

Ατομική Διπλωματική Εργασία

**ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ
SIM-ALPHA ΣΕ ΘΕΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΙΣΧΥΟΣ**

ΕΥΗ ΘΕΟΦΑΝΟΥΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ



ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μάιος 2009

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Επικύρωση αποτελεσμάτων του προσομοιωτή Sim-alpha σε θέματα θερμοκρασίας και ισχύος

Εύη Θεοφάνους

Επιβλέπων Καθηγητής

Γιαννάκης Σαζείδης

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

Μάιος 2009

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας δεν γινόταν πραγματικότητα χωρίς την καθοδήγηση και υποστήριξη του επιβλέποντα καθηγητή μου, Γιαννάκη Σαζείδη. Η συνεργασία μαζί του ήταν μια εποικοδομητική εμπειρία, μέσα από την οποία κέρδισα πάρα πολλά. Η συνεχής επιμονή, βοήθεια και ενδιαφέρον που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της πορείας της έρευνας ήταν το κίνητρο μου για τη συνέχιση της εργασίας ιδιαίτερα όταν ήρθα αντιμέτωπη με διάφορες προκλήσεις. Είμαι βαθιά ευγνώμων για τις συμβουλές που μου προσέφερε και πιστεύω ότι μέσω της συνεργασίας μας απέκτησα γνώση όχι μόνο από ένα σπουδαίο ακαδημαϊκό αλλά και από ένα σπουδαίο άνθρωπο.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ το προσφέρω στην οικογένεια μου, στους γονείς μου Βασίλη και Μαρία, στην αδελφή μου Αγγέλικα, στον αδελφό μου Ονούφριο καθώς και στους παππούδες και θείους που αν και μακριά από μένα, με στήριξαν όσο κανένας άλλος. Η απέραντη αγάπη, υποστήριξη και καθοδήγηση τους με βοήθησε να φτάσω μέχρι εδώ. Ειδικότερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ορέστη που στάθηκε δίπλα μου σε όλες τις στιγμές, δεν σταμάτησε να πιστεύει σε μένα και με βοήθησε να συνεχίσω υπενθυμίζοντας μου τις δυνάμεις που φυλάω μέσα μου. Τελευταίοι αλλά όχι λιγότερο σημαντικοί οι φίλοι μου που ήταν πάντοτε δίπλα μου.

Περίληψη

Μέσα από την διπλωματική εργασία παρουσιάζονται έννοιες που απασχολούν την επιστημονική επικαιρότητα και αφορούν τους τομείς της θερμοκρασίας και ισχύος στους μικροεπεξεργαστές καθώς και τις επιπτώσεις που προκαλούνται στα συστήματα από τη συνεχή αυξητική τους τάση. Σκοπός της εργασίας είναι η επικύρωση των αποτελεσμάτων του προσομοιωτή Sim-alpha συγκρίνοντας τα αποτελέσματά και τη συμπεριφορά τους με ήδη υπάρχοντα συστήματα. Έγινε επιλογή τεσσάρων συγκριτικών μέτρησης επιδόσεως από τη σειρά Spec2000. Επελέγησαν δύο συγκριτικά κινητής υποδιαστολής και δύο ακεραίων πράξεων και από κάθε ομάδα συγκριτικών το ένα είχε ψηλό αριθμό εκτελέσιμων εντολών ανά κύκλο ενώ το δεύτερο είχε χαμηλό αριθμό. Μέσα από τα πειράματα που διεξάχθηκαν παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματά των προσομοιώσεων δεν ήταν τα αναμενόμενα, οι τιμές των εξεταζόμενων μεγεθών (ισχύς και θερμοκρασία) ήταν χαμηλότερες από τις επιθυμητές. Για αυτό το λόγω τέθηκε το θέμα ρύθμισης του προσομοιωτή για την επίτευξη των αποτελεσμάτων που προσδοκούμε μέσα από τη διπλωματική εργασία. Μετά από προσπάθειες και διεκπεραίωση κάποιων πειραμάτων επιτεύχθηκε η επικύρωση των αποτελεσμάτων που προσδοκούσαμε από την έναρξη της έρευνας.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	1
	1.1 Υπόβαθρο	1
	1.2 Επισκόπηση έρευνας	4
Κεφάλαιο 2	Θερμοκρασία	6
	2.1 Θερμοκρασία	6
	2.2 Διάχυση της θερμοκρασίας σε ένα επεξεργαστή	12
	2.3 Πειράματα για επικύρωση βασικών αρχών θερμοκρασίας και ισχύος	14
	2.4 Τεχνικές αντιμετώπισης της αύξησης της θερμοκρασίας στους επεξεργαστές	27
Κεφάλαιο 3	Μικροαρχιτεκτονική.....	30
	3.1 Μικροαρχιτεκτονική υπολογιστών	30
	3.2 Μικροαρχιτεκτονική EV6 21264	41
Κεφάλαιο 4	Πειράματα	48
	4.1 Κριτήρια επιλογής πειραμάτων	48
	4.2 Μεθοδολογία πειραμάτων	50
	4.3 Πειράματα αναφοράς	52
	4.4 Συνοπτικά συμπεράσματα πειραμάτων	72
Κεφάλαιο 5	Ρύθμιση capacitance	80
	5.1 Πειράματα ρύθμισης τιμών capacitance	80
Κεφάλαιο 6	Συμπεράσματα	89
	6.1 Γενικά συμπεράσματα	89

6.2 Μελλοντική εργασία	91
------------------------	----

Βιβλιογραφία	92
---------------------------	-----------

Παράρτημα Α	A-1
--------------------------	------------

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Υπόβαθρο	1
1.2 Επισκόπηση έρευνας	4

1.1 Υπόβαθρο

Η τεχνολογία υπολογιστών παρουσιάζει μια συνεχή εξελικτική τάση σε θέματα επίδοσης και πολυπλοκότητας τα τελευταία περίπου πενήντα πέντε χρόνια από την πρώτη εμφάνιση ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Με την πάροδο του χρόνου η τεχνολογία εξελίσσεται και συνεχώς οι τάσεις της τεχνολογίας διαφοροποιούνται με αποτέλεσμα να επηρεάζεται ο σχεδιασμός των μικροεπεξεργαστών. Η αύξηση του αριθμού των τρανζίστορς επιτρέπει την τοποθέτηση περισσότερων μονάδων σε ένα μονοπυρήνα γεγονός που παρέχει περισσότερη λειτουργικότητα στις επόμενες γενιές επεξεργαστών. Με τη μεταφορά από μια γενεά στην επόμενη μειώνεται το μέγεθος του τρανζίστορ που τοποθετείται στην επιφάνεια που αποτελεί τον επεξεργαστή επιτρέποντας γρηγορότερη μετατροπή της κατάστασης των τρανζίστορς από 1 σε 0 και αντίστροφα, με άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας των επόμενων γενεών επεξεργαστών. Εκτός από τα θετικά αποτελέσματά της εξέλιξης παρουσιάζονται και κάποια προβλήματα που περιορίζουν την περαιτέρω εξέλιξη της τεχνολογίας. Με την αύξηση της συχνότητας ρολογιού αυξάνεται και ο αριθμός των εκτελέσιμων εντολών με αποτέλεσμα να αυξάνεται η δραστηριότητα των μονάδων, η κατανάλωση ισχύς. Αυτές όλες οι αλληλένδετες αλλαγές αυξάνουν την θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον επεξεργαστή με άμεσο κίνδυνο τη

φυσική φθορά του συστήματος καθώς και την αλλοίωση των αποτελεσμάτων των υπολογισμών.

Με την πάροδο του χρόνου η ανάπτυξη της τεχνολογίας πρόσφερε πολλές νέες δυνατότητες στη βιομηχανία. Οι καινούργιες τεχνικές που αναπτύχθηκαν όσον αφορά την αρχιτεκτονική ενός υπολογιστή αλλά και τη μεταγλώττιση έθεσαν ακόμη πιο ψηλά τον πήχη της επίδοσης των συστημάτων. Τεχνικές όπως η διασωλήνωση (pipelining), speculative εκτέλεση κώδικα, out-of-order εκτέλεση, superscalar μικροαρχιτεκτονική καθώς παραλληλισμός στο επίπεδο των εντολών (instruction-level parallelism) έχουν δώσει ένα καινούργιο πρόσωπο στο σχεδιασμό των μικροεπεξεργαστών. Επιπρόσθετα η πρόσφατη εμφάνιση των καινούργιων πολυπύρηνων συστημάτων με ταυτόχρονη πολυνηματική εκτέλεση (simultaneous multithreading) προωθώντας τη νέα τάση της τεχνολογίας οδήγησε τον παραλληλισμό στο επίπεδο νημάτων. Όλες αυτές οι τεχνικές μεταφράζονται σε αύξηση των υπολογισμών ανά μονάδα χρόνου σε κάθε επόμενη γενεά επεξεργαστών.

Από μια ιστορική προοπτική η υπολογιστική επίδοση έχει επιδείξει τεράστια πρόοδο με το πέρασμα του χρόνου. Ενδυναμώνοντας τις τεχνικές που αναπτύχθηκαν οι σχεδιαστές μικροεπεξεργαστών κατάφεραν να ξεπεράσουν τις τάσεις επίδοσης που είχε υποδείξει ο κανόνας του Moore. Όπως προέβλεψε ο Gordon Moore το 1965 ο αριθμός των τρανζίστορς σε ένα τσιπ θα διπλασιαζόταν κάθε 2 χρόνια περίπου, πιο συγκεκριμένα κάθε 18 μήνες. Ο διπλασιασμός του αριθμού των τρανζίστορς μπορεί να συνοδεύεται και από την μείωση του εμβαδού της επιφάνειας. Σε κάθε μεταφορά σε επόμενη τεχνολογία οι διαστάσεις του τρανζίστορς που περιλαμβάνεται στο τσιπ μειώνεται κατά 0.7 φορές με αποτέλεσμα στην περίπτωση μείωσης και του εμβαδού του επεξεργαστή η κάθε διάσταση της επιφάνειας του επεξεργαστή μειώνεται κατά 0.7 φορές επίσης. Η συνεχής σμίκρυνση του τσιπ και αύξηση του αριθμού των τρανζίστορς σε αυτό είναι μια αδιάπτωτη ώθηση προς μεγαλύτερη επίδοση γεγονός που παρέχει υπολογιστική δυνατότητα σε αναδυόμενες κινητές συσκευές περιορισμένη δυνατότητα σε προηγούμενα συστήματα κεντρικών υπολογιστών.

Εντούτοις η εξέλιξη της τεχνολογίας των επεξεργαστών έφερε επιπτώσεις στη συνέχεια. Ταυτόχρονα με τη συνεχή αύξηση της συχνότητας ρολογιού και της επίδοσης των συστημάτων, η διάχυση της ισχύος στα υπολογιστικά συστήματα παρουσίασε γρήγορη επιτάχυνση. Με τη μετάβαση σε επόμενες γενεές επεξεργαστών η πυκνότητα ισχύος καθώς και η θερμοκρασία υπέστηκε εκθετική αύξηση. Αυτή η εξέλιξη πρόσφατα είχε δυσάρεστα αποτελέσματά στο μικροαρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Αυτή η αύξηση είχε αποτέλεσμα η ισχύς και η θερμοκρασία να θεωρούνται οι κύριοι περιορισμοί στο σχεδιασμό των συστημάτων διότι με την αύξηση της πυκνότητας ισχύος ενός συστήματος άμεσα επηρεάζονται οι θερμικοί περιορισμοί των επεξεργαστών, απαιτώντας προηγμένες στρατηγικές θερμικής και ψυκτικής διαχείρισης του επεξεργαστή. Εκτός από τους κινδύνους και τα προβλήματα αξιοπιστίας των συστημάτων με την αύξηση της θερμοκρασίας τόσο το κόστος κατασκευής τους αλλά και οι επιδράσεις που προκαλούν στο περιβάλλον αυξάνονται. Έτσι για να βγουν από το συγκεκριμένο αδιέξοδο ανέπτυξαν νέα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν πολλαπλούς πυρήνες σε χαμηλότερες συχνότητες ρολογιού πετυχαίνοντας τη μείωση της ισχύς και άμεσα της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο σύστημα βοηθώντας ταυτόχρονα στη μείωση των εκπομπών αερίων στην ατμόσφαιρα που συνήθως προκαλούνταν από τη συνεχή προσπάθεια ψύξης των συστημάτων.

Συνοψίζοντας, στόχος των σχεδιαστών μικροαρχιτεκτονικής είναι να σχεδιάσουν αποδοτικά συστήματα λαμβάνοντας υπόψη τον καθοριστικό παράγοντα ισχύς – επίδοση. Η διαχείριση των ανησυχιών που προκαλούνται με τη διάχυση της ισχύς στους μικροεπεξεργαστές μετατράπηκε σε ένα πιεστικό ερευνητικό πρόβλημα στις περιοχές της αρχιτεκτονικής υπολογιστών και μεταγλωττιστών. Θέτοντας ως κύριο άξονα τους δύο αυτούς καθοριστικούς παράγοντες, έχουν εισαχθεί προσομοιωτές που εξετάζουν διάφορα σενάρια ισχύος. Ενώ αυτοί οι προσομοιωτές μπορούν να είναι αρκετά χρήσιμοι για τις μικροαρχιτεκτονικές μελέτες, η γενικότητά τους περιορίζει την ακρίβεια τους ως προς τις οικογένειες των επεξεργαστών.

1.2 Επισκόπηση έρευνας

Με τη χρήση προσομοιωτών οι καινούργιες ιδέες που προβάλλονται από την ομάδα ατόμων που ασχολούνται με την αρχιτεκτονική υπολογιστών μπορούν να αξιολογηθούν και να προωθηθούν μετέπειτα στην υλοποίηση έχοντας ήδη μια πρώτη εικόνα του αντικειμένου της ιδέας. Πολλές ιδέες έχουν εκδοθεί σε άρθρα στηριζόμενες στα αποτελέσματά αυτών των εργαλείων.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι ο προσομοιωτής Sim-alpha και σκοπός της εργασίας είναι η αξιολόγηση και επικύρωση των αποτελεσμάτων του προσομοιωτή όσον αφορά θέματα ισχύος και θερμοκρασίας. Αρχικά ο πρώτος στόχος της εργασίας προτού προβούμε στο πειραματικό στάδιο για την επικύρωση των αποτελεσμάτων ήταν η εκμάθηση του εργαλείου που χρησιμοποιείται στην έρευνα. Γνωρίζοντας τη βασική λειτουργία του εργαλείου διευκολύνεται η μετέπειτα διαδικασία αξιολόγησης διότι με αυτόν τον τρόπο το έργο της επεξήγησης των αποτελεσμάτων και της συμπεριφοράς του προσομοιωτή γίνεται ευκολότερο. Παράλληλα με την εκμάθηση του προσομοιωτή πραγματοποιήθηκε έρευνα για τα εξεταζόμενα μεγέθη ισχύ και θερμοκρασία για καλύτερη κατανόηση. Μέσα από την εξέταση των δύο αυτών μεγεθών πραγματοποιήθηκαν πειράματα για την επικύρωση των σχέσεων μεταξύ τους αλλά και για την εξέταση των σχέσεων με τους υπόλοιπους παράγοντες που επηρεάζουν τα σύγχρονα συστήματα. Η συγκεκριμένη έρευνα παρουσιάζεται στα επόμενα κεφάλαια και πιο συγκεκριμένα στο κεφάλαιο δύο γίνεται η παρουσίαση της σχέσης των δύο μεγεθών της θερμοκρασίας και ισχύος μαζί με τα υπόλοιπους παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία στα υπολογιστικά συστήματα. Τα πειράματα που διεξάχθηκαν με σκοπό την επικύρωση των σχέσεων της θερμοκρασίας και των υπόλοιπων παραγόντων που την επηρεάζουν πραγματοποιήθηκαν μέσω του ATMI μιας βιβλιοθήκης γραμμένη στη γλώσσα προγραμματισμού C η οποία μοντελοποιεί τη θερμοκρασία που διαμορφώνεται όταν ο μικροεπεξεργαστής φτάσει σε μια σταθερή κατάσταση. Μια σύντομη περιγραφή του εργαλείου γίνεται στο δεύτερο κεφάλαιο.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται κάποιες μικροαρχιτεκτονικές έννοιες και γίνεται αναφορά τους μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα συστήματα για την επίτευξη μεγαλύτερης επίδοσης. Στο δεύτερο μέρος του τρίτου κεφαλαίου παρουσιάζεται η μικροαρχιτεκτονική πάνω στην οποία στηρίχθηκε ο προσομοιωτής Sim-alpha. Στα κεφάλαια που ακολουθούν γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων που διεξάχθηκαν μαζί με τα συμπεράσματα. Μέσα από τις παρατηρήσεις που έγιναν από τα αρχικά πειράματα η πορεία της έρευνας άλλαξε πλεύση. Λόγω των χαμηλών τιμών θερμοκρασίας και ισχύος που πήραμε από τα αποτελέσματά των πειραμάτων ο στόχος της έρευνας διαφοροποιήθηκε. Ο νέος στόχος που καθορίστηκε ήταν μέσα από εκτίμηση η ρύθμιση των τιμών του capacitance που χρησιμοποιείται στα πειράματα. Μέρος της ρύθμισης ήταν και η σύγκριση με τιμές ισχύος, τάσεως, συχνότητας σύγχρονων συστημάτων πανομοιότυπων προδιαγραφών με τη κατάσταση που διαμόρφωσα για τα πειράματα με εργαλείο. Στο τελευταίο κεφάλαιο της έρευνας παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα όλων των πειραμάτων που διεξάχθηκαν κατά τη διάρκεια της έρευνας καθώς και η μελλοντική εργασία στο συγκεκριμένο θέμα. Στο τέλος σαν παράρτημα επισυνάπτεται η διαδικασία εκμάθησης του εργαλείου καθώς και τα προβλήματα που αντιμετώπισα στην έρευνα.

Κεφάλαιο 2

Θερμοκρασία

2.1 Θερμοκρασία	6
2.2 Διάχυση της θερμοκρασίας σε ένα επεξεργαστή	12
2.3 Πειράματα για επικύρωση βασικών αρχών θερμοκρασίας και ισχύος	14
2.4 Τεχνικές αντιμετώπισης της αύξησης της θερμοκρασίας στους επεξεργαστές	27

2.1 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία αποτελεί πλέον ένα από πιο σημαντικότερους περιορισμούς για το σχεδιασμό των μικροεπεξεργαστών υψηλής επίδοσης. Η μετάβαση σε επόμενες γενεές επεξεργαστών σήμαινε και την σμίκρυνση της επιφάνειας τις περισσότερες φορές καθώς και τον διπλασιασμό του αριθμού των τρανζίστορς. Έτσι η συνεχής επιθυμία για υψηλότερη επίδοση δηλαδή η εκτέλεση περισσότερων υπολογισμών ανά μονάδα χρόνου έσπρωξε την κατανάλωση ενέργεια σε υψηλά επίπεδα με αποτέλεσμα η θερμοκρασία να απειλεί τόσο την αξιοπιστία όσο και η φυσική φθορά των συστημάτων. Η μελέτη της θερμοκρασίας είναι πάρα πολύ σημαντική και αποτελεί πλέον ένας περιορισμός που λαμβάνεται υπόψη σε μεγάλο βαθμό στο σχεδιασμό των μικροεπεξεργαστών σήμερα. Για αυτό και στα σημερινά συστήματα χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές αντιμετώπισης αυτής της αυξητικής τάσεις, τεχνικές που επεξηγούνται πιο αναλυτικά στο τέταρτο υποκεφάλαιο.

Μεταβαίνοντας σε χαμηλότερο επίπεδο του επεξεργαστή και ερευνώντας τον τρόπο

λειτουργίας του παρατηρούμε ότι η όλη διαδικασία πραγματοποιείται στο επίπεδο των τρανζίστορς, με αποτέλεσμα λόγω της κατασκευής του επεξεργαστή κάθε μονάδα να επηρεάζει άμεσα τις άλλες. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει άμεση επικοινωνία μεταξύ των μονάδων και το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη η πλακέτα είναι τέτοιο ώστε να γίνεται πιο εύκολη η διάχυση θερμότητας. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε ένα επεξεργαστή ποικίλουν. Μερικοί από αυτούς είναι η ισχύς, η πυκνότητα ισχύος, η δραστηριότητα των μονάδων, η απόσταση, συχνότητα και η κατανομή των μονάδων στο χώρο. Στο πρώτο κεφάλαιο εξετάζονται μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία με σκοπό την επικύρωση της σχέσης τους με το συγκεκριμένο μέγεθος, μέσω διαφόρων πειραμάτων τα οποία περιγράφονται στο τρίτο μέρος του κεφαλαίου. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου αυτού γίνεται αναφορά στον ορισμό των μεγεθών που προαναφέραμε ως μια πρώτη εικόνα του αντικειμένου με το οποίο ασχολείται η συγκεκριμένη έρευνα. Συνεχίζοντας στο δεύτερο μέρος, παρουσιάζεται μια χαμηλού επιπέδου εικόνα του επεξεργαστή από πλευράς σχεδιασμού και επεξηγείται ο τρόπος κατασκευής των υλικών που αποτελείται ένας επεξεργαστής. Ο λόγος που γίνεται αυτή η αναφορά είναι η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο διαχέεται η θερμοκρασία στο υλικό. Το τρίτο μέρος του κεφαλαίου όπως προαναφέρθηκε παρουσιάζεται το πειραματικό μέρος, ακολουθούμενο από τεχνικές αντιμετώπισης της αύξησης της θερμοκρασίας στους επεξεργαστές και τα συμπεράσματα του κεφαλαίου στο τελευταίο και πέμπτο μέρος αντίστοιχα.

2.1.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία σε ένα επεξεργαστή

Ισχύς, Εμβαδόν επιφάνειας, Πυκνότητα ισχύος (Power, Area, Power Density)

Όπως γνωρίζουμε από την θεωρία, η πυκνότητα ισχύος που καταναλώνεται είναι ίση με το αποτέλεσμα της διαίρεσης της ισχύς δια το εμβαδόν της περιοχής που εξετάζεται. Τα μεγέθη αυτά είναι αλληλένδετα και επηρεάζουν άμεσα τη θερμοκρασία. Με την αύξηση ή μείωση των τριών αυτών μεγεθών τότε αντίστοιχα αυξάνεται ή μειώνεται και η

θερμοκρασία του επεξεργαστή.

Ισχύς (Power)

Η ισχύς που καταναλώνεται σε ένα επεξεργαστή χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, τη δυναμική και στατική ισχύ. Όπως θα δούμε και πιο αναλυτικά στις επόμενες δύο παραγράφους οι παράγοντες που επηρεάζουν τις δύο μορφές ποικίλουν. Η δυναμική ισχύς καταναλώνεται καθ' όλη τη διάρκεια που ο επεξεργαστής είναι ενεργοποιημένος δηλαδή παρατηρείται δραστηριότητα στις μονάδες. Ενώ η στατική ισχύς λόγω της μορφής της καταναλώνεται ακόμα και όταν απενεργοποιήσουμε τον επεξεργαστή αφού παρουσιάζεται διαρροή στο κύκλωμα ακόμα και όταν δεν κυκλοφορεί ρεύμα.

Δυναμική Ισχύς (Dynamic Power)

Η δυναμική ισχύς εξαρτάται κυρίως από τη δραστηριότητα (activity) των μονάδων του επεξεργαστή, τη συχνότητα (1/cycle time), την τάση και τη δραστηριότητα των πυκνωτών στην είσοδο – έξοδο (capacitance). Με την αυξομείωση των πιο πάνω μεγεθών η κατανάλωση ισχύος επηρεάζεται άμεσα. Η δραστηριότητα των μονάδων μετρείται με μονάδες μεταξύ 0-1. Η πιθανότητα όμως να χρησιμοποιηθούν όλες οι μονάδες είναι σπάνια εκτός βέβαια και αν υπάρχει διαρροή σε όλους τους πυκνωτές. Ένα άλλο μετρικό το οποίο σχετίζεται με τη δραστηριότητα είναι το CPI (cycles per instruction), ο αριθμός των κύκλων που χρειάζονται για την εκτέλεση μιας εντολής. Η σχέση μεταξύ τους είναι αντιστρόφως ανάλογη διότι όσο μειώνονται οι κύκλοι ανά εντολή τόσο αυξάνεται η δραστηριότητα στις μονάδες – αυξάνεται η ρυθμοαπόδοση των εντολών που εκτελούνται. Η δυναμική ισχύς δίνεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$P=aCV^2F \quad (1)$$

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της παραγράφου η δυναμική ισχύς έχει μια γραμμική σχέση με τα μεγέθη (activity, capacitance, frequency, voltage).

Στατική Ισχύς (Static Power)

Η άλλη κατηγορία ισχύς είναι η στατική ισχύς η οποία είναι υπεύθυνη για τη μέτρηση της

διαρροής των τρανζίστορς. Όπως είναι γνωστό τα τρανζίστορς δεν είναι τέλειοι διακόπτες και είναι επόμενο να υπάρχει διαρροή. Η στατική ισχύς είναι λιγότερη σε σχέση με τη δυναμική στο άθροισμα για την ολική ισχύ που καταναλώνεται σε ένα chip. Με τη μετάβαση σε μικρότερα μεγέθη τεχνολογιών και την αύξηση του αριθμού των τρανζίστορς που χρησιμοποιούνται η στατική ισχύς αυξάνεται λόγω του ότι παρόλο που η ενέργεια που χρειάζεται για την αλλαγή της κατάστασης των τρανζίστορς είναι μικρότερη διότι το μέγεθος του κάθε τρανζίστορ είναι μικρότερο, η ολική ενέργεια για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των τρανζίστορς είναι μεγαλύτερη από ότι σε μεγαλύτερες τεχνολογίες. Η στατική ισχύς προσδιορίζεται από το άθροισμα της διαρροής που προκαλείται από το γεγονός ότι το ρεύμα έχει την ικανότητα να διαπερνά την μόνωση της πύλης (Pgate) και της διαρροής που δημιουργείται από τη μετατροπή του ρεύματος κατά μήκος του επεξεργαστή **Psubthreshold**.

$$P_{Static} = P_{gate} + P_{subthreshold} \quad (2)$$

Η ισχύς που υπάρχει σε μια πύλη εξαρτάται κυρίως από τις διαστάσεις των τρανζίστορς και το υλικό που είναι κατασκευασμένα ενώ η ισχύς στο subthreshold ισούται με $V_{ke}(-qV_t/(aKaT))$ όπου παρουσιάζεται εκθετική σχέση με V_t και τη θερμοκρασία (T) και γραμμική σχέση με τη τάση (V).

Εμβαδόν επιφάνειας – Μέγεθος τεχνολογίας (Area - Feature Size)

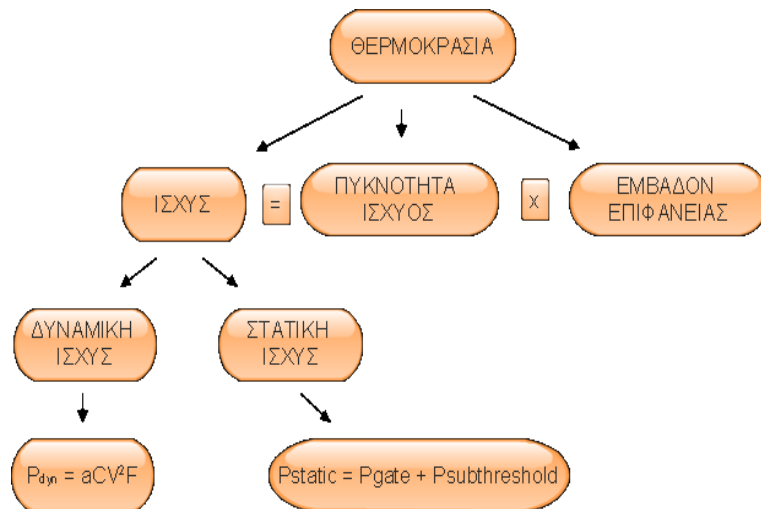
Ο παράγοντας επιφάνεια επηρεάζει άμεσα τη θερμοκρασία σε ένα επεξεργαστή διότι όπως βλέπουμε με τη πάροδο των χρόνων η τεχνολογία μικραίνει με αποτέλεσμα το εμβαδόν της επιφάνειας που αποτελεί τις μονάδες μειώνεται. Ο αριθμός των τρανζίστορς διπλασιάζεται κατά το νόμο του Moore και ως επακόλουθο είναι η αύξηση της ισχύς με άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας.

Πυκνότητα Ισχύος (Power Density)

Η πυκνότητα ισχύος στους μικροεπεξεργαστές διπλασιάζεται κάθε τρία χρόνια καθώς η τεχνολογία αλλάζει και η συχνότητα ρολογιού κλιμακώνεται γρηγορότερα από ότι η τάση.

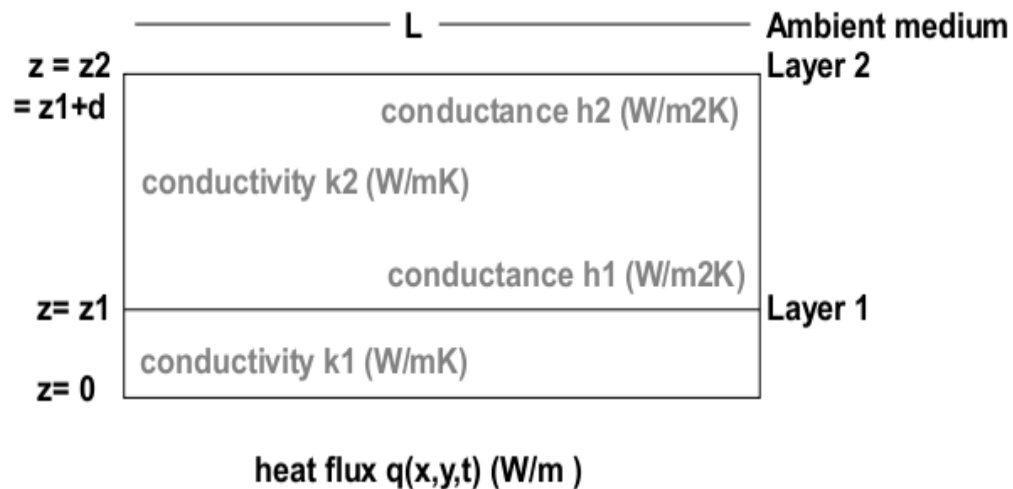
Συχνότητα ρολογιού – Μέγεθος Τεχνολογίας (Frequency - Feature Size)

Το μέγεθος της τεχνολογίας όπως προαναφέρθηκε και η συχνότητα του επεξεργαστή είναι μερικά από τα μεγέθη που τα τελευταία χρόνια έχουν τεράστια αλλαγή και επηρεάζουν άμεσα τη θερμοκρασία του επεξεργαστή διότι η ενέργεια που καταναλώνεται μετατρέπεται σε θερμότητα με αυξημένα ρίσκα τόσο στην επίδοση του επεξεργαστή καθώς και στην κατάσταση του όσον αφορά το υλικό που αποτελείται. Με την αύξηση της θερμοκρασίας εμφανίζονται άμεσα προβλήματα δυσλειτουργίας, μειώνεται η μακροχρόνια αξιοπιστία του επεξεργαστή και καταστρέφεται το υλικό σε κάποιες περιπτώσεις υπερθέρμανσης. Έχοντας υπόψη το νόμο του Moore κατανοούμε ότι με τη συνεχή σμίκρυνση του εμβαδού του επεξεργαστή και την εισαγωγή περισσότερων και μικρότερων σε μέγεθος τρανζίστορς η δραστηριότητα στις μονάδες αυξάνεται καθώς επίσης και η κατανάλωση ισχύος, αφού γίνεται γρηγορότερη η κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα χώρου. Για το λόγω αυτό οι παρούσες τάσεις της τεχνολογίας υιοθέτησαν την ιδέα χρήσης πολυπύρηνων επεξεργαστών. Στα παρόντα συστήματα χρησιμοποιούνται πολυπύρηντοι επεξεργαστές οι οποίοι με χαμηλότερη συχνότητα ρολογιού και επομένως τάσης έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν την ίδια ή και μεγαλύτερη επίδοση σε σχέση με τους μονοπύρηνους επεξεργαστές. Αν για παράδειγμα πάρουμε δύο επεξεργαστές με διαφορετικές τεχνολογίες, ο ένας μονοπύρηνος και ο δεύτερος με δύο πυρήνες με την προϋπόθεση ότι η δραστηριότητα που θα υπάρξει θα είναι σταθερή θα παρατηρήσουμε ότι η ισχύς επηρεάζεται κυρίως από τα υπόλοιπα μεγέθη που τη συνθέτουν, κυρίως από την τάση και τη συχνότητα ρολογιού (βλ. (1)). Όπως υπολογίζεται η ισχύς θα επηρεαστεί από τη συχνότητα του ρολογιού η οποία μειώνεται στην περίπτωση με τους δύο πυρήνες λόγω της ιδέας κατασκευής της συγκεκριμένης τεχνολογίας, καθώς και από την τάση η οποία άμεσα μειώνεται από την μείωση του ρολογιού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ισχύς και της θερμοκρασίας αντίστοιχα.



Σχήμα 2.1 Σχεδιάγραμμα απεικόνισης των παραγόντων που επηρεάζουν τη θερμοκρασία σε ένα επεξεργαστή

2.2 Διάχυση της θερμοκρασίας σε ένα επεξεργαστή



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα στρωμάτων υλικού ενός επεξεργαστή [2,4,5,6]

Parameter	Units(SI)	Meaning
z_1	m	Layer 1 thickness
$d=z_2-z_1$	m	Layer 2 thickness
k_1	W/mK	Layer 1 thermal conductivity
k_2	W/mK	Layer 2 thermal conductivity
α_1	m ² /s	Layer 1 thermal diffusivity
α_2	m ² /s	Layer 2 thermal diffusivity
h_1	W/m ² K	Conductance between layers 1 and 2

Πίνακας 2.1 Παράμετροι στρωμάτων υλικού ενός επεξεργαστή [2,4,5,6]

Ένας μικροεπεξεργαστής είναι ένα ενσωματωμένο κύκλωμα σε ένα μικρό κομμάτι πυριτίου. Το πυρίτιο ως υλικό χρησιμοποιείται για το λόγω ότι εκ φύσεως είναι ημιαγωγός. Ανήκει σε μια ομάδα υλικών των οποίων η ηλεκτρική αγωγιμότητα τους είναι μεταξύ ενός αγωγού και ενός μονωτή. Η ιδιότητα αυτή δίνει τη δυνατότητα να αλλάζει συμπεριφορά.

