Ατομική Διπλωματική Εργασία

Μελέτη της σχέσης επίδοση – κατανάλωση ενέργειας κεντρικών μονάδων επεξεργασίας διαφόρων αρχιτεκτονικών

Μιχάλης Ευσταθίου

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μάιος 2016

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μελέτη της σχέσης επίδοση – κατανάλωση ενέργειας κεντρικών μονάδων επεξεργασίας διαφόρων αρχιτεκτονικών

Μιχάλης Ευσταθίου

Επιβλέπων Καθηγητής
Pedro Trancoso

Η Ατομική Διπλωματική Εργασία υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων απόκτησης του πτυχίου Πληροφορικής του Τμήματος Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Κύπρου

Μάιος 2016

Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος των προπτυχιακών σπουδών και με την ολοκλήρωση της ατομικής διπλωματικής εργασίας μου, θα ήθελα να εκφράσω την βαθύτατη και ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Pedro Trancoso για την βοήθεια και καθοδήγηση του. Οι συμβουλές του οποίου όχι μόνο καθόρισαν την ακαδημαϊκή μου πορεία αλλά με βοήθησαν στην περεταίρω κατανόηση του θέματος της διπλωματικής μου εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον διδακτορικό φοιτητή Ανδρέα Διαβαστό, που με την βοήθεια και τις γνώσεις του μπόρεσα να ξεπεράσω δυσκολίες στις πειραματικές μου μετρήσεις.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Σωκράτη και Χαριθέα Ευσταθίου, καθώς και την κοπέλα μου, Ελίζα Ηρακλέους, που ήταν πάντα στο πλευρό μου και με την αγάπη και τις συμβουλές τους με βοήθησαν να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

Τέλος, θα ήταν παράβλεψη μου να μην ευχαριστήσω το YouTube, το οποίο μου πρόσφερε απλόχερα γνώση μέσω διαλέξεων από επιστήμονες για το σύμπαν, καθώς και κλασική μουσική του Vivaldi, τα οποία με χαλάρωναν κατά την δύσκολη αυτή περίοδο ολοκλήρωσης της συγγραφής της διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Υπολογιστικά ισχυροί επεξεργαστές καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια σε σύγκριση με υπολογιστικά υποδεέστερους επεξεργαστές. Τα τελευταία χρόνια όμως παρατηρείται μια εξασθένηση αυτού του ανεπίσημου κανόνα. Επεξεργαστές με σχετικά μικρή κατανάλωση ενέργειας μπορούν να φτάσουν την υπολογιστική απόδοση πιο ενεργοβόρων μονάδων επεξεργασίας. Καταλύτης αυτού του γεγονότος είναι η ραγδαία ανάπτυξη των επεξεργαστών αρχιτεκτονικής ARM, οι οποίοι έχουν προτεραιότητα την μεγιστοποίηση της σχέσης υπολογιστική επίδοση – κατανάλωση ενέργειας. Συνέπεια αυτού του μοντέλου ανάπτυξης είναι να κατασκευάζονται επεξεργαστές με την ίδια κατανάλωση ενέργειας όπως ο προκάτοχος τους, παρουσιάζοντας όμως εκθετική άνοδο στην υπολογιστική επίδοση. Η αρχιτεκτονική x86 που κατέχει τις ηγεμονικές θέσεις της υπολογιστικής επίδοσης θα αποκτήσει ανταγωνισμό από λύσεις που περιλαμβάνουν επεξεργαστές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Συνδυάζοντας αριθμό από αυτούς τους επεξεργαστές σε υπολογιστικές πλατφόρμες, θα προσφέρεται συναγωνίσιμη υπολογιστική επίδοση, αλλά με μειωμένο ενεργειακό κόστος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε μελέτη και μέτρηση της υπολογιστικής επίδοσης και κατανάλωσης ενέργειας από πληθώρα κεντρικών μονάδων επεξεργασίας που απαντώνται σε διάφορα υπολογιστικά συστήματα, όπως έξυπνα κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές, επιτραπέζιους υπολογιστές καθώς και υπολογιστικές μονάδες. Ο σκοπός είναι να γίνει στοχευμένη εργαστηριακή μελέτη των προαναφερθέντων επεξεργαστών και εύρεση, αν υπάρχει, της εκθετικής βελτίωσης στην επεξεργαστική ισχύ των χαμηλών σε κατανάλωση ενέργειας επεξεργαστών, και πως αυτή συγκρίνετε με πιο ενεργοβόρους επεξεργαστές. Απώτερος σκοπός είναι να εξαχθούν συμπεράσματα για την σκοπιμότητα των χαμηλών σε κατανάλωση ενέργειας επεξεργαστών σε λύσεις για υπερυπολογιστές. Για εξυπηρέτηση αυτού του σκοπού χρησιμοποιήθηκαν προγράμματα που αξιολογούν υπολογιστές υψηλών επιδόσεων, ονομαστικά το πακέτο NAS NPB 3.3, τα προγράμματα του οποίου ήταν εφικτό να τρέξουν στα συστήματα προς αξιολόγηση. Τα ευρήματα της παρούσας έρευνας αποδεικνύουν πως η υπολογιστική ισχύς αυξάνετε από γενιά σε γενιά, καταναλώνοντας λιγότερη ενέργεια για πραγματοποίηση υπολογισμών, αλλά απαιτώντας περισσότερο χρόνο σε σύγκριση με επεξεργαστές αρχιτεκτονικής x86.

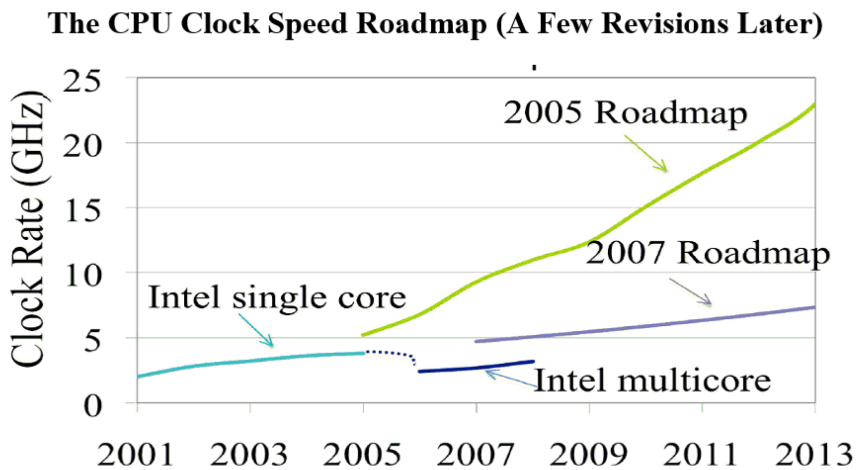
Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ενεργειακή απόδοση κεντρικών μονάδων επεξεργασίας

Μέχρι την τελευταία δεκαετία, η βιομηχανία και επιστημονική κοινότητα που ενασχολείται με την δημιουργία και παραγωγή κεντρικών μονάδων επεξεργασίας, αφοσιωνόταν στην κατάκτηση της κορυφής της υπολογιστικής επίδοσης, με ναυαρχίδα την αρχιτεκτονική x86 [1]. Αρχικά με την αύξηση της συχνότητας του επεξεργαστή και ακολούθως με την χρήση πολυπύρηνων λύσεων σε ένα σύστημα επεξεργασίας [5]. Αυξάνοντας την συχνότητα λειτουργείας ενός επεξεργαστή, ήταν ο απλός και σχετικά εύκολός τρόπος για να πετύχουν μεγαλύτερες υπολογιστικές επιδώσεις. Ολόκληρες γενεές επεξεργαστών βασίστηκαν σε αυτή την τεχνική, και το μέλλον φαινόταν να ακολουθεί αυτή την πορεία. Αποδείχτηκε όμως, πως η αύξηση της συχνότητας ήταν απαγορευτική τόσο από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας όσο και από την θερμική επαγωγή των συστημάτων. Η προβλέψεις για μια πορεία ανάπτυξης βασισμένη στην μεθοδική αύξηση της συχνότητας ενός επεξεργαστή άλλαξαν οριστικός. Καθοριστικός παράγοντας ήταν η αδυναμία εξεύρεσης οικονομικά βιώσιμου τρόπου ψύξης των ολοένα και πιο θερμών και ενεργοβόρων επεξεργαστών. Εξ αυτού, επεξεργαστές με μεγαλύτερο από 5 GHz χρονισμό απαντούνε μόνο σε πολύ εξειδικευμένα υπολογιστικά περιβάλλοντα με ιδιοκατασκευασμένα ψυκτικά συστήματα[6]. Το πρόβλημα αυτό ονομάστηκε Power Wall και βασίστηκε στον φυσικό κανόνα πως όλη η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται θα πρέπει να απωθηθεί από το σύστημα σαν θερμότητα [5]. Συνεπακόλουθο ήταν να αλλάξει εξολοκλήρου η σχεδίαση νέων επεξεργαστών.



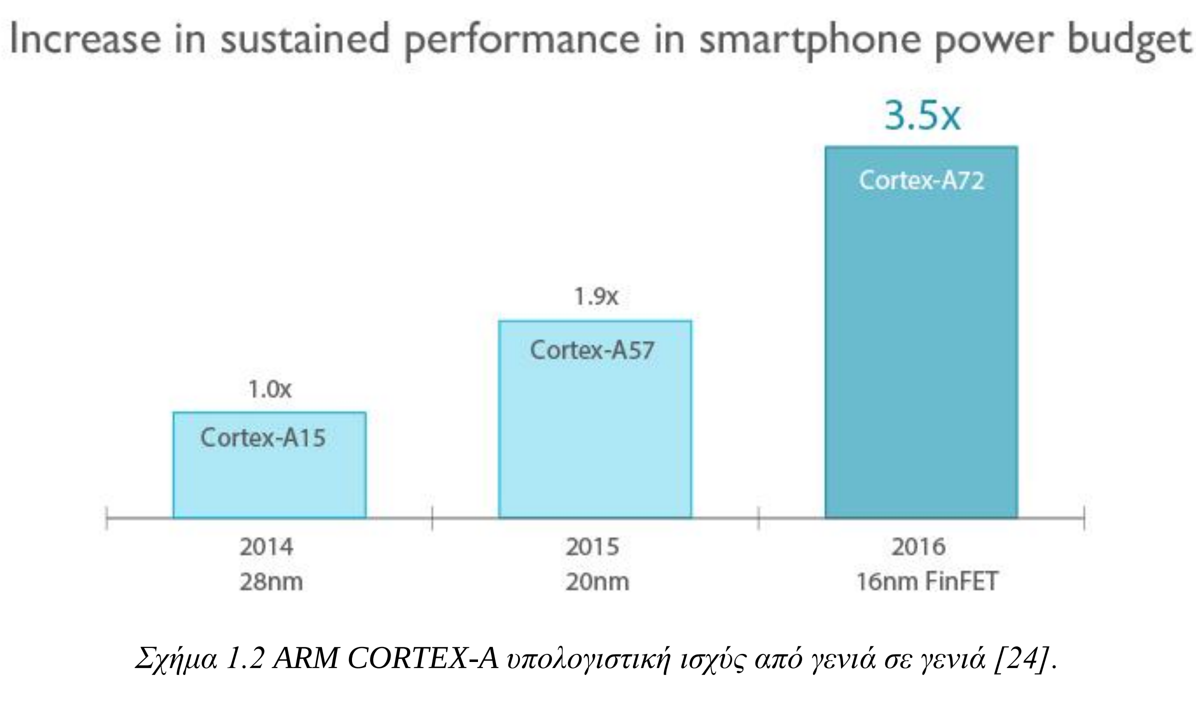
Σχήμα 1.1 Το πλάνο για ανάπτυξη του χρονισμού της Κ.Μ.Ε. την χρονιά 2005 [5].

Η λύση ήρθε από την ενσωμάτωση πολλών επεξεργαστών σε ένα μόνο πακέτο επεξεργασίας, τον λεγόμενο πολυπύρηνο επεξεργαστή. Η ενσωμάτωση πολλών επεξεργαστών που έχουν σχετικά μικρή κατανάλωση ενέργειας και μικρή θερμική επαγωγή, παράγει ένα υπολογιστικό πακέτο που μπορεί να συναγωνιστή σε επιδώσεις μονοπύρηνους επεξεργαστές με υψηλότερο χρονισμό. Αυτό το συμπέρασμα θα οδηγήσει στην παραγωγή εξολοκλήρου πολυπύρηνων επεξεργαστών από τούδε και στο εξής ώστε να είναι δυνατή η συνέχιση της αύξησης της υπολογιστικής ισχύος, σχεδόν να διπλασιάζεται κάθε 18 μήνες, όπως είχε προβλέψει ο Gordon E. Moore, συνιδρυτής της Intel. Η παραγωγή ολοένα και περισσότερων τρανζίστορ σε ένα chip συνεχίζει, αλλά αντί να αυξάνεται ο χρονισμός, αυξάνεται ο αριθμός τον υπολογιστικών μονάδων [7]. Όμως, ακόμη και οι πολυπύρηνοι επεξεργαστές, όπως σχεδιάζονταν και παράγονταν μέχρι τώρα ήρθαν αντιμέτωποι με το πρόβλημα του Power Wall. Η λύση για το απώτερο μέλλον είναι να εξάγουμε την περισσότερη δυνατή υπολογιστική απόδοση με την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας [6].

1.2 Η αρχιτεκτονική ARM

Η εναλλαγή των πρωταρχικών περιορισμών στην σχεδίαση επεξεργαστών, από το μέγεθος του chip και την πολυπλοκότητα του σε ενέργεια και επεξεργαστική ισχύ, αντικατοπτρίζει την αλλαγή στην χρήση του υπολογιστή [8]. Έξυπνα κινητά τηλέφωνα και υπολογιστές μορφής tablet έχουν ξεπεράσει κατά πολύ τις πωλήσεις φορητών και επιτραπέζιων υπολογιστών. Η εξάπλωση τους όμως δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την χρήση διαφορετικών τεχνολογιών. Επεξεργαστές χωρίς την απαίτηση για ψυκτικά συστήματα ήταν πρωτίστου σημασίας. Αυτό συνεπάγει επεξεργαστές με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Η ARM αρχιτεκτονική είναι βασισμένη σε RISC ISA και απαντάται σχεδόν σε όλα τα έξυπνα κινητά τηλέφωνα. Η οικογένεια επεξεργαστών που της επέτρεψε να κυριαρχήσει είναι η CORTEX-A [10]. Μέσα από μια σειρά εκπληκτικών εξελίξεων στην επεξεργαστική ισχύ με κάθε νέα γενιά επεξεργαστών [1, 2, 3, 4] και την εναλλαγή από 32-bit σε 64-bit άρχισε να συναγωνίζεται την επίδοση CISC ISA επεξεργαστών, να εγκαθίσταστε σε λύσεις για εξυπηρετητές (servers) [8] και να είναι υπό μελέτη για μελλοντική χρήση σε υπερυπολογιστές (HPC), όπου κυριαρχούν εξολοκλήρου οι επεξεργαστές με αρχιτεκτονική x86.



Σχήμα 1.2 ARM CORTEX-A υπολογιστική ισχύς από γενιά σε γενιά [24].

1.3 Κίνητρο για την επιλογή και ενασχόληση με αυτό το θέμα

Η εκθετική αύξηση στην υπολογιστική ισχύ των επεξεργαστών χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας έχει αλλάξει τον τρόπο που αλληλοεπιδρούμε με τον υπολογιστή και με την τεχνολογία γενικότερα, αναγκάζοντας μας να επανεξετάσουμε τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάζονται νέα υπολογιστικά συστήματα.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αλλαγής από τις προκαθορισμένες πρακτικές του παρελθόντος είναι η υλοποίηση συστημάτων εξυπηρετητών (server systems) με επεξεργαστές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Ο επεξεργαστής X – Gene της εταιρίας Applied Micro είναι αρχιτεκτονικής ARMv8 – 64 bit, με μοναδικό σκοπό την υιοθέτηση του σε εξυπηρετητές, προσφέροντας μια εξίσου ικανή εναλλακτική επιλογή από επεξεργαστές με αρχιτεκτονική x86.
Ακόμη, η εταιρία που κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς συστημάτων για εξυπηρετητές, η Hewlett Packard (HP), κυκλοφόρησε ένα νέο υπολογιστικό σύστημα με την ονομασία Moonshot, όπου η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται από επεξεργαστές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Αυτές οι μεγάλες αλλαγές με ανάγκασαν να διερωτηθώ αν το άμεσο μέλλον θα επιφέρει μια ριζική αλλαγή στον τρόπο που σκεφτόμαστε για την επεξεργασία της πληροφορίας.

Ένας επιπλέον παράγοντας που είχα την δυνατότητα να παρατηρήσω από πρώτο χέρι ήταν η διέλευση τον επεξεργαστών με αρχιτεκτονική ARMv7 και ARMv8 σε συσκευές που χρησιμοποιώ στην καθημερινότητα μου και πιο συγκεκριμένα σε έξυπνα κινητά τηλέφωνα. Η αγορά των έξυπνων κινητών τηλέφωνων παρουσιάζει ανάπτυξη που δεν μπορεί καμία εταιρία να αγνοήσει, αφού ολοένα και περισσότεροι χρήστες αγοράζουν φορητές συσκευές για να αντικαταστήσουν την φωτογραφική τους μηχανή, την συσκευή αναπαραγωγής πολυμέσων και τον προσωπικό τους υπολογιστή. Παρατηρείτε μια ριζική αλλαγή στην κοινότητα της πληροφορικής, μια αλλαγή που θέτει ως κέντρο υπολογισμού το έξυπνο κινητό τηλέφωνο ή παρόμοια υπολογιστική πλατφόρμα. Η συγγραφή ενός αρχείου κειμένου, η εξερεύνηση του διαδικτύου, ακόμη και η ενασχόληση με ηλεκτρονικά παιχνίδια μπορεί να γίνει στις προαναφερθέντες πλατφόρμες, οδηγώντας έτσι στην αποκέντρωση του υπολογισμού από τον φορητό ή επιτραπέζιο υπολογιστή. Βρισκόμαστε στην μέση μιας μεταβατικής περιόδου, μια περίοδος που θα καθορίσει τον τρόπο που χρησιμοποιούμε τους υπολογιστές στο απώτερο μέλλον.

Η κορύφωση της προσοχής μου για την ενασχόληση με την παρούσα μελέτη προήλθε από την συνειδητοποίηση πως η υπολογιστική ισχύς στους κλασικούς υπολογιστές παρουσιάζει πολύ μικρή βελτίωση από γενιά σε γενιά, τις τάξης του 10%. Αντίθετος, οι ανάπτυξη στους επεξεργαστές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας παρουσιάζει λογαριθμική πορεία. Κάθε νέα γενιά παρέχει νέες δυνατότητες, όπως η υποστήριξη πολύ υψηλής ανάλυσης οθόνης, καταγραφή 4K video καθώς και πολυπύρηνες λύσεις που φτάνουν μέχρι και τους 10 πυρήνες. Επιδώσεις που ήταν κατορθωτές σε φορητούς υπολογιστές πριν λίγα χρόνια είναι τώρα πραγματικότητα σε ένα υπολογιστικό πακέτο με πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας, ανοίγοντας έτσι την δυνατότητα για χρήση υπολογιστών σε περιβάλλοντα που ήταν αδύνατο πριν, όπως IoT (Internet of Things) συσκευές.

Το ερώτημα, πως μπορούμε να μετρήσουμε με επιστημονικό τρόπο την ανάπτυξη σε υπολογιστική ισχύ διάφορων γενεών επεξεργαστών με αρχιτεκτονική ARM, πως αυτή η ανάπτυξη συγκρίνεται με άλλες αρχιτεκτονικές και πια συμπεράσματα μπορούν να γίνουν για την μελλοντική σκοπιμότητα τους σε λύσεις για υπερυπολογιστές, ήταν το κίνητρο μου.

Επιπροσθέτως, ιδιαίτερο ενδιαφέρων παρουσιάζει και η υλοποίηση γραφικών μονάδων επεξεργασίας (GPUs) στο ίδιο chip με επεξεργαστές ARM. Επωφελούμενοι της εξελιγμένης λιθογραφίας που κατασκευάζονται οι επεξεργαστές αυτοί, παρατηρείτε μια μεγάλη αύξηση στην επεξεργαστική ισχύ. Ο σύνδεσμός CPU και GPU σε ένα ενεργειακά οικονομικό πακέτο ίσως να αποτελέσει την λύση για την εδραίωση των χαμηλών σε κατανάλωση ενέργειας υπολογιστών σε υπερυπολογιστές.

1.4 Στόχος και αναμενόμενα αποτελέσματα

Ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι να βρεθεί η αυξητική πορεία στην υπολογιστική ισχύ που ακολουθούν οι επεξεργαστές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, και πως οι επιδώσεις τους μπορούν να συγκριθούν με πληθώρα άλλων επεξεργαστών. Θα χρησιμοποιηθούν συστήματα που αντιπροσωπεύουν όλες τις κατηγορίες υπολογισμού που έχει στην διάθεση του ένας μέσος χρήστης.

Κύριας σημασίας είναι η λήψη ακριβών και αντιπροσωπευτικών μετρήσεων για κάθε σύστημα που αξιολογείται. Προς ικανοποίηση αυτού του στόχου διαβεβαιώθηκε πως όλα τα συστήματα θα αξιολογούνται με το ίδιο Benchmark, ονομαστικά το NAS NPB 3.3 [1, 4, 21, 22, 23], ώστε να εξάγονται μετρήσεις που να είναι απευθείας συγκρίσιμες.

Πέρα από την καταγραφή μετρήσεων υπολογιστικής ισχύος, θα γίνει καταγραφή και μέτρηση κατανάλωσης ενέργειας από μετρητή ο οποίος είναι ανεξάρτητος από τα συστήματα, παρέχοντας έτσι μη προκατειλημμένα αποτελέσματα.

Ένα από τα αναμενόμενα αποτελέσματα είναι η εύρεση της αυξητικής πορείας στην υπολογιστική ισχύ που ακολουθούν οι επεξεργαστές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Εφόσον γίνει αυτή η πειραματική απόδειξη, αναμένετε να βρεθεί πως νέες γενεές επεξεργαστών μπορούν να συναγωνιστούν σε επιδώσεις επεξεργαστές με μεγαλύτερο ενεργειακό κόστος. Επίσης, αναμένετε να παρατηρηθεί αύξηση στην επίδοση με το ίδιο ή λιγότερο ενεργειακό κόστος από τους προκάτοχους τους. Τέλος, η σκοπιμότητα των επεξεργαστών για χρήση σε λύσεις για υπερυπολογιστές αναμένετε να είναι αρνητική, τουλάχιστον προς το παρόν, με την προοπτική για θετική έκβαση στο απώτερο μέλλον, όπου νέες γενεές θα φέρουν ακόμη περισσότερή ισχύ.

1.5 Οργάνωση και μεθοδολογία

Η περάτωση της μελέτης ακολούθησε πορεία από διάφορα βήματα, η ολοκλήρωση των οποίον οδηγούσε στην επόμενη φάση. Ορισμένες φορές το αποτέλεσμα μιας φάσης άλλαζε επιλογές που έγιναν στον προκάτοχο, με απώτερο σκοπό την εύρεση βέλτιστων επιλογών για τις εργαστηριακές μετρήσεις.

Αρχικά έπρεπε να βρεθεί το επιστημονικό υπόβαθρο και να τεθεί το θέμα της επιστημονικής αξίας των αποτελεσμάτων που θα παραχθούν. Έγινε μελέτη επιστημονικών δημοσιεύσεων στο θέμα της επέλασης του υπολογισμού σε μηχανές χαμηλής ενεργειακής απαίτησης. Η επέλαση αυτή οφειλόταν σε φυσικούς περιορισμούς των υλικών τα οποία αναλύθηκαν σε δημοσιεύσεις για το πρόβλημα του Power Wall. Άρθρα που εμβάθυναν τον λόγο χρήσης διαφορετικών αρχιτεκτονικών για λύσεις σε υπερυπολογιστές και τρόπους για να γίνει κατορθωτό αποτέλεσαν την βάση για την σημαντικότητα της μελέτης αυτής.

Ακολούθως, αναζητήθηκε μια κοινή βάση όπου θα μπορούσαν να γίνουν μετρήσεις σε διάφορες αρχιτεκτονικές. Η λύση ήρθε από την χρήση του ανοικτού κώδικα των benchmarks NPB 3.3 της NASA. Η διαθεσιμότητα εκδοχών για μονοπύρηνους, πολυπύρηνους και CUDA επεξεργαστές δίνει την δυνατότητα να συμπεριληφθούν πολλά συστήματα στις μετρήσεις.

Η εξεύρεση των συστημάτων για αξιολόγηση βασίστηκε στο γεγονός πως θα έπρεπε να υπάρχει τουλάχιστον ένα σύστημα από κάθε κατηγορία. Προς τον σκοπό αυτό, συμπεριλήφθηκαν δύο έξυπνα κινητά τηλέφωνα, τρεις υπολογιστικές μονάδες, δύο φορητοί υπολογιστές και ένας επιτραπέζιος υπολογιστής.

Με την εξεύρεση τόσο του λογισμικού που θα χρησιμοποιηθεί όσο και του υλικού προς αξιολόγηση, μελετήθηκαν πόροι από το διαδίκτυο όπως άρθρα και τεχνικά βιβλία για εγκατάσταση των απαραίτητων λειτουργικών συστημάτων και εφαρμογών ώστε να είναι δυνατή η χρήση των NPB 3.3 benchmarks. Κάθε σύστημα παρουσίαζε τις δικές του προκλήσεις, με περιορισμούς που απαγόρευαν την σωστή λειτουργεία των benchmarks, η επίλυση των οποίων ήταν δυνατή με τεχνικές πού παρουσιάστηκαν στα άρθρα που μελετήθηκαν.

Με την σωστή λειτουργεία όλων των προγραμμάτων και συσκευών άρχισε η καταγραφή μετρήσεων. Η πρώτη μέτρηση ήταν αυτή της κατανάλωσης ενέργειας όταν το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση που δεν εκτελεί εντολές (idle power). Ακολούθως, πάρθηκαν μετρήσεις για κάθε εκδοχή του benchmark. Η μέτρηση της κατανάλωσης ενέργειας γινόταν από τον μετρητή που ήταν συνδεδεμένος με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και η μέτρηση του χρόνου ολοκλήρωσης υπολογιζόταν από το ίδιο το benchmark.

Αν μια συσκευή είχε μονοπύρηνο επεξεργαστή τότε μόνο το benchmark για ένα πυρήνα χρησιμοποιείτο. Αν είχε πολυπύρηνο επεξεργαστή, τότε τόσο το μονοπύρηνο όσο και το πολυπύρηνο benchmark χρησιμοποιείτο. Στην μια περίπτωση που είχε και CUDA επεξεργαστή, έγινε και η αντίστοιχη χρήση του CUDA benchmark.

Εφόσον έχουν παρθεί όλες οι μετρήσεις, αρχίζει η διαδικασία επεξεργασίας τους για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Από την κατανάλωση ενέργειας αφαιρείτε η αρχική (idle) μέτρηση έτσι ώστε η μέτρηση ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί να είναι αυτή που χρησιμοποιεί ο εκάστοτε επεξεργαστής για να λύσει το πρόβλημα.

