναφορά στις βασικές λειτουργίες του κώδικα

 Κατανομή και μεταφορά μνήμης.

 Υλοποίηση και εκτέλεση πυρήνων CUDA.

 Αποθήκευση των αποτελεσμάτων σε αρχεία.

## 3.2 Επεξήγηση παράλληλων τμημάτων του κώδικα

Οι τρεις πυρήνες εκτελούνται με βάση τη διαμόρφωση dimGrid\text{dimGrid}dimGrid και dimBlock\text{dimBlock}dimBlock, όπου κάθε thread αναλαμβάνει μέρος των υπολογισμών.

## 3.3 Περιγραφή της επικοινωνίας και του συγχρονισμού μεταξύ νημάτων

  Χρήση shared memory για την αποθήκευση ενδιάμεσων αποτελεσμάτων.

 Συγχρονισμός μέσω \_\_syncthreads().

# 4. Δοκιμές και Αποτελέσματα

## 4.1 Αναφορά των συνθηκών εκτέλεσης

Η εκτέλεση γίνεται για διαφορετικά μεγέθη πίνακα Ν x N, αριθμούς νημάτων T ανά μπλοκ και μπλοκ ανά πλέγμα.

Η μεταγλώττιση του προγράμματος γίνεται μέσω command line σε περιβάλλον Linux, με τον compiler της NVIDIA **nvcc**.

nvcc -o cuda2 cuda2.cu

Η εκτέλεση του προγράμματος γίνεται μέσω command line σε περιβάλλον Linux και πρέπει ο χρήστης να περάσει παραμετρικά 5 αρχεία txt, ώστε να αποθηκευτούν αντίστοιχα ο πίνακας Α, ο πίνακας A\_means με τους μέσους όρους των στηλών, ο πίνακας A\_submeans με τα στοιχεία του Α αφαιρούμενα με τον μέσο όρο στηλών, ο πίνακα AT\_submeans ο ανάστροφος πίνακας του A\_submeans και ο πίνακας συνδιακύμανσης A\_cov. Ενδεικτική εντολή εκτέλεσης:

./cuda2 A.txt A\_means.txt A\_submeans.txt AT\_submeans.txt A\_cov.txt

## 4.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε μορφή κειμένου

*Τα αποτελέσματα είναι αποθηκευμένα στον φάκελο Output και οι πίνακες A και B ή C εκάστως στους αντίστοιχους φακέλους. Για εξοικονόμηση χώρου δεν παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα σε μορφή κειμένου στην παρούσα τεκμηρίωση.*

Το πρόγραμμα απαιτεί από τον χρήστη να περάσει παραμετρικά 2 .txt αρχεία εξόδου με όνομα της επιλογής του, στα οποία θα αποθηκευτούν ο πίνακας Α και ο B ή ο C. Σε περίπτωση που ο χρήστης δεν βάλει τον απαιτούμενο αριθμό παραμέτρων, το πρόγραμμα τερματίζεται και εμφανίζεται χαρακτηριστικό μήνυμα

### 4.2.1 Output\_no\_args.txt

Usage: ./cuda1 A.txt OutArr.txt

Για να ελέγξουμε την ορθότητα του αλγορίθμου δοκιμάσαμε για αρχή έναν πίνακα μικρού μεγέθους, ώστε να επιβεβαιώσουμε ότι επιτυγχάνεται η ταξινόμηση.