Μπορεί να αλλάξει είτε σε μονωτικό υλικό μπλοκάροντας ένα ηλεκτρικό φορτίο είτε στην ιδιότητα του αγωγού επιτρέποντας το φορτίο να περάσει. Κάθε επεξεργαστής περιέχει εκατομμύρια transistors τα οποία είναι διασυνδεδεμένα με εξαιρετικά λεπτά σύρματα κατασκευασμένα είτε από αλουμίνιο είτε χαλκό. Αν κοιτάξουμε πιο συγκεκριμένα στη λειτουργία του επεξεργαστή βλέπουμε ότι η όλη διαδικασία πραγματοποιείται στο επίπεδο των transistors με αποτέλεσμα λόγω της κατασκευής του επεξεργαστή κάθε μονάδα να επηρεάζει άμεσα τις άλλες. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει άμεση επικοινωνία των μονάδων και το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη η πλακέτα είναι τέτοιο ώστε να γίνεται πιο εύκολη η διάχυση θερμότητας. Για περισσότερη κατανόηση αυτής της ιδιότητας στο σχήμα 1 [2,4,5,6] απεικονίζεται το σχεδιάγραμμα των στρώματων από τα οποία αποτελείται ένας επεξεργαστής και στο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στα στρώματα υλικού. Ο επεξεργαστής αποτελείται από δύο στρώματα υλικού. Αρχικά το πρώτο στρώμα (layer 1) αντιπροσωπεύει το στρώμα πυριτίου πάνω στο οποίο αποτυπώνεται ο επεξεργαστής κατά τη διαδικασία κατασκευής του. Σε αυτό το επίπεδο πραγματοποιείται η όλη δραστηριότητα διότι όπως προανέφερα κάτω από αυτό το στρώμα υπάρχουν τα transistors. Το επόμενο στρώμα (layer 2), στο εργαλείο ATMI είναι κατασκευασμένο υποθέτουμε από χαλκό, ένα υλικό που επιτρέπει μεγαλύτερη διάχυση θερμότητας. Το δεύτερο στρώμα αποτελεί το heat sink base plate. Μετά από το δεύτερο στρώμα βρίσκεται το Ambient medium το οποίο βασικά είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος η οποία επηρεάζει το heat sink και εξαρτάται από τον σχεδιασμό του κουτιού μέσα στο οποίο βρίσκεται ο επεξεργαστής.[2,4,5,6]

2.3 Πειράματα για επικύρωση βασικών αρχών θερμοκρασίας και ισχύος

Στο παρακάτω παρουσιάζονται πειράματα με τη χρήση του εργαλείου ATMI το οποίο προσομοιώνει την πυκνότητα ισχύος σε ένα επεξεργαστή και επιστρέφει τη θερμοκρασία του κάθε αισθητήρα στον επεξεργαστή. Μέσα από τα πειράματα δίνεται η ευκαιρία να απαντηθούν τα πιο κάτω ερωτήματα και να καταλήξουμε σε κάποια συμπεράσματα.

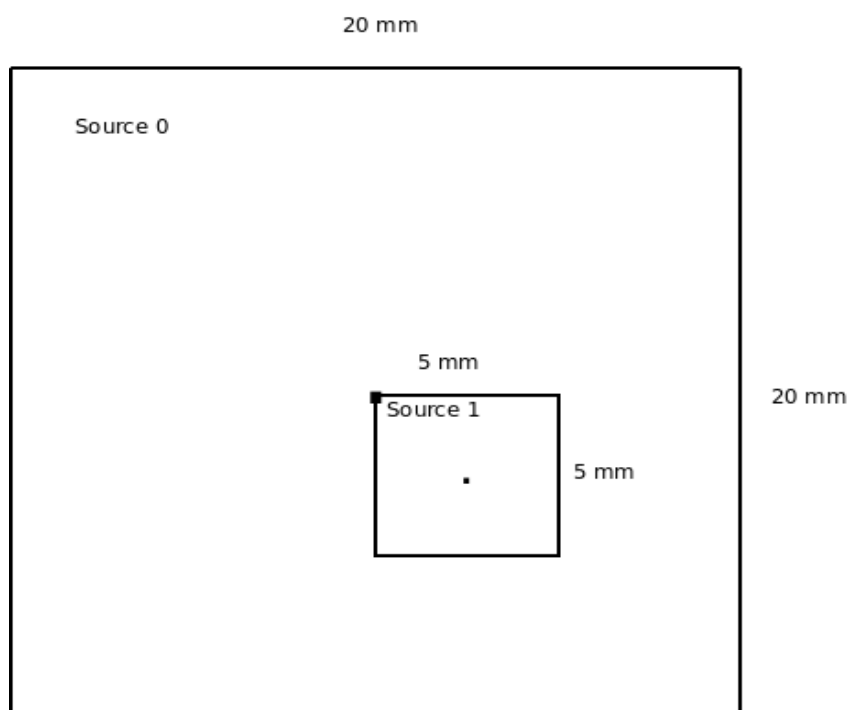
- i. Πως επηρεάζει τη θερμοκρασία η ανομοιογενής πυκνότητα ισχύος σε ένα chip;
- ii. Πως επηρεάζει μια πηγή τη θερμοκρασία μιας άλλης μονάδας στο chip συναρτήσει της απόστασης;
- iii. Πως επηρεάζεται η θερμοκρασία σε συνάρτηση με την επιφάνεια της πηγής (για το ίδιο power);
- iv. Πόσο γρήγορα αλλάζει η θερμοκρασία;

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα παρακάτω πειράματα διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη “φύση” τους. Η μια κατηγορία παρουσιάζει χρονικό χαρακτήρα διότι παρουσιάζει τη χρονική συμπεριφορά κάποιου παράγοντα όπως για παράδειγμα της θερμοκρασίας, ισχύς, ενέργειας. Η δεύτερη μορφή αποτελεσμάτων χαρακτηρίζεται από την ιδιότητα όπως είναι ευρύτερα γνωστό ως “steady state”. Η κατάσταση αυτή ορίζεται ως η κατάσταση ενός συστήματος η οποία δεν μπορεί να υποστεί επιπλέον μεταβολή της κατάστασης αλλά διατηρείται σταθερή παρόλο που οι ιδιότητες και παράμετροι που την αλλάζουν/καθορίζουν συνεχίζουν να μεταβάλλονται στο χρόνο. Μιλώντας πιο συγκεκριμένα, σε μερικά από τα παρακάτω πειράματα τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας των μονάδων που εξετάζονται παρουσιάζονται σε “steady state” μορφή κάτι που δηλώνει ότι δεν υπάρχει κάποια αλλαγή στο αποτέλεσμα του συστήματος που μελετάται αν συνεχιστεί η εκτέλεση για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

2.3.1 Σχέση πυκνότητας ισχύος και θερμοκρασίας

Στο παρακάτω πείραμα θέλουμε να κατανοήσουμε το βαθμό που επηρεάζεται μια περιοχή όσον αφορά τη θερμοκρασία που θα αναπτύξει σε σχέση με την εφαρμογή διαφορετικών τιμών πυκνότητας ισχύος στην μονάδα που δοκιμάζεται. Για τις ανάγκες του πειράματος

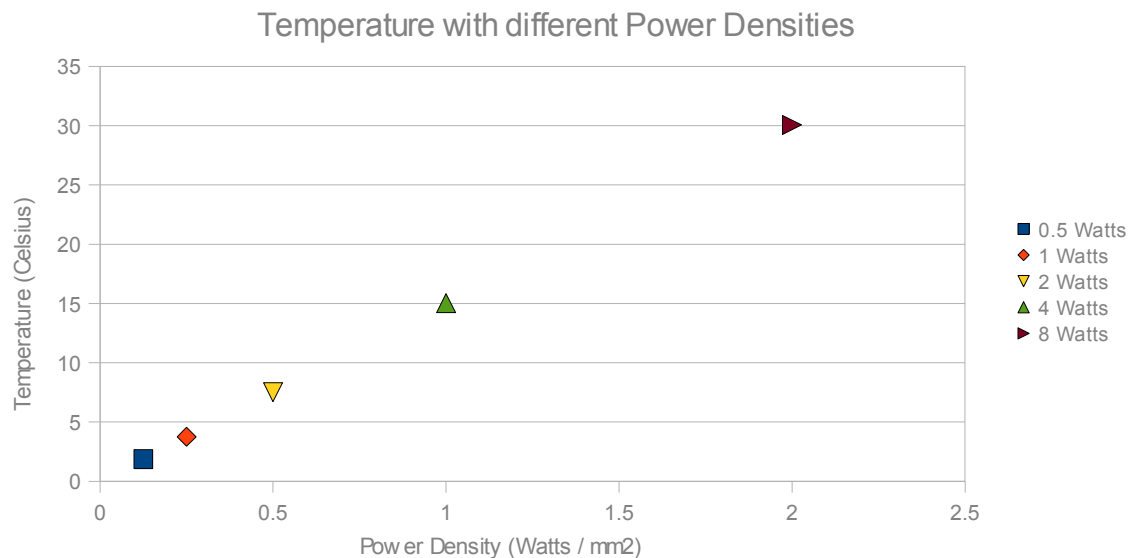
χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο ATMI για να πραγματοποιηθεί η καταμέτρηση της θερμοκρασίας. Στο πιο κάτω σχεδιάγραμμα παρουσιάζεται η διάταξη των μονάδων που αποτελούν τον επεξεργαστή που προσομοιώνεται στο πείραμα. Συγκεκριμένα υπάρχει ένας πυρήνας ο οποίος περιέχει μια μονάδα. Οι διαστάσεις των μονάδων παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.3 Σχεδιάγραμμα διάταξης των μονάδων στον επεξεργαστή

Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος πραγματοποιήθηκαν πέντε δοκιμές όπου σε κάθε δοκιμή η πυκνότητα ισχύος διπλασιαζόταν στη μικρή μονάδα. Οι δοκιμαζόμενες τιμές ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα ήταν 0.5, 1, 2, 4, και 8 Watts. Σε κάθε δοκιμή παρατηρήθηκε όπως φαίνεται και στην ακόλουθη γραφική παράσταση ότι όσο η πυκνότητα ισχύος αυξανόταν τόσο αυξανόταν και η θερμοκρασία στη μικρή μονάδα. Η σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών είναι γραμμική διότι σε κάθε δοκιμή με διαφορετική πυκνότητα ισχύος η θερμοκρασία διπλασιαζόταν. Η γενική παρατήρηση του πειράματος αυτού είναι ότι τα δύο μεγέθη είναι άμεσα συνδεδεμένα αφού η αύξηση είτε του ενός είτε του άλλου

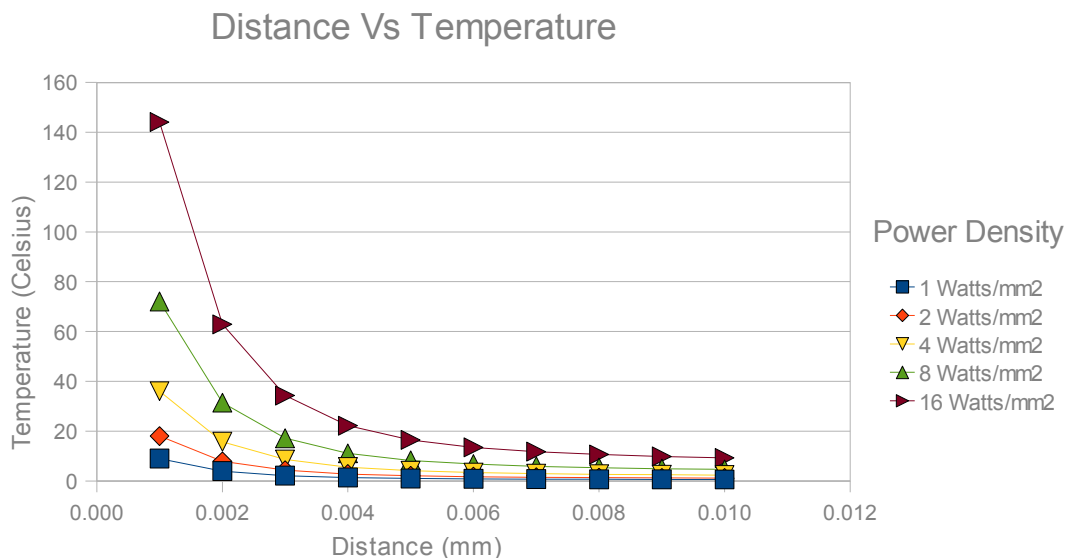
επηρεάζει άμεσα το άλλο μέγεθος.



Σχήμα 2.4 Γραφική παράσταση Θερμοκρασίας με την εφαρμογή διαφορετικών πυκνοτήτων ισχύος

2.3.2 Σχέση απόστασης και θερμοκρασίας

Στο παρακάτω πείραμα θέλουμε να κατανοήσουμε το βαθμό που επηρεάζεται μια περιοχή όσον αφορά τη θερμοκρασία που θα αναπτύξει σε σχέση με την απόσταση που βρίσκεται από μια πηγή θερμότητας. Για τις ανάγκες και αυτού του πειράματος χρησιμοποιήθηκε και πάλι το εργαλείο ATMI για να πραγματοποιηθεί η καταμέτρηση της θερμοκρασίας. Για το συγκεκριμένο πείραμα υλοποιήθηκε το σενάριο στο οποίο εξετάζεται η θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε διάφορες αποστάσεις από μια πηγή θερμότητας Όπως και στο προηγούμενο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το ίδιο σενάριο το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3 στο οποίο απεικονίζεται η μικρή μονάδα η οποία αντιπροσωπεύει την πηγή θερμότητας του επεξεργαστή. Στην πηγή θερμότητας εφαρμόζονται σε κάθε δοκιμή διάφορες πυκνότητες ισχύος. Για τις δοκιμές εφαρμόστηκαν τιμές πυκνότητας ισχύος 1, 2, 4, 8, και 16 Watts/mm². Τα αποτελέσματα και η γραφική παράσταση βρίσκονται πιο κάτω.



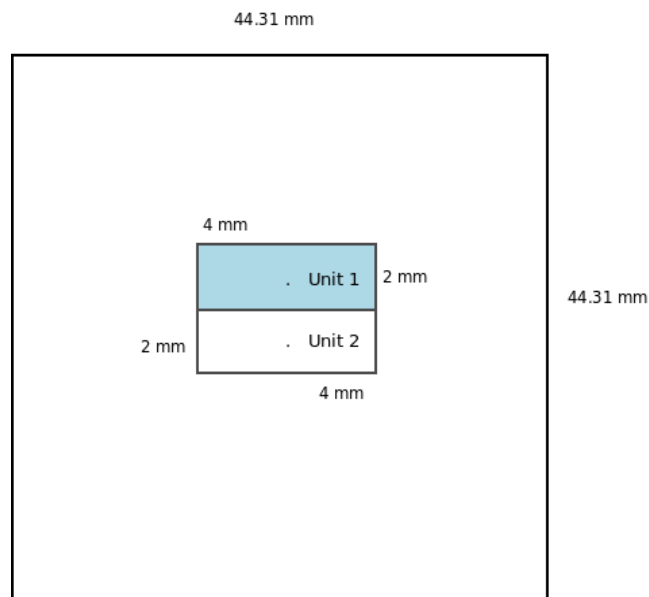
Σχήμα 2.5 Γραφική παράσταση θερμοκρασίας σε διαφορετικές εφαρμογές πυκνότητας ισχύος συναρτήσει της απόστασης

Όπως φαίνεται στη γραφική παράσταση στις διάφορες δοκιμές με την αύξηση της πυκνότητας ισχύος παρατηρούμε ότι σε κάθε δοκιμή μειώνεται η θερμοκρασία. Η μείωση της θερμοκρασίας σε κάθε απόσταση πραγματοποιείται με εκθετικό ρυθμό. Όσον αφορά την μεταξύ σχέση των δοκιμών παρατηρείται διπλασιασμός της θερμοκρασίας σε κάθε απόσταση. Επίσης παρουσιάζεται μια σχέση μεταξύ των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται με την αύξηση της πυκνότητας ισχύος. Για κάθε τιμή πυκνότητας ισχύος που δοκιμάστηκε ο λόγος της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε κάθε απόσταση σε σχέση με την αρχική είναι ο ίδιος. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το ποσοστό μείωσης της θερμοκρασίας σε κάθε απόσταση για οποιαδήποτε τιμή πυκνότητας ισχύος διατηρείται σταθερό. Έτσι με αυτό τον τρόπο διαγράφεται μια εικόνα του βαθμού που επηρεάζεται μια μονάδα από την απόσταση που βρίσκεται από κάποια άλλη και το ποσοστό της θερμοκρασίας που θα αναπτύξει.

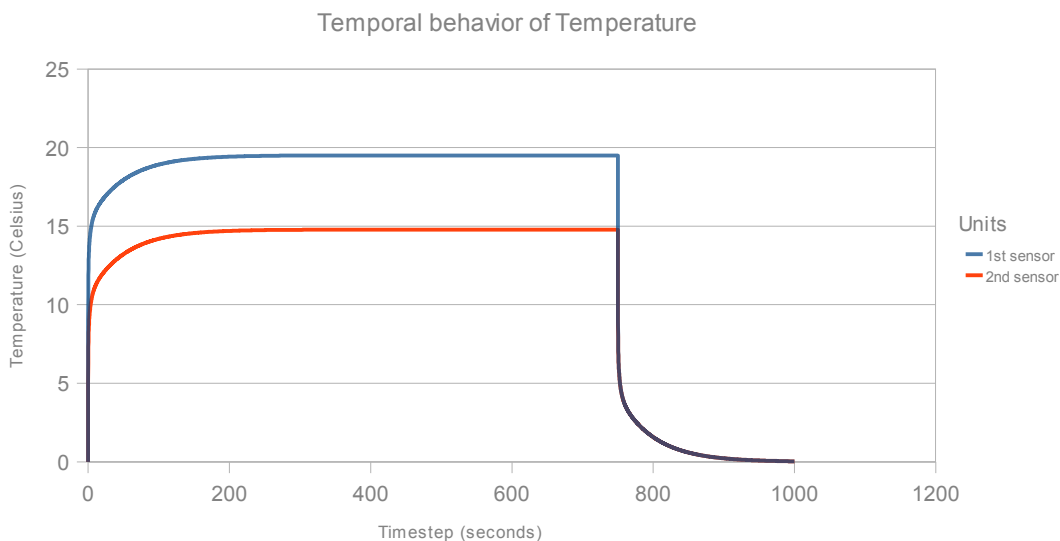
2.3.4 Μελέτη της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο

Στο επόμενο πείραμα το εργαλείο προσομοιώνει ένα επεξεργαστή με 2 μονάδες και 2 αισθητήρες. Η μονάδα με τον 1ο αισθητήρα έχει πυκνότητα ισχύος 0.1 W/mm^2 ενώ η μονάδα με τον 2ο αισθητήρα έχει πυκνότητα ισχύος είναι 0 W/mm^2 . Ο σκοπός του πειράματος είναι να παρακολουθήσουμε πόσο γρήγορα αλλάζει η θερμοκρασία συναρτήσει του χρόνου. Ο χρόνος προσομοίωσης είναι 1000 δευτερόλεπτα, ο οποίος χωρίζεται σε περιόδους του 1ος δευτερολέπτου. Επίσης η περίοδος χωρίζεται σε βήματα (timesteps) που έχουν διάρκεια 0.1 δευτερόλεπτα. Στα $\frac{3}{4}$ του χρόνου της προσομοίωσης η πυκνότητα ισχύος μηδενίζεται και στον 1ο αισθητήρα. Αυτό πραγματοποιήθηκε για να παρακολουθήσουμε και η συμπεριφορά της θερμοκρασίας όταν απενεργοποιείται μια μονάδα.

Παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα των μονάδων στον επεξεργαστή που προσομοιώνεται στο πείραμα αυτό. Όπως παρατηρούμε οι δύο μονάδες επηρεάζονται άμεσα για το λόγο ότι η μια βρίσκεται δίπλα από την άλλη. Οι δύο αισθητήρες που καταμετρούν τη θερμοκρασία βρίσκονται στο κέντρο της κάθε μονάδας.



Σχήμα 2.6 Σχεδιάγραμμα διάταξης μονάδων του επεξεργαστή

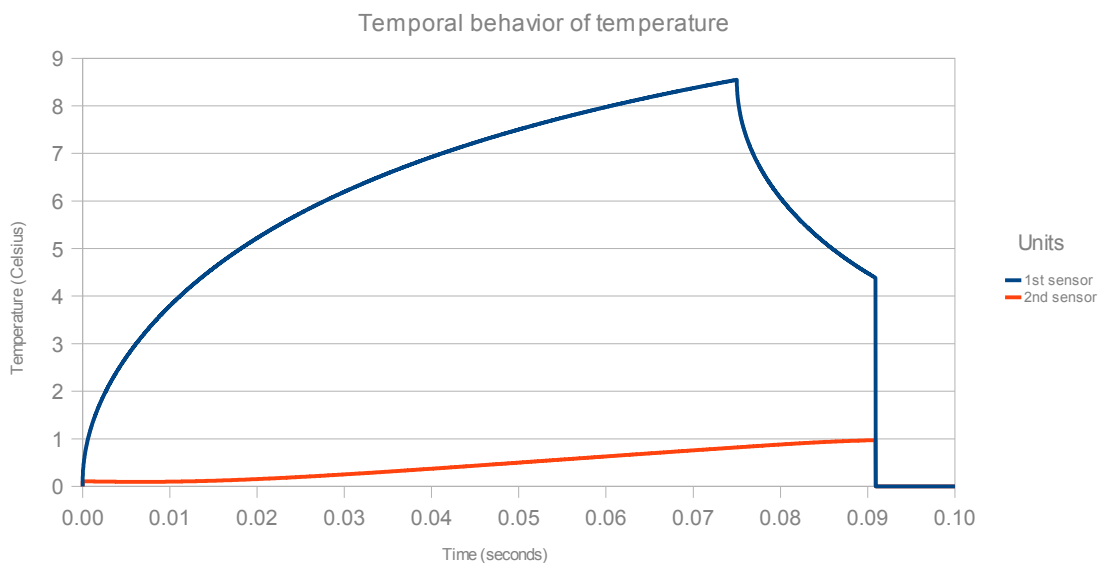


Σχήμα 2.7 Γραφική παράσταση θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου

Στην πιο πάνω γραφική παράσταση παρουσιάζεται η σχέση της θερμοκρασίας με το χρόνο δηλαδή πόσο γρήγορα αλλάζει η θερμοκρασία σε ένα επεξεργαστή με την πάροδο του χρόνου που στη συγκεκριμένη προσομοίωση είναι 1000 δευτερόλεπτα. Η αύξηση της θερμοκρασίας πραγματοποιείται γρήγορα διότι όπως φαίνεται σε κάθε δευτερόλεπτο αυξάνεται κατά ένα 1 αρχικά βαθμό Κελσίου περίπου και μετά μειώνεται μέχρι να σταθεροποιηθεί (steady state). Όσον αφορά την θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη δεύτερη μονάδα έχει να κάνει με το βαθμό που επηρεάστηκε από τη δραστηριότητα της μονάδας που περιέχει τον πρώτο αισθητήρα και την απόσταση μεταξύ τους. Παρατηρείται ότι ο αισθητήρας που βρίσκεται στην μονάδα που εφαρμόζεται πυκνότητα ισχύος έχει μεγαλύτερη αύξηση όπως αναμένεται σε σύγκριση με τη θερμοκρασία του δεύτερου αισθητήρα που καταγράφει τη θερμοκρασία της μονάδας με μηδενική πυκνότητα ισχύος. Παρακολουθώντας τώρα την αλλαγή της θερμοκρασίας των δύο αισθητήρων όταν μηδενιστεί η πυκνότητα ισχύος τους παρατηρήθηκε μια κατακόρυφη πτώση της θερμοκρασίας και στο τέλος ταυτόχρονος μηδενισμός της θερμοκρασίας και στους δύο αισθητήρες. Αυτό συμβαίνει διότι εφόσον δεν παρέχεται ισχύς στις μονάδες, αρχίζουν να κρυνώνουν επηρεάζοντας άμεσα η μια την άλλη. Η “ζεστή” μονάδα δεν προσφέρει

θερμότητα στην δεύτερη και έτσι ακολουθείται πτώση και στις δύο.

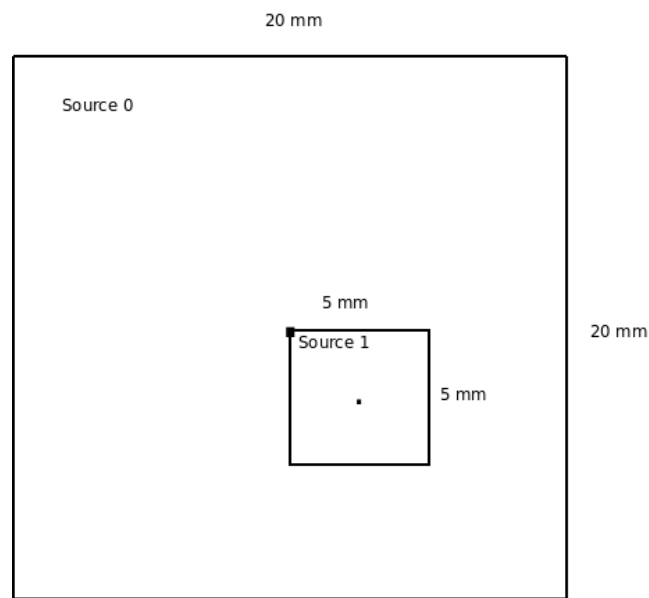
Στο σχήμα 2.8 φαίνεται μια αναλυτικότερη παρουσίαση των αρχικών αλλαγών της θερμοκρασίας στις δύο μονάδες για χρονικό διάστημα σχεδόν ενός microsecond. Αυτό μας βοηθά να παρατηρήσουμε ότι η θερμοκρασία αρχικά παρουσιάζει μια αύξηση που κυμαίνεται σε κλίμακα δεκάτων ενός βαθμού κελσίου και συνεχίζει με ένα αυξητικό ρυθμό. Όπως παρατηρείται ο πρώτος αισθητήρας στον οποίο εφαρμόζεται πυκνότητα ισχύος αναπτύσσεται γρηγορότερα ψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με τον δεύτερο που δεν ακολουθεί το ίδιο μοτίβο. Η θερμοκρασία στον δεύτερο αισθητήρα παρουσιάζει μια σταθερή τιμή για ένα μικρό χρονικό διάστημα και μετά αυξάνεται με μικρό ρυθμό με εκθετική τάση μέχρι που τη χρονική στιγμή που “σβήνουν” οι μονάδες και μηδενίζεται μαζί με την άλλη μονάδα όταν φτάσουν και οι δύο στην ίδια τιμή θερμοκρασίας.



Σχήμα 2.8 Γραφική παράσταση θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου για μικρότερο χρονικό διάστημα

2.3.5 Μελέτη ομοιογενής και ανομοιογενής κατανομής πυκνότητας ισχύος μεταξύ των μονάδων.

Στις επόμενες δύο σειρές πειραμάτων ακολουθείται η ίδια διάταξη των μονάδων στον επεξεργαστή όπως περιγράφεται στο σχήμα 2.9. Επίσης η μέγιστη θερμοκρασία που επιτρέπει το εργαλείο σε αυτό το σενάριο να φτάσει είναι 85 βαθμούς κελσίου. Ο λόγος που οριοθετούμε την μέγιστη τιμή που μπορεί να φτάσει η θερμοκρασία είναι για να πραγματοποιηθεί μια πιο αληθοφανής προσομοίωση. Έτσι η προσομοίωση ακολουθεί τεχνικές ελέγχου και διαχείρισης της θερμοκρασίας που αναπτύσσουν οι μονάδες που προσομοιώνονται. Με την υπέρβαση του ορίου στη θερμοκρασία υπολογίζεται ξανά ο παράγοντας δραστηριότητας και η πυκνότητα ισχύος για να μειωθεί η θερμοκρασία που παράγεται στις “ζεστές” μονάδες.



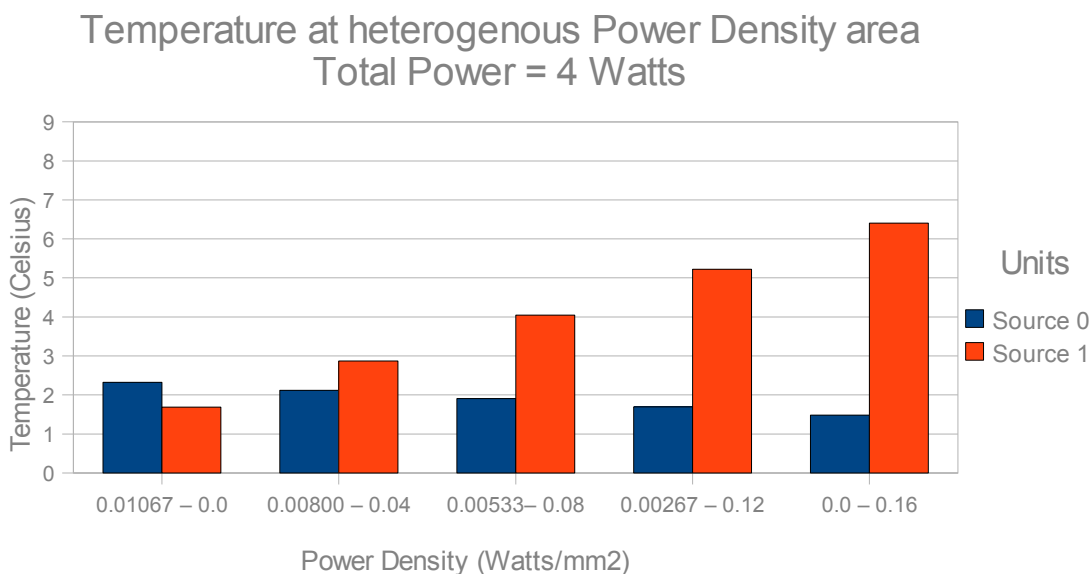
Σχήμα 2.9 Διάταξη μονάδων στον επεξεργαστή

Στο πιο πάνω σχεδιάγραμμα διαγράφεται η διάταξη των μονάδων για ένα επεξεργαστή. Το σενάριο υποθέτει ότι υπάρχουν συνολικά 2 μονάδες και η κάθε μονάδα έχει από ένα αισθητήρα. Η μικρή μονάδα έχει εμβαδόν 25 mm^2 και η μεγάλη μονάδα 400 mm^2 . Ο κάθε αισθητήρας βρίσκεται στο κέντρο της κάθε μονάδας. Για το συγκεκριμένο σενάριο

πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων των οποίων ακολουθεί πιο κάτω η περιγραφή τους και αναφορά στα συμπεράσματα που διεξάχθηκαν από αυτά.

2.3.5.1 Αυξομείωση της πυκνότητας ισχύος στις δύο μονάδες διατηρώντας την ολική ισχύ σταθερή.

Αρχικά στην πρώτη σειρά πειραμάτων ορίστηκε να εφαρμοστεί ολική ισχύς 4 Watts σε όλες τις μονάδες του επεξεργαστή. Για το λόγω αυτό και στις πέντε δοκιμές διαμοιράστηκε η πυκνότητα ισχύος. Στην πρώτη δοκιμή μόνο η μεγάλη μονάδα έχει ισχύ ίση με 4 Watts και η μικρή μονάδα 0 Watts. Μετέπειτα στη μεγάλη μονάδα μειωνόταν η ισχύς σε κάθε δοκιμή κατά 1 Watt και αυξανόταν κατά 1 Watt η ισχύς που εφαρμοζόταν στη μικρή μονάδα.



Σχήμα 2.10 Γραφική παράσταση θερμοκρασίας συναρτήσει πυκνότητας ισχύος

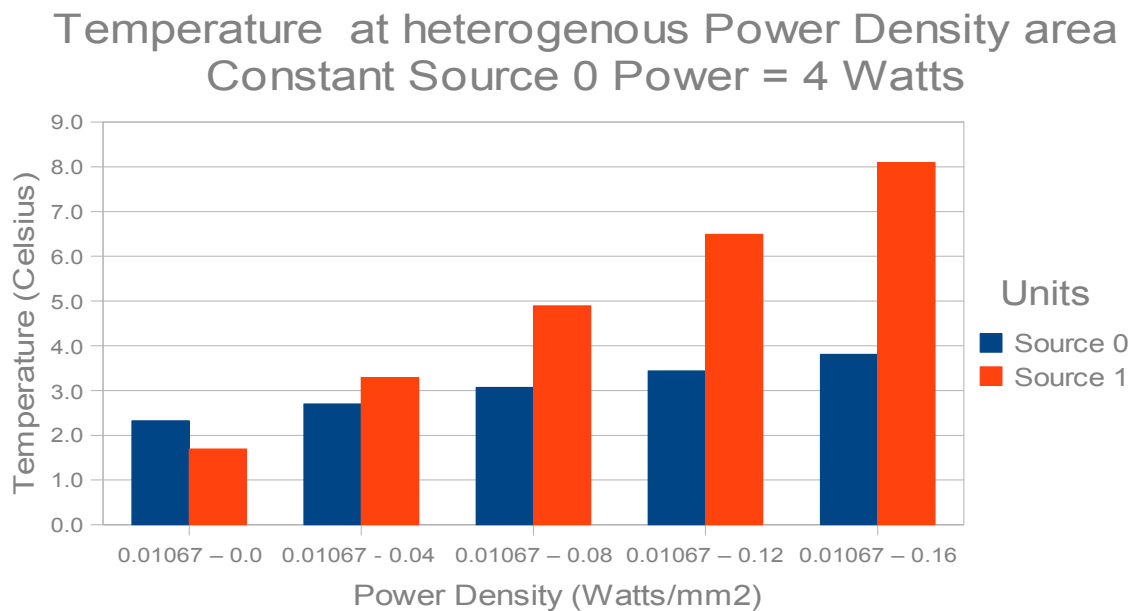
Η παρατήρηση που πραγματοποιείται στο συγκεκριμένο πείραμα έχει να κάνει με τη γραμμική συμπεριφορά της θερμοκρασίας σε σχέση με τις αυξομειώσεις της πυκνότητας ισχύος στις δύο μονάδες. Αρχικά παρατηρείται στη πρώτη δοκιμή ανάπτυξη θερμοκρασίας

και στη μικρή μονάδα παρόλο που η πυκνότητα ισχύος της ήταν μηδενική. Αυτό συμβαίνει διότι επηρεάζεται από όλες τις πλευρές από τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη μεγάλη μονάδα που την περικλείει. Στις επόμενες δοκιμές όπου εφαρμόζεται πυκνότητα ισχύος και στη μικρή μονάδα φαίνεται ότι παρόλο που μειώνεται η πυκνότητα ισχύος της μεγάλης μονάδας η θερμοκρασία δεν ακολουθεί όμως το βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας της μικρής μονάδας αφού η μείωση είναι ανάλογη με την αύξηση της μικρής μονάδας. Η θερμοκρασία της μικρής μονάδας αυξάνεται περίπου κατά 1.2 βαθμούς κελσίου σε κάθε δοκιμή σε αντίθεση με τη θερμοκρασία της μεγάλης μονάδας που είχε μια αύξηση της τάξης των 0.2 βαθμών κελσίου. Η διαφορά των δύο θερμοκρασιών οφείλεται στο γεγονός ότι η κατανομή της πυκνότητας ισχύος πραγματοποιείται σε διαφορετικά μεγέθη επιφάνειας με αποτέλεσμα η μικρότερη σε μέγεθος επιφάνεια να αναπτύσσει ψηλότερη θερμοκρασία και να επηρεάζει τη μεγαλύτερη. Παρατηρώντας την πρώτη και τελευταία δοκιμή παρόλο που δεν εφαρμόστηκε πυκνότητα ισχύος στη μικρή και μεγάλη μονάδα στην αντίστοιχη δοκιμή οι μονάδες και στις δύο περιπτώσεις αναπτύσσουν θερμοκρασία στην κάθε περίπτωση ανάλογη με το βαθμό θερμότητας που επηρεάζονται καθώς και το μέγεθος της επιφάνειας που δέχεται τη θερμοκρασία. Στην πρώτη περίπτωση η μικρή μονάδα λόγω μικρότερης επιφάνειας επηρεάζεται περισσότερο αναπτύσσοντας ψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με την τελευταία περίπτωση που η μεγαλύτερη μονάδα δέχεται την σχεδόν τριπλάσια θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην μικρότερη μονάδα από την εφαρμογή της ίδιας πυκνότητας ισχύος με την πρώτη δοκιμή. Η διαφορά παρατηρείται στο γεγονός ότι η κατανομή της θερμοκρασίας που λαμβάνει η μεγαλύτερη μονάδα είναι σε μεγαλύτερη επιφάνεια με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται χαμηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με την πρώτη περίπτωση στην μικρότερη μονάδα. Ο παράγοντας επιφάνεια φαίνεται περισσότερο στην τρίτη δοκιμή όπου η κατανομή της ολικής ισχύος ήταν ομοιογενής αλλά δεν παρουσιάστηκε κάποια διαφορά με τις άλλες περιπτώσεις ανομοιογενής κατανομής. Η ισχύς στην περίπτωση αυτή μοιράστηκε στις δύο μονάδες, εφαρμόζοντας 2 Watts στην κάθε μια από αυτές. Η θερμοκρασία που αναπτύσσει η μικρή μονάδα σε σχέση με τη μεγαλύτερη μονάδα είναι σχεδόν 47% ψηλότερη με αποτέλεσμα να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε μια επιφάνεια

επηρεάζεται από το μέγεθος της, το βαθμό θερμότητας των επιφανειών που την επηρεάζουν και την μεταξύ τους απόσταση, καθώς και το ποσό της πυκνότητας ισχύος που εφαρμόζεται σε αυτή.