1.6 Περιγραφή δομής Ατομικής Διπλωματικής Εργασίας

Η εργασία αυτή είναι χωρισμένη σε 7 κεφάλαια, μέσα από τα οποία περιγράφετε το σύνολο της μελέτης που έγινε. Το πρώτο κεφάλαιο που αποτελείται από την εισαγωγή έχει σαν σκοπό να εμπέδωση στον αναγνώστη την σύγκλιση των διαφόρων παραγόντων που οδήγησαν στην παρούσα κατάσταση και να δώσει μια πρώτη εντύπωση για το είδος της μελέτης και τα αποτελέσματα που αναμένεται να παρουσίαση. Επίσης, παρουσιάζεται και ο λόγος που ώθησε τον συγγραφέα να αναλάβει την περάτωση της. Το δεύτερο κεφάλαιο που αποτελείτε από την ανάλυση σχετικών εργασιών έχει σαν σκοπό την παρουσίαση αποτελεσμάτων από άλλες ερευνητικές ομάδες και οργανισμούς, όπως αυτά μελετήθηκαν για εκβάθυνση της κατανόησης του θέματος της παρούσας μελέτης. Το τρίτο κεφάλαιο αποτελείτε από την παρουσίαση των συσκευών που έτυχαν ανάλυσης, τα χαρακτηριστικά τους καθώς και ο λόγος που επιλέχθηκαν. Ακόλουθή η ανάλυση των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές μετρήσεις. Στο τέταρτο κεφάλαιο θα διατυπωθεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να ετοιμαστούν τα συστήματα για τις μετρήσεις. Θα γίνει ενδελεχώς αναφορά σε όλα τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να ο αναγνώστης να είναι σε θέση να επαναλάβει τις μετρήσεις πιστά, όπως έγιναν στην παρούσα μελέτη. Το πέμπτο κεφάλαιο αποτελείται από την περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την σωστή μέτρηση των αποτελεσμάτων σε κάθε πλατφόρμα ξεχωριστά. Το έκτο κεφάλαιο αποτελείται από την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και την μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε. Τέλος, με το έβδομο κεφάλαιο αποτυπώνονται τα συμπεράσματα που πάρθηκαν και γίνεται μια αναφορά σε μεθόδους βελτίωσης που θα μπορούσαν να ακολουθηθούν.

Κεφάλαιο 2

Ανάλυση σχετικών εργασιών και μελετών

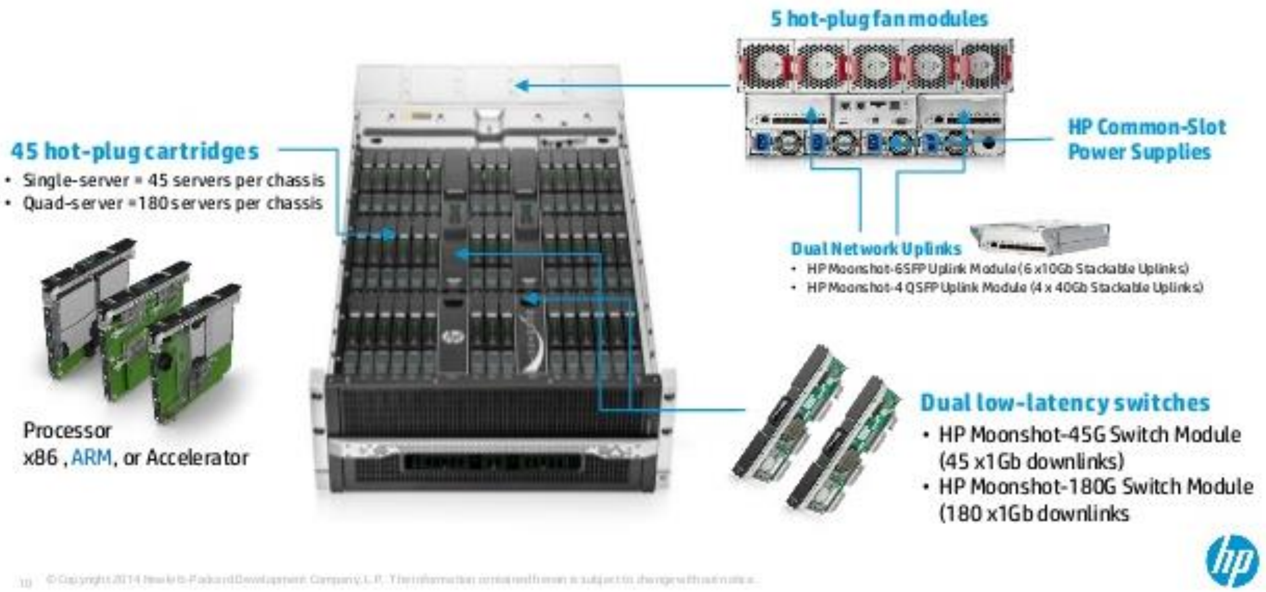
Η επιτυχής ολοκλήρωση της μελέτης και η σωστή μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί για την μέτρηση των χαρακτηριστικών των συστημάτων υπό μελέτη έπρεπε να είναι βασισμένη σε έρευνες που έχουν γίνει από επιστημονικά κέντρα που ασχολήθηκαν με το θέμα αυτό. Εξ αυτού, έγινε εμβάθυνση των γνώσεων από δημοσιεύσεις και άρθρα. Αυτά επέτρεψαν την κατανόηση των αποτελεσμάτων που θα πρέπει να εξαχθούν και τον τρόπο που θα ερμηνευθούν.

Η ARM, προβλέποντας την ολοένα και αυξανόμενη χρήση εφαρμογών τεχνολογίας νέφους (cloud computing) τόσο από απλούς χρήστες όσο και από επιχειρήσεις και την ανάγκη για μείωση του κόστους ιδιοκτησίας (Total Cost of Ownership (TCO)), άρχισε να προωθεί λύσεις που απευθύνονται σε αυτά τα προβλήματα [12]. Η προοπτική για την εδραίωση της αρχιτεκτονικής ARM σε λύσεις για εξυπηρετητές είναι η δημιουργία ενός νέου πρότυπου βασισμένου σε ARM επεξεργαστές το οποίο να δίνει την δυνατότητα για μελλοντική κλιμάκωση της επεξεργαστικής ισχύς (Server Base System Architecture (SBSA)) [11].

Συνδεδεμένη με την προώθηση για εδραίωση στην αγορά εξυπηρετητών είναι και η προσπάθεια για την δημιουργία υπολογιστικών υλοποιήσεων για υπολογιστές υψηλών επιδόσεων (HPC) [13, 16, 17]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως για να συνεχιστή η ανάπτυξη σε υπολογιστική ισχύ των υπερυπολογιστών και να επιτευχθεί Exascale επίδοση, θα χρειαστεί να γίνει μόχλευση υλικού πού είναι εδραίος διαθέσιμο και φθηνό [18, 19]. Αυτό το υλικό είναι επεξεργαστές ARM χαμηλής κατανάλωσης που εδραιώθηκαν στην αγορά έξυπνων κινητών τηλέφωνων, IoT (Internet of Things) συσκευές καθώς και υπολογιστές τύπου tablet. Όπως ο αριθμός των υπερυπολογιστών βασισμένων σε Vector/SIMD ξεπεράστηκε από υπερυπολογιστές με αρχιτεκτονική RISC το 1995, και ακολούθως η αρχιτεκτονική RISC ξεπεράστηκε το 2004 από την αρχιτεκτονική x86 [20], είναι τρανό παράδειγμα πώς οι οικονομίες κλίμακας φθηνών επεξεργαστών έχουν την δυνατότητα να αλλάξουν τον προκαθορισμένο τρόπο που κατασκευάζονται νέα υπολογιστικά συστήματα. Στην σήμερον ημέρα, οι επεξεργαστές χαμηλής κατανάλωσης αποτελούν την επικρατούσα τάση στην αγορά, και αυτό θα είναι ο καταλύτης για να χρησιμοποιηθούν σε λύσεις για υπερυπολογιστές. Προς το παρόν δεν είναι πιο γρήγοροι από τους ενεργοβόρους επεξεργαστές με αρχιτεκτονική x86, αλλά έχουν το πλεονέκτημα να είναι κατά πολύ φθηνότεροι και λιγότερο απαιτητικοί σε ενέργεια, χαρακτηριστικά που συμβάλουν στην αλλαγή της αγοράς των υπερυπολογιστών [18].

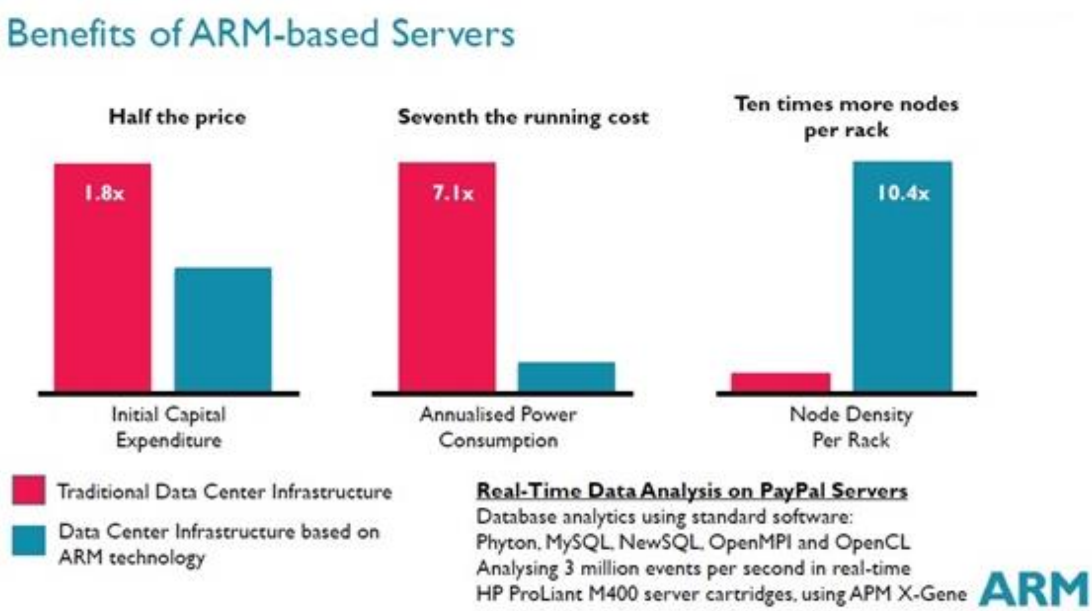
Λόγο του γεγονότος πως ένας επεξεργαστής αρχιτεκτονικής ARM δεν μπορεί να συναγωνιστεί απευθείας σε επιδόσεις ένα επεξεργαστή με αρχιτεκτονική x86, οι υπολογιστικές λύσεις βασισμένες σε ARM είναι πολυπύρηνες. Μέσα στον ίδιο ή και μικρότερο ενεργειακό προϋπολογισμό που έχει ένα σύστημα βασισμένο σε x86 μπορούν να εγκατασταθούν πολλοί ARM επεξεργαστές με εφάμιλλή απόδοση, δημιουργώντας έτσι μια εναλλακτική πλατφόρμα υπολογισμού. Αυτή η νέα πλατφόρμα μπορεί να ικανοποίηση τα 3 πιο σημαντικά χαρακτηριστικά που απαιτούν οι υπολογιστές εξυπηρετητών και υπερυπολογιστών, υψηλή υπολογιστική επίδοση, υψηλή πυκνότητα στην κατασκευή (δηλαδή όσο το δυνατόν περισσότερη υπολογιστική ισχύ στον μικρότερο δυνατό χώρο) και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Την αρχή προς αυτή την κατεύθυνση υπολογισμού έχουν κάνει δύο εταιρίες, η HP με το πρόγραμμα Moonshot και η Applied Micro με τον επεξεργαστή X-Gene. Με το πρόγραμμα Moonshot, η HP επιθυμεί να εισάγει στην αγορά υπολογιστικές λύσεις βασισμένες σε χαμηλούς σε κατανάλωση ενέργειας επεξεργαστές αρχιτεκτονικής x86 και ARM. Πληρώντας τα 3 προαναφερθέν κριτήρια, η πλατφόρμα Moonshot προσφέρει την δυνατότητα για εγκατάσταση συστημάτων με υψηλές επιδόσεις όπου θα μπορούν εύκολα να αναβαθμιστούν και ταυτόχρονα να έχουν το μικρότερο δυνατό Total Cost of Ownership. Η αναβάθμιση γίνεται μέσο σχαρών (rack) από ολοκληρωμένα συστήματα επεξεργασίας, και ο τελικός χρήστης επιλέγει την αρχιτεκτονική (x86 ή ARM) που ανταποκρίνεται καλύτερα στον τύπο και μέγεθος των εργασιών που θα εκτελεστούν.



Σχήμα 2.1 HP Moonshot overview.

Ο επεξεργαστής X – Gene της εταιρίας Applied Micro αποτελεί την πρώτη υλοποίηση μικρό αρχιτεκτονικής βασισμένη στην ISA ARMv8 64 – bit. Ο σκοπός του επεξεργαστή είναι να εγκατασταθεί σε περιβάλλοντα υψηλών επιδόσεων όπου η απόδοση και εξοικονόμηση ενέργεια είναι εξίσου σημαντικοί παράγοντες. Απαντάτε στο σύστημα Moonshot μέσο του cartridge ProLiant m400.



Σχήμα 2.1 ProLiant m400 overview.

Η σκοπιμότητα για την χρήση χαμηλών σε κατανάλωση ενέργειας επεξεργαστών σε λύσεις για υπερυπολογιστές οφείλετε στο γεγονός πως η απαιτήσεις για υπολογιστική ισχύ αυξάνονται συνεχώς, και για να συνεχιστεί αυτή η ανάπτυξη στην ισχύ θα πρέπει να βρεθούν ενεργειακά αποδοτικές λύσεις. Η γενική ιδέα είναι η χρήση ενός μεγάλου αριθμού από ενεργειακά αποδοτικούς επεξεργαστές ARM σε αντίθεση με την χρήση ενός μικρού αριθμού από ενεργοβόρους επεξεργαστές αρχιτεκτονικής x86 [1, 2]. Ακόμη, η κατασκευαστές επεξεργαστών επικεντρώνονται στην αγορά των οικιακών και επαγγελματικών προϊόντων η οποία αντιπροσωπεύει το 99% τον κερδών τους, με την αγορά των υπερυπολογιστών να ανταποκρίνεται στο 1% [4]. Αυτό το γεγονός δείχνει πως οι μελλοντικές λύσεις θα πρέπει να στηριχθούν στις καινοτομίες που γίνονται στον τομέα αυτό, και στην σήμερον ημέρα είναι επεξεργαστές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Επιπροσθέτως, η χρήση πολυπύρηνων επεξεργαστών σε χαμηλής κατανάλωσης λύσεις δείχνει να επωφελείται από διπλασιασμό στην υπολογιστική ισχύ με μόνο 67% αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας [2]. Στα πλαίσια της μελέτης αυτής θα γίνουν μετρήσεις σε μηχανή Raspberry Pi 1 και Raspberry Pi 2 έτσι ώστε να βρεθεί βαθμός της εξέλιξης της υπολογιστικής ισχύος από γενιά σε γενιά καθώς και η διαφορά στις μετρήσεις με την χρήση πολυπύρηνου επεξεργαστή.

Θα χρειαστεί να βρεθεί μια σουίτα από προγράμματα για να τρέξουν στα συστήματα υπό αξιολόγηση, τα οποία να αντιπροσωπεύουν μια πληθώρα από προβλήματα που λύνονται σε υπερυπολογιστές. Η απάντηση θα έρθει από την μορφή των NAS Parallel Benchmarks, τα οποία δίνουν τον χρόνο λύσης του προβλήματος ανεξάρτητα από τον χρόνο που χρειάστηκε να γίνει προετοιμασία για το τρέξιμο (initialization time) [1, 4, 21, 22, 23]. Αυτό είναι απαραίτητο διότι λόγο της φύσης των επεξεργαστών ARM, η διαθέσιμη μνήμη είναι περιορισμένη και αργή, και αυτό έχει αντίκτυπο στον χρόνο λύσης (Time to Solution). Η πληθώρα των προγραμμάτων αυτόν επιτρέπει την ανάλυση όλων των χαρακτηριστικών των μονάδων επεξεργασίας, και την εύρεση των περιορισμών που έχουν αντίκτυπο στην επίδοση τους.

Ακόμη, απαιτείτε να βρεθεί μια μεθοδολογία για να γίνει η αξιολόγηση των συστημάτων. Για αυτόν τον σκοπό μελετήθηκαν λεπτομερώς οι μετρήσεις υπολογιστικής ισχύος και κατανάλωσης ενέργειας και ο τρόπος που επεξεργάζονταν σε γραφικές παραστάσεις από τα διάφορα άρθρα [1, 2, 3, 4, 8, 14, 15] . Από την γνώση που αποκτήθηκε και έχοντας λάβει υπόψιν τους περιορισμούς σε υλικό που είναι διαθέσιμο για την παρούσα μελέτη, αποφασιστικέ πως οι πιο αντιπροσωπευτικές μετρήσεις θα είναι η συνολική κατανάλωση ενέργειας μέχρι να τερματίσει το benchmark (Energy to Solution) και ο συνολικός χρόνος (Time to Solution). Αυτές οι μετρήσεις θα καταστήσουν δυνατή την απευθείας σύγκριση των επεξεργαστών στα δυο κύρια χαρακτηριστικά που αναζητά η έρευνα αυτή, ενέργεια και χρόνο εκτέλεσης.

Στην μελέτη που έγινε δεν συμπεριλήφθηκαν επεξεργαστές με αρχιτεκτονική ARM v8 64-bit λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας τους σε υπολογιστικές μονάδες. Η πρώτες ενδείξεις για την βελτίωση που πρόκειται να παρουσιάζουν είναι πολύ υποσχόμενες [1, 4, 18], με την αλλαγή σε αρχιτεκτονική 64 bit και την αύξηση της μνήμης cache για κάθε πυρήνα να τους κάνει πιο κατάλληλους για λύσεις σε υπερυπολογιστές.

Κεφάλαιο 3

Το υλικό και λογισμικό προς αξιολόγηση

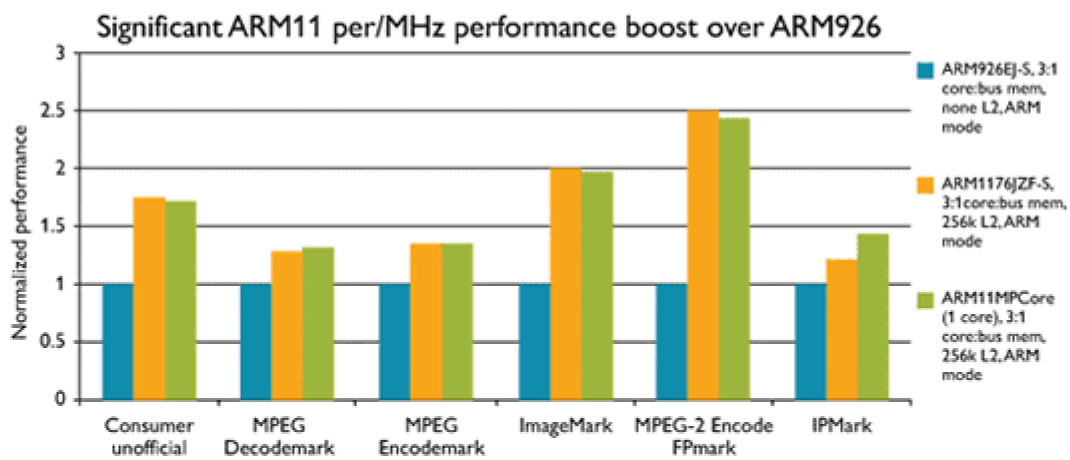
3.1 Υλικό

Το υλικό που θα αξιολογηθεί στην παρών μελέτη καλύπτει ένα ευρέως φάσμα από μικρό αρχιτεκτονικές κεντρικών μονάδων επεξεργασίας (Κ.Μ.Ε). Ο απώτερος στόχος είναι να βρεθεί αν οι χαμηλοί σε κατανάλωση ενέργειας επεξεργαστές μπορούν να συναγωνιστούν επεξεργαστές με εκθετικά μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Ακόμη, ερευνητικό ενδιαφέρων παρουσιάζει η αυξητική πορεία των επιδόσεων των προαναφερθέντων επεξεργαστών, κάτι που καθιστά ικανό να γίνουν βάσιμες προβλέψεις για το άμεσο μέλλον και να βγουν συμπεράσματα για την σκοπιμότητα τους σε λύσεις για υπερυπολογιστές.

Προς εξυπηρέτηση των στόχων αυτών, επιλέχθηκε υλικό που αντιπροσωπεύει όσο το δυνατών μεγαλύτερη διαφορά (delta) στην ενεργειακή κλίμακα. Στο κατώτερο άκρο της ενεργειακής κατανάλωσης βρίσκονται 2 έξυπνα κινητά τηλέφωνα, όπου η πλατφόρμα τους απαιτεί η Κ.Μ.Ε. να είναι όσο το δυνατών ενεργειακά αποδοτική γίνεται. Ακολουθούν 2 υπολογιστικές μονάδες οι οποίες έχουν παθητική ψύξη, όπως τα έξυπνα κινητά τηλέφωνα, αλλά η Κ.Μ.Ε. τους δεν βρίσκετε εσώκλειστη, επιτρέποντας ένα ελαφρά μεγαλύτερο ενεργειακό προφίλ. Στην ίδια θέση της κλίμακας κατανάλωσης απαντώνται ακόμη μία υπολογιστική μονάδα και ένας φορητός υπολογιστής. Εδώ το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στο γεγονός ότι η υπολογιστική μονάδα είναι εξοπλισμένη με τον πιο ενεργοβόρω επεξεργαστή ARM της μελέτης αυτής, απαιτώντας έτσι ενεργή ψύξη μέσο ανεμιστήρα και ψήκτρας, ενώ ο φορητός υπολογιστής αντιπροσωπεύει την πιο ενεργειακά αποδοτική Κ.Μ.Ε. αρχιτεκτονικής x86, χωρίς την ανάγκη για ενεργή ψύξη. Προχωρώντας αυξητικά στην κλίμακα, την επόμενη θέση κατέχει ένας φορητός υπολογιστής με ενεργειακό προφίλ αρκετά μεγαλύτερο από ότι προήλθε μέχρι τώρα. Αυτό οφείλεται στην Κ.Μ.Ε. του η οποία είναι σχεδιασμένη για αυξημένη υπολογιστική επίδοση. Στο βάθρο της κλίμακας βρίσκεται ο πιο απαιτητικός επεξεργαστής, εγκατεστημένος σε ένα επιτραπέζιο υπολογιστή. Σχεδιασμένος για μέγιστες επιδώσεις, δεν περιορίζει την απόδοση του για εξοικονόμηση ενέργειας, δίνοντας έτσι και την μεγαλύτερη μέτρηση κατανάλωσης.

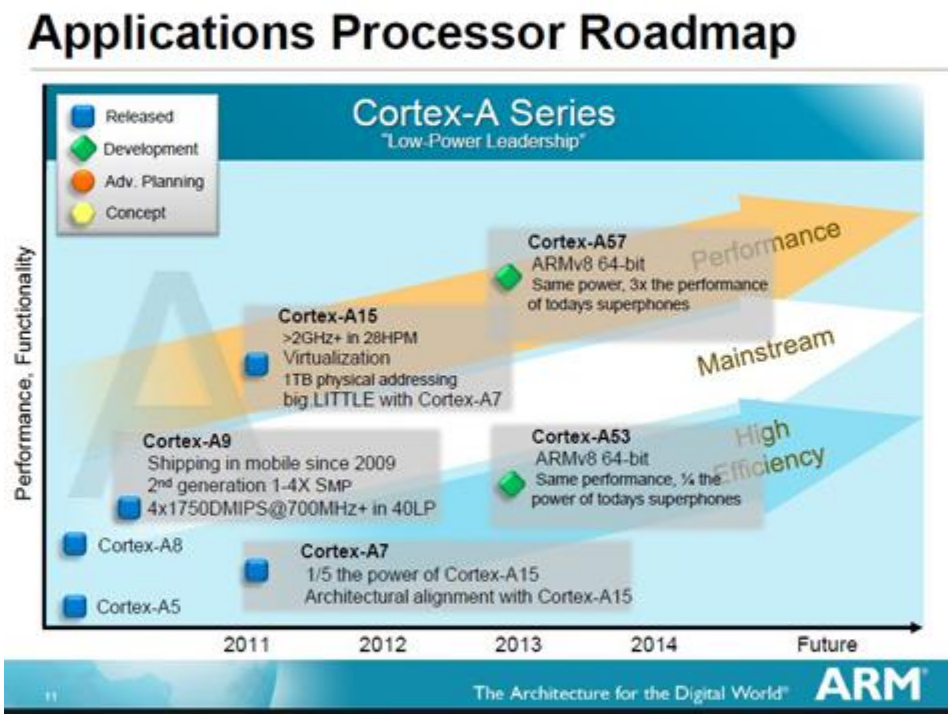
Οι πρώτες δύο κατηγορίες, τα έξυπνα κινητά τηλέφωνα και οι υπολογιστικές μονάδες, αποτελούν τα συστήματα που υλοποιούν την αρχιτεκτονική ARM. Κύριο χαρακτηριστικό της είναι η μικρή κατανάλωση ενέργειας με υψηλές επιδώσεις. Υπάρχουν 2 γενεές RISC ISA 32 bit που θα μελετηθούν, ARMv6 και ARMv7, με εμβάθυνση στην τελευταία. Κάθε ISA έχει και την δική της μικρό αρχιτεκτονική, η ARMv6 υλοποιείται μέσο της ARM11 (και την τώρα μη διαθέσιμη ARM9) και η ARMv7 μέσω των Cortex-A μικρό αρχιτεκτονικών. Οι Cortex-A είναι πιο ευρέως διαδεδομένοι, κάτι που αντικατοπτρίζει το πλήθος τους στην παρούσα μελέτη.

Η Κ.Μ.Ε. ARM1176JZF-S είναι η μόνη υλοποίηση ARMv6 που είναι διαθέσιμη για μελέτη. Αποτελεί το αποκορύφωμα των ARMv6 μονοπύρηνων επεξεργαστών [34]. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων θα επιτρέψει την σύγκριση της με την διάδοχο της, ARMv7, και με αυτήν την σύγκριση θα είναι δυνατή η εύρεση της αυξητικής πορείας της υπολογιστικής ισχύς.



Σχήμα 3.1 Αρχιτεκτονική ARM11 σε σύγκριση με ARM9 [34].