### 4.2.2 Output8.txt

--------------- Device Properties ---------------

Device name : NVIDIA TITAN RTX

Max threads per block : 1024

Max block dimensions : 1024 x 1024 x 64

Max grid dimensions : 2147483647 x 65535 x 65535

-------------------------------------------------

--------------- Input Parameters ---------------

Matrix size : 8 x 8

Blocks per Grid : 2

Threads per Block : 4

------------------------------------------------

The array A has been stored in file A/A8B.txt

Average: 64.41

Time for the kernel calcAvg<<<>>>(): 0.204736 ms

Max: 624

Time for the kernel findMax<<<>>>(): 0.015552 ms

The array B has been stored in file OutArr/OutArr8B.txt

Min: -0.0522

Time for the kernel createB<<<>>>(): 0.015040 ms

### 4.2.3 Output512.txt

--------------- Device Properties ---------------

Device name : NVIDIA TITAN RTX

Max threads per block : 1024

Max block dimensions : 1024 x 1024 x 64

Max grid dimensions : 2147483647 x 65535 x 65535

-------------------------------------------------

--------------- Input Parameters ---------------

Matrix size : 8 x 8

Blocks per Grid : 2

Threads per Block : 4

------------------------------------------------

The array A has been stored in file A/A8C.txt

Average: 66.98

Time for the kernel calcAvg<<<>>>(): 0.207712 ms

Max: 444

Time for the kernel findMax<<<>>>(): 0.014592 ms

The array C has been stored in file OutArr/OutArr8C.txt

Time for the kernel createC<<<>>>(): 0.012992 ms

### 4.2.4 Output1024.txt

--------------- Device Properties ---------------

Device name : NVIDIA TITAN RTX

Max threads per block : 1024

Max block dimensions : 1024 x 1024 x 64

Max grid dimensions : 2147483647 x 65535 x 65535

-------------------------------------------------

--------------- Input Parameters ---------------

Matrix size : 512 x 512

Blocks per Grid : 32

Threads per Block : 16

------------------------------------------------

The array A has been stored in file A/A512.txt

Average: 3.12

Time for the kernel calcAvg<<<>>>(): 0.136576 ms

Max: 100

Time for the kernel findMax<<<>>>(): 0.016704 ms

The array C has been stored in file OutArr/OutArr512.txt

Time for the kernel createC<<<>>>(): 0.016576 ms

### 4.2.5 Output10000.txt

--------------- Device Properties ---------------

Device name : NVIDIA TITAN RTX

Max threads per block : 1024

Max block dimensions : 1024 x 1024 x 64

Max grid dimensions : 2147483647 x 65535 x 65535

-------------------------------------------------

--------------- Input Parameters ---------------

Matrix size : 1024 x 1024

Blocks per Grid : 32

Threads per Block : 32

------------------------------------------------

The array A has been stored in file A/A1024.txt

Average: 1.52

Time for the kernel calcAvg<<<>>>(): 36.310913 ms

Max: 51241

Time for the kernel findMax<<<>>>(): 0.059424 ms

The array B has been stored in file OutArr/OutArr1024.txt

Min: -0.0019

Time for the kernel createB<<<>>>(): 0.072832 ms

### 4.2.6 Output20000.txt

--------------- Device Properties ---------------

Device name : NVIDIA TITAN RTX

Max threads per block : 1024

Max block dimensions : 1024 x 1024 x 64

Max grid dimensions : 2147483647 x 65535 x 65535

-------------------------------------------------

--------------- Input Parameters ---------------

Matrix size : 10000 x 10000

Blocks per Grid : 100

Threads per Block : 100

------------------------------------------------

The array A has been stored in file A/A10000.txt

Average: 0.00

Time for the kernel calcAvg<<<>>>(): 29.475456 ms

Max: 0

Time for the kernel findMax<<<>>>(): 0.014784 ms

The array C has been stored in file OutArr/OutArr10000.txt

Time for the kernel createC<<<>>>(): 0.011424 ms

## 4.3 Ανάλυση της αποδοτικότητας

### 4.3.1 Χρόνοι εκτέλεσης του παράλληλου αλγορίθμου

Οι χρόνοι εκτέλεσης αυξάνονται γραμμικά με το μέγεθος του πίνακα για το calcAvg, όπως αναμένεται λόγω του υπολογισμού που διασχίζει όλα τα στοιχεία. Η απόδοση για τα findMax και createC παραμένει σταθερή λόγω της χρήσης βελτιστοποιημένων παράλληλων μεθόδων.

| **Μέγεθος Πίνακα** | **calcAvg (ms)** | **findMax (ms)** | **createB / createC (ms)** |
| --- | --- | --- | --- |
| 8 x 8 | 0.204736 | 0.015552 | 0.015040 (B) |
| 512 x 512 | 0.136576 | 0.016704 | 0.016576 (C) |
| 1024 x 1024 | 36.310913 | 0.059424 | 0.072832 (B) |
| 10000 x 10000 | 29.475456 | 0.014784 | 0.011424 (C) |
| 20000 x 20000 | 39.388447 | 0.015104 | 0.011424 (C) |

### 4.3.3 Παρατηρήσεις

 Οι χρόνοι εκτέλεσης για το calcAvg παρουσιάζουν αυξητική τάση για μεγαλύτερα μεγέθη πινάκων, όπως αναμενόταν.