2.3.5.2 Αύξηση της πυκνότητας ισχύος της μικρής μονάδας και διατήρηση της πυκνότητας ισχύος της μεγάλης μονάδας σταθερή.

Η ιδέα της δεύτερης σειράς πειραμάτων ήταν η παρατήρηση της θερμοκρασίας που αναπτύσσουν οι δύο μονάδες όταν διατηρείται σταθερή η πυκνότητα ισχύος της μεγάλης μονάδας και αυξάνεται η πυκνότητα ισχύος της μικρής μονάδας σε κάθε δοκιμή. Η διαφορά εδώ είναι ότι η ολική ισχύς σε κάθε δοκιμή αυξάνεται λόγω του ότι διατηρείται η πυκνότητα ισχύος στη μεγαλύτερη μονάδα και διπλασιάζεται η πυκνότητα ισχύος της μικρής. Η ισχύς που εφαρμόζεται στη μεγάλη μονάδα είναι 4 Watts ενώ αρχικά στη μικρή μονάδα δεν εφαρμόζεται καθόλου ισχύς. Στη συνέχεια στη μικρή μονάδα εφαρμόζεται ισχύς 1, 2, 4 και 8 Watts.



Σχήμα 2.11 Γραφική παράσταση συναρτήσεως πυκνότητας ισχύος

Όπως φαίνεται από την πιο πάνω γραφική παράσταση συμβαίνει μια παρόμοια συμπεριφορά με την προηγούμενη σειρά πειραμάτων. Λόγω του ότι όμως εφαρμόζεται περισσότερη ισχύς η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στις δύο μονάδες είναι ψηλότερη σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα. Όπως και προηγουμένως παρόλο που η πυκνότητα ισχύος στην μεγάλη μονάδα διατηρείται σταθερή αντί να μειώνεται, επηρεάζεται από τη θερμοκρασία που αναπτύσσει η μικρή μονάδα με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται μια αύξηση στη θερμοκρασίας της μεγάλης μονάδας. Η διαφορά της θερμοκρασίας που αναπτύσσει η μικρή μονάδα σε κάθε δοκιμή σε σχέση με τις δοκιμές του προηγούμενου πειράματος οφείλεται στο γεγονός ότι η πυκνότητα ισχύος της μεγαλύτερης μονάδας είναι περισσότερη. Η αύξηση της θερμοκρασίας της μεγαλύτερης μονάδας είναι της τάξης του 0.4 βαθμών κελσίου ενώ της μικρής είναι περίπου 1.6 βαθμούς κελσίου. Η συμπεριφορά που βλέπουμε στα πειράματα όπου άλλες μονάδες έχουν λιγότερη πυκνότητα ισχύος και άλλες περισσότερη, είναι ένα προσιτό σενάριο σε σχέση με τα σημερινά δεδομένα αφού οι μονάδες δεν έχουν την ίδια δραστηριότητα με αποτέλεσμα να αλληλεπιδρούν λιγότερο ή περισσότερο με τις γειτονικές περιοχές. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η κάθε μονάδα επηρεάζεται άμεσα και η θερμοκρασία στη καθεμιά είναι ανάλογη με τη θέση που βρίσκεται μια μονάδα στον επεξεργαστή και πόση ισχύ καταναλώνεται στις γύρω μονάδες.

Γενικά συμπεράσματα πειραμάτων

Μέσα από το συγκεκριμένο υποκεφάλαιο δίνεται μια γενική εικόνα για τη θερμοκρασία, πώς ορίζεται, καθώς και το βαθμό που επηρεάζει τη δυναμική και στατική ισχύ μέσα από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Από τις παρατηρήσεις που έγιναν στα πιο πάνω πειράματα καταλήγουμε σε διάφορα γενικά συμπεράσματα.

- i. Αυξάνοντας την πυκνότητα ισχύος που εφαρμόζεται σε κάθε μονάδα του επεξεργαστή παρουσιάζεται μια γραμμική αυξητική τάση της θερμοκρασίας. Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η σχέση μεταξύ πυκνότητας ισχύος και θερμοκρασίας είναι γραμμική και αυτό φάνηκε μέσα από το πείραμα που εκτελέσαμε.
- ii. Με την πάροδο του χρόνου η θερμοκρασία σταθεροποιείται σε μια τιμή αφού προηγηθεί μια έντονη αυξητική τάση που διαρκεί μερικά δευτερόλεπτα.
- iii. Με την απενεργοποίηση μιας μονάδας η θερμοκρασία που είχε αναπτύξει όταν ήταν ενεργή μειώνεται κατακόρυφα σε λιγότερο χρονικό διάστημα από ότι χρειάστηκε για να σταθεροποιηθεί.
- iv. Το μέγεθος της επιφάνειας πάνω στην οποία εφαρμόζεται μια ποσότητα πυκνότητας ισχύος παρουσιάζει γραμμική σχέση με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε αυτή. Μειώνοντας το μέγεθος της επιφάνειας η θερμοκρασία αυξάνεται διότι η ίδια ποσότητα εργασίας πρέπει να εκτελεστεί σε μικρότερη επιφάνεια.
- v. Η κάθε μονάδα του επεξεργαστή επηρεάζεται, όσον αφορά τη θερμοκρασία που αναπτύσσει, από τη θέση που βρίσκεται στο floorplan καθώς και από το βαθμό θερμότητας που εκπέμπει μια πηγή. Όσο πιο κοντά στην πηγή θερμότητας βρίσκεται μια μονάδα επηρεάζεται περισσότερο. Η σχέση που παρουσιάζεται μεταξύ της απόστασης και της θερμοκρασίας είναι εκθετική.
- vi. Είτε σε ομοιογενή είτε σε ανομοιογενή κατανομή πυκνότητας ισχύος, το μέγεθος της επιφάνειας στην οποία εφαρμόζεται η πυκνότητα ισχύος και η απόσταση από “θερμές” πηγές καθορίζουν τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε κάθε επιφάνεια.

2.4 Τεχνικές αντιμετώπισης της αύξησης της θερμοκρασίας στους επεξεργαστές

Η συνεχής αύξηση της θερμότητας που δημιουργείται με την αύξηση της πυκνότητας ισχύος στις διάφορες μονάδες του επεξεργαστή ώθησαν τους επιστήμονες να δημιουργήσουν μηχανισμούς για τη δυναμική διαχείριση της θερμότητας. Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά διάφορες τεχνικές όπως αναφέρονται στο άρθρο [7]. Οι τεχνικές αυτές μπορεί να αναφερθούν και με τα ονόματα, **DVS based Thermal Throttling, Micro-architectural Thermal Throttling και Advanced DTM, Linear Thermal Throttling.**

Clock Gating

Η τεχνική αυτή έχει να κάνει με το σβήσιμο του ρολογιού όταν η θερμοκρασία του επεξεργαστή ξεπεράσει μια καθορισμένη θερμοκρασία (threshold). Με το σβήσιμο του ρολογιού παρουσιάζεται μια άμεση μείωση και τελικός μηδενισμός της δυναμικής ισχύος διότι μειώνεται άμεσα όπως είναι γνωστό η συχνότητα του επεξεργαστή και οι μονάδες δεν παρουσιάζουν πλέον δραστηριότητα ενώ η θερμοκρασία λόγω ψυκτήρων και των ιδιοτήτων του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το chip παίρνει κάποιο χρόνο για να μειωθεί. Η στατική ενέργεια παρουσιάζει και αυτή μείωση αλλά δεν μηδενίζεται.

Micro-architectural Thermal Throttling

Με τη μείωση της δραστηριότητας σε κάποιες μονάδες πετυχαίνεται η μείωση της ισχύς και κατά συνέπεια και της θερμοκρασίας. Διάφορα παραδείγματα για την τεχνική αυτή είναι:

- **Stop or slow down instruction fetch**
- **Stop speculation**
- **Adaptively reduce array sizes**

Για παράδειγμα η πιο πάνω τεχνική αυτή έχει παρόμοια εφαρμογή όπως παρουσιάζεται στο [7] με τον τίτλο **Local Feedback-Controlled Fetch Toggling**. Οι μονάδες που παρουσιάζουν μια θερμική έξαρση επιλέγονται για να υποστούν τη διαδικασία της τεχνικής αυτής για την άμεση μείωση της θερμοκρασίας του επεξεργαστή. Οι μονάδες που

επιλέγονται τρέχουν σε duty cycle x/y δηλαδή η κάθε μονάδα χρησιμοποιείται ολικά για x κύκλους και δεν χρησιμοποιείται για $y - x$ κύκλους. Με την τεχνική αυτή ρυθμίζεται η θερμοκρασία επιτυχώς αφού καθοριστεί το κατάλληλο duty cycle.

DVFS

Στην τεχνική αυτή γίνεται μείωση της τάσης και της συχνότητας. Αρχικά όταν θα γίνει η αλλαγή της κατάστασης μειώνεται η συχνότητα και μετά σταδιακά μειώνεται και η τάση. Στο διάστημα όπου υπάρχει η αλλαγή της κατάστασης στον επεξεργαστή γίνεται συνεχώς έλεγχος για on/off καταστάσεις με σκοπό να επιστρέψει η αρχική συχνότητα του επεξεργαστή αν δεν υφίστανται πλέον on/off καταστάσεις. Στην διαδικασία επαναφοράς στην προηγούμενη κατάσταση αυξάνεται αρχικά η τάση και μετά η συχνότητα του ρολογιού. Κατά τη διάρκεια της αλλαγής η επίδοση του επεξεργαστή μειώνεται γραμμικά ανάλογα με τη συχνότητα και η ολική ισχύς μειώνεται κυβικά.

Advanced DTM - Migrating Computation

Όταν σε μια μονάδα του πολυπύρηνου επεξεργαστή αυξηθεί η θερμοκρασία για αποφυγή του σβησίματος του ρολογιού μια άλλη τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η τεχνική του migration. Για τη μεγιστοποίηση της επίδοσης του επεξεργαστή μεταφέρει τις διεργασίες (threads) από τον ζεστό πυρήνα σε ένα πιο κρύο πυρήνα με σκοπό την γρήγορη ολοκλήρωση της διεργασίας. Με την τεχνική αυτή αποφεύγεται η καθυστέρηση της ολοκλήρωσης της διεργασίας που θα είχε σε άλλες τεχνικές αλλά παρουσιάζεται πρόβλημα επικοινωνίας και καθυστέρησης διότι παρουσιάζονται περισσότερα cache misses. Η μειωμένη επίδοση όμως είναι λιγότερη συγκριτικά με την επίδοση που χάνεται με το σβήσιμο του ρολογιού. Στο άρθρο [7] παρουσιάζεται μια διαφοροποιημένη εφαρμογή της τεχνικής αυτής. Σε ένα SMT core επεξεργαστή εφαρμόστηκε η τεχνική όπου αντί να μεταφέρεται η διεργασία σε άλλο πυρήνα όπως γινόταν σε ένα πολυπύρηνου επεξεργαστή μεταφέρεται σε ένα αντίγραφο της μονάδας που την εκτελούσε για ολοκλήρωση της εκτέλεσης. Η μεταφοράς έχει μείωση στην επίδοση του επεξεργαστή διότι παρουσιάζεται μια καθυστέρηση υπολογισμού λόγω της αύξησης της απόστασης επικοινωνίας και πάλι

με την μνήμη.

Κεφάλαιο 3

Μικροαρχιτεκτονική

3.1 Μικροαρχιτεκτονική υπολογιστών	30
3.2 Μικροαρχιτεκτονική EV6 21264	41

3.1 Μικροαρχιτεκτονική υπολογιστών

Η μικροαρχιτεκτονική ή αλλιώς οργάνωση υπολογιστή είναι η επαρκής περιγραφή ενός ηλεκτρικού κυκλώματος ενός επεξεργαστή/ υπολογιστή, της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας και γενικότερα της λειτουργίας του υλικού.

Η μικροαρχιτεκτονική συνδυαζόμενη με την αρχιτεκτονική συνόλου εντολών (ISA) αποτελούν την αρχιτεκτονική ενός υπολογιστή. Αυτό που διακρίνει την ΑΣΕ από την μικροαρχιτεκτονική είναι ότι η δεύτερη είναι το σύνολο των τεχνικών σχεδιασμού που υλοποιούν την αρχιτεκτονική συνόλου εντολών. Η οργάνωση υπολογιστή είναι μια χαμηλού επιπέδου δομή η οποία περιέχει μεγάλο αριθμό από λεπτομέρειες κρυμμένες από το προγραμματιστικό μοντέλο. Συγκεκριμένα στη μικροαρχιτεκτονική περιλαμβάνονται τα βασικά μικροαρχιτεκτονικά στοιχεία ενός επεξεργαστή όπως οι πύλες, latches, πολυπλέκτες και μετρητές καθώς επίσης και ο τρόπος διασύνδεσης και επικοινωνίας τους για την ολοκλήρωση μονάδων όπως αριθμητικές λογικές μονάδες κτλ.

Παρουσιάζοντας τη μικροαρχιτεκτονική ενός επεξεργαστή κυρίως περιγράφονται ο τρόπος υλοποίησης του μηχανισμού πρόβλεψης (branch prediction), των μνήμων ταχύτατης

προσπέλασης (caches), το μέγεθος του διαύλου και λεπτομέρειες της δομής διασωλήνωσης καθώς και άλλες τεχνικές και υλοποιήσεις που χρησιμοποιούνται σήμερα στους μικροεπεξεργαστές. Αντίθετα με τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, του οποίου κύριος στόχος είναι η επίτευξη μιας καλύτερης απόδοσης του συστήματος, ο μικροαρχιτεκτονικός σχεδιασμός εστιάζει περισσότερο σε περιορισμούς που αφορούν την υλοποίηση του συστήματος όπως:

- εμβαδό τσιπ και κόστος
- κατανάλωση ισχύος
- πολυπλοκότητα λογικής
- ευκολία διασύνδεσης
- δυνατότητα κατασκευής
- ευκολία αποσφαλμάτωσης
- δυνατότητα δοκιμής

Στη συνέχεια περιγράφονται κάποιες από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται στη μικροαρχιτεκτονική που ολοκληρώνουν τη σημερινή εικόνα των μικροεπεξεργαστών.

Μια γενική υλοποίηση ενός μονοπύρηνου ή πολυπύρηνου μικροεπεξεργαστή για την εκτέλεση προγραμμάτων ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- Διάβασμα και αποκωδικοποίηση μιας εντολής
- Εύρεση των συσχετιζόμενων δεδομένων για την εκτέλεση της εντολής
- Εκτέλεση εντολής
- Αποθήκευση αποτελεσμάτων εκτέλεσης

Αυτό που περιπλέκει την πιο πάνω διαδικασία είναι η ιεραρχία της μνήμης. Επιβαρύνεται ο χρόνος εκτέλεσης με την πρόσβαση στις κρυφές μνήμες, στην κύρια μνήμη και σκληρό δίσκο. Επιπλέον παρατηρείται καθυστέρηση και αύξηση του χρόνου εκτέλεσης μιας εντολής από τη μεταφορά των δεδομένων στον δίαυλο του επεξεργαστή. Έτσι για λόγους βελτίωσης των προβλημάτων που προκύπτουν σήμερα η τεχνολογία των μικροεπεξεργαστών χρησιμοποιεί τις πιο κάτω υλοποιήσεις και τεχνικές.

Αρχιτεκτονική συνόλου εντολών (ISA)

Η αρχιτεκτονική συνόλου εντολών είναι βασικά το προγραμματιστικό μοντέλο που έρχεται σε επαφή ένας προγραμματιστής Assembly γλώσσας ή ένας κατασκευαστής μεταγλωττιστών. Περιλαμβάνει το εκτελεστικό μοντέλο, τους τύπους δεδομένων και εντολές της γλώσσας, τους καταχωρητές, τους φορμαλισμούς των διευθύνσεων και δεδομένων ενός επεξεργαστή, την αρχιτεκτονική της μνήμης, τη διαχείριση εξαιρέσεων (exception), διακοπών (interrupt) και χρήση εξωτερικών συσκευών εισόδου και εξόδου. Η αρχιτεκτονική συνόλου εντολών προδιαγράφει το σύνολο των εντολών του κώδικα μηχανής που υλοποιούνται από ένα συγκεκριμένο σχεδιασμό της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας. Υπολογιστές με διαφορετικές υλοποιήσεις μικροαρχιτεκτονικής μπορούν να μοιράζονται το ίδιο σύνολο εντολών. Η διαφορά τους βρίσκεται στον εσωτερικό σχεδιασμό.

Διασωλήνωση εντολών (Pipeline)

Η διασωλήνωση εντολών είναι μια τεχνική υλοποίησης που χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό των σύγχρονων υπολογιστών και άλλων ψηφιακών ηλεκτρονικών συσκευών για την αύξηση της ρυθμοαπόδοσης των εντολών, δηλαδή τον αριθμό των εντολών που μπορούν να εκτελεστούν σε μια μονάδα χρόνου. Η τεχνική χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της απόδοσης της εκτέλεσης αφού επιτρέπεται η επικάλυψη (overlap) της εκτέλεσης των εντολών. Η δυνατότητα επικάλυψης μεταξύ των εντολών είναι μια μορφή παραλληλισμού αφού οι εντολές αξιολογούνται παράλληλα. Ο παραλληλισμός αυτός πραγματοποιείται στο επίπεδο των εντολών και ονομάζεται instruction level parallelism (ILP). Η θεμελιώδης ιδέα της διασωλήνωσης είναι η διάσπαση της επεξεργασίας μιας εντολής σε μια σειρά από ανεξάρτητα στάδια με τη δυνατότητα αποθήκευσης των αποτελεσμάτων στο τέλος του κάθε σταδίου. Η διαδικασία αυτή δίνει τη δυνατότητα στον μικροεπεξεργαστή να τροχοδρομήσει εντολές οι οποίες εκτελούνται στο χρόνο του πιο αργού σταδίου, διαδικασία που είναι γρηγορότερη χρονικά από τη σειριακή εκτέλεση.

Κρυφή μνήμη (cache)

Η ευκαιρία που δόθηκε με το πέρασμα του χρόνου με τις βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στην κατασκευή των τσιπ επέτρεψαν την τοποθέτηση περισσότερου κυκλώματος στο die. Οι επιστήμονες αξιοποίησαν την ευκαιρία αυτοί προσθέτοντας μια συνεχώς αυξανόμενη ποσότητα κρυφής μνήμης. Η κρυφή μνήμη είναι μικρή σε μέγεθος και γρηγορότερη σε ταχύτητα, της οποίας η πρόσβαση πραγματοποιείται σε λιγότερους κύκλους μηχανής σε σχέση με την κύρια μνήμη. Αποθηκεύει αντίγραφα δεδομένων από θέσεις στην κύρια μνήμη τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί πιο πρόσφατα μειώνοντας το χρόνο καθυστέρησης που προκαλείται από προσβάσεις σε χαμηλότερα επίπεδα μνήμης. Οι περισσότεροι κεντρικοί υπολογιστές και μικροεπεξεργαστές έχουν τουλάχιστο τρεις ανεξάρτητες κρυφές μνήμες: μια κρυφή μνήμη επεξεργασίας εντολών (instruction cache) με σκοπό την επιτάχυνση της ευρύτητας των εντολών που εισέρχονται στη διασωλήνωση για εκτέλεση, μια κρυφή μνήμη δεδομένων (data cache) για την επιτάχυνση των δεδομένων που λαμβάνονται και αποθηκεύονται για την εκτέλεση και τρίτο μια δομή αποθήκευσης των μεταφρασμένων εικονικών διευθύνσεων (translation look aside buffer) για την επιτάχυνση της μετάφρασης εικονικών σε φυσικές διευθύνσεις τόσο για δεδομένα όσο και για εντολές.

Κάθε σειρά καταχώρησης στην κρυφή μνήμη ακολουθεί την πιο κάτω δομή:

Data blocks	Tag	Index	Displacement(offset)	Valid bit
-------------	-----	-------	----------------------	-----------

Τα μπλοκ δεδομένων περιέχουν τα πραγματικά δεδομένα που έρχονται από τη μνήμη. Η διεύθυνση μνήμης είναι χωρισμένη (MSB to LSB) στο tag , index και offset, καθώς το valid bit δεικνύει αν η συγκεκριμένη καταχώρηση περιέχει έγκυρα δεδομένα. Το index περιγράφει την σειρά στην οποία έχουν τοποθετηθεί τα δεδομένα. Το offset καθορίζει ποια μπλοκ από τη σειρά δεδομένων που επεξεργαζόμαστε χρειάζεται να διαβάσουμε και το tag περιέχει τα most significant bits της διεύθυνσης και επιβεβαιώνει αν επεξεργαζόμαστε την σωστή σειρά δεδομένων που ανακτήθηκε από το index. Η πολιτική αντικατάστασης ενός μπλοκ αποφασίζει αν μια συγκεκριμένη καταχώρηση ενός αντιγράφου της κύριας μνήμης

πρέπει να φύγει από την κρυφή μνήμη. Παρουσιάζονται διάφορες πολιτικές αντικατάστασης όπως στις πιο κάτω περιπτώσεις:

i. Fully associative cache

Επιτρέπεται η επιλογή οποιαδήποτε καταχώρησης στην κρυφή μνήμη για να φυλάξει το αντίγραφο από την κύρια μνήμη,

ii. Direct mapped cache

Κάθε καταχώρηση στην κρυφή μνήμη επιτρέπεται να τοποθετηθεί σε μια μόνο συγκεκριμένη θέση.

iii. N-way set associative

Κάθε καταχώρηση στην κύρια μνήμη μπορεί να τοποθετηθεί σε N θέσεις στην κρυφή μνήμη.

Κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης εντολών πραγματοποιούνται αιτήματα στη μνήμη για μεταφορά και χρήση δεδομένων για τις ανάγκες της κάθε εντολής. Όμως όταν ο επεξεργαστής αποτυγχάνει να διαβάσει ή να γράψει δεδομένα στην κρυφή μνήμη τότε πραγματοποιείται αποτυχία πρόσβασης στην κρυφή μνήμη (cache miss) με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται πρόσβαση στην κύρια μνήμη που προκαλεί περισσότερη χρονική καθυστέρηση. Υπάρχουν τρία είδη αποτυχιών:

i. Instruction read miss

Η παρουσίαση μιας αποτυχίας διαβάσματος μιας εντολής από την instruction cache προκαλεί τη μεγαλύτερη καθυστέρηση διότι ο επεξεργαστής πρέπει να περιμένει μέχρι η εντολή να μεταφερθεί από την κύρια μνήμη.

ii. Data read miss

Μια αποτυχία διαβάσματος δεδομένων προκαλεί λιγότερη καθυστέρηση διότι οι εντολές που δεν εξαρτώνται από τα συγκεκριμένα δεδομένα μπορούν να επικαλύψουν τις επηρεασμένες εντολές και να συνεχίσουν την εκτέλεση τους μέχρι να μεταφερθούν τα δεδομένα από την κύρια μνήμη και να συνεχίσουν και αυτές την

εκτέλεση τους.

iii. Data write miss

Είναι η αποτυχία με τη λιγότερη καθυστέρηση διότι η εγγραφή δεδομένων μπαίνει σε μια ουρά προκαλώντας κάποιους περιορισμούς στην εκτέλεση επόμενων εντολών ιδίως όταν εξαρτώνται από το αποτέλεσμα που πρόκειται να γραφτεί στη μνήμη.

Ο κατάλληλος συνδυασμός του μεγέθους, associativity και του μεγέθους του μπλοκ της κρυφής μνήμης μειώνει το ποσοστό αποτυχίας πρόσβασης στην κρυφή μνήμη. Οι αποτυχίες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε από τον Mark Hill:

i. Compulsory misses

Είναι οι αποτυχίες που προκαλούνται από την πρώτη αναφορά σε δεδομένα στη μνήμη τα οποία πρέπει να μεταφερθούν στην κρυφή μνήμη. Λύσεις για μείωση του αριθμού των αποτυχιών αναφοράς είναι η χρήση της τεχνικής του prefetching καθώς και η αύξηση του μεγέθους του μπλοκ της μνήμης.

ii. Capacity misses

Οι αποτυχίες αυτές εμφανίζονται όταν δεν υπάρχει άδειος χώρος για να αποθηκευτεί ένα καινούργιο αντίγραφο με αποτέλεσμα να γίνεται η αντικατάσταση ενός παλαιότερου. Οφείλονται κυρίως στο πεπερασμένο μέγεθος της κρυφής μνήμης.

iii. Conflict misses

Συμβαίνει όταν ένα μπλοκ που βρισκόταν στην κρυφή μνήμη υπόκειται ανώφελη αντικατάσταση λόγω της πολιτικής αντικατάστασης και είναι αναγκαία η επαναφορά του στην κρυφή μνήμη.

Branch Prediction

Μια από τις αιτίες καθυστέρησης στη διασωλήνωση προκαλείται από τις εντολές διακλάδωσης. Κανονικά εάν μια υπό όρους εντολή διακλάδωσης (conditional branch) θα είναι αληθής ή όχι, είναι γνωστό σε αργότερο για την εκτέλεση στάδιο της διασωλήνωσης αφού εξαρτάται από αποτελέσματα που προέρχονται από τους καταχωρητές. Από αυτήν τη στιγμή ο επεξεργαστής μπορεί να υπολογίσει τη σωστή διεύθυνση που έπρεπε να έχει διαδεχθεί την προηγούμενη της. Στην περίπτωση που η εντολή διακλάδωσης είναι αληθής οι επόμενες εντολές που βρίσκονται στη διασωλήνωση πρέπει αφαιρεθούν για να εισαχθούν οι εντολές που απαρτίζουν το καινούργιο μονοπάτι εντολών εκτέλεσης. Οι τεχνικές πρόβλεψης εντολών διακλάδωσης και θεωρητικής πρόβλεψης (speculative execution) χρησιμοποιούνται για τη μείωση των ποινών που πληρώνει η εκτέλεση με τις εντολές διακλάδωσης. Ο μηχανισμός πρόβλεψης είναι κυρίως το υλικό που πραγματοποιεί προβλέψεις εάν μια συγκεκριμένη εντολή διακλάδωσης είναι αληθής ή όχι. Με την πρόβλεψη αυτή επιτρέπεται στο υλικό να φέρνει εκ των προτέρων εντολές χωρίς να περιμένει το διάβασμα των καταχωρητών. Η θεωρητική πρόβλεψη μια τεχνική που σχολιάζεται σε μεταγενέστερο στάδιο είναι μια επιπλέον ανάπτυξη όπου ο κώδικας και το προεπιλεγμένο μονοπάτι εντολών εκτελούνται πριν να είναι γνωστό εάν η εντολή διακλάδωσης είναι αληθής ή όχι.

Superscalar

Η αρχιτεκτονική μιας ΚΜΕ υλοποιεί μια μορφή παραλληλισμού μέσα σε ένα μονοπύρηνο επεξεργαστή που ονομάζεται instruction-level parallelism. Επομένως επιτρέπει γρηγορότερη ρυθμοαπόδοση με την ίδια συχνότητα μηχανής σε σχέση με τη σειριακή εκτέλεση εντολών. Κατά τη διάρκεια ενός κύκλου του ρολογιού ένας superscalar επεξεργαστής εκτελεί περισσότερες από μια εντολές αφού έχει τη δυνατότητα να αποστέλλει ταυτόχρονα πολλαπλές εντολές σε αχρησιμοποίητες λειτουργικές μονάδες του επεξεργαστή. Κάθε μονάδα είναι πλέον ένας πόρος εκτέλεσης μέσα σε μια ενιαία ΚΜΕ όπως μια αριθμητική λογική μονάδα, ένας bit shifter, ένας πολλαπλασιαστής.

Out-of-order execution

Παρόλο που η προσθήκη κρυφών μηνύων μειώνει τη συχνότητα εμφάνισης ή διάρκειας των καθυστερήσεων που προκύπτουν από την αναμονή της άφιξης των δεδομένων από τα χαμηλότερα επίπεδα ιεραρχίας μνήμης δεν εξαφανίζονται εξ ολοκλήρου. Η out-of-order εκτέλεση επιτρέπει σε μια έτοιμη από πλευράς δεδομένων εντολή να προχωρήσει για επεξεργασία ενώ μια προηγούμενη εντολή μπορεί να περιμένει μέχρι να παραλάβει τα δεδομένα που αναμένει για την εκτέλεση της. Στο τέλος της εκτέλεσης των εντολών ενός προγράμματος πριν την αλλαγή της κατάστασης του επεξεργαστή (register file) γίνεται αλλαγή της σειράς των εντολών με την οποία θα γίνουν commit έτσι ώστε να επανέλθει η αρχική σειρά προγράμματος (program order). Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται επίσης για την αποφυγή καθυστερήσεων που προκαλούνται όταν μια εντολή περιμένει ένα αποτέλεσμα από μια λειτουργία που χρειάζεται πολλαπλούς κύκλους μηχανής για την ολοκλήρωση της εκτέλεσης της όπως λειτουργίες με αριθμούς κινητής υποδιαστολής (floating point), πολλαπλασιασμού και διαίρεσης. Αποφεύγονται κυρίως οι καθυστερήσεις που προκαλούνται στο δεύτερο στάδιο της επεξεργασίας εντολών μιας σειριακής εκτέλεσης (in-order execution) όπου λόγω ελλειπόντων δεδομένων οι εντολές δεν προχωρούν για εκτέλεση. Οι καθυστερήσεις αναπληρώνονται από τις έτοιμες από άποψης δεδομένων εντολές που προχωρούν για εκτέλεση.

Η επεξεργασία των εντολών διασπώνται στα ακόλουθα βήματα:

1. Επιλογή εντολής.
2. Αποστολή εντολής σε ουρά (reservation station).
3. Αναμονή στην ουρά μέχρι οι τελεσταίοι εισόδου είναι διαθέσιμοι για να της επιτραπεί η αποχώρηση από την ουρά πριν από νεότερες ή παλαιότερες εντολές.
4. Η εντολή αποστέλλεται στην κατάλληλη λειτουργική μονάδα για εκτέλεση.
5. Τα αποτελέσματα εισέρχονται σε μια ουρά.
6. Η εγγραφή στο αρχείο καταχωρητών πραγματοποιείται μόνο όταν όλες οι παλιές εντολές έχουν ανακτήσει τα αποτελέσματά τους.

Το όφελος που κερδίζεται από την επεξεργασία τέτοιου είδους εκτέλεσης αυξάνεται καθώς με το πέρασμα του χρόνου και την ανάπτυξη της τεχνολογία των επεξεργαστών σήμερα η διασωλήνωση εντολών αυξάνεται από πλευράς αριθμών σταδίων και επομένως χρόνου με αποτέλεσμα να δημιουργείται περισσότερη καθυστέρηση. Η διαφορά ταχύτητας μεταξύ μνήμης και επεξεργαστών μεγαλώνει λόγω του ότι οι μοντέρνοι επεξεργαστές σήμερα έχουν την ικανότητα να τρέχουν πολύ γρηγορότερα από τη μνήμη, για αυτό και η τεχνική αυτή εκμεταλλεύεται την καθυστέρηση που προκαλείται από τις εντολές που έχουν ελλειπή δεδομένα και δεν μπορούν να προχωρήσουν στην εκτέλεση με την αντικατάσταση τους από έτοιμες εντολές. Η δυνατότητα αυτή έχει ως αποτέλεσμα την βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός συστήματος – μείωση χρόνου εκτέλεσης ενός προγράμματος.

Speculative execution

Η θεωρητική εκτέλεση (speculative execution) είναι μια παρόμοια υλοποίηση πρόβλεψης που είδαμε και πιο πάνω. Κυρίως είναι ακόμα μια τεχνική βελτιστοποίησης της απόδοσης ενός συστήματος. Στην τεχνική αυτή πραγματοποιείται η εκτέλεση κάποιου κώδικα που η πρόωρη εκτέλεση του μπορεί να καταναλώσει λιγότερο χρόνο και χώρο σε αντίθεση με μια μετέπειτα εκτέλεση αντισταθμίζοντας και τη τυχών λάθος εκτέλεση μακροπρόθεσμα.

Register Renaming

Η μετονομασία καταχωρητών αναφέρεται σε μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την αποφυγή αχρείαστης σειριακής εκτέλεσης ενός προγράμματος η οποία προκαλείται από την επαναχρησιμοποίηση των ίδιων καταχωρητών από τις εντολές. Δίνεται η δυνατότητα σε δύο εντολές που σκοπεύουν να χρησιμοποιήσουν τον ίδιο καταχωρητή να ανατεθούν και οι δύο σε διαφορετικούς καταχωρητές και να εκτελεστούν παράλληλα παρά να περιμένει η μια για να αποδεσμεύσει τον κοινό καταχωρητή η άλλη για να συνεχίσει την εκτέλεση της η πρώτη.

Multiprocessing and multithreading

Μια από τις προκλήσεις που είχαν να αντιμετωπίσουν οι επιστήμονες όταν ήρθαν αντιμέτωποι με την οριακή διακοπή της εξέλιξης της τεχνολογίας για την κατασκευή επεξεργαστών λόγω του νόμου του Moore, ήταν η εύρεση μιας ιδέας που θα είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης και των δυνατοτήτων των επεξεργαστών. Η αύξηση της συχνότητας ενός μονοπύρινου επεξεργαστή έφτασε σε ένα όριο το οποίο δεν μπορούσε να ξεπεραστεί λόγω των περιορισμών της θερμοκρασίας. Έτσι οι επιστήμονες κατέληξαν στην ιδέα της πολυεπεξεργασίας (multiprocessing) δηλαδή της ενσωμάτωσης πολλαπλών πυρήνων σε ένα σύστημα ηλεκτρονικού υπολογιστή. Οι πυρήνες οι οποίοι θα έτρεχαν σε χαμηλότερη συχνότητα θα λειτουργούσαν παράλληλα εκτελώντας τις διαμοιραζόμενες διεργασίες και πόρους.