Οι αρχιτεκτονικές υλοποιημένες με ARMv7 που θα μελετηθούν είναι οι ακόλουθες, Cortex-A7, Cortex-A8, Cortex-A15 και Krait. Η Cortex-A8 αρχιτεκτονική ήταν η πρώτη που υποστήριζε το ISA ARMv7 και είχε στόχο την μέγιστη υπολογιστική απόδοση [35]. Η αρχιτεκτονική Krait σχεδιαστικέ από την Qualcomm για ενσωμάτωση στα δικά της συστήματα σε ένα τσιπ με στόχο την μέγιστη υπολογιστική απόδοση με το λιγότερο κόστος σε ενέργεια [36]. Ο σκοπός της αρχιτεκτονική Cortex-A7 είναι να προσφέρει εφάμιλλη απόδοση με τον πιο ισχυρό επεξεργαστή που ήταν διαθέσιμος το 2012, τον Cortex-A9, αλλά με λιγότερο ενεργειακό προϋπολογισμό [37]. Τελειώνοντας, η αρχιτεκτονική Cortex-A15 προσφέρει την μεγαλύτερη υπολογιστική επίδοση με την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας [38].



Σχήμα 3.2 Κατηγοριοποίηση και το πλάνο για Cortex-A Κ.Μ.Ε.

Οι δυο εναπομείναντες κατηγορίες, φορητοί υπολογιστές και επιτραπέζιοι υπολογιστές περιέχουν συσκευές υλοποιημένες με Κ.Μ.Ε. αρχιτεκτονικής x86. Με τον παράγοντα ενεργειακής απόδοσης να είναι δευτερεύον σε σύγκριση με την υπολογιστική ισχύ, είναι αναμενόμενο να παρουσιάζουν την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Μόνη εξαίρεση αποτελεί ο επεξεργαστής Intel Celeron N2840 ο οποίος είναι ο λιγότερο απαιτητικός σε ενέργεια από τους τρείς που μελετήθηκαν.

Πιο συγκεκριμένα, θα εξεταστούν 3 επεξεργαστές με 2 διαφορετικές μικρό αρχιτεκτονικές.
Ο πρώτος και ο πιο ισορροπημένος σε σχέση επίδοση - κατανάλωση ενέργειας είναι ο Intel Celeron N2840. Η μικρό αρχιτεκτονική του είναι η Silvermont η οποία είναι ιδικά σχεδιασμένη

για να μείωση το ενεργειακό προφίλ επεξεργαστών x86 ώστε να εγκαθίστανται σε πλατφόρμες με παθητική ψύξη [39, 40]. Η τελευταία μικρό αρχιτεκτονική που θα μελετηθεί είναι η Sandy Bridge, η οποία υλοποιείτε στον Intel Core i5 2450M και Intel Core i5 2400 [41]. Είναι η πιο μεγάλη σε υπολογιστική επίδοση μικρό αρχιτεκτονική που σχεδιάζει η Intel, με περισσότερη έμφαση στην επεξεργαστική ισχύ και λιγότερη στην κατανάλωση ενέργειας. Υλοποιείται όμως σε πληθώρα από συστήματα σε ένα τσιπ με μεγάλες διαφορές στην κατανάλωση ενέργειας, από φορητούς υπολογιστές μέχρι εξυπηρετητές [41]. Τα δύο αυτά τσιπ που είναι υλοποιημένα με την ίδια μικρό αρχιτεκτονική θα μελετηθούν προσεκτικά ώστε να βρεθεί πως η απόδοση επηρεάζεται από την κατανάλωση ενέργειας, αφού το ένα βρίσκετε σε φορητό υπολογιστή και έτσι θα έχει χαμηλό ενεργειακό προφίλ, ενώ το άλλο σε επιτραπέζιο υπολογιστή με πιο μεγάλες απαιτήσεις σε ενέργεια.

3.1.1 Έξυπνα κινητά τηλέφωνα

3.1.1.1 Google/Samsung Nexus S

Το έξυπνο κινητό τηλέφωνο Nexus S έχει σχεδιαστεί από την Google σε συνεργασία με την Samsung και κυκλοφόρησε στην αγορά το 2010. Συσκευές που ανήκουν στην κατηγορία Nexus χρήζουν απευθείας ελέγχου από την Google και εξ αυτού αποτελούν την ναυαρχίδα για το λογισμικό Android. Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας του συστήματος είναι το σύστημα σε ένα τσιπ (SoC) Exynos 3110/Exynos 3 Single. Ο πυρήνας του συστήματος είναι μια μονοπύρηνη επεξεργαστική μονάδα 32-bit Cortex-A8 [25] χρονισμένη στα 1 GHz με 512 KB L2 cache, υλοποιώντας την αρχιτεκτονική ARMv7-A [27]. Το σύστημα παρέχει 512 MB RAM. Ενδιαφέρον αποτελεί το γεγονός πως η μεγάλη υπολογιστική ισχύς που παρέχει του επέτρεψε να σταλεί στο διάστημα και να συμμετάσχει σε πειράματα της NASA στον διαστημικό σταθμό [26].

3.1.1.2 Google/LG Nexus 4

Το έξυπνο κινητό τηλέφωνο Nexus 4 έχει σχεδιαστεί από την Google σε συνεργασία με την LG και κυκλοφόρησε στην αγορά το 2012. Το σύστημα σε ένα τσιπ που είναι εγκατεστημένο είναι το Qualcomm Snapdragon S4 Pro (APQ8064) [28]. Η επεξεργαστικής ισχύς προέρχεται από 4 ασύγχρονους πυρήνες αρχιτεκτονικής Krait χρονισμένους στα 1.5 GHz. Η αρχιτεκτονική Krait αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της Qualcomm, και είναι σχεδιαστικά παρόμοια με την αρχιτεκτονική Cortex-A15 [29], υλοποιώντας την ARMv7-A ISA. Το σύστημα παρέχει 2 GB RAM.

3.1.2 Υπολογιστικές Μονάδες

3.1.2.1 Raspberry Pi 1 (model B rev 1 w/ 256MB RAM)

Η υπολογιστική μονάδα Raspberry Pi γενιάς 1 μοντέλου B που είναι διαθέσιμη για αξιολόγηση, κυκλοφόρησε στην αγορά το 2012. Ήταν από τα πρώτα μοντέλα που είχαν 256 MB RAM, με τα επόμενα να έχουν 512 MB RAM. Το σύστημα σε ένα τσιπ που συναντούμε είναι το Broadcom BCM2835, με ένα μονοπύρηνο επεξεργαστή ARM1176JZF-S χρονισμένο στα 700 MHz με βάση το ARMv6 ISA [30]. Υπαρχή η δυνατότητα να αλλαχτεί η ταχύτητα χρονισμού από τον χρήστη μέχρι το 1 GHz.

3.1.2.2 Raspberry Pi 2 model B

Η υπολογιστική μονάδα Raspberry Pi γενιάς 2 μοντέλου B που θα αξιολογηθεί κυκλοφόρησε το 2015. Υλοποιήθηκε με το σύστημα σε ένα τσιπ Broadcom BCM2836, το οποίο είναι πανομοιότυπο με το Broadcom BCM2835 που απαντάται στο Raspberry Pi γενιάς 1 [31], με την μοναδική διαφορά πως αλλάχτηκε η κεντρική μονάδα επεξεργασίας από τον μονοπύρηνο ARM1176JZF-S σε τετραπύρηνο Cortex-A7, συνεπακόλουθο της αλλαγής από ARMv6 σε ARMv7 ISA. Ο χρονισμός του ανέρχεται στα 900 MHz και η RAM σε 1 GB.

3.1.2.3 NVidia Jetson TK1

Η υπολογιστική μονάδα NVidia Tegra K1 κυκλοφόρησε το 2014. Το σύστημα σε ένα τσιπ που χρησιμοποιεί είναι το NVidia Tegra K1 με τέσσερις πυρήνες Cortex-15 [32, 33]. Υπάρχει και ένας μικρός πυρήνας πολύ χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας αλλά δεν είναι διαθέσιμος στον χρήστη. Ο μέγιστος χρονισμός της Κ.Μ.Ε. είναι 2.3 GHz και η μνήμη RAM ανέρχεται σε 2 GB. Ακόμη, υπαρχή και μια αρκετά ισχυρή επεξεργαστική μονάδα για γραφικά (GPU), με 192 SM3.2 CUDA πυρήνες (μέχρι και 326 GFLOPS) [33] η οποία θα αξιολογηθεί με τα αντίστοιχα benchmarks.

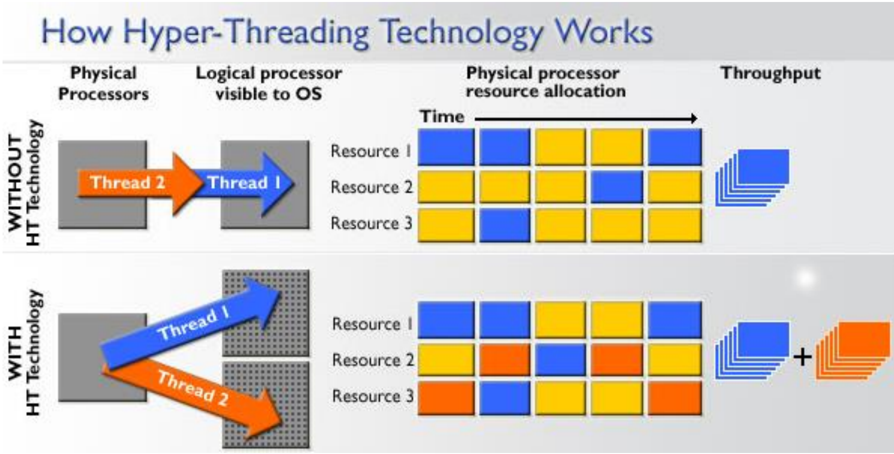
3.1.3 Φορητοί υπολογιστές

3.1.3.1 HP Stream Notebook PC 13

Η πλατφόρμα φορητού υπολογιστή Stream 13 κυκλοφόρησε το 2014 και υλοποιείται από τον πιο ενεργειακά αποδοτικό επεξεργαστή x86 προς αξιολόγηση, τον Intel Celeron N2840 με μικρό αρχιτεκτονική Silvermont. Υπάρχουν 2 πυρήνες χρονισμένοι στα 2.16 GHz υποστηριζόμενοι από 2 GB μνήμης RAM [42]. Με την χρήση αυτού του συστήματος στις αξιολογήσεις θα είναι δυνατή η μέτρηση του ρόλου που παίζει η αρχιτεκτονική στις επιδόσεις, αφού το σύστημα αυτό ανήκει στην ίδια κατηγορία κατανάλωσης με τις υπολογιστικές μονάδες.

3.1.3.2 Sony VAIO Laptop SVE1511W1ESI

Η πλατφόρμα φορητού υπολογιστή SVE1511W1ESI κυκλοφόρησε το 2013 και η Κ.Μ.Ε. της είναι η Intel Core i5 2450M με δύο πυρήνες αρχιτεκτονικής Sandy Bridge χρονισμένους στα 2.5 GHz. Η μνήμη RAM του συστήματος είναι 6 GB [43]. Ο επεξεργαστής υποστηρίζει την τεχνολογία Hyper – Threading, η οποία επιτρέπει σε 1 πυρήνα επεξεργασίας να παρουσιάζεται στο λειτουργικό σύστημα σαν 2 [44].



Σχήμα 3.3 Απλό παράδειγμα της τεχνολογίας Hyper – Threading.

Οι δυνατότητες της τεχνολογίας αυτής θα αξιολογηθούν με την παράλληλη σουίτα των benchmarks, τα οποία αναγνωρίζουν και τους 4 πυρήνες. Ενδιαφέρων θα έχει η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά του επιτραπέζιου υπολογιστή που διαθέτη έμφυτους 4 πυρήνες επεξεργασίας. Θα μελετηθεί αν η τεχνολογία Hyper – Threading μπορεί να δόση όντος επιδώσεις εφάμιλλες με πιο ισχυρούς επεξεργαστές που δεν την υποστηρίζουν.

3.1.4 Επιτραπέζιοι υπολογιστές

3.1.4.1 HP Compaq 8200 Elite CMT PC

Το σύστημα με την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας της μελέτης είναι ο επιτραπέζιος υπολογιστής HP Compaq 8200 Elite. Η Κ.Μ.Ε. του υπολογιστή είναι η Intel Core i5 2400 αρχιτεκτονικής Sandy Bridge με 4 πυρήνες επεξεργασίας χρονισμένους στα 3.1 GHz. Εδώ το σύστημα έχει 4 πραγματικούς πυρήνες χωρίς την υποστήριξη της τεχνολογία Hyper – Threading [45], σε αντίθεση με το VAIO. Η μνήμη RAM του συστήματος ανέρχεται στα 8 GB. Εφόσον το σύστημα μπορεί να λειτουργεί παράλληλα 4 πυρήνες, αναμένετε να παρουσίαση και την πιο μεγάλη υπολογιστική επίδοση, με το αντίκτυπο να έρχεται υπό την μορφή της κατανάλωσης ενέργειας.

3.1.5 Μετρητής κατανάλωσης ενέργειας

3.1.5.1 Energenie ENER007

Η συσκευή που καθιστά δυνατή την μέτρηση των ενεργειακών απαιτήσεων όλων των συστημάτων είναι η Energenie ENER007. Είναι ένας μετρητής κατανάλωσης ενέργειας που ενώνεται στην πρίζα, και διαμέσου της παρέχετε ενέργεια στη εκάστοτε πλατφόρμα που χρησιμοποιείται για αξιολόγηση. Η ενέργεια που καταναλώνει ο μετρητής είναι μικρότερη από 0.5W [46] και δεν προσθέτετε στα αποτελέσματα των μετρήσεων, αφού οι μετρήσεις αρχίζουν από τα 0.0W.

Ακολουθεί πίνακας με τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των συσκευών που αξιολογήθηκαν, ταξινομημένα αυξητικά με βάση το ενεργειακό προφίλ τους.

Πλατφόρμα	**ISA**	**SoC**	**Μικρό αρχιτεκτονική CPU πυρήνων**	**# πυρήνων**	**Μέγιστος χρονισμός CPU σε GHz**	**Μέγεθος μνήμης RAM**	**Ενεργειακό προφίλ (κατάταξη)**
Nexus S	ARMv7	Samsung Exynos 3 Single	Cortex-A8	1	1	512 MB	Κατώτατο
Nexus 4	ARMv7	Qualcomm Snapdragon S4 Pro	Krait	4	1.5	2 GB	Κατώτατο
Raspberry Pi 1	ARMv6	Broadcom BCM2835	ARM1176JZF-S	1	0.7 – 1 (overclk)	256 MB	Δεύτερο
Raspberry Pi 2	ARMv7	Broadcom BCM2836	Cortex-A7	4	0.9	1 GB	Δεύτερο
NVidia Jetson TK1	ARMv7	NVidia Tegra K1	Cortex-A15	4 + 1(Hidden)	2.3	2 GB	Δεύτερο
HP Stream Notebook PC 13	x86	Intel Celeron N2840	Silvermont	2	2.16	2 GB	Δεύτερο
Sony VAIO Laptop SVE1511W1ESI	x86	Intel Core i5 2450M	Sandy Bridge	2 (4 Logical)	2.5	6 GB	Τρίτο
HP Compaq 8200 Elite CMT PC	x86	Intel Core i5 2400	Sandy Bridge	4	3.1	8 GB	Μέγιστο

Πίνακας 3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά συσκευών.

3.2 Λογισμικό

3.2.1 Λογισμικό Android

Το λογισμικό που τρέχει στα δύο έξυπνα κινητά τηλέφωνα είναι το Android. Αποτελεί δημιουργία της εταιρίας Google και είναι ανοικτού πηγαίου κώδικά (open source). Η νεότερη έκδοση του, ονομαστικά 6.0.1 Marshmallow, δεν είναι συμβατή με τα συστήματα μας λόγο της χρονολογίας που κυκλοφόρησαν στην αγορά, το Nexus S το 2010 και το Nexus 4 το 2012. Το γεγονός όμως πως οι δυο συσκευές ανήκουν στην κατηγορία Nexus, μας δίνει την δυνατότητα να αλλάξουμε την έκδοση του λειτουργικού συστήματος που είναι εγκατεστημένη με μια της δικής μας επιλογής. Η επιλογές μας όμως περιορίζονται διότι οι εφαρμογές που θα χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλον Android έχουν περιορισμούς συμβατότητας με νεότερες εκδώσεις. Επιλέχθηκε να γίνει χρήση της έκδοσης 4.1.2 για το Nexus S και 4.4.4 για το Nexus 4 οι οποίες είναι ο νεότερες που έχουν συμβατότητα με τις εφαρμογές που χρειαζόμαστε.

3.2.1.1 Terminal IDE

Η πρώτη εφαρμογή που θα χρησιμοποιηθεί είναι η Terminal IDE. Αποτελεί ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον για ανάπτυξη εφαρμογών και παρέχει την δυνατότητα μεταγλώττισης εφαρμογών με την χρήση του GCC GNU Compiler, γεγονός που μας επέτρεψε να τρέξουμε τα benchmarks στα έξυπνα κινητά τηλέφωνα. Μεταφέρθηκε ο πηγαίος κώδικας στο σύστημα και ακολούθως με την χρήση της εφαρμογής Terminal IDE έγινε η μεταγλώττιση. Η μετακινήσεις μέσα στην εφαρμογή γίνονται μέσω παραθύρου terminal και η εντολές είναι αυτές που χρησιμοποιούνται σε περιβάλλον Linux. Χρησιμοποιώντας το παράθυρο terminal θα γίνει τρέξιμο των benchmark και καταγραφή του χρόνου εκτέλεσης. Για να τρέξει η εφαρμογή χρειάζεται έκδοση Android 2.3 και πάνω μέχρι 4.4.4

3.2.1.2 Power Tutor

Για την μέτρηση της κατανάλωσης ενέργειας χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή Power Tutor. Η χρήση της έχει ως εξής, ανοίγοντας την εφαρμογή σου δίνεται η επιλογή να ξεκινήσεις ένα νέο κύκλο μετρήσεων. Η μετρήσεις γίνονται με βάση την εφαρμογή, δηλαδή θα εμφανιστή μέτρηση κατανάλωσης για όλες τις εφαρμογές που τρέχουν. Ανάλογα με την χρονική διάρκεια και χρήση του επεξεργαστή από την εκάστοτε εφαρμογή, γίνεται ο υπολογισμός της ενέργειας και παρουσιάζεται σε μονάδα μέτρησης Joule. Η υλοποίηση της εφαρμογής έγινε από το πανεπιστήμιο του Michigan. Για να τρέξει η εφαρμογή χρειάζεται έκδοση Android 1.5 και πάνω.

3.2.2 Λογισμικό Raspbian/Ubuntu

Το λειτουργικό σύστημα που τρέχει στις υπολογιστικές πλατφόρμες Raspberry Pi 1 και Raspberry Pi 2 είναι το Raspbian, το οποίο είναι μια ανεπίσημη έκδοση του δωρεάν λειτουργικού συστήματος Debian. Η έκδοση του Raspbian που χρησιμοποιείται είναι η “Jessie November” η οποία είναι βασισμένη στην έκδοση 8 του Debian. Το Raspbian αλλάζει τις παραμέτρους για το “application binary interface” ώστε να είναι συμβατό με την παλαιότερη αρχιτεκτονική ARMv6 του Raspberry Pi 1 καθώς και με την αρχιτεκτονική ARMv7 του Raspberry Pi 2. Το λειτουργικό σύστημα Debian χρησιμοποιεί το Linux Kernel σε συνδυασμό με δικά του προγράμματα. Ένα από αυτά είναι και ο μεταγλωττιστής GCC GNU Compiler με τον οποίο θα γίνει η μεταγλώττιση των benchmarks στα προαναφερθέν συστήματα.

Το λειτουργικό σύστημα που είναι προεγκατεστημένο στην υπολογιστική πλατφόρμα NVidia Tegra K1 και στον επιτραπέζιο υπολογιστή HP Compaq 8200 Elite CMT PC είναι το Ubuntu 14.04 LTS (Long Term Support) το οποίο είναι βασισμένο στο λειτουργικό σύστημα Debian και κάνει χρήση του Linux Kernel. Ανάμεσα στα προ εγκατεστημένα προγράμματα είναι ο GCC και G++ GNU Compiler, χρήση των οποίων είναι απαραίτητη για την μεταγλώττιση του κώδικα σε γλώσσα C των benchmark NPB3.3-SER-C και NPB3.3-OMP-C και του κώδικα σε γλώσσα C++ των NPB3.3-CUDA.

3.2.3 Λογισμικό Windows

Τα δύο εναπομείναντα συστήματα προς αξιολόγηση είναι το HP Stream Notebook PC 13 και το Sony VAIO Laptop SVE1511W1ESI. Το λειτουργικό σύστημα και των δυο είναι το ίδιο, ονομαστικά το Windows 10 64 – bit. Αρχικά τα συστήματα χρησιμοποιούσαν μια παλαιότερη έκδοση του λειτουργικού συστήματος, Windows 8.1 64 – bit, αλλά για λόγους επιδόσεων και για να είναι πιο αντιπροσωπευτικά τα αποτελέσματα στο άμεσο μέλλον, κρίθηκε αναγκαίο να γίνει αναβάθμιση. Όσων αφορά την πρόθεση μας για αξιολόγηση των παρών συστημάτων, η έλλειψη προ εγκατεστημένου μεταγλωττιστή αποτελεί το μεγαλύτερο μειονέκτημα των λειτουργικών συστημάτων αυτών σε σύγκριση με τα προηγούμενα. Η εγκατάσταση του μεταγλωττιστή GCC GNU Compiler θα γίνει μέσο του προγράμματος/εργαλείου Cygwin.

3.2.3.1 Cygwin

Το πρόγραμμα Cygwin επιτρέπει την εκτέλεση ενός περιβάλλοντος Linux σε πλατφόρμα Windows με υποστήριξη εντολών bash και εγκατάσταση προγραμμάτων ιθαγενών σε περιβάλλον Linux. Στην δική μας περίπτωση, η ανάγκη για μεταγλώττιση των benchmarks γραμμένων σε γλώσσα C θα μας αναγκάσει να εγκαταστήσουμε τον GCC GNU Compiler καθώς και το εργαλείο make GNU. Ακόμη, μέσω του παραθύρου terminal που παρέχει το Cygwin, θα γίνει το τρέξιμο των εκτελέσιμων αρχείων και το μέτρημα του χρόνου ολοκλήρωσης.

3.2.3 Benchmarks

Για την αξιολόγηση των επιδόσεων των συστημάτων έπρεπε να βρεθεί μια σουίτα από εφαρμογές η οποία να είναι διαθέσιμη χωρίς χρέωση, να είναι ανοικτού πηγαίου κώδικα ώστε να μεταγλωττίζεται στο κάθε σύστημα ξεχωριστά και να είναι αντιπροσωπευτική των υπολογιστικών μεθόδων και φορτίων που χρησιμοποιούνται σε εξυπηρετητές και υπερυπολογιστές. Όλα τα προαναφερθέν κριτήρια πληρούνται από την σουίτα NPB3.3 (NAS Parallel Benchmarks) η οποία ακολουθεί το πρότυπο προγραμματισμού (API) OpenMP το οποίο υποστηρίζει παράλληλη επεξεργασία. Το NAS είναι συντομογραφία του NASA Advanced Supercomputing division, ο οργανισμός από τον οποίο προέρχονται και έχουν προγραμματιστεί τα συγκεκριμένα benchmarks [21]. Ο λόγος που δημιουργήθηκαν ήταν για να αξιολογήσουν υπολογιστές υψηλών επιδόσεων οι οποίοι ήταν υποψήφιοι για αγορά από την NASA, και πιο συγκριμένα από το AMES Research Center. Τα 8 προβλήματα benchmark που είναι διαθέσιμα αντιπροσωπεύουν πραγματικούς επιστημονικούς υπολογισμούς που εκτελούνται σε υπερυπολογιστές [22, 23],με 5 από αυτά να κάνουν μαθηματικούς υπολογισμούς και τα υπόλοιπα 3 να προσομοιώνουν εφαρμογές ρευστό-δυναμικής (simulated computational fluid dynamics). Ακόμη, για κάθε πρόβλημα υπαρχή η επιλογή 4 διαφορετικών μεγεθών (classes) που μπορούν να εκτελεστούν [21]:

- S class, το πιο μικρό μέγεθος. Χρησιμοποιείτε για να εξακριβωθεί αν τρέχει σωστά η εφαρμογή.
- W class, αντιπροσωπευτικό ενός σταθμού εργασίας από το 1990.
- A class, αποτελεί την αρχή για μετρήσεις επιπέδου υπερυπολογιστών.
- B class, αύξηση μεγέθους x4 από την A class.

3.2.3.1 NPB3.3-SER-C

Αυτή είναι η σουίτα οπού η εκτέλεση των benchmarks γίνεται σε ένα πυρήνα επεξεργασίας μόνο. Είναι προγραμματισμένα με την γλώσσα προγραμματισμού C. Ασχέτως αν το σύστημα διαθέτη επιπλέον πυρήνες, ο κώδικας στα παρών προβλήματα δεν αναγνωρίζει επιπλέον επεξεργαστικές μονάδες. Χρησιμοποιούνται για αξιολόγηση μονοπύρηνων επεξεργαστών, και στην παρών μελέτη θα μας βοηθήσουν να εξακριβώσουμε τις βελτιώσεις από μια μικρό αρχιτεκτονική σε σύγκριση με μια άλλη. Μετρώντας την επίδοση ενός πυρήνα επεξεργασίας κάθε φορά, θα είναι δυνατή η εξακρίβωση της πιο αποδοτικής αρχιτεκτονικής. Τα προβλήματα benchmark περιγράφονται πιο κάτω:

- EP, embarrassingly parallel. Όπως αφήνει να ενωθεί από το όνομα του, η εκτέλεση γίνεται παράλληλα χωρίς την μεσολάβηση επικοινωνίας μεταξύ των υπολογιστικών μονάδων και παράγει ζευγάρια από Gaussian παρεκκλίσεις.

- MG, multigrid calculation. Υπολογίζει τον πολλαπλασιασμό πλεγμάτων με την χρήση δομημένων πληροφορίων και η ταχύτητα του είναι εξαρτώμενη από την επικοινωνία μεταξύ των επεξεργαστικών μονάδων.
- CG, conjugate gradient. Υπολογίζει τις μικρότερες ιδιοτιμές μεγάλων πινάκων με την χρήση μη δομημένων πινάκων πολλαπλασιασμού, και η ταχύτητα του εξαρτάτε από την επικοινωνία μεταξύ των πυρήνων επεξεργασίας.
- FT, furrier transform. Υπολογίζει την λύση τρισδιάστατων διαφορικών εξισώσεων με την χρήση Fast Furrier Transform (FFT) και η ταχύτητα του εξαρτάτε από την ενδοεπικοινωνία μεταξύ των πυρήνων επεξεργασίας.
- IS, integer sort. Υπολογίζει την ταξινόμηση ακέραιων αριθμών. Το πρόβλημα αυτό εξαρτάτε τόσο από την ταχύτητα επεξεργασίας ακέραιων αριθμών όσο και από την επικοινωνία μεταξύ των επεξεργαστών.
- LU, Lower-Upper symmetric Gauss-Seidel. Υπολογίζει σύνθετα computational fluid dynamics (CFD) συστήματα λύνοντας Lower-Upper 5x5 τριγωνικά συστήματα.
- SP, Scalar Penta-diagonal. Υπολογίζει σύνθετα computational fluid dynamics (CFD) συστήματα λύνοντας πολλά ανεξάρτητα συστήματα Penta-diagonal εξισώσεων.
- BT, Block Tridiagonal. Υπολογίζει σύνθετα computational fluid dynamics (CFD) συστήματα λύνοντας πολλά ανεξάρτητα συστήματα Block Tridiagonal εξισώσεων.