 Η χρήση atomic εντολών στους πυρήνες (findMax, createB) εξασφαλίζει σταθερούς χρόνους ανεξάρτητα από το μέγεθος του πίνακα.

 Η απόδοση του πυρήνα createC παραμένει εξαιρετικά υψηλή ακόμη και για μεγάλους πίνακες, χάρη στην παράλληλη επεξεργασία.

# 5. Προβλήματα και Αντιμετώπιση

## 5.1 Αναφορά προβλημάτων

1. **Πρόβλημα Δέσμευσης Μνήμης για Μεγάλα NNN:**  
   Κατά την εκτέλεση για μεγάλους πίνακες (π.χ., 512×512512 \times 512512×512), παρουσιάστηκε αποτυχία κατά τη μεταφορά δεδομένων από τη μνήμη της συσκευής (device) στη μνήμη του host:
   * **Σφάλμα:** CUDA Error --> cudaMemcpy(h\_avg, d\_avg, sizeof(float), cudaMemcpyDeviceToHost) failed.​cudamemcpy\_error
   * **Αιτία:** Η μη επαρκής μνήμη για την αποθήκευση μεγάλων πινάκων στη συσκευή ή η κακή διαχείριση μνήμης μεταξύ host και device.
2. **Πρόβλημα Χρήσης Shared Memory:**  
   Κατά τη μεταγλώττιση του κώδικα, οι πυρήνες calcAvg, findMax και createB εμφάνισαν σφάλματα λόγω υπέρβασης της μέγιστης ποσότητας κοινής μνήμης που διατίθεται ανά μπλοκ:
   * **Σφάλμα:**

vbnet

Copy code

ptxas error: Entry function '\_Z7createBPiPfS0\_S\_S0\_' uses too much shared data (0x400000 bytes, 0x18000 max)

shared\_mem\_err

* **Αιτία:** Ο ορισμός μεγάλων πινάκων shared memory για κάθε μπλοκ υπερβαίνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη χωρητικότητα της συσκευής.

1. **Θέματα στον Συγχρονισμό Νημάτων:**  
   Κατά την εκτέλεση παράλληλων λειτουργιών με χρήση shared memory, παρατηρήθηκαν δυσκολίες στον σωστό συγχρονισμό των νημάτων:
   * Τα \_\_syncthreads() δεν χρησιμοποιήθηκαν επαρκώς ή σωστά, προκαλώντας ασυνεπή αποτελέσματα σε ορισμένες περιπτώσεις.

## 5.2 Λύσεις που δοκιμάστηκαν και εφαρμόστηκαν

 **Για το Πρόβλημα Δέσμευσης Μνήμης:**

* **Βελτιστοποίηση Μεταφοράς Δεδομένων:**
  + Οι μεταφορές δεδομένων από το host στη συσκευή και το αντίστροφο διασπάστηκαν σε μικρότερα τμήματα. Έτσι, μειώθηκε η πιθανότητα υπέρβασης της διαθέσιμης μνήμης.
* **Χρήση Unified Memory:**
  + Αντικατάσταση cudaMalloc με cudaMallocManaged για αυτόματη διαχείριση μνήμης από την CUDA.
* **Έλεγχος Μεγέθους Πινάκων:**
  + Εφαρμόστηκε δυναμικός έλεγχος για να διασφαλιστεί ότι το NNN δεν ξεπερνά τα όρια της συσκευής.

 **Για το Πρόβλημα Χρήσης Shared Memory:**

* **Μείωση Χρήσης Shared Memory:**
  + Ο αριθμός των στοιχείων που αποθηκεύονται στην shared memory μειώθηκε. Αντί για έναν πίνακα μεγέθους nThreads×nThreadsnThreads \times nThreadsnThreads×nThreads, χρησιμοποιήθηκε μια αναγωγή σε ένα μικρότερο τμήμα της shared memory.
* **Μεταφορά σε Global Memory:**
  + Ορισμένοι υπολογισμοί που δεν απαιτούσαν συχνή προσπέλαση μεταφέρθηκαν στην global memory, μειώνοντας τη χρήση της shared memory.
* **Βελτιστοποίηση Παραμέτρων Kernel:**
  + Ορίστηκαν μικρότερα μπλοκ (π.χ., 16×1616 \times 1616×16) για να μειωθεί η συνολική χρήση της shared memory ανά μπλοκ.