Σε ένα σύστημα πολυεπεξεργασίας όλοι οι πυρήνες που ενσωματώνονται στο σύστημα μπορεί να είναι πανομοιότυποι (επαναχρησιμοποίηση πρωτοτύπου) ή μερικοί να διαφέρουν στην κατασκευή τους λόγω των ειδικών λειτουργιών που μπορεί να υποστηρίζουν.

Η ίση διαχείριση όλων των ενσωματωμένων πυρήνων σε ένα σύστημα ονομάζεται συμμετρική πολυεπεξεργασία (symmetric multiprocessing – SMP). Αντίθετα η άνιση διαχείριση όπου οι πόροι του συστήματος διαμοιράζονται με διάφορους τρόπους περιλαμβάνεται στην ασύμμετρη πολυεπεξεργασία (asymmetric multiprocessing – ASMP) με ανομοιόμορφη πρόσβαση στη μνήμη (non-uniform memory access – NUMA).

Μια άλλη τεχνική που χρησιμοποιείται στους σύγχρονους επεξεργαστές είναι το simultaneous multithreading (SMT) η οποία χρησιμεύει στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης ενός superscalar επεξεργαστή ο οποίος με τη σειρά του υποστηρίζει πολυνηματώδη υλικό. Η τεχνική επιτρέπει την εκτέλεση πολλαπλών ανεξάρτητων νημάτων με σκοπό την καλύτερη χρήση των πόρων που παρέχονται από τις μοντέρνες αρχιτεκτονικές επεξεργαστών. Η ταυτόχρονη πολυνηματώδης επεξεργασία είναι μια από τις δύο κυριότερες υλοποιήσεις της πολυνηματώδης ιδέας.

Παρόλο που τα συστήματα πολυεπεξεργασίας περιλαμβάνουν πολλαπλές ολοκληρωμένες μονάδες επεξεργασίας, η τεχνική multithreading στοχεύει στην αύξηση της χρήσης ενός πυρήνα ενδυναμώνοντας τον παραλληλισμό σε επίπεδο των νημάτων καθώς και στο επίπεδο των εντολών. Οι δύο τεχνικές συμπληρώνουν η μια την άλλη αφού μπορούν να συνδυαστούν σε κάποιες περιπτώσεις σε συστήματα με πολλαπλές πολυνηματώδεις κεντρικές μονάδες επεξεργασίας καθώς επίσης και σε κεντρικές μονάδες επεξεργασίας με πολλαπλούς πολυνηματώδεις πυρήνες. Η τεχνική SMT χρησιμοποιείται για την απόκρυψη της καθυστέρησης που προκαλείται από την πρόσβαση στη μνήμη με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητας και της ρυθμοαπόδοσης των υπολογισμών ανά την ποσότητα του υλικού που χρησιμοποιείται.

3.2 Μικροαρχιτεκτονική EV6 21264

Στο παρακάτω μέρος του υποκεφαλαίου παρουσιάζεται η μικροαρχιτεκτονική του επεξεργαστή πάνω στην οποία βασίζεται η κατασκευή του προσομοιωτή Sim-alpha που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων που απαιτούσαν οι ανάγκες της διπλωματικής εργασίας.

Ο Sim-alpha superscalar προσομοιωτής βασίζεται στην αρχιτεκτονική του μικροεπεξεργαστή Ev6 Alpha 21264 [1,3]. Κατασκευάστηκε έτσι ώστε να τρέχει σε x86/Linux πλατφόρμες και μπορεί να τρέξει οποιοδήποτε binary είναι μεταγλωττισμένο για κάποιο Alpha ISA. Ο προσομοιωτής μπορεί να δεχτεί command line arguments καθώς και παραμέτρους από αρχείο.

Ο επεξεργαστής Ev6 υλοποιεί 64-bit load και store RISC αρχιτεκτονική σε 350 nm CMOS process. Τρέχει σε 600 MHz cycle time και μπορεί να φτάσει μέχρι και 3 GHz σε συχνότητα. Το μέγεθος του επεξεργαστή στη συγκεκριμένη τεχνολογία είναι 313.96 mm². Ο επεξεργαστής έχει την ικανότητα σε κάθε κύκλο να εκτελέσει 6 εντολές (4 integer και 2 floating point) προερχόμενες από τις αντίστοιχες ακέραιες (integer) και πραγματικών αριθμών (floating point) ουρές (issue queues).

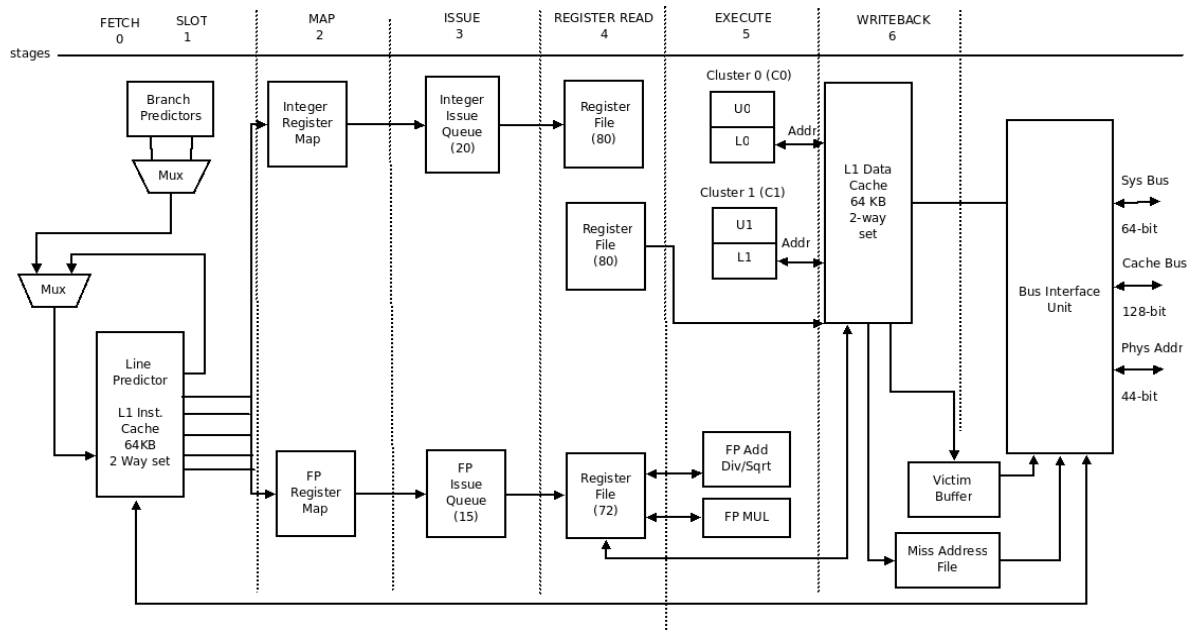
Όσον αφορά τις μονάδες αποθήκευσης δεδομένων και εντολών εκτός από τη 64KB 2-way associative Data cache και Instruction cache στη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική σημαντική είναι η παρουσία ενός ακόμα επιπέδου κρυφής μνήμης (**L2 cache**). Το δεύτερο επίπεδο μνήμης είναι μια 2MB 4-way associative κρυφή μνήμη σειριακής πρόσβασης. Το σύστημα της μνήμης που υπάρχει προσφέρει ψηλά επίπεδα επίδοσης. Οι ταχύτατες κρυφές μνήμες (caches) που βρίσκονται on-chip και off-chip έχουν πολύ μικρή καθυστέρηση στην πρόσβαση δεδομένων. Επίσης μεγάλος αριθμός από αναφορές στην μνήμη μπορούν να εξυπηρετηθούν παράλληλα σε όλες τις κρυφές μνήμες (caches) και στο σύστημα μνήμης που βρίσκεται off-chip. Αυτό επιτρέπει πολύ ψηλό bandwidth για πρόσβαση δεδομένων.

Ο Εν6 αποτελείται από τέσσερις αριθμητικές λογικές μονάδες ακεραίων πράξεων, τέσσερις αριθμητικές λογικές μονάδες κινητής υποδιαστολής, τέσσερις πολλαπλασιαστές ακεραίων πράξεων και τέσσερις πολλαπλασιαστές κινητής υποδιαστολής. Περιέχει εκατοκοσιοχτώ ακέραιους και εκατοκοσιοχτώ κινητής υποδιαστολής καταχωρητές.

Ο επεξεργαστής επιτρέπει τεχνικές μικροαρχιτεκτονικής οι οποίες μεγιστοποιούν τον αριθμό των εντολών που εκτελούνται κάθε κύκλο. Ο συγκεκριμένος μικροεπεξεργαστής υλοποιεί μια out-of-order και speculative εκτέλεση. Σε μια Out-of-order εκτέλεση οι εντολές μπορούν να εκτελεστούν σε μια σειρά η οποία είναι διαφορετική από τη σειρά με την οποία παρουσιάζονται στη σειρά προγράμματος. Αποτέλεσμα αυτής της εκτέλεσης είναι η άμεση και γρήγορη εκτέλεση των εντολών κυρίως σε περιπτώσεις υπολογισμού σε κρίσιμα μονοπάτια όπου ξεκινούν και ολοκληρώνουν την εκτέλεση τους όσο το δυνατό πιο γρήγορα. Οι εντολές επιλέγονται έτσι ώστε να μην παραβιάζονται οι εξαρτήσεις που παρουσιάζονται ανάμεσα στις εντολές.

Επίσης χρησιμοποιεί speculative execution με στόχο τη μεγιστοποίηση της επίδοσης. Με απλά λόγια ο επεξεργαστής εικαστικά επιλέγει (fetch) και εκτελεί εντολές παρόλο που υπάρχει πιθανότητα οι εντολές που επιλέχθηκαν να μην βρίσκονται στο τελικό μονοπάτι εκτέλεσης. Αυτή η διαδικασία είναι χρήσιμη για την πρόβλεψη των εντολών διακλάδωσης (branches). Ο μηχανισμός πρόβλεψης (Branch Predictor) που χρησιμοποιείται εκτελεί τις εντολές ακολουθούμενος το *mis-speculated path*. Το μειονέκτημα που παρουσιάζεται είναι η ποινή που λαμβάνεται με την λάθος πρόβλεψη αφού το ορθό μονοπάτι είναι γνωστό στο τελευταίο στάδιο της διασωλήνωσης (commit stage).

Οι κύκλοι της διασωλήνωσης που εφαρμόζεται στο συγκεκριμένο εργαλείο είναι δεκαπέντε διότι εκτός από τα έξι βασικά στάδια που παρουσιάζονται και στην 21264 αρχιτεκτονική προστέθηκαν στο δεύτερο στάδιο επιπλέον εννέα slot στάδια. Τα στάδια αυτά προστέθηκαν για να δημιουργηθεί μια μικρή καθυστέρηση στη διασωλήνωση έτσι ώστε να προλαβαίνουν όλοι οι τύποι εντολών να εκτελούνται.



Σχήμα 3.1 Εικόνα διασωλήνωσης προσομοιωτή [1,3]

Ακολουθεί μια ψηλού επιπέδου αναφορά στη διασωλήνωση που υλοποιεί ο επεξεργαστής με περιγραφή στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται στον συγκεκριμένο επεξεργαστή για επίτευξη μεγαλύτερης επίδοσης. Κάθε στάδιο της διασωλήνωσης είναι υλοποιημένο σε διαφορετικό αρχείο, εκτός από το register read stage που είναι ενσωματωμένο με το issue stage. Τα στάδια της διασωλήνωσης εκτελούνται σε ένα βρόγχο όπου κάθε επανάληψη βρόγχου πραγματοποιείται κάθε κύκλο μηχανής. Η προσομοίωση είναι μερικώς event driven. Πριν την εκτέλεση του βρόγχου γίνεται κλήση συναρτήσεων αρχικοποίησης κάθε σταδίου.

Στάδιο 0: Instruction Fetch

Το στάδιο αυτό είναι η αρχή της διασωλήνωσης, υλοποιείται στη συνάρτηση *fetch_stage()* και βρίσκεται στο αρχείο **fetch.c**. Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται πρόσβαση στη 64K byte, two-way set-associative instruction cache, και επιλέγονται 4 εντολές σε κάθε πρόσβαση. Ο αριθμός των εντολών καθορίζεται από *fetch_width* που καθορίζεται στο configuration αρχείο. Στο στάδιο αυτό είναι υλοποιημένος ο μηχανισμός πρόβλεψης (line

predictor) της επόμενης σειράς εντολών που θα εισέλθει στη διασωλήνωση για εκτέλεση.

Line Prediction

Η ταχύτητα του fetch καθορίζει τον αριθμό των discontinuous fetches που μπορούν να εκτελεστούν από τον επεξεργαστή κάθε κύκλο. Κάθε fetch block με τις 4 εντολές περιέχει ένα Line Prediction το οποίο δεικνύει από πού να γίνει το επόμενο I-fetch line που θα χρησιμοποιηθεί.

Στάδιο 1: Slot Stages

Το επόμενο στάδιο της διασωλήνωσης υλοποιείται στη συνάρτηση *slot_stage()* η οποία βρίσκεται στο αρχείο **slot.c**. Ο πυρήνας εκτέλεσης ακέραιων εντολών αποτελείται από 2 clusters C0, C1. Κάθε cluster έχει ένα αντίγραφο του 80-entry register file και δύο subclusters, lower (L) και upper (U), οι οποίοι περιέχουν τις λειτουργικές μονάδες. Οι εντολές τοποθετούνται στατικά στους δύο sub-clusters ανάλογα με τη θέση τους στο fetch packet, τις απαιτήσεις τους σε πόρους και τον τύπο τους. Επίσης οι εντολές ελέγχου έχουν πρόσβαση στον μηχανισμό πρόβλεψης βρόγχου (branch predictor). Για τις PC relative control instructions γίνεται ο υπολογισμός του target με τη χρήση ενός adder. Πραγματοποιείται αναβάθμιση του branch predictor και line predictor. Στην περίπτωση που η πρόβλεψη του line predictor δεν συνάδει με την πρόβλεψη του branch predictor τότε επικρατεί το δεύτερο. Αυτό συμβαίνει όταν προηγηθεί misprediction και πρέπει να αναιρεθούν οι λανθασμένες εντολές που είναι στο fetch queue και να επανεκκινήσει η διαδικασία fetching με εντολές που προέρχονται από τη διεύθυνση branch predictor target. Υπάρχει επίσης έλεγχος για να υπάρχει συνεχόμενη επιλογή εντολών ακόμα και στην απουσία εντολών ελέγχου. Αν όμως υπάρχουν εντολές ελέγχου τότε γίνεται επανεκκίνηση εισαγωγής εντολών στη διασωλήνωση από τη σωστή PC διεύθυνση.

Στάδιο 2: Map Stage

Στο επόμενο στάδιο προσδιορίζονται αρχικά οι καταχωρητές εισόδου και εξόδου για κάθε εντολή που υπάρχει στη διασωλήνωση. Το στάδιο του mapping υλοποιείται στη συνάρτηση

map_stage στο αρχείο map.c. Με τον προσδιορισμό των καταχωρητών εισόδου και εξόδου πραγματοποιείται έλεγχος για τη διαθεσιμότητα μιας θέσης στο reorder buffer, σε integer ή floating point issue queue ανάλογα με τον τύπο του καταχωρητή προορισμού της εντολής. Επίσης ελέγχεται αν είναι διαθέσιμοι οι φυσικοί καταχωρητές εξόδου της εντολής καθώς και στη περίπτωση που η εντολή είναι τύπου load ή store αν διατίθεται μια θέση στη load ή store queue. Στη συνέχεια προσδιορίζεται ο φυσικός καταχωρητής εισόδου για τη συγκεκριμένη εντολή και οι καταχωρητές αυτοί είναι έτοιμοι η εντολή τοποθετείται στην έτοιμη ουρά που αντιστοιχεί. Στην αντίθετη περίπτωση πραγματοποιείται ο προσδιορισμός των παραγωγών των παραμέτρων της εντολής, και τοποθετείται σε ουρά για να περιμένει για εκτέλεση. Όλοι οι τύποι εντολών δρομολογούνται στις αντίστοιχες ουρές που ανήκουν για την εκτέλεση. Ελέγχεται επίσης και οι εντολές load που εξαρτώνται και δρομολογούνται στη σωστή σειρά λαμβάνοντας υπόψη το τελευταίο store.

Στάδιο 3: Issue Stage

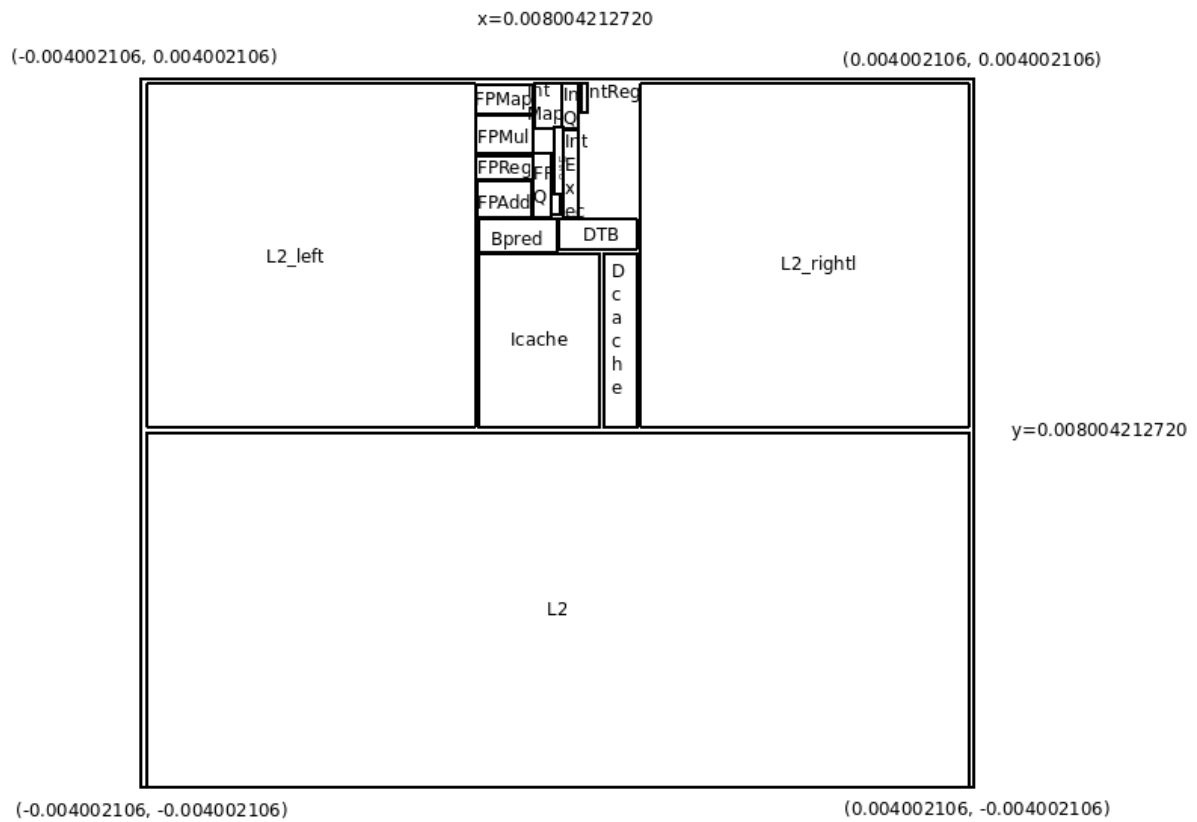
Το επόμενο στάδιο είναι υπεύθυνο για την επιλογή έτοιμων εντολών από τις integer και floating point ουρές, ελέγχονται ταυτόχρονα τις διαθέσιμες μονάδες επεξεργασίας (functional units) για να δρομολογήσει την κάθε εντολή στην μονάδα που χρειάζεται για να εκτελεστεί. Στο στάδιο αυτό παρουσιάζεται μια καθυστέρηση από το διάβασμα των καταχωρητών. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι οι τιμές των καταχωρητών μπορεί να έχουν υπολογιστεί και από μεταβίβαση από υπολογισμούς τιμών που ανήκουν σε προηγούμενες εντολές σε επόμενα στάδια (writeback stage). Η επιλογή των εντολών γίνεται βάση ηλικίας. Η παλαιότερη εντολή στην ουρά δρομολογείται και της παρέχονται τα προαπαιτούμενα (τιμές καταχωρητών) για την εκτέλεση. Γίνεται χρήση της απόφασης κατεύθυνσης για κάθε εντολή που πάρθηκε στο slot stage. Έτσι γνωρίζοντας σε ποιο subcluster ανήκει η εντολή δρομολογείται από εκεί. Επίσης στο στάδιο αυτό εφαρμόζεται η κατάλληλη καθυστέρηση για κάθε τύπο εντολής. Με το πέρασμα δύο κύκλων μετά την εκκίνηση της λειτουργίας issue ενεργοποιούνται events για να αδειάσουν οι integer και floating point ουρές και δίνεται σήμα ολοκλήρωσης της εντολής που εκτελείτο.

Στάδιο 4: Writeback Stage

Η διαδικασία διανομής των καινούργιων τιμών των καταχωρητών που υπολογίστηκαν και αναμένονται από εξαρτώμενες εντολές πραγματοποιείται στο στάδιο writeback το οποίο υλοποιείται στο αρχείο writeback.c. Το στάδιο αυτό είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο των εξαρτώμενων εντολών που βρίσκονται στο event queue σε κάθε περίπτωση ολοκλήρωσης εντολής αν κάποια παράμετρος της εντολής που έχει υπολογιστεί την αναμένει κάποια εξαρτώμενη εντολή για να συνεχίσει την εκτέλεση της. Οι εντολές που πληρούν τις απαιτήσεις τους συνεχίζουν την εκτέλεση τους καταβάλλοντας μια θέση στο reorder buffer. Επίσης στο στάδιο αυτό γίνεται ο υπολογισμός της επόμενης εντολής που θα εισέλθει στη διασωλήνωση σε περίπτωση εκτέλεσης μιας εντολής ελέγχου καθώς και οι αλλαγές των εντολών σε περίπτωση λάθος πρόβλεψης. Οι εντολές load έχουν πρόσβαση στο D-cache και οι store εντολές θεωρούνται έτοιμες για να έχουν πρόσβαση στη D-cache στο στάδιο ολοκλήρωσης μιας εντολής (commit).

Στάδιο 5: Commit Stage

Η ολοκλήρωση της εκτέλεσης μιας εντολής πραγματοποιείται στο τελευταίο στάδιο της διασωλήνωσης το οποίο είναι υπεύθυνο για να αδειάζει το reorder buffer από τις εντολές που ολοκληρώνονται. Σε κάθε κύκλο ολοκληρώνει την εκτέλεση του ένας αριθμός από εντολές που καθορίζεται από τη μεταβλητή commit_width που βρίσκεται στο configuration file. Το στάδιο αυτό είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του δείκτη που δεικνύει την κεφαλή-αρχή(head) του reorder buffer για λανθασμένες προβλέψεις και παγίδες εντολών, έτσι ώστε να αδειάσει τη διασωλήνωση στην περίπτωση αυτή. Στην αντίθετη περίπτωση όπου η εκτέλεση κινείται ομαλά, πραγματοποιείται αφυπηρέτηση της εντολής και ενημέρωση του αρχείου που περιέχει τους αρχιτεκτονικούς καταχωρητές με τις καινούργιες τιμές που υπολογίστηκαν. Επίσης στο σημείο αυτό επιτρέπεται η πρόσβαση των store εντολών στο D-cache.



Σχήμα 3.2 Σχεδιάγραμμα διάταξης μονάδων προσομοιωτή [1,3]

Κεφάλαιο 4

Πειράματα αναφοράς

4.1 Κριτήρια επιλογής πειραμάτων	48
4.2 Μεθοδολογία έρευνας	50
4.3 Πειράματα αναφοράς	52
4.4 Συνοπτικά συμπεράσματα πειραμάτων	72

4.1 Κριτήρια επιλογής πειραμάτων

Μια εικόνα ολοκληρώνεται με την υπόδειξη και της πρακτικής πλευράς εκτός από τη θεωρητική εικόνα που έχουμε δει προηγουμένως στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έχοντας δει την οργάνωση του επεξεργαστή που προσομοιώνουμε για την έρευνα μας είναι προτιμότερο να παρατηρήσουμε τα αποτελέσματα κάποιων πειραμάτων με σκοπό να επικυρώσουμε, να απορρίψουμε και να καταλήξουμε σε γενικά συμπεράσματα. Για το λόγω αυτό πραγματοποιήθηκαν μια σειρά πειραμάτων τα οποία θα χρησιμοποιηθούν μετέπειτα στην έρευνα ως σημείο αναφοράς και σύγκρισης. Επιλέχθηκαν τέσσερα ενδεικτικά συγκριτικά μέτρησης επιδόσεως (benchmarks) τα οποία προέρχονται από τη σειρά Spec2000 Benchmarks, δύο συγκριτικά ακεραίων αριθμών (Integer) και δύο κινητής υποδιαστολής (Floating Point). Τα κριτήρια επιλογής των τεσσάρων benchmarks ήταν ο τύπος/μορφή και η τιμή των εκτελέσιμων εντολών ανά κύκλων μηχανής (IPC). Για κάθε κατηγορία από τις δύο που προανέφερα επιλέχθηκε ένα benchmark με χαμηλό IPC και ένα άλλο με υψηλή τιμή στην παράμετρο αυτή. Με αυτά τα απλά κριτήρια επιλέχθηκαν από την κατηγορία Floating Point τα benchmarks `art00.peak.ev6` και `equake00.peak.ev6` και από την κατηγορία Integer τα `crafty00.peak.ev6` και `gcc00.peak.ev6` με τα πρώτα κάθε

κατηγορίας αντίστοιχα να έχουν ψηλό IPC σε αντίθεση με τα δεύτερα της κάθε κατηγορίας που έχουν χαμηλό IPC. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με την εκτέλεση και των τεσσάρων benchmarks και την ανάληψη των αποτελεσμάτων της κάθε εκτέλεσης. Οι μονάδες που εξετάστηκαν καταγράφονται στον πιο κάτω πίνακα:

Unit	Units with power contribution	Area (mm ²)
floorplan	floorplan	64.0674
L2_left	Level 2 cache Tag/Data array L2 Miss Handler Register Clock	7.5353
L2	Level 2 cache Tag/Data array L2 Miss Handler Register Clock	38.5087
L2_right	Level 2 cache Tag/Data array L2 Miss Handler Register Clock	7.5353
Icache	Instruction Level 1 Cache Tag/Data array IL1 Line Predictor IL1 Miss Handler Register General Checkpoint Table Clock	2.0865
Dcache	Data Level 1 Cache Tag/Data array Victim Cache Tag/Data array DL1 Miss Handler Register Clock	1.9560
Bpred	Branch Prediction Return Address Stack Clock	0.5673
DTB	Data Translation Lookaside Buffer Tag/ Data array Clock	0.5738
FPAdd	Floating Point Adder/ Subtractor/ Comparator Floating Point to Integer Converter Floating Point Square Root / Result Bus Clock	0.4850
FPrege	Floating Point Register File / Result Bus Clock	0.2088
FPMul	Floating Point Multiplier/Divisor Clock	0.5190
FPMa	Floating Point Register Mapper / Freelist Reorder Buffer stWait Table Renaming Checkpoint Table Clock	0.3613
IntMa	Integer Register Mapper / Freelist Reorder Buffer stWait Table Renaming Checkpoint Table Clock	0.3208
IntQ	Integer Issue Queue Clock	0.4395
IntReg	Integer Register File/ Result Bus Clock	0.3065
IntExec	ubtractor/ Shifter Integer Condition Instructions Integer Special Instructions Integer Multiplier/ Divisor Integer Result Bus Clock	0.9963
FPQ	Floating Point Issue Queue Clock	0.3613
LdStq	Load /Store Queue Miss Address File Clock	0.3130
ITB	Instruction Translation Lookaside Buffer Tag/ Data array Clock	0.1955

Πίνακας 4.1 Εμβαδό μονάδων επεξεργαστή

4.2 Μεθοδολογία έρευνας

Η διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο ένα εργαλείο μοντελοποίησης της ισχύς και της θερμοκρασίας. Πρωταρχικός στόχος της έρευνας ήταν η λεπτομερής εκμάθηση του εργαλείου και κατανόηση της λειτουργίας του. Κατά τη διάρκεια της ενασχόλησης με την εκμάθηση του εργαλείου, πραγματοποιήθηκε παράλληλη μελέτη για τα μεγέθη ισχύς και θερμοκρασίας. Μέσα από τη μελέτη κατανοήθηκαν έννοιες οι οποίες είναι άμεσα συνδεδεμένες με τα εξεταζόμενα μεγέθη. Διεξάχθηκαν επίσης πειράματα κάνοντας χρήση του εργαλείου Atmi για επικύρωση βασικών αρχών της ισχύς και της θερμοκρασίας, πειράματα τα οποία αναλύθηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο.

Στη μετέπειτα φάση της έρευνας πραγματοποιήθηκε η πρώτη διεξαγωγή πειραμάτων της έρευνας χρησιμοποιώντας τον προσομοιωτή Sim-alpha, στον οποίο προσομοιάστηκαν μέσω εντολών πειράματα που είχαν σκοπό να παρατηρήσουν τη συμπεριφορά του επεξεργαστή δοκιμάζοντας διάφορα συγκριτικά μέτρησης επιδόσεως. Αρχικά εκτελέστηκαν πειράματα χωρίς θερμικούς περιορισμούς για να καταγράψουμε τη συμπεριφορά της θερμοκρασίας, ισχύος και δραστηριότητας των μονάδων για να χρησιμοποιηθούν αργότερα ως αναφορά στα πειράματα που έγιναν με τη χρήση περιορισμών στη θερμοκρασία. Οι περιορισμοί αυτοί ορίζονταν στην εντολή που δινόταν στο command line και διαμόρφωναν την κατάσταση κατά την οποία θα έτρεχε ο προσομοιωτής. Για τα πειράματα όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα συγκριτικά μέτρησης επίδοσης (benchmarks) από τη σειρά συγκριτικών Spec2000 benchmarks. Επιλέχτηκαν δύο ακέραιας μορφής (integer) και δύο κινητής υποδιαστολής (floating point) συγκριτικά για το λόγο ότι θα ήταν ορθότερο να παρατηρήσουμε τη συμπεριφορά που θα έχει ο προσομοιωτής και στα δύο είδη benchmarks. Τα benchmarks που επιλέχτηκαν ήταν art00.peak.ev6 , earthquake00.peak.ev6, crafty00.peak.ev6 και gcc00.peak.ev6.

Μέσα από τις παρατηρήσεις των πειραμάτων αναφοράς η πορεία της έρευνας

διαφοροποιήθηκε. Λόγω των χαμηλών τιμών της ισχύς και της θερμοκρασίας που ανέπτυξαν στις προσομοιώσεις τα τέσσερα benchmarks προχώρησα στην διεξαγωγή πειραμάτων με ψηλότερη τάση και capacitance. Λήφθηκε η απόφαση της επιλογής του συγκριτικού μέτρησης επιδόσεως με το μεγαλύτερο IPC για την εκτέλεση διαφόρων πειραμάτων ρυθμίζοντας τις τιμές του capacitance έτσι ώστε τα αποτελέσματα ισχύς και θερμοκρασίας των πειραμάτων να συμπίπτουν με τις τιμές που επιλέχθηκαν για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τα συστήματα που επιλέχθηκαν ήταν οι επεξεργαστές της οικογένειας Pentium 4 της εταιρείας Intel [8] με προδιαγραφές πανομοιότυπες με των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν οι επεξεργαστές που αναγράφονται στον πίνακα 4.2 στον οποίο αναφέρονται και κάποια από τα χαρακτηριστικά τους. Όμως μαζί με τα στοιχεία αυτά θεωρήθηκε σωστό να γίνουν κάποιοι υπολογισμοί πρόβλεψης των τιμών της ισχύος για κάθε τεχνολογία. Έτσι υπολογίστηκε για τις τεχνολογίες 45, 70 και 100 nm ότι οι προσδοκώμενες τιμές ισχύος θα ήταν 30-40, 50-60 και 70-90 αντίστοιχα.

Επιλέχθηκε το benchmark art00.peak.en6 και έγιναν πειράματα για μεγέθη τεχνολογιών 70 και 100 nm. Υπήρχε η επιθυμία αύξησης της τάσεως στα 1.3 V κάτι που επιτεύχθηκε μόνο για την τεχνολογία των 100 nm. Στην τεχνολογία των 70 nm ο προσομοιωτής δεν επέτρεπε την αύξηση της τάσεως πέρα των 0.9 V. Για αυτό το λόγω συνέχισε η ρύθμιση των τιμών του capacitance με τις τιμές τάσεως 0.9 και 1.3 V για τις τεχνολογίες 70 και 100 nm αντίστοιχα. Ρυθμίζοντας τις τιμές καταλήξαμε στις προσδοκώμενες τιμές ισχύος, γεγονός που επέτρεπε την συνέχιση των πειραμάτων με θερμικούς περιορισμούς. Χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους με προηγουμένως πραγματοποιήθηκαν πειράματα με θερμικό όριο τους 85 βαθμούς Κελσίου. Όταν μια μονάδα ξεπερνούσε το συγκεκριμένο όριο ο επεξεργαστής απενεργοποιείτο μέχρι να επέλθει η επιθυμητή κατάσταση όσον αφορά τη θερμοκρασία.

Με την ολοκλήρωση των πειραμάτων η έρευνα έφτασε σε ένα επιθυμητό στάδιο όπου μπορούσαμε να τερματίσουμε λόγω έλλειψης χρόνου και να αφιερώσουμε τον υπόλοιπο

χρόνο στη συγγραφή της έρευνας και των αποτελεσμάτων από τα πειράματα.

Processor number	Technology size	Frequency	Voltage	FSB Bus	L2 cache	Die size	Max TDP
Pentium 4 631	65 nm	3 GHz	1.200V-1.3375V	800 MHz	2 MB	81 mm ²	86 W
Pentium 4 630	90 nm	3 GHz	1.2V-1.4V	800 MHz	2 MB	135 mm ²	84 W

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά επεξεργαστών Pentium 4

4.3 Πειράματα αναφοράς

Στο παρόν υποκεφάλαιο περιγράφονται τα τέσσερα συγκριτικά μέτρησης επίδοσης που επιλέχθηκαν για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματά της κάθε προσομοίωσης όσον αφορά την ισχύ, θερμοκρασία καθώς επίσης και τη δραστηριότητα των μονάδων.