3.2.3.2 NPB3.3-OMP-C

Σε αντίθεση με την NPB3.3-SER-C, η σουίτα προβλημάτων benchmark NPB3.3-OMP-C αναγνωρίζει τις επιπλέον υπολογιστικές μονάδες που υπάρχουν στο σύστημα, καθιστώντας την ιδανική για αξιολόγηση πολυπύρηνων συστημάτων. Στην μελέτη αυτή, θα χρησιμοποιηθεί για να εξακριβωθεί το ποσοστό αύξησης της επεξεργαστικής ισχύς από μονοπύρηνες λύσεις σε πολυπύρηνες, καθώς και για την ανάλυση των επιδόσεων μεταξύ πολυπύρηνων συστημάτων σε ένα τσιπ (SoC). Τα προβλήματα benchmark παραμένουν τα ίδια με αυτά από την σουίτα NPB3.3-SER-C.

3.2.3.3 NPB3.3-CUDA

Για την αξιολόγηση την γραφικής μονάδας επεξεργασίας (GPU) του συστήματος NVidia Tegra K1 το οποίο έχει προγραμματίσιμους πυρήνες CUDA, θα χρειαστούμε μια σουίτα εφαρμογών που να είναι ικανή να τρέξει σε αυτή την αρχιτεκτονική. Στην παρών μελέτη θα χρησιμοποιηθεί η σουίτα προβλημάτων benchmark NPB3.3-CUDA η οποία είναι γραμμένη σε γλώσσα C++ και διαθέτη τα benchmark BT και SP, με απώτερο σκοπό να συγκριθεί η απόδοση της αρχιτεκτονικής CUDA και του μοντέλου GPGPU (General Purpose Graphics Processing Unit, run programs on the GPU cores instead of the CPU) γενικότερα, με αυτή των αρχιτεκτονικών για κεντρικές μονάδες επεξεργασίας.

Κεφάλαιο 4

Διαδικασία ετοιμασίας συστημάτων για εργαστηριακές μετρήσεις

4.1 Google/Samsung Nexus S

Η προετοιμασία του συστήματος Google/Samsung Nexus S ώστε να είναι έτοιμο για πειραματικές μετρήσεις έγινε με διαδοχικά βήματα. Αρχικά έπρεπε στο σύστημα να εγκατασταθεί η νεότερη έκδοση του λειτουργικού συστήματος ώστε να έχει την μέγιστη δυνατή απόδοση και αποφυγή προβλημάτων (bugs) κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Λόγο του γεγονότος ότι το σύστημα διατέθηκε στην αγορά πριν από 6 χρόνια, ήταν ζωτικής σημασίας να βρεθεί έκδοση με συμβατότητα στο πρόγραμμα Terminal IDE το οποίο είναι απαραίτητο για να μπορέσουν να τρέξουν τα benchmarks.

Η εργοστασιακή έκδοση του συστήματος, Android 2.3 Gingerbread δεν ήταν συμβατή [47] και σε συνδυασμό με το γεγονός πως οι πιο νέες εκδώσεις πρόσθεσαν υποστήριξη, αποφασίστηκε να γίνει η εγκατάσταση της νεότερης έκδοσης. Η νεότερη έκδοση είναι η 4.1.2 και φέρει την ονομασία Jelly Bean [48].

Η διαδικασία της εγκατάστασης είναι η εξής:

- Αρχικά έγινε η απόκτηση της νέας έκδοσης λειτουργικού συστήματος από την επίσημη ιστοσελίδα της Google [48]. Το μοντέλο του συστήματος είναι το ‘soju, worldwide version, i9020t’ και το σωστό αρχείο έχει τον κωδικό ‘4.1.2 (JZO54K)’.
- Εφόσον το αρχείο κατέβηκε, αποσυμπιέστηκε. Αυτό έγινε 2 φορές, πρώτα το αρχείο αποσυμπιέζεται από .tgz σε .tar, και την δεύτερη φορά σε ένα φάκελο που περιέχει όλα τα απαραίτητα αρχεία. Ανάμεσα τους είναι και ένα αρχείο που περιέχει όλες τις εντολές για να γίνει σωστά η εγκατάσταση (script), με την ονομασία ‘flash-all’.
- Για να μπορέσει να τρέξει όμως το αρχείο αυτό (flash-all), πρέπει να γίνει εγκατάσταση ενός άλλου προγράμματος, πιο συγκεκριμένα το Android SDK Platform Tools. Αυτό το πρόγραμμα βρίσκεται στην ιστοσελίδα για τους προγραμματιστές της Google [49] και αφότου κατεβεί και γίνει η εγκατάσταση του στον υπολογιστή θα μας δώσει πρόσβαση στο εργαλείο (tool) με την ονομασία ‘fastboot’. Αυτό το εργαλείο παρέχει την δυνατότητα στον χρήστη να αλλάζει/επανεγκατάσταση του λειτουργικό σύστημα της συσκευής NEXUS.
- Πριν μπορέσει να καλεστή όμως το εργαλείο αυτό, πρέπει να μπει η διεύθυνση του στο path του υπολογιστή το οποίο γίνεται μέσο του μενού ‘environment variables’.
- Όταν ικανοποιηθούν όλα τα πιο πάνω, η συσκευή είναι έτοιμη για επανεγκατάσταση. Πρέπει να μπει σε κατάσταση ανάνηψης (recovery). Αυτό επιτυγχάνεται με το κλείσιμο της συσκευής και την μετέπειτα ενεργοποίηση της, αλλά έχοντας πατημένα τα κουμπιά power & volume – down ταυτόχρονα.
- Ακολούθως πρέπει να γίνει ξεκλείδωμα του bootloader. Ο bootloader είναι ένας μηχανισμός προστασίας του συστήματος από την μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση και θα πρέπει να απενεργοποιηθεί. Αυτό επιτυγχάνεται με την εκτέλεση της εντολής: “ $fastboot OEM unlock “ την οποία εκτελούμε μέσο του terminal και εφόσον έχουμε τρέξει το εργαλείο fastboot στον υπολογιστή.
- Η απενεργοποίηση του bootloader διαγραφή όλα τα δεδομένα στο σύστημα.
- Τώρα θα γίνει η εγκατάσταση της νέας έκδοσης με το άνοιγμα του αρχείου (script) ‘flash-all’.

- Τέλος, όταν το σύστημα έχει τελειώσει με την εγκατάσταση, θα πρέπει να κλειδωθεί ο bootloader με την εντολή μέσο του terminal:
“ $fastboot OEM lock ”.

Το σύστημα τώρα είναι ενήμερο με την νεότερη έκδοση λειτουργικού συστήματος. Ακολουθεί η δημιουργία ενός λογαριασμού Google για να παρέχετε η πρόσβαση στην αγορά εφαρμογών με την ονομασία “Google Play Store”. Γίνεται η εγκατάσταση της εφαρμογής “Terminal IDE”. Ακολούθως, πρέπει να γίνουν compile τα διάφορα benchmarks για να τρέξουν στο σύστημα. Αυτό γίνεται με την μεταφορά του πηγαίου κώδικα από τον υπολογιστή στο σύστημα. Εφόσον έχει γίνει η μεταφορά του, θα τρέξει η εφαρμογή Terminal IDE. Μέσο του terminal που παρέχει η εφαρμογή αυτή, θα γίνει η μετακίνηση στον φάκελο που βρίσκονται τα αρχεία πηγαίου κώδικα. Με την εκτέλεση της εντολής: “ $cd ~/sdcard/NPB3.3-SER-C ”βρισκόμαστε στην τοποθεσία των benchmarks και εδώ θα γίνει το compilation. Η εντολή που θα εκτελεστή είναι “ $make [name of benchmark] CLASS=[S, W, A, B] ”. Για να είναι δυνατή όμως η μεταγλώττιση του κώδικα πρέπει να γίνουν κάποιες αλλαγές στον πηγαίο κώδικα. Αρχικά, μέσα στο φάκελο config βρίσκεται το αρχείο make.def, στο οποίο θα γίνουν οι εξής αλλαγές: στη γραμμή 81 θα αλλαχτεί το " CC = gcc “ σε “ CC = terminal-gcc” και στην γραμμή 131 θα αλλαχτεί το “ UCC = gcc ” σε “ UCC = terminal-gcc ”. Ακολούθως, στο Makefile που βρίσκεται μέσα στο root folder, θα αλλαχτεί η πρώτη γραμμή του κώδικα από “ SHELL=/bin/sh ” σε “ SHELL=system/bin/sh ”. Τέλος, μέσα στο φάκελο sys βρίσκεται το αρχείο print_header στο οποίο πρέπει να προστεθούν προνόμια εκτέλεση με την εντολή “ $chmod +x print_header “. Η πρώτη αλλαγή είναι για να γίνει χρήση του compiler που παρέχεται με το Terminal IDE και η δεύτερη αλλαγή είναι για να δώσουμε την σωστή διεύθυνση του προγράμματος shell. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι δεν ήταν εφικτή η μεταγλώττιση του πηγαίου κώδικα στο παρών σύστημα λόγο περιορισμών στο τρέξιμο αρχείων που δεν ανήκουν στο λειτουργικό σύστημα. Εξ αυτού, το compilation έγινε σε μια διαφορετική πλατφόρμα ARM με τα εκτελέσιμα αρχεία να αντιγράφονται στο παρών σύστημα. Έγινε μεταγλώττιση της σουίτας NPB3.3-SER-C μόνο, αφού το σύστημα είναι μονοπύρηνο. Αυτή η πρακτική δεν ενδέχεται να επιφέρει μειονεκτήματα διότι η αρχιτεκτονική μεταξύ των δύο συστημάτων παραμένει η ίδια και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν πανομοιότυπα. Με τα εκτελέσιμα αρχεία στο σύστημα προς μελέτη, έγινε η αλλαγή των περιορισμών τους με την εντολή

“ $chmod +x [name of executable] ”. Για μέτρηση της κατανάλωσης της ενέργειας έγινε η εγκατάσταση της εφαρμογής Power Tutor [50] από το Google Play Store.

4.2 Google/LG Nexus 4

Η προετοιμασία του συστήματος Google/LG Nexus 4 για εργαστηριακές μετρήσεις είναι η ίδια με την ακολουθία των βημάτων που ακολουθήθηκαν για το Google/Samsung Nexus S. Τα εργαλεία και η μεθοδολογία είναι πανομοιότυπα, με την μόνη διαφορά να βρίσκεται στην έκδοση του λειτουργικού συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί. Η εργοστασιακή έκδοση, Android 4.2.2 Jelly Bean, ήταν συμβατή με το Terminal IDE αλλά αποφασίστηκε όπως γίνει η αντικατάσταση της με την νεότερη για αποφυγή προβλημάτων κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Η νεότερη έκδοση όμως, 5.1.1 Lollipop, δεν ήταν συμβατή διότι έγινε αλλαγή στο Virtual Machine από Dalvik (Just In Time (JIT) compilation) σε ART (ahead of time compilation). Για να τρέξει το Terminal IDE χρειάζεται το Dalvik Virtual Machine, και για αυτόν τον λόγο έγινε εγκατάσταση της έκδοσης Android 4.4.4 KitKat με την κωδικό ονομασία 4.4.4 (KTU84P) η οποία είναι η τελευταία που υποστηρίζει το Dalvik [47]. Ο κωδικός του συστήματος για το κατέβασμα των αρχείων από την επίσημη ιστοσελίδα της Google είναι “Occam” [48]. Επίσης, έγινε μεταγλώττιση της σουίτας NPB3.3-SER-C μόνο, αφού η εκτέλεση των benchmarks γίνετε μέσα από το πρόγραμμα Terminal IDE στο οποίο παραχωρείτε μόνο ένας πυρήνας για χρήση.

4.3 Raspberry Pi 1 (model B generation 1 w/ 256MB RAM)

Για να ετοιμαστεί το σύστημα Raspberry Pi 1 έπρεπε να βρεθεί τόσο συμβατό υλικό όσο και συμβατό λογισμικό. Για το υλικό, έπρεπε να βρεθεί κάρτα μνήμης SD Card (full size) όπου και θα εγκαθίσταντο το λειτουργικό σύστημα καθώς και τρόπος για παροχή ηλεκτρισμού στο σύστημα. Η λύση για την παροχή ενέργειας ήταν η χρήση του καλωδίου και της συσκευής φόρτισης ενός έξυπνου κινητού τηλεφώνου. Για την εγκατάσταση του λειτουργικού συστήματος χρησιμοποιήθηκε μια SD Card (Full Size) χωρητικότητας 8 GB. Για το λογισμικό, αποφασίστηκε πως θα χρησιμοποιηθεί το επίσημο λειτουργικό σύστημα για λόγους συμβατότητας και σταθερότητας, καθώς και για το γεγονός πως παρέχεται ο GCC GNU compiler με τον οποίο θα γίνει το compilation των benchmarks. Αρχικά έγινε το κατέβασμα του λειτουργικού συστήματος

“Raspbian” έκδοσης “Jessie November” από την επίσημη ιστοσελίδα του οργανισμού [51]. Ακολούθως έγινε η αποσυμπίεση του με το τελικό αρχείο να έχει την μορφή Disk Image File το οποίο θα πρέπει να εγκατασταθεί στην κάρτα μνήμης. Η εγκατάσταση όμως απαιτεί ιδικό πρόγραμμα που εγκαθιστά Disk Image Files. Όπως συνιστά η εταιρία, έγινε χρήση του προγράμματος Win 32 Disk Imager [52]. Πριν όμως γίνει η εγκατάσταση, θα πρέπει να γίνει format η κάρτα μνήμης με άλλο ιδικό πρόγραμμα ούτως ώστε να διαγραφούν όλα τα partitions που ενδέχεται να έχει. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το SD Formatter [53]. Έχοντας κάνει format την κάρτα μνήμης, το πρόγραμμα Win 32 Disk Imager την αναγνωρίζει σαν προορισμό για εγγραφή, και με την επιλογή του Disk Image File του λειτουργικού συστήματος, γίνεται η εγκατάσταση του. Αξίζει να σημειωθεί πως οι προαναφερθέν διαδικασίες έγιναν σε υπολογιστή με την χρήση ενός εξωτερικού αναγνωστέα καρτών μνήμης. Με το λειτουργικό σύστημα εγκαταστημένο, το μόνο που απομένει είναι να τοποθετηθεί η κάρτα μνήμης στην κατάλληλη υποδοχή.

Με το σύστημα ενεργοποιημένο, γίνεται η μεταφορά του πηγαίου κώδικα των benchmarks μέσω ενός USB Stick. Για να γίνει η μεταγλώττιση του κώδικά όμως πρέπει να γίνει η ακόλουθη αλλαγή, μέσα στο φάκελο sys βρίσκεται το αρχείο print_header στο οποίο πρέπει να προστεθούν προνόμια εκτέλεσης με την εντολή “ $chmod +x print_header “. Τώρα το σύστημα είναι έτοιμο για μεταγλώττιση. Ο κώδικας προς εκτέλεση είναι ο ακόλουθος “ $make [name of benchmark] CLASS=[S, W, A, B] ” ο οποίος εκτελείται εφόσον βρισκόμαστε μέσα στον root folder. Έγινε μεταγλώττιση της σουίτας NPB3.3-SER-C μόνο, αφού το σύστημα είναι μονοπύρηνο.

Στην εργοστασιακή του ρύθμιση, το σύστημα έχει χρονισμό πυρήνα 700 MHz. Για να γίνει η αλλαγή στο 1 GHz, επιλέγετε από το μενού των χαρακτηριστικών του συστήματος η επιλογή Turbo (1 GHz) και ακολούθως γίνεται επανεκκίνηση του συστήματος.

4.4 Raspberry Pi 2 model B

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την προετοιμασία του συστήματος Raspberry Pi 2 είναι τα ίδια με αυτά για το σύστημα Raspberry Pi 1. Εξαίρεση αποτελεί η επιλογή της κάρτας μνήμης, με την χρήση microSD Card 8 GB σε σύγκριση με Full Size SD Card 8 GB στο Raspberry Pi 1.

Επίσης, η επιλογή για αλλαγή χρονισμού πυρήνα δεν χρησιμοποιήθηκε αφού το σύστημα είναι εργοστασιακά ρυθμισμένο να τρέχει στα 900 MHz και η επιτρεπτή αλλαγή μέχρι το 1 GHz θα είχε ελάχιστο αντίκτυπο στις επιδώσεις. Ακόμη, στο σύστημα έγινε και μεταγλώττιση της σουίτας NPB3.3-OMP-C αφού το σύστημα διαθέτει 4 πυρήνες επεξεργασίας.

4.5 NVidia Tegra K1

Το σύστημα NVidia Tegra K1 έρχεται προεγκατεστημένο με το λειτουργικό σύστημα Ubuntu 14.04 Long Term Support (LTS) σε μια κάρτα μνήμης microSD Card 8 GB η οποία μπαίνει σε μετατροπέα Full Size. Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα γίνεται από τον εργοστασιακό μετατροπέα AC – DC. Αφού μεταφερθούν τα αρχεία με τον πηγαίο κώδικα μέσο ενός USB Stick, ακολουθεί η μεταγλώττιση τους. Απαραίτητη είναι η χρήση του μεταγλωττιστή GCC GNU Compiler ο οποίος είναι προεγκατεστημένος στο σύστημα. Όμως, και εδώ θα γίνουν μετατροπές για να είναι εφικτή η μεταγλώττιση. Μέσα στο φάκελο sys βρίσκεται το αρχείο print_header στο οποίο πρέπει να προστεθούν προνόμια εκτέλεσης με την εντολή “ $chmod +x print_header “ και ακολούθως, στο φάκελο config, στο αρχείο make.def θα πρέπει να διαγραφούν και οι τέσσερεις εμφανίσεις του κώδικα “ mcmodel = medium ”. Η τελευταία αλλαγή αφορά την σουίτα NPB3.3-OMP-C μόνο. Εφόσον βρισκόμαστε στον root φάκελο, η εντολή για μεταγλώττιση είναι η εξής: “ $make [name of benchmark] CLASS=[S, W, A, B] ”. Αυτό ισχύει τόσο για την έκδοση SER-C όσο και για την OMP-C.

Επίσης, στο σύστημα αυτό θα χρησιμοποιηθούν benchmarks που τρέχουν σε CUDA cores (GPGPU). Για αυτόν τον λόγο θα πρέπει να γίνει η μεταγλώττιση της σουίτας NPB3.3-CUDA. Για να μπορέσουν να μεταγλωττιστούν απαιτείτε η χρήση του G++ compiler ο οποίος είναι επίσης προεγκατεστημένος στο σύστημα. Η διαδικασία της μεταγλώττισης είναι η εξής, μετακίνηση σε κάθε φάκελο που περιέχει το αντίστοιχο benchmark και εκτέλεση της εντολής “ $make ”. Αυτό θα δημιουργήσει ένα εκτελέσιμο αρχείο που περιέχει όλες τις κλάσεις του αντίστοιχου benchmark.

4.6 HP Stream Notebook PC 13

Το πρώτο βήμα για την προετοιμασία του συστήματος ήταν η αναβάθμιση του λειτουργικού συστήματος από Windows 8.1 64 – bit σε Windows 10 64 – bit μέσο του windows update εργαλείου. Εφόσον έγινε αυτό, και βεβαιωθήκαμε πως το σύστημα ήταν “activated”, δηλαδή η αναβάθμιση του λειτουργικού συστήματος ήταν επιτυχής και είχε γίνει register με την Microsoft ώστε να επιτρέπετε η επανεγκατάσταση του, προχωρήσαμε στην επανεγκατάσταση του με ένα νέο αντίγραφο που αποκτήθηκε από την επίσημη ιστοσελίδα της Microsoft [54]. Η διαδικασία είναι η ακόλουθη, αρχικά κατεβάζετε το media creation tool από την ιστοσελίδα το οποίο επιτρέπει την δημιουργία ενός ιδικού “bootable USB image” σε ένα USB stick. Εφόσον η δημιουργία του bootable USB έχει ολοκληρωθεί, το σύστημα παίρνει εντολές να κάνει επανεκκίνηση και να φορτώσει τα δεδομένα του συγκεκριμένου USB stick. Από το μενού που εμφανίζεται γίνεται η επιλογή την καθαρής εγκατάστασης (do not keep anything) και ακολούθως διαγράφηκαν όλα τα partitions στον σκληρό δίσκο ώστε να δημιουργηθεί ένα μεγάλο όπου θα εγκατασταθεί το λειτουργικό σύστημα. Η επιλογή για καθαρή εγκατάσταση (clean install) έγινε ώστε να μην υπάρχουν επιπλέον προγράμματα εγκατεστημένα στο σύστημα, τα οποία ενδέχεται να επηρεάζουν τις μετρήσεις, καθώς και για την πιο ομαλή λειτουργεία του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο θα εγκατασταθούν μόνο τα απαραίτητα εργαλεία, ελαχιστοποιώντας την χρήση της Κ.Μ.Ε. από ανεπιθύμητα προγράμματα.

Για να γίνει η μεταγλώττιση του πηγαίου κώδικα, απαιτείτε η χρήση του GCC GNU Compiler. Η πιο απλή και γρήγορη εγκατάσταση του σε περιβάλλον windows είναι μέσο του Cygwin προγράμματος. Το πρόγραμμα Cygwin παρέχει ένα περιβάλλον Linux το οποίο τρέχει σε λειτουργικά windows, επιτρέποντας την εκτέλεση εντολών bash και εγκατάσταση προγραμμάτων που συναντιόνται σε περιβάλλον Linux. Η εγκατάσταση του Cygwin 64 - bit έγινε μέσο της επίσημης ιστοσελίδας της εταιρίας [55]. Κατά την διάρκεια της εγκατάστασης δίνεται η επιλογή στον χρήστη να επιλέξει επιπλέον προγράμματα/εργαλεία που επιθυμεί να εγκαταστήσει. Στην περίπτωση την δική μας, διαλέξαμε τα προγράμματα GCC CORE GNU Compiler & make GNU tool τα οποία βρίσκονται κάτω από την κατηγορία DEVEL. Ο installer κατεβάζει όλα τα αναγκαία αρχεία και εγκαθιστά το Cygwin μαζί με τις επιλογές μας.

Για να γίνει η μεταγλώττιση του πηγαίου κώδικα, μετακινόμαστε μέσο του terminal που παρέχει το Cygwin στη τοποθεσία των αρχείων στον σύστημα. Για να είναι δυνατή η μετάβαση σε φακέλους που βρίσκονται στο περιβάλλον windows, πρέπει να εκτελεστή η εντολή:
“ $ cd /cygdrive/c/Users/ ” η οποία μας μετακινεί στο filesystem των windows. Από εκεί, μετακινόμαστε στο root φάκελο της σουίτας benchmarks που θα μεταγλωττίσουμε, σε αυτήν την περίπτωση τα NPB3.3-OMP-C και NPB3.3-SER-C. Τέλος, εκτελείται η εντολή:
“ $make [name of benchmark] CLASS=[S, W, A, B] ”.

4.7 Sony VAIO Laptop SVE1511W1ESI

Η εργασίες που έπρεπε να εκτελεστούν για τη προετοιμασία του συστήματος SVE1511W1ESI είναι ίδιες με αυτές για το σύστημα HP Stream. Αφού και τα δυο συστήματα διαθέτουν λειτουργικό σύστημα Windows, η εγκατάσταση του Cygwin και των άλλων εργαλείων είναι πανομοιότυπη.

4.8 HP Compaq 8200 Elite CMT PC

Το σύστημα HP Compaq 8200 Elite έρχεται προεγκατεστημένο με το λειτουργικό σύστημα Ubuntu 14.04 LTS. Δημιουργήθηκε ένας τοπικός λογαριασμός για εισαγωγή στο σύστημα. Αφού μεταφερθούν τα αρχεία με τον πηγαίο κώδικα μέσο ενός USB Stick, ακολουθεί η μεταγλώττιση τους. Η μεταγλώττιση θα γίνει με τον μεταγλωττιστή GCC GNU ο οποίος είναι προεγκατεστημένος στη πλατφόρμα. Πριν γίνει η μεταγλώττιση θα πρέπει να γινούν μερικές αλλαγές στον πηγαίο κώδικα. Μέσα στο φάκελο sys βρίσκεται το αρχείο print_header στο οποίο πρέπει να προστεθούν προνόμια εκτέλεσης με την εντολή “ $chmod +x print_header “ και ακολούθως, στο φάκελο config, στο αρχείο make.def θα πρέπει να διαγραφούν και οι τέσσερεις εμφανίσεις του κώδικα “ mcmodel = medium ”. Η τελευταία αλλαγή αφορά την σουίτα NPB3.3-OMP-C μόνο. Εφόσον έχουν γίνει οι απαραίτητες αλλαγές, ανοίγοντας ένα παράθυρο terminal, γίνεται μετακίνηση στο root φάκελο της εκάστοτε σουίτας benchmark και η εντολή προς εκτέλεση είναι η ακόλουθη: “ $make [name of benchmark] CLASS=[S, W, A, B] ”. Αυτό ισχύει τόσο για την έκδοση SER-C όσο και για την OMP-C.

Κεφάλαιο 5

Διαδικασία καταγραφής αποτελεσμάτων

5.1 Google/Samsung Nexus S

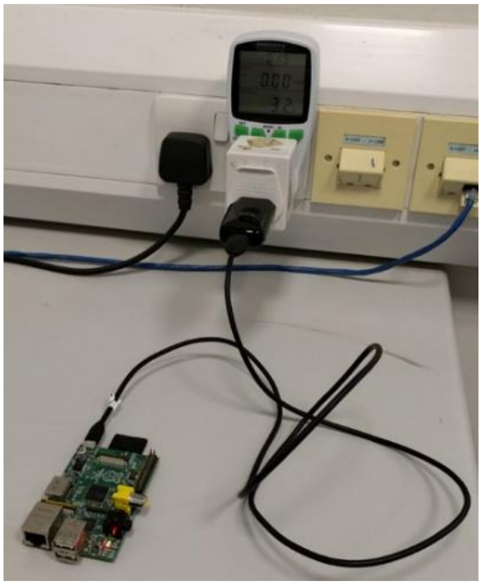
Για την καταγραφή των αποτελεσμάτων έγινε χρήση των εφαρμογών Terminal IDE για καταγραφή του χρόνου εκτέλεσης και Power Tutor για καταγραφή της συνολικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε. Αρχικά έγινε η μετακίνηση στον φάκελο με τα τρεχούμενα αρχεία μέσο του terminal της εφαρμογής Terminal IDE εκτελώντας την εντολή “ $cd ~/system/NPB3.3-SER-C/bin ”. Στο παράθυρο του terminal ετοιμάστηκε η εντολή “ $./[name of benchmark].[class of benchmark].x ” αλλά δεν εκτελέστηκε. Ακόλουθος, ανοίχτηκε η εφαρμογή Power Tutor και έγινε η εκκίνηση ενός νέου κύκλου μετρήσεων. Αμέσως μεταφερθήκαμε στην εφαρμογή Terminal IDE και εκτελέσαμε την εντολή. Όταν τερμάτισε το benchmark, αντιγράφτηκε ο χρόνος εκτέλεσης του (σε δευτερόλεπτα) σε ένα αρχείο Excel και ακολούθως έγινε μετακίνηση στην εφαρμογή Power Tutor για αντιγραφή της συνολικής ενέργειας (σε Joule). Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε για όλα τα benchmark και για όλες τις κλάσεις υπολογισμού. Εξαίρεση αποτέλεσαν όλα τα dc, ft.A.x, ft.B.x, is.B.x, mg.A.x, mg.B.x καθώς και όλα τα ua, τα οποία δεν μπόρεσαν να τρέξουν στον σύστημα. Οι μετρήσεις ενέργειας αφορούν μόνο την ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε από το τρέξιμο της εφαρμογής χωρίς την μέτρηση εξωγενών παραγόντων. Αυτό είναι το πλεονέκτημα της χρήσης της εφαρμογής Power Tutor [50].