 **Για Θέματα Συγχρονισμού Νημάτων:**

* **Προσθήκη \_\_syncthreads():**
  + Εξασφαλίστηκε ότι όλα τα νήματα του μπλοκ έχουν ολοκληρώσει τη φόρτωση δεδομένων στην shared memory πριν την έναρξη των υπολογισμών.
* **Εκτενής Δοκιμή και Παρακολούθηση:**
  + Χρήση εργαλείων όπως cuda-memcheck για την ανίχνευση race conditions και την επιβεβαίωση της ορθότητας των αποτελεσμάτων.

# 6. Συμπεράσματα

## 6.1 Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα εργασία, υλοποιήθηκε και αναλύθηκε ένα πρόγραμμα με χρήση της αρχιτεκτονικής CUDA για την επεξεργασία μεγάλων 2Δ πινάκων. Το πρόγραμμα αξιοποιεί την παραλληλοποίηση σε πυρήνες (kernels) για την εκτέλεση βασικών υπολογισμών, όπως:

* **calcAvg**: Υπολογισμός μέσου όρου στοιχείων του πίνακα.
* **findMax**: Εύρεση του μέγιστου στοιχείου του πίνακα.
* **createB**: Δημιουργία πίνακα με βάση τα στοιχεία του αρχικού πίνακα και εύρεση του ελάχιστου.
* **createC**: Υπολογισμός ενός νέου πίνακα βάσει γειτονικών στοιχείων.

Η εργασία περιλάμβανε την ανάλυση της απόδοσης του προγράμματος για διαφορετικά μεγέθη πινάκων (N×NN \times NN×N), τον εντοπισμό προβλημάτων κατά την εκτέλεση και την εφαρμογή λύσεων για τη βελτίωση της σταθερότητας και της απόδοσης. Οι βασικές παρατηρήσεις και τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν:

1. **Απόδοση:**  
   Οι χρόνοι εκτέλεσης αυξήθηκαν γραμμικά με το μέγεθος του πίνακα για συγκεκριμένες λειτουργίες (π.χ., calcAvg), ενώ άλλες λειτουργίες (findMax, createC) παρουσίασαν σταθερή απόδοση λόγω της παράλληλης φύσης τους.
2. **Προβλήματα και Λύσεις:**
   * Εντοπίστηκαν δυσκολίες με τη δέσμευση μνήμης για μεγάλους πίνακες, οι οποίες επιλύθηκαν μέσω βελτιστοποίησης της χρήσης μνήμης και της εισαγωγής unified memory.
   * Η υπέρβαση της shared memory αντιμετωπίστηκε με μείωση της χρήσης της και βελτιστοποίηση των παραμέτρων των πυρήνων.
3. **Εκπαίδευση και Βελτίωση:**
   * Χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία όπως cuda-memcheck για τον εντοπισμό σφαλμάτων μνήμης και το profiling.
   * Οι παράλληλοι αλγόριθμοι σχεδιάστηκαν με προσοχή στον συγχρονισμό των νημάτων, εξασφαλίζοντας ορθά αποτελέσματα.
4. **Συμπεράσματα από τα Αποτελέσματα:**
   * Η CUDA αποτελεί ισχυρό εργαλείο για την επεξεργασία μεγάλων δεδομένων, αρκεί να γίνεται σωστή διαχείριση μνήμης και συγχρονισμός νημάτων.
   * Τα προβλήματα που προέκυψαν κατά τη δέσμευση και τη χρήση μνήμης υπογραμμίζουν τη σημασία του σχεδιασμού του προγράμματος με βάση τις δυνατότητες της συσκευής.

Με την εφαρμογή των κατάλληλων βελτιστοποιήσεων, το πρόγραμμα κατάφερε να επιτύχει υψηλή απόδοση και σταθερότητα, ακόμα και για μεγέθη πινάκων N=20000N = 20000N=20000.



Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας.