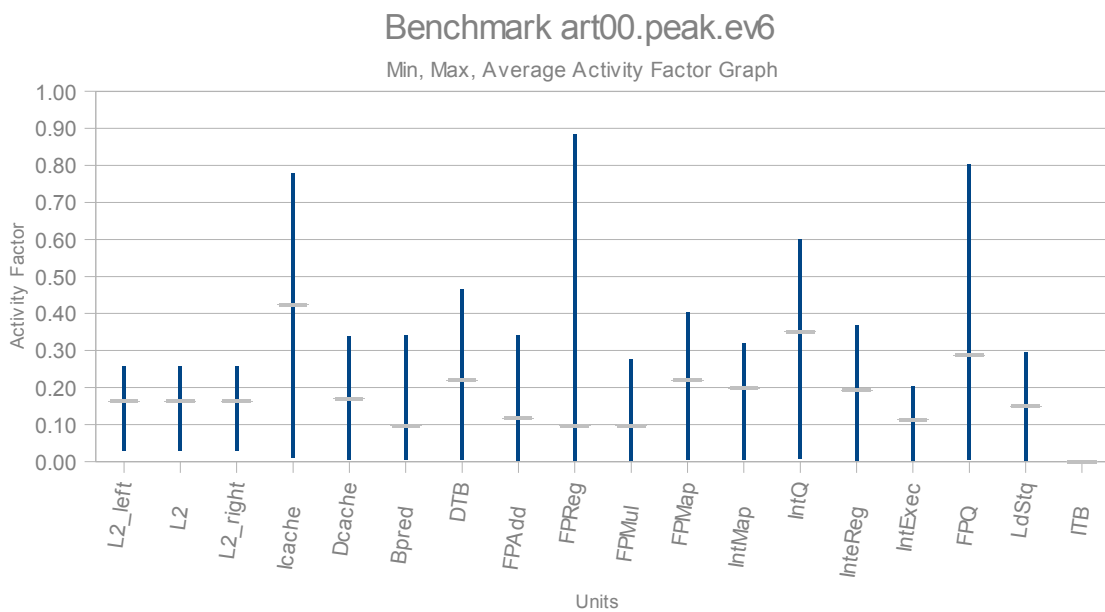
4.3.1 Αποτελέσματα συγκριτικών μέτρησης επίδοσης κινητής υποδιαστολής (Floating Point Benchmarks)

art00.peak.ev6

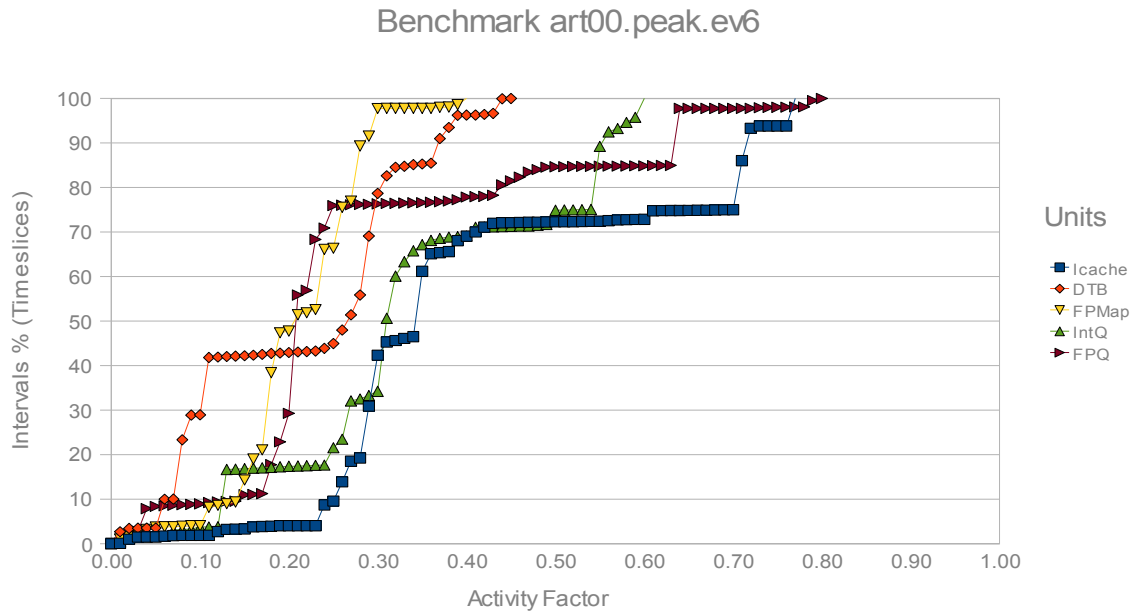
IPC = 1.9072

Το συγκριτικό μέτρησης επίδοσης art00.peak.ev6 (Adaptive Resonance Theory 2) υλοποιεί ένα νευρωνικό δίκτυο το οποίο χρησιμοποιείται για την αναγνώριση αντικειμένων σε μια θερμική εικόνα. Τα αντικείμενα που χρησιμοποιούνται για εκπαίδευση είναι ένα ελικόπτερο και ένα αεροπλάνο. Αρχικά το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται με τα αντικείμενα που εισάγονται για εκπαίδευση. Ακολούθως όταν ολοκληρωθεί η εκπαίδευση,

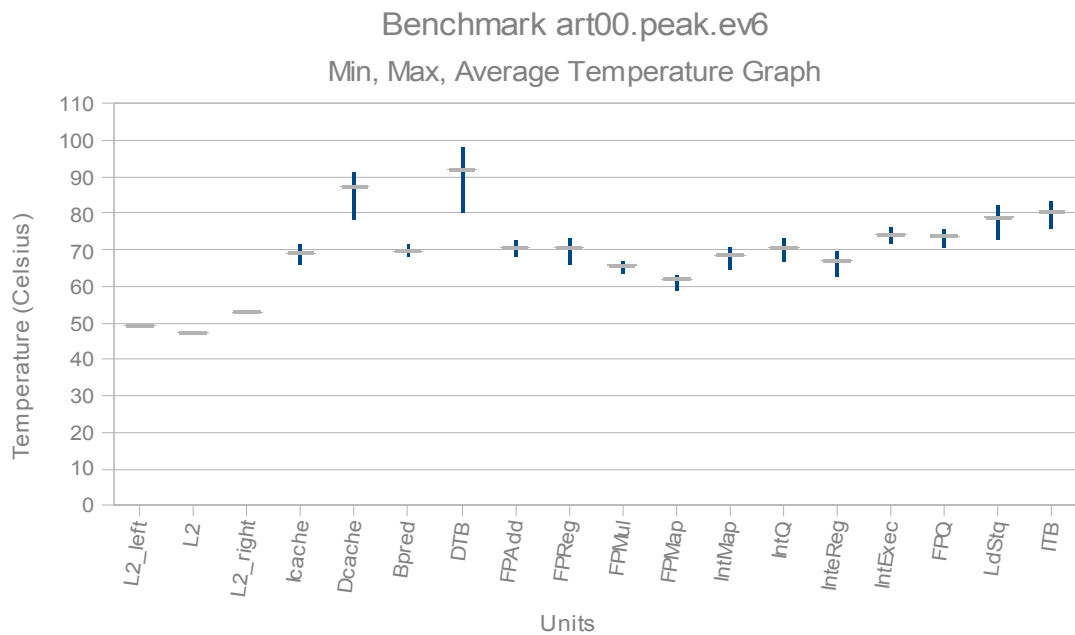
οι εικόνες που έμαθε το δίκτυο βρίσκονται σε ένα αρχείο. Ένα παράθυρο αντίστοιχου μεγέθους των εκπαιδευόμενων αντικειμένων ανιχνεύει κατά μήκος του αρχείου που περιέχει τα αντικείμενα που έμαθε το δίκτυο. Το συγκεκριμένο αρχείο χρησιμοποιείται σαν είσοδος στο δίκτυο το οποίο προσπαθεί να αντιστοιχίσει τις εικόνες του παραθύρου με τις εκπαιδευμένες εικόνες. Τα αποτελέσματα εξόδου περιέχουν την αντιστοιχία μεταξύ των εικόνων εκπαίδευσης και το οπτικό πεδίο του παραθύρου. Επίσης εκτυπώνονται τα αποτελέσματα κάθε νευρώνα. Μετά την ολοκλήρωση της ανίχνευσης το οπτικό πεδίο που είχε την καλύτερη αντιστοιχία εκτυπώνεται.



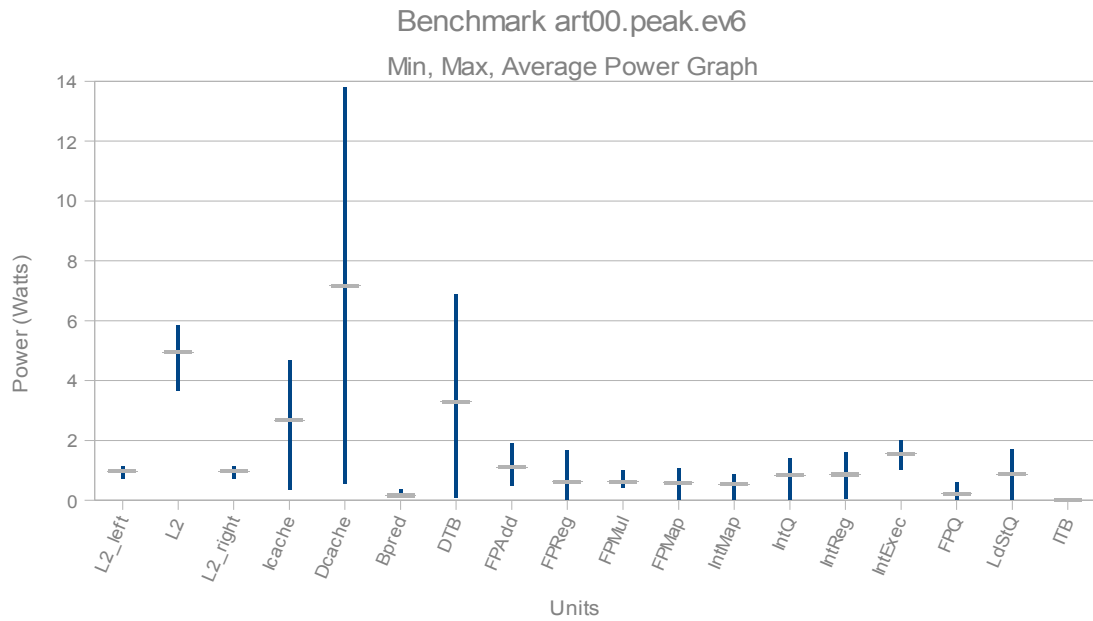
Σχήμα 4.1 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής παράγοντα δραστηριότητας (Activity Factor)



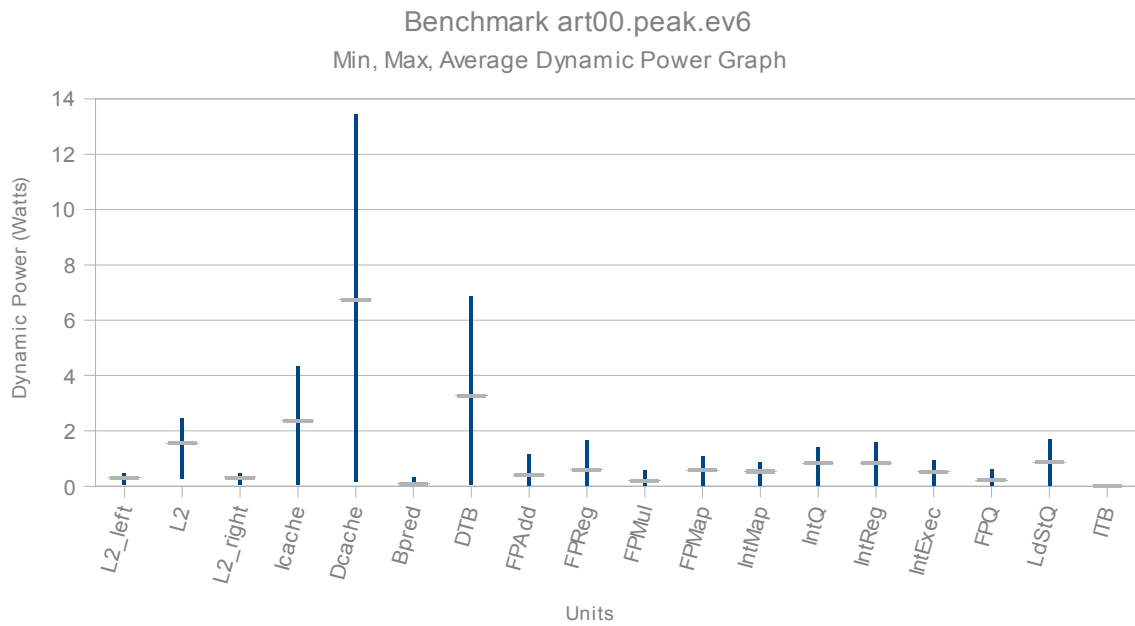
Σχήμα 4.2 Γραφική παράσταση παράγοντα δραστηριότητας (Activity Factor) συναρτήσει της ποσοστιαίας χρονικής εκτέλεσης του Benchmark.



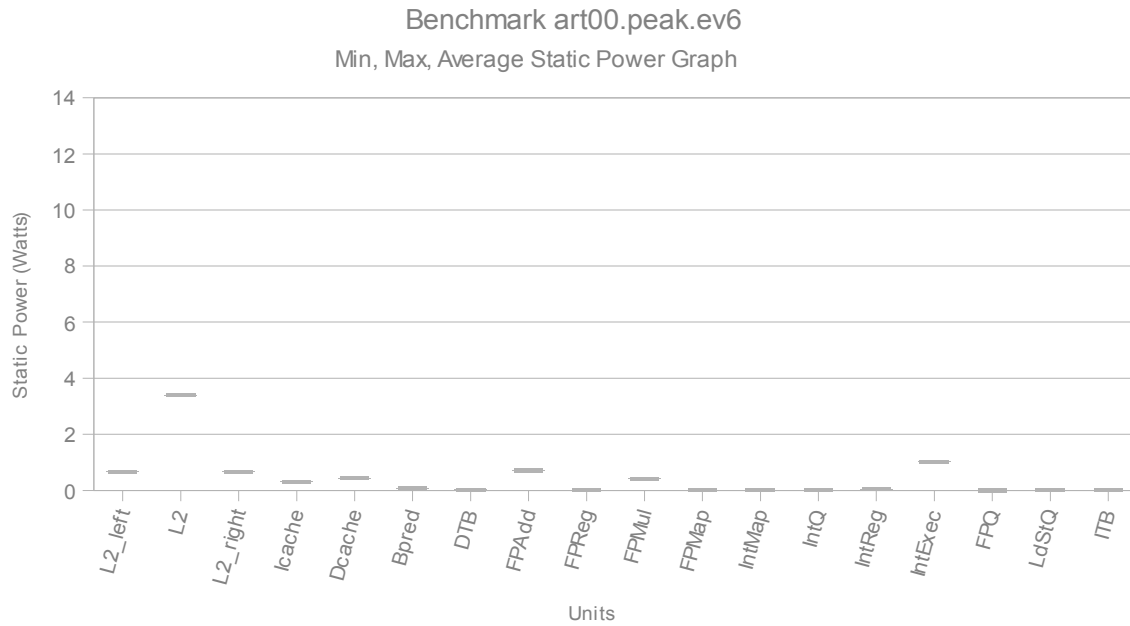
Σχήμα 4.3 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας



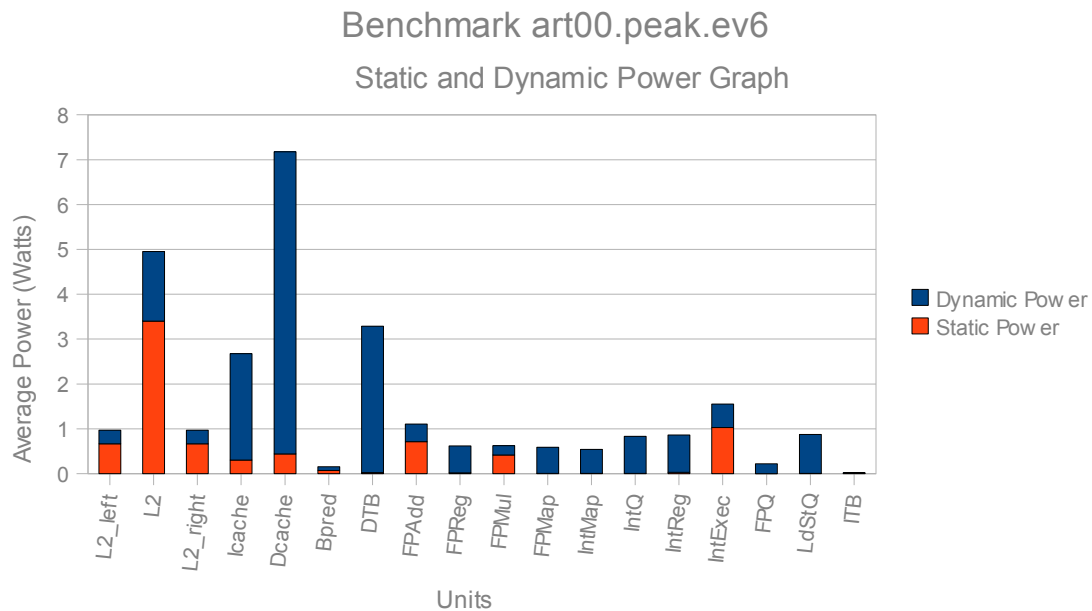
Σχήμα 4.4 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής της ισχύος



Σχήμα 4.5 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής της δυναμικής ισχύος



Σχήμα 4.6 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής της στατικής ισχύος

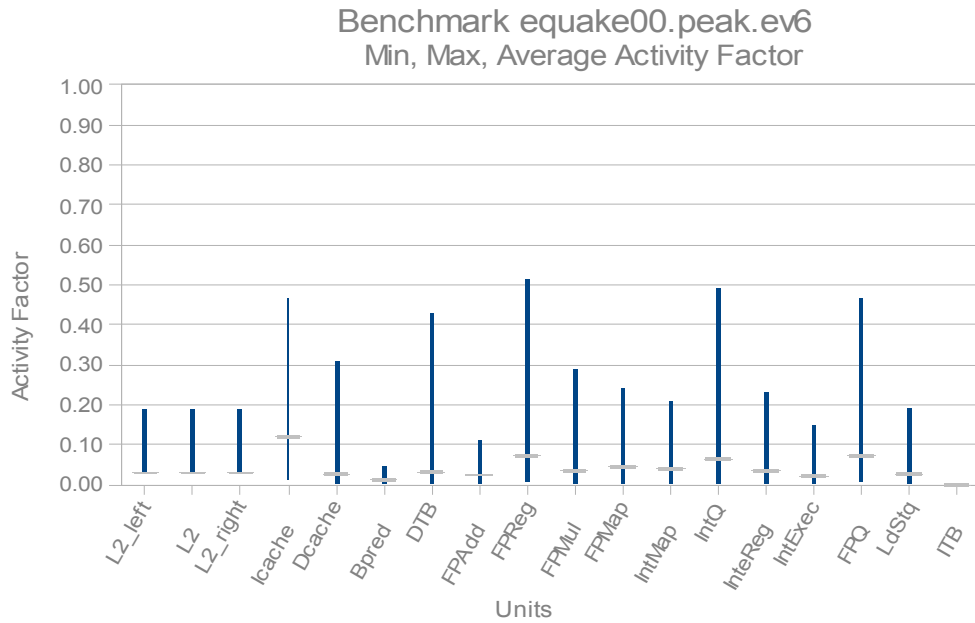


Σχήμα 4.7 Γραφική παράσταση μέσου όρου της στατικής και δυναμικής ισχύος

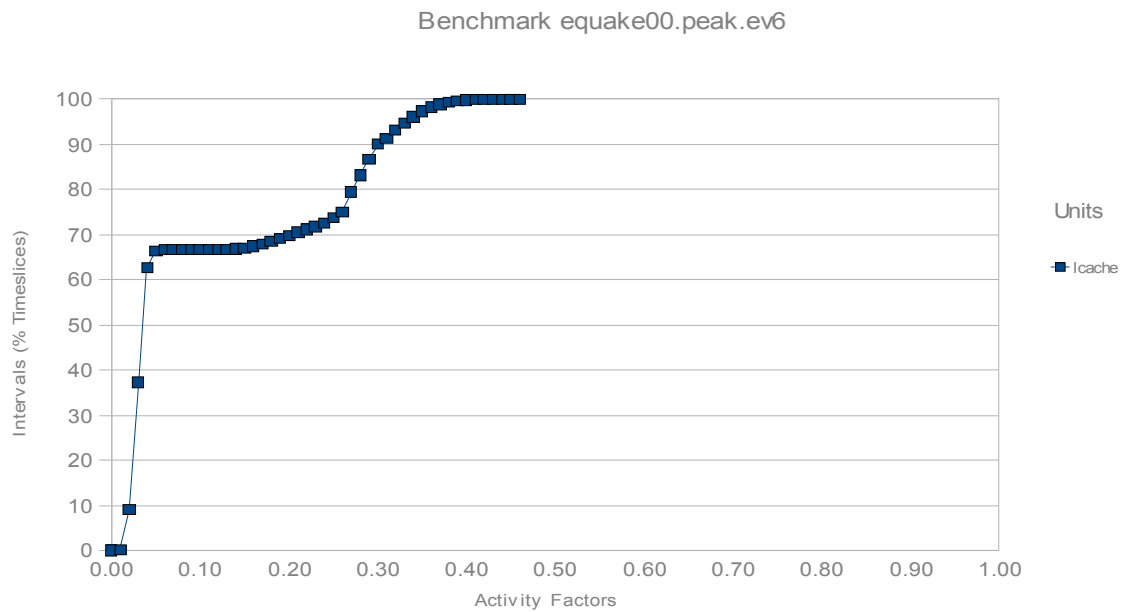
equake00.peak.ev6

IPC = 0.3776

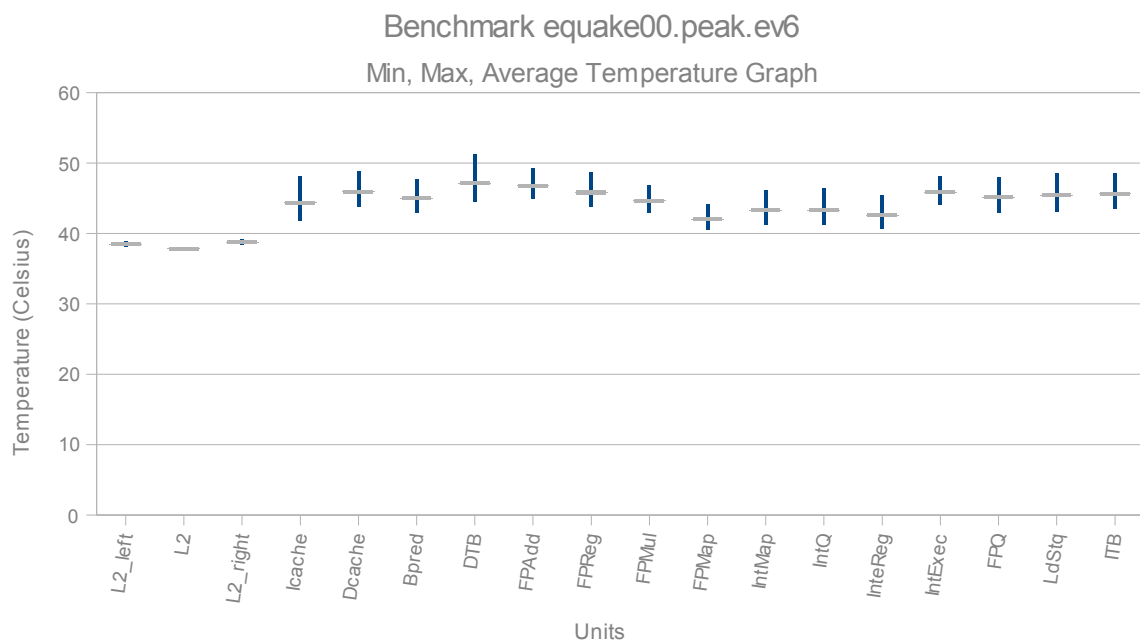
Το πρόγραμμα προσομοιώνει τη διάδοση των ελαστικών κυμάτων σε μεγάλες σε έκταση και ιδιαίτερα ετερογενείς κοιλάδες όπως της California's San Fernando ή της the Greater Los Angeles Basin. Ο στόχος του προγράμματος είναι η ανάκτηση της χρονική ιστορίας της επίγειας κίνησης μέσα στην κοιλάδα λόγω ενός συγκεκριμένου σεισμικού γεγονότος. Οι υπολογισμοί εκτελούνται σε ένα μη δομημένο πλέγμα που επιλύει τοπικά τα μήκη κύματος, χρησιμοποιώντας μια πεπερασμένη μέθοδο στοιχείων. Τα δεδομένα εισόδου περιλαμβάνουν τη μη δομημένη τοπολογία πλέγματος, δηλαδή τον αριθμό των κόμβων, τον αριθμό tetrahedral στοιχείων, των συντεταγμένων του κάθε κόμβου, και συνδεσιμότητας στοιχείων, τα σεισμικά χαρακτηριστικά ενός γεγονότος, δηλαδή τη διάρκεια και τις σεισμικές λεπτομέρειες της πηγής όπως υλικές ιδιότητες, και τη δομή της αραιής μήτρας συστημάτων. Το υπάρχον πρόβλημα αναφοράς είναι η προσομοίωση του σεισμού Northridge του 1994 aftershock στο San Fernando Valley νότιας Καλιφόρνιας. Το αρχείο εξόδου περιέχει μια περίληψη της υπόθεσης με δεδομένα της σεισμικής πηγής και κάνει αναφορά στην κίνηση (μετατοπίσεις) του υπόκεντρου και επίκεντρου ενός σεισμού για να προκαθοριστεί ο αριθμός των timesteps της προσομοίωσης.



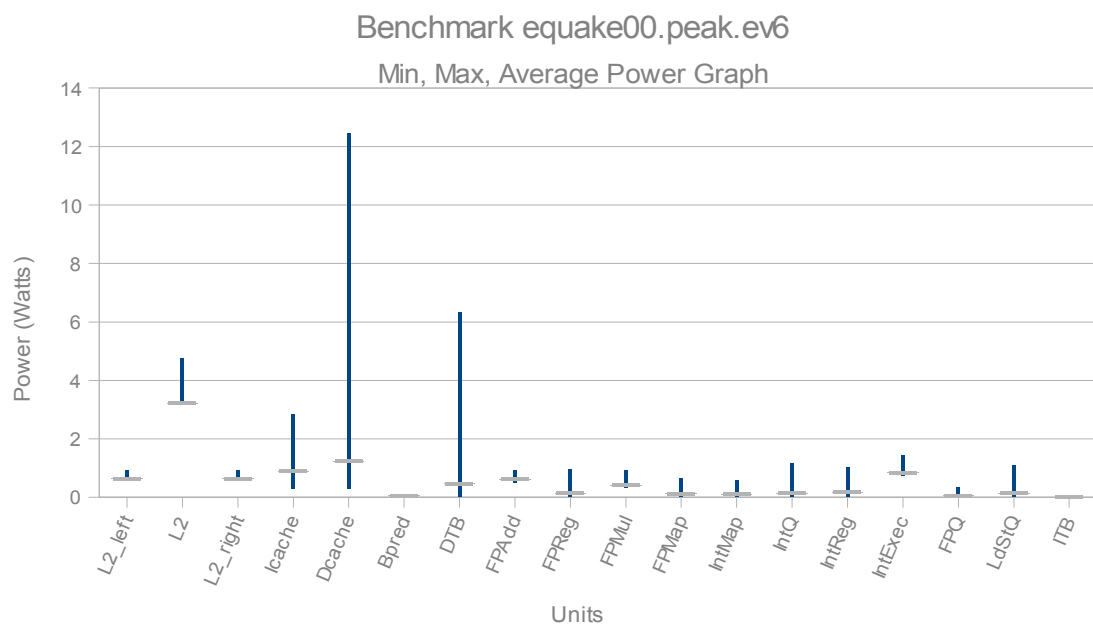
Σχήμα 4.8 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής παράγοντα δραστηριότητας (Activity Factor)



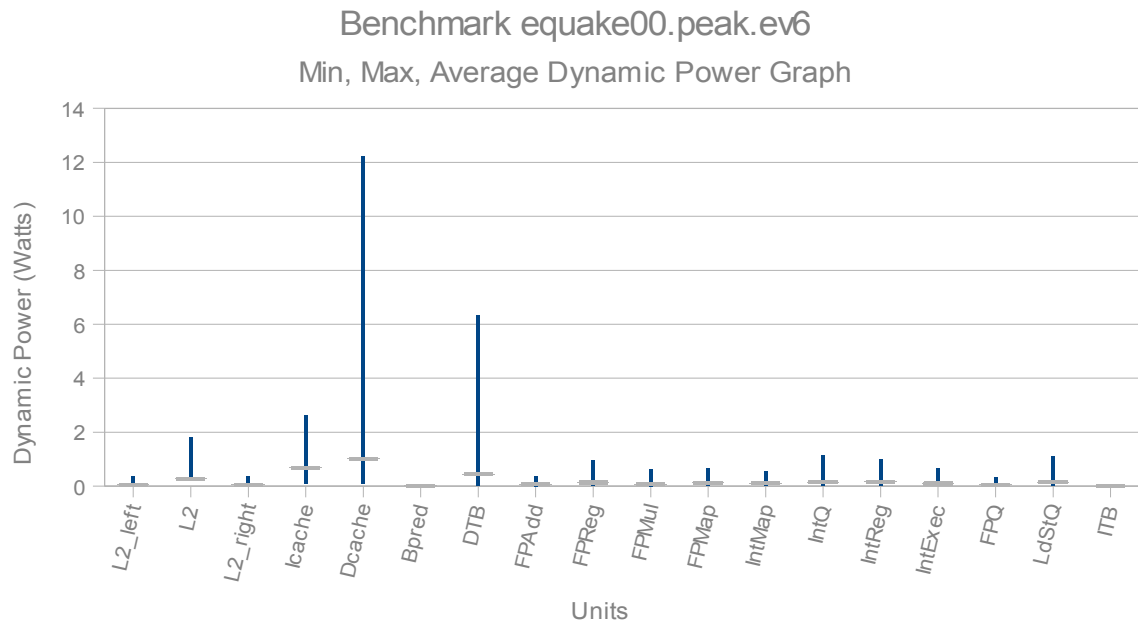
Σχήμα 4.9 Γραφική παράσταση παράγοντα δραστηριότητας (Activity Factor) συναρτήσει της ποσοστιαίας χρονικής εκτέλεσης του Benchmark.