5.2 Google/LG Nexus 4

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το Nexus 4 είναι η ίδια με αυτή για το Nexus S. Η μόνη διαφορά είναι πως τα μη συμβατά benchmarks είναι πιο λίγα, με όλα τα dc, ft.B.x και όλα τα ua να μην είναι συμβατά.

5.3 Raspberry Pi 1 (model B generation 1 w/ 256MB RAM)

Αρχικά το σύστημα ενώθηκε στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς επιπλέον συσκευές (οθόνη, πληκτρολόγιο, ποντίκι). Αυτό έγινε για να μετρηθεί η κατανάλωση ενέργειας που προέρχεται από το σύστημα καθαυτό. Αφότου αφέθηκε να λειτουργήσει για λίγο χρονικό διάστημα, έγινε η μέτρηση της ενέργειας (σε Watt) όπως αυτή παρουσιάζεται στην οθόνη του Energenie ENER007.



Εικόνα 5.1 Μέτρηση ενέργειας Raspberry Pi 1.

Η μέτρηση αυτή καταχωρήθηκε σε ένα αρχείο Excel. Ακολούθως, έγινε μέτρηση του συστήματος με όλα τα περιφερειακά ενωμένα. Ο λόγος που έγιναν αυτές οι μετρήσεις είναι για να μπορέσουμε να αφαιρέσουμε από τα τελικά αποτελέσματα την ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε αλλά δεν οφειλόταν στον επεξεργαστή.

Στο τελευταίο βήμα της διαδικασίας μετρήσεων βρίσκεται η μέτρηση της ενέργειας και του χρόνου εκτέλεσης για κάθε benchmark ξεχωριστά. Μετακινούμαστε μέσο του terminal στον φάκελο με τα εκτελέσιμα αρχεία και ακόλουθος εκτελείτε το κάθε ένα ξεχωριστά με την εντολή: “ $./[name of benchmark].[class of benchmark].x ”. Ο χρόνος μέχρι την λύση παρουσιάζεται στο τέλος κάθε εκτέλεσης και μετριέται σε δευτερόλεπτα. Για την μέτρηση της ενέργειας, η διαδικασία είναι πιο περίπλοκη. Λόγο του γεγονότος ότι ορισμένα benchmark εκτελούνται πολύ γρήγορα και η σωστή αντιγραφή των μετρήσεων από το ENER007 είναι αδύνατη, αποφασίστηκε πως για το κάθε benchmark θα εκτελείται το μεγαλύτερο σε κλάση που είναι συμβατό, και η μέτρηση αυτή θα υιοθετείτε και στις πιο μικρές κλάσης. Η μέτρηση της ενέργειας όμως δεν μπορεί να γίνει αμέσως μετά την εκτέλεση του benchmark διότι γίνονται εργασίες προετοιμασίας (initialization) οι οποίες λοξεύουν τις πραγματικές τιμές. Εξ αυτού, η μέτρηση γίνεται μετά από 2 λεπτά και εφόσον η ένδειξη ενέργειας στον μετρητή είναι σταθερή. Αν δεν είναι σταθερή, τότε καταγράφεται ο μέσος όρος της ψηλότερης και της χαμηλότερης τιμής. Ο λόγος που γίνεται η μέτρηση της ενέργειας με αυτόν τον τρόπο είναι διότι παρατηρήθηκε πως μετά από ένα χρονικό περιθώριο οι ενδείξεις του μετρητή σταθεροποιούνται και η χρησιμοποίηση του επεξεργαστικού πυρήνα (CPU utilization) είναι 100%, δύο γεγονότα που μας επιτρέπουν να υποθέσουμε πως η μέτρηση της ενέργειας στην συγκεκριμένη χρονική στιγμή να είναι αντιπροσωπευτική για την συμπεριφορά του συστήματος γενικότερα. Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε για όλα τα benchmarks, με τα μη συμβατά να αναφέρονται πιο κάτω: bt.B.x, cg.B.x, dc.A.x, ep.B.x, ft.A.x, ft.B.x, is.B.x, lu.B.x, mg.A.x, mg.B.x, sp.B.x, ua.B.x. Ο λόγος που υπάρχουν τόσα πολλά μη συμβατά είναι η χωρητικότητα της μνήμης RAM που ανέρχεται σε 256 MB και δεν επιτρέπει στα benchmark να φορτωθούν. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις μετρήσεις σε χρονισμό 1 GHz.

5.4 Raspberry Pi 2 model B

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το Raspberry Pi 2 είναι η ίδια με αυτή για το Raspberry Pi 1. Η μόνη διαφορά είναι πως τα μη συμβατά benchmarks είναι πιο λίγα, με το dc.B.x και το ft.B.x να παρουσιάζουν προβλήματα εκτέλεσης. Επίσης, στο παρών σύστημα έγινε και μέτρηση των παράλληλων benchmarks.

5.5 NVidia Tegra K1

Το πρώτο βήμα μετρήσεων ήταν η καταγραφή της κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος χωρίς περιφερειακά ενωμένα, και ακολούθως με όλα ενωμένα. Στο επόμενο στάδιο, έγινε η καταγραφή του χρόνου λύσης και της ενέργειας για 3 διαφορετικές σουίτες εφαρμογών, σειριακά, παράλληλα και CUDA. Για τα σειριακά η διαδικασία είναι η εξής, μέσο του terminal μετακινούμαστε στον φάκελο με τα εκτελέσιμα αρχεία και τρέχουμε την εντολή: “ $./[name of benchmark].[class of benchmark].x ”. Για τα παράλληλα, πριν να εκτελέσουμε την προαναφερθέν εντολή, πρέπει να εκτελεστή η ακόλουθη: “ $export OMP_NUM_THREADS=4 ”, η οποία θα εμφανίσει τους 4 πυρήνες επεξεργασίας στο benchmark. Ο χρόνος λύσης παρουσιάζεται στο τέλος εκτέλεσης σε δευτερόλεπτα και η ενέργεια μετριέται μέσο του ENER007 σε Watt όπως περιεγράφηκε πιο πάνω. Για την σουίτα CUDA, ο τρόπος μέτρησης χρόνου και ενέργειας λύσης παραμένει ως έχει, αυτό που αλλάζει είναι η εντολή προς εκτέλεση. Η εντολή είναι η εξής: “ $./[name of benchmark] [class of benchmark]”. Η αλλαγή αυτή οφείλετε στο γεγονός πώς στην περίπτωση αυτή το εκτελέσιμο αρχείο είναι μόνο ένα και περιέχει όλες τις κλάσεις, η εναλλαγή των οποίων γίνεται μέσο της πιο πάνω εντολής. Τα μη συμβατά benchmarks είναι τα εξής: σειριακά και παράλληλα: dc.B.x, και για CUDA: όλα τα lu.

5.6 HP Stream Notebook PC 13

Ξεκινώντας, φροντίσαμε να είναι πλήρως φορτισμένη η μπαταρία του συστήματος ώστε η ένδειξη στον μετρητή ενέργειας να είναι αντιπροσωπευτική για την λειτουργία του συστήματος και όχι για την φόρτιση της μπαταριάς. Ακολούθως το σύστημα τέθηκε σε λειτουργεία και μετρήθηκε η κατανάλωση ενέργειας με την οθόνη απενεργοποιημένη (lid closed). Αυτό, πάλι, έγινε για να αποφευχθεί η μέτρηση της ενέργειας που καταναλώνει η οθόνη. Ακόλουθος, μέσο του προγράμματος cygwin έγινε η μετακίνηση στον φάκελο με τα εκτελέσιμα αρχεία και εκτελέστηκε η εντολή: “ $./[name of benchmark].[class of benchmark].x ” για όλα τα διαθέσιμα benchmarks. Ο χρόνος λύσης παρουσιάζεται στο τέλος της εκτέλεσης και η ενέργεια μετρήθηκε από τον μετρητή μετά το πέρας 2 λεπτών και με την οθόνη απενεργοποιημένη, λαμβάνοντας υπόψη την πιο μεγάλη συμβατή κλάση επεξεργασίας και υιοθέτηση της μέτρησης αυτής στις μικρότερες.

5.7 Sony VAIO Laptop SVE1511W1ESI

Η διαδικασία καταγραφής αποτελεσμάτων στο σύστημα SVE1511W1ESI αποτελείται από τα ίδια βήματα με αυτά που ακολουθήθηκαν για το σύστημα HP Stream. Η μοναδική διαφορά είναι ότι η μπαταρία του συστήματος μπορεί να αφαιρεθεί και το σύστημα να λειτουργεί εξολοκλήρου με ηλεκτρική ενέργεια από την πρίζα, μηδενίζοντας έτσι τον χρόνο αναμονής για πλήρη φόρτιση της μπαταρίας.

5.8 HP Compaq 8200 Elite CMT PC

Στο παρών σύστημα, η διαδικασία καταγραφής των αποτελεσμάτων ξεκίνησε με την απενεργοποίηση του συστήματος. Έγινε πρώτα βεβαίωση πως δεν υπήρχαν χρήστες συνδεδεμένοι με αυτό, αφού η λειτουργία του συστήματος ήταν σαν μηχάνημα σε εργαστήριο στο οποίο μπορεί να γίνει εξ αποστάσεως πρόσβαση, εκτελώντας την εντολή “ $who ”. Ακολούθως αφαιρέθηκε η σύνδεση στο διαδίκτυο ώστε να μην αρχίσουν εκτέλεση διεργασίες αναβάθμισης και εξ αποστάσεως καθώς και όλα τα περιφερικά που ήταν ενωμένα με το σύστημα. Πάρθηκε η μέτρηση κατανάλωσης ενέργειας και ακολούθως έγινε επανεκκίνηση του συστήματος με όλα τα περιφερικά ενωμένα εκτός του Ethernet. Στο επόμενο στάδιο, έγινε η καταγραφή του χρόνου λύσης και της ενέργειας των σειριακών και παράλληλων benchmarks. Για τα σειριακά η διαδικασία είναι η εξής, μέσο του terminal μετακινούμαστε στον φάκελο με τα εκτελέσιμα αρχεία και τρέχουμε την εντολή: “ $./[name of benchmark].[class of benchmark].x ”. Για τα παράλληλα, πριν να εκτελέσουμε την προαναφερθέν εντολή, πρέπει να εκτελεστή η ακόλουθη: “ $export

OMP_NUM_THREADS=4 ”, η οποία θα εμφανίσει τους 4 πυρήνες επεξεργασίας στο benchmark. Ο χρόνος λύσης παρουσιάζεται στο τέλος εκτέλεσης σε δευτερόλεπτα και η ενέργεια μετριέται μέσο του ENER007 σε Watt λαμβάνοντας υπόψη την πιο μεγάλη συμβατή κλάση επεξεργασίας και υιοθέτηση της μέτρησης αυτής στις μικρότερες.

Κεφάλαιο 6

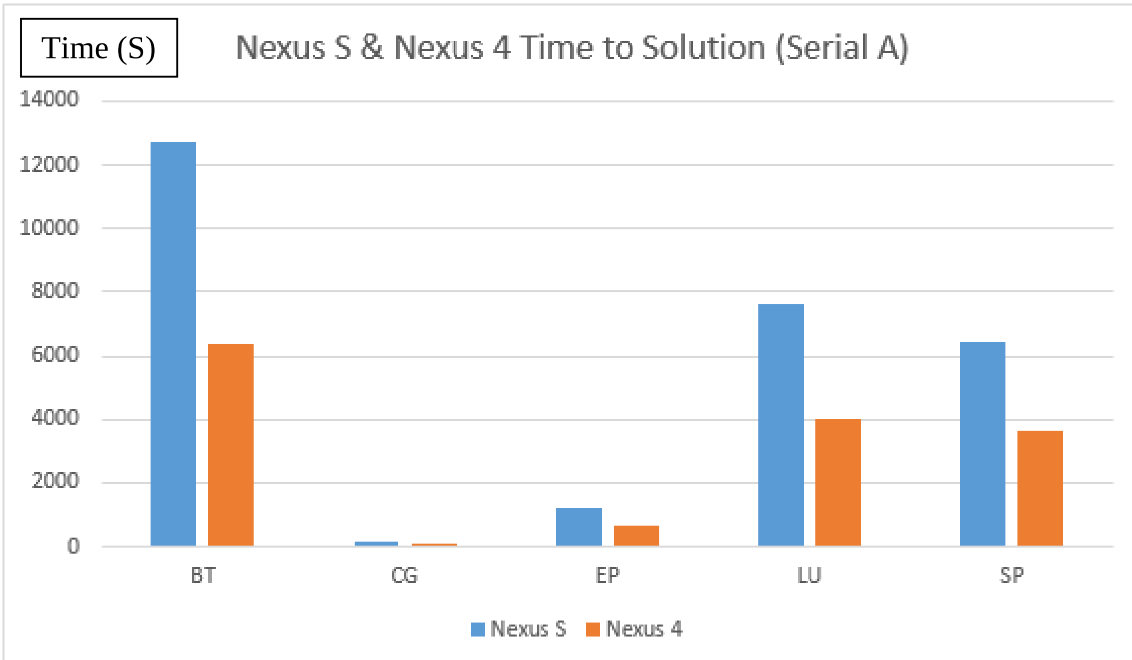
Πειραματική Αξιολόγηση

Για να μπορέσουν να αναλυθούν οι πειραματικές μετρήσεις που έχουμε λάβει, πρέπει πρώτα να αφαιρεθεί από τη συνολική κατανάλωση ενέργειας η ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε από τα περιφερειακά εξαρτήματα (πληκτρολόγια, ποντίκια). Προς εξυπηρέτηση αυτού του σκοπού είχαν παρθεί δύο αρχικές μετρήσεις ενέργειας, μια χωρίς περιφερειακά ενωμένα και μια με όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα συνδεδεμένα, και όταν γίνει η αφαίρεση του πρώτου από το δεύτερο μας δίνει την διαφορά αυτή. Αυτή η ποσότητα ενέργειας θα αφαιρεθεί από τη τελική μέτρηση ενέργειας.

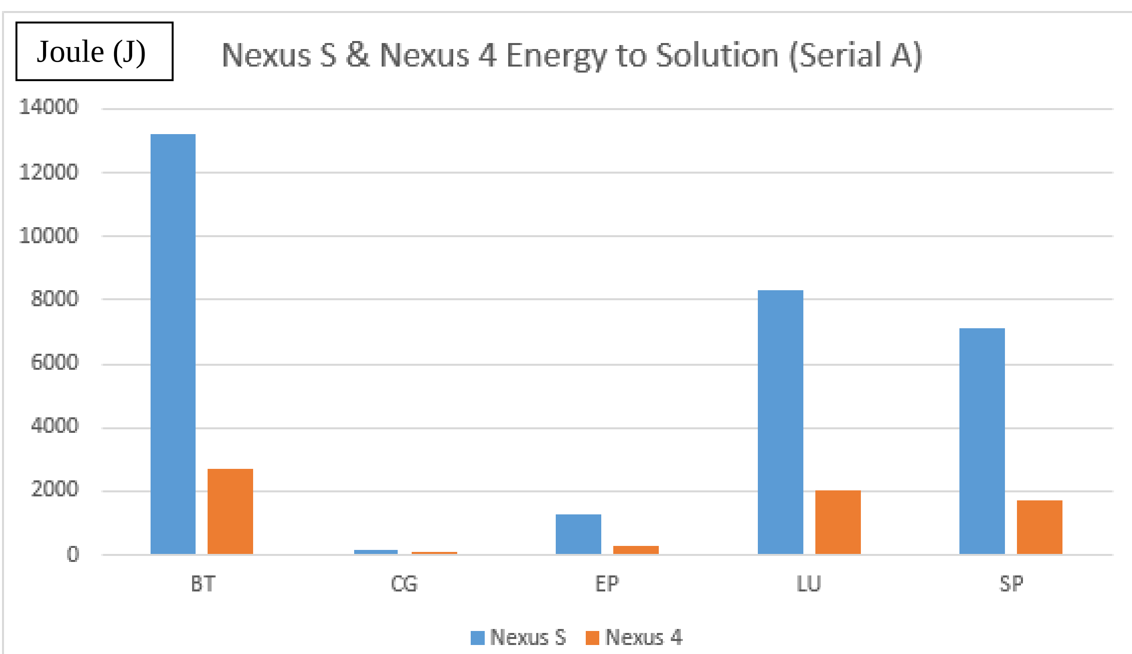
Έχοντας την σωστή μέτρηση σε Watt (W), το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της ενέργειας σε μονάδα μέτρησης Joule (J). Η μονάδα μέτρησης Joule καθορίζεται από την μαθηματική εξίσωση J = W * S, όπου S = time in seconds. Αυτό θα μας δώσει την συνολική κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα κατά την διάρκεια εκτέλεσης του benchmark.

Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν σε γραφικές παραστάσεις όπως αυτές παρουσιάζονται πιο κάτω, με τον αριστερό άξονα να μετρά είτε τον χρόνο σε δευτερόλεπτα είτε την ενέργεια σε Joule, ανάλογα με την περίσταση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα αποτελέσματα του benchmark IS (Integer Sort) και FT (Furrier Transform) αφέθηκαν έξω διότι δεν εμφανίζονταν στην τελική γραφική παράσταση λόγο των πολύ μικρόν αποτελεσμάτων.

Αρχίζουμε από τα συστήματα που ανήκουν στην κατηγορία με το μικρότερο ενεργειακό προφίλ, τα Nexus S και Nexus 4, η ανάλυση των αποτελεσμάτων των οποίων παρουσιάζεται στις επόμενες γραφικές παραστάσεις.



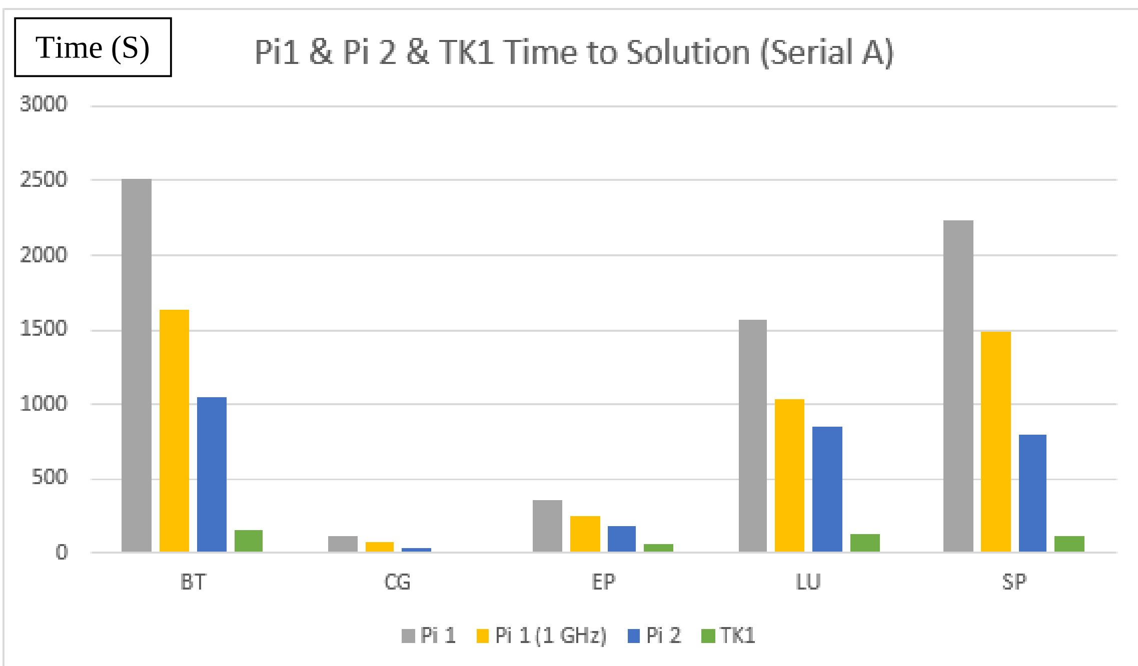
Σχήμα 6.1 Nexus S & Nexus 4 Time to Solution Serial A Class.



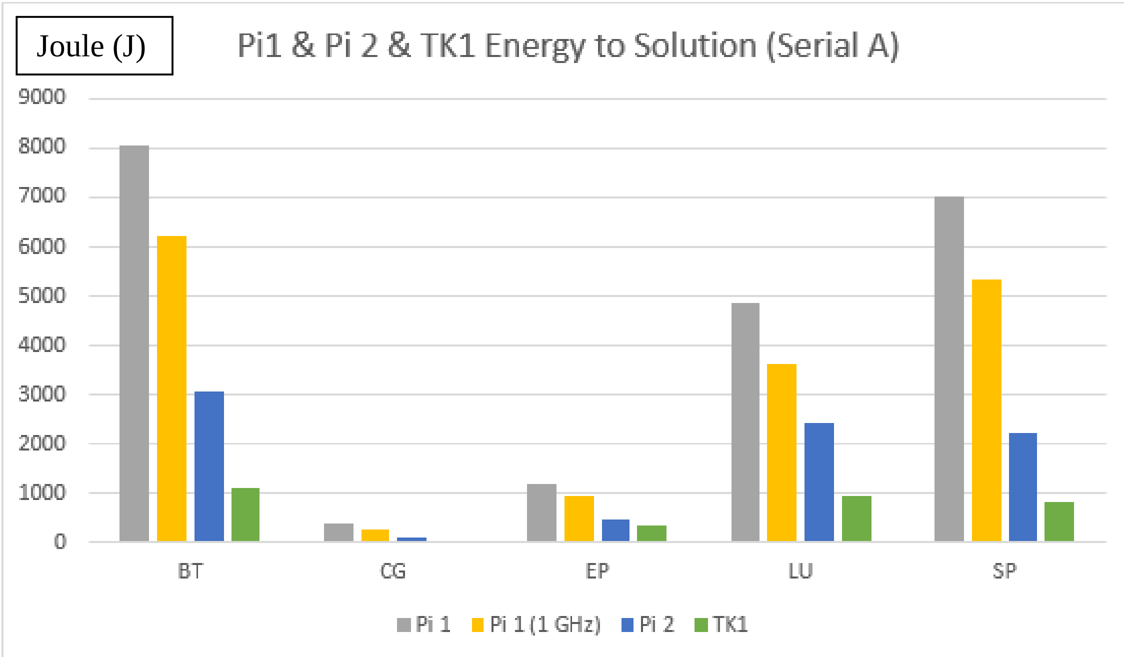
Σχήμα 6.2 Nexus S & Nexus 4 Energy to Solution Serial A Class.

Παρατηρούμε πως με την πάροδο 2 χρόνων από την χρονολογία κυκλοφορίας του Nexus S και την μικρό αρχιτεκτονική Cortex-A8, παρουσιάζεται το Nexus 4 με μικρό αρχιτεκτονική Krait, η οποία προσφέρει σε ορισμένες περιπτώσεις 50% αύξηση στις επιδώσεις με κατανάλωση ενέργειας που ανέρχεται στο ¼ από τον προκάτοχο της. Εδώ παρουσιάζεται το μέγεθος A των benchmark διότι ήταν το πιο μεγάλο που διέθετε την μεγαλύτερη συμβατότητα.

Ακολοθεί η κατηγορία με το δεύτερο μεγαλύτερο ενεργειακό προφιλ, ονομαστικά τα συστήματα Raspberry Pi 1, Raspberry Pi 2 και NVidia Tegra K1. Αφέθηκε έξω το σύστημα HP Stream 13 διότι σε αυτή την σύγκριση επιθυμούμε να εστίασουμε στην αρχιτεκτονική ARM.



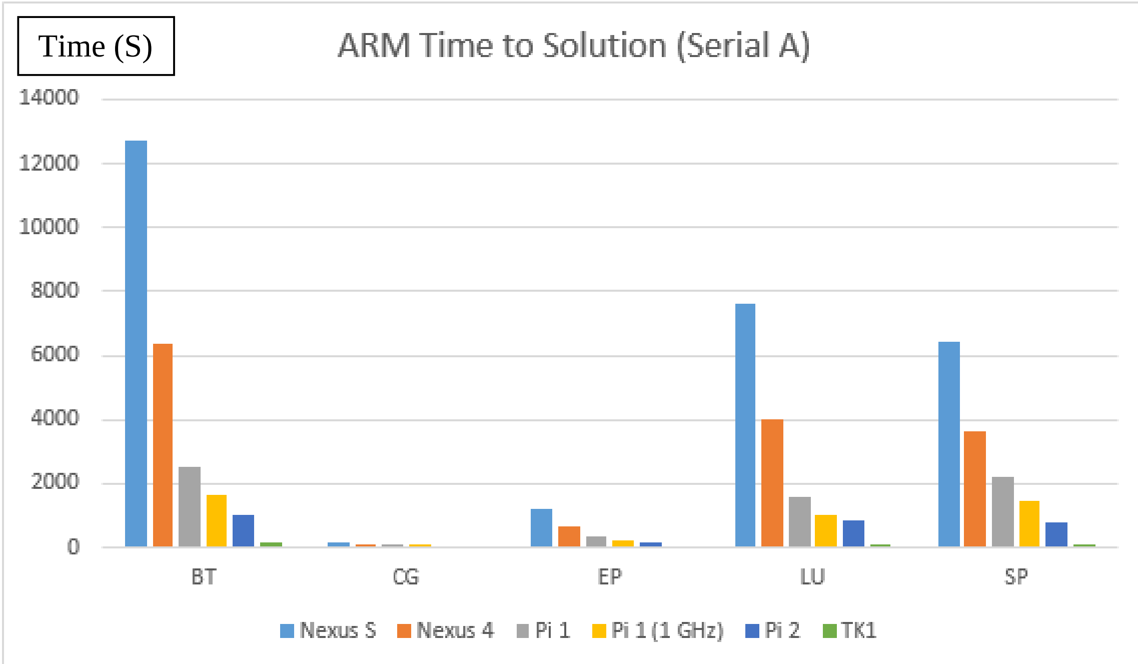
Σχήμα 6.3 Pi 1 & Pi 2 & TK1 Time to Solution Serial A Class.



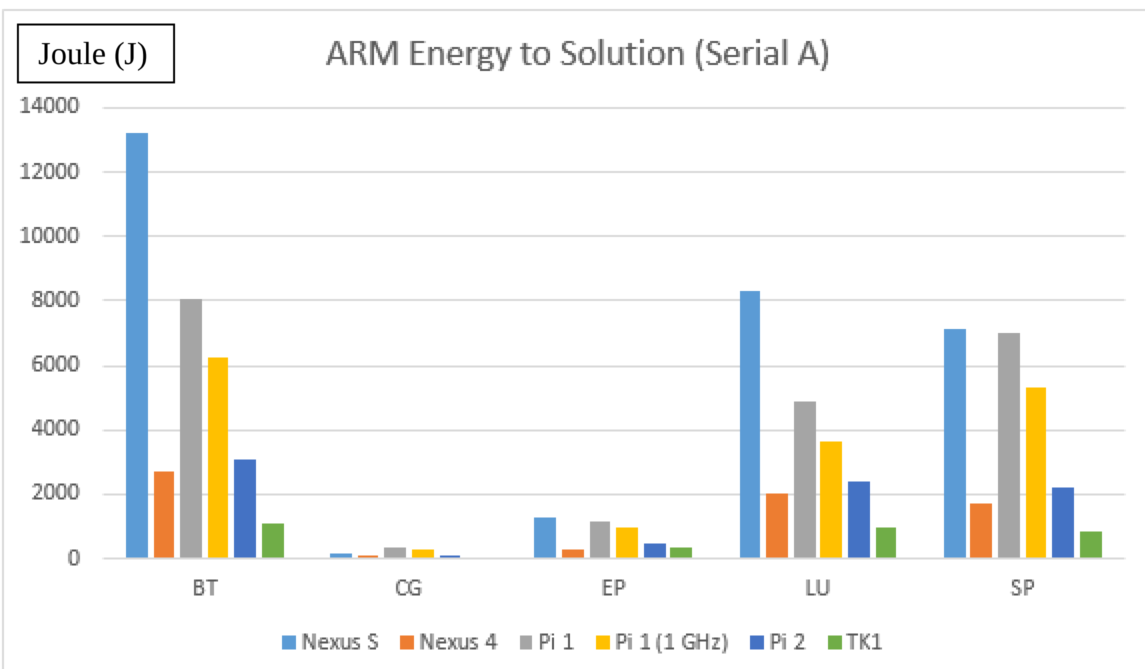
Σχήμα 6.4 Pi 1 & Pi 2 & TK1 Energy to Solution Serial A Class.

Παρατηρούμε πως τα προβλήματα benchmark BT, LU, SP, τα οποία είναι προσομοιώσεις CFD είναι τα πιο απαιτητικά τόσο σε χρόνο εκτέλεσης όσο και σε κατανάλωση ενέργειας. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως με τον υπερχρονισμό του επεξεργαστή του συστήματος Raspberry Pi 1, αυξάνετε η υπολογιστική του επίδοση χωρίς αρνητικές συνέπειες στην κατανάλωση ενέργειας. Ο πιο γρήγορος χρόνος εκτέλεσης των benchmark του επιτρέπει να έχει επίδοση Energy to Solution καλύτερη από το μη υπερχρονισμένο σύστημα. Επίσης, παρατηρούμε πώς πως η εναλλαγή από αρχιτεκτονική ARMv6 σε ARMv7 έχει θετικό αντίκτυπο στις επιδώσεις, όπου η μικρό αρχιτεκτονική ARM1176JZF-S που απαντάτε στο Raspberry Pi 1 έχει ξεπεραστεί από την μικρό αρχιτεκτονική Cortex-A7. Ακόμη, παρατηρούμε πως η υπολογιστική μονάδα που βρίσκεται μέσα στο σύστημα TK1 με μικρό αρχιτεκτονική Cortex-A15 είναι όχι μόνο η πιο γρήγορη αλλά και η πιο αποδοτική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως είναι η πιο καινούργια και φέρει την πιο γρήγορη επεξεργαστική μονάδα, γεγονός που αντισταθμίζει την πιο μεγάλη κατανάλωση της.

Η ανάλυση των αρχιτεκτονικών ARM έχει ως εξής:

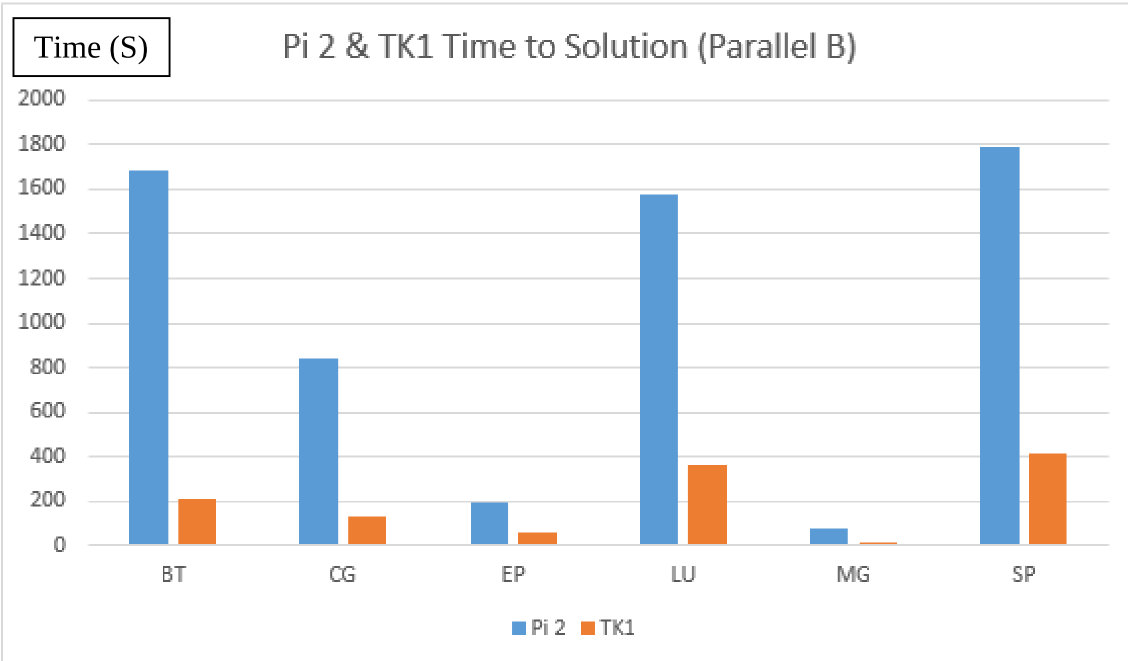


Σχήμα 6.5 ARM Time to Solution Serial A Class.

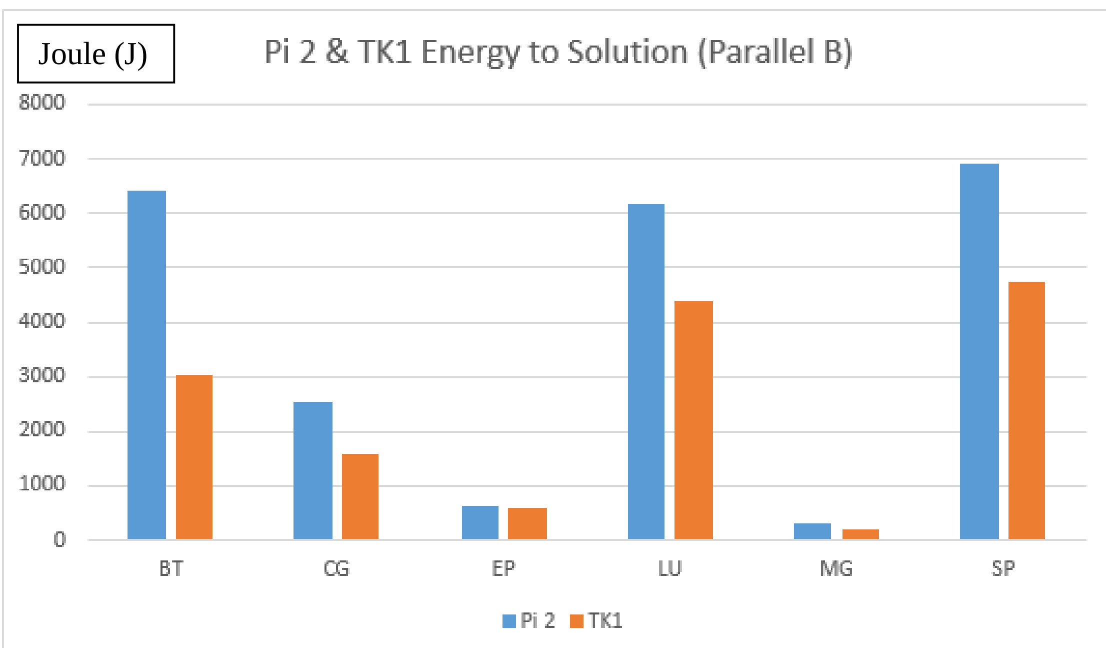


Σχήμα 6.6 ARM Energy to Solution Serial A Class.

Ακόλουθή η ανάλυση για πολυπύρηνες λύσεις σε συστήματα ARM. Τα συστήματα που έχουν πολυπύρηνο επεξεργαστή είναι το Raspberry Pi 2 και το NVidia Tegra K1.



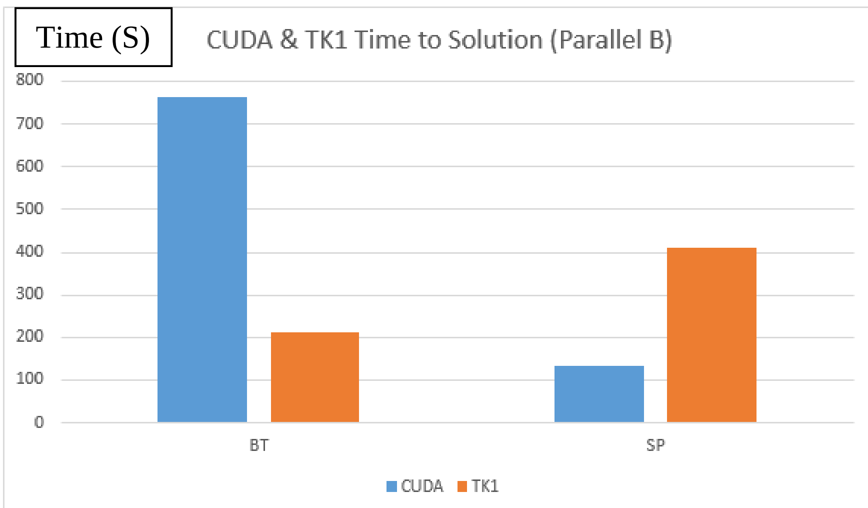
Σχήμα 6.7 Pi 2 & TK1 Time to Solution Parallel B Class.



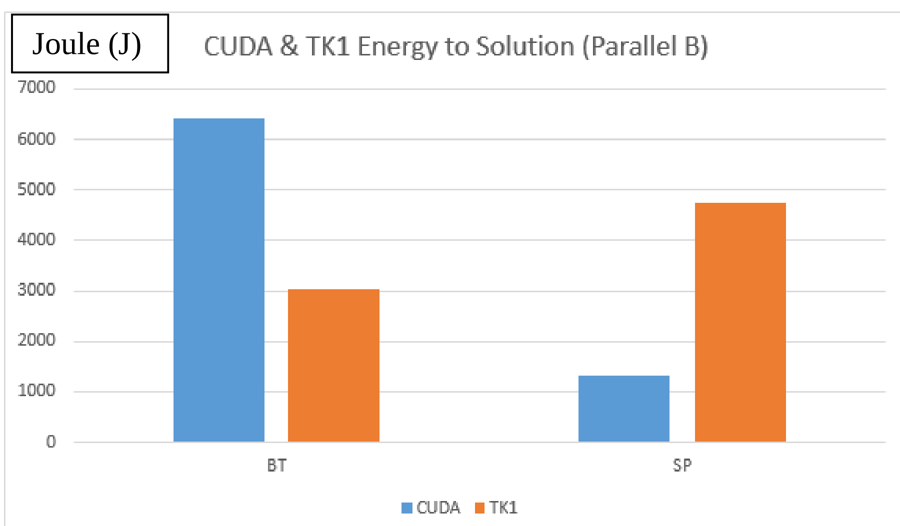
Σχήμα 6.8 Pi 2 & TK1 Energy to Solution Parallel B Class.

Παρατηρούμε πως το πιο αποδοτικό σύστημα από πλευράς επιδόσεων όσο και κατανάλωσης ενέργειας είναι το Tegra K1. Και τα δύο συστήματα διαθέτουν 4 πυρήνες επεξεργασίας, με τον Cortex-A15 να υπερέχει του Cortex-A7 όπως και ήταν αναμενόμενο. Η πιο γρήγορη εκτέλεση του benchmark αντισταθμίζει την πιο μεγάλη απαίτηση σε ενέργεια αφού η φόρμουλα υπολογισμού είναι J = W * S.

Αφού έχουμε καταλήξει στην πιο γρήγορη μονάδα επεξεργασίας αρχιτεκτονικής ARM, Tegra K1 με πυρήνες Cortex-A15, Θα γίνει σύγκριση με την αρχιτεκτονική CUDA.



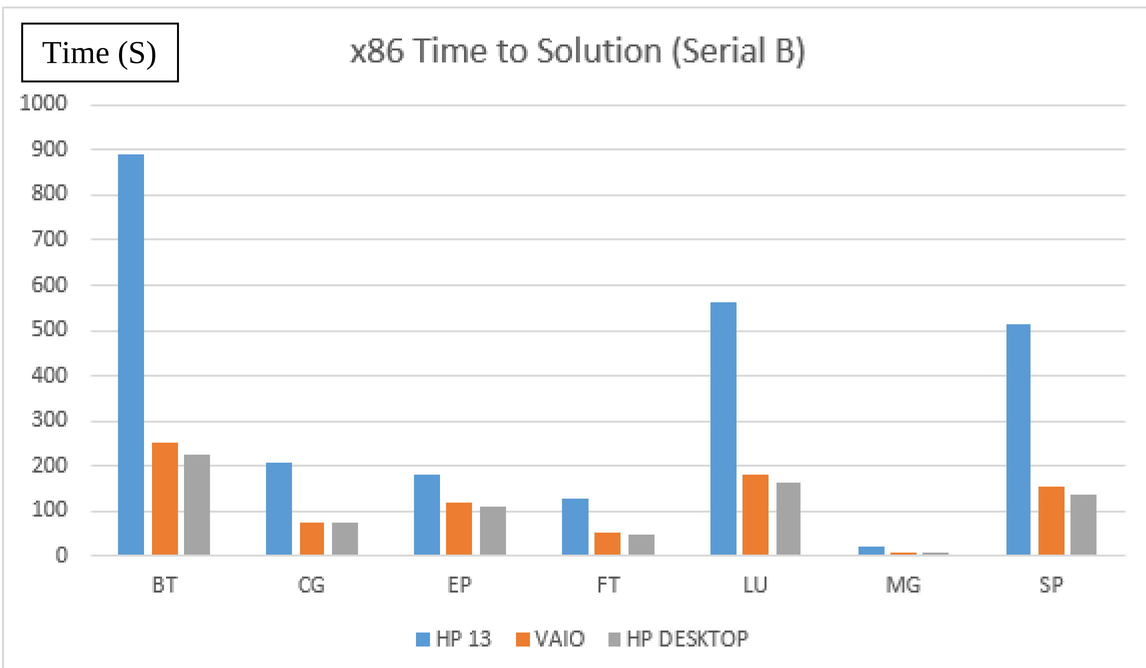
Σχήμα 6.9 CUDA & TK1 Time to Solution Parallel B Class.



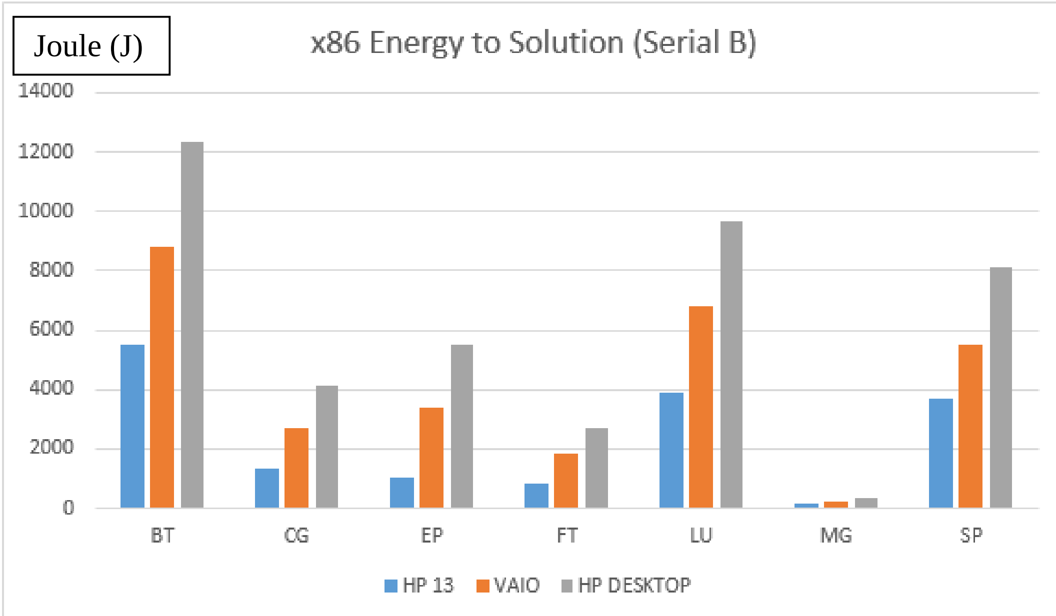
Σχήμα 6.10 CUDA & TK1 Energy to Solution Parallel B Class.

Παρατηρούμε πως η ταχύτητα εκτέλεση σε επεξεργαστικές μονάδες CUDA εξαρτάτε από την σωστή προσαρμογή το κώδικα. Όταν ο κώδικας είναι βελτιστοποιημένος σωστά, το πλεονέκτημα σε επίδοση είναι εμφανές, όταν όμως η υλοποίηση δεν γίνει σωστά το αποτέλεσμα δεν είναι το επιθυμητό. Για αυτόν τον λόγο η εκτέλεση σε περιβάλλον CUDA (GPGPU) είναι πιο περίπλοκη από την εκτέλεση σε περιβάλλον από κλασσικές μονάδες επεξεργασίας (CPU). Όταν η προσαρμογή γίνει σωστά όμως, η βελτιστοποίηση στις επιδώσεις ακολουθεί εκθετική πορεία.

Στις επόμενες γραφικές παραστάσεις γίνεται η ανάλυση των συστημάτων που διαθέτουν επεξεργαστές με αρχιτεκτονική x86.

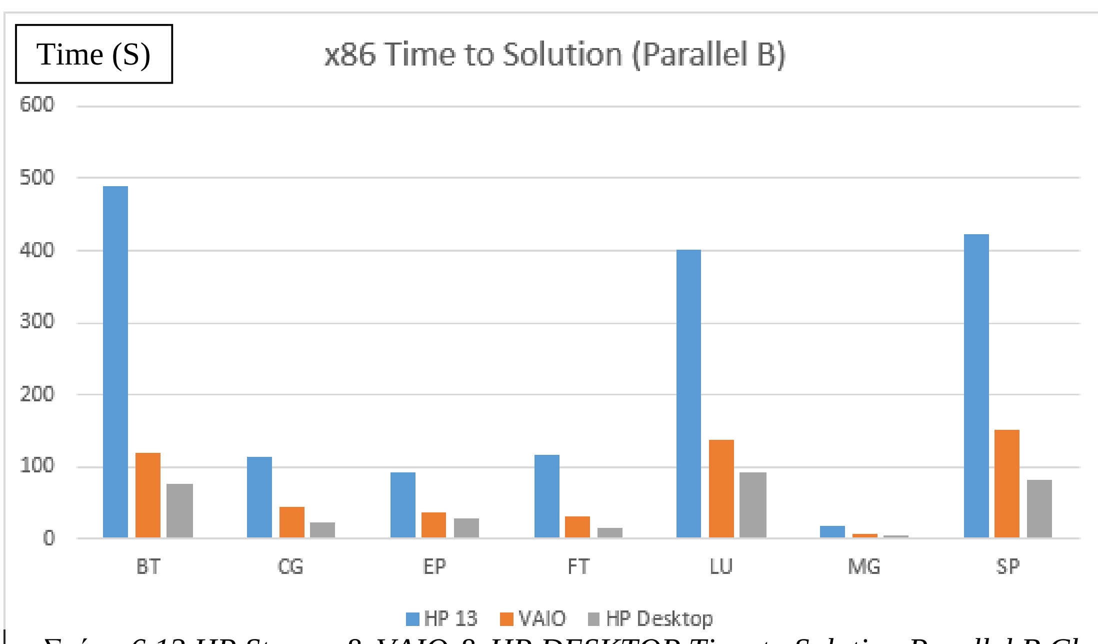


Σχήμα 6.11 HP Stream & VAIO & HP DESKTOP Time to Solution Serial B Class.

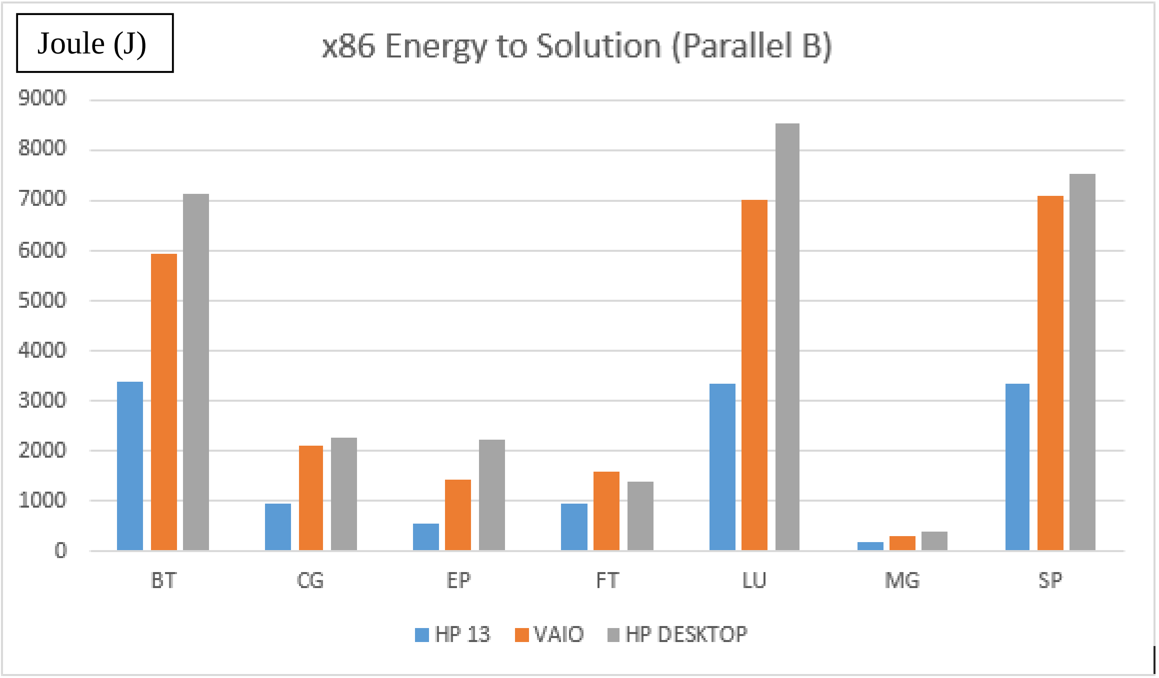


Σχήμα 6.12 HP Stream & VAIO & HP DESKTOP Energy to Solution Serial B Class.

Παρατηρείτε πως η αρχιτεκτονική Silvermont που απαντάτε στο σύστημα HP Stream είναι υποδεέστερη σε όλα τα μετρικά. Είναι μέχρι και 4.5 φορές πιο αργή στην εκτέλεση των εφαρμογών αλλά παρουσιάζει μόνο ½ βελτίωση στη κατανάλωση ενέργειας από τα άλλα συστήματα.

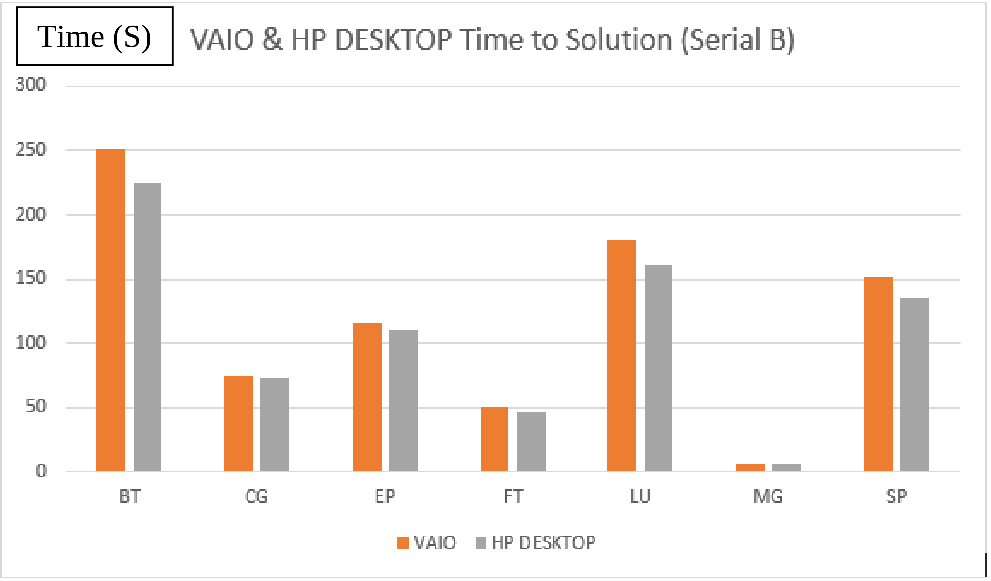


Σχήμα 6.13 HP Stream & VAIO & HP DESKTOP Time to Solution Parallel B Class.

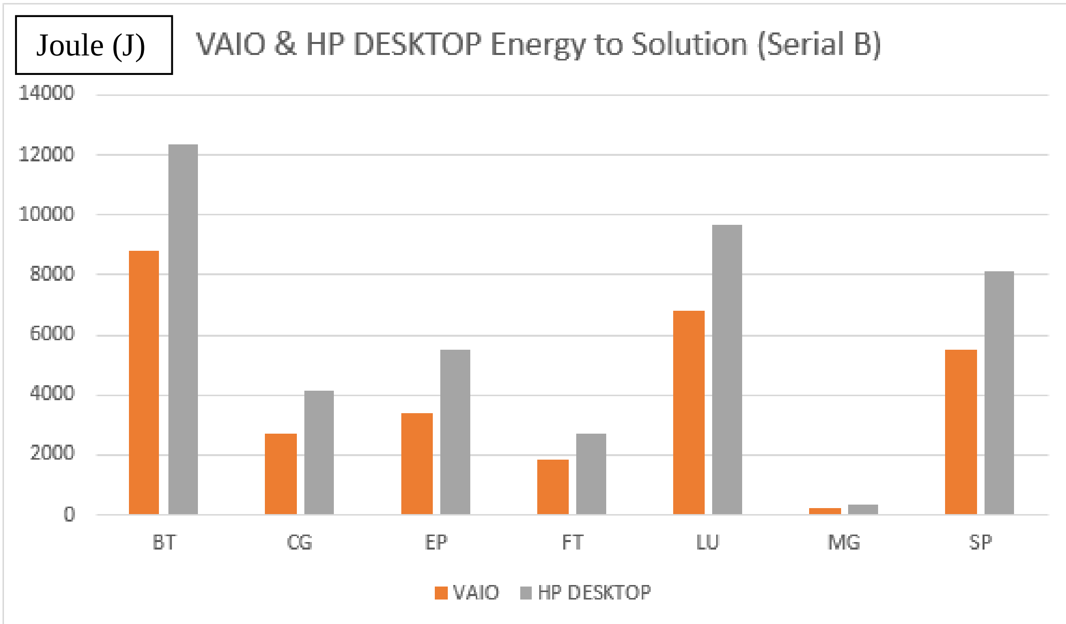


Σχήμα 6.14 HP Stream & VAIO & HP DESKTOP Energy to Solution Parallel B Class.