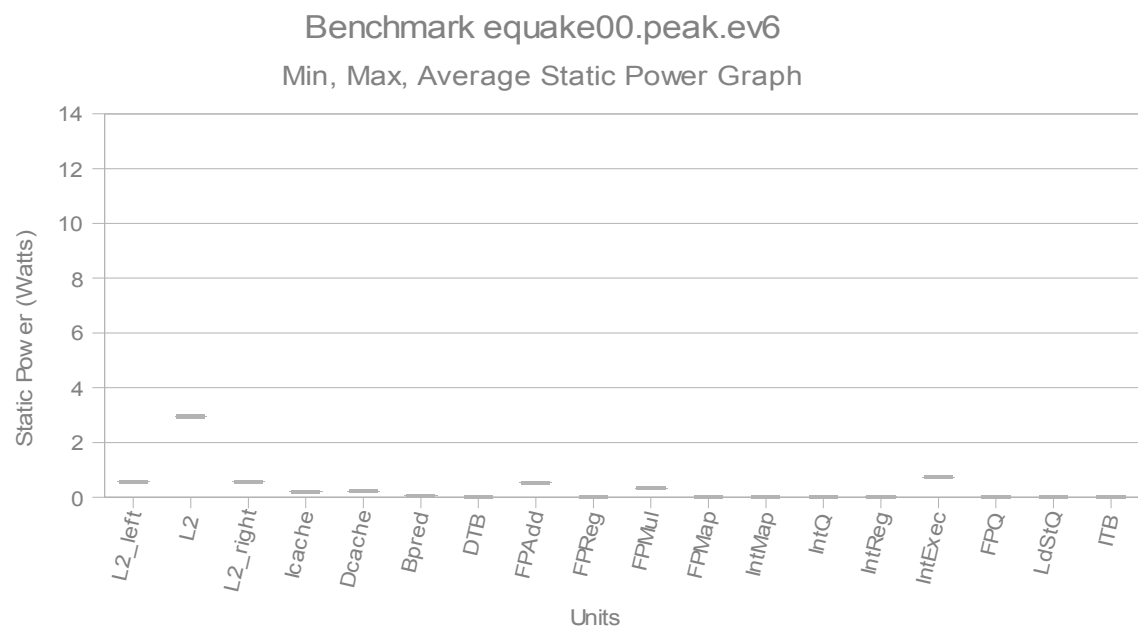
Σχήμα 4.10 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας



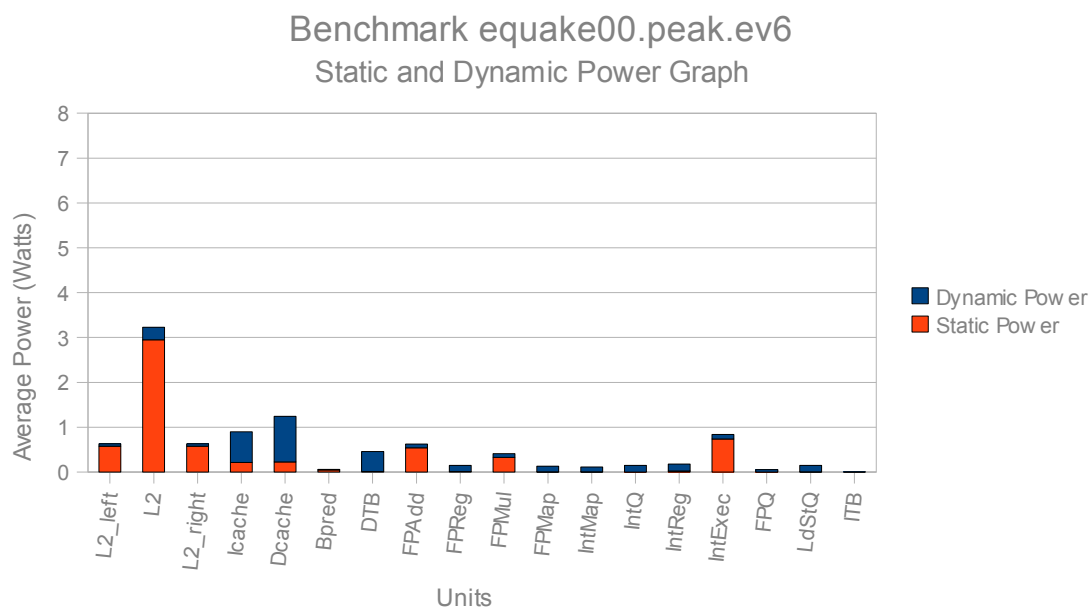
Σχήμα 4.11 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής της ισχύος



Σχήμα 4.12 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής της δυναμικής ισχύος



Σχήμα 4.13 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής της στατικής ισχύος



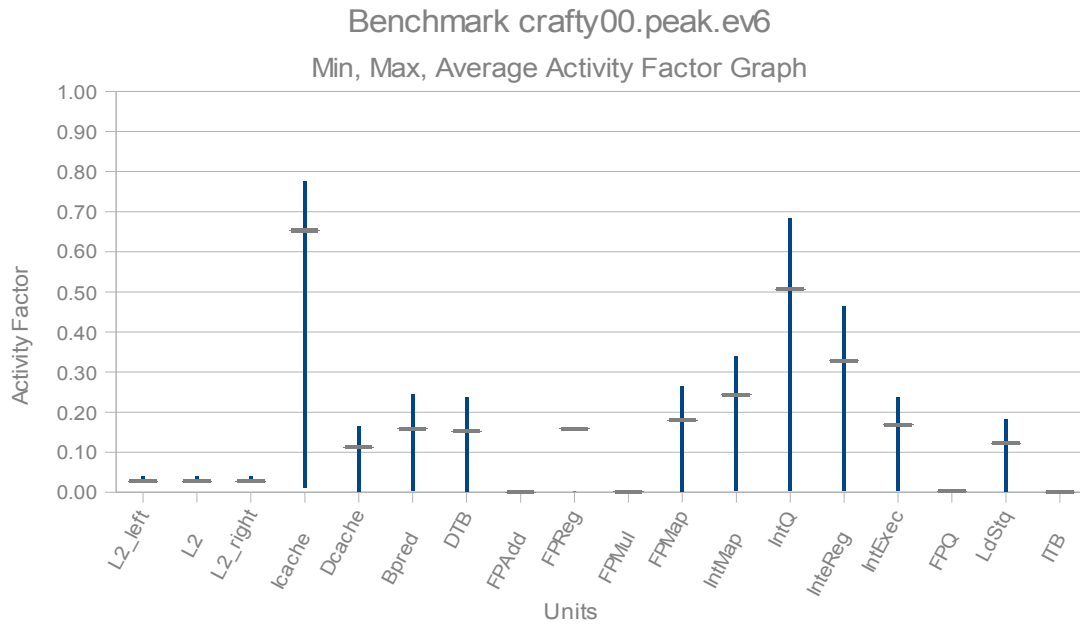
Σχήμα 4.14 Γραφική παράσταση μέσου όρου δυναμικής και στατικής ισχύος

4.2.2 Αποτελέσματα συγκριτικών μέτρησης επίδοσης ακεραίων (Integer Benchmarks)

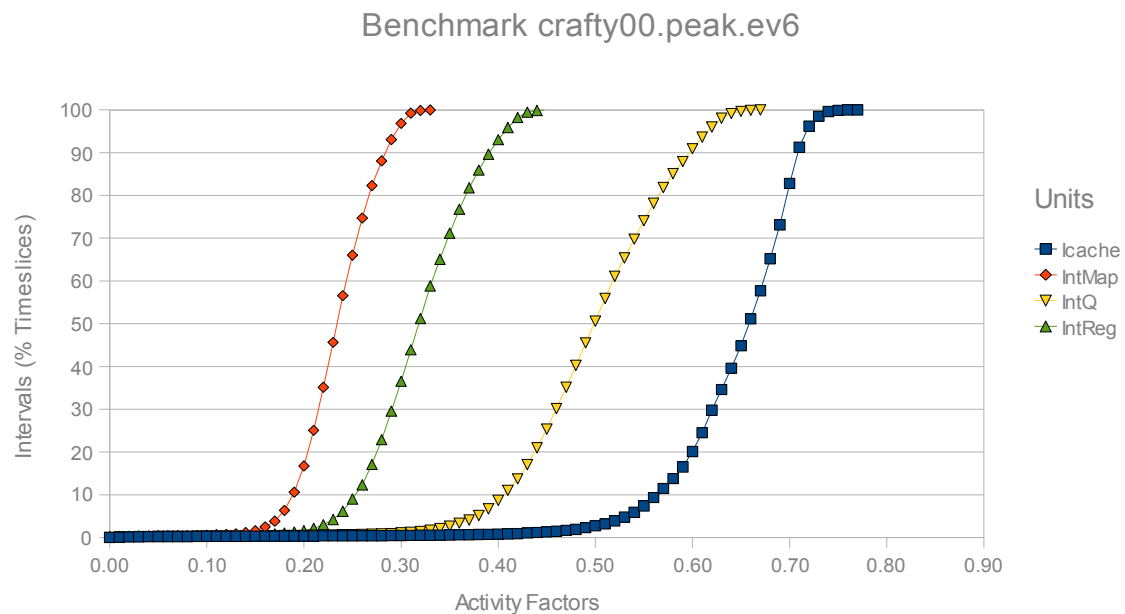
crafty00.peak.ev6

IPC = 1.7267

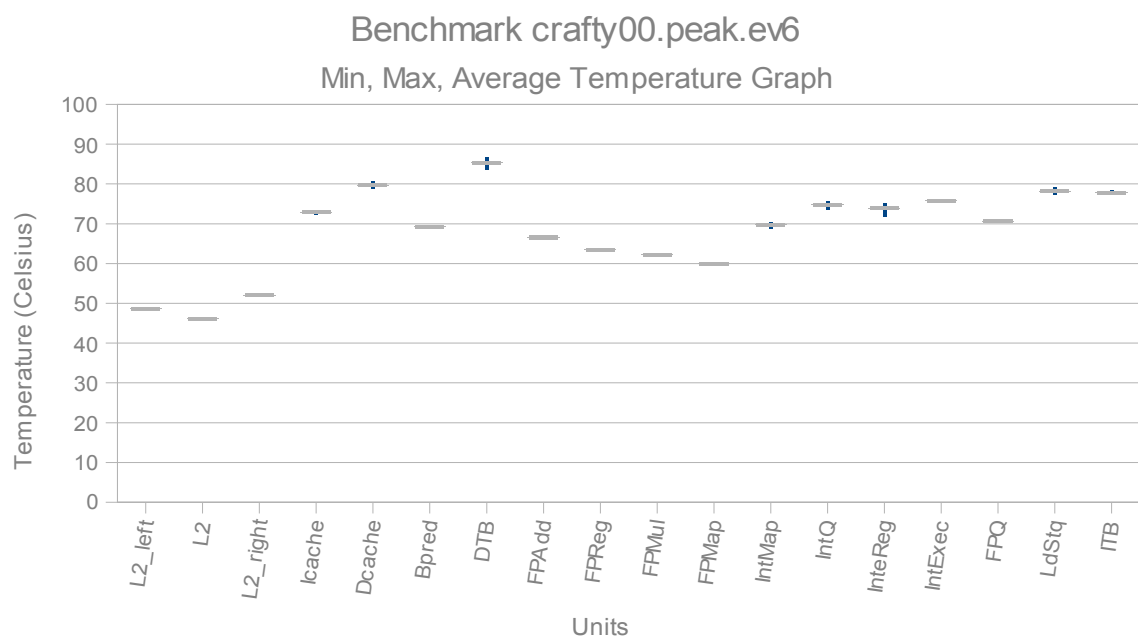
Το crafty είναι ένα υψηλής απόδοσης πρόγραμμα υλοποίησης ενός ηλεκτρονικού παιχνιδιού σκακιού το οποίο είναι σχεδιασμένο γύρω από μια 64bit λέξη. Τρέχει σε 32 bit μηχανές χρησιμοποιώντας τον τύπο δεδομένων “long long”. Είναι πρώτιστα ένας κώδικας ακεραίων αριθμών ο οποίος περιέχει ένα σημαντικό αριθμό λογικών λειτουργιών όπως and, or, exclusive or και shift. Μπορεί να διαμορφωθεί για να τρέξει ένα αναπαραγόμενο σύνολο αναζητήσεων για να συγκρίνει τις μονάδες ακεραίων αριθμών/πρόβλεψης εντολών διακλάδωσης/διασωλήνωσης ενός επεξεργαστή. Η εισαγωγή αναφοράς επιλύει πέντε διαφορετικά σχεδιαγράμματα σκακίρας τα οποία περιέχουν μια ποικιλία από “depths” μέσα από τα οποία θα διερευνηθεί το δέντρο με τις πιθανές κινήσεις για την επιλογή της επόμενης κίνησης. Η έξοδος του προγράμματος περιέχει το σύνολο των πιθανών κινήσεων σε κάθε επίπεδο του δέντρου με τις πιθανές κινήσεις μέχρι το μέγιστο προκαθορισμένο βάθος από την παράμετρο εισόδου. Σε κάθε επίπεδο η πιθανή κίνηση επιλέγεται για να εκκινήσει την έρευνα στο επόμενο επίπεδο.



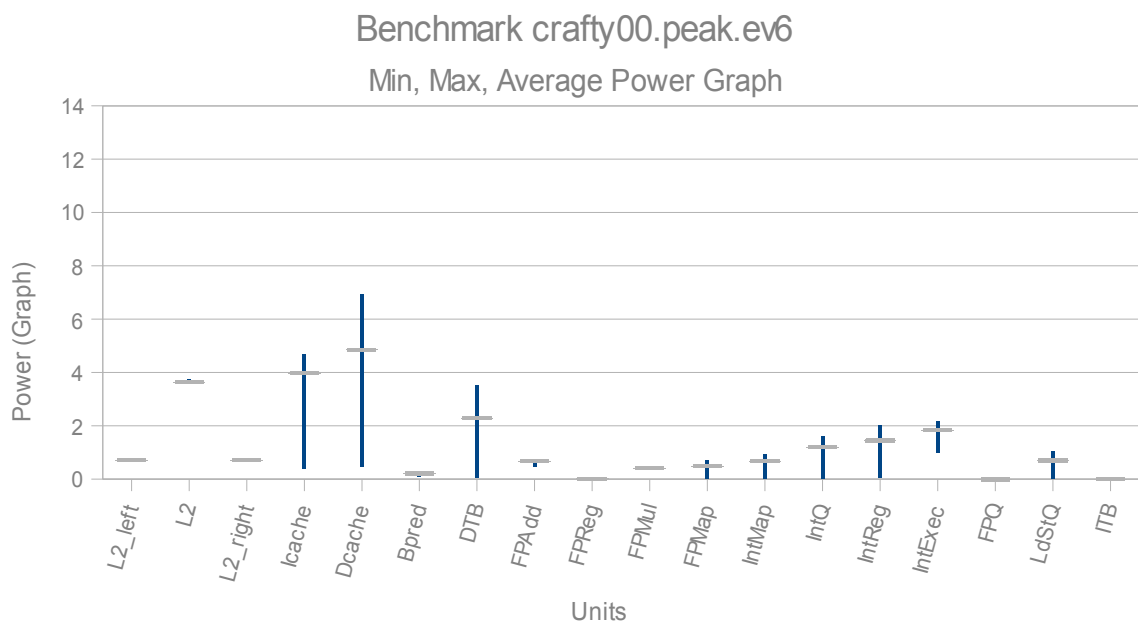
Σχήμα 4.15 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής του παράγοντα δραστηριότητας (Activity Factor)



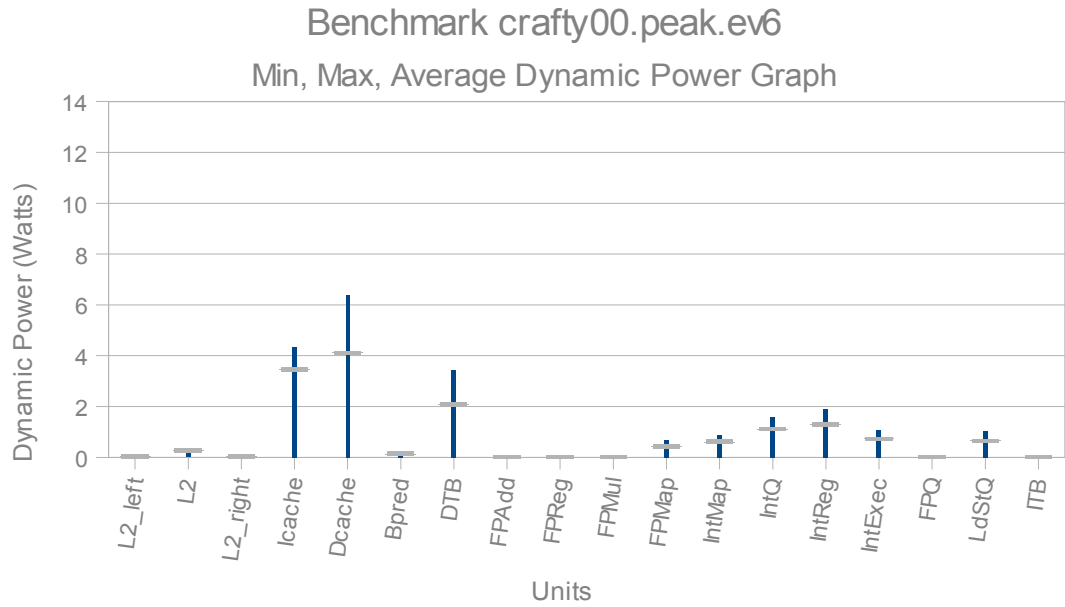
Σχήμα 4.16 Γραφική παράσταση παράγοντα δραστηριότητας (Activity Factor) συναρτήσει της ποσοστιαίας χρονικής εκτέλεσης του Benchmark.



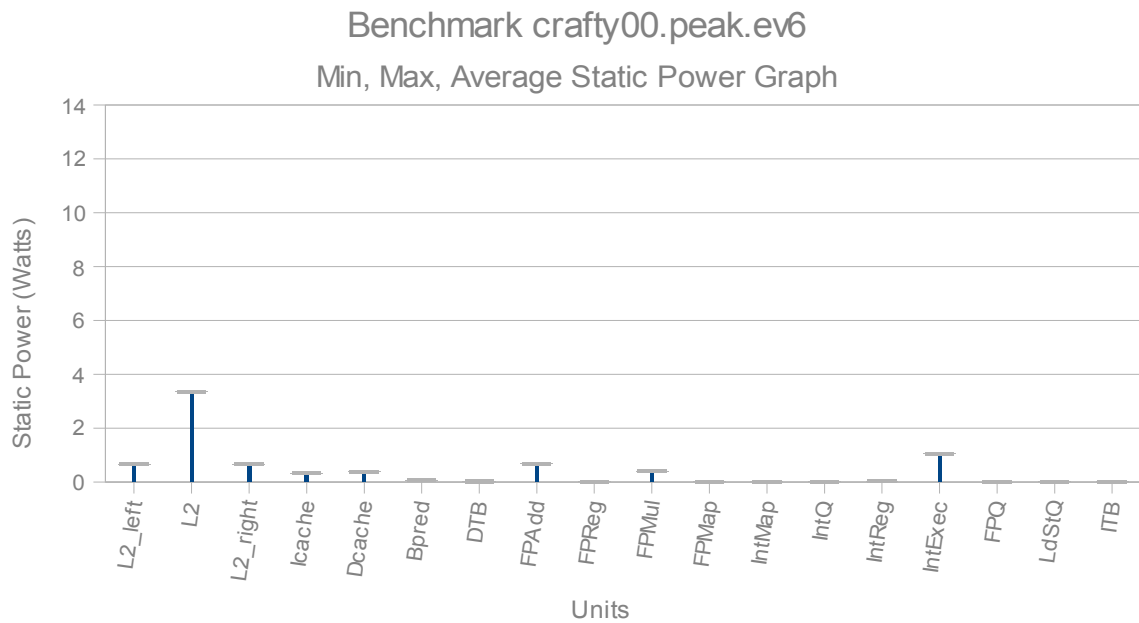
Σχήμα 4.17 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας



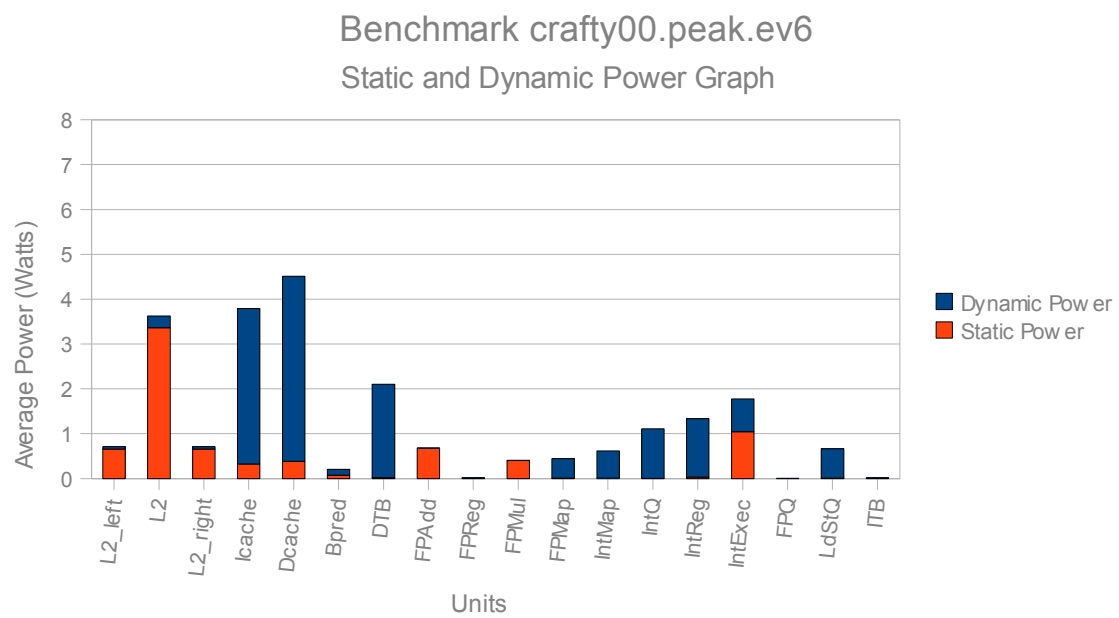
Σχήμα 4.18 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής της ισχύς



Σχήμα 4.19 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής της δυναμικής ισχύς



Σχήμα 4.20 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής της στατικής ισχύς

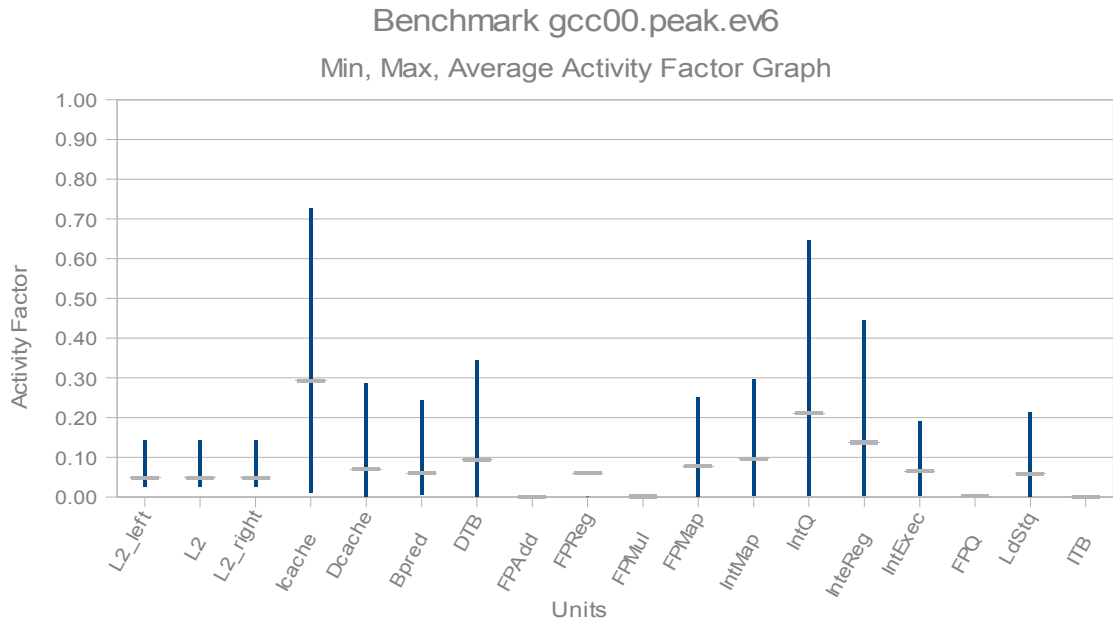


Σχήμα 4.21 Γραφική παράσταση μέσου όρου της στατικής και δυναμικής ισχύς

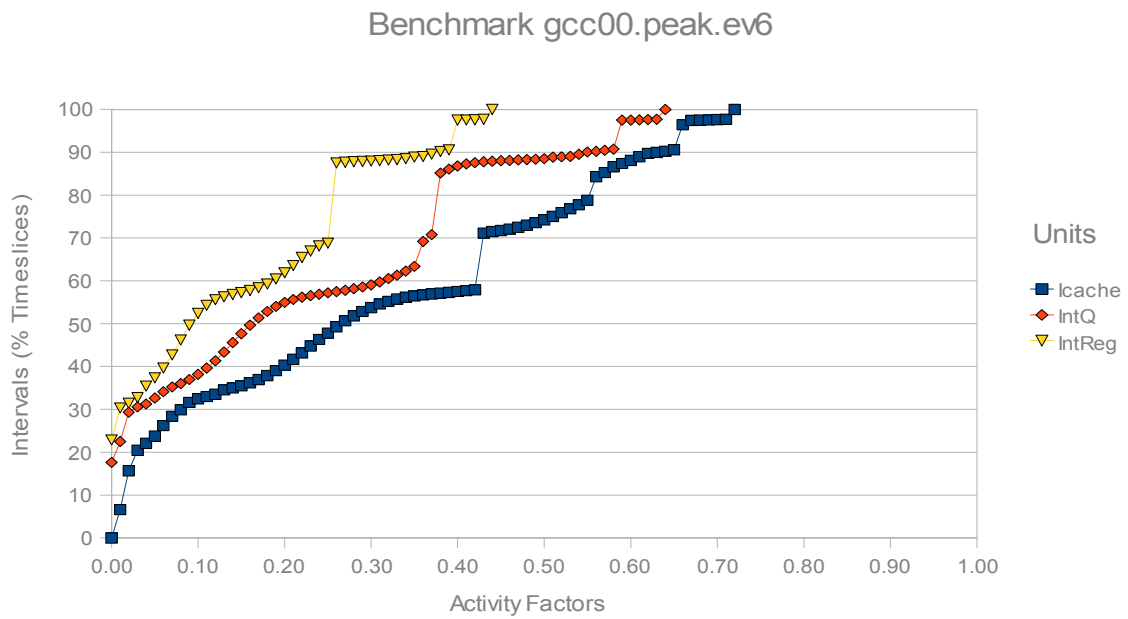
gcc00.peak.ev6

IPC = 0.8220

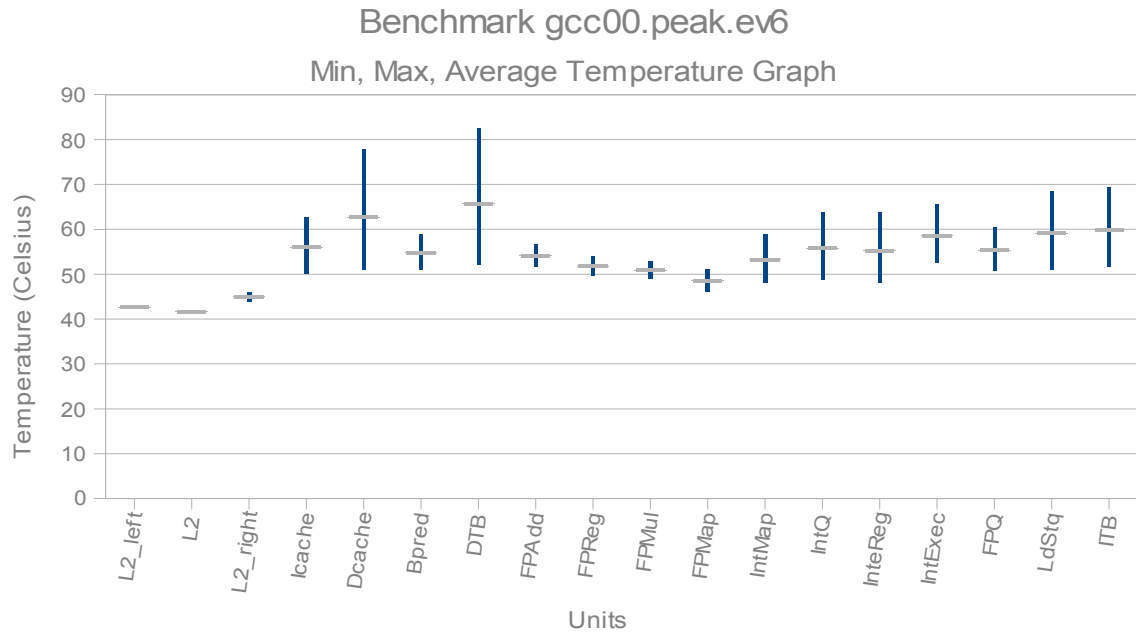
Το πρόγραμμα βασίζεται στην έκδοση 2.7.2.2 του gcc μεταγλωττιστή και παράγει κώδικα για τον Motorola 88100 επεξεργαστή. Το συγκριτικό μέτρησης απόδοσης που εξετάζεται εδώ τρέχει ως ένας μεταγλωττιστής με τις επιτρεπόμενες σημαίες βελτιστοποίησης. Για να μπορέσει το πρόγραμμα να ξοδεύει περισσότερο χρόνο αναλύοντας τις εισόδους του πηγαίου κώδικα και χρησιμοποιώντας περισσότερη μνήμη έγιναν κάποιες αλλαγές στα inlining ευρετικά με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια πιο χαρακτηριστική εικόνα της χρήσης του μεταγλωττιστή. Χωρίς την αλλαγή αυτή το συγκριτικό μέτρησης απόδοσης gcc θα πραγματοποιούσε λιγότερη ανάλυση και θα χρειαζόταν να εισαχθεί περισσότερος φόρτος εργασίας για την επίτευξη των προαπαιτούμενων χρόνων για την κατηγορία συγκριτικών μέτρησης απόδοσης SPECint2000. Ως είσοδο δίνονται πέντε διαφορετικοί φόρτοι εργασίας τα οποία αρχεία αποτελούνται από προεπεξεργασμένο κώδικα γλώσσας προγραμματισμού C και ως έξοδο αρχεία με 88100 κώδικα Assembly.



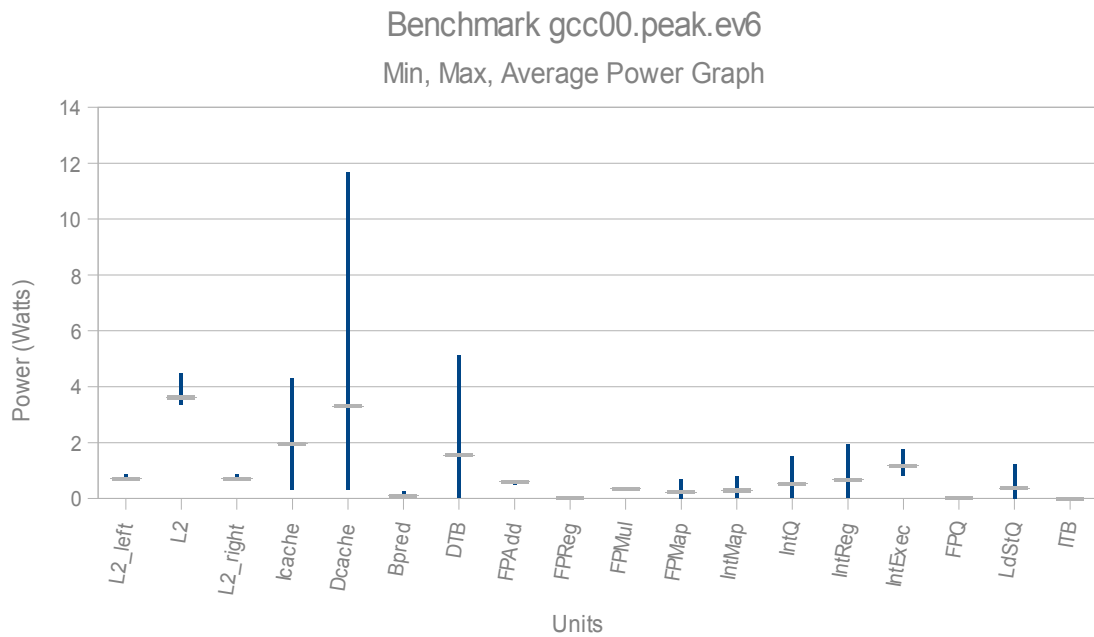
Σχήμα 4.22 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής του παράγοντα δραστηριότητας (Activity Factor)



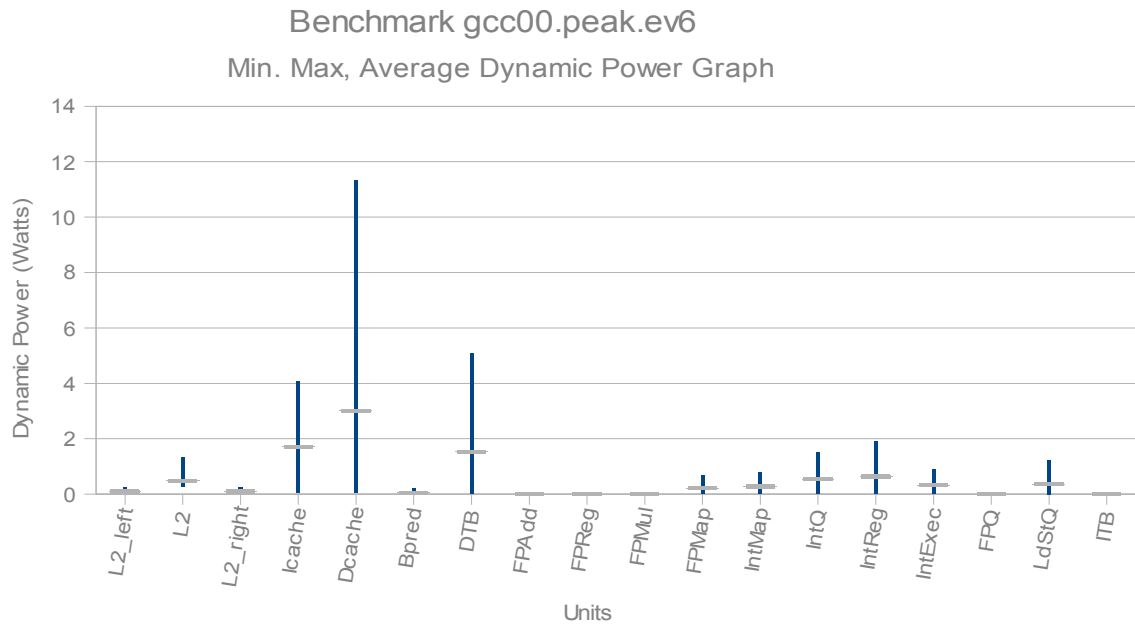
Σχήμα 4.23 Γραφική παράσταση παράγοντα δραστηριότητας (Activity Factor) συναρτήσει της ποσοστιαίας χρονικής εκτέλεσης του Benchmark.



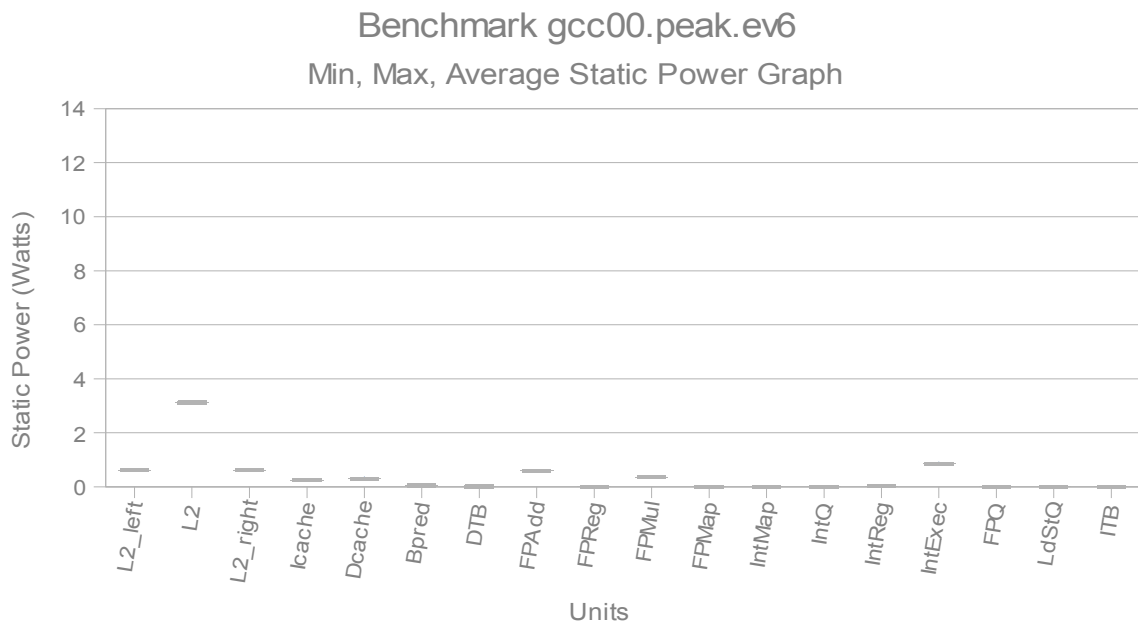
Σχήμα 4.24 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας



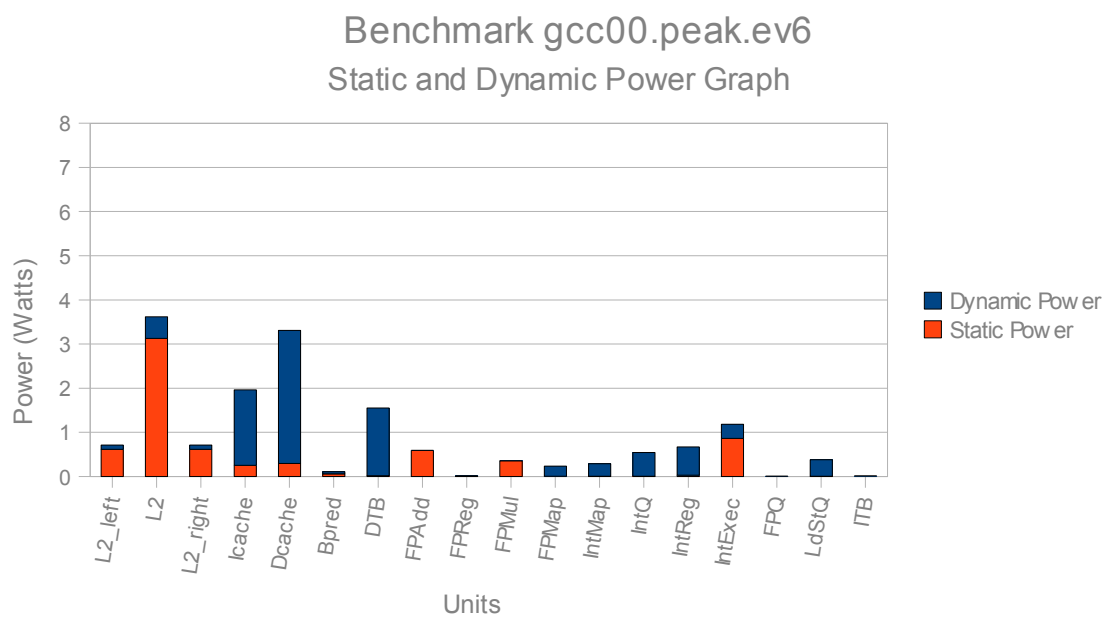
Σχήμα 4.25 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής της ισχύς



Σχήμα 4.26 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής της δυναμικής ισχύς



Σχήμα 4.27 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής της στατικής ισχύς



Σχήμα 4.28 Γραφική παράσταση μέσω του όρου της στατικής και δυναμικής ισχύος

4.4 Συνοπτικά συμπεράσματα πειραμάτων

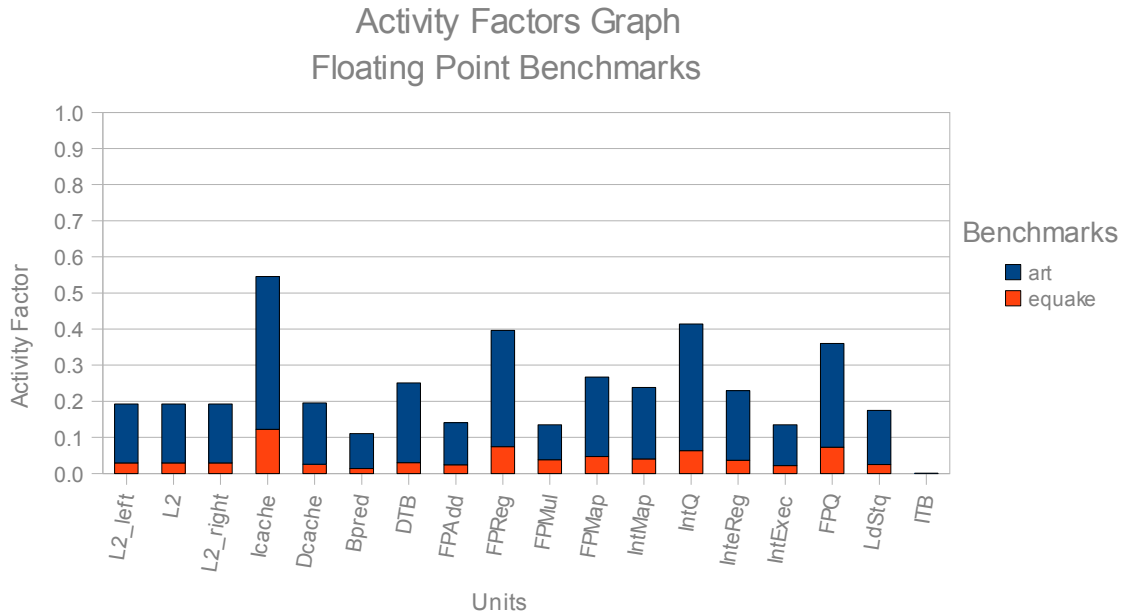
Μέσα από τη μελέτη των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων των τεσσάρων συγκριτικών μέτρησης επίδοσεως παρουσιάστηκε η ευκαιρία παρακολούθησης της συμπεριφοράς και των τεσσάρων όσον αφορά την θερμοκρασία, την ισχύ που αναπτύσσεται καθώς και τη δραστηριότητα των μονάδων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Τα αρχικά αυτά πειράματα πραγματοποιήθηκαν για να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα ως αναφορά σε μετέπειτα στάδιο της έρευνας. Για το λόγο αυτό δεν χρησιμοποιήθηκαν περιορισμοί στα μεγέθη που εξετάστηκαν με σκοπό να δημιουργηθεί μια ξεκάθαρη εικόνα του προσομοιωτή και κατ' επέκταση να εξετάσουμε την πιθανότητα μη συμβατικότητας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τις τιμές που παίρνουμε από αληθινά συστήματα έτσι ώστε να προβούμε σε αλλαγές για να γίνει πιο έγκυρος ο προσομοιωτής.