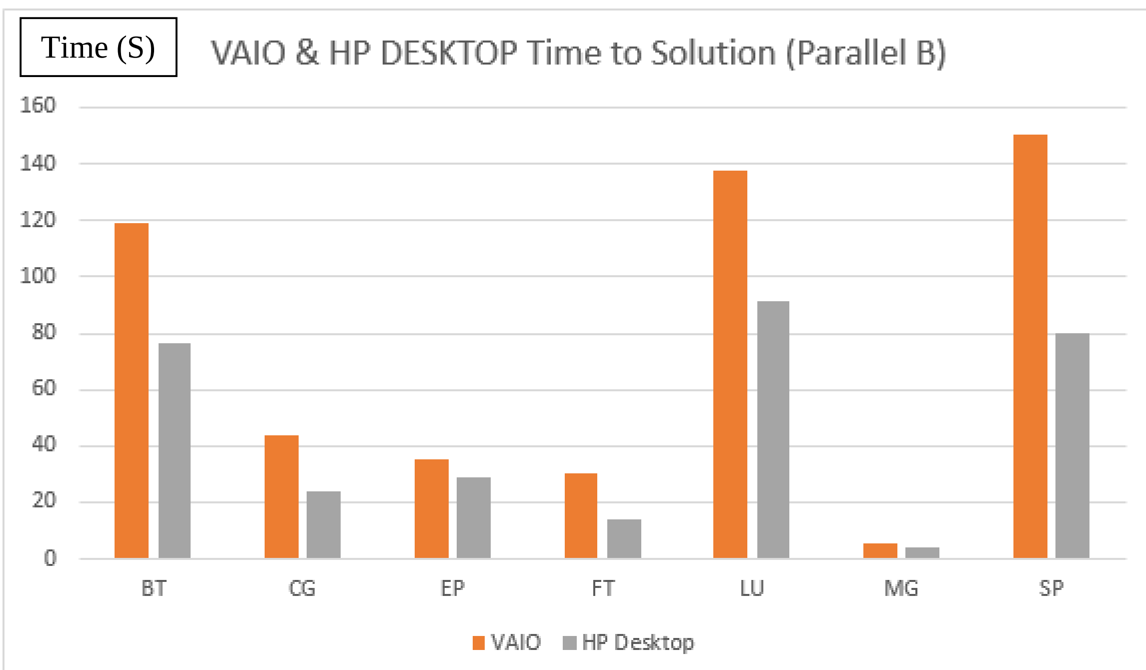
Παρατηρούμε πως και στα παράλληλα benchmark η αρχιτεκτονική Silvermont δεν μπορεί να πλησιάσει τις επιδώσεις των άλλων συστημάτων x86, παρουσιάζοντας μέχρι και πέντε φορές πιο μεγάλο χρόνο ολοκλήρωσης αλλά με εξοικονόμηση ενέργειας τις τάξης του ½.



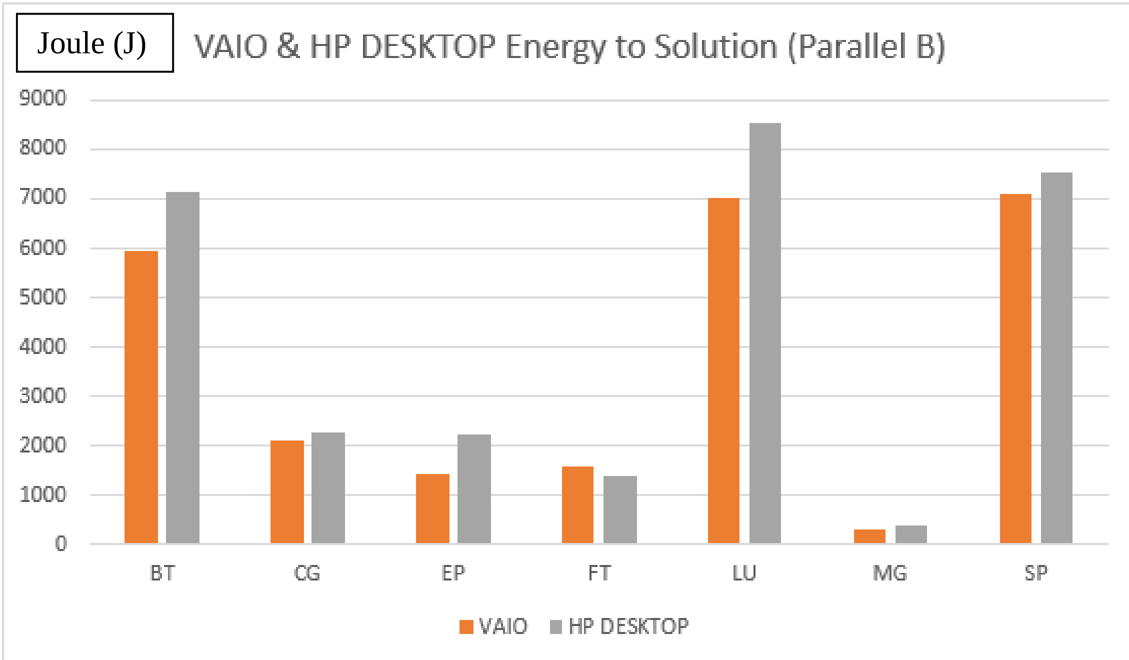
Σχήμα 6.15 VAIO & HP DESKTOP Time to Solution Serial B Class.



Σχήμα 6.16 VAIO & HP DESKTOP Energy to Solution Serial B Class.



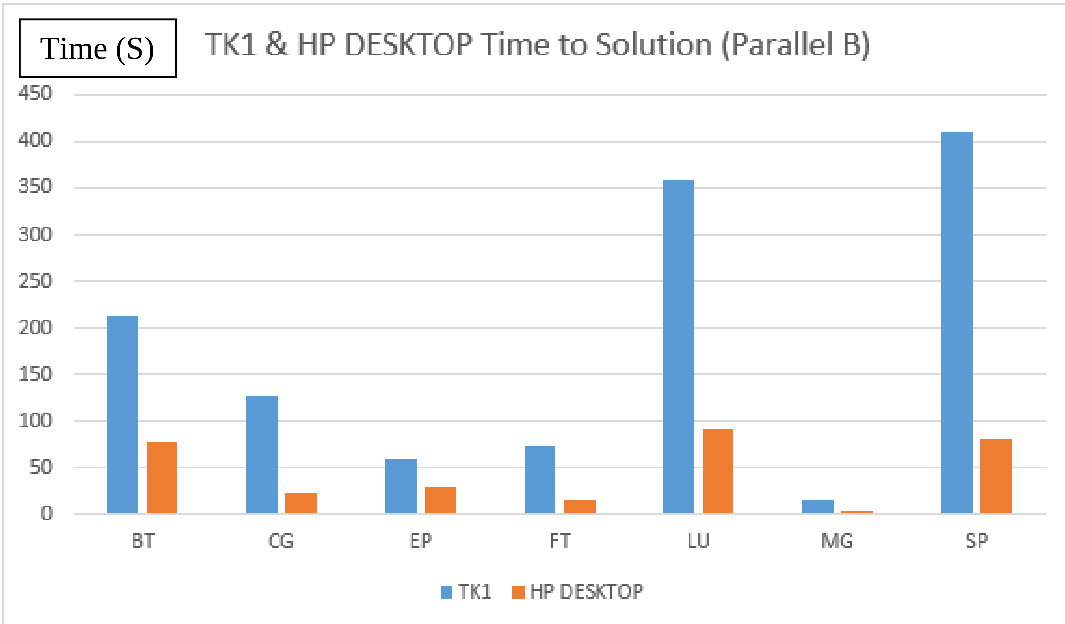
Σχήμα 6.17 VAIO & HP DESKTOP Time to Solution Parallel B Class.



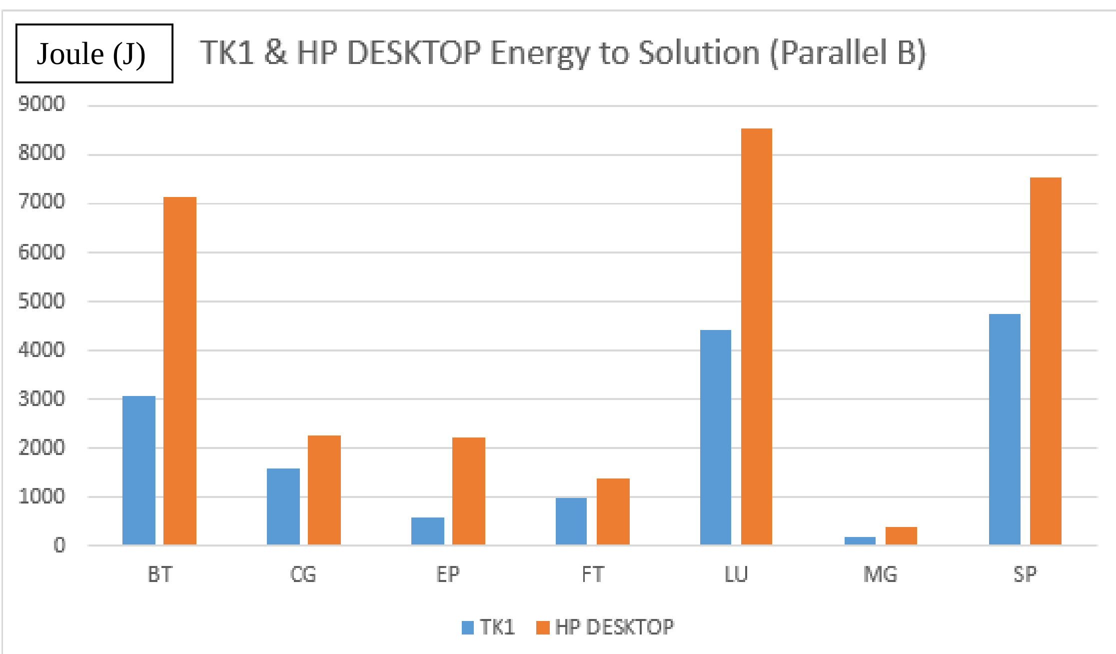
Σχήμα 6.18 VAIO & HP DESKTOP Energy to Solution Parallel B Class.

Η ανάλυση της αρχιτεκτονικής Sandy Bridge μας δείχνει πως η τεχνολογία Hyper-Threading δουλεύει περισσότερο για εκτελέσεις προγραμμάτων σε ένα πυρήνα, όπου η επίδοση μεταξύ των συστημάτων είναι εφάμιλλη αλλά με μεγάλη διαφορά στην κατανάλωση ενέργειας. Όταν η εκτέλεση γίνεται σε πολλούς πυρήνες όμως, το γεγονός πως το ένα τσιπ διαθέτη 2 πυρήνες και το άλλο 4 είναι εμφανές. Σε αυτήν την περίπτωση το τετραπύρηνο τσιπ είναι μέχρι και δύο φορές πιο γρήγορο, με την κατανάλωση ενέργειας να είναι σχεδόν η ίδια.

Έχοντας βρει το πιο γρήγορο τσιπ από κάθε αρχιτεκτονική, θα γίνει η σύγκριση μεταξύ τους.

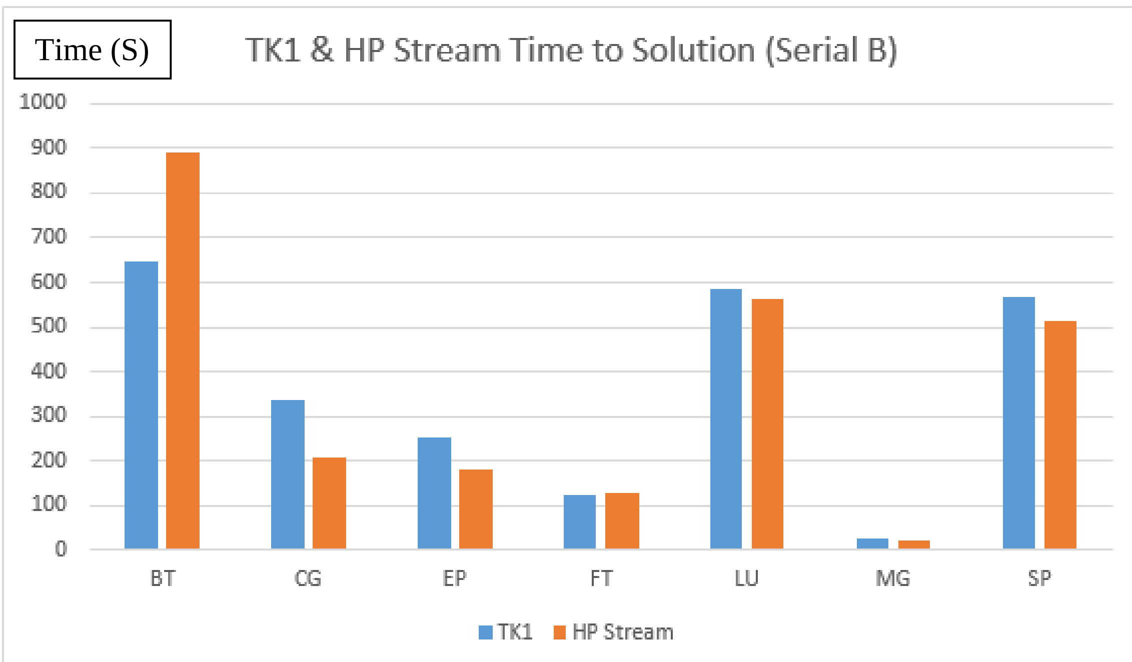


Σχήμα 6.19 TK1 & HP DESKTOP Time to Solution Parallel B Class.

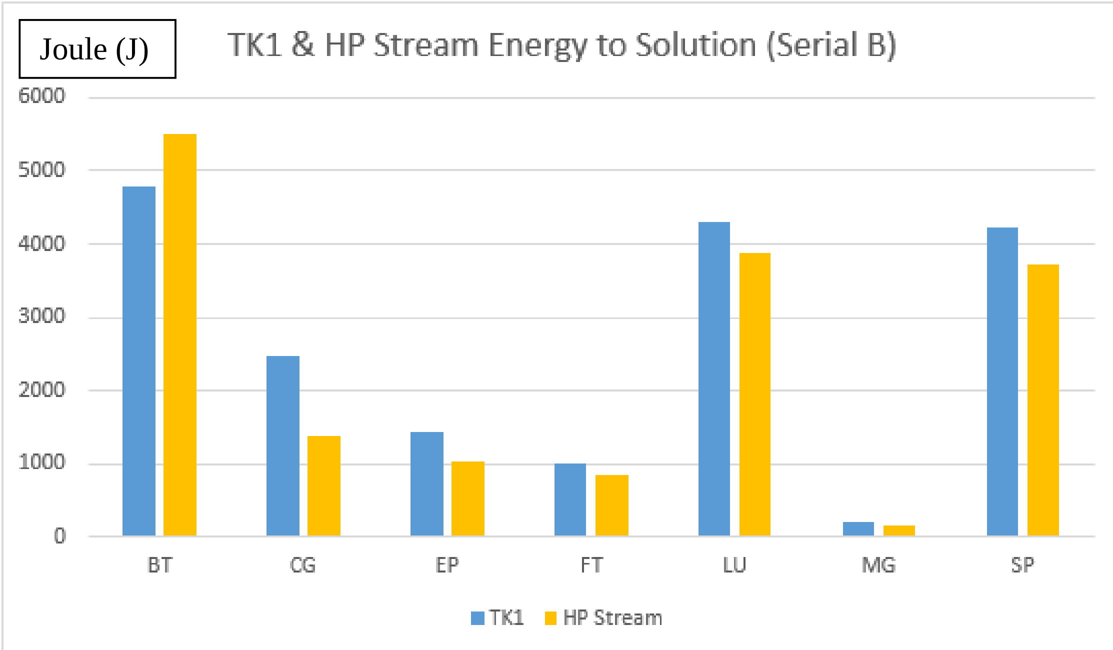


Σχήμα 6.20 TK1 & HP DESKTOP Energy to Solution Parallel B Class.

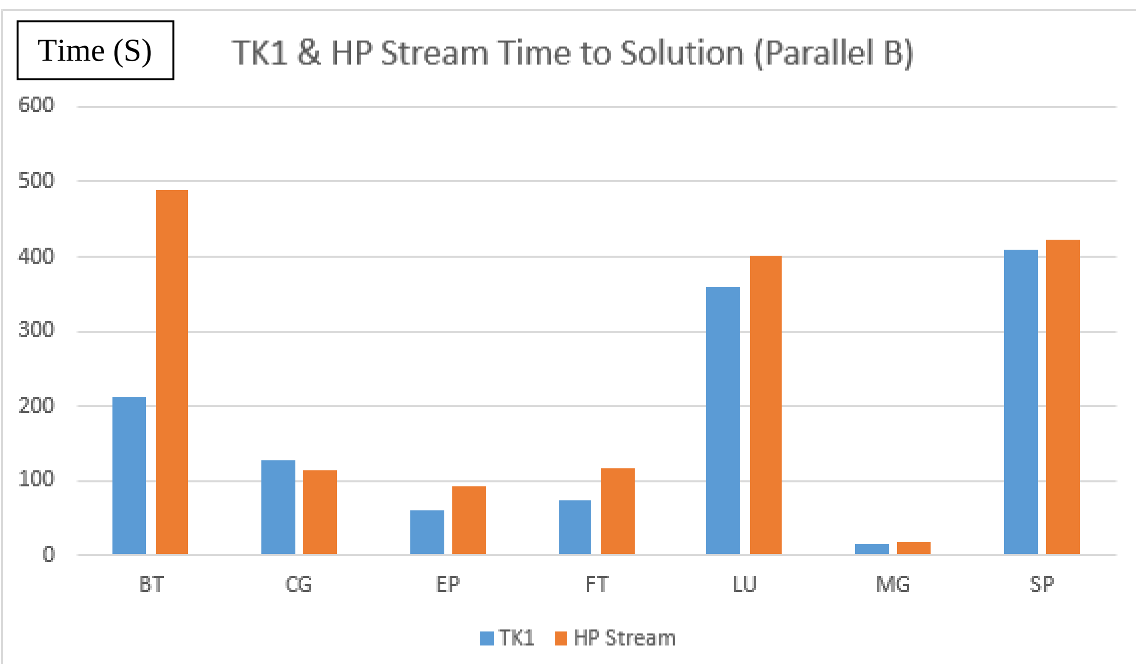
Παρατηρούμε πως η διάρκεια στον χρόνο εκτέλεσης είναι μέχρι και 4 φορές πιο μεγάλη στο τσιπ Tegra σε σύγκριση με το τσιπ Core i5. Αυτό δεν θα αποτελούσε πρόβλημα αν η κατανάλωση ενέργειας ήταν μέχρι και 4 φορές πιο μικρή, αλλά όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα πιο πάνω, στη καλύτερη περίπτωση η βελτίωση είναι της τάξης του 2.5. Αυτό καθιστά το τσιπ Tegra λιγότερο αποδοτικό από το Core i5 αν το κύριο κριτήριο αξιολόγησης είναι ο χρόνος επίλυσης.



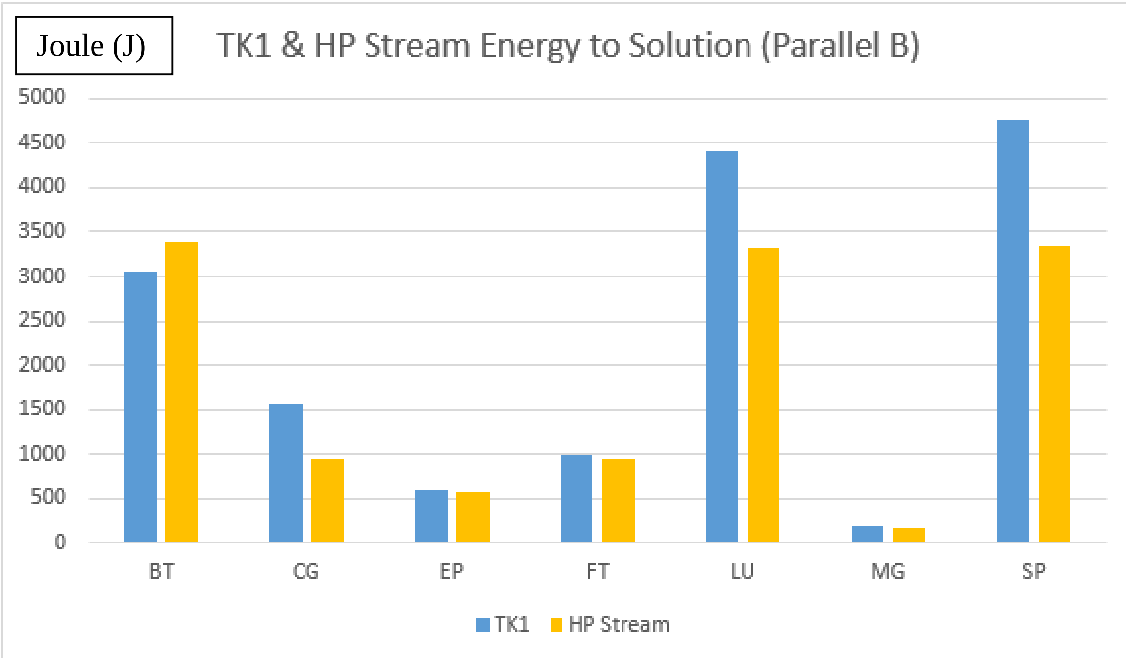
Σχήμα 6.21 TK1 & HP Stream Time to Solution Serial B Class.



Σχήμα 6.22 TK1 & HP Stream Energy to Solution Serial B Class.



Σχήμα 6.23 TK1 & HP Stream Time to Solution Parallel B Class.



Σχήμα 6.24 TK1 & HP Stream Energy to Solution Parallel B Class.

Η σύγκριση των τσιπ Tegra K1 και N2840 παρουσιάζει ενδιαφέρων διότι ανήκουν και τα δύο στην ίδια ενεργειακή κατηγορία. Το πρώτο αποτελεί την πιο επεξεργαστικά ισχυρή λύση αρχιτεκτονικής ARM και το δεύτερο την πιο ενεργειακά αποδοτική λύση αρχιτεκτονικής x86. Παρατηρούμε πως στην μονοπύρηνη εκτέλεση, οι δύο αρχιτεκτονικές είναι εφάμιλλες σε επιδώσεις, με την συνολική κατανάλωση ενέργειας να είναι συνδεδεμένη με τον χρόνο εκτέλεσης. Στην πολυπύρηνη εκτέλεση, τα αποτελέσματα είναι ανάμικτα. Σε κάποια προβλήματα υπερτερεί το Tegra και σε άλλα το N2840. Αυτό είναι χαρακτηριστικό της εξέλιξης των επεξεργαστών ARM, οι οποίοι την χρονική στιγμή που έγινε η μελέτη αυτή μπορούν να συναγωνιστούν σε επιδώσεις μόνο τους πιο αδύνατους επεξεργαστές αρχιτεκτονικής x86. Επίσης, παρατηρούμε πως το τσιπ N2840 θα μπορούσε να θεωρηθεί εξίσου ενεργειακά αποδοτικό όσο το τσιπ Tegra, θέτοντας έτσι την σκοπιμότητα των επεξεργαστών ARM για λύσεις σε υπερυπολογιστές σε αμφιβολία.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

7.1 Συμπεράσματα

Το πρώτο συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι η ενεργειακή απόδοση είναι άμεσα εξαρτημένη από τον χρόνο εκτέλεσης του benchmark. Ένας επεξεργαστής μπορεί να είναι πιο απαιτητικός σε ενέργεια σε σύγκριση με έναν άλλο, αλλά το γεγονός πως η εκτέλεση ολοκληρώνεται πιο γρήγορα αντισταθμίζει την μεγάλη κατανάλωση, διότι η φόρμουλα υπολογισμού είναι η ακόλουθη: J = W * S. Ένα παράδειγμα αυτής της παρατήρησης είναι το αποτέλεσμα Energy to Solution για το Raspberry Pi 2 και TK1.

Επίσης, παρατηρήθηκε πως η επεξεργαστές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας πετυχαίνουν καλή επίδοση Energy to Solution άλλα υστερούν σε χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης, Time to Solution. Αυτό ήταν αναμενόμενο, η έκπληξη όμως ήρθε από το γεγονός ότι για την επίτευξη του ίδιου χρόνου επίδοσης με πιο ενεργοβόρους επεξεργαστές, όπου θεωρητικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ένας αριθμός από low power SoCs, η ενεργειακή απόδοση θα είναι χειρότερη από τους ενεργοβόρους επεξεργαστές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η καθυστέρηση σε χρόνο είναι της τάξης του x3-x4 αλλά η βελτιστοποίησης της κατανάλωσης της ενέργειας της τάξης του ½. Αν ο χρόνος εκτέλεσης είναι δευτερεύοντας σημασίας, τότε η χρήση επεξεργαστή χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας είναι επιτρεπτή επιλογή.

Ακόμη, από την ανάλυση των αποτελεσμάτων μπορεί να συμπεραθεί ότι η βελτίωση της επεξεργαστικής ισχύς των επεξεργαστών ARM από γενιά σε γενιά ακολουθεί εκθετική πορεία με θετικό αντίκτυπο στην συνολική Energy to Solution επίδοση. Μεγάλη βελτίωση σε όλες τις παραμέτρους επιφέρει και η εναλλαγή από ARMv6 σε ARMv7, βελτίωση που οφείλεται στην πιο αποδοτική εκτέλεση εφαρμογών στην νέα ISA (Instruction Set Architecture) και αφήνει το ενδεχόμενο για μια εξίσου μεγάλη βελτίωση από την εναλλαγή σε ARMv8.

Συνοπτικά, παρατηρήθηκε βελτίωση τόσο στην μέτρηση Time to Solution όσο και στην Energy to Solution από όλα τα συστήματα αρχιτεκτονικής ARM, αρχίζοντας από το παλαιότερο και προχωρώντας μέχρι το νεότερο. Η μετάβαση από το Nexus S στο Nexus 4 έφερε x2 αύξηση στην υπολογιστική επίδοση και x4 μείωση στην κατανάλωση ενέργειας. Η ίδια εκθετική πορεία μπορεί να παρατηρηθεί στην μετάβαση από το Raspberry Pi 1 στο Raspberry Pi 2 και τέλος στο NVidia Tegra K1. Στην κάθε περίπτωση, η επίδοση του διάδοχου είναι καλύτερη σε όλες μετρήσεις. Σε ότι αφορά τις μετρήσεις σε αρχιτεκτονική x86, η επίδοση Energy to Solution είναι αντιστρόφως ανάλογη στην επίδοση Time to Solution. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως για να επιτευχθεί καλύτερος χρόνος εκτέλεσης χρειάζεται περισσότερη ενέργεια από το τσιπ. Λόγο του γεγονότος πως στις x86 μετρήσεις μας δεν έχουμε εναλλαγή γενιάς, VAIO και HP Desktop χρησιμοποιούν την ίδια μικρό αρχιτεκτονική και το HP Stream δεν μπορεί να συγκριθεί με άλλο σύστημα στην ίδια κατηγορία ενεργειακής κατανάλωσης x86, η καλύτερη επίδοση χρόνου έχει αντίκτυπο στην ενέργεια.