Τα κριτήρια επιλογής της μορφής των πειραμάτων είχαν να κάνουν με την προσπάθεια να παρακολουθήσουμε τις διαφορές στην συμπεριφορά των συγκριτικών μέτρησης της επίδοσης. Επικεντρώθηκαν στις διαφορές που παρουσιάζονται όσον αφορά την ισχύ και θερμοκρασία καθώς και τη δραστηριότητα που θα ανέπτυσαν οι μονάδες στις διαφορετικές περιπτώσεις. Στις περιπτώσεις με ψηλό αριθμό εκτελέσιμων εντολών ανά κύκλο (IPC) αναμένεται να παρουσιαστεί ψηλότερη θερμοκρασία και ισχύς καθώς και μεγαλύτερη δραστηριότητα στις μονάδες. Διαφορές στις δραστηριότητες των μονάδων παρουσιάζονται και λόγω της φύσης των συγκριτικών μέτρησης επίδοσης (ακέραιοι ή κινητής υποδιαστολής αριθμοί). Έτσι ανάλογα με τη φύση του κάθε συγκριτικού μέτρησης επίδοσης οι αντίστοιχες μονάδες έχουν συνήθως αναπτύξει μεγαλύτερη δραστηριότητα και ακολούθως μεγαλύτερη ισχύ και θερμοκρασία. Αντίθετα τα συγκριτικά μέτρησης επίδοσης με μικρό αριθμό εκτελέσιμων εντολών ανά κύκλο δεν αναπτύσσουν ψηλές τιμές στα εξεταζόμενα μεγέθη (ισχύς, θερμοκρασία, δραστηριότητα μονάδων).

Η εξέταση των αποτελεσμάτων έγινε αρχικά με κριτήριο τη μορφή των συγκριτικών μέτρησης επίδοσης δηλαδή πραγματοποιήθηκε σύγκριση των δύο συγκριτικών κινητής

υποδιαστολής και των δύο ακεραίων συγκριτικών ξεχωριστά με άξονα σύγκρισης τον αριθμό εκτελέσιμων εντολών ανά κύκλο που αντιστοιχεί σε κάθε συγκριτικό.

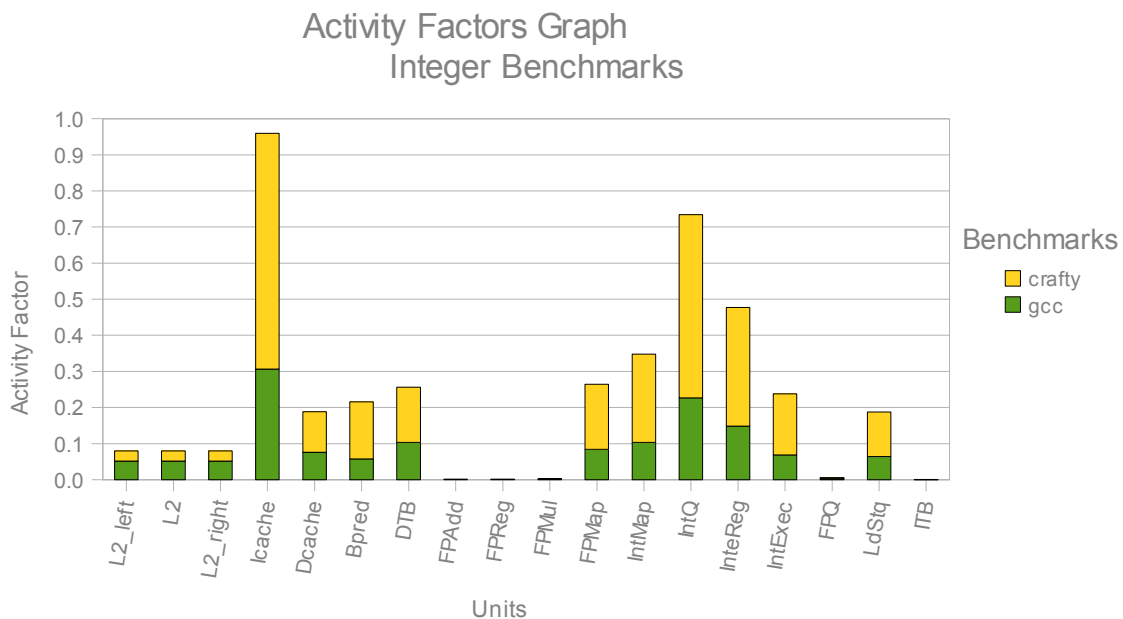
Το σχήμα 4.29 παρουσιάζει τη δραστηριότητα της κάθε μονάδας του επεξεργαστή δηλαδή το ποσοστό χρήσης της κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης των δύο συγκριτικών κινητής υποδιαστολής. Όπως παρατηρείται λόγω του μεγαλύτερου αριθμού εκτελέσιμων εντολών ανά κύκλο (IPC) το συγκριτικό `art00.peak.en6` έχει μεγαλύτερη δραστηριότητα σε όλες τις μονάδες του επεξεργαστή σε σχέση με το συγκριτικό `equake00.peak.en6`. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το `equake00.peak.en6` παρουσιάζει μεγαλύτερο αριθμό λανθασμένων προβλέψεων σε εντολές διακλάδωσης με αποτέλεσμα να συμβαίνουν περισσότερα αδειάσματα (flushes) στην διασωλήνωση, προκαλώντας μεγαλύτερη καθυστέρηση στην εκτέλεση των εντολών του προγράμματος. Ο αριθμός των εντολών που αποτελούν ένα μπλοκ εντολών διακλάδωσης είναι μεγαλύτερος και έτσι λόγω των πολλαπλών λανθασμένων προβλέψεων το τίμημα πληρώνεται στον μειωμένο αριθμό των εντολών που εκτελούνται ανά κύκλο. Επίσης παρατηρείται αυξημένος αριθμός κλήσεων συναρτήσεων με αποτέλεσμα να φορτώνεται με συνεχείς εισόδους και εξόδους η στοίβα επιστροφής διευθύνσεων (return address stack). Ο χαμηλότερος βαθμός δραστηριότητας του δευτέρου επιπέδου μνήμης (L2 cache) οφείλεται στον μεγάλο αριθμό αποτυχιών διαβάσματος ή γραψίματος σε αυτήν με αποτέλεσμα η μετάβαση στο επόμενο επίπεδο μνήμης δηλαδή στην κύρια μνήμη προσθέτει επιπλέον καθυστέρηση στην εκτέλεση των εντολών διότι ξοδεύεται χρόνος για να μεταφερθούν τα δεδομένα από την κύρια μνήμη στα πιο πάνω επίπεδα για επεξεργασία.



Σχήμα 4.29 Γραφική παράσταση δραστηριοτήτων κάθε μονάδας του επεξεργαστή για τα συγκριτικά μέτρησης επίδοσης κινητής υποδιαστολής

Όπως και προηγουμένως στην επόμενη γραφική παράσταση απεικονίζεται η δραστηριότητα της κάθε μονάδας για τα συγκριτικά ακεραίων πράξεων `crafty0.peak.ev6` και `equake00.peak.ev6`. Το συγκριτικό `equake00.peak.ev6` με το χαμηλότερο αριθμό εκτελέσιμων εντολών ανά κύκλο παρουσιάζει τη συγκεκριμένη συμπεριφορά για διάφορους λόγους. Ένας από αυτούς είναι ο πολλαπλός αριθμός εντολών που αφυπηρετούν πρόωρα προκαλεί καθυστέρηση στην εκτέλεση εντολών με αποτέλεσμα να χρειάζονται περισσότεροι κύκλοι για την εκτέλεση μιας εντολής διότι με την πρόωρη αφυπηρέτηση ενεργοποιείται το άδειασμα της διασωλήνωσης με χρονικές επιπτώσεις στη συνοχή των εντολών στη διασωλήνωση. Λόγω του ότι η σειρά προγράμματος αλλάζει επιβαρύνεται το instruction cache αφού καινούργιες εντολές πρέπει να επιλεγθούν και να προωθηθούν στη διασωλήνωση. Ο λόγος που η δραστηριότητα του δευτέρου επιπέδου κρυφής μνήμης (L2 cache) είναι περισσότερη στο συγκριτικό `equake00.peak.ev6` είναι ο μεγαλύτερος αριθμός αποτυχιών στο προηγούμενο επίπεδο μνήμη καθώς και η πιθανότητα ύπαρξης αποτυχιών συγκρούσεων (conflict misses) βασιζόμενες στη συνεχή μεταφορά μπλοκ δεδομένων για

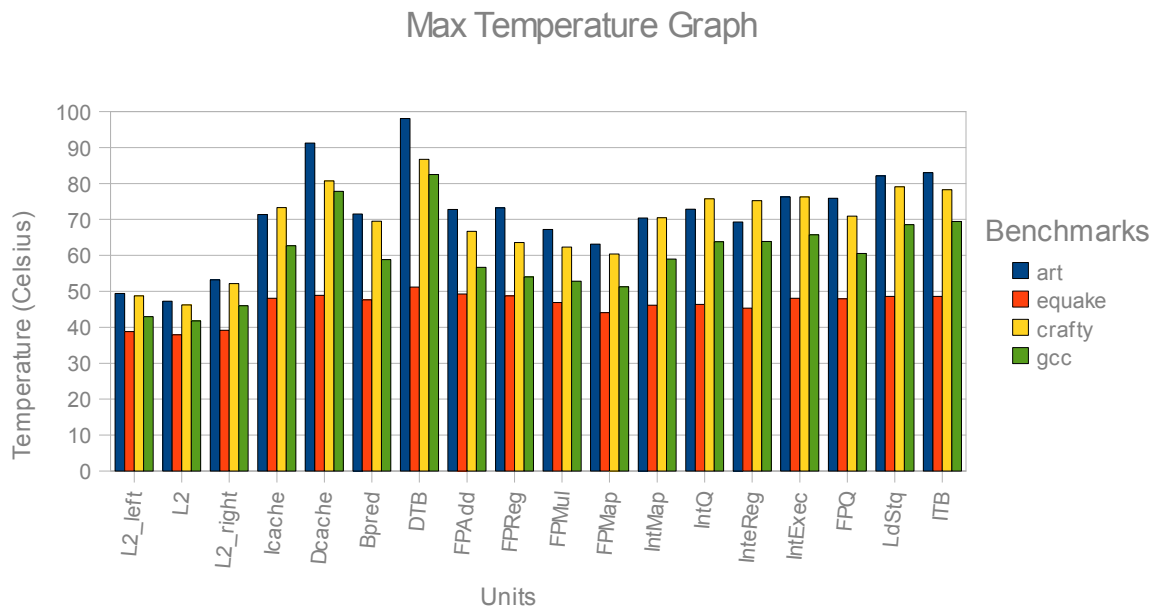
την ικανοποίηση των αναγκών των εντολών. Η δραστηριότητα στις υπόλοιπες μονάδες του συγκριτικό crafty00.peak.en6 είναι φυσιολογική διότι λόγω του μεγαλύτερου αριθμού εκτελέσιμων εντολών που πραγματοποιεί είναι αναμενόμενο να έχει περισσότερη δραστηριότητα ιδίως στις μονάδες που αντιπροσωπεύουν τη φύση των συγκριτικών ακέραιων πράξεων.



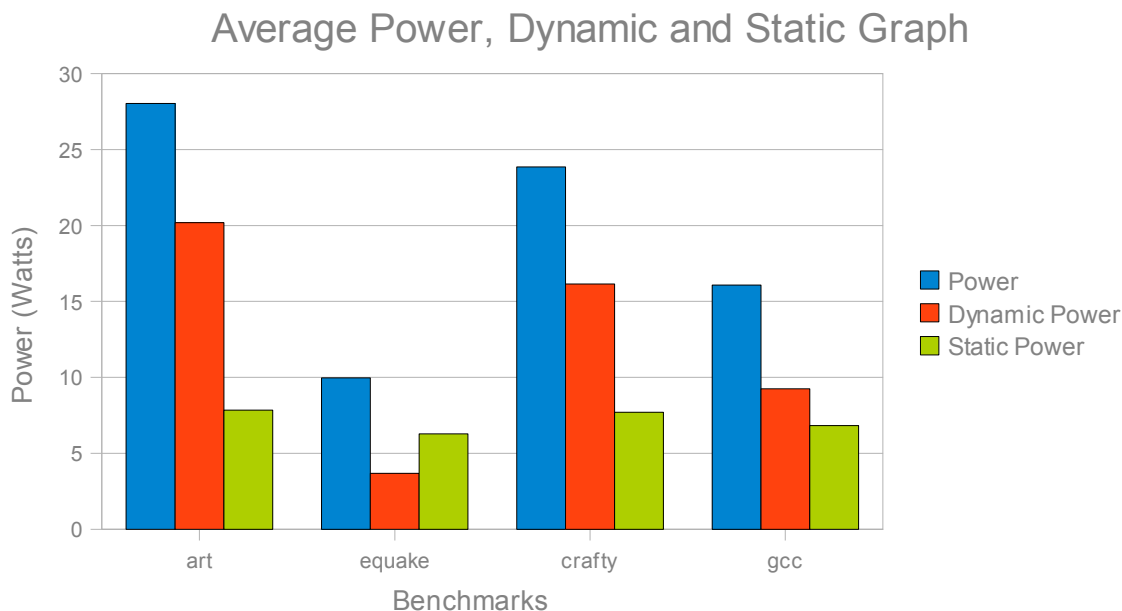
Σχήμα 4.30 Γραφική παράσταση δραστηριοτήτων κάθε μονάδας του επεξεργαστή για τα συγκριτικά μέτρησης επίδοσης ακεραίων πράξεων

Στο σχήμα 4.31 παρουσιάζεται η ψηλότερη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε σε κάθε μονάδα. Όπως ήταν αναμενόμενο οι μονάδες που ανέπτυξαν περισσότερη δραστηριότητα από τα συγκριτικά art00.peak.en6 και crafty00.peak.en6 είχαν τη ψηλότερη θερμοκρασία. Η γενικότερη εικόνα της θερμοκρασίας των μονάδων δείχνει ότι αν και δεν υπήρχαν περιορισμοί στην προσομοίωση δεν αναπτύχθηκε ψηλή θερμοκρασία στις μονάδες κάτι που δεικνύει όπως επίσης φαίνεται και από το σχήμα 4.32 ότι η ισχύς που αναπτύσσεται δεν αντιστοιχεί στις τιμές ισχύος που αναπτύσσονται στους σημερινούς επεξεργαστές.

Αυτή η παρατήρηση ώθησε την έρευνα στο επόμενο στάδιο, όπου λόγω των χαμηλών αποτελεσμάτων των προηγούμενων προσομοιώσεων χρειάστηκε να επαναληφθούν τα πειράματα συντονίζονται τις παραμέτρους εισόδου και πιο συγκεκριμένα την τάση και τον παράγοντα capacitance έτσι ώστε τα αποτελέσματα να αντιστοιχίσουν με τις πραγματικές τιμές ισχύος που συναντούμε στους επεξεργαστές σήμερα.



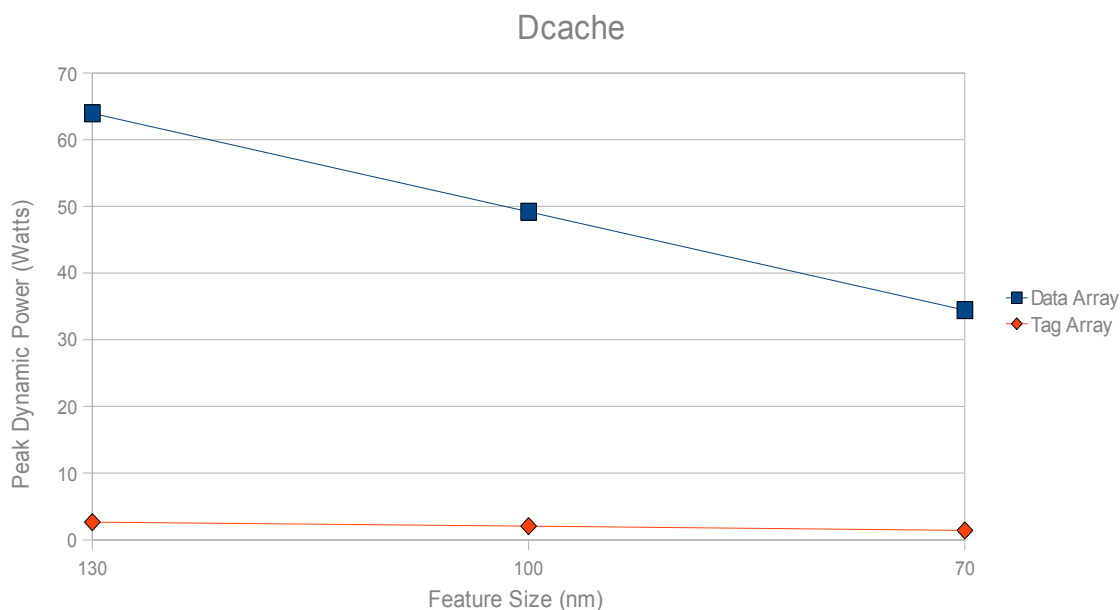
Σχήμα 4.31 Γραφική παράσταση μέσου όρου της θερμοκρασίας κάθε μονάδας του επεξεργαστή για όλα τα συγκριτικά μέτρησης επίδοσης



Σχήμα 4.32 Γραφική παράσταση μέσου όρου της ισχύς κάθε μονάδας του επεξεργαστή για όλα τα συγκριτικά μέτρησης επίδοσης

Παρόλα αυτά πριν να την έναρξη της καινούργιας σειράς πειραμάτων προέκυψαν κάποιες αμφιβολίες από τα αποτελέσματα της δυναμικής ισχύος που αναπτύσσεται στη κάθε μονάδα του επεξεργαστή. Για λόγους επικύρωσης πραγματοποιήθηκαν κάποια πειράματα με σκοπό να γίνει έλεγχος αν οι τιμές της δυναμικής ισχύος που φάνηκαν να είναι κάπως σε ψηλά επίπεδα είναι τελικά έγκυρες και δεν υπάρχει κάποιο σφάλμα στον κώδικα του προσομοιωτή για τον τρόπο υπολογιστών των συγκεκριμένων τιμών. Η σκέψη που έγινε για το πείραμα ήταν να τρέξουμε πειράματα προσομοιώνοντας κάθε φορά διαφορετικό μέγεθος τεχνολογίας. Με αυτό τον τρόπο γνωρίζοντας ήδη τη συμπεριφορά που πρέπει να έχει η κάθε προσομοίωση δίνεται η δυνατότητα άμεσης επαλήθευσης των αποτελεσμάτων. Όπως αναμένεται με την αύξηση του μεγέθους της τεχνολογίας λόγω γραμμικής σχέσης θα αυξηθεί και η δυναμική ισχύς που καταναλώνεται. Διατηρώντας τις προηγούμενες παραμέτρους εισόδου σταθερές, δοκιμάστηκαν τρία διαφορετικά μεγέθη τεχνολογίας 70, 100 και 130 nm. Στο σχήμα 4.33 φαίνονται τα αποτελέσματα της μέγιστης κατανάλωσης της δυναμικής ισχύς για συγκεκριμένη μονάδα. Όπως φαίνεται τα αποτελέσματά είναι τα

προβλεπόμενα επιβεβαιώνοντας την εγκυρότητα των προηγούμενων αποτελεσμάτων. Ενδεικτικά το πείραμα διεξάχθηκε για ένα μόνο συγκριτικό μέτρησης επιδόσεως διότι οι υπολογισμοί είναι οι ίδιοι. Η εξήγηση για τις ψηλές τιμές της δυναμικής ισχύς δόθηκε στο γεγονός ότι το fudge factor (capacitance) είχε την τιμή 2 διπλασιάζοντας την δυναμική ισχύ στους υπολογισμούς του προσομοιωτή.



Σχήμα 4.33 Γραφική παράσταση μέγιστης κατανάλωσης δυναμικής ισχύος της Data cache για διαφορετικά μεγέθη τεχνολογίας για το συγκριτικό μέτρησης επίδοσης ακέραιων πράξεων art00.peak.ev6

Βλέποντας ότι οι ολικές τιμές ήταν χαμηλές σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα προσπάθησα να διαφοροποιήσω κάποιες από τις παραμέτρους εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση για να ρυθμίσω τη συμπεριφορά και τις τιμές των υπολογισμών που θα εξάγονταν από τον Sim-alpha έτσι ώστε να ικανοποιούν τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Οι παράμετροι που έτυχαν διαφοροποιήσεις ήταν η τάση (voltage) και το capacitance. Για λόγους καλύτερης σύγκρισης επέλεξα να τρέξω πειράματα σε δύο διαφορετικά μεγέθη τεχνολογίας συγκεκριμένα για 70 και 100 nm, δύο

επιτρεπόμενα μεγέθη που προσφέρει ο προσομοιωτής. Αλλάζοντας τη τιμή στην τάση ανακάλυψα ότι υπήρχαν περιορισμοί για μια συγκεκριμένη τεχνολογία (70 nm) όσον αφορά τις επιτρεπόμενες τιμές για την τάση που μπορούμε να εισάγουμε ως παράμετρο με αποτέλεσμα να αδυνατούμε να τρέξουμε πειράματα σε ψηλότερη τάση για τεχνολογία στα 70 nm, μια ιδέα που θα βοηθούσε στη ρύθμιση του προσομοιωτή για εγκυρότερα αποτελέσματα. Ωστόσο σε τεχνολογία 100nm η προσομοίωση με ψηλότερη τάση ήταν εφικτή αλλά παρόλο που η τιμή της τάσης ανέβηκε στα 1.3 Volts, ως η μέγιστη τιμή που χρησιμοποιείται στα πραγματικά συστήματα πανομοιότυπων προδιαγραφών δεν επέφερε τα προσδοκώμενα αποτελέσματα. Οι τιμές της ολικής ισχύς που καταναλώθηκε κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ήταν χαμηλές με αποτέλεσμα να καταλήξουμε σε δοκιμές διαφόρων τιμών για το capacitance μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή κατανάλωσης ισχύος. Παρόλο που το επιθυμητό αποτέλεσμα ήταν πλέον πραγματικότητα η υψηλή τιμή στο capacitance και στα δύο μεγέθη τεχνολογίας είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής της δυναμικής ενέργειας γεγονός το οποίο τίθεται υπό επεξεργασία στο παρόν στάδιο.

Στο μετέπειτα στάδιο της εργασίας πρόκειται να ερευνηθούν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του προσομοιωτή. Προγραμματίζονται πειράματα με θερμικούς περιορισμούς, διαφορετικά μεγέθη τεχνολογίας καθώς και ότι προλαβαίνουμε από θέμα χρόνου.

Κεφάλαιο 5

Ρύθμιση capacitance

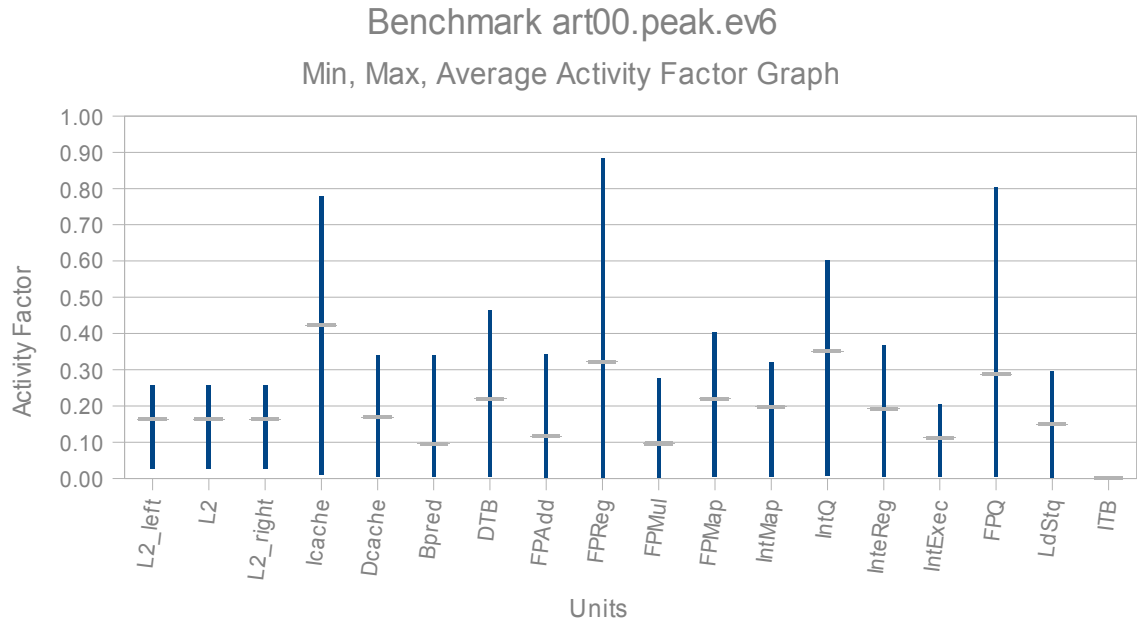
5.1 Πειράματα ρύθμισης τιμών capacitance	80
--	----

5.1 Πειράματα ρύθμισης τιμών capacitance

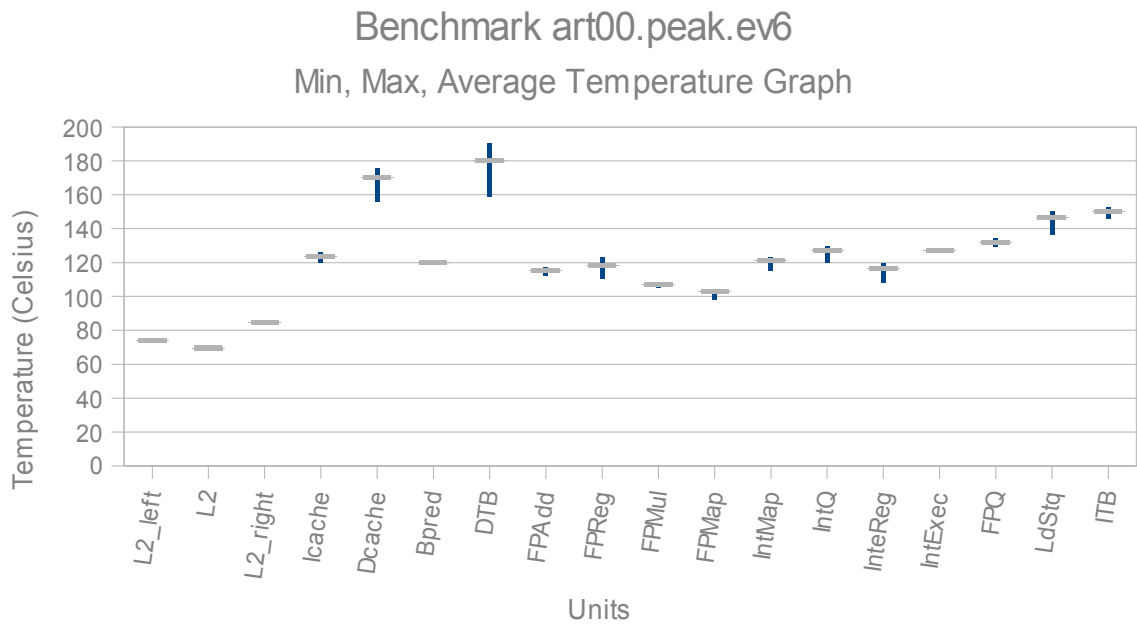
Τα συγκεκριμένα πειράματα έγιναν με σκοπό της εύρεσης των κατάλληλων τιμών capacitance έτσι ώστε να πετύχουμε ψηλότερες τιμές σε ισχύ και θερμοκρασία. Παρόλο που όπως προαναφέρθηκε προέκυψαν κάποια πρακτικά προβλήματα λόγω των περιορισμών στις επιτρεπόμενες τιμές της τάσης για τα 70 nm αποφάσισα να τρέξω πειράματα και στη συγκεκριμένη τεχνολογία χωρίς να ψηλώσω την τάση αλλά ρυθμίζοντας περισσότερο το capacitance. Ακολούθως παρουσιάζονται οι δύο σειρές πειραμάτων με τα δύο μεγέθη τεχνολογιών 70 και 100 nm με την τελική ρύθμιση των τιμών του capacitance.