Τελειώνοντας, το πιο σημαντικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από την παρών μελέτη είναι πως οι χαμηλοί σε κατανάλωση ενέργειας επεξεργαστές δεν μπορούν να αντικαταστήσουν τους ενεργοβόρους επεξεργαστές x86 σε ενεργειακά αποδοτικές λύσεις με την ίδια ή εφάμιλλη επίδοση Time to Solution. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως οι μικρό αρχιτεκτονικές ARM που αναλύθηκαν είναι 32 – bit, πράγμα που δείχνει πως δεν προορίζονται για λύσεις σε υπολογιστές υψηλών επιδόσεων. Αντιθέτως, όλοι οι επεξεργαστές x86 είναι 64 – bit. Υπάρχει όμως η ένδειξη στα αποτελέσματα μας πως με μερικές βελτιώσεις η όλη κατάσταση μπορεί να αλλάξει. Με εναλλαγή στην ISA ARMv8 64 – bit και συνέχιση της εκθετικής πορείας ανάπτυξης σε επιδώσεις Time to Solution με το ίδιο η καλύτερο ενεργειακό προφίλ, θα ήταν δυνατό μια μέρα να θεωρηθούν οι πιο κατάλληλες λύσεις για υπερυπολογιστές και η σκοπιμότητα τους για αυτό τον σκοπό να είναι αποδεκτή. Αυτό μένει να αποδειχθεί σε μελλοντική μελέτη. Προς το παρών όμως, η ηγεμονική θέση σε θέματα επίδοσης που κατέχουν οι επεξεργαστές x86 είναι δικαιολογημένη.

7.2 Μελλοντική εργασία

Λόγο περιορισμού των διαθέσιμων συστημάτων, ήταν εφικτή η μελέτη επεξεργαστών με ISA ARM[v6, v7] – 32 bit και πιο παλιών αρχιτεκτονικών x86 μόνο. Αν και τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν δείχνουν με σαφήνεια την πορεία των επεξεργαστών ARM σε ότι αφορά την σκοπιμότητα τους για λύσεις σε υπερυπολογιστές, θα ήταν πιο αντιπροσωπευτικό να γίνει και μελέτη νεότερων επεξεργαστών.

Από την πλευρά των χαμηλών σε κατανάλωση επεξεργαστών, θα μπορούσε να γίνει μελέτη υλοποιήσεων με την ISA ARMv8 – 64 bit και νεότερων μικρό αρχιτεκτονικών x86. Οι μικρό αρχιτεκτονικές Cortex-[A32, A35, A53, A57, A72] αποτελούν την νέα γενεά 64 bit της ARM, και είναι λύσεις με αυτές της μικρό αρχιτεκτονικές που θα εγκατασταθούν σε εξυπηρετητές και υπερυπολογιστές. Για να γίνει η μελέτη τους, θα μπορούσε να αξιολογηθεί το Raspberry Pi 3 το οποίο έχει 4 πυρήνες Cortex-A53 καθώς και η νέα υπολογιστική πλατφόρμα της NVidia, Jetson TX1, με 4 πυρήνες Cortex-A53 και 4 Cortex-A57. Επιπροσθέτως, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε και η μελέτη ιδιο-σχεδίαστων μικρό αρχιτεκτονικών ARMv8 - 64 bit όπως η Mongoose της Samsung, η Kryo από την Qualcomm και η Denver από την NVidia. Τα μόνα σε διάθεση συστήματα με αυτούς τους επεξεργαστές είναι έξυπνα κινητά τηλεφωνά και υπολογιστικές ταμπλέτες.

Από την πλευρά της αρχιτεκτονικής x86, θα μπορούσε να μελετηθεί η επίδοση των χαμηλών σε κατανάλωση CORE επεξεργαστών που φέρνουν την ονομασία ‘CORE m[3, 5, 7]’ με μικρό αρχιτεκτονική είτε Broadwell είτε Skylake. Επιπρόσθετος, η νέα μικρό αρχιτεκτονική της κατηγορίας ATOM με την ονομασία Airmont αποτελεί ένα εξίσου σημαντικό παράγοντα για μελέτη. Προϊόντα που υλοποιούν τους προαναφερθείς επεξεργαστές είναι οι κατηγορία των φορητών υπολογιστών.

Για πιο απαιτητικές σε ενέργεια λύσεις, θα μπορούσαν να αξιολογηθούν είτε φορητοί υπολογιστές είτε επιτραπέζια συστήματα με επεξεργαστές μικρό αρχιτεκτονικής Broadwell και Skylake που ανήκουν στην κατηγορία CORE-i[3, 5, 7] οι οποίοι είναι κατά 3 με 4 χρόνια νεότεροι από τους παρών μελετηθείς επεξεργαστές.

Τελειώνοντας με τις εισηγήσεις, θα μπορούσαν να μελετηθούν οι δύο νεότερες μικρό αρχιτεκτονικές της NVidia για CUDA Cores με την ονομασία Maxwell (2015) και Pascal (2016), για να εξαχθούν αποτελέσματα για την βελτίωση της επίδοσης των γραφικών μονάδων επεξεργασίας.

Βιβλιογραφία

[1] Michael A. Laurenzano et al, "Characterizing the Performance-Energy Tradeoff of Small ARM Cores in HPC Computation," in *Euro-Par 2014: Parallel Processing: 20th International Conference, August 25-29, 2014*, pp. 124-137.

[2] Nikola Rajovic, Alejandro Rico, James Vipond, Isaac Gelado, Nikola Puzovic, Alex Ramirez, "Experiences with Mobile Processors for Energy Efficient HPC," in *Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe, March 18-22, 2013*, pp. 464-468.

[3] Nikilesh Balakrishnan, "Building and benchmarking a low power ARM cluster," M.S. thesis, The University of Edinburgh, Scotland, UK, 2012.

[4] Sritrusta Sukaridhoto, Achmad Subhan KHalilullah, Dadet Pramadihanto, "Further Investigation on Building and Benchmarking a Low Power Embedded Cluster for Education," in *IPTEK, Journal of Proceeding Series, Vol. 1*, 2014, pp. 311-318.

[5] Edward L. Bosworth, "Multicore Processors & the Power Wall," class notes for CPSC 5155, TSYS School of Computer Science, Columbus State University, Jan. 2010.

[6] Kevin Skadron, "Implications of the Power Wall in a Manycore Era. Sustaining Growth in Computing Performance," presented at National Research Council Computer Science and Telecommunications Board, Mountain View, CA, USA, Sept. 2007

[7] Mike Bailey, "Parallel Programming: Moore's Law and Multicore," class notes for cs475, Computer Science, Oregon State University, Mar. 2016.

[8] Emily Blem, Jaikrishnan Menon, and Karthikeyan Sankaralingam, "A Detailed Analysis of Contemporary ARM and x86 Architectures," in *19th IEEE Intl. Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA), February 23-27, 2013*, pp. 1- 12.

[9] Michelle McDaniel and Jonathan Dorn, "Intel Atom Processor," class notes for CS 8535, Computer Science, University of Virginia, Apr. 2011.

[10] Katie Roberts-Hoffman, Pawankumar Hegde, "ARM Cortex-A8 vs. Intel Atom: Architectural and Benchmark Comparisons," University of Texas at Dallas, 2009, unpublished.

[11] ARM Holdings plc. ARM Ecosystem Collaborates to Deliver Initial Server Platform Standard. [Online]. Available: https://www.arm.com/about/newsroom/arm-ecosystem-collaborates-to-deliver-initial-server-platform-standard.php

[12] ARM Holdings plc. ARM-based Servers. [Online]. Available: https://www.arm.com/markets/Infrastructure/servers.php

[13] George Leopold. (2016). ARM Scales Chips for Datacenters, HPC. [Online]. Available: http://www.hpcwire.com/2016/03/17/arm-scales-chips-datacenters-hpc/

[14] C. Steinhaus C. Wedding, “High Performance Computing on ARM,” class notes for HPAC, Computational Engineering Science, RWTH Aachen University, Sept. 2014.

[15] Jahanzeb Maqbool, Sangyoon, Geoffrey C. Fox, “Evaluating Energy Efficient HPC Clusters for Scientific Workloads,” in *Concurrency and Computation Practice and Experience*, vol. 27, no. 17, 10 December 2015, pp. 5390–5410.

[16] ARM Holdings plc. ARM Accelerates Mathematical Computation on 64-bit ARM-based HPC Systems. [Online]. Available: https://www.arm.com/about/newsroom/arm-accelerates-mathematical-computation-on-64-bit-arm-based-hpc-systems.php

[17] ARM Holdings plc. High Performance Computing (HPC) on ARM. [Online]. Available: https://developer.arm.com/hpc/latest-news/deployments

[18] Alex Ramirez, Paul Carpenter, “European scalable and power efficient HPC platform based on low-power embedded technology,” presented at *International Supercomputing Conference, HPC for Asia Workshop*, 2013,

[19] Peter Kogge et al, “ExaScale Computing Study: Technology Challenges in Achieving Exascale Systems,”AFRL, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, Tech Rep. FA8650-07-C-7724, 2008.

[20] Filippo Mantovani, “High Performance Computing Based on Mobile Embedded Technology,” presented at Emerging Technology Conference, 2015.

[21] NASA Agency. NAS Parallel Benchmarks. [Online]. Available: https://www.nas.nasa.gov/publications/npb.html

[22] David H Bailey, “The NAS Parallel Benchmarks,” in *Encyclopedia of Parallel Computing*, Padua, David Ed. Urbana, IL: Springer, 2011, pp. 1255-1258

[23] D. Bailey et al, “The NAS Parallel Benchmarks,” Ames Research Center, Mountain View, CA, USA, Tech. Rep. RNR-94-007, 1994.

[24] ARM Holdings plc. Cortex-A72 Processor. [Online]. Available: http://www.arm.com/products/processors/cortex-a/cortex-a72-processor.php

[25] *Exynos 3110 Leaflet*, Samsung Inc., Suwon, South Korea, 2010.

[26] NASA Agency. The Force is Strong with NASA's Smartphone-Powered Satellite. [Online]. Available: http://www.nasa.gov/mission_pages/station/main/spheres_smartphone.html

[27] ARM Holdings plc. ARM Exynos 3 Single. [Online]. Available: https://community.arm.com/docs/DOC-7978

[28] Qualcomm Inc. Qualcomm Snapdragon S4 Pro. [Online]. Available: https://www.qualcomm.com/products/snapdragon/smartphones/google-nexus-4

[29] Qualcomm Inc. Qualcomm Announces Next-generation Snapdragon Mobile Chipset Family. [Online]. Available: https://www.qualcomm.com/news/releases/2011/02/14/qualcomm-announces-next-generation-snapdragon-mobile-chipset-family

[30] Raspberry Pi Foundation. BCM2835. [Online]. Available: https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/bcm2835/README.md

[31] Raspberry Pi Foundation. BCM2836. [Online]. Available: https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/bcm2836/README.md

[32] NVidia Corp. JETSON TK1. [Online]. Available: http://www.nvidia.com/object/jetson-tk1-embedded-dev-kit.html

[33] Elinux. JETSON TK1. [Online]. Available: http://elinux.org/Jetson_TK1

[34] ARM Holdings plc. ARM11. [Online]. Available: https://www.arm.com/products/processors/classic/arm11/arm1176.php

[35] ARM Holdings plc. Cortex-A8. [Online]. Available: https://www.arm.com/products/processors/cortex-a/cortex-a8.php

[36] Qualcomm Inc. Krait, Power VS Performance. [Online]. Available: https://www.qualcomm.com/news/onq/2013/10/25/power-vs-performance-management-cpu

[37] ARM Holdings plc. Cortex-A7 processor. [Online]. Available: https://www.arm.com/products/processors/cortex-a/cortex-a7.php

[38] ARM Holdings plc. Cortex-A15 processor. [Online]. Available: https://www.arm.com/products/processors/cortex-a/cortex-a15.php

[39] Intel Corp. Intel Launches Low-Power, High-Performance Silvermont Microarchitecture. [Online]. Available: https://newsroom.intel.com/news-releases/intel-

launches-low-power-high-performance-silvermont-microarchitecture/

[40] Anand Lal Shimpi. (May,2013). Intel's Silvermont Architecture Revealed: Getting Serious about Mobile. [Online]. Available: http://www.anandtech.com/show/6936/intels-silvermont-architecture-revealed-getting-serious-about-mobile

[41] Intel Corp. Intel Sandy Bridge. [Online]. Available: http://ark.intel.com/products/codename/29900/Sandy-Bridge#@All

[42] *Φύλλο δεδομένων HP Stream Notebook 13-c010nv,* Hewlett Packard Inc. Palo Alto, CA. USA, 2015

[43] Sony Corp. SONY VAIO SVE1511W1ESI. [Online]. Available: https://www.sony.co.uk/support/en/content/cnt-specs/SVE1511W1E/list

[44] Intel Corp. Intel Hyper-Threading Technology. [Online]. Available: http://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/hyper-threading/hyper-threading-technology.html

[45] Intel Corp. Intel Core i5-2400 Processor. [Online]. Available: http://ark.intel.com/products/52207/Intel-Core-i5-2400-Processor-6M-Cache-up-to-3_40-GHz

[46] *Energenie ENER007 Manual*, Energenie U.K., 2012.

[47] Google. Terminal IDE. [Online]. Available: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.spartacusrex.spartacuside&hl=en

[48] Google. Factory images for nexus devices. [Online]. Available: https://developers.google.com/android/nexus/images#mysidspr

[49] Google. Android SDK. [Online]. Available: https://developer.android.com/studio/intro/update.html

[50] Google. Power Tutor. [Online]. Available: https://play.google.com/store/apps/details?id=edu.umich.PowerTutor&hl=en

[51] Raspberry Pi Foundation. Raspbian. [Online]. Available: https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/

[52] SourceForge. Win 32 Disk Imager. [Online]. Available: https://sourceforge.net/projects/win32diskimager/

[53] SD Card Corp. SD Card Formatter. [Online]. Available: https://www.sdcard.org/downloads/formatter_4/

[54] Microsoft Corp. Windows 10. [Online]. Available: https://www.microsoft.com/en-us/software-download/windows10/

[55] Cygnus Solutions. Cygwin. [Online]. Available: http://cygwin.com/install.html

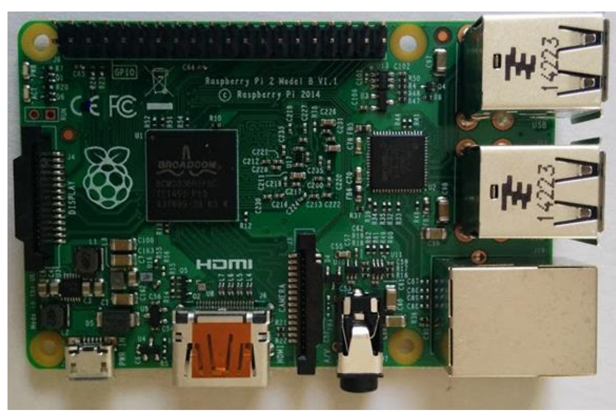
Παράρτημα Α

Εικόνες από τις πλατφόρμες που αξιολογήθηκαν

Εικόνα Α.1 Nexus S

Εικόνα Α.2 Nexus 4

Εικόνα Α.3 Raspberry Pi 1



Εικόνα Α.4 Raspberry Pi 2

Εικόνα Α.5 NVidia Jetson TK1

Εικόνα Α.6 HP Stream Notebook PC 13

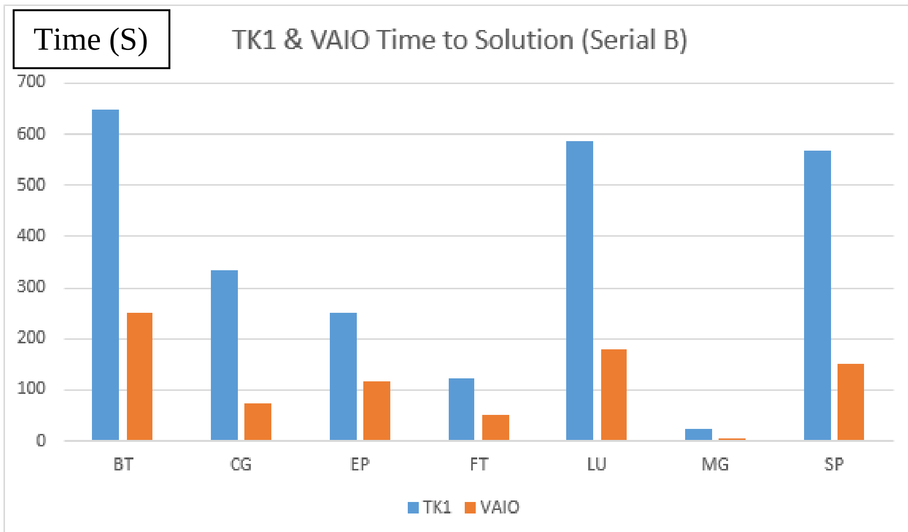
Εικόνα Α.7 Sony VAIO Laptop SVE1511W1ESI

Εικόνα Α.9 Energenie ENER007

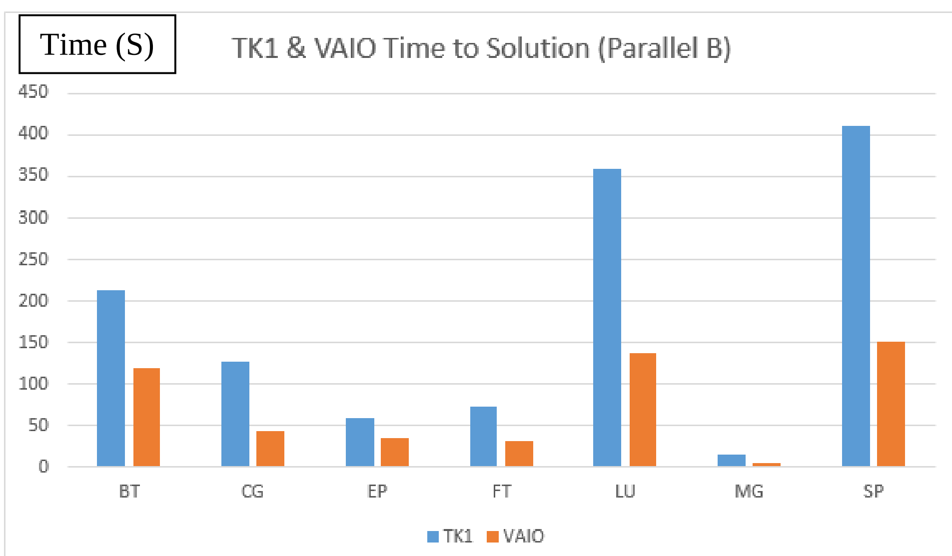
Εικόνα Α.8 HP Compaq 8200 Elite CMT PC

Παράρτημα Β

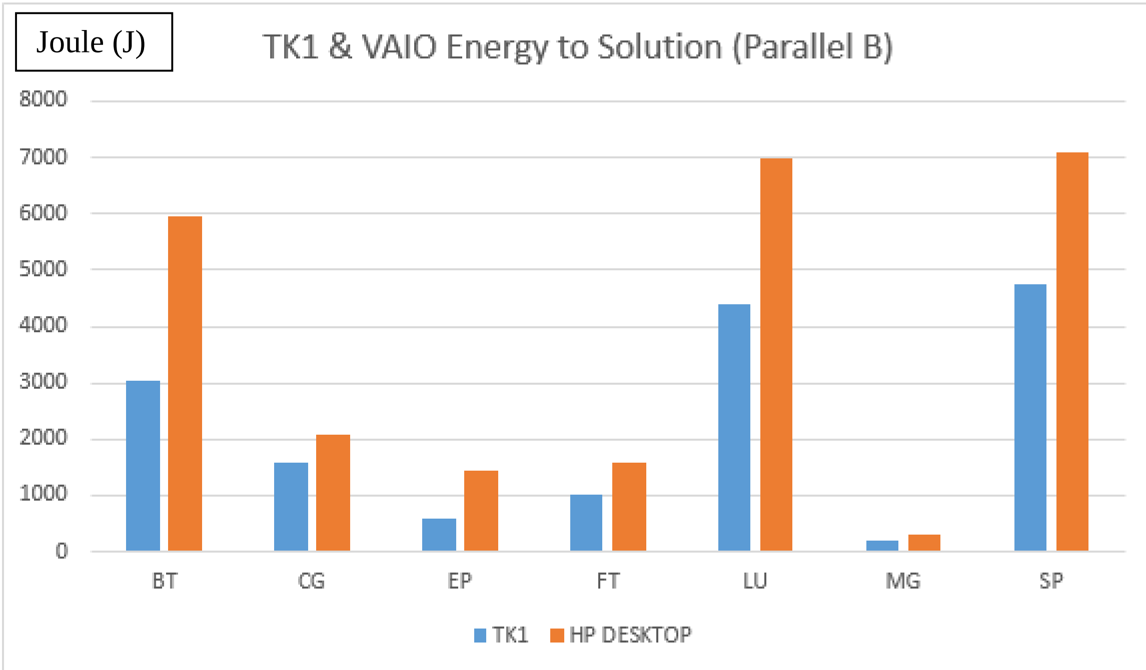
Επιπλέων γραφικές παραστάσεις



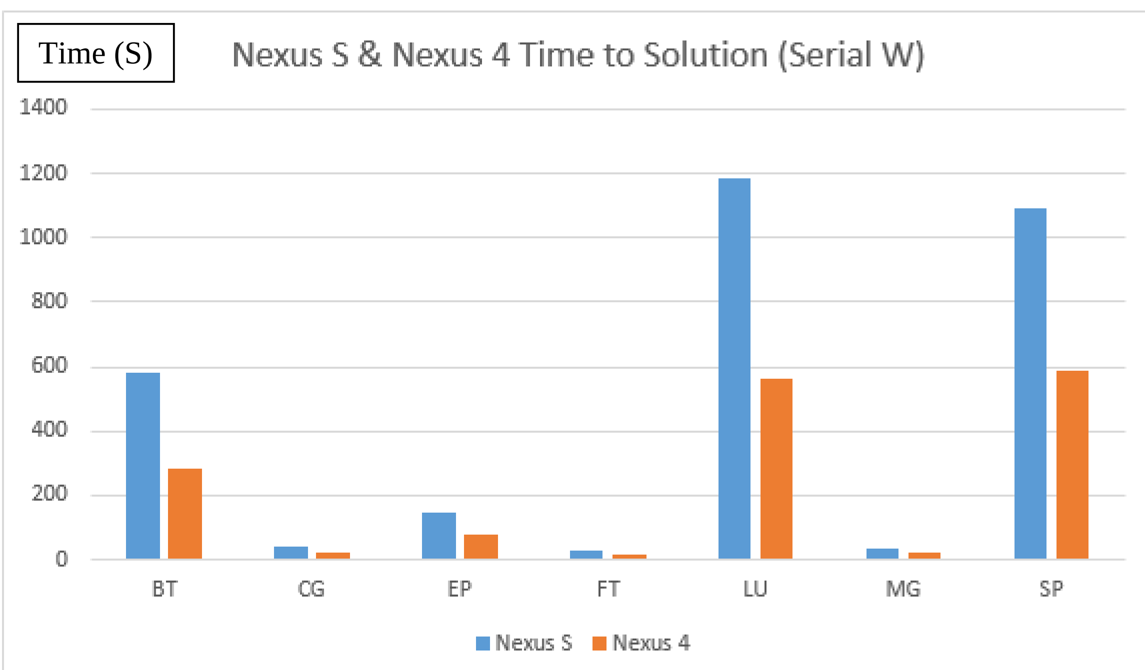
Σχήμα Β.1 TK1 & VAIO Time to Solution Serial B Class.



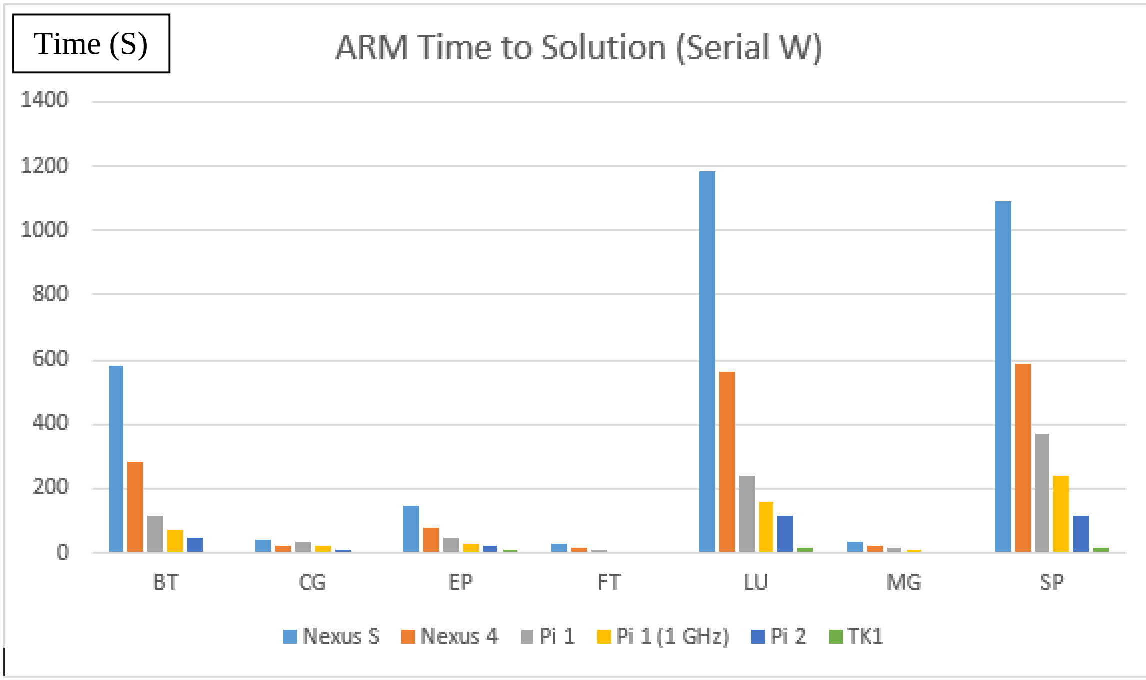
Σχήμα Β.2 TK1 & VAIO Time to Solution Parallel B Class.



Σχήμα B.3 TK1 & VAIO Energy to Solution Parallel B Class.



Σχήμα B.4 Nexus S & Nexus 4 Time to Solution Serial W Class.



Σχήμα B.5 ARM Time to Solution W Class.