Παράμετροι 1ης σειράς πειραμάτων

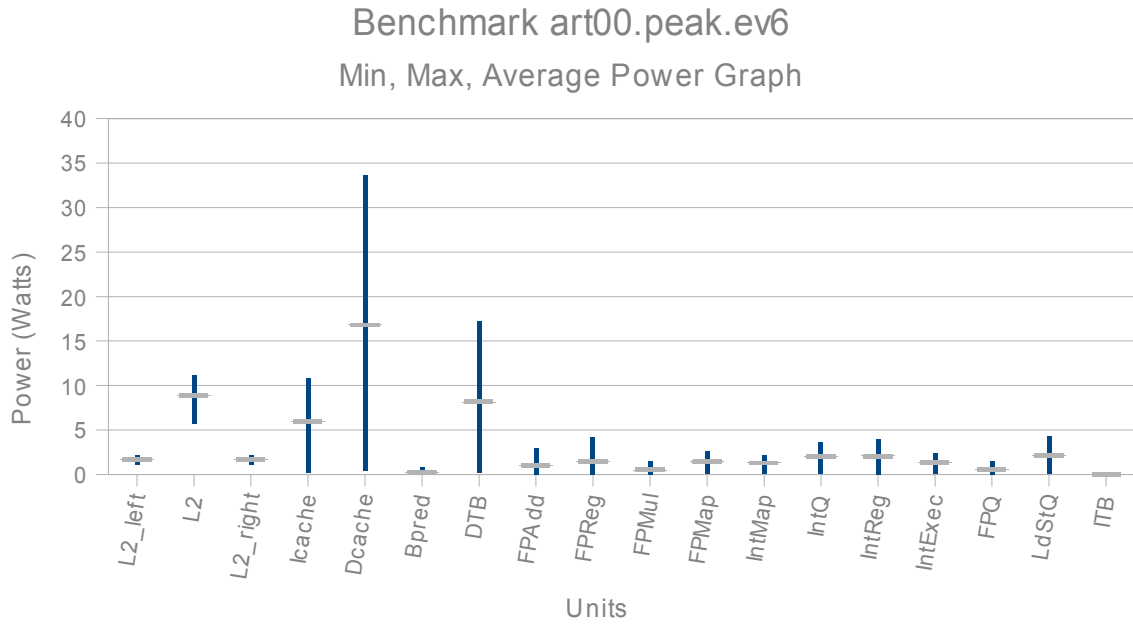
- Συχνότητα ρολογιού 3GHz
- Τάση 0.9 V
- Μέγεθος τεχνολογίας 70 nm
- Capacitance 5



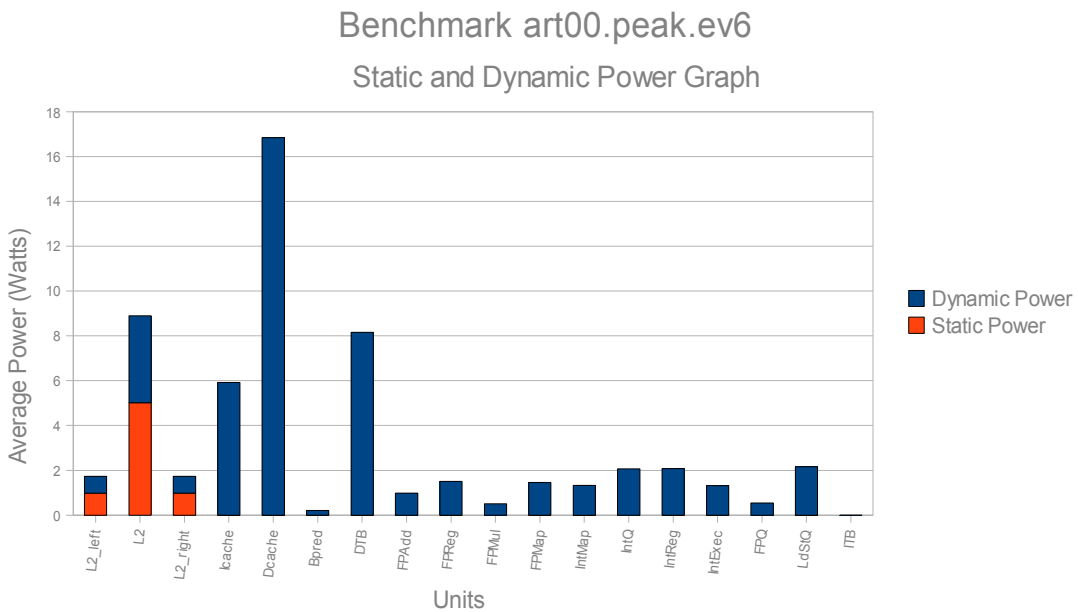
Σχήμα 5.1 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής του παράγοντα δραστηριότητας (Activity Factor)



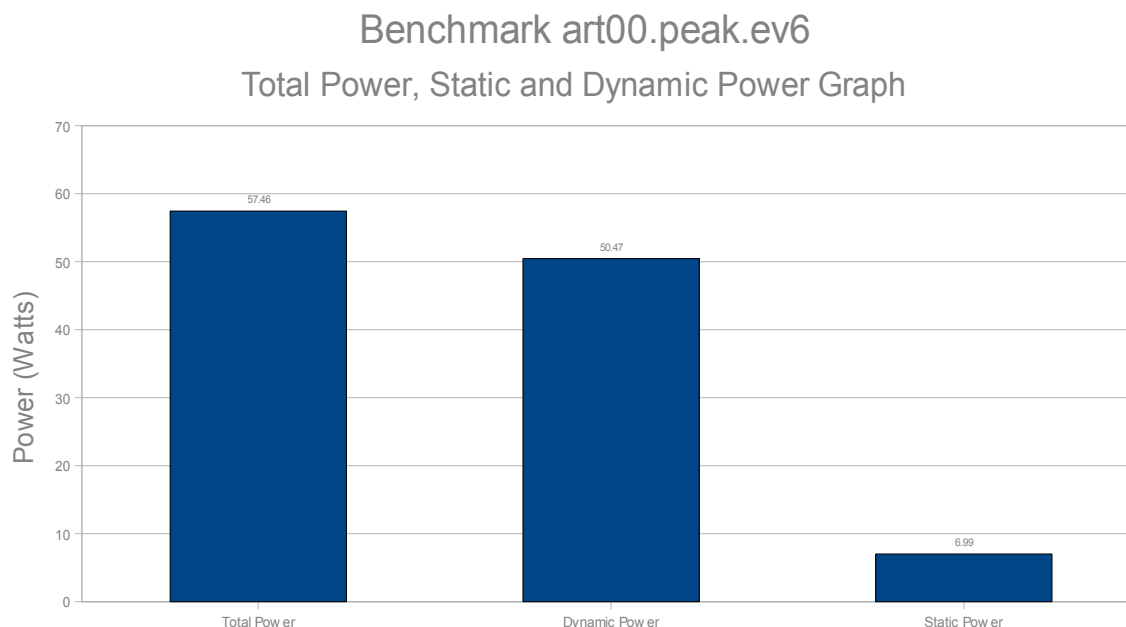
Σχήμα 5.2 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής θερμοκρασίας



Σχήμα 5.3 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής ισχύος κάθε μονάδας του επεξεργαστή



Σχήμα 5.4 Γραφική παράσταση μέσου όρου στατικής και δυναμικής ισχύος της κάθε μονάδας του επεξεργαστή

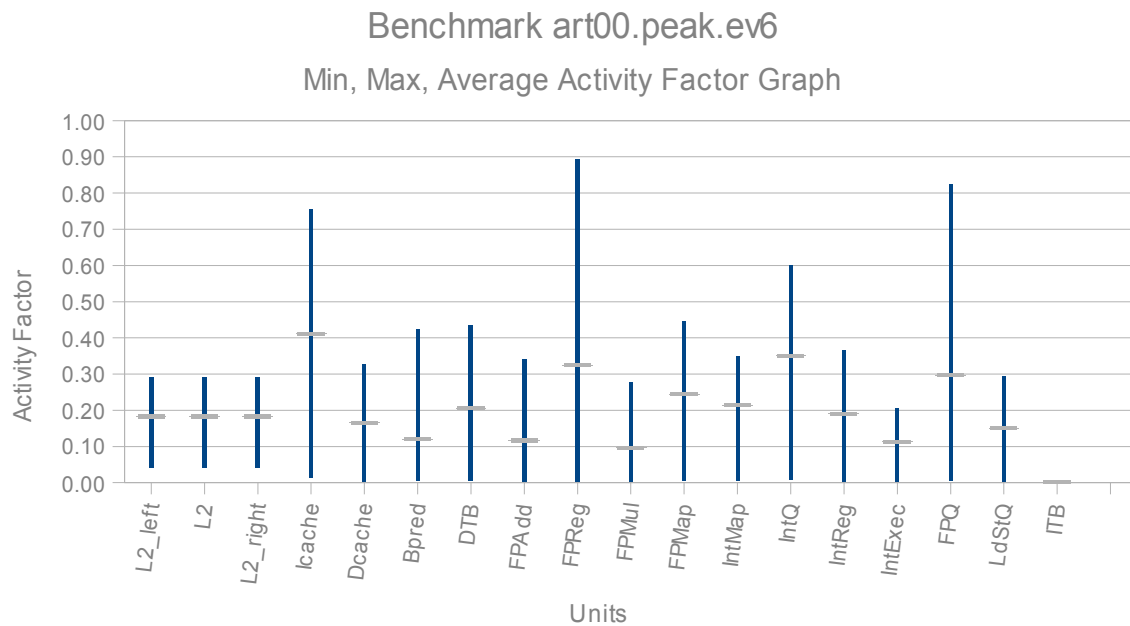


Σχήμα 5.5 Γραφική παράσταση μέσου όρου ολικής, στατικής και δυναμικής ισχύος της εκτέλεσης

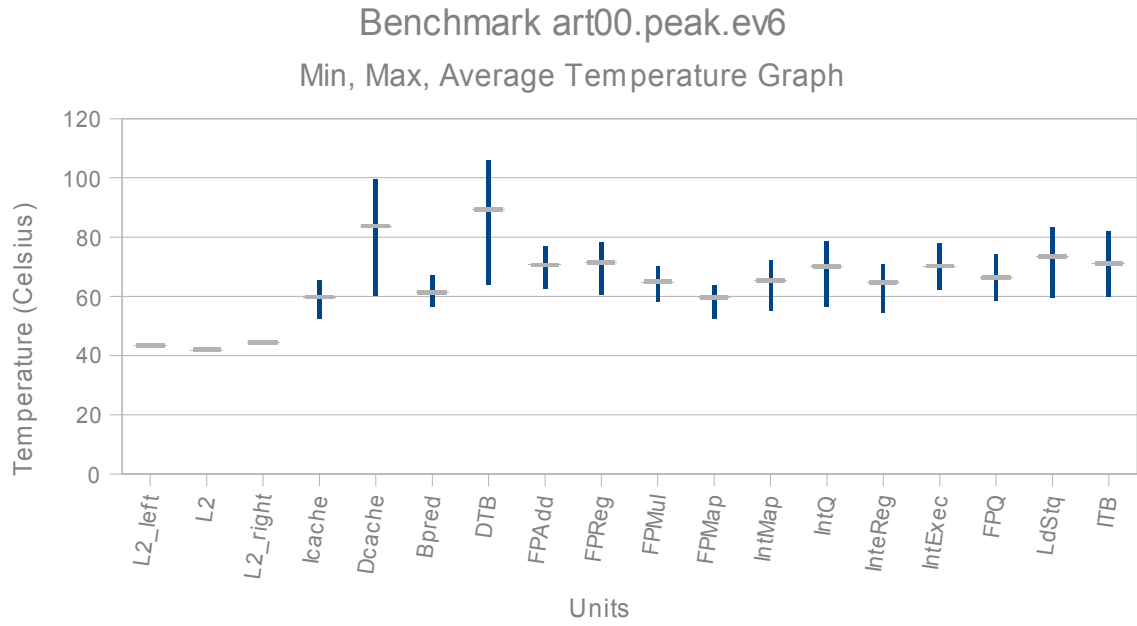
Η ρύθμιση των τιμών του capacitance πραγματοποιήθηκε με επιτυχία εξασφαλίζοντας τα προσδοκώμενα αποτελέσματα ισχύος. Όμως όπως φαίνεται από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις η δυναμική ισχύς συγκρινόμενη με τα πειράματα αναφοράς έχει αυξηθεί περισσότερο και από διπλασιασμό σε μερικές από τις μονάδες. Αυτό παρατηρείται και από το σχήμα 5.5 όπου το ποσοστό της δυναμικής ισχύς σε σχέση με τη στατική είναι 88% έναντι 12%. Επίσης με την αύξηση της δυναμικής ισχύος αυξήθηκε και η θερμοκρασία η οποία σχεδόν διπλασιάστηκε. Αυτό συμβαίνει κυρίως στο συγκεκριμένο μέγεθος τεχνολογίας για το λόγο ότι είναι μικρότερη η επιφάνεια πάνω στην οποία επιβάλλεται μεγαλύτερη ποσότητα ισχύος.

Παράμετροι 2ης σειράς πειραμάτων

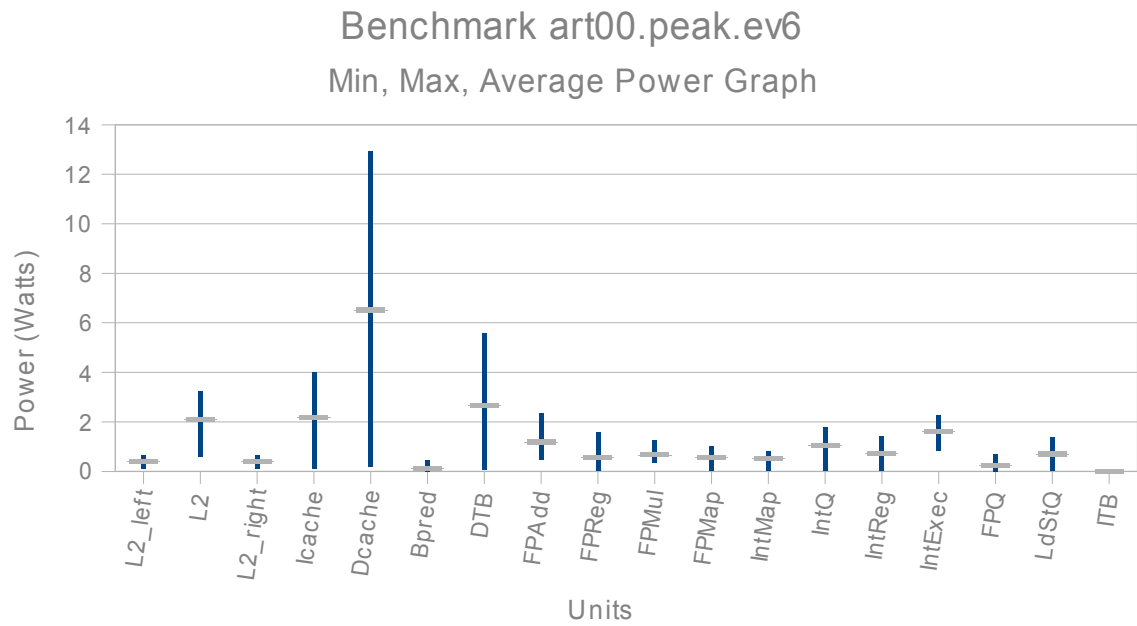
- Συχνότητα ρολογιού 3GHz
- Τάση 1.3 V
- Μέγεθος τεχνολογίας 100 nm
- Capacitance 4



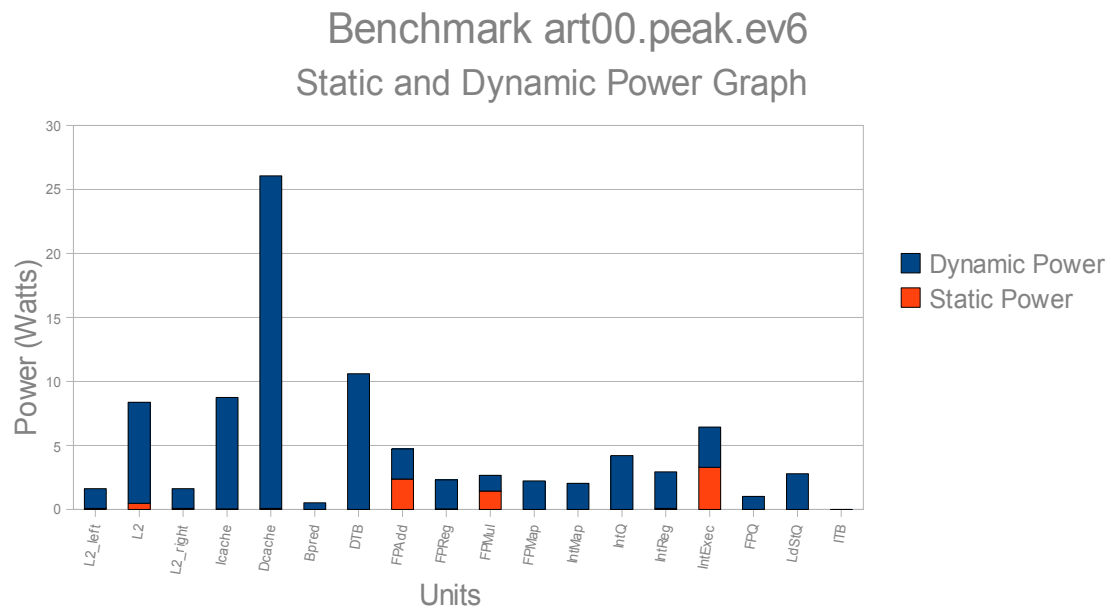
Σχήμα 5.6 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής του παράγοντα δραστηριότητας (Activity Factor)



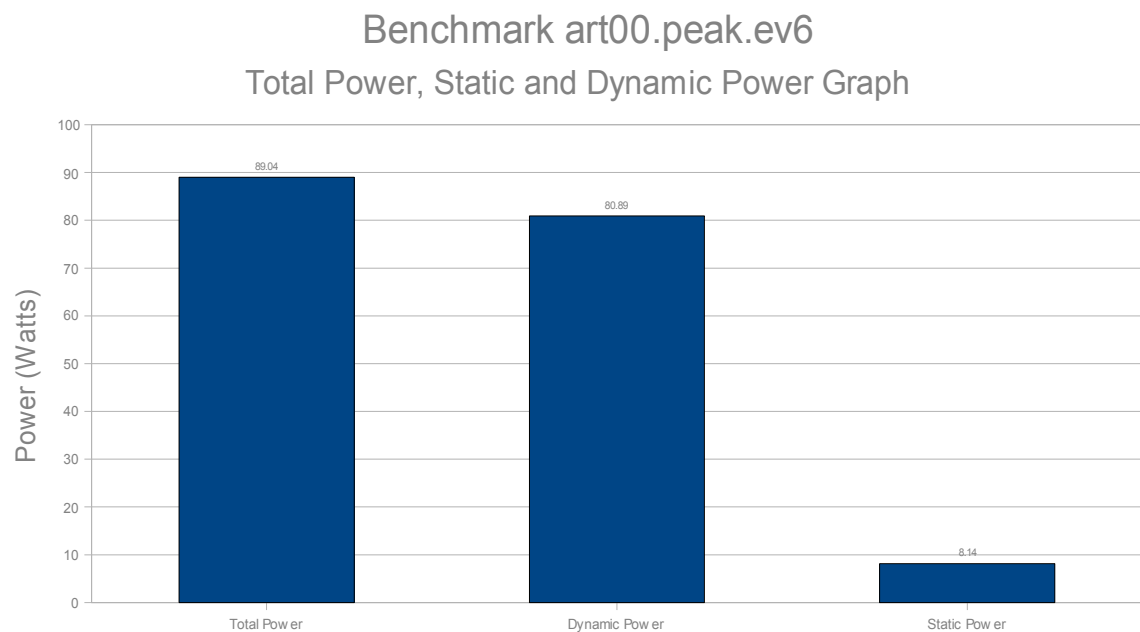
Σχήμα 5.7 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής θερμοκρασίας



Σχήμα 5.8 Γραφική παράσταση μέσου όρου, ελάχιστης, μέγιστης τιμής ισχύος κάθε μονάδας του επεξεργαστή



Σχήμα 5.9 Γραφική παράσταση μέσου όρου στατικής και δυναμικής ισχύος της κάθε μονάδας του επεξεργαστή

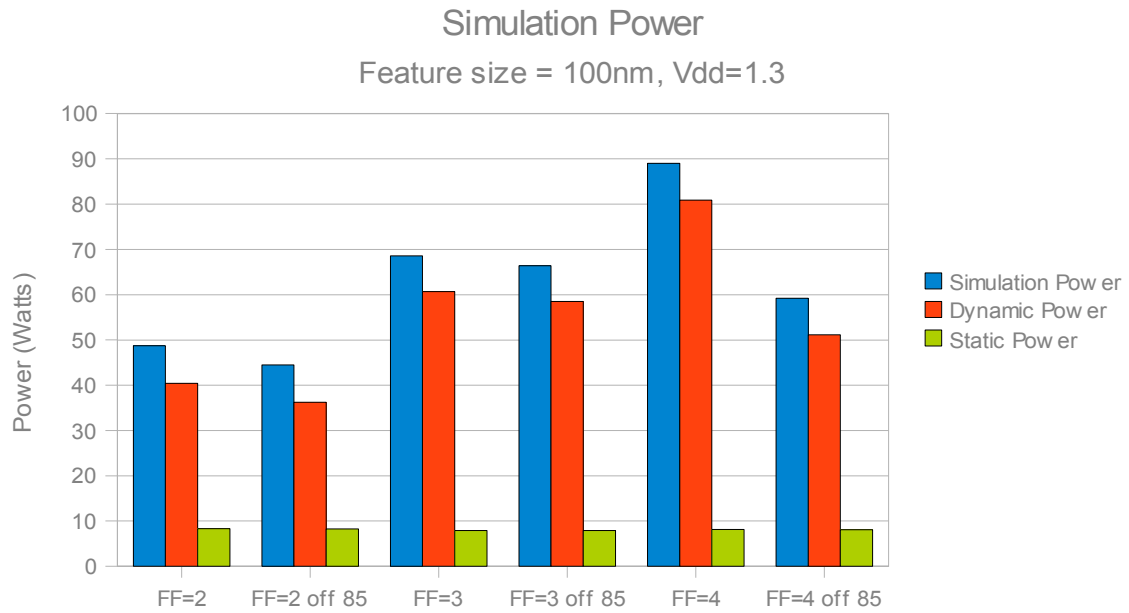


Σχήμα 5.10 Γραφική παράσταση μέσου όρου ολικής, στατικής και δυναμικής ισχύος της εκτέλεσης

Στην περίπτωση της τεχνολογίας των 100 nm τα πειράματα που διεξάχθηκαν παρόλο που οι μονάδες είχαν την ίδια σχεδόν δραστηριότητα με την προηγούμενη σειρά πειραμάτων δεν ανέπτυξαν ψηλές τιμές θερμοκρασίας αντίθετα με τις τιμές ισχύος που ήταν αρκετά ικανοποιητικές με τις προσδοκώμενες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μέγεθος της επιφάνειας είναι μεγαλύτερο 130 mm^2 έναντι εμβαδού των 64 mm^2 που είχε η προηγούμενη τεχνολογία. Επίσης λόγω αύξησης του μεγέθους του τρανζίστορ η στατική ισχύς μειώνεται σε μεγάλο βαθμό και αυτό φαίνεται από την γραφική παράσταση του σχήματος 5.10 όπου το ποσοστό της στατικής ισχύς είναι 9% σε σχέση με τη δυναμική ισχύ που αποτελεί το υπόλοιπο 91%.

Στην ακόλουθη γραφική παράσταση παρουσιάζεται η ολική ισχύς μαζί με τις ποσότητες ισχύος που αντιστοιχούν στη δυναμική και στατική ισχύ στα πειράματα ρύθμισης των τιμών capacitance καθώς επίσης και στα αντίστοιχα πειράματα που επιβλήθηκαν θερμικοί περιορισμοί. Χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες τιμές ρύθμισης των τιμών του capacitance 2,3 και 4 για τη διεξαγωγή καινούργιων πειραμάτων επιβάλλοντας αυτή τη φορά όρια στην επιτρεπόμενη θερμοκρασία που δικαιούται να αναπτύξει μια μονάδα στον επεξεργαστή. Το όριο θετήθηκε στους 85 βαθμούς Κελσίου, όριο το οποίο αν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ξεπερνιόταν ο επεξεργαστής απενεργοποιείτο μέχρι να επανέλθει σε μια επιτρεπόμενη θερμική κατάσταση.

Όπως διαφαίνεται στο σχήμα 5.11 με την αύξηση του capacitance όπως είναι γνωστό (1) η δυναμική ισχύς αυξάνεται και μαζί της και η ολική ισχύς της εκτέλεσης. Στις περιπτώσεις που επιβάλλονται θερμικοί περιορισμοί λόγω του ότι η θερμοκρασία σε συγκεκριμένες θερμές μονάδες (Dcache, DTB) είναι αυξημένη και ξεπερνά το όριο ο επεξεργαστής αναγκάζεται να μεταβαίνει σε on/off καταστάσεις για να επανέλθει στα φυσιολογικά επίπεδα η θερμοκρασία αφού κατά τη διάρκεια της απενεργοποίησης του επεξεργαστή λόγω του ότι η δυναμική ισχύς μηδενίζεται δίνεται η ευκαιρία στις θερμές μονάδες να κρυώσουν.



Σχήμα 5.11 Γραφική παράσταση μέσου όρου ολικής, στατικής και δυναμικής ισχύος όλων των πειραμάτων ρύθμισης των τιμών capacitance για μέγεθος τεχνολογίας 100 nm

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

6.1 Γενικά συμπεράσματα	89
6.2 Μελλοντική εργασία	91

6.1 Γενικά συμπεράσματα

Μέσα από τη συγκεκριμένη εργασία δόθηκε η ευκαιρία εκμάθησης καινούργιων εργαλείων καθώς και αξιοποίηση τους για τη διεξαγωγή διαφόρων πειραμάτων. Αρχικός στόχος ήταν η αξιολόγηση ενός εργαλείου μοντελοποίησης της ισχύος και θερμοκρασίας μέσα από σειρές πειραμάτων έχοντας εξαρχής υπόψη από την αρχή διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της θερμοκρασίας ενός επεξεργαστή.

Κατά τη διάρκεια της έρευνας μέσα από τη μελέτη και διεξαγωγή των διαφόρων πειραμάτων διαφάνηκαν πολλά συμπεράσματα και παρατηρήσεις. Η μελέτη της θερμοκρασίας πλέον αποτελεί ένας από τους κυριότερους παράγοντες σχεδιασμού της μικροαρχιτεκτονικής και λαμβάνεται σημαντικά υπόψη από τους ερευνητές σήμερα προκειμένου να βρεθούν λύσεις για την αντιμετώπιση της αυξητικής τάσης που έχει υποστεί τα τελευταία χρόνια προκαλώντας προβλήματα στα συστήματα, τόσο στην αξιοπιστία όσο και στη φυσική φθορά τους.

Σήμερα κατά το σχεδιασμό των μικροεπεξεργαστών κύριος στόχος είναι η αύξηση της επίδοσης του συστήματος. Μέσα από την πορεία εξέλιξης της τεχνολογίας έγιναν

σημαντικές ανακαλύψεις. Επινοήθηκαν πολλές τεχνικές και μηχανισμοί οι οποίοι είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση της επίδοσης. Τεχνικές όπως κρυφές μνήμες, διασωλήνωση, παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών και νημάτων, θεωρητική εκτέλεση κ.τ.λ.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επιδίωκε τη εξερεύνηση της συμπεριφοράς ενός επεξεργαστή σε θέματα ισχύος και θερμοκρασίας αντιλαμβανόμενη των παραγόντων που διεγείρουν τη συγκεκριμένη συμπεριφορά.

Τα πειράματα υπέδειξαν κάποιες σημαντικές αρχές οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του επεξεργαστή. Η τοποθέτηση των μονάδων αρχικά προσδιορίζεται μέσα από μελέτες από τη δραστηριότητα και το μέγεθος της κάθε μονάδας. Μια μονάδα που αποτελεί μια θερμή μονάδα επιδιώκεται να τοποθετηθεί δίπλα από μονάδες με λιγότερη δραστηριότητα και επομένως λιγότερη ανάπτυξη θερμοκρασίας για να αποφεύγεται η ραγδαία ανάπτυξη θερμοκρασίας στον επεξεργαστή. Μονάδες με μεγάλη επιφάνεια αναπτύσσουν περισσότερη στατική ενέργεια διότι αποτελείται από μεγαλύτερο αριθμό τρανζίστορς τα οποία συνολικά έχουν μεγαλύτερη διαρροή. Παράδειγμα τέτοιων μονάδων είναι το δεύτερο επίπεδο κρυφής μνήμης (L2 cache). Επίσης παρατηρήθηκε ότι μονάδες με μικρό μέγεθος που δεν άνηκαν στις μονάδες με τις μεγαλύτερες τιμές δραστηριότητας αποτελούσαν θερμές μονάδες. Το φαινόμενο αυτό δικαιολογείται διότι το ποσοστό δραστηριότητας που ανέπτυξε η μονάδα για το μέγεθος της ήταν μεγάλο με αποτέλεσμα να αναπτύσσει ψηλές τιμές θερμοκρασίας.

Η ανάπτυξη ισχύος στα συστήματα όπως ειπώθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια πραγματοποιείται από την ανάπτυξη της δυναμικής και στατικής ισχύος. Η μετάβαση σε μικρότερες τεχνολογίες αυξάνει τη στατική ισχύ όμως παρόλο που συμβαίνει αυτό η δυναμική ισχύς είναι τις περισσότερες φορές περισσότερη. Στις περιπτώσεις που ο αριθμός των εκτελέσιμων εντολών ανά κύκλο είναι πολύ χαμηλός λόγω χαμηλής επομένως δραστηριότητας στις μονάδες η στατική ισχύς είναι μεγαλύτερη όπως παρατηρείται στη συμπεριφορά του benchmark `equake00.peak.ev6` στα σχήματα 4.14 και 4.32.

Η τάση μείωση της τάσης έφτασε και αυτή σε κάποιο όριο διότι η περαιτέρω μείωση προκαλεί προβλήματα στην αλλαγή της κατάστασης των τρανζίστορ. Λόγω του ότι μικραίνει το όριο που χωρίζει τη μετάβαση από τη μια κατάσταση στην άλλη (0 και 1) η αξιοπιστία του συστήματος κινδυνεύει διότι δεν είναι πλέον εφικτή η ακριβής μετάβαση στις διάφορες καταστάσεις αφού μπορεί απλά να μην προλαβαίνει να αλλάξει κατάσταση.

6.2 Μελλοντική εργασία

Για το συγκεκριμένο εργαλείο μπορώ να εισηγηθώ μια βελτίωση στον κώδικα όσον αφορά το πρόβλημα που προέκυψε με την αύξηση της τάσης στα 70 nm, έτσι ώστε να γίνονται πειράματα και στη συγκεκριμένη τεχνολογία για μεγαλύτερες τιμές τάσεως, τιμές που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα συστήματα.

Όσον αφορά τις τεχνολογίες είναι ορθότερο για καλύτερη αξιοποίηση του εργαλείου να ενσωματωθεί επιπλέον κώδικας για την προσομοίωση πειραμάτων και για τεχνολογίες όπως 45 nm καθώς και για οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία προκύψει.

Βιβλιογραφία

- [1] R. Desikan, D.C. Burger, S.W. Keckler, and Todd Austin. "Sim-alpha: a Validated, Execution-Driven Alpha 21264 Simulator.", The University of Texas at Austin, Department of Computer Sciences. Technical Report TR-01-23
- [2] Damien Fetis and Pierre Michaud. "An evaluation of HotSpot-3.0 block based temperature model ", 5th Annual Workshop on Duplicating, Deconstructing, and Debunking, Boston, USA, June 18, 2006
- [3] R.E. Kessler, E.J. McLellan, D.A. Webb, "The Alpha 21264 Microprocessor Architecture," iccd,pp.90, 1998 IEEE International Conference on Computer Design (ICCD'98), 1998
- [4] Pierre Michaud, "ATMI- 1.0.4 manual ", March 17, 2008
- [5] Pierre Michaud and Yiannakis Sazeides. "ATMI: an analytical model of temperature in microprocessors", Third Annual Workshop on Modeling, Benchmarking and Simulation (MoBS), June, 2007
- [6] Pierre Michaud * , Yiannakis Sazeides ** , Andre´ Seznec *** , Theofanis Constantinou **** , Damien Fetis ***** , "An analytical model of temperature in microprocessors ", Technical Report, Projet CAPS , Publication interne n°1760 — November 2005
- [7] Kevin Skadron, Mircea R. Stan, Wei Huang, Sivakumar Velusamy, Karthik Sankaranarayanan, and David Tarjan , "Temperature-Aware Microarchitecture ", 30th International Symposium on Computer Architecture, San Diego, June 9-11, 2003

- [8] <http://www.intel.com/products/processor/pentium4/>

Παράρτημα Α

Εγχειρίδιο εργαλείου Sim-alpha [1]

Ο προσομοιωτής Sim-alpha είναι ένα εργαλείο μοντελοποίησης της ισχύος και της θερμοκρασίας. Χρησιμοποιεί μερικά επιπλέον εργαλεία για τον υπολογισμόν διαφόρων μεγεθών όπως θερμοκρασία, στατική και δυναμική ισχύς. Τα εργαλεία είναι τα παρακάτω:

1. Atmi

Το εργαλείο αυτό είναι μια βιβλιοθήκη γραμμένη σε γλώσσα C η οποία μοντελοποιεί τη συμπεριφορά της θερμοκρασίας (steady-state, time-varying) στους μικροεπεξεργαστές.

2. MyCacti

Μοντελοποίηση του χρόνου πρόσβασης σε κάθε επίπεδο μνήμης, του χρόνου κύκλου ρολογιού, του εμβαδού επιφάνειας, του leakage καθώς και της δυναμικής ισχύς.

3. HotLeakage

Μοντελοποίηση / υπολογισμός του leakage power των tag arrays των κρυφών μνημών.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε η μεταγλώττιση και εκτέλεση του προσομοιωτή με τις παρακάτω εντολές:

```
make sim-alpha-power
```

Η εντολή εκτέλεσης benchmarks είναι η ακόλουθη:

```
sim-alpha-power -config desktop.cfg -fastfwd "NumberOfInstructionsToSkip"-  
max:inst 100000000 -cacti:ver 3 -power:inputfile "benchName"_power_input.txt  
-floorplan:input core_floorplan.txt -atmi:configfile temperature_input.txt  
-atmi:initfile atmi_init.timeslice_1e-6.txt -powertrace:file "benchName".trace  
-off_threshold 1000.0 -atmi:wmax 1000.0 -redir:sim "benchName"_simout.txt  
-redir:prog "benchName"_prog.txt -atmi:timeslice 0.000001  
../spec2000Alpha/"benchName" ../00/"benchParameters"
```

Για κάθε benchmark χρησιμοποιήθηκε η πιο πάνω εντολή προσομοίωσης στην οποία αρχικά ορίστηκαν κάποιες σταθερές παράμετροι οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις δοκιμές πειραμάτων. Η διαμόρφωση της κατάστασης του προσομοιωτή πραγματοποιείται μέσα από το αρχείο **desktop.cfg** από το οποίο γίνεται ανάθεση των προκαθορισμένων τιμών στις παραμέτρους. Πριν την έναρξη της εκτέλεσης των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε η δημιουργία καινούργιων τιμών του παράγοντα δραστηριότητας της κάθε μονάδας που εξετάζεται για το κάθε benchmark. Τα τέσσερα benchmarks που χρησιμοποιήθηκαν εκτελέστηκαν από μια φορά το καθένα με σκοπό να χρησιμοποιηθούν οι παραγόμενες τιμές του παράγοντα δραστηριότητας (activity factor) της κάθε μονάδας του προσομοιωτή. Οι τιμές αυτές φυλάγονται σε αρχείο για κάθε benchmark ξεχωριστά και χρησιμοποιούνται ως παράμετρος εισόδου στην εντολή προσομοίωσης. Οι τιμές αυτές παράχθηκαν μέσω της εκτέλεσης του script merge_new_af το οποίο βρίσκεται στο αρχείο **QuickREADME_TEMPER.txt**.

Στην πρώτη δοκιμή πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν για μελλοντική αναφορά χρησιμοποιήθηκαν οι προκαθορισμένες τιμές διότι δεν υπάρχουν περιορισμοί στα πειράματα. Προκειμένου να μην παρουσιαστεί κάποια διαφοροποίηση στα αποτελέσματα των πειραμάτων λόγω περιορισμών της θερμοκρασίας για τα πειράματα αυτά αλλάχθηκαν οι τιμές της μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας και του ανώτατου ορίου αλλαγής της κατάστασης του προσομοιωτή (on/off). Οι τιμές αυτές φαίνονται στις παραμέτρους wmax και off_threshold αντίστοιχα όπου και οι δύο παράμετροι πήραν την τιμή 1000.0, τιμή που

δεν επρόκειτο να φτάσει καμιά μονάδα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο μέγιστος αριθμός εκτέλεσης εντολών για τα συγκεκριμένα πειράματα είναι 100 εκατομμύρια αλλά σε κάθε benchmark έχει οριστεί το σημείο εκκίνησης των εντολών της εκτέλεσης, δηλαδή παραλείπεται ένας καθορισμένος αριθμός εντολών. Αυτό φαίνεται στην παράμετρο **-fastfwd “NumberOfInstructionsToSkip”** η οποία καθορίζει τον αριθμό των εντολών που εξαιρούνται από την εκτέλεση. Δίνονται ως είσοδος τα αρχεία ή οι τιμές στις παραμέτρους της εντολής που χρειάζονται καθώς και το όνομα του benchmark και των παραμέτρων που δέχεται.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για να διαμορφωθεί η κατάσταση του προσομοιωτή στα πρώτα πειράματα ήταν :

- Τάση (Voltage) – 0.9 Volts
- Συχνότητα ρολογιού (Frequency) – 3 GHz
- Μέγεθος τεχνολογίας (Feature size) – 70 nm

Στα υπόλοιπα πειράματα διαφοροποιήθηκαν κάποιες παράμετροι εισόδου οι οποίες σε κάθε πείραμα που υπήρχε αλλαγή οι τιμές άλλαζαν στο αρχείο power_input.txt το οποίο περιέχει στοιχεία για το μέγεθος της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται, τη συχνότητα ρολογιού, την τάση, capacitance και μικροαρχιτεκτονική περιγραφή των μονάδων του επεξεργαστή.